

课堂教学 独立自学 工程计算 科学研究

地球潮汐负荷效应与形变监测计算系统

ETideLoad4.5 参考说明书

章 传 银

- 数值标准统一、地球物理模型协调、算法之间解析相容
- 固体潮、负荷潮、地球极移与质心变化效应的统一计算
- 环境负荷形变场全要素解析计算与时变重力场协同监测
- 水文环境地质与地面稳定性变化监测及其时空演变预报



中国测绘科学研究院

二〇二四年十月

摘 要

地球潮汐负荷效应与形变监测计算系统 (Earth Tide, Load Effect and Deformation Monitoring Computation) ETideLoad4.5, 是一种地球物理大地测量监测科学计算大型 Windows 程序包, 由大地测量全要素潮汐与极移效应解析计算, 非潮汐大地测量时序分析处理, 多源异质负荷形变场逼近与多种异构协同监测, CORS InSAR 融合与地面稳定性计算, 以及大地测量数据编辑计算与可视化五大子系统有机构成。

ETideLoad4.5 采用一致的地球物理模型和相同的数值标准, 构造相容的大地测量与地球动力学算法, 统一计算各种大地测量多种潮汐/非潮汐效应, 由地表环境观测数据, 精确逼近全球和区域负荷形变场, 严格依据大地测量与固体地球动力学原理, 约束同化多源异质监测数据的深度融合, 实现陆地水、负荷形变场及时变重力场协同监测, 定量跟踪地表动力环境与地面稳定性变化。为多种异构大地测量基准构建维持, 地球形变效应监测计算, 空天地海协同观测与海量数据深度融合, 以及地表水文环境、地质灾害与地面稳定性变化监测, 提供一套科学先进的实用大地测量地球动力学算法系统。

ETideLoad4.5 覆盖形变地球大地测量学的基本原理、主要公式与重要方法, 以改善高等教育环境; 严格按大地测量和固体地球动力学原理, 约束同化多源异质地球数据深度融合, 控制多种异构大地测量协同监测, 完善大地测量科学技术, 夯实拓展应用能力。

ETideLoad4.5 适合大地测量、地球物理、地质环境灾害、水文动力学、卫星动力学、地震与地球动力学等领域高年级本科生、研究生、科研和工程技术人员, 兼顾课堂教学、自学练习、应用计算与科学研究多层次需要。用户可按需设计个性化技术流程, 灵活组织有关程序及模块, 完成地面及固体地球外部各种潮汐/非潮汐效应监测计算, 全球或区域形变场/时变重力场/地面稳定性/陆地水/地表动力环境变化监测, 以及多源异质大地测量数据深度融合等计算工作。

关键词: 大地测量; 地球物理; 固体潮; 负荷形变; 陆地水; 地面稳定性。

<https://www.zcyphygeodesy.com>

技术支持: 章传银, 王伟, 蒋涛

中国测绘科学研究院, 100036

北京市海淀区 莲花池西路 28 号

联系电话 (010) 63880705/0703

13240330136/18600110108/13910496532

zhangchy@casm.ac.cn/QQ916601604

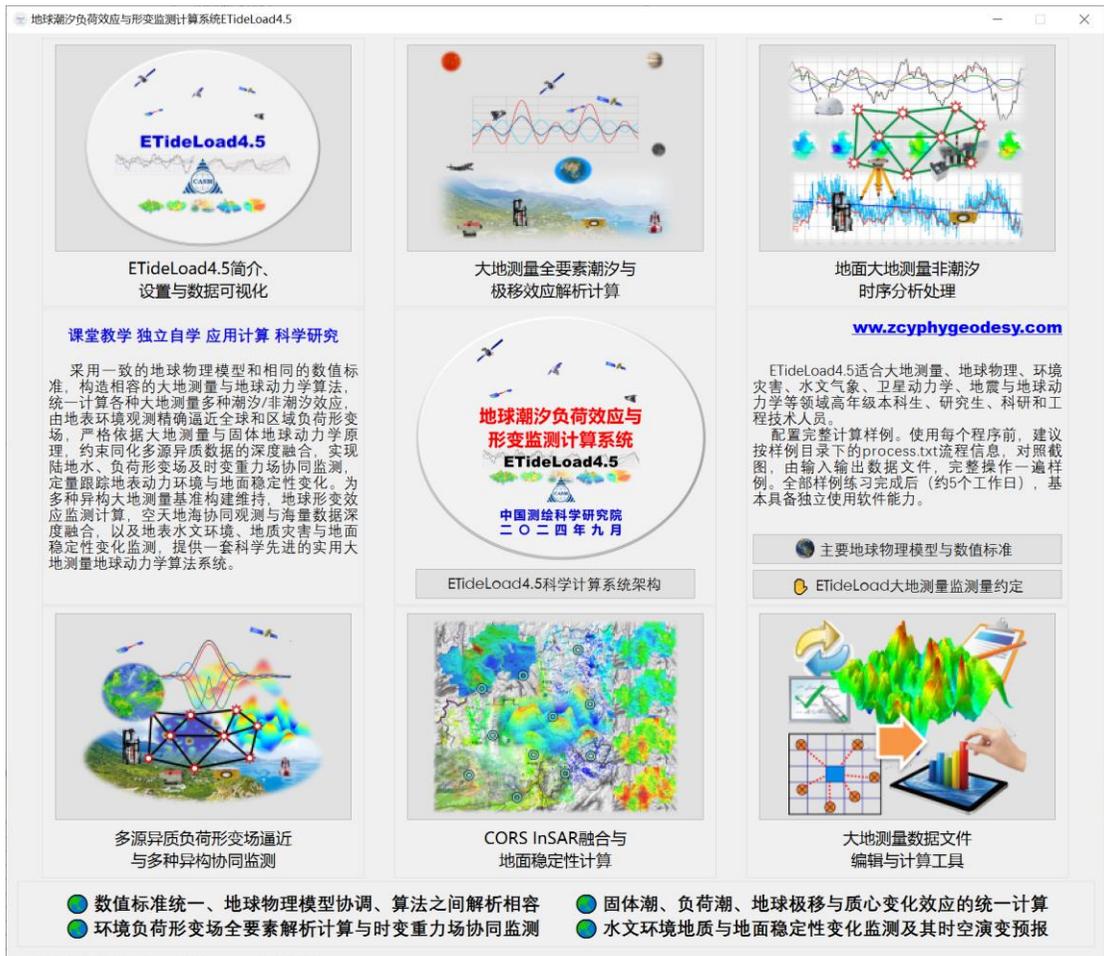
目 录

第一章 ETideLoad4.5 架构、特色与理念	1
1.1 ETideLoad4.5 科学计算系统架构	1
1.2 ETideLoad4.5 大地测量监测量约定	5
1.3 ETideLoad4.5 科学目标与技术特色	6
1.4 ETideLoad4.5 重要概念与特色理念	7
1.5 ETideLoad4.5 协议、学习与使用	10
第二章 大地测量全要素潮汐与极移效应解析计算	13
2.1 地面及固体地球外部精密固体潮效应计算	13
2.2 地面及固体地球外部海潮负荷效应球谐综合	20
2.3 地面及固体地球外部大气潮负荷球谐综合	27
2.4 自转极移效应与自转参数潮汐效应计算	34
2.5 永久潮汐影响与地球质心变化效应	43
2.6 大地测量控制网固体潮负荷潮效应计算	48
2.7 近地空间负荷潮效应格林积分法区域精化	51
2.8 全要素地面大地测量潮汐效应数值预报	54
第三章 地面大地测量非潮汐时序分析处理	56
3.1 地面监测量不规则时序粗差分离与处理	56
3.2 监测量不规则时序低通滤波与信号重构	59
3.3 不规则采样时序加权差分积分插值运算	62
3.4 大地测量监测网批量时间序列规格化	65
3.5 大地测量监测站网批量时序分析处理	67
3.6 地面大地监测网记录时序构造与分析	69
3.7 监测量（向量）格网时间序列处理分析	72
3.8 格网时序多种形式时空插值推估运算	75
第四章 多源异质负荷形变场逼近与异构协同监测	79
4.1 全球地表环境负荷格网时间序列球谐分析	79
4.2 分潮球谐分析与负荷潮球谐系数模型构建	83
4.3 球谐综合法模型等效水高与调和常数计算	88
4.4 球谐综合法负荷形变场及时变重力场计算	90
4.5 区域地表环境负荷格林积分法负荷形变场计算	97
4.6 区域负荷 SRBF 逼近及负荷形变场 SRBF 综合计算	102
4.7 格林积分约束法多种异质数据负荷形变场监测计算	105
4.8 SRBF 逼近法陆地水及负荷形变场多种异质协同监测	110
4.9 地面形变场（向量）格网时序动力学运算	115
4.10 地表动力环境及其负荷形变场监测计算练习	117
第五章 CORS InSAR 融合与地面稳定性计算	133

5.1 大地监测网记录时序多站拟稳约束平差	134
5.2 InSAR 监测量粗差探测与空间形变分析	135
5.3 CORS 网控制 InSAR 时空协同监测处理	138
5.4 多源异构 InSAR 的深度融合与时序分析	141
5.5 垂直形变格网时序地面稳定性变化计算	145
5.6 重力变化格网时序地面稳定性变化计算	147
5.7 向量变化格网时序地面稳定性变化计算	149
5.8 稳定性变化时序的优化与时空特征整合	150
第六章 大地测量数据编辑、计算与可视化	153
6.1 文本记录数据标准化提取	153
6.2 数据插值、提取与区域分离	154
6.3 数据文件的简单直接运算	157
6.4 同规格时间序列文件编辑运算	159
6.5 区域数据格网生成与构造	161
6.6 向量格网文件构造与转换	162
6.7 大地测量数据统计信息提取	164
6.8 粗差探测与加权基函数格网化	164
6.9 大地测量数据可视化绘图工具	168
第七章 文件格式、地球物理模型与数值标准	173
7.1 ETideLoad4.5 大地测量数据文件	173
7.2 稳态大地测量数据文件约定格式	173
7.3 大地测量时间序列文件约定格式	175
7.4 主要地球物理模型与数值标准	178
第八章 ETideLoad4.5 主要算法及公式	184
8.1 地面及地球外部大地测量固体潮效应	184
8.2 全球负荷球谐分析与负荷形变场球谐综合	206
8.3 负荷格林函数与负荷效应空域积分算法	224
8.4 地球外部海洋及大气压负荷潮效应	236
8.5 地球质心变化与形状极移效应计算	250
8.6 自转极移效应与自转参数潮汐效应	259
8.7 负荷 SRBF 逼近与负荷效应 SRBF 综合	268
ETideLoad4.5 科学计算程序功能索引	278
样例目录名与可执行程序名对照列表	284
主要参考文献	287

第一章 ETideLoad4.5 架构、特色与理念

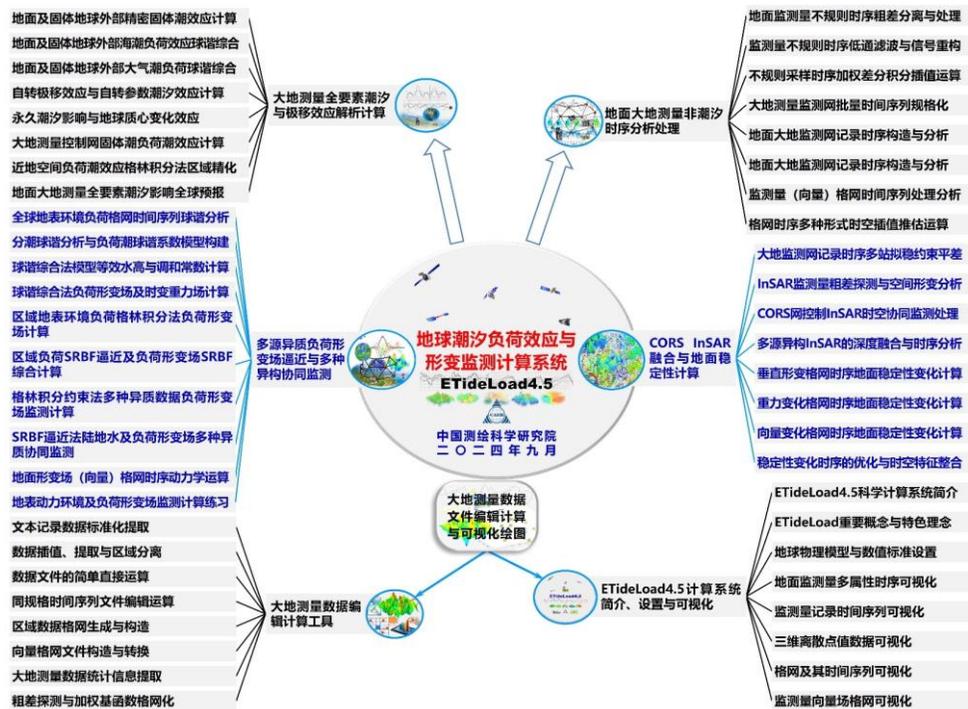
地球潮汐负荷效应与形变监测计算系统 ETideLoad4.5 (Earth Tide, Load Effect and Deformation Monitoring Computation), 是一种地球物理大地测量监测科学计算大型 Windows 系统程序包, 旨在采用科学一致的地球物理模型和严格相同的数值标准, 构造解析相容的大地测量与地球动力学算法, 统一计算各种大地测量多种潮汐/非潮汐效应, 由地表环境观测数据, 精确逼近全球和区域负荷形变场, 严格依据大地测量与固体地球动力学原理, 约束同化多源异质监测数据的深度融合, 实现陆地水、负荷形变场及时变重力场协同监测, 定量跟踪地表动力环境与地面稳定性变化, 科学支撑多源异质大地测量数据深度融合与多种异构大地测量技术协同监测。



1.1 ETideLoad4.5 科学计算系统架构

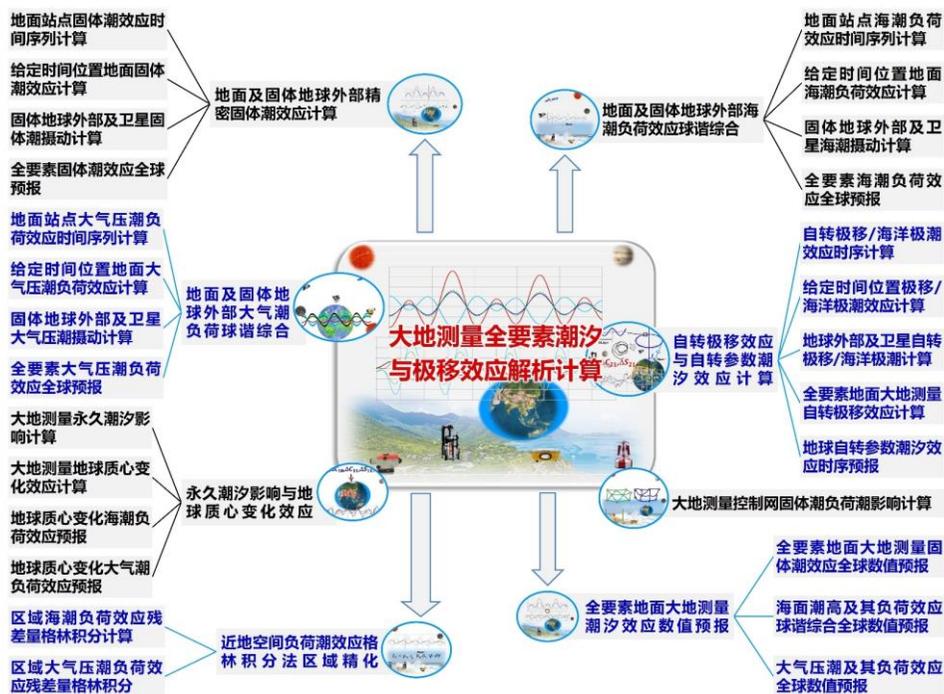
1.1.1 ETideLoad4.5 系统总体结构

ETideLoad4.5 由大地测量全要素潮汐与极移效应解析计算, 非潮汐大地测量时序分析处理, 多源异质负荷形变场逼近与多种异构协同监测, CORS InSAR 融合与地面稳定性计算, 以及大地测量数据编辑计算与可视化五大子系统有机构成。

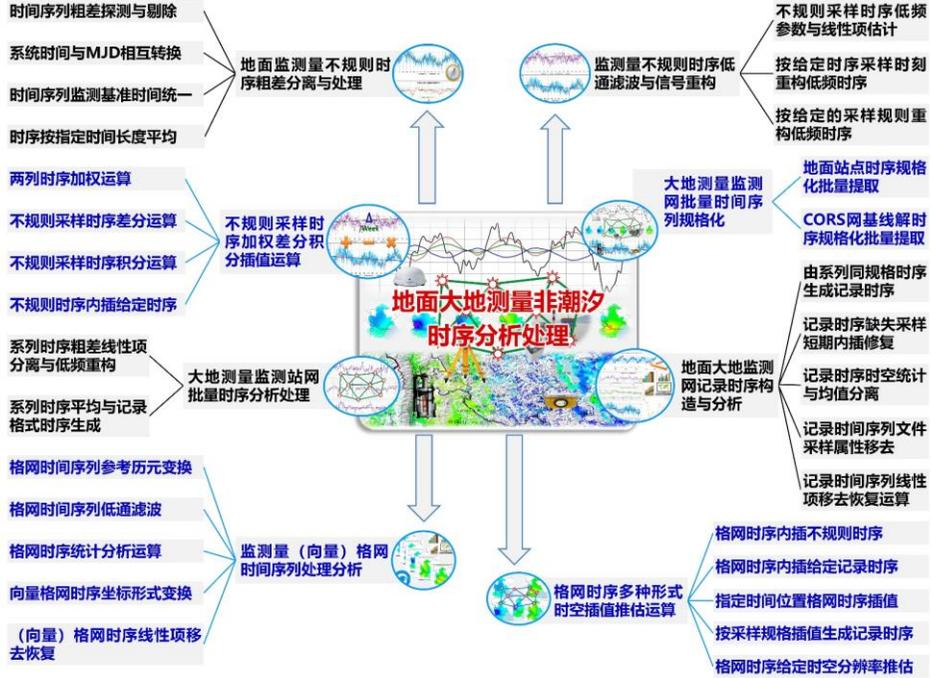


1.1.2 大地测量全要素潮汐与极移效应解析计算

采用一致的地球物理模型、统一的数值标准和完全相容的大地测量和地球动力学算法，实现地面及固体地球外部全要素大地测量固体潮、海潮、大气潮负荷效应、地球质心变化与极移效应的解析统一计算。这是多源异质地球数据深度融与多种异构大地监测技术协同的必要条件和最低要求。

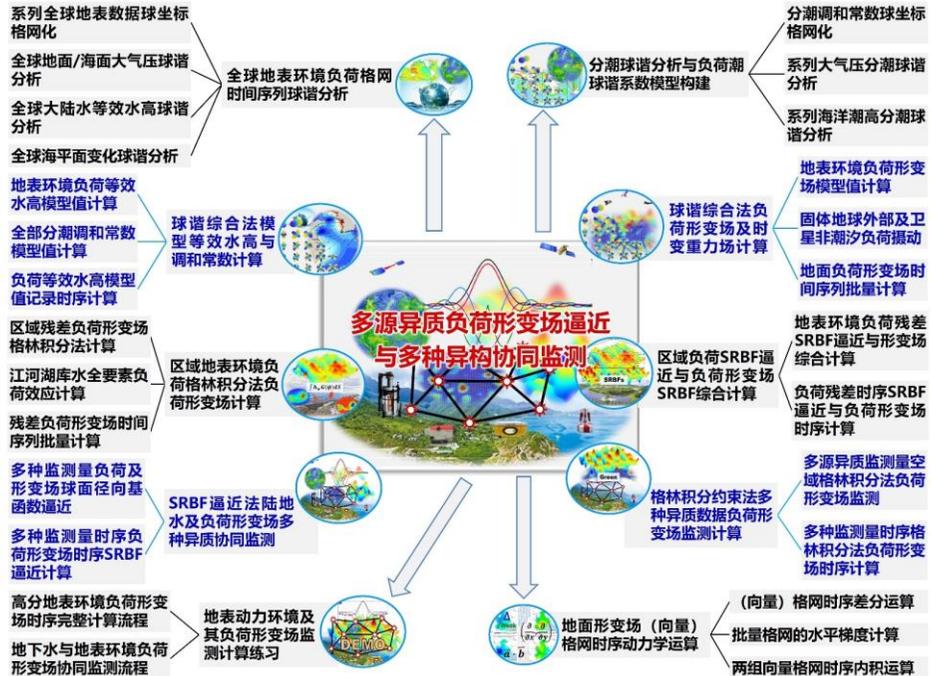


1.1.3 地面大地测量非潮汐时序分析处理

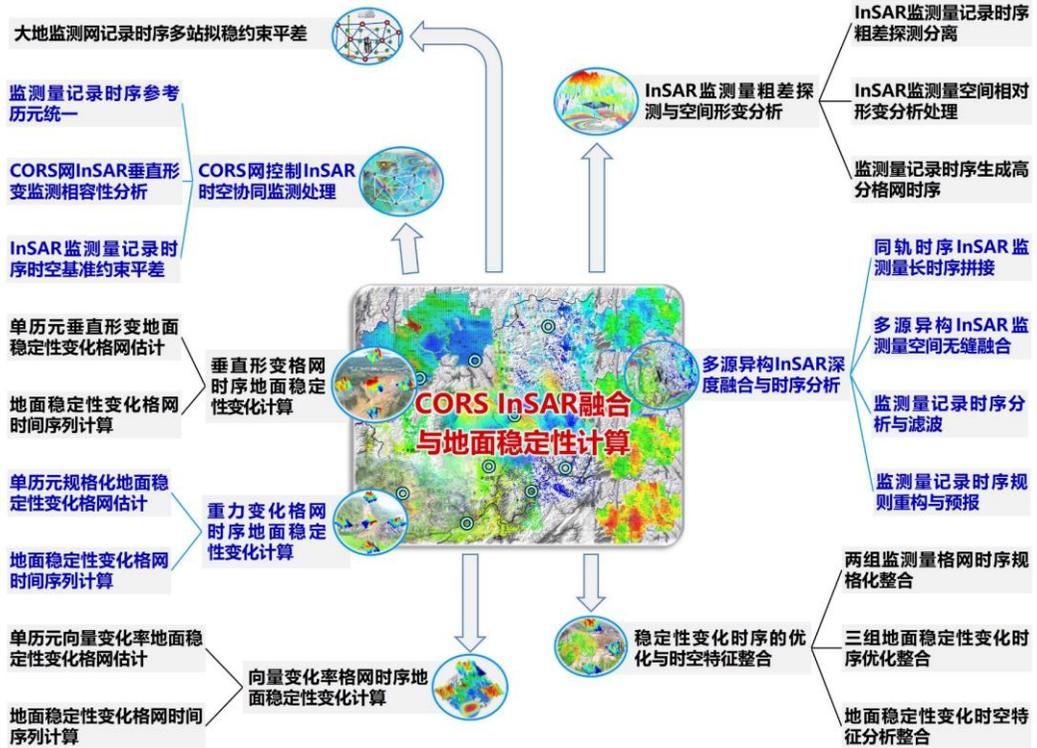


1.1.4 多源异质负荷形变场逼近与多种异构协同监测

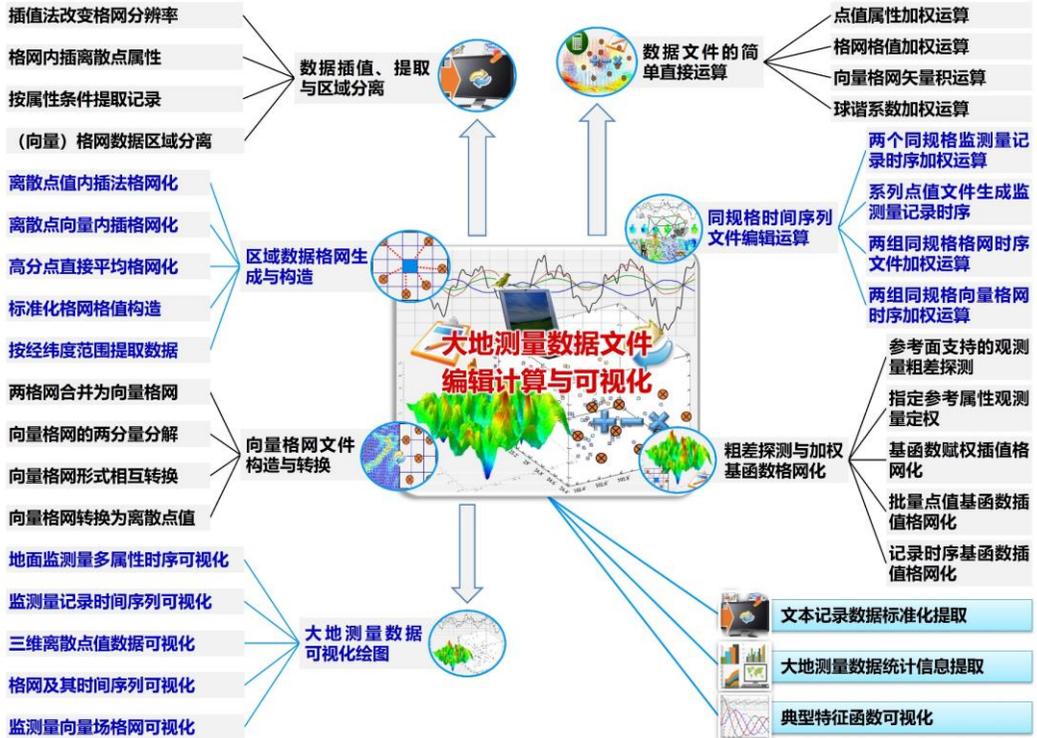
用于精确计算全球和区域各种地表环境非潮汐负荷效应及负荷形变场，严格依据大地测量与固体地球动力学原理，约束同化多源异质大地测量监测量与地表环境观测数据的深度融合，实现陆地水时空变化、负荷形变场及时变重力场的多种异构技术协同监测。



1.1.5 CORS InSAR 融合与地面稳定性计算



1.1.6 大地测量数据编辑、计算与可视化



1.2 ETideLoad4.5 大地测量监测量约定

因技术需要，ETideLoad 约定了大地测量监测量概念。大地测量监测量定义为当前历元时刻的大地测量观测量或参数，与其一段时间内观测量或参数的平均值或某一参考历元时刻大地测量观测量或参数之差。

大地测量监测量通常用大地测量观测量或参数变化（特指时间差分）表示。如地面重力变化、地倾斜向量变化分别表示地面重力监测量和地倾斜监测量。

1.2.1 主要物理量单位及方向

(1) 扰动重力场元单位约定：高程异常 ζ /大地水准面高 N (m, 米)、空间异常 Δg /扰动重力 δg (mGal, 毫伽, $1\text{mGal} = 1 \times 10^5 \text{m/s}^2$)、垂线偏差 ($"$, as, 角秒), 扰动重力梯度 T_{rr} /水平重力梯度 (E, $1\text{E} = 1 \times 10^{-9} \text{s}^2$)。

(2) 经度 (度小数), 纬度 (度小数), 椭球高 (m), 正 (常) 高/水深 (m)。

(3) 垂线偏差方向 SW。第一分量 ξ 指向南方向, 第二分量 η 指向西方向, 与扰动重力 δg 方向 (铅垂线方向) 构成右手直角坐标系, 即自然坐标系。

(4) 水平重力梯度方向 NW。第一分量 T_{NN}/T_{xx} 指向北方向, 第二分量 T_{WW}/T_{yy} 指向西方向, 与扰动重力梯度 T_{rr}/T_{zz} 方向 (天顶方向) 构成右手直角坐标系。

扰动重力梯度和水平重力梯度为扰动位对坐标的二阶偏导数, 是重力梯度张量的主对角线分量。注意区分水平重力梯度与重力水平梯度概念, 后者是扰动位或重力位垂向导数的水平梯度, 仅是重力梯度张量的非对角线分量 (交叉项, 如 T_{zx} 或 T_{zy})。

另外, 地倾斜变化是地面与当地水准面的二面角随时间变化, 地倾斜变化受局部构造形变和局部均衡形变影响, 不等于铅垂线的变化, 即不等于地面垂线偏差的变化。地倾斜变化与地面垂线偏差变化的负荷形变效应相等, 地面垂线偏差变化可理解为移去构造形变和均衡形变效应后的地倾斜变化。

1.2.2 监测量类型及单位约定

(1) 高程异常/大地水准面变化 (mm, 毫米)、地面重力/重力变化 (μGal , 微伽)、地倾斜/垂线偏差变化 (mas, $0.001"/$ 毫角秒);

(2) 地面水平位移 (东向/北向, mm)、地面径向位移 (大地高变化 mm)、地面正 (常) 高变化 (mm);

(3) 重力梯度变化 (径向/天顶, $10\mu\text{E}$)、水平重力梯度变化 (北向/西向 $10\mu\text{E}$)。仅在表示区域性重力梯度的非潮汐负荷效应时, 重力梯度径向变化单位 mE, 水平重力梯度变化单位 E。

(4) 卫星轨道重力位摄动 ($0.1\text{m}^2/\text{s}^2$)、重力摄动及其三维分量变化 (μGal)、重力梯度摄动对角线三分量变化 ($10\mu\text{E}$);

(5) 陆地水负荷等效水高变化 (cm)、海平面变化 (cm)、海洋潮高 (cm) 和大气压变化 (hPa/mbar)。

1.2.3 监测量向量方向约定

(1) 地倾斜/垂线偏差变化 SW。第一分量指向南方向，第二分量指向西方向，与地面重力/扰动重力方向构成右手直角坐标系，即自然坐标系；

(2) 站点水平位移 EN。第一分量指向东方向，第二分量指向北方向，与径向位移（大地高变化）方向构成右手直角坐标系，即东北天坐标系；

(3) 水平重力梯度变化 NW。第一分量指向北方向，第二分量指向西方向，与扰动重力梯度方向（径向/天顶方向）构成右手直角坐标系；

(4) 分潮调和常数。第一分量同相幅值（余弦分量），第二分量异相幅值（正弦分量）。

1.2.4 时间（日期）格式约定

ETideLoad4.5 时间（日期）采用格林尼治时间（零时区）。格式有两种形式，一种以 JD2400000.5 为零点的 MJD 天（GPS 时间，J2000.0 对应 MJD=51544.5），一种为 ETideLoad 约定的长整型。

大多数情况下，ETideLoad4.5 时间序列的采样历元时刻和参考历元采用约定的长整型。如 20181224122642 表示 2018 年 12 月 24 日 12 时 26 分 42 秒，2018122412 表示 2018 年 12 月 24 日 12 时 0 分 0 秒，20181224 表示 2018 年 12 月 24 日 0 时 0 分 0 秒，而 201812、2018 不是有效的 ETideLoad4.5 约定格式时间。

1.3 ETideLoad4.5 科学目标与技术特色

1.3.1 ETideLoad4.5 科学目标

(1) 采用一致的地球物理模型和相同的数值标准，构造解析相容的大地测量与地球动力学算法，统一计算各种大地测量各类潮汐与非潮汐形变效应，由地表环境观测精确逼近全球和区域负荷形变场。

(2) 严格依据大地测量与固体地球动力学原理，约束同化多源异质大地测量监测量与地表环境观测数据的深度融合，实现陆地水时空变化、负荷形变场及时变重力场的多种异构技术协同监测。

(3) 为多种异构大地测量基准构建维持，地球形变效应监测计算，空天地海协同观测与海量数据深度融合，地表水文环境与地面稳定性变化监测，提供一套科学先进的实用大地测量地球动力学算法系统。

1.3.2 ETideLoad4.5 技术特色

(1) 严格采用科学统一的标准与解析相容的算法，精密计算地面及固体地球外部全要素大地测量的固体潮、海潮及大气潮负荷效应，极移效应、地球质心变化效应与永久潮汐影响，实现地面全要素大地测量各类潮汐效应全球预报。

(2) 精确计算大气、海平面、土壤水、江河湖库水和冰川雪山等非潮汐地表环境负荷形变场及时变重力场；由大地测量与固体地球形变理论，约束同化多种大地测量监测量与地表环境数据的深度融合，协同监测陆地水变化与时变重力场。

(3) 构建区域统一、长期稳定时空监测基准，融合 CORS 网、InSAR 与多源大地测量数据；按照客观自然规律，由大地测量几何物理场时序，构造地面稳定性定量辨识准则，实现地面稳定性变化空间无缝、时间持续的定量监测与短时预报。

1.4 ETideLoad4.5 重要概念与特色理念

1.4.1 多源异质数据深度融合与多种异构技术协同监测

(1) 构造科学一致的地球物理模型、严格统一的数值标准和解析相容的大地测量与地球动力学算法，统一时空监测基准和参考历元，创建空天地海多种大地测量技术协同监测的数理基础环境。

(2) 依据地球物理大地测量原理，深度融合或约束同化多源异质大地测量数据，通过重构各种监测量之间的大地测量与地球动力学时空关联，实现多种异构几何物理大地测量技术协同监测。

(3) 同类多源异质大地测量监测量时间序列，通过基本大地测量约束或联合测量平差方法（按需要附加监测基准参数），逐历元实现深度融合。

(4) 不同类型多种监测量时间序列，通过物理大地测量、固体地球物理或环境地质动力学约束（按需要附加动力学参数），实现解析深度融合。

(5) 通过多源异质数据深度融合与多种异构技术协同监测，同步提高监测的时空分辨率，丰富监测要素种类，揭示监测对象的地球物理结构和动力学特征，科学支撑监测质量控制智能化和自动化。

1.4.2 固体地球潮汐形变及其大地测量潮汐效应

(1) 地球外部天体引潮位、海潮及大气潮，引起固体地球形变和地球重力场随时间变化，称为固体地球的潮汐形变。

(2) 通常将地球外部天体引潮位、海潮及大气潮引起的大地测量观测量或参数的周期性变化，称为该观测量或参数的潮汐效应（也称潮汐影响）。

(3) 大地测量潮汐效应包括固体潮效应和负荷潮效应。固体潮效应是天体引潮位引起的大地测量观测量或参数变化，负荷潮效应是海潮负荷或大气潮负荷引起的大地测量观测量或参数变化。

(4) 大地测量潮汐效应是可以模型化的，能够随时随地精确地移去或恢复。大地测量潮汐效应等于其潮汐改正数的负值。

只进行潮汐效应改正，而不考虑非潮汐效应的大地测量参考框架，仍是静态或稳态的。如精密水准控制网和重力控制网，虽然其观测量都经过潮汐改正，但它们仍然只是稳态的大地测量框架。

1.4.3 固体地球非潮汐形变形式及大地测量影响

(1) 地球表层系统（简称地表）中的土壤及植被水、江河湖库水、冰川冰盖雪山、地下水、大气与海平面等环境负荷非潮汐变化，引起地球重力位变化（直接影响），同步激发

固体地球形变（间接影响），综合表现为地面垂直形变、地面重力及地倾斜变化，称为固体地球的负荷形变，包括地球重力场随时间变化。

(2) 地下水利用、地下资源开采、地下工程建设、冰川冰盖消融以及其他自然或人工地表质量大量变动，致使表层岩土失去原有平衡，在自身重力或内应力作用下，缓慢趋向另一平衡状态，引起地面塑性均衡垂直形变。

(3) 地面负荷垂直形变由地表环境负荷质量变化（或重新分布）激发，作用于整个固体地球，属于弹性形变，可用负荷勒夫数定量表征；地面塑性垂直形变由人类活动或自然环境因素诱发，动力作用位于地下岩土，并以岩土自身为力学介质传递，是一种缓慢的塑性均衡垂直形变。

(4) 非潮汐效应难以模型化，一般采用大地测量技术测定。快速或实时应用需要时，可将实测结果进行短期预报推估。

顾及非潮汐效应的大地测量参考框架只能是动态的，动态参考框架基准值对应具体唯一的参考历元时刻。当前历元参考框架点的基准值，需在其参考历元基准值的基础上，增加一项当前历元非潮汐效应相对于参考历元非潮汐效应的差异的校正，这项校正称为（非潮汐效应）历元归算。

1.4.4 地面垂直形变形式及时空动力学定量特征

地面垂直形变（地面沉降）有 3 种形式，即弹性负荷垂直形变、塑性均衡垂直形变与局部构造垂直形变。后两者也称非负荷垂直形变，都属于塑性形变。

(1) 负荷垂直形变，由地表环境负荷质量变化激发，引起地球重力位变化（直接影响），经固体地球的弹性动力作用，导致固体地球形变（间接影响，用负荷勒夫数表征），在监测区内表现为与负荷变化时间同步的地面垂直形变和重力场变化。其时变特征与地表环境负荷变化相似，表现为复杂的非线性和准周期性。

(2) 均衡垂直形变，通常表现为环境地质动力作用破坏地下岩土原有的平衡状态后，岩土在自身重力或内应力作用下，缓慢趋近于另一平衡状态的动力学过程。如：地下空隙岩土失水后的压实效应与渗/注水后的膨胀效应，地下工程建设引发的上方围岩形变，以及地表质量迁移后（冰雪消融、水土流失和地基开挖）的地面塑性回弹。

①均衡垂直形变空域动力学定量特征：动力作用点位于地下岩土内部，均衡调整对象为动力作用点上方的岩土层，均衡调整空间影响角约为 45° ，即地面形变的空域影响半径约等于地下作用点的埋藏深度。

②均衡垂直形变时域动力学定量特征：均衡调整持续时间与动力作用点埋藏深度近似成正比，在数年时间尺度上均衡垂直形变量与其加速率符号相反，在数月内表现为短期线性时变。

(3) 构造垂直形变，由板块水平运动驱动，仅作用于压缩性断裂带附近。构造垂直形变大小随离开断裂带的距离快速衰减至零，空间影响半径与构造深度相当。在百年时间尺度上，构造垂直形变速率基本保持不变。

1.4.5 负荷形变场的表示、逼近与监测基本原理

(1) 负荷形变场是大地测量非潮汐负荷效应的一种表现形式，可用地球重力场变化唯一表示。地球重力场参数非潮汐负荷效应之间的解析关系，与地球重力场参数之间的解析关系完全一致。全球重力场可用地球重力位系数模型表示，同样全球负荷形变场及时变重力场可用全球负荷球谐系数模型表示。

(2) 已知地球重力位系数模型，可计算地球外部任意点的各种重力场参数，同样，已知负荷球谐系数模型，可计算固体地球外部各种大地测量参数的负荷效应。局部重力场（大地水准面）可采用移去恢复法精化，同样，区域非潮汐负荷效应（负荷形变场及时变重力场）也能采用移去恢复方法逼近。

(3) 地球重力场逼近理论是线性的，同样，弹性（线性粘弹性）负荷形变理论也是线性的。例如，将大气、陆地水和海平面变化统一用地表负荷等效水高表示，分别由大气、大陆水和海平面变化三种等效水高计算负荷影响，再求和，与先对三种等效水高求和，再计算负荷影响，两者结果完全等价。

(4) 地球重力场逼近方法可归纳为两类，即空域重力场边值问题 Stokes/Hotine 积分法和谱域球面基函数（面球函数、径向基函数、样条函数等）逼近法，能综合全球或区域各种重力场数据。同样，负荷形变场（时变重力场）逼近或监测，也有负荷格林函数积分约束和谱域球面基函数逼近两种方法，也能有效融合全球或区域多源异质监测数据。

1.4.6 CORS 网时序 InSAR 垂直形变协同监测原理

(1) 通过粗差野值探测、空间滤波与时序分析，将时序 InSAR 监测量分离成地面数米以浅土壤（气温和降水引起涨缩）及地表面在垂直方向上的变化和数米以深岩土层垂直形变两部分，只有后者与其他大地测量监测相容。

(2) 通过 CORS 网地面大地高变化时序，约束多源时序 InSAR 监测量，控制时序 InSAR 监测量中垂直形变信号的精准分离和 CORS 网多源异构时序 InSAR 协同监测。

(3) 只有数米以深岩土层垂直形变，才是地面沉降、地震地质环境灾害、地面稳定性变化、固体地球形变、地下水及地球动力学监测所需的信息。

从时序 InSAR 监测量中分离出的地表面及浅层土壤垂直变化，可用于土壤、湿地与水环境监测，以及地质环境调查监测、灾情监测灾后评估和水文气象研究等。

1.4.7 区域地面稳定性变化无缝连续定量监测方案

(1) 基于多源异质数据融合的地面垂直形变、重力与地倾斜变化格网时序，构建地面稳定性降低的确定性准则，实现区域地面稳定性变化的无缝定量连续监测。

(2) 地面稳定性降低定量准则（依据确定性的客观自然规律）：地面大地高增大/重力减小，大地高/重力变化水平梯度大，地倾斜变化与地形坡度内积大等。

(3) 参考已发生的地质灾害事件，优化整合多种大地测量地面稳定性变化格网时序，建成适应当地环境地质的地面稳定性变化格网时序，夯实稳定性变化监测能力。

1.4.8 大地测量算法之间的解析相容性问题

解析相容性，是大地测量学的理论要求和监测对象唯一性的具体表现，是多源异质大地测量数据深度融合与多种异构大地测量技术协同监测的最低要求。

大地测量算法之间的解析相容性涉及两方面问题：(1) 不同类型大地测量观测量或参数、同类地球动力学影响量之间的相容性。(2) 同类大地测量观测量或参数、不同类型地球动力学影响量之间的相容性。

第一类相容性是大地测量理论基本要求。如，高程异常负荷效应等于扰动重力负荷效应的 Hotine 积分，在实现高程异常和扰动重力负荷效应算法时，应确保 Hotine 积分关系不变；再如，站点的正常高固体潮效应等于其大地高固体潮效应与大地水准面固体潮效应之差，这个关系也需严格保证。

第二类相容性由形变地球动力学方程组（含本构方程）决定。

1.5 ETideLoad4.5 协议、学习与使用

1.5.1 主要地球物理模型与数值标准

ETideLoad 默认情况下，以 IERS2010 协议推荐的地球物理模型和数值标准为基础。



用户可根据需要，调用[地球物理模型与数值标准设置]程序，对其进行替换或更新。这些地球物理模型和数值标准以文件形式存储在 C:\ETideLoad4.5_win64cn 目录中，主要包括大气压潮负荷球谐系数模型，海潮负荷球谐系数模型，地球负荷勒夫数，IERS 地球定向参数（EOP）时间序列，SLR 地球质心变化时序，海洋潮高调和常数向量格网模型，月球与行星星历 JEPH440，勒夫数频率相关系数，Desai 海洋极潮系数，以及全球负荷潮球谐系数一阶项等。

1.5.2 大地测量时间序列数据格式约定

ETideLoad 采用自定义格式的五种形式大地测量时间序列数据，包括地面监测量时间序列、监测网站点记录时间序列、监测网观测量记录时间序列、监测量（向量）数值格网时间序列和球谐系数模型时间序列。

(1) 地面监测量时间序列。一个地面监测量时序文件可存储某一站点、某条基线或路线多种属性监测量时间序列数据，各种属性的采样历元时刻完全相同。如 CORS 坐标解时间序列、固体潮站观测与分析成果时间序列、GNSS 基线解时间序列等。

(2) 监测网站点记录时间序列。一个监测网站点记录时序文件可存储大地监测网多个地面站点一种类型监测量的时间序列数据。如 CORS 站网坐标解（一维）、水准网点高程、固体潮站网、验潮站网时间序列，以及时序 InSAR 监测量等。

(3) 监测网观测量记录时间序列。一个大地测量监测网观测量记录时序文件可存储 CORS 网（GNSS 网）一维基线解、水准控制网水准路线高差观测量或重力控制网重力段差观测量时间序列数据。

(4) 数字模型（向量）格网时间序列。由一组带时间（历元）信息的某一种类型监测量（向量）格网文件构成，每个格网头文件第 7 个属性约定为该格网数据的采样历元时刻。如陆地水等效水高、海平面变化格网时序，各种地面负荷形变场格网时序，时变重力场格网时间序列等。

(5) 球谐系数模型时间序列。由一组带时间信息的球谐系数（Stokes 系数）模型文件构成，用于表示全球负荷变化时间序列、全球负荷形变场时间序列和全球重力场变化时间序列。每个文件头占住一行，至少包含地心引力常数 GM ($\times 10^{14} \text{m}^3/\text{s}^2$)、地球椭球长半轴 a (m) 和采样历元时刻（ETideLoad 约定的长整数格式）3 个属性。

GM, a 称为球谐系数模型的尺度参数，表示球谐系数模型中的面谐函数定义在半径等于地球长半轴 a 的球面上。

程序[文本记录数据文件标准化提取]，[大地测量监测网批量时间序列规格化]，是 ETideLoad 接受外部文本数据的重要接口。利用各种潮汐效应的全球预报功能，可以构造指定位置和采样规格的地面监测量时序文件；利用[区域数据格网生成与构造]，可以构造指定规格的数值格网文件。其他程序模块，只接受 ETideLoad 自身产生的格式数据。

1.5.3 课堂教学、自学练习与技术培训

ETideLoad4.5 为每个程序配置了完整的计算样例，存放在 C:\ETideLoad4.5_win64cn\examples 目录，每个样例目录下存放了该程序样例全部功能模块的计算过程文件（process.txt）、输入输出数据文件和程序计算过程的界面系列截图，以方便课堂教学、独立自学与技术培训需要。

样例所在的目录名与可执行程序名相同。使用 ETideLoad4.5 程序前，建议按照 process.txt 流程信息，由输入输出数据文件，对照截图，完整操作一遍样例。全部样例练习完成后（约 5 个工作日），基本具备独立使用 ETideLoad4.5 的能力。

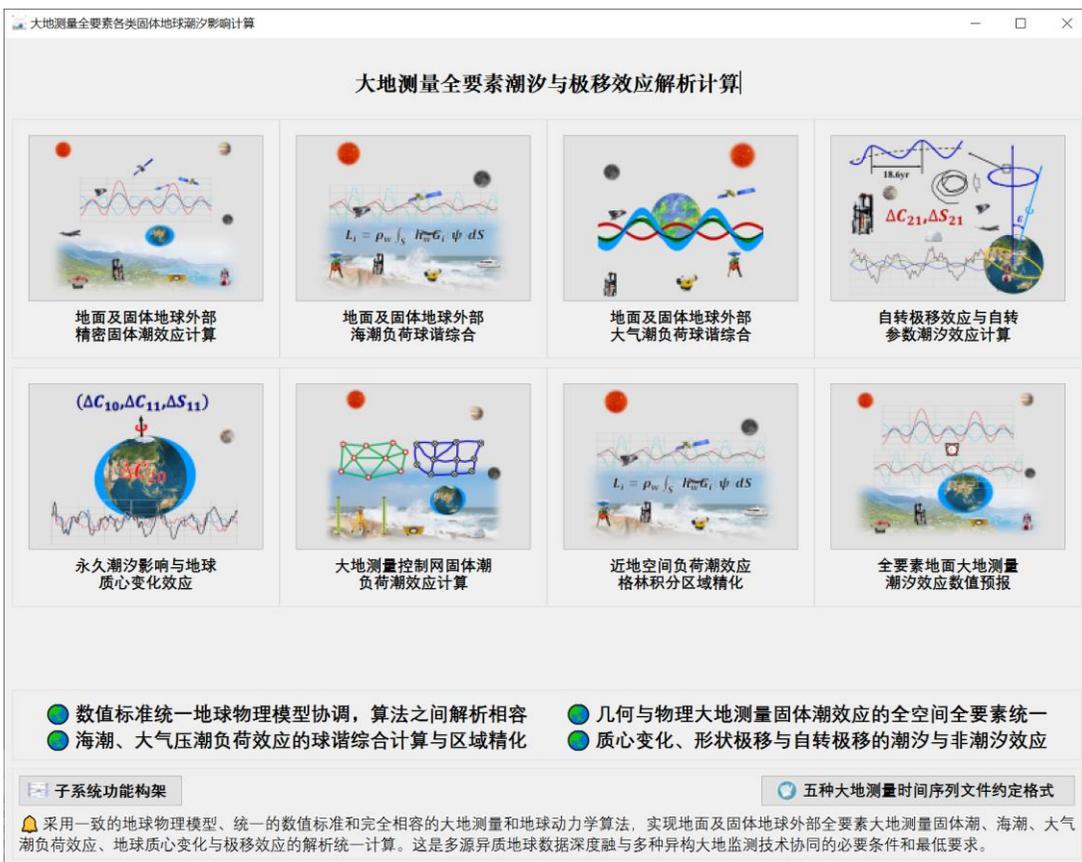
1.5.4 ETideLoad4.5 适用范围与使用说明

ETideLoad4.5 适合大地测量、地球物理、地质环境灾害、水文动力学、卫星动力学、地震与地球动力学等领域高年级本科生、研究生、科研和工程技术人员，可用于课堂教学、独立自学、工程计算与科学研究。

用户可按需设计个性化技术流程，灵活组织有关程序模块，完成地面及固体地球外空间各种潮汐/非潮汐效应监测计算，全球或区域形变场/时变重力场/地面稳定性/陆地水/地表动力环境变化监测，以及多源异质大地测量深度融合等工作。

第二章 大地测量全要素潮汐与极移效应解析计算

大地测量全要素潮汐与极移效应解析计算程序集，采用一致的地球物理模型、统一的数值标准和完全相容的大地测量和地球动力学算法，实现地面及固体地球外部全要素大地测量固体潮、海潮、大气潮负荷效应、地球质心变化与极移效应的解析统一计算。这是多源异质地球数据深度融与多种异构大地监测技术协同的必要条件和最低要求。



ETideLoad4.5 中的固体地球外部点，泛指海洋、低空和卫星等不与地球固连的空间点。程序界面中标注⊙的大地测量观测量或参数，只在其点位与地球固连情况下有效。

ETideLoad4.5 时间（日期）采用格林尼治时间（零时区）。格式有两种形式，一种以 JD2400000.5 为零点的 MJD 天（GPS 时间，J2000.0 对应 MJD=51544.5），一种为 ETideLoad 自己约定的长整型，如 2018122412。

2.1 地面及固体地球外部精密固体潮效应计算

[目标]按指定地点和时刻，计算地面各种大地测量观测量或参数的固体潮效应或固体地球外部空间的固体潮摄动。这里的固体地球外部点泛指海洋、低空和卫星等不与地球固连的空间点。

兼容 IERS2010 协议地球重力位与地面站点位移固体潮效应数值标准与算法，顾及体潮勒夫数的纬度依赖和频率相关性，严密实现地面及固体地球外部全要素几何和物理大地测

量固体潮效应算法统一，以维持各种大地测量要素固体潮效应之间的解析关系。天体引潮位计算时，月球取 6 阶、太阳取 3 阶和太阳系地球外部行星取 2 阶。

2.1.1 地面站点固体潮效应时间序列计算

[功能]输入地面站点时间序列文件，计算其高程异常(大地水准面 mm)、地面重力(μGal)、扰动重力(μGal)、地倾斜(SW 南向/西向 mas)、垂线偏差(SW 南向/西向 mas)、水平位移(EN 东向/北向 mm)、地面径向(大地高 mm)、地面正(常)高(mm)、扰动重力梯度(径向 $10\mu\text{E}$)或水平重力梯度(NW 北向/西向 $10\mu\text{E}$)的固体潮效应。

[输入]地面站点时间序列文件。

头文件占住一行，属性包括点名，经度，纬度(度小数)，大地高(m)，起算 MJD(可选)，…。从第二行起，每行记录表示时序的一个历元时刻采样，其中至少有一个属性是采样历元时刻，其他各列代表不同属性时序。

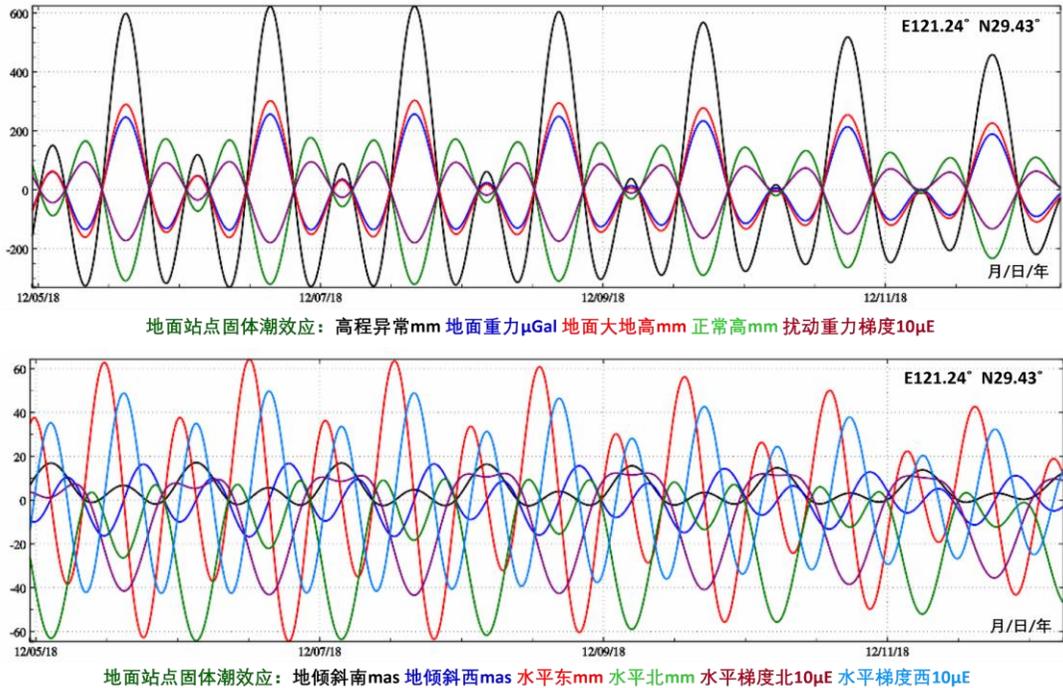
[参数设置]输入头文件中大地高列序号，记录中时间属性列序号，选择影响类型(本例全选)，输入结果文件名。

[输出]头文件取输入文件头，输出文件记录在输入文件记录的基础上，增加用户选择要素的固体潮效应(本例全选，共 14 列属性)。

当时间为系统约定的长整型格式时，头文件中可以没有起算 MJD 属性，程序自动识别并忽略选择。

当地面点大地高等于大地水准面高时，地面高程异常的固体潮效应即为大地水准面的固

体潮效应。



正常高固体潮效应 (幅值约 300mm) 与大地高固体潮效应、大地水准面固体潮效应 (幅值约 600mm) 异相 (符号相反)。地面站点位置、地倾斜固体潮效应, 在东西方向上的幅度一般远大于南北方向。

程序在当前目录下还输出二阶位系数和形状极移固体潮效应时序文件*Stdsfptm.txt。*为输入文件名, 这是一个系统内部测试文件。头文件占住一行, 记录格式: 系统格式时间, 5 列二阶规格化位系数的固体潮效应 $\Delta\bar{C}_{20}, \Delta\bar{C}_{21}, \Delta\bar{S}_{21}, \Delta\bar{C}_{22}, \Delta\bar{S}_{22}$ ($\times 10^{-8}$), 2 列形状极移固体潮效应 $\Delta x_{sfp}, \Delta y_{sfp}$ (地固空间直角坐标系 x 方向/y 方向, 单位 m)。形状极移的固体潮效应最大最小值之差一般超过 1 千多米。

2.1.2 给定时间位置地面固体潮效应计算

[功能]输入带观测时间的若干地面点坐标文件, 计算其高程异常 (大地水准面 mm)、地面重力 (μGal)、扰动重力 (μGal)、地倾斜 (SW 南向/西向 mas)、垂线偏差 (SW 南向/西向 mas)、水平位移 (EN 东向/北向 mm)、地面径向 (大地高 mm)、地面正 (常) 高 (mm)、扰动重力梯度 (径向 $10\mu\text{E}$) 或水平重力梯度 (NW 北向/西向 $10\mu\text{E}$) 的固体潮效应。

[输入]带观测时间的若干地面点坐标文件。

头文件占住一行。从第二行起, 每行记录的第 2、3 个属性约定为经度、纬度 (度小数), 记录中存在时间和大地高属性。

当时间为系统约定的长整型格式时, 头文件中可以没有起算 MJD 属性, 程序自动识别并忽略选择。

[参数设置]输入文件记录中大地高、时间属性列序号，选择影响类型（本例选择高程异常、地面重力、地面径向和地面正常高），输入结果文件名。

[输出]头文件取输入文件头，输出文件记录在输入文件记录的基础上，增加用户选择要素的固体潮效应，本例增加高程异常、地面重力、地面径向和地面正常高固体潮效应，共4列属性。

记录中大地高列序号 4

记录中时间属性列序号 1

头文件中起算MJD列序号 5

选择影响类型

- 高程异常(大地水准面mm)
- 地面重力(μGal)
- 扰动重力(μGal)
- 地倾斜(南向/西向mas)
- 垂线偏差(南向/西向mas)
- 水平位移(东向/北向mm)
- 地面径向(大地高mm)
- 地面正(常)高(mm)
- 扰动重力梯度(径向10μE)
- 水平重力梯度(北向/西向10μE)

结果文件保存为

101.230000	29.910000	47.218	58484.000000	0.000000	5.0358	1.7076	3.1155	-2.1503
201901010000	101.230000	29.910000	47.218	0.041667	58.8231	23.6509	30.0982	-28.9902
201901010100	101.230000	29.910000	47.218	0.083333	78.0669	31.2478	40.9442	-37.4099
201901010200	101.230000	29.910000	47.218	0.125000	53.5512	20.7524	31.1847	-22.6573
201901010300	101.230000	29.910000	47.218	0.166667	-10.5505	-5.9728	2.5197	12.7964
201901010400	101.230000	29.910000	47.218	0.208333	-97.6384	-41.9360	-37.5333	59.8670
201901010500	101.230000	29.910000	47.218	0.250000	-183.0041	-76.8920	-77.5458	105.2687
201901010600	101.230000	29.910000	47.218	0.291667	-240.2918	-100.0549	-105.1383	135.0173
201901010700	101.230000	29.910000	47.218	0.333333	-248.3904	-102.9109	-110.2284	138.0747
201901010800	101.230000	29.910000	47.218	0.375000	-197.0322	-81.4343	-87.7448	109.2377
201901010900	101.230000	29.910000	47.218	0.416667	-89.7696	-37.2085	-39.1342	50.6065
201901011000	101.230000	29.910000	47.218	0.458333	56.3348	22.7649	27.7106	-28.6484
201901011100	101.230000	29.910000	47.218	0.500000	214.2113	87.4990	100.0911	-114.1552
201901011200	101.230000	29.910000	47.218	0.541667	352.6896	144.3748	163.3355	-189.4084
201901011300	101.230000	29.910000	47.218	0.583333	443.4953	181.9157	204.1705	-239.4004
201901011400	101.230000	29.910000	47.218	0.625000	467.7631	192.3858	213.8422	-254.0143
201901011500	101.230000	29.910000	47.218	0.666667	420.5515	173.6290	190.2404	-230.4143

地面重力固体潮因子 $1+(2h_{nm}-(n+1)k_{nm})/n$ ，扰动重力固体潮因子 $1-(n+1)k_{nm}/n$ ；地倾斜固体潮因子 $1+k_{nm}-h_{nm}$ ，垂线偏差固体潮因子 $1+k_{nm}$ 。

通常情况下， ΔC_{n0} 主要由固体潮的长期或长周期分潮（周期大于半个太阴月， $n=1, 2, \dots$ ）构成； ΔC_{n1} ， ΔS_{n1} 主要由周日分潮构成； ΔC_{n2} ， ΔS_{n2} 主要由半日分潮构成。更一般地， ΔC_{nm} ， ΔS_{nm} 主要由 $1/m$ 日分潮构成。

2.1.3 固体地球外部及卫星固体潮摄动计算

[功能]输入带观测时间的固体地球外部点坐标文件，计算空间直角坐标系或球坐标系中的重力位 ($0.1m^2/s^2$)、重力 (μGal) 或重力梯度 ($10\mu E$) 的固体潮摄动。

[输入]带观测时间的固体地球外部点坐标文件。

头文件占住一行。从第二行起，每行记录的第 2、3 个属性约定为经度、纬度（度小数），记录中存在时间和大地高属性。

当时间为系统约定的长整型格式时，头文件中可以没有起算 MJD 属性，程序自动识别并忽略选择。

地面及固体地球外部精密固体潮效应计算

打开文件 结果保存 设置参数输入 开始计算 计算信息保存 查看样例

地面站点固体潮效应时间序列计算 给定时间位置地面固体潮效应计算 固体地球外部及卫星固体潮波动计算 全要素固体潮效应全球预报

打开带时间的地球外部文件 计算信息保存 地面及其外部全要素固体潮效应统一计算

设置文件格式
 记录中大地高列序号 4
 记录中时间属性列序号 1
 头文件中起算MJD列序号 5

选择影响类型
 重力位(扰动位)振动(0.1m²/s²)
 摄动力空间直角坐标三分量(μGal)
 摄动力当地东北天系三分量(μGal)
 重力梯度空间直角坐标三分量(10μE)
 重力梯度当地东北天系三分量(10μE)

计算信息保存
 >> 计算开始时间: 2023-08-21 15:35:03
 >> 完成固体潮效应计算!
 >> 计算结束时间: 2023-08-21 15:35:03
 >> [功能]输入带观测时间的固体地球外部坐标文件, 计算空间直角坐标系或球坐标系中的重力位(0.1m²/s²)、重力(μGal)或重力梯度(10μE)的固体潮波动。
 >> 打开带时间的地球外部文件 C:/Etideload4.5_win64cn/examples/TideEffectsolidearth/outerpm.txt.
 ** 观察下方窗口文件信息, 设置输入文件格式, 选择影响参数类型, 输入结果保存文件名后, 点击[参数设置结果输入]按钮, 将参数输入系统...
 >> 结果文件保存为 C:/Etideload4.5_win64cn/examples/TideEffectsolidearth/outerst.txt.
 在输入文件记录的基础上增加若干列固体潮效应计算量, 保留4位有效数字。
 ** 参数设置结果已输入系统!
 ** 点击[开始计算]控件按钮, 或[开始计算]工具按钮, ...
 >> 计算开始时间: 2023-08-21 15:38:50
 >> 完成固体潮效应计算!
 >> 计算结束时间: 2023-08-21 15:38:51

结果文件保存为 参数设置结果输入 开始计算 框口数据保存

输入输出数据显示!

NY	01.23	29.91	260000.0	58284.000000	0.4000	-70.1436	35.8873	-1.6087
2019010100	101.23	29.91	450000.0	0.4000	4.6869	-86.1108	21.7992	-20.5315
2019010101	101.23	29.91	450000.0	6.2226	-94.5864	-0.3923	-27.2614	
2019010102	101.23	29.91	450000.0	4.2712	-93.8742	-23.9444	-18.5773	
2019010103	101.23	29.91	450000.0	-0.8379	-84.3366	-41.6558	3.9968	
2019010104	101.23	29.91	450000.0	-7.7847	-68.2594	-47.8237	34.5663	
2019010105	101.23	29.91	450000.0	-14.6000	-49.2406	-39.7655	64.4269	
2019010106	101.23	29.91	450000.0	-19.1794	-31.2866	-18.5199	84.3560	
2019010107	101.23	29.91	450000.0	-19.8343	-17.8560	11.4088	87.0221	
2019010108	101.23	29.91	450000.0	-15.7401	-11.0848	43.1538	68.9095	
2019010109	101.23	29.91	450000.0	-7.1772	-11.3610	69.1379	31.3166	
2019010110	101.23	29.91	450000.0	4.4921	-17.3267	82.8747	-19.7820	
2019010111	101.23	29.91	450000.0	17.1034	-26.2877	80.5148	-74.9606	
2019010112	101.23	29.91	450000.0	28.1638	-34.9298	61.7990	-123.3805	
2019010113	101.23	29.91	450000.0	35.4125	-40.1780	30.2051	-155.1382	
2019010114	101.23	29.91	450000.0	37.3432	-40.0045	-7.7618	-163.8135	
2019010115	101.23	29.91	450000.0	33.5643	-33.9961	-44.0054	-147.4454	

兼容 IERS2010 协议地球重力位与地面站点位移固体潮效应, 顺及体潮勒夫数的纬度依赖和频率相关性, 严密实现地面及固体地球外部全要素几何和物理大地测量固体潮效应算法统一, 天体引潮位计算时, 月球取6阶、太阳取3阶和太阳系地球外部行星取2阶。
 地面重力固体潮因子 $1 + (2h_{mm} - (n+1)k_{mm})/n$, 扰动重力固体潮因子 $1 - (n+1)k_{mm}/n$; 地倾斜固体潮因子 $1 + k_{mm} - h_{mm}$, 垂线偏差固体潮因子 $1 + k_{mm}$ 。
 通常 ΔC_m 主要由长期/长周期分期(周期大于半太阳月, $n=1, 2, \dots$) 构成; $\Delta C_m, \Delta S_m$ 主要由周日分期构成; $\Delta C_m, \Delta S_m$ 主要由半日分期构成, 更一般地, $\Delta C_m, \Delta S_m$ 主要由 $1/m$ 日分期构成。
 正常高固体潮效应(幅值约300mm)与大地高、大地水准面固体潮效应(幅值约600mm)异相(符号相反)。地面站点位置、地倾斜固体潮效应, 在东西方向上的幅度一般远大于南北方向。

记录的第2、3列约定为卫星轨道的经纬度

记录的第2、3列约定为卫星轨道的经纬度

地面及固体地球外部精密固体潮效应计算

打开文件 结果保存 设置参数输入 开始计算 计算信息保存 查看样例

地面站点固体潮效应时间序列计算 给定时间位置地面固体潮效应计算 固体地球外部及卫星固体潮波动计算 全要素固体潮效应全球预报

打开带时间的地球外部文件 计算信息保存 地面及其外部全要素固体潮效应统一计算

设置文件格式
 记录中大地高列序号 4
 记录中时间属性列序号 1
 头文件中起算MJD列序号 5

选择影响类型
 重力位(扰动位)振动(0.1m²/s²)
 摄动力空间直角坐标三分量(μGal)
 摄动力当地东北天系三分量(μGal)
 重力梯度空间直角坐标三分量(10μE)
 重力梯度当地东北天系三分量(10μE)

计算信息保存
 >> 计算开始时间: 2023-08-21 15:38:50
 >> 完成固体潮效应计算!
 >> 计算结束时间: 2023-08-21 15:38:51
 >> [功能]输入带观测时间的固体地球外部坐标文件, 计算空间直角坐标系或球坐标系中的重力位(0.1m²/s²)、重力(μGal)或重力梯度(10μE)的固体潮波动。
 >> 打开带时间的地球外部文件 C:/Etideload4.5_win64cn/examples/TideEffectsolidearth/satelm.txt.
 ** 观察下方窗口文件信息, 设置输入文件格式, 选择影响参数类型, 输入结果保存文件名后, 点击[参数设置结果输入]按钮, 将参数输入系统...
 >> 结果文件保存为 C:/Etideload4.5_win64cn/examples/TideEffectsolidearth/satelst.txt.
 在输入文件记录的基础上增加若干列固体潮效应计算量, 保留4位有效数字。
 ** 参数设置结果已输入系统!
 ** 点击[开始计算]控件按钮, 或[开始计算]工具按钮, ...
 >> 计算开始时间: 2023-08-21 15:41:24
 >> 完成固体潮效应计算!
 >> 计算结束时间: 2023-08-21 15:41:25

结果文件保存为 参数设置结果输入 开始计算 框口数据保存

输入输出数据显示!

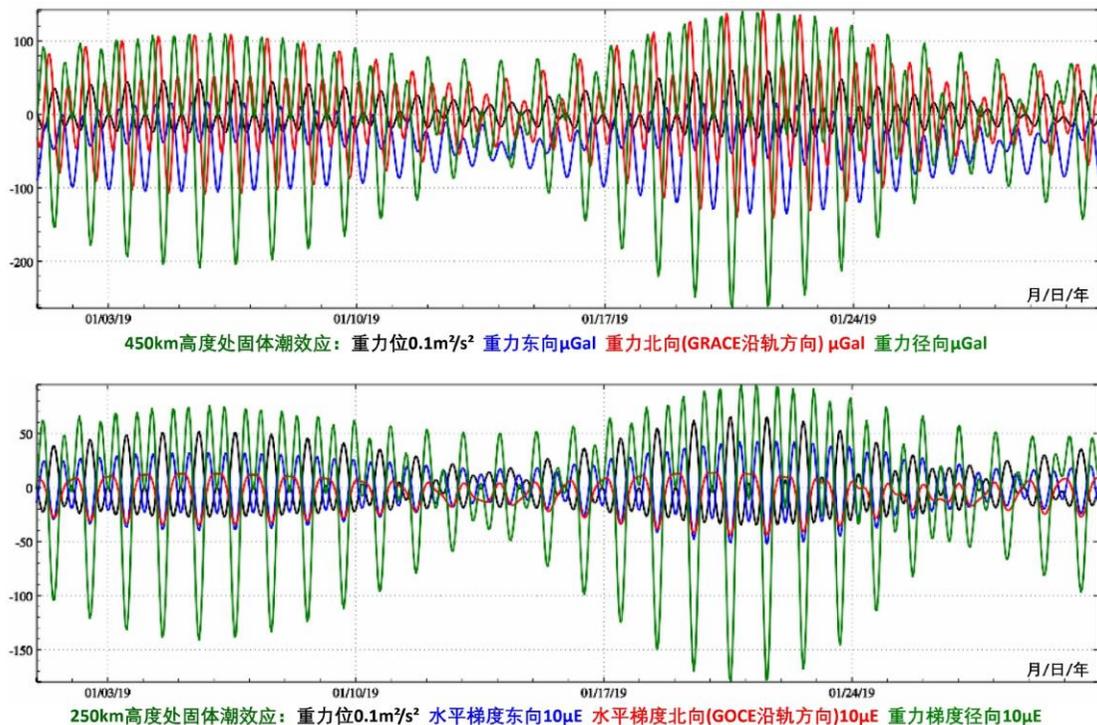
NY	01.23	29.91	260000.0	58284.000000	0.4382	-6.5822	-0.5122	-0.9869
2019010100	101.23	29.91	250000.0	0.4382	5.1279	-14.9763	0.0031	-13.9191
2019010101	101.23	29.91	250000.0	6.8071	-18.7797	0.7941	-18.4802	
2019010102	101.23	29.91	250000.0	4.6711	-16.8956	1.9916	-12.4902	
2019010103	101.23	29.91	250000.0	-0.9180	-9.7866	3.4507	2.9535	
2019010105	101.23	29.91	250000.0	-8.5149	0.6783	4.7745	23.7699	
2019010106	101.23	29.91	250000.0	-15.9652	11.7492	5.4154	44.0014	
2019010107	101.23	29.91	250000.0	-20.9686	20.5242	4.8258	57.3982	
2019010108	101.23	29.91	250000.0	-21.6806	24.6773	2.6194	59.0468	
2019010109	101.23	29.91	250000.0	-17.2021	23.0095	-1.2992	46.6407	
2019010110	101.23	29.91	250000.0	-7.8411	15.7141	-6.6698	21.1129	
2019010111	101.23	29.91	250000.0	4.9132	4.3191	-12.8933	-13.4846	
2019010112	101.23	29.91	250000.0	18.6963	-8.6623	-19.1283	-50.8102	
2019010113	101.23	29.91	250000.0	30.7850	-20.2944	-24.4480	-83.5856	
2019010114	101.23	29.91	250000.0	38.7096	-27.8815	-28.0227	-105.1893	
2019010115	101.23	29.91	250000.0	40.8233	-29.5954	-29.2897	-111.1463	
2019010116	101.23	29.91	250000.0	36.6968	-24.9322	-28.0705	-100.2021	

兼容 IERS2010 协议地球重力位与地面站点位移固体潮效应, 顺及体潮勒夫数的纬度依赖和频率相关性, 严密实现地面及固体地球外部全要素几何和物理大地测量固体潮效应算法统一, 天体引潮位计算时, 月球取6阶、太阳取3阶和太阳系地球外部行星取2阶。
 地面重力固体潮因子 $1 + (2h_{mm} - (n+1)k_{mm})/n$, 扰动重力固体潮因子 $1 - (n+1)k_{mm}/n$; 地倾斜固体潮因子 $1 + k_{mm} - h_{mm}$, 垂线偏差固体潮因子 $1 + k_{mm}$ 。
 通常 ΔC_m 主要由长期/长周期分期(周期大于半太阳月, $n=1, 2, \dots$) 构成; $\Delta C_m, \Delta S_m$ 主要由周日分期构成; $\Delta C_m, \Delta S_m$ 主要由半日分期构成, 更一般地, $\Delta C_m, \Delta S_m$ 主要由 $1/m$ 日分期构成。
 正常高固体潮效应(幅值约300mm)与大地高、大地水准面固体潮效应(幅值约600mm)异相(符号相反)。地面站点位置、地倾斜固体潮效应, 在东西方向上的幅度一般远大于南北方向。

[参数设置]输入文件记录中大地高、时间属性列序号, 选择影响类型(本例选择重力位、摄动力东北天系三分量、重力梯度东北天系三分量), 输入结果文件名。

[输出]头文件取输入文件头，输出文件记录在输入文件记录的基础上，增加用户选择要素的固体潮效应属性。

本例增加重力位摄动、摄动力东北天系三分量、重力梯度东北天系三分量固体潮效应共7个属性。



2.1.4 全要素固体潮效应全球预报

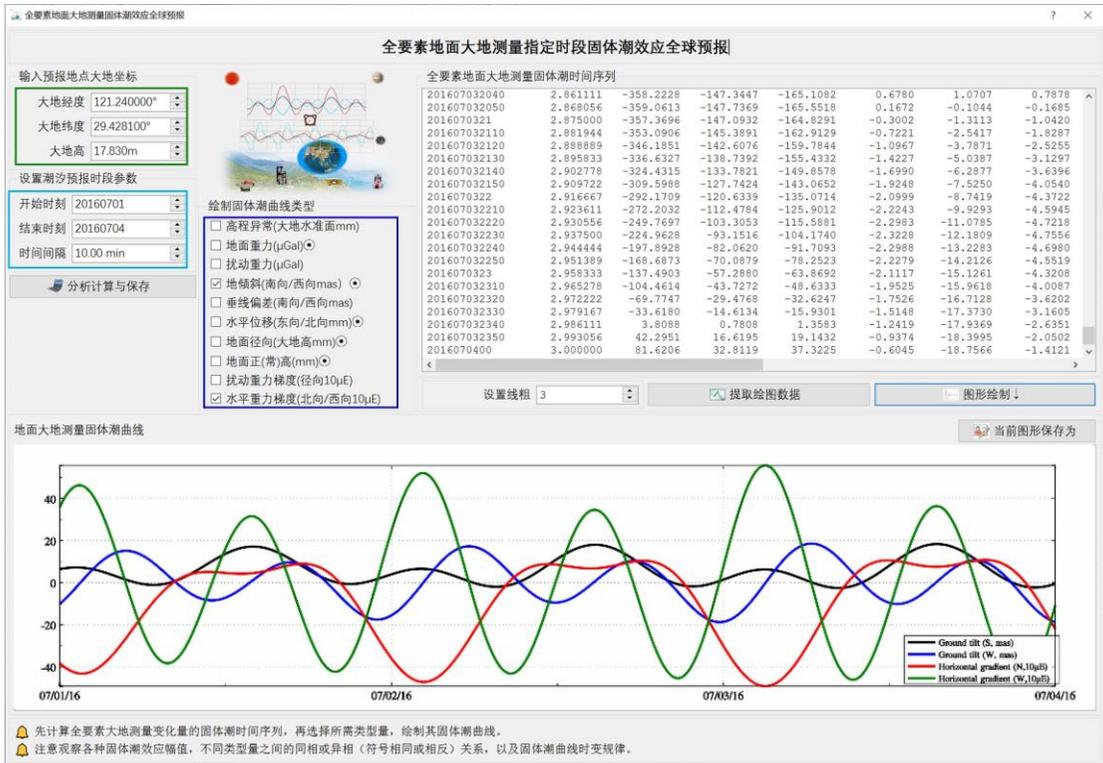
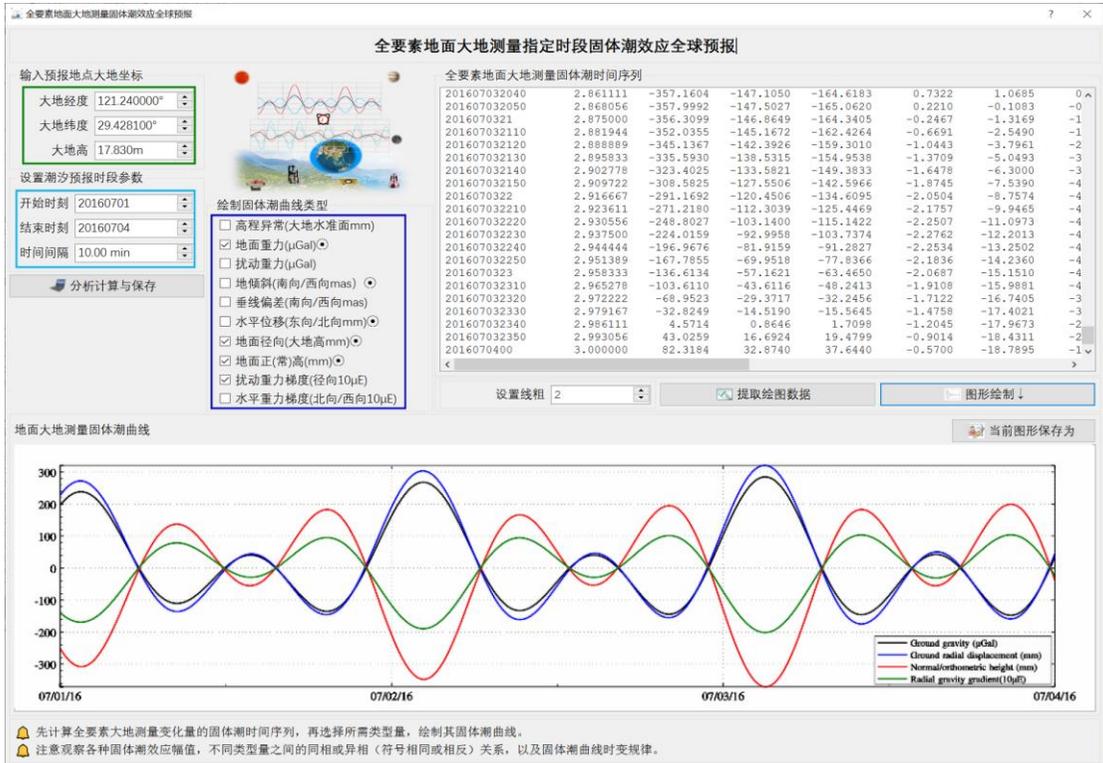
[功能]输入全球范围内任意地面站点的大地坐标，即经纬度（度小数）与大地高（m），设置起止时刻和时间间隔，实时预报该地面站点的固体潮效应时间序列，绘制固体潮效应预报曲线。

先计算全要素大地测量变化量的固体潮时间序列，再选择所需类型量，绘制其固体潮曲线。注意观察各种固体潮效应幅值，不同类型量之间的同相或异相（符号相同或相反）关系，以及固体潮曲线时变规律。

程序输出计算点固体潮效应时间序列文件。头文件占住一行，属性包括计算点的点名，经度，纬度（度小数），大地高（m），起算 MJD。从第二行起，每行记录第 1 列为系统格式时间，第 2 列与头文件最后 1 列之和为 MJD 天数，最后 14 列为全要素大地测量的固体潮效应。

后 14 列固体潮效应的大地测量要素分别是：高程异常（大地水准面 mm，第 3 列）、地面重力（ μGal ，第 4 列）、扰动重力（ μGal ）、地倾斜（SW 南向/西向 mas，第 6、7 列）、垂线偏差（SW 南向/西向 mas）、水平位移（EN 东向/北向 mm，第 10、11 列）、地面径向（大地高 mm）、地面正（常）高（mm）、扰动重力梯度（径向 $10\mu\text{E}$ ，第 14 列）或水平重力梯

度 (NW 北向/西向 10 μ E, 第 15、16 列)。



2.2 地面及固体地球外部海潮负荷效应球谐综合

[目标]利用全球海潮负荷球谐系数模型 (cm)，按球谐综合算法，由给定地点和时刻，计算地面各种大地测量观测量或参数的海潮负荷效应或固体地球外部空间的海潮摄动。这里的固体地球外部点泛指海洋、低空和卫星等不与地球固连的空间点。

海潮负荷位于海面，计算点相对海面的高度为正（常）高。程序采用默认的全球海潮负荷球谐系数模型。可在 ETideLoad4.5[地球物理模型与数值标准设置]程序中，指定其他海潮负荷球谐系数模型。

2.2.1 地面站点海潮负荷效应时间序列计算

[功能]输入地面站点时间序列文件，计算其高程异常(大地水准面 mm)、地面重力(μGal)、扰动重力(μGal)、地倾斜(SW南向/西向 mas)、垂线偏差(SW南向/西向 mas)、水平位移(EN东向/北向 mm)、地面径向(大地高 mm)、地面正(常)高(mm)、扰动重力梯度(径向 $10\mu\text{E}$)或水平重力梯度(NW北向/西向 $10\mu\text{E}$)的海潮负荷效应。

[输入]地面站点时间序列文件。

头文件占住一行，属性包括点名，经度，纬度(度小数)，高度(m，相对于海平面的高度)，起算 MJD (可选)，…。从第二行起，每行记录表示时序的一个历元时刻采样。

头文件的第2、3列约定为地面站点的经纬度

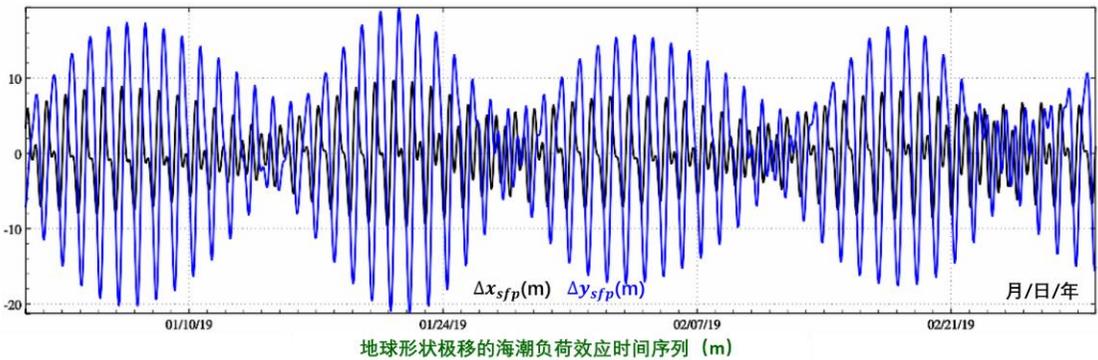
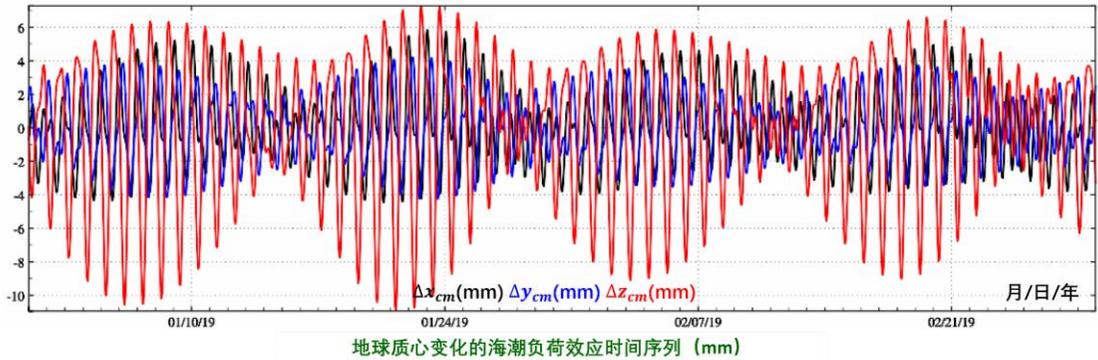
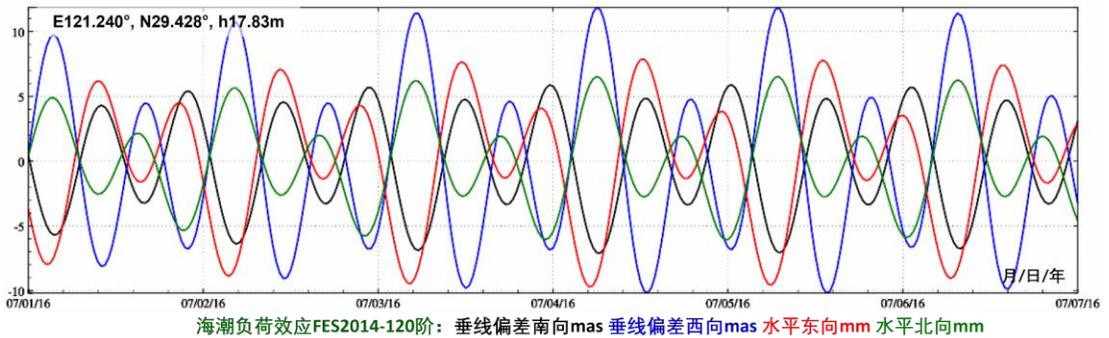
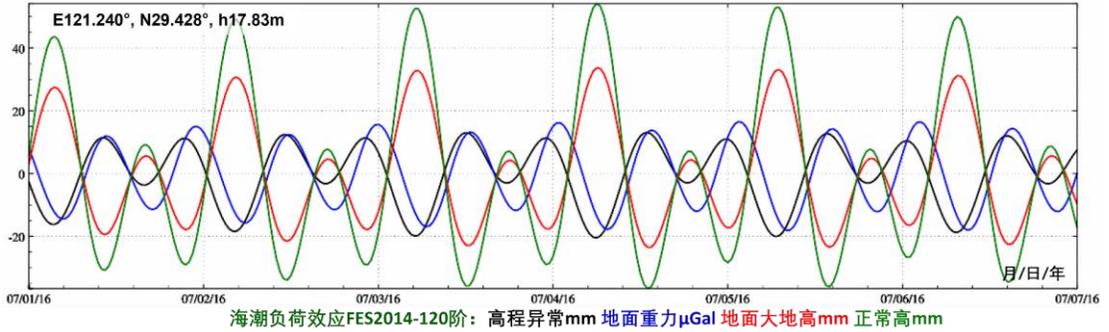
MYB	ID	230000	29.910000	147.218	58484.000000								
201901010000			0.000000		2.764	1.2449	-0.4035	-0.2017	0.3119	0.7195	0.1417		
201901010100			0.041667		2.778	0.6786	-0.0160	0.0865	0.0386	0.4860	0.0561		
201901010200			0.083333		2.762	-0.0187	0.3381	0.2949	-0.2772	0.0904	-0.0527		
201901010300			0.125000		2.724	-0.6942	0.5578	0.3546	-0.5436	-0.3852	-0.1519		
201901010400			0.166667		2.675	-1.2004	0.5705	0.2303	-0.6808	-0.8446	-0.2105		
201901010500			0.208333		2.626	-1.4330	0.3625	-0.0583	-0.6405	-1.1972	-0.2077		
201901010600			0.250000		2.582	-1.3553	-0.0107	-0.4348	-0.4154	-1.3708	-0.1373		
201901010700			0.291667		2.546	-1.0049	-0.4424	-0.7884	-0.0401	-1.3213	-0.0094		
201901010800			0.333333		2.517	-0.4812	-0.8120	-1.0129	0.4151	-1.0448	0.1517		
201901010900			0.375000		2.489	0.0810	-1.0222	-1.0406	0.8559	-0.5867	0.3120		
201901011000			0.416667		2.455	0.5431	-1.0201	-0.8566	1.1832	-0.0393	0.4345		
201901011100			0.458333		2.410	0.7952	-0.8001	-0.4928	1.3166	0.4798	0.4884		
201901011200			0.500000		2.354	0.7812	-0.3975	-0.0132	1.2170	0.8626	0.4572		
201901011300			0.541667		2.288	0.5139	0.1160	0.4977	0.8994	1.0434	0.3435		
201901011400			0.583333		2.223	0.0727	0.6388	0.9443	0.4295	1.0138	0.1690		
201901011500			0.625000		2.169	-0.4157	1.0545	1.2327	-0.0942	0.8159	-0.0313		

[参数设置]输入头文件中正(常)高列序号，记录中时间属性列序号，选择影响类型(本例全选)，输入海潮球谐系数模型最大计算阶数。

球谐系数模型最大计算阶数: 程序自动选择海潮负荷球谐系数模型最大阶数和输入最大

阶数中的最小值作为计算阶数。

[输出]头文件取输入文件头，文件记录在输入文件记录的基础上，增加用户选择要素的海潮负荷效应，本例全选，共 14 列属性。



程序在当前目录下还输出一、二阶位系数、地球质心变化和形状极移海潮负荷效应时间

序列文件*Otdcmsfpm.txt。*为输入文件名，这是一个系统内部测试文件。

头文件占住一行，记录格式：系统格式时间，8列一、二阶规格化位系数海潮负荷效应 $\Delta\bar{C}_{10}, \Delta\bar{C}_{11}, \Delta\bar{S}_{11}, \Delta\bar{C}_{20}, \Delta\bar{C}_{21}, \Delta\bar{S}_{21}, \Delta\bar{C}_{22}, \Delta\bar{S}_{22}$ ($\times 10^{-10}$)，3列地球质心变化海潮负荷效应 $\Delta x_{cm}, \Delta y_{cm}, \Delta z_{cm}$ (单位 mm)，2列形状极移海潮负荷效应 $\Delta x_{sfp}, \Delta y_{sfp}$ (地固空间直角坐标系 x 方向/y 方向，单位 m)。

2.2.2 给定时间位置地面海潮负荷效应计算

[功能]输入带观测时间的若干计算点坐标文件，计算高程异常(大地水准面 mm)、地面重力 (μGal)、扰动重力 (μGal)、地倾斜 (SW 南向/西向 mas)、垂线偏差 (SW 南向/西向 mas)、水平位移 (EN 东向/北向 mm)、地面径向 (大地高 mm)、地面正(常)高 (mm)、扰动重力梯度 (径向 $10\mu\text{E}$) 或水平重力梯度 (NW 北向/西向 $10\mu\text{E}$) 的海潮负荷效应。¹⁰

[输入]带观测时间的若干地面点坐标文件。

头文件占住一行。从第二行起，每行记录的第 2、3 个属性约定为经度、纬度(度小数)，记录中存在采样历元时间和正(常)高属性。

[参数设置]输入文件记录中正(常)高、时间属性列序号，球谐系数模型最大计算阶数，选择影响类型(本例选择高程异常、扰动重力和重力梯度)，输入结果文件名。

球谐系数模型最大计算阶数：程序自动选择海潮负荷球谐系数模型最大阶数和输入最大阶数中的最小值作为计算阶数。

[输出]头文件取输入文件头，输出文件记录在输入文件记录的基础上，增加用户选择要

素的海潮负荷效应属性。本例增加 3 列属性。

地面重力负荷潮因子 $1+(2h'_n-(n+1)k'_n)/n$ ，扰动重力负荷潮因子 $1-(n+1)k'_n/n$ ；地倾斜负荷潮因子 $1+k'_n-h'_n$ ，垂线偏差负荷潮因子 $1+k'_n$ 。

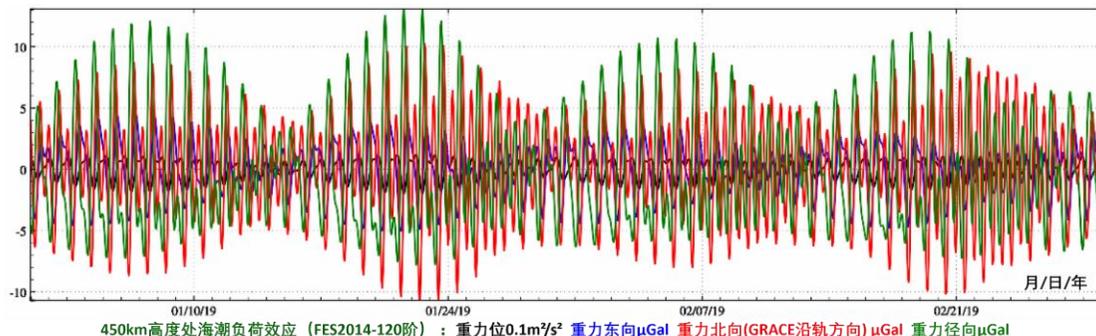
与固体潮效应不同，正常高负荷效应与大地高负荷效应同相，正常高海潮负荷效应的幅值约为大地高海潮负荷幅值的 1.75 倍。

2.2.3 固体地球外部及卫星海潮摄动计算

[功能]输入带观测时间的固体地球外部点坐标文件，计算空间直角坐标系或球坐标系中的重力位 ($0.1m^2/s^2$)、重力 (μGal) 或重力梯度 ($10\mu E$) 的海潮负荷效应。

记录的第 2、3 列约定为卫星轨道的经纬度

Time	Longitude	Latitude	Gravity Potential	Gravity East	Gravity North	Gravity Radial
201901010000	150.24	32.42	4500000.0	0.7444	1.6041	3.9139
201901010100	150.24	32.42	4500000.0	0.7999	0.8529	2.4651
201901010200	150.24	32.42	4500000.0	0.7549	-0.2592	0.2211
201901010300	150.24	32.42	4500000.0	0.6080	-1.5493	-2.3289
201901010400	150.24	32.42	4500000.0	0.3759	-2.7710	-4.6045
201901010500	150.24	32.42	4500000.0	0.0916	-3.6773	-6.0758
201901010600	150.24	32.42	4500000.0	-0.2027	-4.0858	-6.3917
201901010700	150.24	32.42	4500000.0	-0.4630	-3.9221	-5.4614
201901010800	150.24	32.42	4500000.0	-0.6524	-3.2299	-3.4721
201901010900	150.24	32.42	4500000.0	-0.7490	-2.1497	-0.8436
201901011000	150.24	32.42	4500000.0	-0.7489	-0.8817	1.8682
201901011100	150.24	32.42	4500000.0	-0.6658	0.3556	4.0972
201901011200	150.24	32.42	4500000.0	-0.5263	1.3653	5.3969
201901011300	150.24	32.42	4500000.0	-0.3625	2.0089	5.5450
201901011400	150.24	32.42	4500000.0	-0.2043	2.2382	4.5949
201901011500	150.24	32.42	4500000.0	-0.0734	2.1071	2.8596
201901011600	150.24	32.42	4500000.0	0.0213	1.7555	0.8279



[输入]带观测时间的固体地球外部点坐标文件。

头文件占住一行。从第二行起，每行记录的第 2、3 个属性约定为经度、纬度 (度小数)，

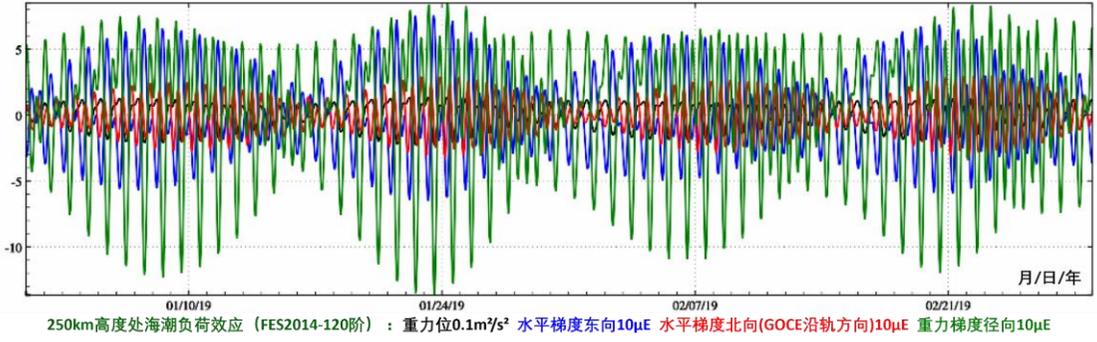
记录中存在时间和大地高属性。

[参数设置]输入文件记录中大地高、时间属性列序号，选择影响类型（本例选择重力扰动、摄动力东北天系三分量、重力梯度东北天系三分量），输入球谐系数模型最大计算阶数和结果文件名。

[输出]头文件取输入文件头，输出文件记录在输入文件记录的基础上，增加用户选择要素的海潮负荷效应属性。本例增加 7 列属性。

记录的 2、3 列约定为卫星轨道的经纬度

Time	Longitude	Latitude	Height	Gravity Perturbation X	Gravity Perturbation Y	Gravity Perturbation Z	Gravity Gradient X	Gravity Gradient Y	Gravity Gradient Z
201901010000	150.24	32.42	250000.0	0.8435	-3.1343	-0.4754	4.6954		
201901010100	150.24	32.42	250000.0	0.9145	-3.7011	-0.1189	5.6509		
201901010200	150.24	32.42	250000.0	0.8695	-3.6880	0.2258	5.7112		
201901010300	150.24	32.42	250000.0	0.7055	-3.0735	0.4697	4.7961		
201901010400	150.24	32.42	250000.0	0.4411	-1.9488	0.5537	3.0198		
201901010500	150.24	32.42	250000.0	0.1140	-0.5114	0.4577	0.6785		
201901010600	150.24	32.42	250000.0	-0.2265	0.9654	0.2028	-1.8019		
201901010700	150.24	32.42	250000.0	-0.5288	2.1943	-0.1519	-3.9573		
201901010800	150.24	32.42	250000.0	-0.7494	2.9501	-0.5179	-5.3966		
201901010900	150.24	32.42	250000.0	-0.8618	3.1325	-0.7957	-5.8975		
201901011000	150.24	32.42	250000.0	-0.8614	2.7862	-0.9002	-5.4542		
201901011100	150.24	32.42	250000.0	-0.7640	2.0733	-0.7866	-4.2611		
201901011200	150.24	32.42	250000.0	-0.6007	1.2148	-0.4660	-2.6473		
201901011300	150.24	32.42	250000.0	-0.4093	0.4302	-0.0033	-0.9985		
201901011400	150.24	32.42	250000.0	-0.2255	-0.1080	0.5019	0.3769		
201901011500	150.24	32.42	250000.0	-0.0749	-0.3028	0.9415	1.2146		
201901011600	150.24	32.42	250000.0	0.0314	-0.1503	1.2233	1.4400		



2.2.4 全要素海潮负荷效应全球预报

[功能]输入全球范围内任意地面站点的大地坐标，即经纬度（度小数）与大地高（m），设置起止时刻和时间间隔，实时预报该地面站点高程异常（大地水准面 mm）、地面重力（ μGal ）、扰动重力（ μGal ）、地倾斜（SW 南向/西向 mas）、垂线偏差（SW 南向/西向 mas）、水平位移（EN 东向/北向 mm）、地面径向（大地高 mm）、地面正（常）高（mm）、扰动重

力梯度（径向 $10\mu\text{E}$ ）或水平重力梯度（NW 北向/西向 $10\mu\text{E}$ ）的海潮负荷效应时间序列，绘制海潮负荷效应预报曲线。

先计算全要素大地测量的海潮负荷效应时序列，再选择所需类型量，绘制其海潮负荷效应曲线。

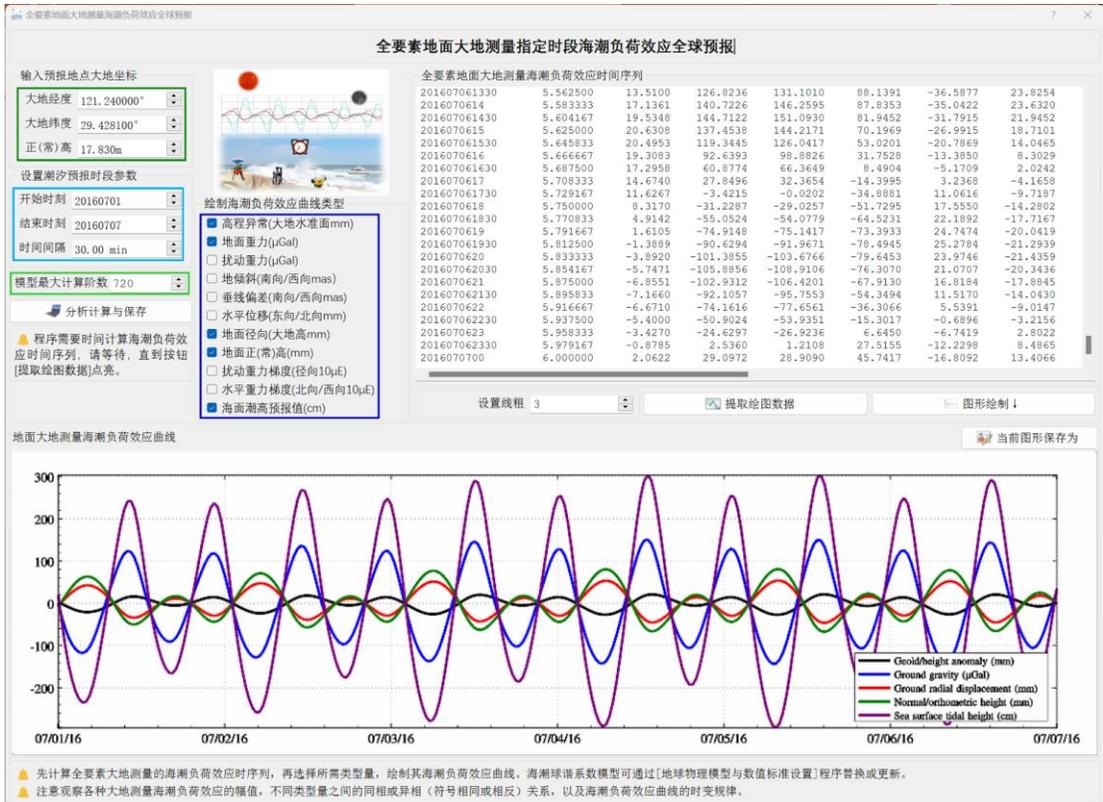
程序的计算速度，取决于海潮负荷球谐系数模型的阶数和分潮数量。

注意观察各种大地测量海潮负荷效应的幅值，不同类型量之间的同相或异相（符号相同或相反）关系，以及海潮负荷效应曲线的时变规律。

全球海潮负荷球谐系数模型（cm）采用 FES2004 格式，可由全球潮高调和常数格网模型，调用[全球海洋潮高调和常数格网球谐分析]程序构造。

程序输出计算点海潮负荷效应时间序列文件。头文件占住一行，属性包括计算点的点名，经度，纬度（度小数），大地高（m），起算 MJD。从第二行起，每行记录第 1 列为系统格式时间，第 2 列与头文件最后 1 列之和为 MJD 天数，最后 14 列为全要素大地测量的海潮负荷效应。

后 14 列海潮负荷效应的大地测量要素分别是：高程异常（大地水准面 mm，第 3 列）、地面重力（ μGal ，第 4 列）、扰动重力（ μGal ）、地倾斜（SW 南向/西向 mas，第 6、7 列）、垂线偏差（SW 南向/西向 mas）、水平位移（EN 东向/北向 mm，第 10、11 列）、地面径向（大地高 mm）、地面正（常）高（mm）、扰动重力梯度（径向 $10\mu\text{E}$ ，第 14 列）或水平重力梯度（NW 北向/西向 $10\mu\text{E}$ ，第 15、16 列）。



全要素地面大地测量海潮负荷效应全球预报

全要素地面大地测量指定时段海潮负荷效应全球预报

输入预报地点大地坐标

大地经度 121.240000°
 大地纬度 29.428100°
 正(常)高 17.830m

设置潮汐预报时段参数

开始时刻 20160701
 结束时刻 20160707
 时间间隔 30.00 min

模型最大计算阶数 720

分析计算与保存

程序需要时间计算海潮负荷效应时间序列, 请等待, 直到按钮[提取绘图数据]点亮。

绘制海潮负荷效应曲线类型

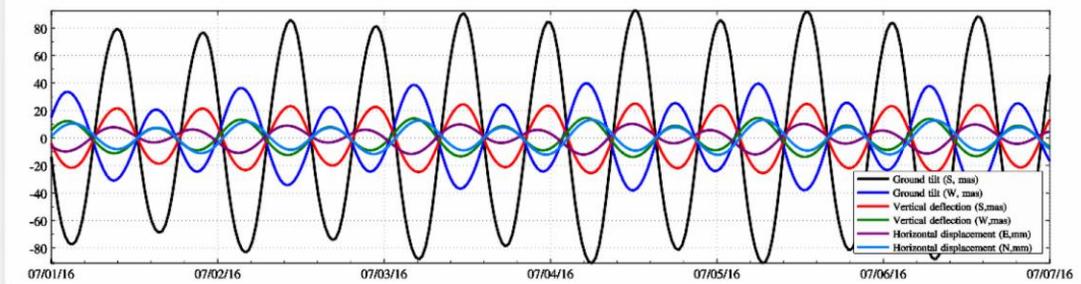
- 高程异常(大地水准面mm)
- 地面重力(μGal)
- 扰动重力(μGal)
- 地倾斜(南向/西向mas)
- 垂线偏差(南向/西向mas)
- 水平位移(东向/北向mm)
- 地面径向(大地高mm)
- 地面正(常)高(mm)
- 扰动重力梯度(径向 $10\mu\text{E}$)
- 水平重力梯度(北向/西向 $10\mu\text{E}$)
- 海面潮高预报值(cm)

全要素地面大地测量海潮负荷效应时间序列

201607061330	5.562500	13.5100	126.8236	131.1010	88.1391	-36.5877	23.8254
2016070614	5.583333	17.1361	140.7226	146.2595	87.8353	-35.0422	23.6320
201607061430	5.604167	19.5348	144.7122	151.0930	81.9452	-31.7915	21.9452
2016070615	5.625000	20.6308	137.4538	144.2171	70.1969	-26.9915	18.7101
201607061530	5.645833	20.4953	119.3445	126.0417	53.0201	-20.7869	14.0465
2016070616	5.666667	19.3083	92.6393	98.8826	31.7528	-13.3850	8.3029
201607061630	5.687500	17.2958	60.8774	66.3649	8.4904	-5.1709	2.0242
2016070617	5.708333	14.6740	27.8496	32.3654	-14.3995	3.2368	-4.1658
201607061730	5.729167	11.6267	-3.4215	-0.0202	-34.8881	11.0616	-9.7187
2016070618	5.750000	8.3170	-31.2287	-29.0257	-51.7295	17.5550	-14.2802
201607061830	5.770833	4.9142	-55.0524	-54.0779	-64.5231	22.1892	-17.7167
2016070619	5.791667	1.6105	-74.9148	-75.1417	-73.3933	24.7474	-20.0419
201607061930	5.812500	-1.3889	-90.6294	-91.9671	-78.4945	25.2784	-21.2939
2016070620	5.833333	-3.8920	-101.3855	-103.6766	-79.6453	23.9746	-21.4359
201607062030	5.854167	-5.7471	-105.8856	-108.9106	-76.3070	21.0707	-20.3436
2016070621	5.875000	-6.8551	-102.9312	-106.4201	-67.9130	16.8184	-17.8845
201607062130	5.895833	-7.1660	-92.1057	-95.7553	-54.3494	11.5170	-14.0430
2016070622	5.916667	-6.6710	-74.1616	-77.6561	-36.3066	5.5391	-9.0147
201607062230	5.937500	-5.4000	-50.9024	-53.9351	-15.3017	-0.6896	-3.2156
2016070623	5.958333	-3.4270	-24.6297	-26.9236	6.6450	-6.7419	2.8022
201607062330	5.979167	-0.8785	2.5360	1.2108	27.5155	-12.2298	8.4865
2016070700	6.000000	2.0622	29.0972	28.9090	45.7417	-16.8092	13.4066

设置线组 3 提取绘图数据 图形绘制 4

地面大地测量海潮负荷效应曲线



先计算全要素大地测量的海潮负荷效应时间序列, 再选择所需类型量, 绘制其海潮负荷效应曲线。海潮球谐系数模型可通过[地球物理模型与数值标准设置]程序替换或更新。
 注意观察各种大地测量海潮负荷效应的幅值, 不同类型量之间的同相或异相(符号相同或相反)关系, 以及海潮负荷效应曲线的时变规律。

全要素地面大地测量海潮负荷效应全球预报

全要素地面大地测量指定时段海潮负荷效应全球预报

输入预报地点大地坐标

大地经度 121.240000°
 大地纬度 29.428100°
 正(常)高 17.830m

设置潮汐预报时段参数

开始时刻 20160701
 结束时刻 20160707
 时间间隔 30.00 min

模型最大计算阶数 720

分析计算与保存

程序需要时间计算海潮负荷效应时间序列, 请等待, 直到按钮[提取绘图数据]点亮。

绘制海潮负荷效应曲线类型

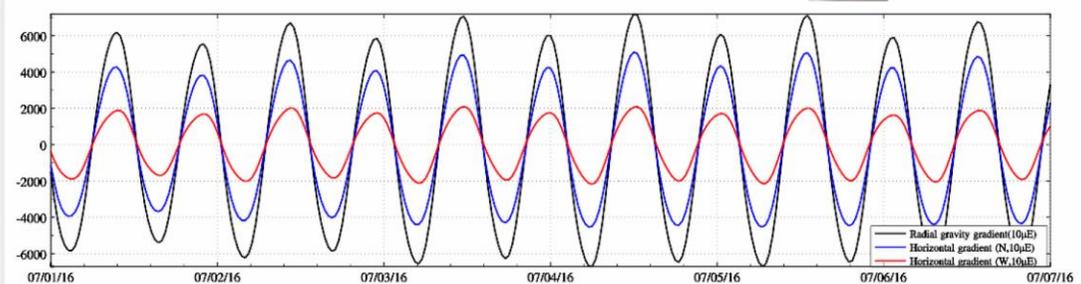
- 高程异常(大地水准面mm)
- 地面重力(μGal)
- 扰动重力(μGal)
- 地倾斜(南向/西向mas)
- 垂线偏差(南向/西向mas)
- 水平位移(东向/北向mm)
- 地面径向(大地高mm)
- 地面正(常)高(mm)
- 扰动重力梯度(径向 $10\mu\text{E}$)
- 水平重力梯度(北向/西向 $10\mu\text{E}$)
- 海面潮高预报值(cm)

全要素地面大地测量海潮负荷效应时间序列

201607061330	5.562500	13.5100	126.8236	131.1010	88.1391	-36.5877	23.8254
2016070614	5.583333	17.1361	140.7226	146.2595	87.8353	-35.0422	23.6320
201607061430	5.604167	19.5348	144.7122	151.0930	81.9452	-31.7915	21.9452
2016070615	5.625000	20.6308	137.4538	144.2171	70.1969	-26.9915	18.7101
201607061530	5.645833	20.4953	119.3445	126.0417	53.0201	-20.7869	14.0465
2016070616	5.666667	19.3083	92.6393	98.8826	31.7528	-13.3850	8.3029
201607061630	5.687500	17.2958	60.8774	66.3649	8.4904	-5.1709	2.0242
2016070617	5.708333	14.6740	27.8496	32.3654	-14.3995	3.2368	-4.1658
201607061730	5.729167	11.6267	-3.4215	-0.0202	-34.8881	11.0616	-9.7187
2016070618	5.750000	8.3170	-31.2287	-29.0257	-51.7295	17.5550	-14.2802
201607061830	5.770833	4.9142	-55.0524	-54.0779	-64.5231	22.1892	-17.7167
2016070619	5.791667	1.6105	-74.9148	-75.1417	-73.3933	24.7474	-20.0419
201607061930	5.812500	-1.3889	-90.6294	-91.9671	-78.4945	25.2784	-21.2939
2016070620	5.833333	-3.8920	-101.3855	-103.6766	-79.6453	23.9746	-21.4359
201607062030	5.854167	-5.7471	-105.8856	-108.9106	-76.3070	21.0707	-20.3436
2016070621	5.875000	-6.8551	-102.9312	-106.4201	-67.9130	16.8184	-17.8845
201607062130	5.895833	-7.1660	-92.1057	-95.7553	-54.3494	11.5170	-14.0430
2016070622	5.916667	-6.6710	-74.1616	-77.6561	-36.3066	5.5391	-9.0147
201607062230	5.937500	-5.4000	-50.9024	-53.9351	-15.3017	-0.6896	-3.2156
2016070623	5.958333	-3.4270	-24.6297	-26.9236	6.6450	-6.7419	2.8022
201607062330	5.979167	-0.8785	2.5360	1.2108	27.5155	-12.2298	8.4865
2016070700	6.000000	2.0622	29.0972	28.9090	45.7417	-16.8092	13.4066

设置线组 2 提取绘图数据 图形绘制 4

地面大地测量海潮负荷效应曲线



先计算全要素大地测量的海潮负荷效应时间序列, 再选择所需类型量, 绘制其海潮负荷效应曲线。海潮球谐系数模型可通过[地球物理模型与数值标准设置]程序替换或更新。
 注意观察各种大地测量海潮负荷效应的幅值, 不同类型量之间的同相或异相(符号相同或相反)关系, 以及海潮负荷效应曲线的时变规律。

2.3 地面及固体地球外部大气潮负荷球谐综合

[目标]采用与海潮负荷效应完全相同的负荷勒夫数与球谐综合方法，由全球地面大气压潮负荷球谐系数模型 (hPa)，计算地面各种大地测量参数的大气压潮负荷效应或固体地球外部空间的大气压潮负荷效应。

计算大气压潮负荷间接影响时，程序假设大气压负荷集中于地面，要求计算点高度 h 为点位相对于地面的高度。计算重力、扰动重力、扰动重力梯度大气压潮负荷直接影响时，假设地面高度 h 处大气压 P_h 与地面大气压 P_0 存在比例关系 $(1-h/44330)^{5.225}$ 。

2.3.1 地面站点大气压潮负荷效应时间序列计算

[功能]输入地面站点时间序列文件，按球谐综合算法，计算其高程异常(大地水准面 mm)、地面重力 (μGal)、扰动重力 (μGal)、地倾斜 (SW 南向/西向 mas)、垂线偏差 (SW 南向/西向 mas)、水平位移 (EN 东向/北向 mm)、地面径向(大地高 mm)、地面正(常)高(mm)、扰动重力梯度(径向 $10\mu\text{E}$)或水平重力梯度(NW 北向/西向 $10\mu\text{E}$)的大气压潮负荷效应。

[输入]地面站点时间序列文件。

头文件占住一行，属性包括点名，经度，纬度(度小数)，高度(m，相对于地面/海平面的高度，简称地面高度)，起算 MJD(可选)，…。从第二行起，每行记录表示时序的一个历元时刻采样。

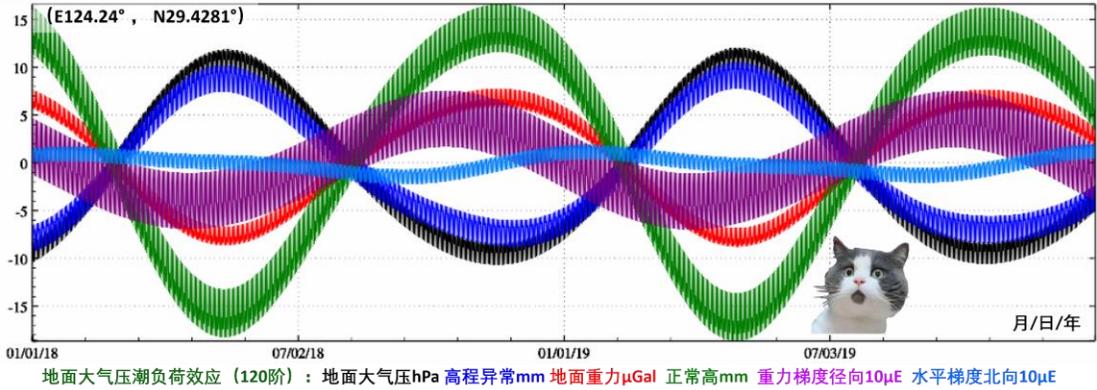
头文件的第2、3列约定为地面站点的经纬度

Forces	121.2450000	22.4281000	0.0000	58119.000000									
2018010100	0.000000	-8.6691	-7.9206	6.3697	4.9036	0.8431	-0.5672	0.3648	-0.2596				
2018010103	0.125000	-8.2147	-7.1096	6.8940	4.5888	0.8537	-0.2702	0.3702	-0.1412				
2018010106	0.250000	-9.1342	-7.3395	6.5245	5.1688	0.7244	-0.1673	0.3216	-0.0971				
2018010109	0.375000	-9.1453	-7.1337	6.5116	5.1977	0.6881	-0.2389	0.3091	-0.1186				
2018010112	0.500000	-8.2336	-6.5034	5.7666	4.5417	0.7813	-0.2378	0.3494	-0.1009				
2018010115	0.625000	-8.6656	-7.1527	6.0979	4.7569	0.7905	-0.2430	0.3563	-0.0895				
2018010118	0.750000	-10.1846	-8.8031	7.3996	5.7968	0.6932	-0.4551	0.3159	-0.1800				
2018010121	0.875000	-10.1570	-9.1459	7.5287	5.8738	0.7033	-0.6698	0.3135	-0.2871				
2018010200	1.000000	-8.5912	-7.8709	6.3132	4.8559	0.8303	-0.5563	0.3596	-0.2550				
2018010203	1.125000	-8.1364	-7.0595	5.8372	4.5108	0.8409	-0.2593	0.3649	-0.1365				
2018010206	1.250000	-9.0554	-7.2889	6.4674	5.1205	0.7116	-0.1564	0.3163	-0.0925				
2018010209	1.375000	-9.0660	-7.0827	6.4542	5.1491	0.6752	-0.2280	0.3039	-0.1139				
2018010212	1.500000	-8.1539	-6.4520	5.7088	4.4930	0.7683	-0.2269	0.3441	-0.0963				
2018010215	1.625000	-8.5854	-7.1009	6.0398	4.7078	0.7775	-0.2320	0.3510	-0.0839				
2018010218	1.750000	-10.1040	-8.7509	7.3411	5.7475	0.6801	-0.4441	0.3106	-0.1753				
2018010221	1.875000	-10.0760	-9.0933	7.4699	5.8243	0.6902	-0.6588	0.3082	-0.2824				
2018010300	2.000000	-8.5097	-7.8178	6.2541	4.8061	0.8172	-0.5452	0.3543	-0.2503				
2018010303	2.125000	-8.0545	-7.0060	5.7778	4.4608	0.8277	-0.2482	0.3596	-0.1319				

[参数设置]输入头文件中地面高度列序号，记录中时间属性列序号，选择影响类型(本

例选择高程异常、地面重力、地面径向和扰动重力梯度), 输入结果文件名。

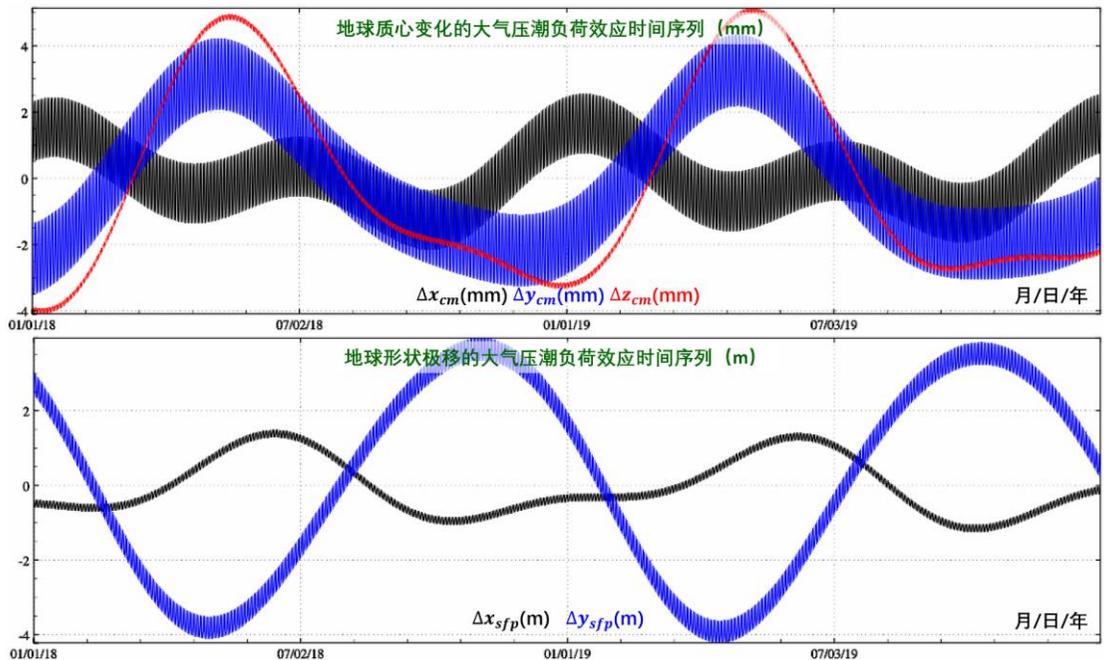
[输出]头文件取输入文件头, 记录在输入文件记录的基础上, 增加用户选择要素的大气压潮负荷效应。本例全选, 增加 14 列属性。



全球地面大气压潮负荷球谐系数模型 (hPa) 采用 FES2004 格式, 可由全球地面大气压潮调和常数格网模型, 调用[全球潮汐调和常数格网球谐分析]程序构造。调用程序[地球物理模型与数值标准设置], 可更换其他大气压潮负荷球谐系数模型。

程序在当前目录下还输出一、二阶位系数、地球质心变化和形状极移大气压潮负荷效应时间序列文件*Atdcmsfptm.txt。*为输入文件名, 这是一个系统内部测试文件。

头文件占住一行, 记录格式: 系统格式时间, 8 列一、二阶规格化位系数大气压潮负荷效应 $\Delta\bar{C}_{10}, \Delta\bar{C}_{11}, \Delta\bar{S}_{11}, \Delta\bar{C}_{20}, \Delta\bar{C}_{21}, \Delta\bar{S}_{21}, \Delta\bar{C}_{22}, \Delta\bar{S}_{22}$ ($\times 10^{-10}$), 3 列地球质心变化大气压潮负荷效应 $\Delta x_{cm}, \Delta y_{cm}, \Delta z_{cm}$ (单位 mm), 2 列形状极移大气压潮负荷效应 $\Delta x_{sfp}, \Delta y_{sfp}$ (地固空间直角坐标系 x 方向/y 方向, 单位 m)。



2.3.2 给定时间位置地面大气压潮负荷效应计算

[功能]输入带观测时间的若干计算点坐标文件，计算高程异常（大地水准面 mm）、地面重力（ μGal ）、扰动重力（ μGal ）、地倾斜（SW 南向/西向 mas）、垂线偏差（SW 南向/西向 mas）、水平位移（EN 东向/北向 mm）、地面径向（大地高 mm）、地面正（常）高（mm）、扰动重力梯度（径向 $10\mu\text{E}$ ）或水平重力梯度（NW 北向/西向 $10\mu\text{E}$ ）的大气压潮负荷效应。

[输入]带观测时间的若干计算点坐标文件。

头文件占住一行。从第二行起，每行记录的第 2、3 个属性约定为经度、纬度（度小数），记录中存在采样历元时间和高度属性。

[参数设置]输入文件记录中高度、时间属性列序号，选择影响类型（本例选择高程异常、地面重力、地面径向和扰动重力梯度），输入结果文件名。

[输出]头文件取输入文件头，输出文件记录在输入文件记录的基础上，增加用户选择要素的大气压潮负荷效应属性。本例增加高程异常、地面重力、地面径向和扰动重力梯度大气压潮负荷效应共 4 列属性。

The screenshot shows the software interface for calculating atmospheric tide load effects. Key elements include:

- Calculation Parameters:** Calculation time is set to 2024-05-07 11:20:06. The calculation result file is named 'C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/ATideLoadharmSynth/Postionta.txt'.
- Input File:** The input file is 'C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/ATideLoadharmSynth/Postionta.txt'.
- Calculation Results:** A table of results is displayed, with columns for time, coordinates, and various load parameters. The table is annotated with a box indicating that the 2nd and 3rd columns of the data rows are longitude and latitude.

Time	Longitude	Latitude	Height	Other
201901010000	101.230000	29.910000	0.0	0.000000	-6.1907	2.5717	3.5475	-9.4853
201901010100	101.230000	29.910000	0.0	0.041667	-5.4420	1.6589	2.5960	-10.9735
201901010200	101.230000	29.910000	0.0	0.083333	-4.7521	0.8907	1.7860	-12.0577
201901010300	101.230000	29.910000	0.0	0.125000	-4.2262	0.3464	1.2609	-12.7221
201901010400	101.230000	29.910000	0.0	0.166667	-3.9154	0.0949	1.0831	-13.0547
201901010500	101.230000	29.910000	0.0	0.208333	-3.8085	0.0912	1.2227	-13.2054
201901010600	101.230000	29.910000	0.0	0.250000	-3.8423	0.2432	1.5705	-13.3297
201901010700	101.230000	29.910000	0.0	0.291667	-3.9239	0.4320	1.9725	-13.5330
201901010800	101.230000	29.910000	0.0	0.333333	-3.9617	0.5498	2.2748	-13.8331
201901010900	101.230000	29.910000	0.0	0.375000	-3.8947	0.5321	2.3683	-14.1504
201901011000	101.230000	29.910000	0.0	0.416667	-3.7117	0.3775	2.2195	-14.3284
201901011100	101.230000	29.910000	0.0	0.458333	-3.4571	0.1485	1.8803	-14.1812
201901011200	101.230000	29.910000	0.0	0.500000	-3.2184	-0.0471	1.4729	-13.5518
201901011300	101.230000	29.910000	0.0	0.541667	-3.1018	-0.0875	1.1551	-12.3677
201901011400	101.230000	29.910000	0.0	0.583333	-3.2011	0.1248	1.0745	-10.6768
201901011500	101.230000	29.910000	0.0	0.625000	-3.5674	0.6318	1.3248	-8.6523
201901011600	101.230000	29.910000	0.0	0.666667	-4.1910	1.4011	1.9156	-6.5654
201901011700	101.230000	29.910000	0.0	0.708333	-4.9973	2.3286	2.7645	-4.7311
201901011800	101.230000	29.910000	0.0	0.750000	-5.8605	3.2583	3.7142	-3.4398

程序默认的 360 阶大气压潮负荷球谐系数模型 ECMWF2006.dat，包含了半年与年周期分潮。采用该模型计算大气潮负荷效应，即使不考虑非潮汐大气负荷效应，也能将大地测量观测或参数的大气负荷效应控制在 1cm 精度水平。

大气压潮年周期振幅是周日振幅的 10 倍以上。在大陆地区，大气压冬高夏低，导致地

面冬季下降、夏季抬升，产生年、半年的周期性地面垂直形变，在厘米级大地测量中应予以顾及。

2.3.3 固体地球外部及卫星大气压潮摄动计算

[功能]输入带观测时间的固体地球外部点坐标文件，计算空间直角坐标系或球坐标系中的重力位 ($0.1\text{m}^2/\text{s}^2$)、重力 (μGal) 或重力梯度 ($10\mu\text{E}$) 的大气压潮摄动。

[输入]带观测时间的固体地球外部点坐标文件。

头文件占住一行。从第二行起，每行记录的第 2、3 个属性约定为经度、纬度 (度小数)，记录中存在采样历元时间和高度属性。

记录的2、3列约定为卫星轨道的经纬度

GRACE重力卫星轨道高度

北向/GRACE卫星沿轨方向/高低跟踪方向

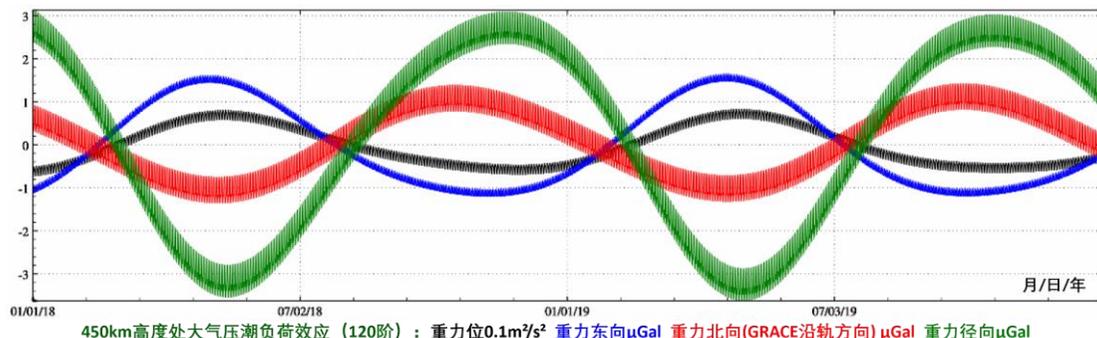
Forecast	121.2400	29.4281	450000.0	58119.00	-0.6276	-1.1288	0.4650	2.6999
2018010104	121.2400	29.4281	450000.0	-0.5577	-1.1084	0.4650	2.5272	
2018010108	121.2400	29.4281	450000.0	-0.5675	-0.9437	0.5120	2.6709	
2018010112	121.2400	29.4281	450000.0	-0.5035	-1.1052	0.4518	2.3798	
2018010116	121.2400	29.4281	450000.0	-0.6052	-1.1231	0.3106	2.6774	
2018010120	121.2400	29.4281	450000.0	-0.7372	-0.9749	0.8376	3.1311	
2018010124	121.2400	29.4281	450000.0	-0.6238	-1.1147	0.9249	2.6797	
2018010204	121.2400	29.4281	450000.0	-0.5539	-1.0942	0.4514	2.5067	
2018010208	121.2400	29.4281	450000.0	-0.5636	-0.9294	0.4984	2.6503	
2018010212	121.2400	29.4281	450000.0	-0.4996	-1.0908	0.4382	2.3591	
2018010216	121.2400	29.4281	450000.0	-0.6012	-1.1086	0.2970	2.4564	
2018010220	121.2400	29.4281	450000.0	-0.7332	-0.9604	0.8239	3.1109	
2018010224	121.2400	29.4281	450000.0	-0.6198	-1.1000	0.9112	2.4583	
2018010304	121.2400	29.4281	450000.0	-0.5498	-1.0795	0.4376	2.4852	
2018010308	121.2400	29.4281	450000.0	-0.5595	-0.9146	0.4846	2.6286	
2018010312	121.2400	29.4281	450000.0	-0.4954	-1.0759	0.4244	2.3372	
2018010316	121.2400	29.4281	450000.0	-0.5970	-1.0937	0.2832	2.6343	
2018010320	121.2400	29.4281	450000.0	-0.7269	-0.9453	0.8100	3.0877	
2018010324	121.2400	29.4281	450000.0	-0.6154	-1.0849	0.9023	2.6365	

计算大气压潮负荷间接影响时，程序假设大气压负荷集中于地面，要求计算点高度h为点位相对于地面的高度。计算重力、扰动重力、扰动重力梯度大气压潮负荷直接影响时，假设地面高度h处大气压 P_0 与地面大气压 P_0 存在比例关系 $(1-h/44330)^{5.25}$ 。

全球地面大气压潮负荷谐系数模型 (hPa) 采用FES2004格式，可由全球地面大气压调谐和常数格网模型，调用[全球潮汐调和常数格网谐分析]程序构造。可在ETideLoad4.0地球物理模型与数值标准设置中，更换其他大气压潮负荷谐系数模型。

程序默认的360阶大气压潮负荷谐系数模型ECMWF2006.dat，包含了半年与年周期分潮。采用该模型计算大气潮负荷效应，即使不考虑非潮汐大气负荷影响，也能将大地测量观测量或参数的大气负荷影响控制在1cm精度水平。

大气压潮年周期振幅是周日振幅的10倍以上。在大陆地区，大气压冬高夏低，导致地面冬季下降、夏季抬升，产生年、半年的周期性地面垂直形变，在厘米级大地测量中应予以顾及。



[参数设置]输入文件记录中高度、时间属性列序号，选择影响类型 (本例选择本例选择

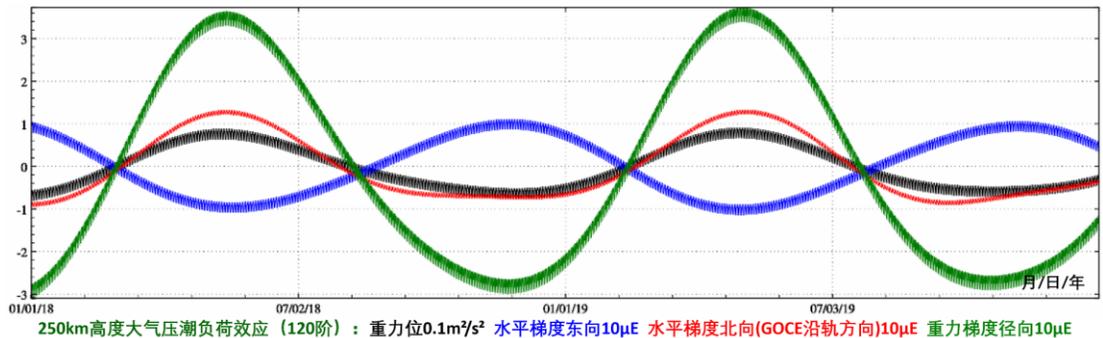
重力位摄动、摄动力东北天系三分量、重力梯度东北天系三分量)，输入结果文件名。

[输出]头文件取输入文件头，输出文件记录在输入文件记录的基础上，增加用户选择要素的大气压潮负荷效应属性。本例增加本例选择重力位摄动、摄动力东北天系三分量、重力梯度东北天系三分量共 7 列属性。

The screenshot shows the software interface with the following annotations:

- 重力位/扰动摄动(0.1m/s²)**: Points to the selected calculation type in the '选择影响类型' section.
- 北向/GOCE沿轨方向**: Points to the '模型最大计算阶数' (Model maximum calculation order) set to 120.
- 记录的第2、3列约定为卫星轨道的经纬度**: Points to the second and third columns of the data table.
- GOCE重力卫星轨道高度**: Points to the '结果文件保存为' (Save result file as) field.

Forcast	121.2400	29.4281	250000.0	58119.0	0.0041	-0.9044	-2.7813
2018010104	121.2400	29.4281	250000.0	-0.6128	0.9141	-0.9044	-2.8233
2018010108	121.2400	29.4281	250000.0	-0.6257	1.0474	-0.8697	-2.9583
2018010112	121.2400	29.4281	250000.0	-0.5555	0.9582	-0.8391	-2.7579
2018010116	121.2400	29.4281	250000.0	-0.6634	0.9732	-0.9110	-2.9476
2018010120	121.2400	29.4281	250000.0	-0.8048	0.9478	-0.9501	-3.0964
2018010124	121.2400	29.4281	250000.0	-0.6819	0.7949	-0.9121	-2.7619
2018010204	121.2400	29.4281	250000.0	-0.6086	0.9049	-0.9029	-2.8037
2018010208	121.2400	29.4281	250000.0	-0.6214	1.0381	-0.8681	-2.9385
2018010212	121.2400	29.4281	250000.0	-0.5511	0.9488	-0.8374	-2.7379
2018010216	121.2400	29.4281	250000.0	-0.6590	0.9637	-0.9093	-2.9274
2018010220	121.2400	29.4281	250000.0	-0.8004	0.9383	-0.9484	-3.0760
2018010224	121.2400	29.4281	250000.0	-0.6774	0.7853	-0.9103	-2.7414
2018010304	121.2400	29.4281	250000.0	-0.6040	0.8952	-0.9010	-2.7829
2018010308	121.2400	29.4281	250000.0	-0.6168	1.0284	-0.8662	-2.9176
2018010312	121.2400	29.4281	250000.0	-0.5465	0.9390	-0.8354	-2.7167
2018010316	121.2400	29.4281	250000.0	-0.6543	0.9539	-0.9073	-2.9061
2018010320	121.2400	29.4281	250000.0	-0.7956	0.9284	-0.9463	-3.0545
2018010324	121.2400	29.4281	250000.0	-0.6726	0.7754	-0.9081	-2.7196



2.3.4 全要素大气压潮负荷效应全球预报

[功能]输入全球范围内任意地面站点的大地坐标，即经纬度（度小数）与大地高（m），设置起止时刻和时间间隔，实时预报该地面站点高程异常（大地水准面 mm）、地面重力（ μGal ）、扰动重力（ μGal ）、地倾斜（SW 南向/西向 mas）、垂线偏差（SW 南向/西向 mas）、水平位移（EN 东向/北向 mm）、地面径向（大地高 mm）、地面正（常）高（mm）、扰动重力梯度（径向 $10\mu\text{E}$ ）或水平重力梯度（NW 北向/西向 $10\mu\text{E}$ ）的大气压潮负荷效应时间序

列，绘制大气压潮负荷效应预报曲线。

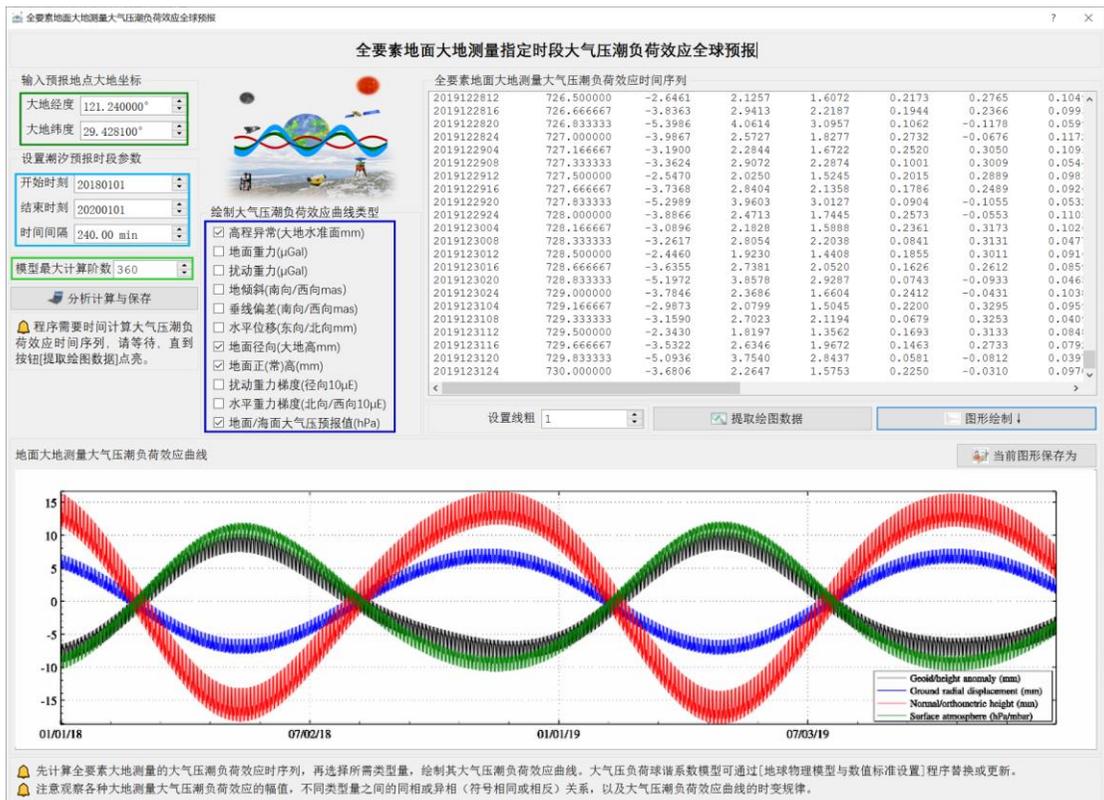
全球地面大气压负荷球谐系数模型可通过[地球物理模型与数值标准设置]程序事先进行替换或更新。

先计算全要素大地测量的大气压潮负荷效应时序列，再选择所需类型量，绘制其大气压潮负荷效应曲线。

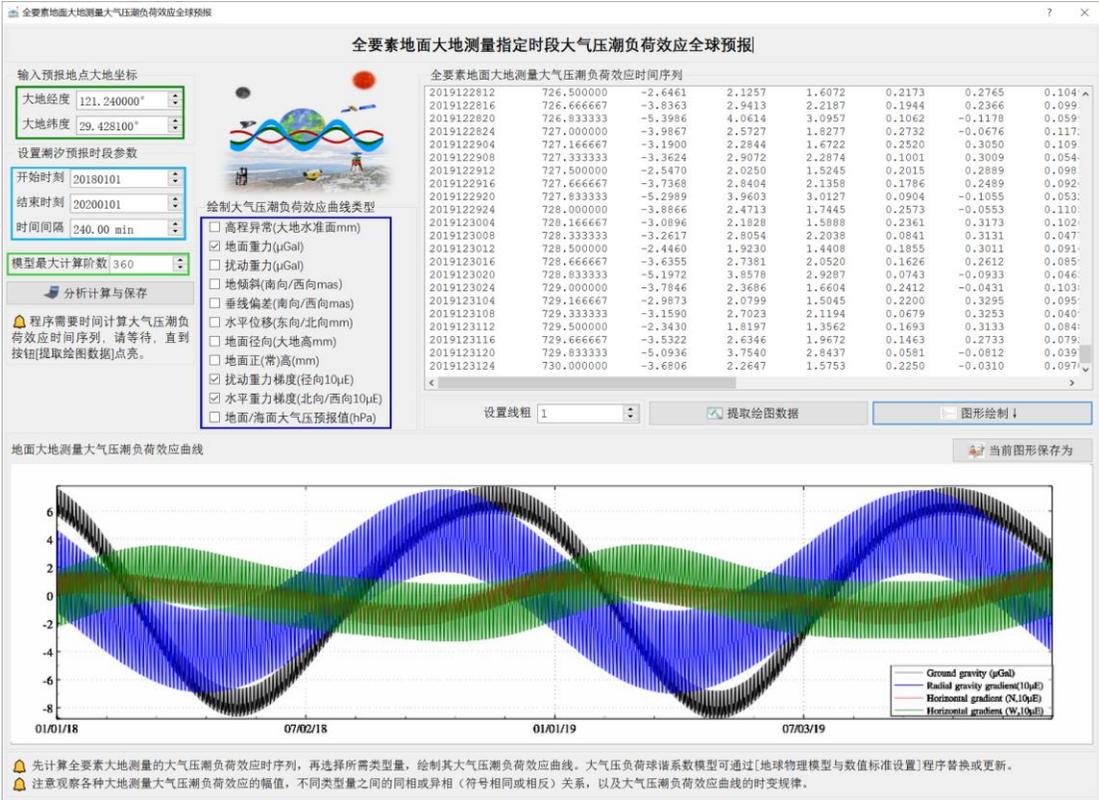
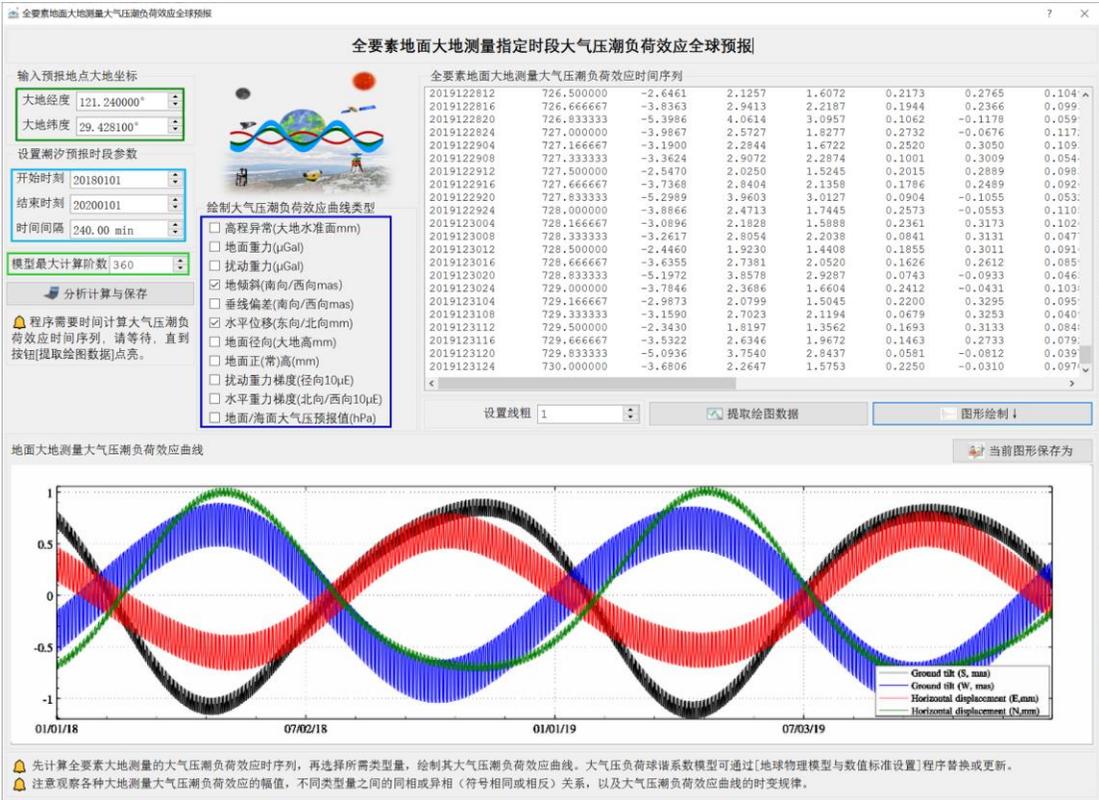
注意观察各种大地测量大气压潮负荷效应的幅值，不同类型量之间的同相或异相（符号相同或相反）关系，以及大气压潮负荷效应曲线的时变规律。

程序输出计算点大气压潮负荷效应时间序列文件。头文件占住一行，属性包括计算点的点名，经度，纬度（度小数），大地高（m），起算 MJD。从第二行起，每行记录第 1 列为系统格式时间，第 2 列与头文件最后 1 列之和为 MJD 天数，最后 14 列为全要素大地测量要素的大气压潮负荷效应。

后 14 列大气压潮负荷效应的大地测量要素分别是：高程异常（大地水准面 mm，第 3 列）、地面重力（ μGal ，第 4 列）、扰动重力（ μGal ）、地倾斜（SW 南向/西向 mas，第 6、7 列）、垂线偏差（SW 南向/西向 mas）、水平位移（EN 东向/北向 mm，第 10、11 列）、地面径向（大地高 mm）、地面正（常）高（mm）、扰动重力梯度（径向 $10\mu\text{E}$ ，第 14 列）或水平重力梯度（NW 北向/西向 $10\mu\text{E}$ ，第 15、16 列）。



先计算全要素大地测量的大气压潮负荷效应时序列，再选择所需类型量，绘制其大气压潮负荷效应曲线。大气压负荷球谐系数模型可通过[地球物理模型与数值标准设置]程序替换或更新。
注意观察各种大地测量大气压潮负荷效应的幅值，不同类型量之间的同相或异相（符号相同或相反）关系，以及大气压潮负荷效应曲线的时变规律。



2.4 自转极移效应与自转参数潮汐效应计算

[目标]利用 IERS 地球定向参数产品文件 IERSeopc04.dat，按输入文件中的地点和时刻，计算地面及固体地球外部大地测量参数的非潮汐自转极移或海洋极潮效应；计算地球自转参数（自转极移和日长变化）的长周期和短周期潮汐效应。

地球自转极移与形状极移是两个不同的监测量。无量纲的形状极移，是归一化的角动量，等于地球自转运动的物质负荷激发。地球自转极移与形状极移分别表征整个地球系统的运动学状态和力学形状随时间变化的行为，都是客观存在的，两者都会引起地球空间各种大地测量要素随时间变化。

2.4.1 自转极移/海洋极潮效应时序计算

[功能]输入地面站点时间序列文件，计算其高程异常（大地水准面 mm）、地面重力（ μGal ）、扰动重力（ μGal ）、地倾斜（SW 南向/西向 mas）、垂线偏差（SW 南向/西向 mas）、水平位移（EN 东向/北向 mm）、地面径向（大地高 mm）、地面正（常）高（mm）、扰动重力梯度（径向 $10\mu\text{E}$ ）或水平重力梯度（NE 北向/西向 $10\mu\text{E}$ ）的自转极移或海洋极潮效应。

[输入]地面站点时间序列文件。

头文件占住一行，属性包括点名，经度，纬度（度小数），大地高（m），起算 MJD（可选），…。从第二行起，每行记录表示时序的一个历元时刻采样。

设置文件格式
头文件中大地高列序号 4
记录中时间属性列序号 1
头文件中起算MJD列序号 5

选择影响类型
 高程异常(大地水准面mm)
 地面重力(μGal)
 扰动重力(μGal)
 地倾斜(南向/西向mas)
 垂线偏差(南向/西向mas)
 水平位移(东向/北向mm)
 地面径向(大地高mm)
 地面正(常)高(mm)
 扰动重力梯度(径向 $10\mu\text{E}$)
 水平重力梯度(北向/西向 $10\mu\text{E}$)

选择计算类型 自转极移效应

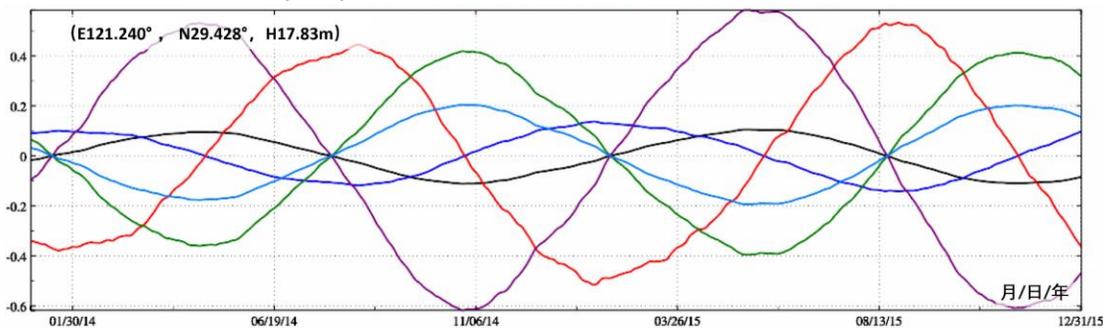
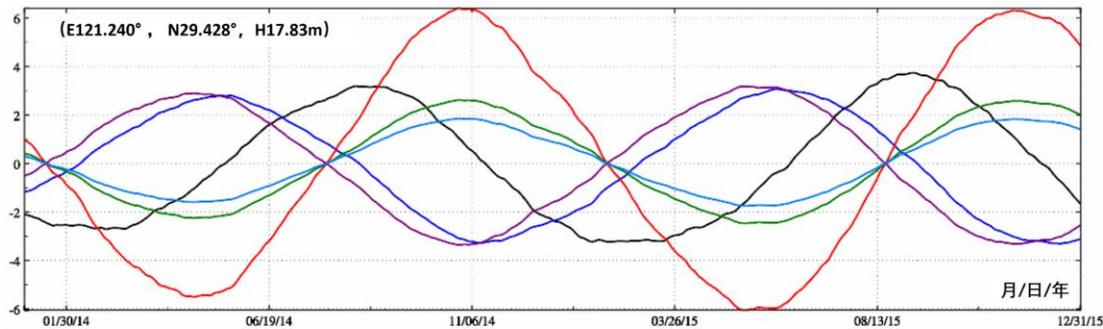
输入输出数据显示:

ASB	177.230000	29.910000	72.4	56658.000000															
201401010000	0.000000	6.713	-2.1021	-1.1883	0.9926	0.4196	0.4576	-0.0171	0										
201401011200	0.500000	6.375	-2.1060	-1.1772	0.9694	0.4102	0.4469	-0.0167	0										
201401020000	1.000000	6.751	-2.1099	-1.1660	0.9462	0.4007	0.4362	-0.0163	0										
201401021200	1.500000	6.412	-2.1188	-1.1547	0.9199	0.3999	0.4241	-0.0158	0										
201401030000	2.000000	6.786	-2.1277	-1.1434	0.8935	0.3792	0.4119	-0.0153	0										
201401031200	2.500000	6.445	-2.1378	-1.1363	0.8743	0.3714	0.4031	-0.0150	0										
201401040000	3.000000	6.818	-2.1480	-1.1293	0.8551	0.3636	0.3942	-0.0147	0										
201401041200	3.500000	6.476	-2.1553	-1.1226	0.8382	0.3567	0.3864	-0.0144	0										
201401050000	4.000000	6.847	-2.1626	-1.1158	0.8214	0.3499	0.3786	-0.0141	0										
201401051200	4.500000	6.504	-2.1712	-1.1055	0.7970	0.3400	0.3674	-0.0137	0										
201401060000	5.000000	6.874	-2.1799	-1.0953	0.7727	0.3300	0.3562	-0.0132	0										
201401061200	5.500000	6.529	-2.1932	-1.0809	0.7381	0.3160	0.3403	-0.0126	0										
201401070000	6.000000	6.897	-2.2065	-1.0666	0.7035	0.3019	0.3243	-0.0120	0										
201401071200	6.500000	6.551	-2.2200	-1.0500	0.6645	0.2860	0.3063	-0.0114	0										
201401080000	7.000000	6.917	-2.2336	-1.0335	0.6255	0.2701	0.2893	-0.0107	0										
201401081200	7.500000	6.570	-2.2405	-1.0167	0.5900	0.2556	0.2720	-0.0101	0										
201401090000	8.000000	6.935	-2.2474	-1.0000	0.5544	0.2411	0.2556	-0.0094	0										
201401091200	8.500000	6.586	-2.2532	-0.9781	0.5102	0.2230	0.2352	-0.0087	0										

地球自转极移与形状极移是两个不同的监测量。无量纲的形状极移，是归一化的角动量，等于地球自转运动的物质负荷激发。
地球自转极移与形状极移分别表征整个地球系统的运动学状态和力学形状随时间变化的行为，都是客观存在的，两者都会引起地球空间各种大地测量要素随时间变化。

[参数设置]输入文件记录中时间属性列序号，选择影响类型和计算类型，输入结果文件

名。



自转极移效应与自转参数潮汐效应计算

打开文件 结果保存 设置参数输入 开始计算 计算信息保存 查看样例

自转极移/海洋极移效应时序计算 给定时间位置极移/海洋极移效应 地球外部极移/海洋极移扰动 全要素大地大地测量极移效应 地球自转参数潮汐效应

打开地面站点时间序列文件 由实测 $\Delta C_{ts}, \Delta S_{ts}$ 计算形状极移效应 计算信息保存 自转极移效应与自转参数潮汐效应计算

设置文件格式
 头文件中大地高列序号 4
 记录中时间属性列序号 1
 头文件中起算MJD列序号 5

选择影响类型
 高程异常(大地水准面mm)
 地面重力(μGal)
 扰动重力(μGal)
 地倾斜(南向/西向mas)
 垂线偏差(南向/西向mas)
 水平位移(东向/北向mm)
 地面径向(大地高mm)
 地面正(常)高(mm)
 扰动重力梯度 径向 $10\mu\text{E}$
 水平重力梯度 北向/西向 $10\mu\text{E}$

结果文件保存为 C:\EITideLoad4.5_win64cn/examples/Poleshiftteffectcalc\tsmquotdrtst.txt

头文件第2、3列约定为地面站点的经纬度

选择计算类型 海洋极移效应 结果文件保存为 参数 设置结果输入 开始计算

ASB	107.230000	29.910000	72.4	56658.000000													
201401010000	0.000000	6.713	0.0297	0.0427	0.0535	0.0026	0.0417	0.0004	0								
201401011200	0.500000	6.375	0.0295	0.0427	0.0535	0.0026	0.0417	0.0003	0								
201401020000	1.000000	6.751	0.0294	0.0428	0.0536	0.0026	0.0418	0.0003	0								
201401021200	1.500000	6.412	0.0290	0.0428	0.0536	0.0026	0.0419	0.0003	0								
201401030000	2.000000	6.786	0.0287	0.0428	0.0536	0.0026	0.0419	0.0003	0								
201401031200	2.500000	6.445	0.0284	0.0429	0.0536	0.0026	0.0420	0.0003	0								
201401040000	3.000000	6.818	0.0280	0.0429	0.0536	0.0026	0.0420	0.0003	0								
201401041200	3.500000	6.476	0.0277	0.0429	0.0535	0.0026	0.0421	0.0003	0								
201401050000	4.000000	6.847	0.0275	0.0429	0.0535	0.0026	0.0421	0.0003	0								
201401051200	4.500000	6.504	0.0272	0.0430	0.0535	0.0026	0.0422	0.0003	0								
201401060000	5.000000	6.874	0.0269	0.0430	0.0535	0.0026	0.0422	0.0003	0								
201401061200	5.500000	6.529	0.0264	0.0430	0.0535	0.0026	0.0423	0.0003	0								
201401070000	6.000000	6.897	0.0259	0.0431	0.0535	0.0026	0.0424	0.0003	0								
201401071200	6.500000	6.551	0.0254	0.0431	0.0536	0.0026	0.0425	0.0003	0								
201401080000	7.000000	6.917	0.0250	0.0432	0.0536	0.0026	0.0426	0.0003	0								
201401081200	7.500000	6.570	0.0247	0.0432	0.0536	0.0026	0.0427	0.0003	0								
201401090000	8.000000	6.935	0.0244	0.0433	0.0536	0.0026	0.0428	0.0003	0								
201401091200	8.500000	6.586	0.0242	0.0434	0.0537	0.0026	0.0429	0.0003	0								

地球自转极移与形状极移是两个不同的监测量。无量纲的形状极移，是归一化的角动量，等于地球自转运动的物质负荷激发。
 地球自转极移与形状极移分别表征整个地球系统的运动学状态和力学形状随时间变化的行为，都是客观存在的，两者都会引起地球空间各种大地测量要素随时间变化。

[输出]头文件取输入文件头。当选择自转极移效应时，输出文件记录在输入文件记录的

基础上，增加 2 列自转极坐标变化（地固空间直角坐标 $\Delta x_p, \Delta y_p$ ，单位 m）和用户选择要素的自转极移效应；当选择海洋极潮效应时，输出文件记录在输入文件记录的基础上，增加用户选择要素的海洋极潮效应。

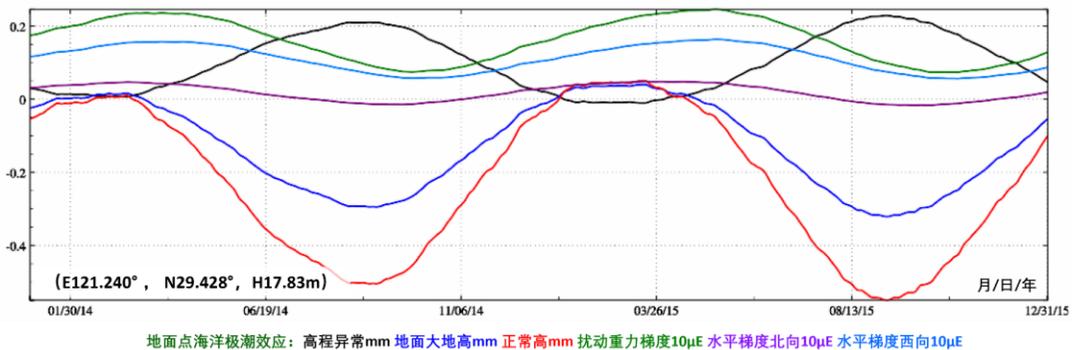
如果计算时间超出 IERS 地球定向参数产品文件 IERSeopc04.dat 时间范围，请更新参数时间序列文件！

位系数与自转极移参数、极潮系数之间关系采用 Desai (2002) 的自适应海洋潮汐质量平衡算法，如 IERS2010 协议式 (6.23)。

瞬时自转轴与平均形状轴不一致，导致地球自转产生离心力位，固体地球在离心力位作用下产生形变，引起地球内部质量重新分布，产生附加离心力位。大地测量要素的自转极移效应等于离心力位的直接影响与间接影响之和。

对于 1cm 精度水平的大地测量，应顾及各种几何物理量的自转极移效应。海洋极潮效应量级较小（小于 1cm），对于一般大地测量目的，可以忽略。

程序采用的体潮勒夫数值： $k_2 = 0.3077 + 0.0036i$, $h_2 = 0.6207$, $l_2 = 0.0836$ 。



2.4.2 给定时间位置极移/海洋极潮效应计算

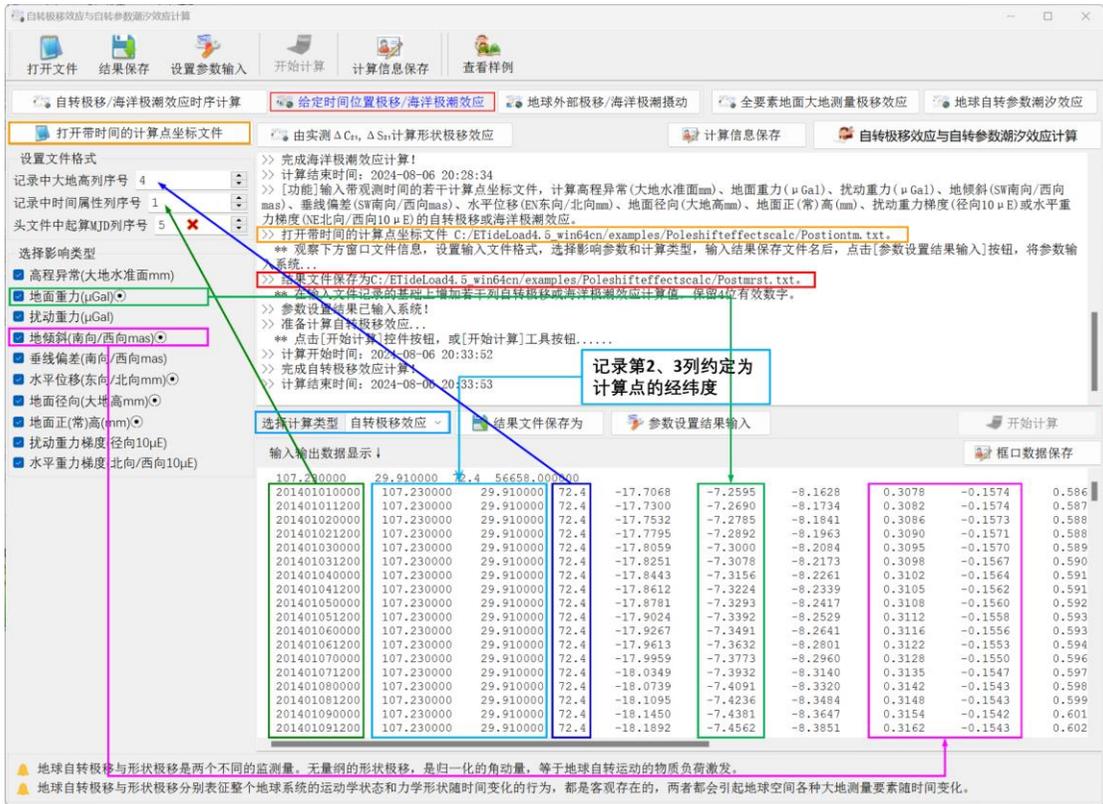
[功能]输入带观测时间的若干计算点坐标文件，计算高程异常（大地水准面 mm）、地面重力（ μGal ）、扰动重力（ μGal ）、地倾斜（SW 南向/西向 mas）、垂线偏差（SW 南向/西向 mas）、水平位移（EN 东向/北向 mm）、地面径向（大地高 mm）、地面正（常）高（mm）、扰动重力梯度（ $10\mu\text{E}$ ）或水平重力梯度（NE 北向/西向 $10\mu\text{E}$ ）的自转极移或海洋极潮效应。

[输入]带观测时间的若干计算点坐标文件。

头文件占住一行。从第二行起，每行记录的第 2、3 个属性约定为经度、纬度（度小数），记录中存在采样历元时间和高度属性。

[参数设置]输入文件记录中的时间属性列序号，选择影响类型和计算类型，输入结果文件名。

[输出]头文件取输入文件头，输出文件记录在输入文件记录的基础上，增加用户选择要素的自转极移/海洋极潮效应。



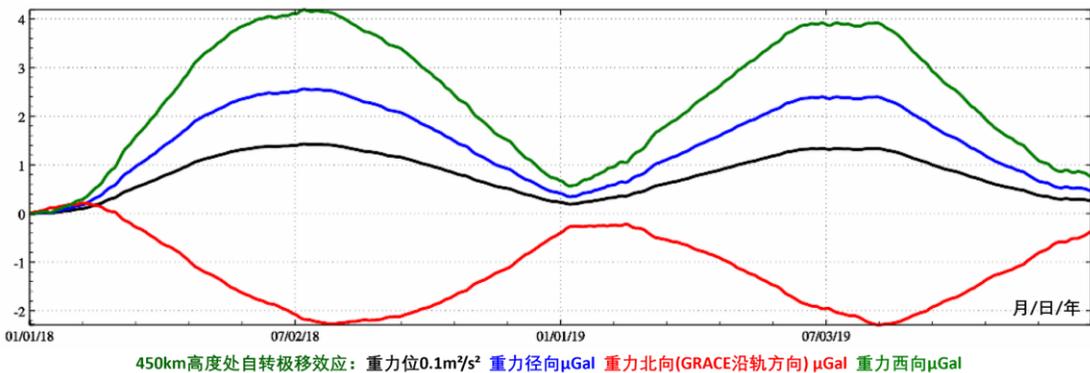
2.4.3 地球外部及卫星自转极移/海洋极潮计算

[功能]输入带观测时间的若干计算点坐标文件，计算空间直角坐标系或球坐标系中的重力位 ($0.1\text{m}^2/\text{s}^2$)、重力 (μGal) 或重力梯度 ($10\mu\text{E}$) 的自转极移或海洋极潮效应。

[输入]带观测时间的固体地球外部点坐标文件。

头文件占住一行。从第二行起，每行记录的第 2、3 个属性约定为经度、纬度 (度小数)，记录中存在时间和大地高属性。

[输出]头文件取输入文件头，输出文件记录在输入文件记录的基础上，增加用户选择要素的自转极移效应。



自转极移效应与自转参数潮汐效应计算

打开文件 结果保存 设置参数输入 开始计算 计算信息保存 查看样例

自转极移/海洋极潮效应时序计算 给定时间位置极移/海洋极潮效应 地球外部极移/海洋极潮波动 全要素大地测量极移效应 地球自转参数潮汐效应

打开带时时间的地球外部点文件 由实测 $\Delta C_n, \Delta S_n$ 计算形状极移效应 计算信息保存 自转极移效应与自转参数潮汐效应计算

设置文件格式
 记录中大地高序号 4
 记录中时间属性列序号 1
 头文件中起算MJD列序号 5

选择影响类型
 重力位/扰动位移动(0.1m²/s²)
 摄动力空间直角坐标三分量(μGal)
 摄动力当地东北天系三分量(μGal)
 重力梯度空间直角坐标三分量(10 μE)
 重力梯度当地东北天系三分量(10 μE)

打开带时时间的地球外部点文件 C:\EfileLoad4.5\win64cn\examples\Poleshifteffectscalc\outerptm.txt
 结果文件保存为 C:\EfileLoad4.5\win64cn\examples\Poleshifteffectscalc\outerprst.txt

参数设置结果已输入系统!
 ** 点击[开始计算]控件按钮, 或[开始计算]工具按钮.....
 >> 计算开始时间: 2024-08-06 20:33:52
 >> 完成自转极移效应计算!
 >> 计算结束时间: 2024-08-06 20:33:53
 >> [功能]输入带观测时间的若干地球外部点坐标文件, 计算空间直角坐标系或球坐标系中的重力位(0.1m²/s²)、重力(μGal)或重力梯度(10 μE)的自转极移或海洋极潮效应。

准备计算自转极移效应...
 ** 点击[开始计算]控件按钮, 或[开始计算]工具按钮.....
 >> 计算开始时间: 2024-08-06 20:36:58
 >> 完成自转极移效应计算!
 >> 计算结束时间: 2024-08-06 20:36:59

选择计算类型 自转极移效应 结果文件保存为 参数设置结果输入 开始计算 框口数据保存

输入输出数据显示

Forcast	121.2400	29.4281	450000.0	58119.0			
2018010100	121.2400	29.4281	450000.0	-0.8623	-1.3486	1.4417	3.7916
2018010104	121.2400	29.4281	450000.0	-0.8637	-1.3508	1.4403	3.7978
2018010108	121.2400	29.4281	450000.0	-0.8651	-1.3530	1.4389	3.8039
2018010112	121.2400	29.4281	450000.0	-0.8665	-1.3552	1.4374	3.8101
2018010116	121.2400	29.4281	450000.0	-0.8680	-1.3574	1.4360	3.8163
2018010120	121.2400	29.4281	450000.0	-0.8694	-1.3596	1.4346	3.8225
2018010124	121.2400	29.4281	450000.0	-0.8708	-1.3617	1.4331	3.8286
2018010204	121.2400	29.4281	450000.0	-0.8721	-1.3638	1.4319	3.8345
2018010208	121.2400	29.4281	450000.0	-0.8734	-1.3659	1.4307	3.8404
2018010212	121.2400	29.4281	450000.0	-0.8748	-1.3680	1.4294	3.8462
2018010216	121.2400	29.4281	450000.0	-0.8761	-1.3701	1.4282	3.8521
2018010220	121.2400	29.4281	450000.0	-0.8774	-1.3722	1.4269	3.8579
2018010224	121.2400	29.4281	450000.0	-0.8788	-1.3743	1.4257	3.8638
2018010304	121.2400	29.4281	450000.0	-0.8799	-1.3761	1.4249	3.8690
2018010308	121.2400	29.4281	450000.0	-0.8811	-1.3779	1.4241	3.8742
2018010312	121.2400	29.4281	450000.0	-0.8823	-1.3798	1.4233	3.8793
2018010316	121.2400	29.4281	450000.0	-0.8835	-1.3816	1.4225	3.8845
2018010320	121.2400	29.4281	450000.0	-0.8846	-1.3835	1.4217	3.8897
2018010324	121.2400	29.4281	450000.0	-0.8858	-1.3853	1.4209	3.8949

地球自转极移与形状极移是两个不同的监测量。无量纲的形状极移, 是归一化的角动量, 等于地球自转运动的物质负荷激发。
 地球自转极移与形状极移分别表征整个地球系统的运动学状态和力学形状随时间变化的行为, 都是客观存在的, 两者都会引起地球空间各种大地测量要素随时间变化。

GRACE重力卫星轨道高度
 北向/GRACE卫星沿轨方向/高低跟踪方向

自转极移效应与自转参数潮汐效应计算

打开文件 结果保存 设置参数输入 开始计算 计算信息保存 查看样例

自转极移/海洋极潮效应时序计算 给定时间位置极移/海洋极潮效应 地球外部极移/海洋极潮波动 全要素大地测量极移效应 地球自转参数潮汐效应

打开带时时间的地球外部点文件 由实测 $\Delta C_n, \Delta S_n$ 计算形状极移效应 计算信息保存 自转极移效应与自转参数潮汐效应计算

设置文件格式
 记录中大地高序号 4
 记录中时间属性列序号 1
 头文件中起算MJD列序号 5

选择影响类型
 重力位/扰动位移动(0.1m²/s²)
 摄动力空间直角坐标三分量(μGal)
 摄动力当地东北天系三分量(μGal)
 重力梯度空间直角坐标三分量(10 μE)
 重力梯度当地东北天系三分量(10 μE)

打开带时时间的地球外部点文件 C:\EfileLoad4.5\win64cn\examples\Poleshifteffectscalc\satpmt.txt
 结果文件保存为 C:\EfileLoad4.5\win64cn\examples\Poleshifteffectscalc\atorbrst.txt

参数设置结果已输入系统!
 ** 点击[开始计算]控件按钮, 或[开始计算]工具按钮.....
 >> 计算开始时间: 2024-08-06 20:36:58
 >> 完成自转极移效应计算!
 >> 计算结束时间: 2024-08-06 20:36:59
 >> [功能]输入带观测时间的若干地球外部点坐标文件, 计算空间直角坐标系或球坐标系中的重力位(0.1m²/s²)、重力(μGal)或重力梯度(10 μE)的自转极移或海洋极潮效应。

准备计算自转极移效应...
 ** 点击[开始计算]控件按钮, 或[开始计算]工具按钮.....
 >> 计算开始时间: 2024-08-06 20:37:53
 >> 完成自转极移效应计算!
 >> 计算结束时间: 2024-08-06 20:37:54

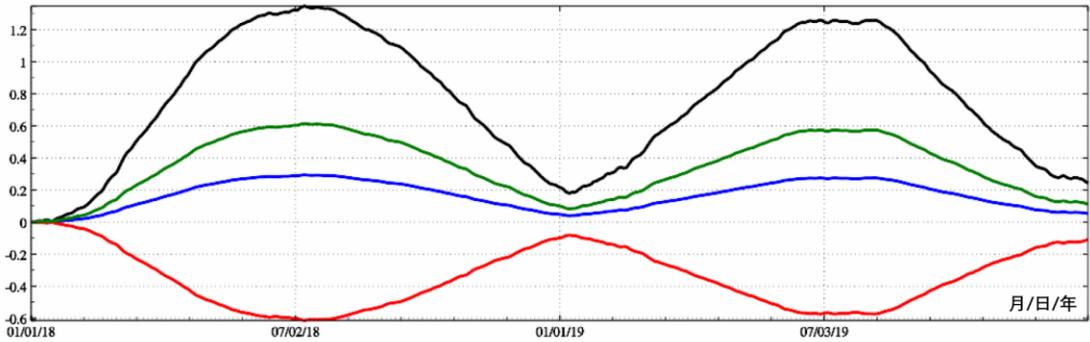
选择计算类型 自转极移效应 结果文件保存为 参数设置结果输入 开始计算 框口数据保存

输入输出数据显示

Forcast	121.2400	29.4281	250000.0	58119.0			
2018010100	121.2400	29.4281	250000.0	-0.9427	0.2824	0.8597	-2.5791
2018010104	121.2400	29.4281	250000.0	-0.9443	0.2829	0.8611	-2.5833
2018010108	121.2400	29.4281	250000.0	-0.9458	0.2834	0.8625	-2.5875
2018010112	121.2400	29.4281	250000.0	-0.9474	0.2838	0.8639	-2.5917
2018010116	121.2400	29.4281	250000.0	-0.9489	0.2843	0.8653	-2.5959
2018010120	121.2400	29.4281	250000.0	-0.9504	0.2847	0.8667	-2.6001
2018010124	121.2400	29.4281	250000.0	-0.9520	0.2852	0.8681	-2.6043
2018010204	121.2400	29.4281	250000.0	-0.9534	0.2856	0.8694	-2.6083
2018010208	121.2400	29.4281	250000.0	-0.9549	0.2861	0.8708	-2.6123
2018010212	121.2400	29.4281	250000.0	-0.9563	0.2865	0.8723	-2.6162
2018010216	121.2400	29.4281	250000.0	-0.9578	0.2869	0.8734	-2.6202
2018010220	121.2400	29.4281	250000.0	-0.9592	0.2874	0.8747	-2.6242
2018010224	121.2400	29.4281	250000.0	-0.9607	0.2878	0.8761	-2.6282
2018010304	121.2400	29.4281	250000.0	-0.9620	0.2882	0.8772	-2.6317
2018010308	121.2400	29.4281	250000.0	-0.9633	0.2886	0.8784	-2.6353
2018010312	121.2400	29.4281	250000.0	-0.9646	0.2890	0.8796	-2.6388
2018010316	121.2400	29.4281	250000.0	-0.9659	0.2894	0.8808	-2.6423
2018010320	121.2400	29.4281	250000.0	-0.9671	0.2897	0.8819	-2.6458
2018010324	121.2400	29.4281	250000.0	-0.9684	0.2901	0.8831	-2.6493

地球自转极移与形状极移是两个不同的监测量。无量纲的形状极移, 是归一化的角动量, 等于地球自转运动的物质负荷激发。
 地球自转极移与形状极移分别表征整个地球系统的运动学状态和力学形状随时间变化的行为, 都是客观存在的, 两者都会引起地球空间各种大地测量要素随时间变化。

GOCE重力卫星轨道高度
 北向/GOCE卫星沿轨方向



250km高度处自转极移效应: 重力位0.1m²/s² 重力梯度径向10μE 水平梯度北向(GOCE沿轨方向)10μE 水平梯度西向10μE

2.4.4 全要素地面大地测量自转极移效应计算

[功能]输入全球范围内任意地面站点的大地坐标，即经纬度（度小数）与大地高（m），设置起止时刻和时间间隔，计算该地面站点高程异常（大地水准面 mm）、地面重力（μGal）、扰动重力（μGal）、地倾斜（SW 南向/西向 mas）、垂线偏差（SW 南向/西向 mas）、水平位移（EN 东向/北向 mm）、地面径向（大地高 mm）、地面正（常）高（mm）、扰动重力梯度（径向 10μE）或水平重力梯度（NW 北向/西向 10μE）的非潮汐自转极移效应时间序列，绘制非潮汐自转极移效应曲线。

先计算全要素大地测量自转极移效应时间序列，再选择所需类型量，绘制其自转极移效应曲线。

全要素地面大地测量指定时段自转极移效应计算

输入地面点大地坐标

大地经度 121.240000°

大地纬度 29.428100°

大地高 17.830a

设置计算时段参数

开始时刻 20180101

结束时刻 20200101

时间间隔 240.00 min

分析计算与保存

非潮汐效应参考历元时刻: 输入的开始时刻。

全要素地面大地测量极移效应时间序列

2019122816	726.666667	-0.9736	-0.4048	-0.4488	0.0176	-0.0449	0.0176	-0.0449	0.0176
2019122820	726.833333	-0.9879	-0.4106	-0.4554	0.0178	-0.0446	0.0178	-0.0446	0.0178
2019122824	727.000000	-1.0023	-0.4164	-0.4620	0.0181	-0.0443	0.0181	-0.0443	0.0181
2019122904	727.166667	-1.0162	-0.4220	-0.4684	0.0184	-0.0439	0.0184	-0.0439	0.0184
2019122908	727.333333	-1.0301	-0.4277	-0.4749	0.0186	-0.0435	0.0186	-0.0435	0.0186
2019122912	727.500000	-1.0440	-0.4333	-0.4813	0.0189	-0.0431	0.0189	-0.0431	0.0189
2019122916	727.666667	-1.0579	-0.4389	-0.4877	0.0191	-0.0427	0.0191	-0.0427	0.0191
2019122920	727.833333	-1.0718	-0.4445	-0.4941	0.0194	-0.0423	0.0194	-0.0423	0.0194
2019122924	728.000000	-1.0857	-0.4501	-0.5005	0.0196	-0.0419	0.0196	-0.0419	0.0196
2019123004	728.166667	-1.0992	-0.4552	-0.5062	0.0198	-0.0416	0.0198	-0.0416	0.0198
2019123008	728.333333	-1.1106	-0.4602	-0.5120	0.0201	-0.0412	0.0201	-0.0412	0.0201
2019123012	728.500000	-1.1231	-0.4652	-0.5177	0.0203	-0.0409	0.0203	-0.0409	0.0203
2019123016	728.666667	-1.1355	-0.4703	-0.5234	0.0205	-0.0406	0.0205	-0.0406	0.0205
2019123020	728.833333	-1.1479	-0.4753	-0.5292	0.0208	-0.0402	0.0208	-0.0402	0.0208
2019123024	729.000000	-1.1604	-0.4803	-0.5349	0.0210	-0.0399	0.0210	-0.0399	0.0210
2019123104	729.166667	-1.1725	-0.4852	-0.5405	0.0212	-0.0397	0.0212	-0.0397	0.0212
2019123108	729.333333	-1.1846	-0.4902	-0.5461	0.0214	-0.0394	0.0214	-0.0394	0.0214
2019123112	729.500000	-1.1967	-0.4951	-0.5517	0.0216	-0.0392	0.0216	-0.0392	0.0216
2019123116	729.666667	-1.2089	-0.5000	-0.5573	0.0219	-0.0389	0.0219	-0.0389	0.0219
2019123120	729.833333	-1.2210	-0.5049	-0.5628	0.0221	-0.0387	0.0221	-0.0387	0.0221
2019123124	730.000000	-1.2331	-0.5098	-0.5684	0.0223	-0.0385	0.0223	-0.0385	0.0223

绘制极移效应曲线类型

- 高程异常(大地水准面mm)
- 地面重力(μGal)
- 扰动重力(μGal)
- 地倾斜(南向/西向mas)
- 垂线偏差(南向/西向mas)
- 水平位移(东向/北向mm)
- 地面径向(大地高mm)
- 地面正(常)高(mm)
- 扰动重力梯度(径向μE)
- 水平重力梯度(北向/西向μE)

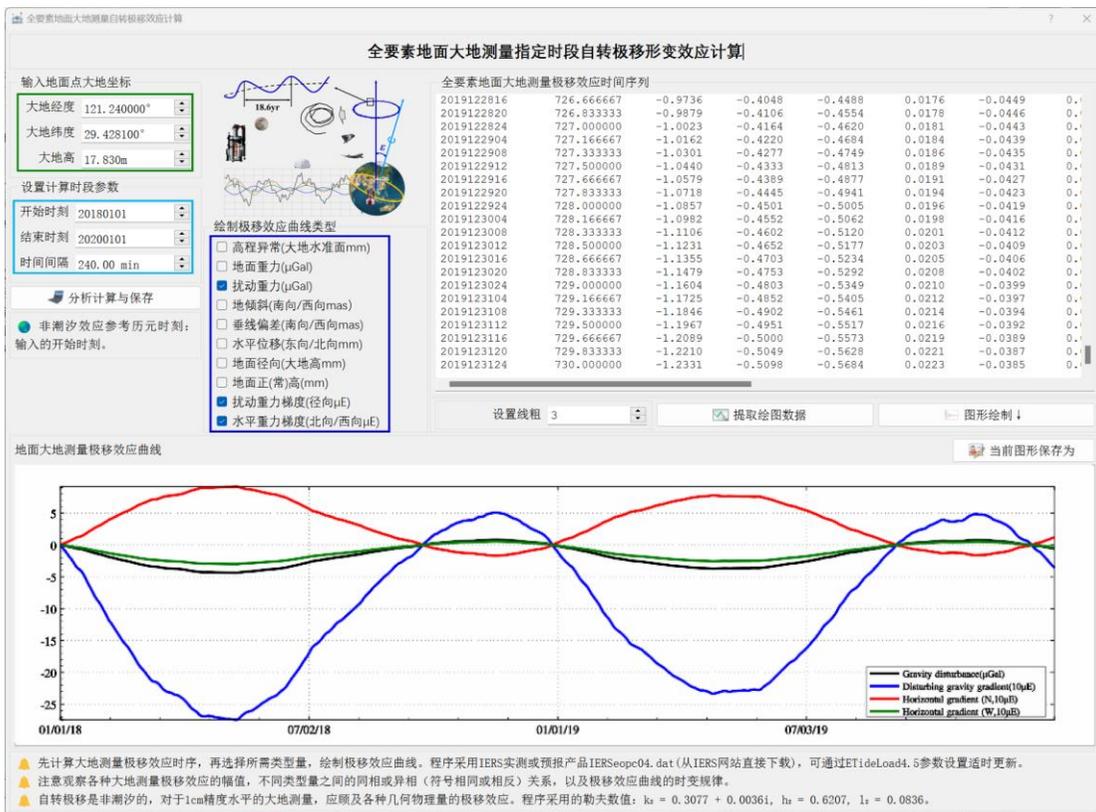
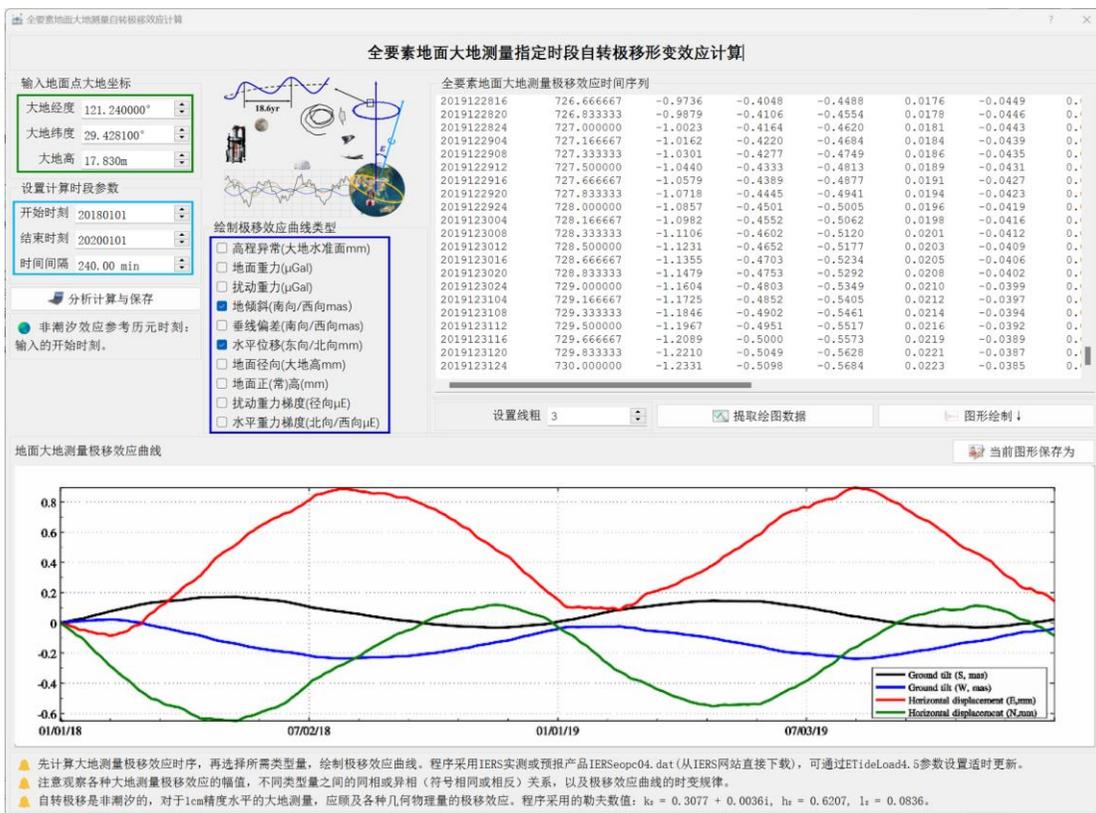
地面大地测量极移效应曲线

▲ 先计算大地测量极移效应时序，再选择所需类型量，绘制极移效应曲线。程序采用IERS实测或预报产品IERSocp04.dat(从IERS网站直接下载)，可通过ETideLoad4.5参数设置适时更新。

▲ 注意观察各种大地测量极移效应的幅值，不同类型量之间的同相或异相（符号相同或相反）关系，以及极移效应曲线的时变规律。

▲ 自转极移是非潮汐的，对于1cm精度水平的大地测量，应顾及各种几何物理量的极移效应。程序采用的勒夫数值： $k_1 = 0.3077 + 0.0036i$, $h_1 = 0.6207$, $l_1 = 0.0836$ 。

39



注意观察各种大地测量自转极移效应的幅值，不同类型量之间的同相或异相（符号相同或相反）关系，以及自转极移效应曲线的时变规律。

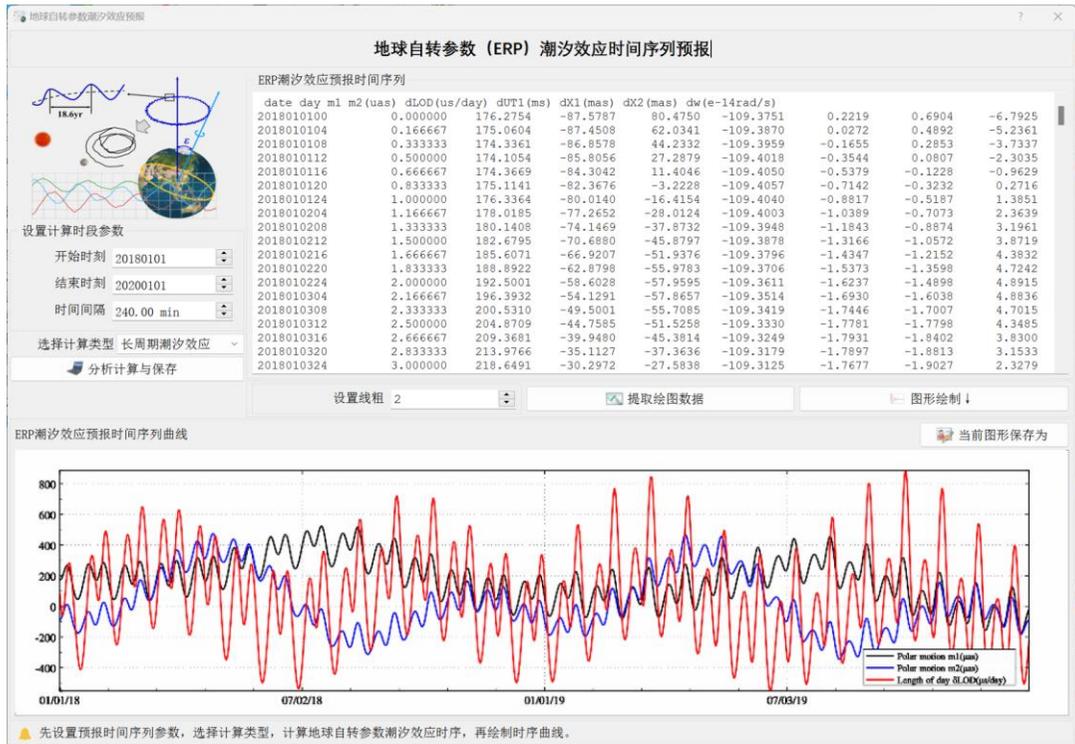
程序输出计算点自转极移效应时间序列文件。头文件占住一行，属性包括计算点的点名，经度，纬度（度小数），大地高（m），起算 MJD。从第二行起，每行记录第 1 列为系统格式时间，第 2 列与头文件最后 1 列之和为 MJD 天数，最后 14 列为全要素大地测量的自转极移形变效应。

后 14 列自转极移形变效应的大地测量要素分别是：高程异常（大地水准面 mm，第 3 列）、地面重力（ μGal ，第 4 列）、扰动重力（ μGal ）、地倾斜（SW 南向/西向 mas，第 6、7 列）、垂线偏差（SW 南向/西向 mas）、水平位移（EN 东向/北向 mm，第 10、11 列）、地面径向（大地高 mm）、地面正（常）高（mm）、扰动重力梯度（径向 $10\mu\text{E}$ ，第 14 列）或水平重力梯度（NW 北向/西向 $10\mu\text{E}$ ，第 15、16 列）。

2.4.5 地球自转参数潮汐效应时序预报

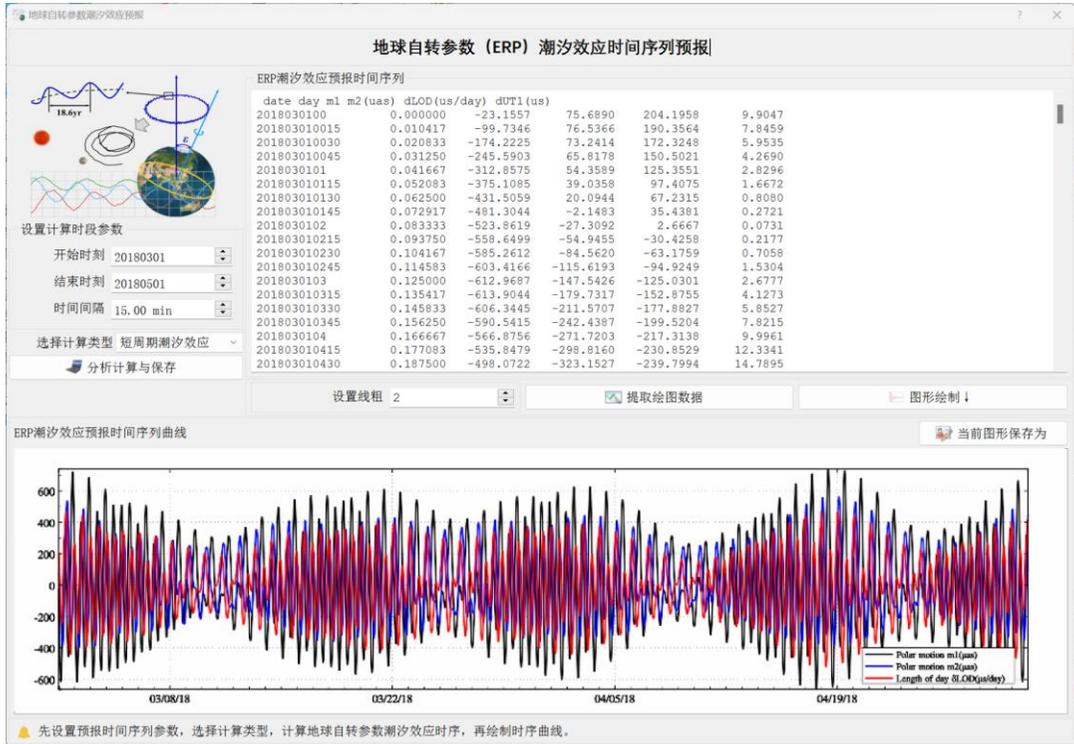
[功能]给定时间跨度和采样间隔，计算地球自转参数（自转极移和日长变化）的长周期和短周期（周日/半日）潮汐效应预报时间序列。

先设置预报时间序列参数，选择计算类型，计算地球自转参数潮汐效应时序，再绘制时序曲线。



当选择“长周期潮汐效应”时，程序输出地球自转参数（ERP）长周期潮汐效应预报时间序列文件，记录格式：预报日期（约定长整型），相对于第一个历元的天数，自转极移 m_1 （ μas ）， m_2 （ μas ），日长变化（ $\mu\text{s/day}$ ）， $UT1$ 变化（ms），有效角动量变化 χ_1 （mas），有效角

动量变化 χ_2 (mas), 自转速率变化 (10^{-14} rad/s)。

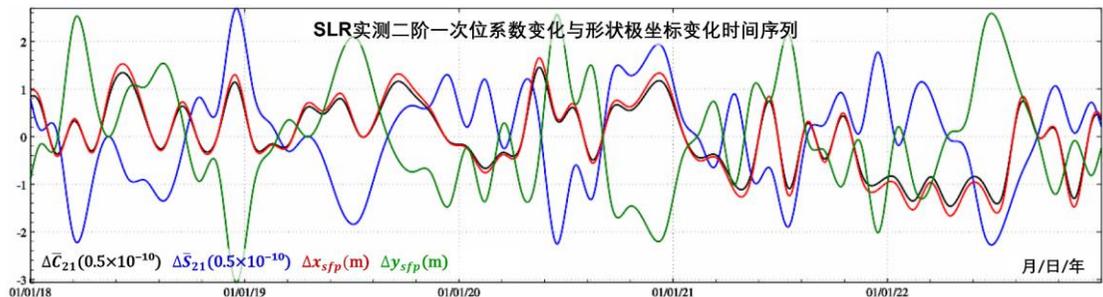


当选择“短周期潮汐效应”时, 程序输出地球自转参数 (ERP) 周日/半日潮汐效应预报时间序列文件, 记录格式: 预报日期 (约定长整型), 相对于第一个历元的天数, 自转极移 m_1 (μ as), m_2 (μ as), 日长变化 (μ s/day), UT1 变化 (μ s)。

[系统内部测试]

【由实测 ΔC_{21} , ΔS_{21} 计算大地测量要素形状极移效应】

输入地面站点时间序列文件, 由多颗卫星激光测距数据实测 SLRUT/CSR RL-06 月时间序列产品文件 C21_S21_RL06.txt (IERS 目录下, 程序自动忽略文件前 15 行), 计算高程异常 (大地水准面 mm)、地面重力 (μ Gal)、扰动重力 (μ Gal)、地倾斜 (SW 南向/西向 mas)、垂线偏差 (SW 南向/西向 mas)、水平位移 (EN 东向/北向 mm)、地面径向 (大地高 mm)、地面正 (常) 高 (mm)、扰动重力梯度 (径向 10μ E) 或水平重力梯度 (NE 北向/西向 10μ E) 的地球形状极移效应。



自转极移效应与自转参数潮汐效应计算

打开文件 结果保存 设置参数输入 开始计算 计算信息保存 查看样例

自转极移/海洋极移效应时序计算 给定时间位置极移/海洋极移效应 地球外部极移/海洋极移波动 全要素地面大地测量极移效应 地球自转参数潮汐效应

由实测 $\Delta C_n, \Delta S_n$ 计算形状极移效应 计算信息保存 自转极移效应与自转参数潮汐效应计算

>> [功能]输入全球任意地面点大地坐标和时间序列参数, 计算并显示其高程异常(大地水准面mm)、地面重力(μGal)、扰动重力(μGal)、地倾斜(SW南向/西向mas)、垂线偏差(SW南向/西向mas)、水平位移(EN东向/北向mm)、地面径向(大地高mm)、地面正(带)高(mm)、扰动重力梯度(径向 $10\mu\text{E}$)或水平重力梯度(NE北向/西向 $10\mu\text{E}$)的非潮汐自转极移效应。

>> 完成计算!

>> [功能]给定时间跨度和采样间隔, 计算地球自转参数(自转极移和日长变化)的长周期和短周期(周日/半日)潮汐效应预报时间序列。

>> 完成计算!

>> [功能]输入地面站点时间序列文件, 由UT/CSR C21, S21, RL-06月时间序列产品文件C21_S21_RL06.txt(IERS目录下, 程序自动忽略文件前16行), 计算高程异常(大地水准面mm)、地面重力(μGal)、扰动重力(μGal)、地倾斜(SW南向/西向mas)、垂线偏差(SW南向/西向mas)、水平位移(EN东向/北向mm)、地面径向(大地高mm)、地面正(带)高(mm)、扰动重力梯度(径向 $10\mu\text{E}$)或水平重力梯度(NE北向/西向 $10\mu\text{E}$)的地球形状极移效应。

>> 结果文件保存为C:/EfileLoad4.s_win64cn/examples/PoleShiftEffectsCalc/newrst.txt.

>> 打开UT/CSR RL-06月时间序列文件 C:/EfileLoad4.s_win64cn/iers/C21_S21_RL06.txt.

>> 参数设置结果已输入系统!

>> 准备计算形状极移效应...

** 点击[开始计算]控件按钮, 或[开始计算]工具按钮.....

>> 计算开始时间: 2024-08-06 20:40:01

>> 完成形状极移效应计算!

>> 计算结束时间: 2024-08-06 20:40:02

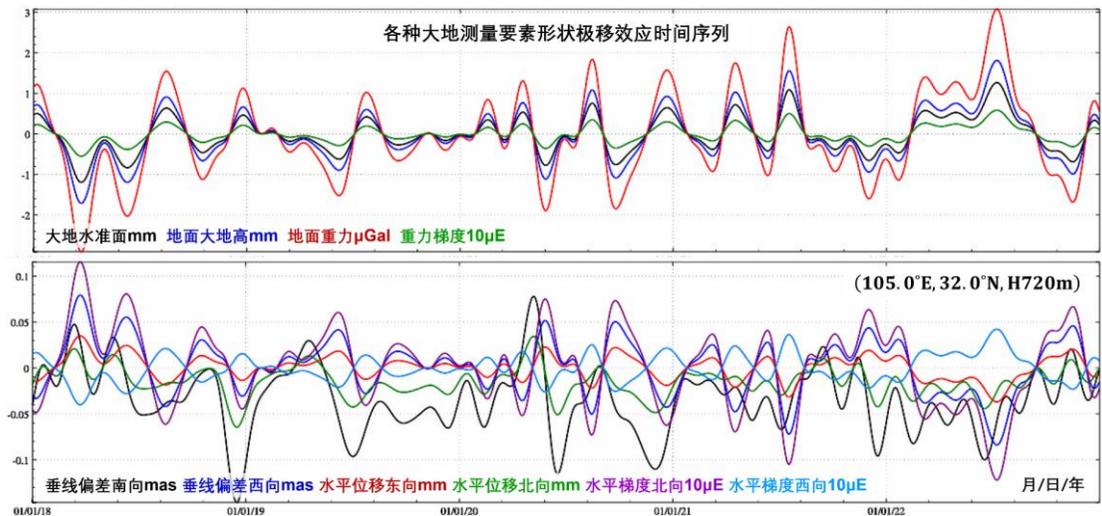
结果文件保存为 参数设置结果输入 开始计算

输入输出数据显示:

Forecast	12												
2018010100	121.2400	29.4281	250000.0	0.4899	0.9034	0.5570	-1.0272	0.2636	0.0724	0.1082	0.0392	-0.0213	
2018010104	121.2400	29.4281	250000.0	0.4909	0.8947	0.5581	-1.0173	0.2596	0.0713	0.1066	0.0390	-0.0210	
2018010108	121.2400	29.4281	250000.0	0.4919	0.8860	0.5593	-1.0074	0.2555	0.0701	0.1049	0.0389	-0.0207	
2018010112	121.2400	29.4281	250000.0	0.4928	0.8773	0.5604	-0.9975	0.2515	0.0690	0.1033	0.0387	-0.0203	
2018010116	121.2400	29.4281	250000.0	0.4938	0.8686	0.5614	-0.9876	0.2475	0.0679	0.1016	0.0385	-0.0200	
2018010120	121.2400	29.4281	250000.0	0.4946	0.8599	0.5624	-0.9777	0.2434	0.0668	0.1000	0.0384	-0.0197	
2018010124	121.2400	29.4281	250000.0	0.4955	0.8512	0.5634	-0.9678	0.2394	0.0657	0.0983	0.0382	-0.0194	
2018010204	121.2400	29.4281	250000.0	0.4963	0.8425	0.5643	-0.9579	0.2354	0.0646	0.0967	0.0380	-0.0190	
2018010208	121.2400	29.4281	250000.0	0.4971	0.8338	0.5652	-0.9480	0.2315	0.0635	0.0950	0.0379	-0.0187	
2018010212	121.2400	29.4281	250000.0	0.4978	0.8251	0.5660	-0.9382	0.2275	0.0624	0.0934	0.0377	-0.0184	
2018010216	121.2400	29.4281	250000.0	0.4985	0.8165	0.5668	-0.9283	0.2235	0.0614	0.0918	0.0375	-0.0181	
2018010220	121.2400	29.4281	250000.0	0.4992	0.8078	0.5676	-0.9185	0.2196	0.0603	0.0902	0.0374	-0.0178	
2018010224	121.2400	29.4281	250000.0	0.4998	0.7992	0.5684	-0.9087	0.2157	0.0592	0.0886	0.0372	-0.0174	
2018010304	121.2400	29.4281	250000.0	0.5004	0.7905	0.5689	-0.8989	0.2118	0.0581	0.0870	0.0370	-0.0171	
2018010308	121.2400	29.4281	250000.0	0.5009	0.7819	0.5695	-0.8891	0.2079	0.0571	0.0854	0.0368	-0.0168	
2018010312	121.2400	29.4281	250000.0	0.5014	0.7733	0.5701	-0.8793	0.2040	0.0560	0.0838	0.0367	-0.0165	
2018010316	121.2400	29.4281	250000.0	0.5019	0.7648	0.5706	-0.8696	0.2002	0.0549	0.0822	0.0365	-0.0162	
2018010320	121.2400	29.4281	250000.0	0.5023	0.7562	0.5711	-0.8598	0.1964	0.0539	0.0806	0.0363	-0.0159	

地球自转极移与形状极移是两个不同的监测量, 无量纲的形状极移, 是归一化的角动量, 等于地球自转运动的物质负荷激发。

地球自转极移与形状极移分别表征整个地球系统的运动学状态和力学形状随时间变化的行为, 都是客观存在的, 两者都会引起地球空间各种大地测量要素随时间变化。



2.5 永久潮汐影响与地球质心变化效应

[目标]计算大地测量永久潮汐影响, 输入计算点时间序列文件, 由 SLR 实测地球质心变化时序, 计算大地测量要素的地球质心变化效应, 预报地球质心变化的海潮负荷效应与地面大气压潮负荷效应时序。

地球质心在现实地球本体中, 客观存在且唯一, 是典型的大地测量要素, 可以直接测定其在地固坐标系中的坐标。一些文献中常见的地壳形状中心(地面参考框架网中心)与固体

地球质心概念，存在假设或约定性质，不具有唯一性与可测性，不符合作为地固坐标参考系基准的技术条件，也不满足大地测量学的计量学要求，我们只保留（瞬时、平均）地球质心概念。在负荷格林函数积分与负荷球谐综合计算时，一阶位负荷勒夫数因此也恒等于零，即 $k_1^i = 0$ 。

2.5.1 大地测量永久潮汐影响计算

[功能]按输入点值文件中位置，计算高程异常/大地水准面（mm）、地面重力（ μGa ）、扰动重力（ μGal ）、地倾斜（SW 南向/西向 mas）、垂线偏差（SW 南向/西向 mas），地面水平位移（EN 东向/北向 mm）、地面径向（大地高 mm）、扰动重力梯度（径向， $10\mu\text{E}$ ）或水平重力梯度（NE 北向/西向 $10\mu\text{E}$ ）的永久潮汐影响。

[输入]离散点值文件。

永久潮汐与时间无关，是长周期固体潮中的零频率潮汐 ΔC_{20} 。永久潮汐对地球产生一个随纬度变化的永久性附加扁率，对大地测量观测量或参数的影响与其所在位置的经度无关。

程序中计算永久潮汐间接影响的勒夫数取值 $k_{20}=0.29525$ ， $h_{20}=0.6078$ ， $l_{20}=0.0847$ 。

采用不同的永久潮汐改正方法，对应不同的潮汐系统。大地测量潮汐系统有三种类型：无潮汐系统、平均潮汐系统和零潮汐系统。平均潮汐不移去永久潮汐影响，零潮汐移去永久潮汐的直接影响，无潮汐移去永久潮汐的直接影响和间接影响之和。

地面几何大地测量观测量或参数不存在引潮位的直接影响。因此，零潮汐几何大地测量观测量或参数与平均潮汐几何大地测量观测量或参数相等。

永久潮汐影响与地球质心变化效应

打开文件 结果保存 设置参数输入 开始计算 计算信息保存 查看样例

大地测量永久潮汐影响计算 大地测量要素地球质心变化效应计算 地球质心变化海潮负荷效应预报 地球质心变化大气潮负荷效应预报

打开大地测量计算点记录文件 计算信息保存 地球质心变化效应与地心运动计算

设置文件格式
头文件占据行数 1
大地高属性序号 4

选择影响类型
 高程异常(大地水准面mm)
 地面重力(μGa)
 扰动重力(μGal)
 地倾斜(南向/西向mas)
 垂线偏差(南向/西向mas)
 水平位移(东向/北向mm)
 地面径向(大地高mm)
 地面正(常)高(mm)
 扰动重力梯度(径向 $10\mu\text{E}$)
 水平重力梯度(北向/西向 $10\mu\text{E}$)

记录第2、3列约定为地面站点的经纬度

永久潮汐影响类型 直接影响

输入输出数据显示

no	lon	lat	hgt	rent				
2	102.546	24.458	1659.0	-0.104	48.8782	22.4868	0.0000	14.1155
4	102.725	24.460	2111.3	-0.061	48.8669	22.4800	0.0000	14.1083
6	102.528	24.562	1936.4	-0.049	48.4711	22.2986	0.0000	13.9958
9	102.832	24.575	1977.4	-0.122	48.4201	22.2750	0.0000	13.9907
10	102.345	24.668	1919.7	-0.078	48.0572	22.1083	0.0000	13.8766
11	102.423	24.652	1959.3	-0.054	48.1195	22.1368	0.0000	13.8942
13	102.631	24.657	1906.3	-0.118	48.1003	22.1281	0.0000	13.8892
14	102.742	24.652	1935.7	-0.076	48.1196	22.1369	0.0000	13.8945
15	102.843	24.642	1880.7	-0.131	48.1592	22.1553	0.0000	13.9064
16	103.137	24.658	1838.4	-0.073	48.0969	22.1268	0.0000	13.8898
17	102.426	24.743	1929.0	-0.077	47.7633	21.9731	0.0000	13.7919
20	102.729	24.734	1856.2	-0.135	47.7992	21.9898	0.0000	13.8028
21	102.840	24.752	2117.8	-0.045	47.7266	21.9555	0.0000	13.7796
22	102.939	24.728	2050.9	-0.090	47.8212	21.9993	0.0000	13.8075
23	103.029	24.748	2034.1	-0.121	47.7429	21.9633	0.0000	13.7851

永久潮汐与时间无关，是长周期固体潮中的零频率潮汐 ΔC_{20} 。永久潮汐对地球产生一个随纬度变化的永久性附加扁率，对大地测量观测量或参数的影响与其所在位置的经度无关。程序中计算永久潮汐间接影响的勒夫数取值 $k_{20}=0.29525$ ， $h_{20}=0.6078$ ， $l_{20}=0.0847$ 。

地球质心变化是地球内部非潮汐负荷变化导致整个地球形变的一阶项，因而影响地球空间中各种几何物理大地测量要素，而不是简单地表现为纯几何量的站点位移。

2.5.2 大地测量地球质心变化效应计算

[功能]输入地面或地球外部带时间的计算点坐标文件，采用多颗卫星激光测距 SLR 地球质心变化实测或预报时序产品，计算高程异常/大地水准面(mm)、地面重力(μGa)、扰动重力(μGal)、地倾斜(SW 南向/西向 mas)、垂线偏差(SW 南向/西向 mas)，地面水平位移(EN 东向/北向 mm)、地面径向(大地高 mm)、扰动重力梯度(径向, $10\mu\text{E}$)或水平重力梯度(NE 北向/西向 $10\mu\text{E}$)的地球质心变化效应。

地球质心变化是地球内部非潮汐负荷变化导致整个地球形变的一阶项，因而影响地球空间中各种几何物理大地测量要素，而不是简单地表现为纯几何量的站点位移。

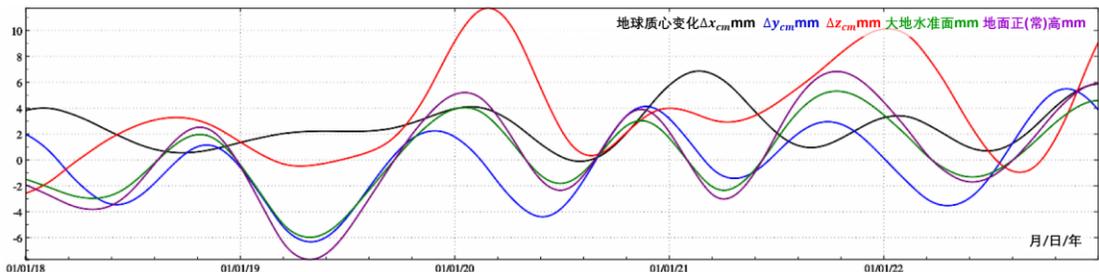
[输入]带观测时间的若干计算点坐标文件。

头文件占住一行。从第二行起，每行记录的第 2、3 个属性约定为经度、纬度(度小数)，记录中存在采样历元时间和高度属性。

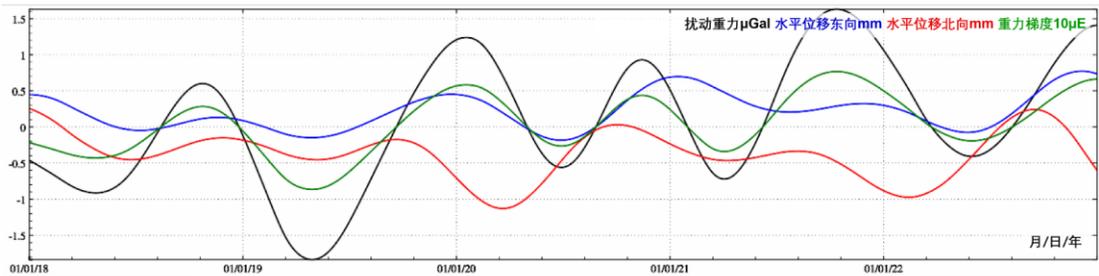
[输出]头文件取输入文件头，输出文件记录在输入文件记录的基础上，增加用户选择要素的地球质心变化效应。

如果计算时间超出 SLR 实测地心运动参数文件时间范围，请更新参数时间序列文件!

一阶位移负荷勒夫数 h_1^* 和 l_1^* 的准确性有重要价值，目前的推荐值还需要进一步验证，今后应在唯一不变的地固坐标系中(基准的唯一性)，由全球地面参考框架多年坐标解时间序列，精化固体地球的 1 阶位移负荷勒夫数 h_1^* 和 l_1^* 。



地球质心变化及其对大地水准面与地面正常高的影响



大地测量要素地球质心变化效应时间序列

2.5.3 地球质心变化海潮负荷效应预报

[功能]输入时间序列参数，由海潮负荷球谐系数一阶项文件（海潮负荷球谐系数模型构程序输出文件），预报地球质心变化的海潮负荷效应（ X_{cm} , Y_{cm} , Z_{cm} ; mm）时间序列。

[输入]界面输入时间序列参数。

永久潮汐影响与地球质心变化效应

打开文件 结果保存 设置参数输入 开始计算 计算信息保存 查看样例

大地测量永久潮汐影响计算 大地测量要素地球质心变化效应计算 **地球质心变化海潮负荷效应预报** 地球质心变化大气潮负荷效应预报

设置预报时段参数

开始时刻: 20160701
结束时刻: 20160715
时间间隔: 60.00 min

计算信息保存

大地测量全要素地球质心变化效应计算

** 点击[开始计算]控件按钮，或[开始计算]工具按钮.....

>> 计算开始时间: 2024-05-15 09:12:27

>> 完成地球质心变化效应计算!

>> 计算结束时间: 2024-05-15 09:12:27

>> [功能]输入时间序列参数，由海潮负荷球谐系数一阶项文件（海潮负荷球谐系数模型构程序输出文件），预报地球质心变化的海潮负荷效应（ X_{cm} , Y_{cm} , Z_{cm} , mm）时间序列。

>> 结果文件保存为: C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Permanentdgeoenter/otdgeoentrst.txt.

>> 参数设置结果已输入系统!

** 点击[开始计算]控件按钮，或[开始计算]工具按钮.....

>> 计算开始时间: 2024-05-15 09:13:42

>> 完成地球质心变化海潮负荷效应计算!

>> 计算结束时间: 2024-05-15 09:13:42

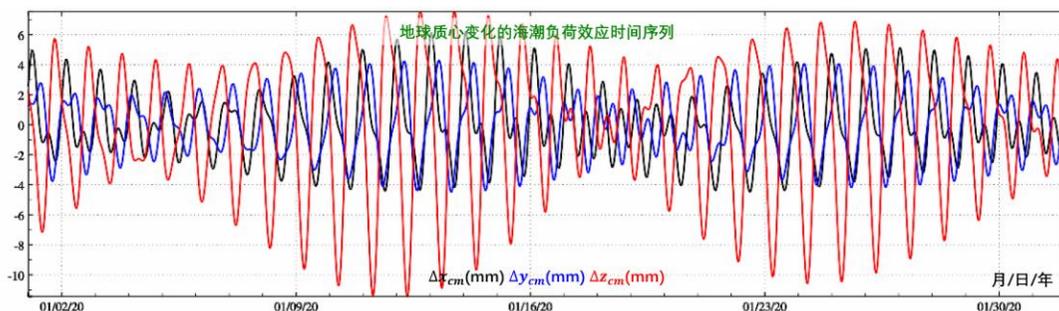
结果文件保存为 参数设置结果输入 开始计算

输入输出数据显示 ↓

Otidgeoenter	0.00	0.00	0.00	57570.000000	-1.8888
2016070100	0.000000	1.8250	4.1299	-3.5160	-1.8888
2016070101	0.041667	0.5041	4.1937	-5.0214	-3.5160
2016070102	0.083333	-0.8168	3.6263	-6.0838	-5.0214
2016070103	0.125000	-1.9306	2.4942	-6.4140	-6.0838
2016070104	0.166667	-2.6848	0.9966	-5.9776	-6.4140
2016070105	0.208333	-3.0220	-0.5533	-4.9099	-5.9776
2016070106	0.250000	-2.9774	-1.8460	-3.3494	-4.9099
2016070107	0.291667	-2.6381	-2.7016	-1.4945	-3.3494
2016070108	0.333333	-2.1152	-3.0653	0.3139	-1.4945
2016070109	0.375000	-1.5704	-2.9291	1.7377	0.3139
2016070110	0.416667	-1.2001	-2.3514	2.6398	1.7377
2016070111	0.458333	-1.1110	-1.5264	3.0545	2.6398
2016070112	0.500000	-1.2582	-0.7283	3.0155	3.0545
2016070113	0.541667	-1.5214	-0.1786	2.5638	3.0155
2016070114	0.583333	-1.7637	0.0066		2.5638

永久潮汐与时间无关，是长周期固体潮中的零频率潮汐 ΔC_{20} 。永久潮汐对地球产生一个随纬度变化的永久性附加扁率，对大地测量观测量或参数的影响与其所在位置的经度无关。程序中计算永久潮汐间接影响的勒夫数取值 $k_{oe}=0.29525$, $h_{oe}=0.6078$, $l_{oe}=0.0847$ 。

地球质心变化是地球内部非潮汐负荷变化导致整个地球形变的一阶项，因而影响地球空间中各种几何物理大地测量要素，而不是简单地表现为纯几何量的站点位移。



[输出]头文件占住一行，记录第 1 列为系统格式时间，第 2 列与头文件最后 1 列之和为 MJD 天数，最后 3 列为地球质心变化的海潮负荷效应。

海潮负荷球谐系数一阶项文件 OtideOne.dat，由[海潮负荷球谐系数模型构建程序]自动生成，可通过 ETideLoad4.5[地球物理模型与数值标准设置]程序中更新。

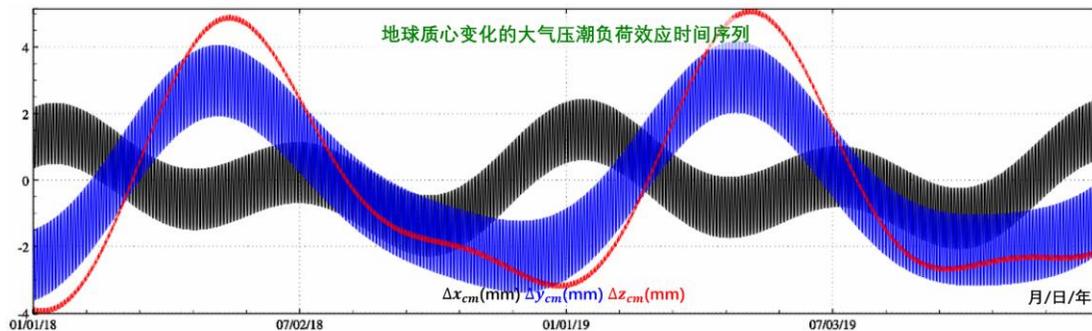
2.5.4 地球质心变化大气潮负荷效应预报

[功能] 输入时间序列参数，由地面大气压潮负荷球谐系数一阶项文件（大气压潮负荷球谐系数模型构建程序输出文件），预报地球质心变化的地面大气压潮负荷效应（ X_{cm} , Y_{cm} , Z_{cm} ; mm）时间序列。

[输出]头文件占住一行，记录第 1 列为系统格式时间，第 2 列与头文件最后 1 列之和为 MJD 天数，最后 3 列为地球质心变化的地面大气压潮负荷效应。

地面大气压潮负荷球谐系数一阶项文件 OtideOne.dat，由[大气压潮负荷球谐系数模型

构建程序]自动生成，可通过 ETideLoad4.5[地球物理模型与数值标准设置]程序中更新。



2.6 大地测量控制网固体潮负荷潮效应计算

[目标]按输入大地控制网文件记录中线路两端位置和观测时间，计算 GNSS 基线或水准高差的固体潮效应、海潮负荷效应或大气压潮负荷效应。

[输入]GNSS 基线网或水准路线网文件，采用 ETideLoad 自定义格式。

头文件占据一行。记录格式：GNSS 基线或水准路线名称，起点经度，纬度，高度，终点经度，纬度，高度，观测时间，…。时间属性列序号不小于 8。

[参数设置]选择控制网类型，输入文件记录中时间属性列序号，负荷潮球谐系数模型最大阶数，输入结果文件名。

计算过程 ** 操作提示

路线名称，起点经度，纬度，高度，终点经度，纬度，高度，观测时间，…。记录中时间属性列序号不小于8。

>> 请先选择控制网类型，再从界面右上方三个控件按钮中选择功能模块...

>> 计算固体潮效应(mm)。

>> 计算GNSS控制网三维基线向量的潮汐效应...

>> 打开带时间的GNSS控制网基线文件 C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Controlnetworktide/GNSSbaseline_levelingroutine.txt。

** 观察下方窗口文件信息，设置输入文件格式，输入结果保存文件名后，点击[参数设置结果输入]按钮，将参数输入系统...

>> 结果文件保存为C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Controlnetworktide/GNSSbaselineolidtide.txt。

在输入文件记录的基础上增加潮汐效应计算值，保留4位有效数字。

>> 参数设置结果已输入系统!

** 点击[开始计算]控件按钮，或[开始计算]工具按钮.....

>> 计算开始时间: 2023-01-25 19:56:56

>> 完成GNSS控制网基线固体潮效应计算!

>> 计算结束时间: 2023-01-25 19:56:57

站名	东经	北纬	高程	东经	北纬	高程	观测时间	Δx _{cm} (mm)	Δy _{cm} (mm)	Δz _{cm} (mm)
CANN_DONT	120.424700	27.522580	21.8	121.150270	27.834630	28.6	79493.9 1.5	2016072412	1.2202	0.8914 0.1312 -2.9377
CANN_FDQC	120.424700	27.522580	21.8	120.207320	27.335310	32.5	29876.4 1.5	2016072412	1.2721	-0.2625 -0.0303 1.0658
CANN_JRYW	120.424700	27.522580	21.8	120.078380	29.272690	32.5	196999.1 1.5	2016072412	1.3927	-0.4457 -0.2262 -2.0067
CANN_JJNH	120.424700	27.522580	21.8	119.642580	29.217830	32.5	202930.8 1.5	2016072412	1.6668	-0.9666 -0.3348 -0.4421
CANN_JJNX	120.424700	27.522580	21.8	119.379220	29.070950	32.5	199897.1 1.5	2016072412	1.3931	-1.2789 -0.3923 0.7251
CANN_JNJZ	120.424700	27.522580	21.8	119.637540	27.976350	32.5	92473.9 1.5	2016072412	1.2143	-0.9650 -0.2266 1.8408
CANN_JSAN	120.424700	27.522580	21.8	118.608560	28.727950	32.5	222881.6 2.5	2016072512	1.2766	-0.9246 -0.9810 3.2264
CANN_LHAI	120.424700	27.522580	21.8	121.189470	28.905910	32.5	170695.1 2.5	2016072512	1.3588	0.7247 0.1287 -7.0521
CANN_LISH	120.424700	27.522580	21.8	120.461260	28.461260	32.5	114864.2 2.5	2016072512	1.6040	-0.1287 0.1287 -7.0521
CANN_LONQ	120.424700	27.522580	21.8	120.080720	28.080720	32.5	141509.7 2.5	2016072512	1.3241	-0.7222 0.1287 3.2567
CANN_LJOY	120.424700	27.522580	21.8	120.552460	27.552460	32.5	71164.3 2.5	2016072512	1.1005	-0.4544 0.1287 -2.7014
CANN_PANR	120.424700	27.522580	21.8	120.436660	29.054190	32.5	169743.8 2.5	2016072512	1.8995	0.2505 -0.2158 -4.8617
CANN_PCJH	120.424700	27.522580	21.8	118.542210	27.923210	32.5	190867.4 2.5	2016072512	1.4645	-1.0953 -0.8725 6.0969
CANN_PCJM	120.424700	27.522580	21.8	118.445440	28.167970	32.5	207660.5 2.5	2016072512	1.7441	-1.1113 -0.9592 5.6876
CANN_QINT	120.424700	27.522580	21.8	120.289980	28.139380	32.5	69628.7 2.5	2016072512	1.1991	0.0078 -0.1545 -1.4199
CANN_QIYU	120.424700	27.522580	21.8	119.079250	27.621280	32.5	133312.2 2.5	2016072512	2.1814	-0.8271 -0.5850 4.9419

GNSS网基线文件和水准网水准路线文件格式相同。程序采用ETideLoad自定义格式。头文件占据一行。记录格式：GNSS基线或水准路线名称，起点经度，纬度，高度，终点经度，纬度，高度，观测时间，…。记录中时间属性列序号不小于8。

大地测量控制网观测量的潮汐效应，应是观测量在实际观测时刻的潮汐效应。顾及1/6日分潮影响时，水准高差观测时间跨度不应超过2小时。

地面控制点的高度(10m精度)：计算固体潮时用大地高，计算海潮负荷时用正(高)高，计算大气压潮负荷时为相对地面高度(程序自动置零)。

重力控制网的外业观测在重力点进行，其固体潮、海潮负荷和大气压潮负荷效应按站点位置 and 实际观测时间计算。

GNSS 网基线文件和水准网水准路线文件格式相同。

大地测量控制网观测量的潮汐效应，应是观测量在实际观测时刻的潮汐效应。顾及 1/6

日分潮影响时，水准高差观测时间跨度不应超过 2 小时。

计算过程 ** 操作提示

- 完成GNSS控制网基线固体潮效应计算!
- 计算结束时间: 2023-01-25 19:56:57
- 计算固体潮效应(mm)...
- 计算水准网水准路线观测高差的潮汐效应...
- 打开带时间的水准网水准路线文件 C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Controlnetworktidef/GNSSbaseline_levelingroutine.txt.
- 观察下方窗口文件信息, 设置输入文件格式, 输入结果保存文件名后, 点击[参数设置结果输入]按钮, 将参数输入系统...
- 结果文件保存为C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Controlnetworktidef/levelroutinesolidtide.txt.
- 在输入文件记录的基础上增加潮汐效应计算值, 保留4位有效数字。
- 参数设置结果已输入系统!
- 点击[开始计算]控件按钮, 或[开始计算]工具按钮.....
- 计算开始时间: 2023-01-25 19:57:51
- 完成水准路线观测高差固体潮效应计算!
- 计算结束时间: 2023-01-25 19:57:51

输出数据

点名	东	北	高	大地高	正常高	高程异常	潮汐效应
CANN_DONT	120.424700	27.522580	21.8	121.150270	27.834630	28.6	79493.9 1.5 2016072412 1.2202 3.0774
CANN_FDIQ	120.424700	27.522580	21.8	120.207320	27.335310	32.5	29876.4 1.5 2016072412 1.2721 -1.0956
CANN_JHYW	120.424700	27.522580	21.8	120.078380	29.272690	32.5	196899.1 1.5 2016072412 1.3927 1.7007
CANN_JJNH	120.424700	27.522580	21.8	119.642580	29.217830	32.5	202930.8 1.5 2016072412 1.6668 0.0324
CANN_JJNX	120.424700	27.522580	21.8	119.379220	29.070950	32.5	199897.1 1.5 2016072412 1.3931 -1.1867
CANN_JNJZ	120.424700	27.522580	21.8	119.637540	27.976350	32.5	92473.9 1.5 2016072412 1.2143 -2.1082
CANN_JSAN	120.424700	27.522580	21.8	118.608560	28.727950	32.5	222881.6 2.5 2016072512 1.2766 -3.7264
CANN_LHAI	120.424700	27.522580	21.8	120.189470	28.909510	32.5	170695.1 2.5 2016072512 1.3588 7.4908
CANN_LLSH	120.424700	27.522580	21.8	119.637540	27.976350	32.5	114864.2 2.5 2016072512 1.6040 0.9304
CANN_LONQ	120.424700	27.522580	21.8	120.078380	28.080720	32.5	141509.7 2.5 2016072512 1.3241 -6.3226
CANN_LUOY	120.424700	27.522580	21.8	120.436660	29.054190	32.5	169743.8 2.5 2016072512 1.1005 -2.9206
CANN_PANA	120.424700	27.522580	21.8	120.436660	29.054190	32.5	169743.8 2.5 2016072512 1.8995 4.9160
CANN_PCHQ	120.424700	27.522580	21.8	118.542210	27.923210	32.5	190867.4 2.5 2016072512 1.4645 -6.6585
CANN_PCJM	120.424700	27.522580	21.8	118.445440	28.167970	32.5	207660.5 2.5 2016072512 1.7441 -6.2671
CANN_QJNT	120.424700	27.522580	21.8	120.289980	28.139380	32.5	69628.7 2.5 2016072512 1.1991 1.3939
CANN_QIYU	120.424700	27.522580	21.8	119.079250	27.621280	32.5	133312.2 2.5 2016072512 2.1814 -5.3509

水准高差固体潮效应mm

计算过程 ** 操作提示

- 完成水准路线观测高差固体潮效应计算!
- 计算结束时间: 2023-01-25 19:57:51
- 计算高潮负荷效应(mm)...
- 计算GNSS控制网三维基线向量的潮汐效应...
- 打开带时间GNSS控制网基线文件 C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Controlnetworktidef/GNSSbaseline_levelingroutine.txt.
- 观察下方窗口文件信息, 设置输入文件格式, 输入结果保存文件名后, 点击[参数设置结果输入]按钮, 将参数输入系统...
- 结果文件保存为C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Controlnetworktidef/GNSSbaselotidload.txt.
- 在输入文件记录的基础上增加潮汐效应计算值, 保留4位有效数字。
- 参数设置结果已输入系统!
- 点击[开始计算]控件按钮, 或[开始计算]工具按钮.....
- 计算开始时间: 2023-01-25 19:59:00
- 完成GNSS控制网基线海潮负荷效应计算!
- 计算结束时间: 2023-01-25 20:00:19

输出数据

点名	东	北	高	大地高	正常高	高程异常	潮汐效应
CANN_DONT	120.424700	27.522580	21.8	121.150270	27.834630	28.6	79493.9 1.5 2016072412 1.2202 1.5302 -1.7339 -7.3849
CANN_FDIQ	120.424700	27.522580	21.8	120.207320	27.335310	32.5	29876.4 1.5 2016072412 1.2721 -0.1975 0.5670 2.6178
CANN_JHYW	120.424700	27.522580	21.8	120.078380	29.272690	32.5	196899.1 1.5 2016072412 1.3927 -5.9334 -3.3567 0.8212
CANN_JJNH	120.424700	27.522580	21.8	119.642580	29.217830	32.5	202930.8 1.5 2016072412 1.6668 -6.6843 -2.2407 -8.6020
CANN_JJNX	120.424700	27.522580	21.8	119.379220	29.070950	32.5	199897.1 1.5 2016072412 1.3931 -6.0052 -1.1866 -11.0751
CANN_JNJZ	120.424700	27.522580	21.8	119.637540	27.976350	32.5	92473.9 1.5 2016072412 1.2143 -4.4776 1.6213 -2.9908
CANN_JSAN	120.424700	27.522580	21.8	118.608560	28.727950	32.5	222881.6 2.5 2016072512 1.2766 -5.7008 0.8475 -24.7294
CANN_LHAI	120.424700	27.522580	21.8	120.189470	28.909510	32.5	170695.1 2.5 2016072512 1.3588 0.4085 -0.4935 -9.5377
CANN_LLSH	120.424700	27.522580	21.8	119.637540	27.976350	32.5	114864.2 2.5 2016072512 1.6040 -5.7708 0.4125 7.8884
CANN_LONQ	120.424700	27.522580	21.8	120.078380	28.080720	32.5	141509.7 2.5 2016072512 1.3241 -6.4738 0.4810 -20.4115
CANN_LUOY	120.424700	27.522580	21.8	120.436660	29.054190	32.5	169743.8 2.5 2016072512 1.1005 -3.9793 0.1890 -1.1890
CANN_PANA	120.424700	27.522580	21.8	120.436660	29.054190	32.5	169743.8 2.5 2016072512 1.8995 -3.6858 0.4320 -6.2443
CANN_PCHQ	120.424700	27.522580	21.8	118.542210	27.923210	32.5	190867.4 2.5 2016072512 1.4645 -6.2674 1.5672 -23.7766
CANN_PCJM	120.424700	27.522580	21.8	118.445440	28.167970	32.5	207660.5 2.5 2016072512 1.7441 -5.8480 1.1670 -24.8319
CANN_QJNT	120.424700	27.522580	21.8	120.289980	28.139380	32.5	69628.7 2.5 2016072512 1.1991 -2.8285 0.9409 -3.1421
CANN_QIYU	120.424700	27.522580	21.8	119.079250	27.621280	32.5	133312.2 2.5 2016072512 2.1814 -7.5856 3.1131 -10.4300

GNSS基线位移ENU
海潮负荷效应mm

地面控制点的高度 (10m 精度): 计算固体潮时用大地高, 计算海潮负荷时用正 (常)

高，计算大气压潮负荷时为控制点相对地面高度（程序自动置零）。

大地测量控制网固体潮负荷效应计算

打开文件 结果保存 设置参数输入 开始计算 计算信息保存 查看样例

选择控制网类型 精密水准网

计算过程 ** 操作提示

计算开始时间: 2023-01-25 19:59:00
完成GNSS控制网基线海潮负荷效应计算!
计算结束时间: 2023-01-25 20:00:12
计算水准网水准路线观测高差海潮效应...
打开带时间的水准网水准路线文件 C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Controlnetworktide/GNSSbaseline_levelingroutine.txt.
** 观察下方窗口文件信息, 设置输入文件格式, 输入结果保存文件名后, 点击[参数设置结果输入]按钮, 将参数输入系统...
结果文件保存为C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Controlnetworktide/levelroutineidload.txt.
在输入文件记录的基础上增加潮汐效应计算值, 保留4位有效数字。
参数设置结果已输入系统!
** 点击[开始计算]控件按钮, 或[开始计算]工具按钮.....
计算开始时间: 2023-01-25 20:02:04
完成水准路线观测高差海潮负荷效应计算!
计算结束时间: 2023-01-25 20:03:17

考察正常高差与大地高差海潮负荷效应的差异

输入输出数据显示

站名	经度	纬度	高程	潮高	潮低	潮差	潮速	潮向	潮位	潮差	
CANN_DONT	120.424700	27.522580	21.8	121.150270	27.834630	28.6	79493.9	1.5	2016072412	1.2202	-10.5202
CANN_FDIQ	120.424700	27.522580	21.8	120.207320	27.335310	32.5	29876.4	1.5	2016072412	1.2721	3.6871
CANN_JHYW	120.424700	27.522580	21.8	120.078380	29.272690	32.5	196899.1	1.5	2016072412	1.3927	1.9175
CANN_JJNH	120.424700	27.522580	21.8	119.642580	29.217830	32.5	202930.8	1.5	2016072412	1.6668	-10.1187
CANN_JJNX	120.424700	27.522580	21.8	119.379220	29.070950	32.5	199897.1	1.5	2016072412	1.3931	-13.4612
CANN_JNJZ	120.424700	27.522580	21.8	119.637540	27.976350	32.5	92473.9	1.5	2016072412	1.2143	-3.2359
CANN_JSAN	120.424700	27.522580	21.8	118.608560	28.727950	32.5	222881.6	2.5	2016072512	1.2766	-32.9398
CANN_LHAI	120.424700	27.522580	21.8	120.289980	28.139380	32.5	170628.1	2.5	2016072512	1.3588	-13.0108
CANN_LISH	120.424700	27.522580	21.8	119.461260	27.524600	32.5	114864.2	2.5	2016072512	1.6040	-15.4518
CANN_LONQ	120.424700	27.522580	21.8	120.080720	28.080720	32.5	141509.7	2.5	2016072512	1.3241	-26.5919
CANN_LUOY	120.424700	27.522580	21.8	120.436660	29.054190	32.5	169743.8	2.5	2016072512	1.8985	-2.9854
CANN_PANA	120.424700	27.522580	21.8	118.542210	27.923210	32.5	190867.4	2.5	2016072512	1.4645	-31.2722
CANN_PCJM	120.424700	27.522580	21.8	118.445440	28.167970	32.5	207660.5	2.5	2016072512	1.7441	-32.8558
CANN_QJMT	120.424700	27.522580	21.8	120.289980	28.139380	32.5	69628.7	2.5	2016072512	1.1991	-4.1912
CANN_QIYU	120.424700	27.522580	21.8	119.079250	27.621280	32.5	133312.2	2.5	2016072512	2.1814	-13.5533

GNSS网基线文件和水准网水准路线文件格式相同, 程序采用ETideLoad自定义格式。头文件占据一行。记录格式: GNSS基线或水准路线名称, 起点经度, 纬度, 高度, 终点经度, 纬度, 高度, 观测时间, ...。记录中时间属性列序号不小于8。

大地测量控制网观测测量的潮汐效应, 应是观测量在实际观测时刻的潮汐效应。顾及1/6日分潮影响时, 水准高差观测时间跨度不应超过2小时。

地面控制点的高度(10m精度): 计算固体潮时用大地高, 计算海潮负荷时用正常高, 计算大气压潮负荷时为相对地面高度(程序自动置零)。

重力控制网的外业观测在重力点上, 其固体潮、海潮负荷和大气压潮负荷效应按站点位置 and 实际观测时间计算。

大地测量控制网固体潮负荷效应计算

打开文件 结果保存 设置参数输入 开始计算 计算信息保存 查看样例

选择控制网类型 GNSS基线网

计算过程 ** 操作提示

计算开始时间: 2023-01-25 20:08:09
完成水准路线观测高差海潮负荷效应计算!
计算结束时间: 2023-01-25 20:03:17
计算大气压潮负荷效应(mm)...
计算GNSS控制网三维基线向量的潮汐效应...
打开带时间的GNSS控制网基线文件 C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Controlnetworktide/GNSSbaseline_levelingroutine.txt.
** 观察下方窗口文件信息, 设置输入文件格式, 输入结果保存文件名后, 点击[参数设置结果输入]按钮, 将参数输入系统...
结果文件保存为C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Controlnetworktide/GNSSbaselineidload.txt.
在输入文件记录的基础上增加潮汐效应计算值, 保留4位有效数字。
参数设置结果已输入系统!
** 点击[开始计算]控件按钮, 或[开始计算]工具按钮.....
计算开始时间: 2023-01-25 20:08:09
完成GNSS控制网基线大气压潮负荷效应计算!
计算结束时间: 2023-01-25 20:08:16

考察正常高差与大地高差海潮负荷效应的差异

输入输出数据显示

站名	经度	纬度	高程	潮高	潮低	潮差	潮速	潮向	潮位	潮差	GNSS基线位移	大气压潮负荷效应	
CANN_DONT	120.424700	27.522580	21.8	121.150270	27.834630	28.6	79493.9	1.5	2016072412	1.2202	-0.0400	-0.0177	-0.0295
CANN_FDIQ	120.424700	27.522580	21.8	120.207320	27.335310	32.5	29876.4	1.5	2016072412	1.2721	0.0120	0.0069	0.0305
CANN_JHYW	120.424700	27.522580	21.8	120.078380	29.272690	32.5	196899.1	1.5	2016072412	1.3927	-0.0227	-0.0442	-0.2633
CANN_JJNH	120.424700	27.522580	21.8	119.642580	29.217830	32.5	202930.8	1.5	2016072412	1.6668	-0.0050	-0.0359	-0.2641
CANN_JJNX	120.424700	27.522580	21.8	119.379220	29.070950	32.5	199897.1	1.5	2016072412	1.3931	0.0063	-0.0266	-0.2457
CANN_JNJZ	120.424700	27.522580	21.8	119.637540	27.976350	32.5	92473.9	1.5	2016072412	1.2143	0.0203	0.0021	-0.0422
CANN_JSAN	120.424700	27.522580	21.8	118.608560	28.727950	32.5	222881.6	2.5	2016072512	1.2766	0.0301	-0.0052	-0.1948
CANN_LHAI	120.424700	27.522580	21.8	120.289980	28.139380	32.5	170628.1	2.5	2016072512	1.3588	-0.0602	0.0519	-0.1741
CANN_LISH	120.424700	27.522580	21.8	119.461260	27.524600	32.5	114864.2	2.5	2016072512	1.6040	0.0000	0.0518	0.1289
CANN_LONQ	120.424700	27.522580	21.8	120.080720	28.080720	32.5	141509.7	2.5	2016072512	1.3241	0.0000	0.0518	0.1289
CANN_LUOY	120.424700	27.522580	21.8	120.436660	29.054190	32.5	169743.8	2.5	2016072512	1.8985	0.0000	0.0518	0.1289
CANN_PANA	120.424700	27.522580	21.8	118.542210	27.923210	32.5	190867.4	2.5	2016072512	1.4645	-0.0320	-0.0419	-0.2118
CANN_PCJM	120.424700	27.522580	21.8	118.445440	28.167970	32.5	207660.5	2.5	2016072512	1.7441	0.0414	0.0165	-0.0502
CANN_QJMT	120.424700	27.522580	21.8	120.289980	28.139380	32.5	69628.7	2.5	2016072512	1.1991	0.0400	0.0135	-0.0969
CANN_QIYU	120.424700	27.522580	21.8	119.079250	27.621280	32.5	133312.2	2.5	2016072512	2.1814	-0.0053	-0.0143	-0.0818

GNSS网基线文件和水准网水准路线文件格式相同, 程序采用ETideLoad自定义格式。头文件占据一行。记录格式: GNSS基线或水准路线名称, 起点经度, 纬度, 高度, 终点经度, 纬度, 高度, 观测时间, ...。记录中时间属性列序号不小于8。

大地测量控制网观测测量的潮汐效应, 应是观测量在实际观测时刻的潮汐效应。顾及1/6日分潮影响时, 水准高差观测时间跨度不应超过2小时。

地面控制点的高度(10m精度): 计算固体潮时用大地高, 计算海潮负荷时用正常高, 计算大气压潮负荷时为相对地面高度(程序自动置零)。

重力控制网的外业观测在重力点上, 其固体潮、海潮负荷和大气压潮负荷效应按站点位置 and 实际观测时间计算。

重力控制网的外业观测在重力点上, 其固体潮、海潮负荷和大气压潮负荷效应按站点位置 and 实际观测时间计算。

点位置 and 实际观测时间计算。

2.7 近地空间负荷潮效应格林积分法区域精化

[目标]由移去模型量的海洋潮高或大气压潮调和常数残差量格网(向量格式),按负荷格林函数积分法,计算地面或近地空间海潮或大气压潮负荷效应的残差量。

程序要求将全部分潮的区域调和常数残差量格网文件独立存放于某个文件夹下。分潮调和常数格网文件采用向量格网形式存储,头文件第7个属性为Doodson常数。

计算海潮负荷效应时采用计算点相对海平面的高度,即正(常)高;计算大气压潮负荷效应时采用计算点相对于地面高度。

2.7.1 区域海潮负荷效应残差量格林积分计算

[功能]由区域海洋潮高各分潮调和常数残差量格网,按负荷格林函数积分法,计算高程异常(大地水准面 mm)、地面重力(μGal)、扰动重力(μGal)、地倾斜(SW南向/西向 mas)、垂线偏差(SW南向/西向 mas)、水平位移(EN东向/北向 mm)、地面径向(大地高 mm)、地面正(常)高(mm)、扰动重力梯度(径向 mE)与水平重力梯度(NE北向/西向 E)海潮负荷效应的残差量。

[输入]地面站点时间序列文件,区域海洋潮高各分潮调和常数残差量格网。

[参数设置]输入文件记录中时间属性和正(常)高列序号,选择影响类型,输入格林函数积分半径和输入结果文件名。

指定海洋分潮调和常数残差量格网文件目录

打开带时间的近地空间点坐标文件

设置计算点文件格式

头文件中起始MJD列序号 5

记录中时间属性列序号 1

记录中正(常)高属性列序号 4

选择影响类型

高程异常(大地水准面mm)

地面重力(μGal)

扰动重力(μGal)

地倾斜(南向/西向mas)

垂线偏差(南向/西向mas)

水平位移(东向/北向mm)

地面径向(大地高mm)

地面正(常)高(mm)

扰动重力梯度(径向mE)

水平重力梯度(北向/西向E)

格林函数积分半径 300 km

输入输出数据显示!

201901010000	121.230000	29.910000	47.218	0.000000	-0.1210	-0.1396	0.2815	-0.1777
201901010100	121.230000	29.910000	47.218	0.041667	-1.3221	-1.1630	2.4871	-0.7737
201901010200	121.230000	29.910000	47.218	0.083333	-2.0286	-1.7591	3.7157	-1.1076
201901010300	121.230000	29.910000	47.218	0.125000	-2.1081	-1.8155	3.9049	-1.1157
201901010400	121.230000	29.910000	47.218	0.166667	-1.5900	-1.3594	2.9316	-0.8174
201901010500	121.230000	29.910000	47.218	0.208333	-0.6572	-0.5491	1.1953	-0.3106
201901010600	121.230000	29.910000	47.218	0.250000	0.4012	0.3662	-0.7689	0.2541
201901010700	121.230000	29.910000	47.218	0.291667	1.2632	1.1099	-2.3668	0.7111
201901010800	121.230000	29.910000	47.218	0.333333	1.6569	1.4494	-3.0973	0.9225
201901010900	121.230000	29.910000	47.218	0.375000	1.4321	1.2564	-2.6844	0.8136
201901011000	121.230000	29.910000	47.218	0.416667	0.6017	0.5434	-1.1538	0.3938
201901011100	121.230000	29.910000	47.218	0.458333	-0.6555	-0.5355	1.1639	-0.2437
201901011200	121.230000	29.910000	47.218	0.500000	-2.0355	-1.7190	3.7075	-0.9433
201901011300	121.230000	29.910000	47.218	0.541667	-3.1810	-2.7012	5.8187	-1.5241
201901011400	121.230000	29.910000	47.218	0.583333	-3.7697	-3.2067	6.9049	-1.8249

程序要求全部分潮的区域调和常数残差量格网文件独立存放于某文件夹下。分潮调和常数采用向量格网形式存储,头文件第7个属性为Doodson常数。

EtideLoad4.5以区域调和常数格网为观测量,以全球负荷潮球谐系数模型为参考场,采用负荷格林函数积分,按移去恢复法精化区域负荷潮效应。本程序只计算移去恢复过程中负荷潮效应的区域残差量。

计算海潮负荷效应时采用计算点相对海平面的高度,即正(常)高。计算大气压潮负荷效应时采用计算点相对于地面高度。

[输出]头文件取输入文件头,记录在输入文件记录的基础上,增加用户选择要素的海潮负荷效应残差量属性。本例增加高程异常、地面重力、地面径向和扰动重力梯度海潮负荷效

应残差量共 4 列属性。

ETideLoad4.5 以区域调和常数格网为观测量，以全球负荷潮球谐系数模型为参考场，采用负荷格林函数积分，按移去恢复法精化区域负荷潮效应。本程序计算移去恢复过程中的区域负荷潮效应残差量。

选择位于海岸带区域 $P_2(121.3^{\circ}E, 28.8^{\circ}N, h11m)$ 和离开海岸线 200km 的海域海岛上 $P_3(123.47^{\circ}E, 25.75^{\circ}N, h3m)$ 两个点，采用由 10 个分潮调和常数模型构成的中国近海 1.2'×1.2'高精度海潮模型 TMchinaR1 (许军, 暴景阳, 2008)，以 720 阶全球海潮负荷球谐系数 (cm) 模型 FES2014b720cs.dat 为负荷潮参考场，按移去-负荷格林函数积分-恢复法计算这两个点处各种大地测量要素的海潮负荷效应残差值时间序列。时间跨度 2020 年 1 月 1 日 0 时至 2020 年 1 月 31 日 24 时，时间间隔 30 分钟，如图。负荷格林函数积分半径 300km，分析海潮球谐系数模型误差影响及高分辨率海潮负荷形变效应的空间和时变特点。

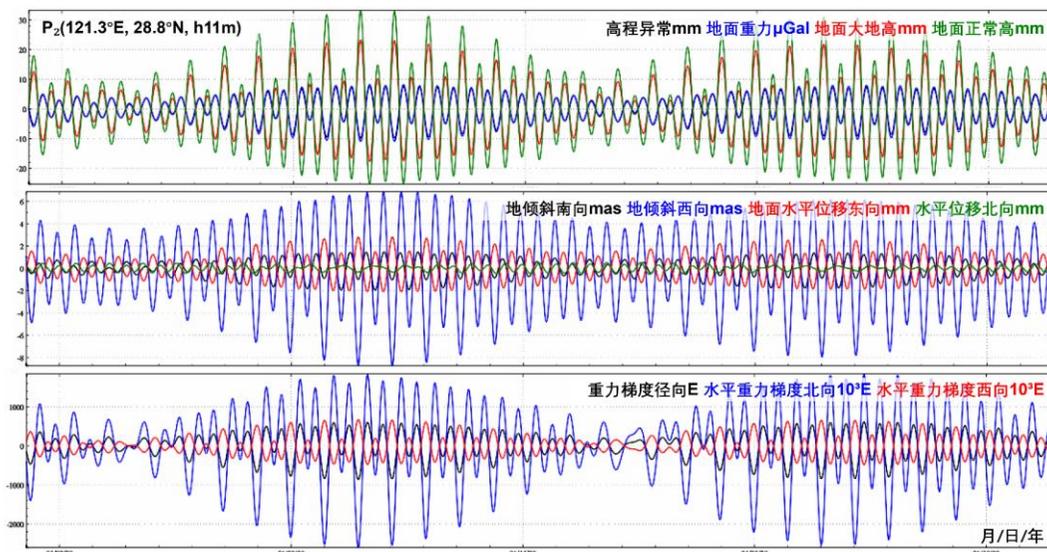


图 1 海岸 P_2 点大地测量全要素海潮负荷效应残差值时间序列

不难理解, 各种大地测量要素的海潮负荷效应残差值时间序列, 也表示 720 阶 FES2014b 海潮球谐系数模型误差对相应大地测量变化量的影响。图 1 和图 2 显示, 即使是 720 阶 FES2014 这样质量较好的高阶海潮球谐系数模型, 海潮模型误差对沿海地区地面正常高影响还可达 5.9cm, 对高程异常和大地高的影响分别可达 1.7cm 和 4.1cm, 对地倾斜和水平位移的影响分别可达 23.6mas 和 1.6cm。

海潮球谐系数模型误差对扰动重力梯度影响很大, 远远超出由海潮球谐系数模型本身计算的海潮负荷效应量级。图 1 显示, 即使采用当前很好的全球海潮模型 FES2014b, 34 个分潮都展开到 720 阶, 海潮球谐系数模型误差对沿海地区径向重力梯度影响仍然可达数十 E。这说明, 重力梯度的海潮负荷效应主要集中在超短波部分, 高阶海潮球谐系数模型 FES2014b720cs 也无法包含这些超短波信号。在海岸带区域, 残差负荷潮格林积分法重力梯度海潮负荷的计算结果发散, 不可用。

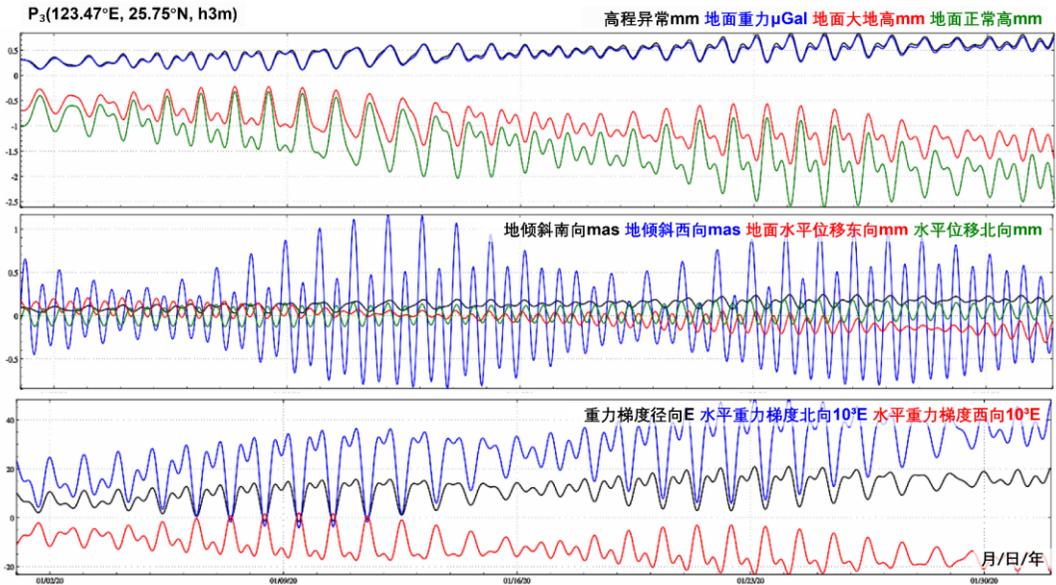


图 2 海岛 P_3 点大地测量全要素海潮负荷效应残差值时间序列

图 2 显示，离岸 200km 后的海潮球谐系数模型误差显著下降，除重力梯度外，模型误差对其他各种大地测量要素的影响较小，但对重力梯度径向影响还可达到 20mE，对水平重力梯度影响仍可超过 40E。

2.7.2 区域大气压潮负荷效应残差量格林积分

[功能]由区域地面大气压各分潮调和常数残差量格网，按负荷格林函数积分法，计算残差高程异常（大地水准面 mm）、地面重力（ μGal ）、扰动重力（ μGal ）、地倾斜（SW 南向/西向 mas）、垂线偏差（SW 南向/西向 mas）、水平位移（EN 东向/北向 mm）、地面径向（大地高 mm）、地面正（常）高（mm）、扰动重力梯度（径向 mE）和水平重力梯度（NE 北向/西向 E）的大气压潮负荷效应。

[输入]地面站点时间序列文件，区域地面大气压各分潮调和常数残差量格网。

[参数设置]输入文件记录中时间属性和地面高度列序号，选择影响类型，输入格林函数积分半径和输入结果文件名。

[输出]头文件取输入文件头，记录在输入文件记录的基础上，增加用户选择要素的大气压负荷效应残差量属性。

全球地面大气压潮（随时间变化量）中长波占优，360 阶球谐系数模型能以足够精度逼近各种大地测量要素（除重力梯度外）的大气压潮负荷效应，在当前及今后一段时期内，一般无需进一步精化。

顺便指出，重力梯度是扰动位的二阶微分量，参见（8.6 节），采用负荷格林积分法计算重力梯度海潮负荷效应的可靠性不足，图 1 和图 2 中扰动重力梯度和水平重力梯度残差海潮负荷效应残差值时间序列只能作为参考。

2.8 全要素地面大地测量潮汐效应数值预报

[目标]全球地面/海面任意点处各种大地测量监测量的固体潮、海潮或大气压潮负荷效应，以及大气压潮或海洋潮高数值预报。

全要素地面/海面大地测量各种潮汐效应全球数值预报

全要素地面大地测量固体潮效应全球数值预报
 海面潮高及其负荷效应球谐综合全球数值预报
 大气压潮及其负荷效应全球数值预报

设置地面/海面预报点位置和时刻
 指定点大地经度 121.240000°
 指定点大地纬度 29.428100°
 指定点的高度 17.830m
 指定预报时刻 201607010930

指定位置时刻潮汐效应预报

高程异常(大地水准面mm)	-237.159	地面重力 μGal	-95.705	扰动重力 μGal	-108.813
水平东向位移mm	20.079	地倾斜南向mas	4.222	垂线偏差南向mas	8.493
水平北向位移mm	-16.345	地倾斜西向mas	-5.333	垂线偏差西向mas	-10.091
径向位移(大地高mm)	-119.083	扰动重力梯度(径向 $10\mu\text{E}$)	67.971		
地面正(常)高mm	117.948	水平重力梯度北向($10\mu\text{E}$)	4.203	水平重力梯度西向($10\mu\text{E}$)	-25.594

⚠ 预报固体潮时输入大地高，预报海潮及其负荷效应时输入预报点相对海平面的高度，即正(常)高，预报大气潮及其负荷效应时程序自动置零。

全要素地面/海面大地测量各种潮汐效应全球数值预报

全要素地面大地测量固体潮效应全球数值预报
 海面潮高及其负荷效应球谐综合全球数值预报
 大气压潮及其负荷效应全球数值预报

设置地面/海面预报点位置和时刻
 指定点大地经度 121.240000°
 指定点大地纬度 29.428100°
 指定点的高度 17.830m
 指定预报时刻 201607010130

球谐系数模型 最大计算阶数 360

瞬时海面潮高cm -77.433

指定位置时刻潮汐效应预报

高程异常(大地水准面mm)	-12.547	地面重力 μGal	-38.621	扰动重力 μGal	-40.790
水平东向位移mm	-10.338	地倾斜南向mas	-83.500	垂线偏差南向mas	-20.769
水平北向位移mm	7.780	地倾斜西向mas	58.130	垂线偏差西向mas	16.004
径向位移(大地高mm)	17.526	扰动重力梯度(径向 $10\mu\text{E}$)	-1622.769		
地面正(常)高mm	30.073	水平重力梯度北向($10\mu\text{E}$)	-1084.238	水平重力梯度西向($10\mu\text{E}$)	-533.235

⚠ 预报固体潮时输入大地高，预报海潮及其负荷效应时输入预报点相对海平面的高度，即正(常)高，预报大气潮及其负荷效应时程序自动置零。

预报固体潮时输入大地高，预报海潮及其负荷效应时输入预报点相对海平面的高度，即正（常）高，预报大气压潮及其负荷效应时程序自动置零。

先从界面上方的三个功能按钮中选择所需功能，设置计算点位置和预报时刻，点击[参数设置结果输入]后，点亮[开始预报计算]按钮，再点击[开始预报计算]，界面文本框显示潮汐效应预报结果。

全要素地面/海面大地测量各种潮汐效应全球数值预报

设置地面/海面预报点位置和时刻
 指定点大地经度 121.240000°
 指定点大地纬度 29.428100°
 指定点的高度 0.000m
 指定预报时刻 201607011115

球谐系数模型 最大计算阶数 360

时间采用ETideLoad4.5约定的长整数，如20181224122624表示2018年12月24日12时26分24秒。
 海潮、大气压潮负荷球谐系数模型可用[ETideLoad4.5地球物理模型与数值标准设置]程序进行更新。|

瞬时地面大气压潮hPa 10.103

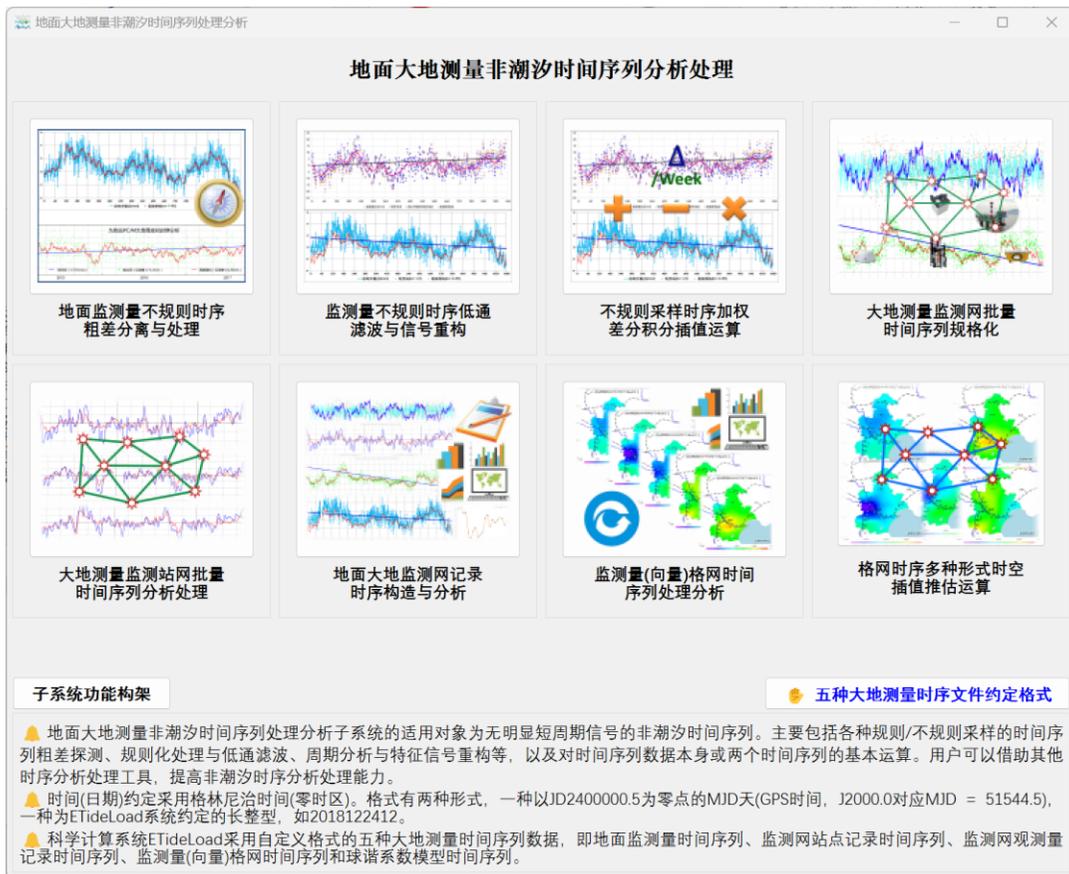
指定位置时刻潮汐效应预报

高程异常(大地水准面mm) 4.458	地面重力 μGal -5.487	扰动重力 μGal -4.644
水平东向位移mm -0.435	地倾斜南向mas -0.667	垂线偏差南向mas -0.281
水平北向位移mm 0.513	地倾斜西向mas 0.665	垂线偏差西向mas 0.268
径向位移(大地高mm) -6.024	扰动重力梯度(径向 $10\mu\text{E}$) -3.565	
地面正(常)高mm -10.482	水平重力梯度北向($10\mu\text{E}$) 0.633	水平重力梯度西向($10\mu\text{E}$) 0.564

预报固体潮时输入大地高，预报海潮及其负荷效应时输入预报点相对海平面的高度，即正（常）高，预报大气潮及其负荷效应时程序自动置零。

第三章 地面大地测量非潮汐时序分析处理

地面大地测量非潮汐时序分析处理的适用对象为无明显短周期信号的非潮汐时间序列。本组程序用于各种规则/不规则采样的时间序列粗差探测、规则化处理、周期分析、低通滤波与特征信号重构等，以及对时间序列数据本身或两个时间序列的基本运算。用户可以借助其他时序分析处理工具，提高非潮汐时序分析处理能力。



ETideLoad 采用自定义格式的五种大地测量时间序列数据，即地面监测量时间序列、监测网站点记录时间序列、监测网观测量记录时间序列、监测量（向量）数值格网时间序列和球谐系数模型时间序列。

3.1 地面监测量不规则时序粗差分离与处理

[目标]输入 ETideLoad 格式的地面大地测量监测量不规则时间序列文件，对其进行粗差探测分离、时间格式变换、多列属性时序监测基准时间统一（即参考历元统一），或按指定时间长度平均等预处理工作。

3.1.1 时间序列粗差探测与剔除

[功能]按给定的低通滤波参数个数，采用连续 Fourier 和切比谢夫组合基函数，由指定属性的不规则采样时序，构造低通滤波参考曲线，计算采样值与参考值之差，并对残差时序进

行统计，将大于指定倍数残差标准差的采样记录，作为粗差分离出去。程序进行 5 次迭代粗差探测与分离。

[输入]地面测量不规则采样时间序列文件。

头文件占据一行。从第二行起，每行记录表示时序的一个历元时刻采样，其中至少有 1 个属性为采样历元时刻，其余各列代表不同属性监测量时序。

[参数设置]设置输入文件记录中采样时间属性、待探测目标属性时序所在的列序号，输入低通滤波参数个数，粗差阈值（标准差的倍数）。

这里的标准差，是目标时序采样值与低通滤波值之差的残差时序标准差。程序将目标属性残差绝对值大于标准差倍数对应的记录作为粗差分离出去。



低通滤波参数个数不大于时序采样数的 1/2，不小于采样数的 1/30。当超出此范围后，

程序自动取最小或最大值。

[输出]剔除粗差后的监测量时序分析文件。

在输入时序文件的基础上，头文件增加常数项和线性项（年变化率，/a）两个属性，每行记录增加低通滤波值、移去常数项后的低通滤波值、移去常数项和线性项后的低通滤波值、线性变化值和残差值 5 个属性，保留 4 位有效数字。

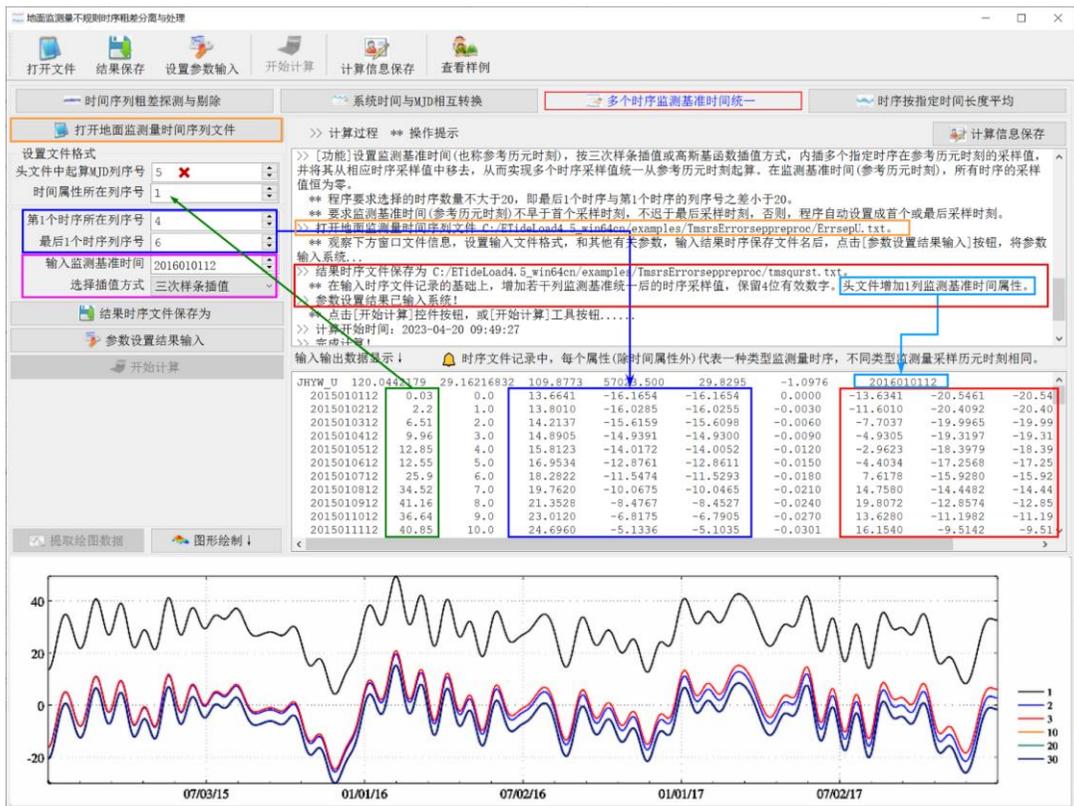
3.1.2 系统时间与 MJD 相互转换

[功能]自动探测地面监测量不规则时序文件的时间格式，实现系统约定格式的时间与以 JD2400000.5 为零点的 MJD 天（GPS 时）时间之间相互转换。

[输出]在输入时序文件记录的基础上，增加 1 列转换后的时间为输出记录的最后一列。当目标为 MJD 时间时，程序还在头文件最后一列增加时序第一个采样时刻对应的 MJD 天作为时序的起算 MJD0。

3.1.3 时间序列监测基准时间统一

[功能]设置监测基准时间（也称参考历元时刻），按三次样条插值或高斯基函数插值方式，内插多个指定时序在参考历元时刻的采样值，并将其从相应时序采样值中移去，从而实现多个时序采样值统一从参考历元时刻起算。在监测基准时间（参考历元时刻），所有时序的采样值恒为零。



程序要求选择的时序数量不大于 20，即最后 1 个时序与第 1 个时序的属性列序号之差

小于 20。

要求监测基准时间（参考历元时刻）不早于首个采样时刻，不迟于最后采样时刻，当参考历元时刻位于首末采样时刻附近时，程序自动选择高斯基函数插值方式。

当时序信号有噪声或缺失采样较多时，建议采用高斯基函数插值。

统一参考历元时刻是多源数据地球动力学监测的前提条件和最低要求。为此，ETideLoad4.5 为各种格式的大地监测测量时间序列都提供了参考历元统一工具。

3.1.4 时序按指定时间长度平均

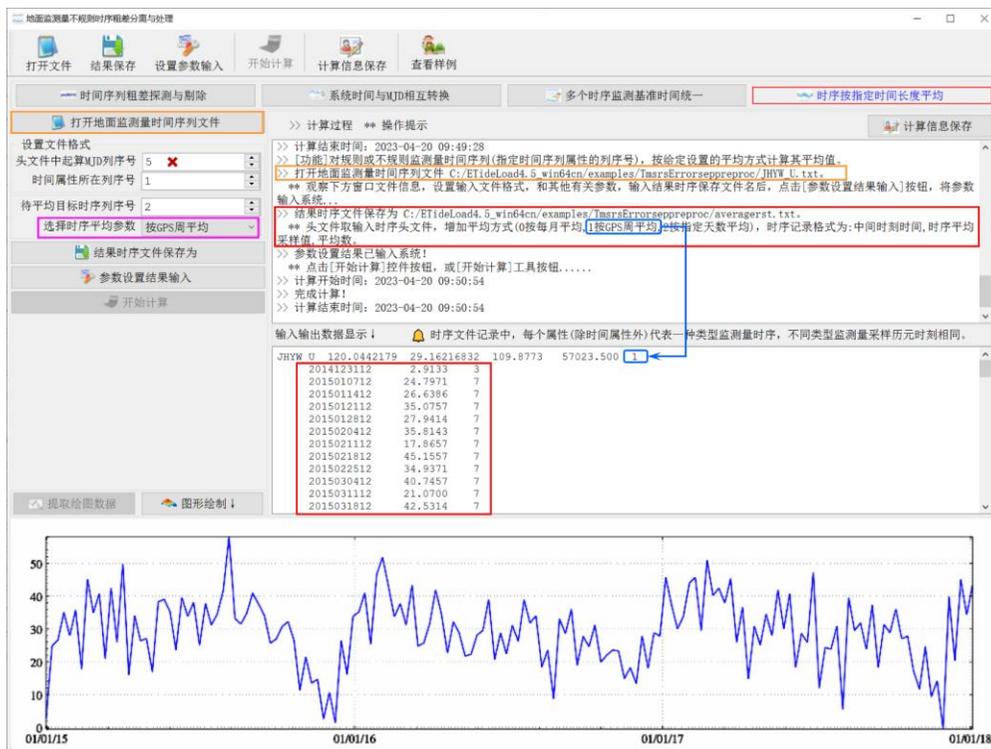
[功能]对规则或不规则监测测量时间序列（指定时间序列属性的列序号），按给定的平均方式计算其平均值。

[输入]地面监测测量不规则采样时间序列文件。

[参数设置]设置输入文件记录中时间属性和待平均目标属性所在的列序号，选择时序平均参数。

[输出]头文件取输入监测测量时序头文件，增加平均方式（0 按月平均，1 按 GPS 周平均，2 按指定天数平均）。

输出时序记录格式：中间时刻时间，时序平均采样值，平均数。



3.2 监测测量不规则时序低通滤波与信号重构

[目标]采用连续切比谢夫与三角基函数组合方法，估计地面监测测量不规则采样时间序列的低频参数，分离常数项和线性项，按用户要求重构监测测量时间序列。

3.2.1 不规则采样时序低频参数与线性项估计

[功能]给定待估参数个数，组合连续切比谢夫与三角基函数，估计测量不规则时间序列的常数项、线性项和低频参数。

[输入]地面测量不规则采样时间序列文件。

头文件占据一行。点名/点号，经度，纬度(度小数)，高度(m，相对于椭球面、海平面或地的高度,可选)，起算 MJD(可选)，...

从第二行起，每行记录表示时序的一个历元时刻采样，其中至少有 1 个属性为采样历元时刻，其余各列代表不同属性监测量时序。

[参数设置]设置输入文件记录中采样时间属性、待滤波目标属性时序所在的列序号，输入低通滤波参数个数。

低通滤波参数个数不大于时序采样数的 1/2，不小于采样数的 1/30。若超出范围，程序自动取最小最大值。

The screenshot shows a software window titled "不规则采样时序低频参数与线性项估计". The interface is divided into several sections:

- Settings Panel (Left):** Includes fields for "设置文件格式", "头文件中起算MJD列序号" (set to 5), "记录中时间属性列序号" (set to 1), "不规则目标时序列序号" (set to 2), and "设置待估的低频参数个数" (set to 120).
- Main Text Area:** Contains instructions and a data table. The data table has columns for station name, coordinates, and various parameters. The first row is: "JHW U 120.0442179 29.16216832 109.8773 57023.500 30.5291 -1.3239 120 57023.500000 58118.5000".
- Plot (Bottom):** A time-series plot showing "low-pass filtering value" (blue line), "fitting without linear" (green line), "linear variation" (red line), and "residual value" (orange dots). The x-axis shows dates from 07/03/15 to 07/02/17, and the y-axis ranges from -40 to 80.

[输出]不规则采样时序低通滤波参数文件，低通滤波时序分析文件。

(1) 不规则采样时序低通滤波参数文件。

头文件在输入时序的头文件基础上，增加常数项、线性项(年变化率, /a)、参数个数、时序开始 MJD 天和结束 MJD 天共 5 个属性。文件主体是按顺序排列的全部低通滤波参数值。

(2) 低通滤波时序分析文件*.rst (*为输入时序文件名)。

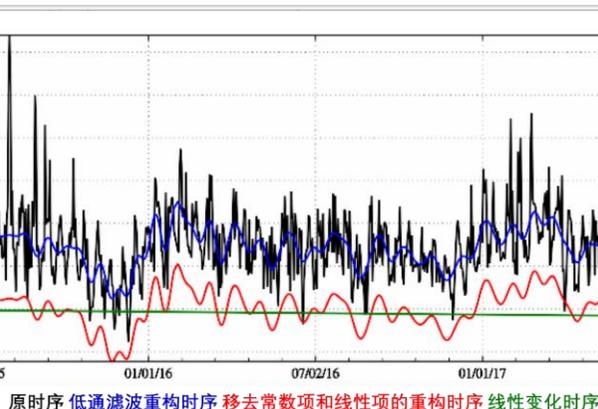
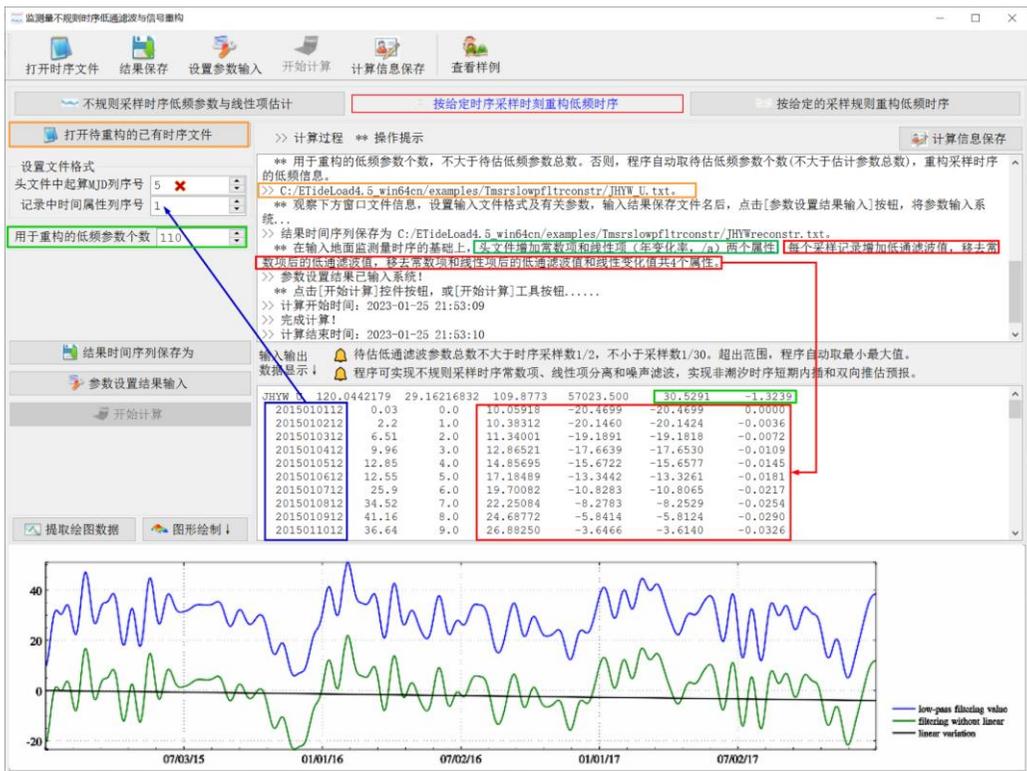
在输入地面监测量时序文件的基础上，头文件增加常数项和线性项（年变化率，/a）两个属性，每个记录增加低通滤波值、移去常数项后的低通滤波值、移去常数项和线性项后的低通滤波值、线性变化值和残差值共 5 个属性，保留 4 位有效数字。

3.2.2 按给定时序采样时刻重构低频时序

[功能]输入待重构的低频参数个数（不大于待估参数最大个数），按照输入时序文件对应的采样历元时刻，重构监测量时序的低频信息。

[输入]地面监测量不规则采样时间序列文件。

[参数设置]设置输入文件记录中采样时间属性所在的列序号，输入用于重构的低频参数个数。



用于重构的低频参数个数，不大于待估低频参数个数。否则，程序自动取待估低频参数个数（不大于估计参数总数），重构采样时序的低频信息。

[输出]低频重构时序文件。在输入地面监测量时序文件的基础上，头文件增加常数项和线性项（年变化率，/a）两个属性；每个采样记录增加低通滤波值，移去常数项后的低通滤波值，移去常数项和线性项后的低通滤波值和线性变化值共 4 个属性。

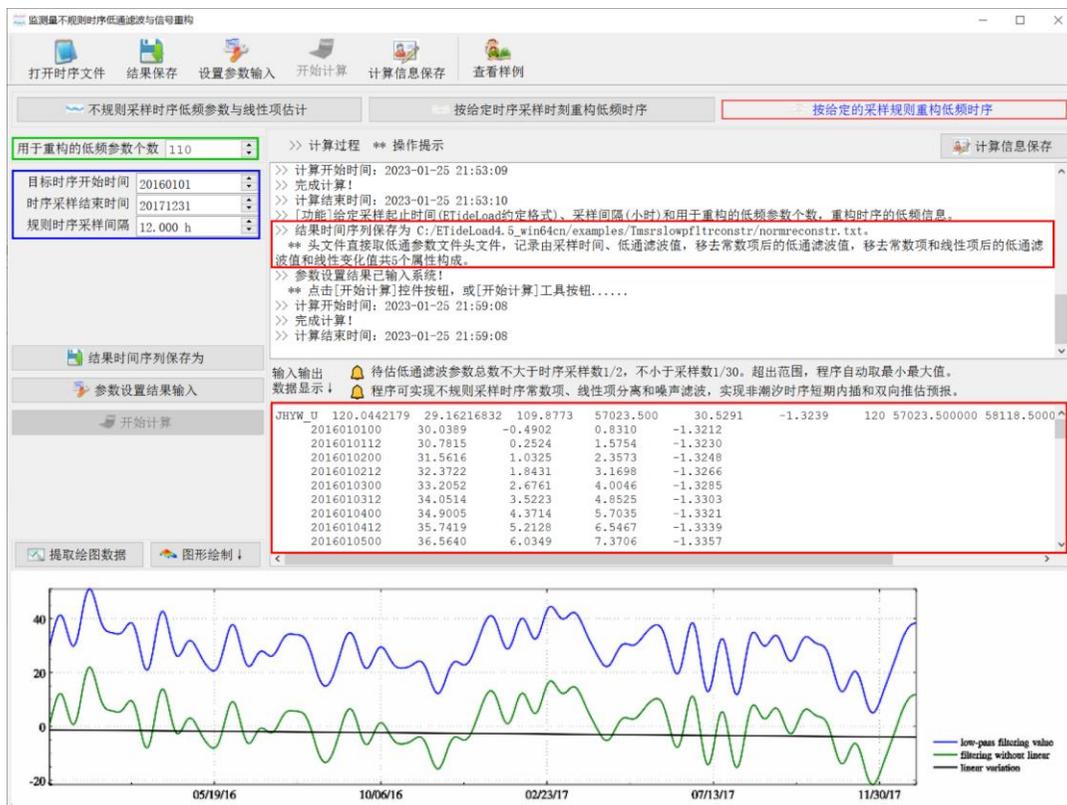
3.2.3 按给定的采样规则重构低频时序

[功能]给定采样起止时间（ETideLoad 约定长整型格式）、采样间隔（小时）和用于重构的低频参数个数，重构时序的低频信息。

[参数设置]采样起止时间不宜早于（可略早于）参数估计时序的第一个采样历元时刻。不宜迟于（可略迟于）参数估计时序的最后一个采样历元时刻。

[输出]头文件直接取低通参数文件头文件，记录由采样时间、低通滤波值，移去常数项后的低通滤波值，移去常数项和线性项后的低通滤波值和线性变化值 5 个属性构成。

程序可实现各种不规则采样时序的常数项、线性项分离和噪声滤波，实现非潮汐大地测量时序的短期内插和双向推估预报。



3.3 不规则采样时序加权差分积分插值运算

[目标]直接对不规则采样的监测量时间序列，按用户给定的方式，进行加权、差分、积分和插值运算。

3.3.1 两列时序加权运算

[功能]对不规则采样时间序列文件中的两列时序执行赋权的加、减或乘法运算。

[输入]地面监测量不规则采样时间序列文件。

[参数设置]设置输入文件记录中采样时间属性、属性 1 时序、属性 2 时序所在的列序号，输入时序 1、时序 2 的权重。

[输出]加权运算结果时间序列文件。

在输入时序文件记录的基础上，增加 1 列加权运算值，保留 4 位有效数字。

3.3.2 不规则采样时序差分运算

[功能]对给定的监测量时间序列执行差分（计算周变化率，即 $dt=1/7$ ）运算。差分运算结果为前后采样的周变化率，对应的采样历元时刻为前后采样的中间时刻。

[输入]地面监测量不规则采样时间序列文件。

[参数设置]设置输入文件记录中采样时间属性、待差分属性时序所在的列序号。

[输出]指定属性时序差分运算结果时间序列文件。

头文件取输入时序文件的头文件，输出记录由长整型格式采样历元时刻、相对原时序首个采样时刻的天数、差分时间跨度（天）和周变化率 4 个属性构成。



3.3.3 不规则采样时序积分运算

[功能]对给定的时间序列执行积分（按周变化率累加，即 $dt=7$ ）运算。积分结果时间序

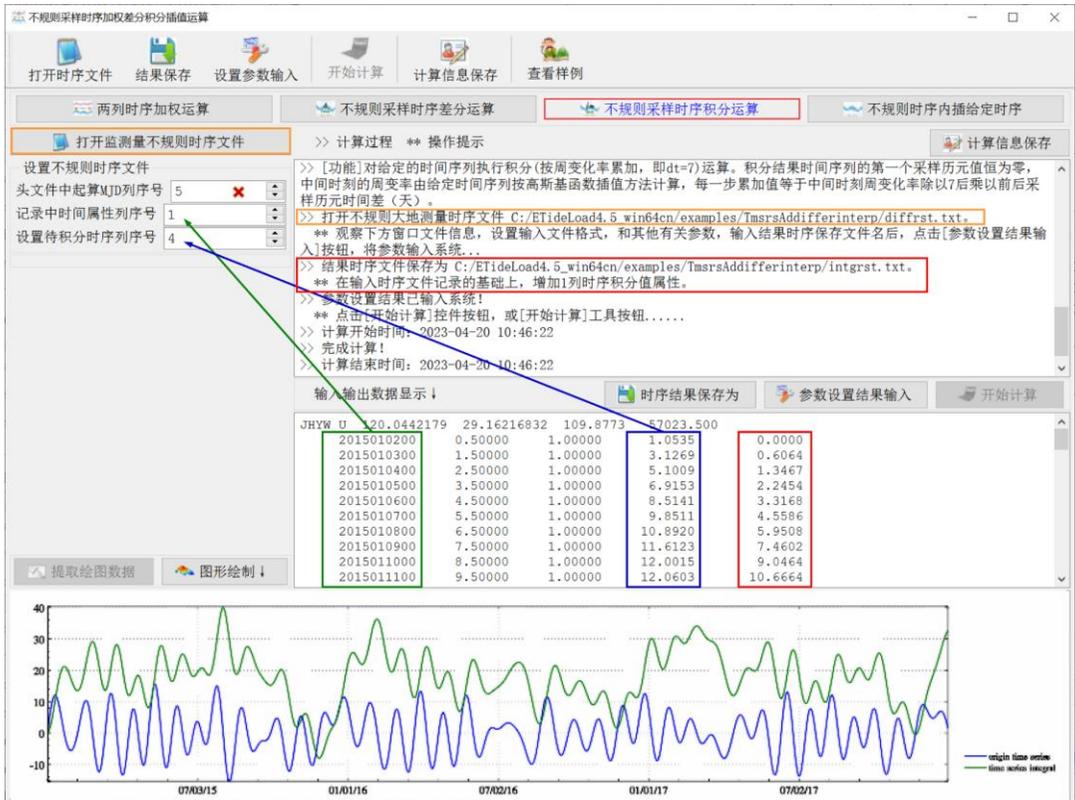
列的第一个采样历元值恒为零，中间时刻的周变率由给定时间序列按高斯基函数插值方法计算，每一步的累加值等于中间时刻周变化率除以 7 后，再乘以前后采样历元的时间间隔 (天)。

[输入]地面监测量不规则采样时间序列文件。

[参数设置]设置输入文件记录中采样时间属性、待积分属性时序所在的列序号。

[输出]指定属性时序积分运算结果时间序列文件。

在输入时序文件记录的基础上，增加 1 列时序积分值属性。



3.3.4 不规则时序内插给定时序

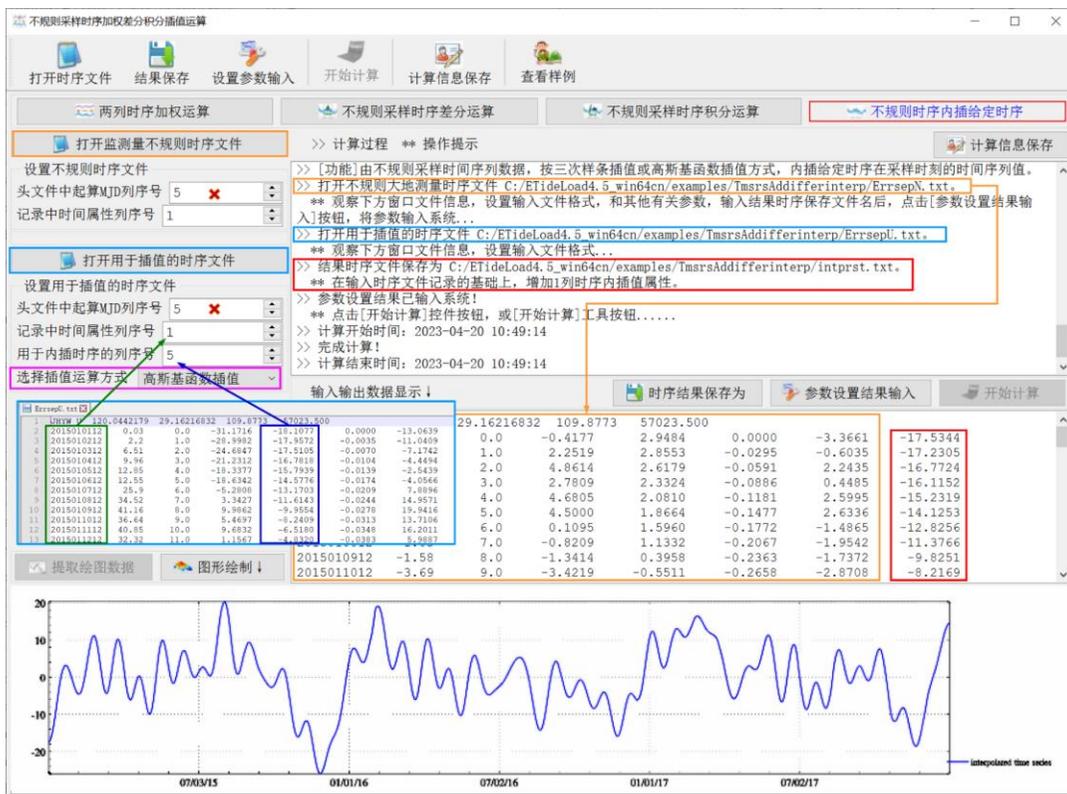
[功能]由不规则采样时间序列数据，按三次样条插值或高斯基函数插值方式，内插给定时序在采样时刻的时间序列值。

[输入]地面监测量不规则采样时序文件，用于插值的监测量不规则采样时序文件。

[参数设置]设置两个输入文件记录中采样时间属性所在的列序号，选择用于插值的监测量时序文件记录中属性时序所在列序号，选择插值方式。

[输出]插值后的结果时间序列文件。

在输入时序文件记录的基础上，增加 1 列时序插值结果属性。



3.4 大地测量监测网批量时间序列规格化

[目标]从格式一致、内含时序数据的系列大地测量站点或 CORS 站网基线解文本文件中, 按监测量时序文件格式要求, 规格化批量提取监测量时序数据。

程序要求批量原文件独立存放于一个目录中, 且原文件名包含站点名或基线名 (所有站点名或基线名的字符数相同), 规格化提取后的批量文件保存到另一目录中。

3.4.1 地面站点时序规格化批量提取

[功能]从格式一致、内含大地测量站点监测量时序, 存放于给定目录下的系列文本文件中, 按给定参数, 批量提取并生成规格化监测量时间序列文件, 存放于指定目录中。

[参数设置]程序要求文件名通配符能唯一标识目录中的文件, 其对应字符将作为规格化提取后的时序文件名保存。

当原文件中不存在高度数据时, 或输入的位置参数超出属性最大序号的行列号值, 程序自动将高度属性置零。

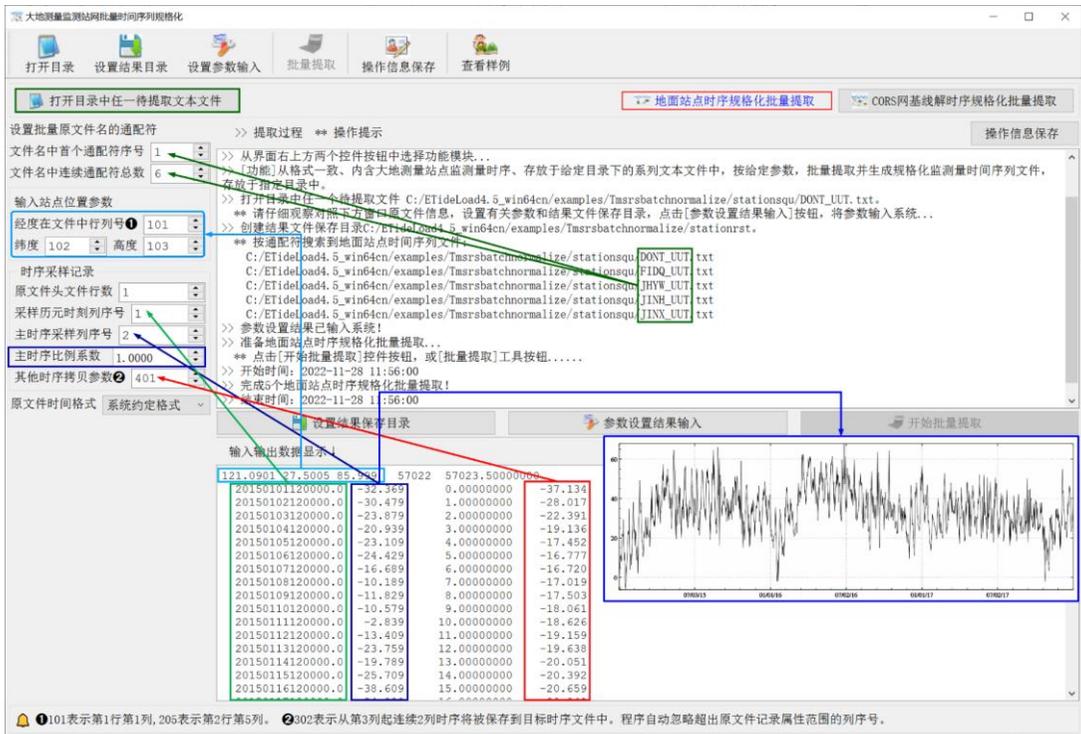
起算 MJD0 与记录中采样历元 (天) 之和, 等于采样历元时刻 MJD 天。当采样历元时刻为系统约定时间格式时, 无需指定起算 MJD0。

若原文件的头文件没有起算 MJD0, 请输入 ETideLoad 约定长整数格式的起算时间, 程序会自动计算 MJD 天。

[输出]批量 ETideLoad 格式的地面站点监测量时序文件。

头文件：站点名（实例化的文件名通配符），经度，纬度，高度，起算 MJD0，常数项（目标时序第一个采样值）。

记录格式：采样时间，相对起算 MJD0 的天数，主时序采样值（移去主时序第一个采样值），其他直接拷贝的属性时序。



3.4.2 CORS 网基线解时序规格化批量提取

[功能]从格式一致、内含 CORS 站网基线解（ENU）时序，存放于给定目录下的系列文本文件中，按给定参数，批量提取并生成规格化 CORS 站网基线解时间序列文件，存放于指定目录中。

程序每次提取 ENU 基线解中一个分量的时间序列数据。

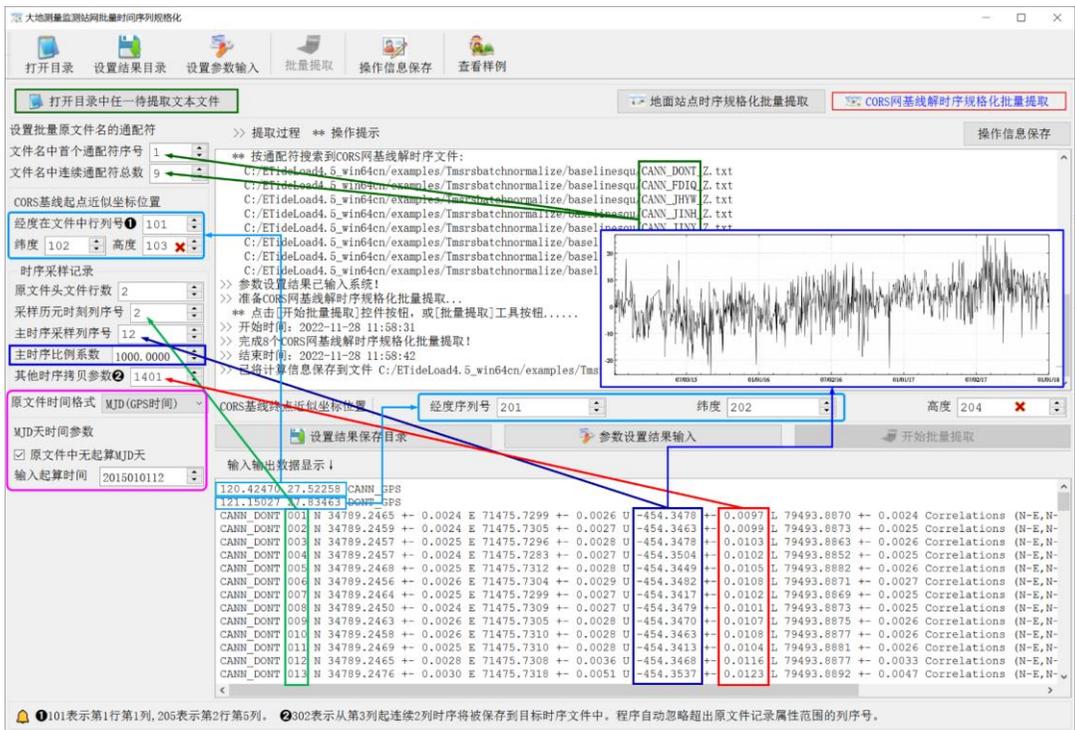
批量提取前，请注意仔细观察对照下方窗口原文件信息，设置有关参数和结果文件保存目录，点击[参数设置结果输入]按钮，将参数输入系统...

若输入参数代表的列序号超出原文件记录属性范围，程序能自动忽略。

[输出]批量 ETideLoad 格式的 CORS 基线解时序文件。

头文件：基线名（实例化的文件名通配符），起点经度，纬度，高度，终点经度，纬度，高度，起算 MJD0，常数项（目标时序第一个采样值）。

记录格式：采样时间（长整数），相对起算 MJD0 的天数，主时序采样值（统一减去主时序第一个采样值，即常数项），其他直接拷贝的属性时序。



3.5 大地测量监测站网批量时序分析处理

[目标]对系列地面监测量时序文件中的指定时序进行粗差探测、线性项分离与低通滤波重构，或按指定时间长度进行平均运算。程序要求原批量时序文件格式一致，且独立存放于一个目录中，处理后的批量时序文件另存于另一目录。

3.5.1 系列时序粗差线性项分离与低频重构

[功能]从系列地面监测量时间序列文件中，逐一构造低通滤波时序，以低通滤波时序为参考曲线，探测剔除粗差，分离线性项，重构低通滤波时序。结果存放于指定目录中。

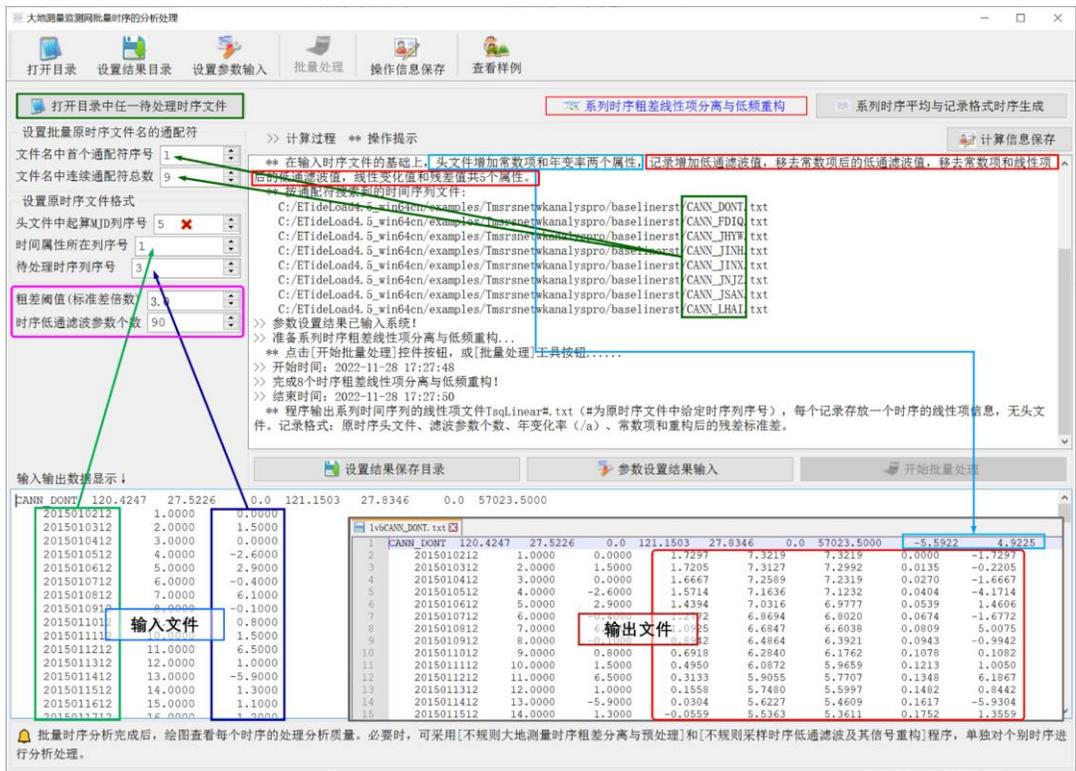
[输入]格式一致的系列地面监测量时间序列文件。

[输出]在输入时序文件的基础上，头文件增加常数项和年变率两个属性，记录增加低通滤波值，移去常数项后的低通滤波值，移去常数项和线性项后的低通滤波值，线性变化值和残差值共 5 个属性。

程序同时输出系列时间序列的线性项文件 TsqLinear#.txt (#为原时序文件中给定时序的列序号)，每个记录存放一个时序的线性项信息，无头文件。记录格式：原时序头文件、滤波参数个数、年变化率 (λ)、常数项和重构后的残差标准差。

批量时序分析完成后，绘图查看每个时序的处理分析质量。必要时，可采用[不规则大地测量时序粗差分离与预处理]和[不规则采样时序低通滤波及其信号重构]程序，调整低通滤波参数个数，单独对个别时序进行分析处理。

当有多个时序分析结果出现异常情况时，请减少低频滤波参数个数，重新运行程序。



3.5.2 系列时序平均与记录格式时序生成

[功能]从系列格式一致的监测量时序文件记录中指定属性时序, 按给定的平均方式进行平均计算。平均后的结果时序以两种方式存储: 一种是每个时序一个文件; 另一种是将时序按行排列, 每个记录存放一个时序, 全部时序存储到一个记录时序文件中。

平均时序文件的头文件取输入时序头文件, 增加平均方式 (0 按每月平均, 1 按 GPS 周平均, 2 按指定天数平均); 时序记录格式: 中间时刻时间, 时序平均采样值, 平均数。

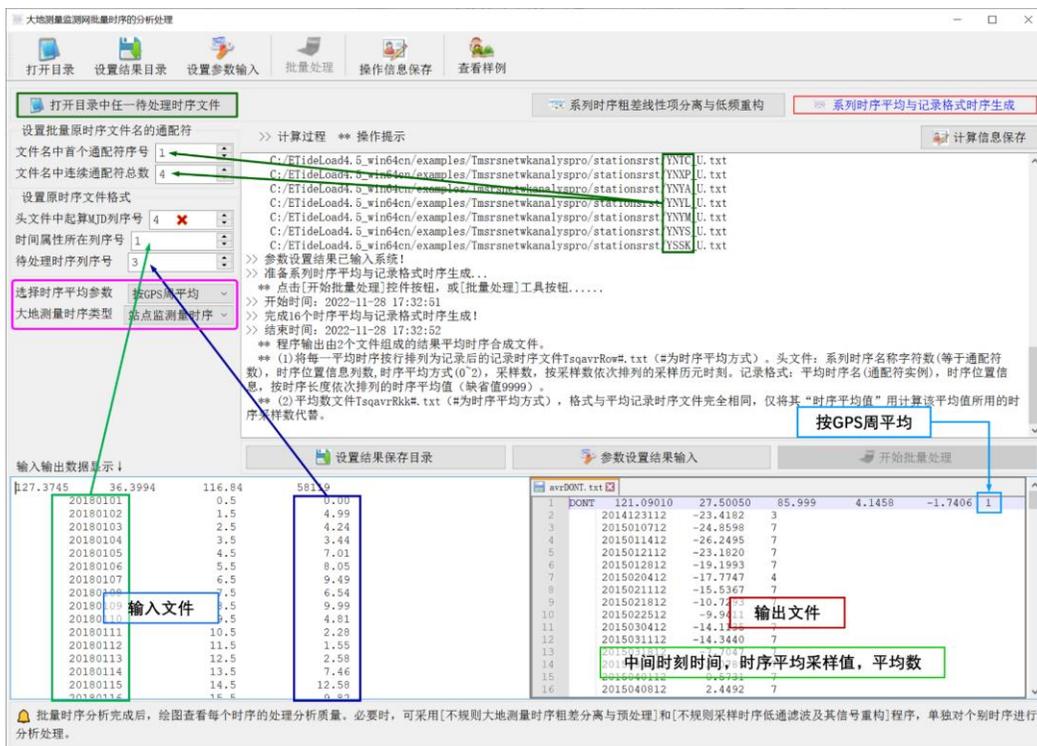
程序输出由两个文件组成的结果平均时序合成文件。

①将每一平均时序按行排列为记录后的记录时序文件 TsqavrRow#.txt (#为时序平均方式)。头文件: 系列时序名称字符数 (等于通配符数), 时序位置信息列数, 时序平均方式 (0~2), 采样数, 按采样数依次排列的采样历元时刻。记录格式: 平均时序名 (通配符实例), 时序位置信息, 按时序长度依次排列的时序平均值 (缺省值 9999)。

②平均数文件 TsqavrRkk#.txt (#为时序平均方式)。格式与平均记录时序文件完全相同, 仅将其“时序平均值”用计算该平均值所用的时序采样数代替。

“站点监测量时序”表示该系列时序为地面站点的坐标、重力、正 (常) 高或地倾斜等大地测量参数变化时间序列。

“大地监测网时序”表示该系列时序为 CORS 网 (GNSS 监测网) 基线、水准网高差或重力网段差等大地网监测量时间序列。



3.6 地面大地监测网记录时序构造与分析

[目标]构造分析由地面大地监测站网的多期或连续观测或成果数据组成的监测网记录时间序列。

记录时间序列文件用于表示由多个站点构成的地面监测网某一种监测测量时间序列，其中一条记录表示一个站点、一条 GNSS 基线、一个重力段差、一条水准路线高差或 InSAR 地面监测点等监测测量时间序列。

3.6.1 由系列同规格时序生成记录时序

[功能]将存放在某个目录中采样规格（采样时间跨度、间隔和历元）相同的系列监测测量时间序列文件，按指定属性时序，生成记录时序格式文件。

[输入] 采样规格相同的系列监测测量时间序列文件。

程序计算所有系列时序中采样时间的最大、最小值和最小采样间隔，组成新的采样规格，每个记录存放一个指定属性时序，其位置信息从相应时序的头文件中提取，9999.000 表示当前历元无有效采样值。

[输出]监测测量记录时间序列文件。

头文件：时序名字符数，时序位置信息占住的列数，记录时序长度，按时间先后排序的采样历元时刻。

记录：时序名，时序位置信息（一般情况下站点时序 3~4 个属性，基线或测段时序 6~8 个属性），按时间先后排序的采样值。

3.6.2 记录时序时空统计与均值分离

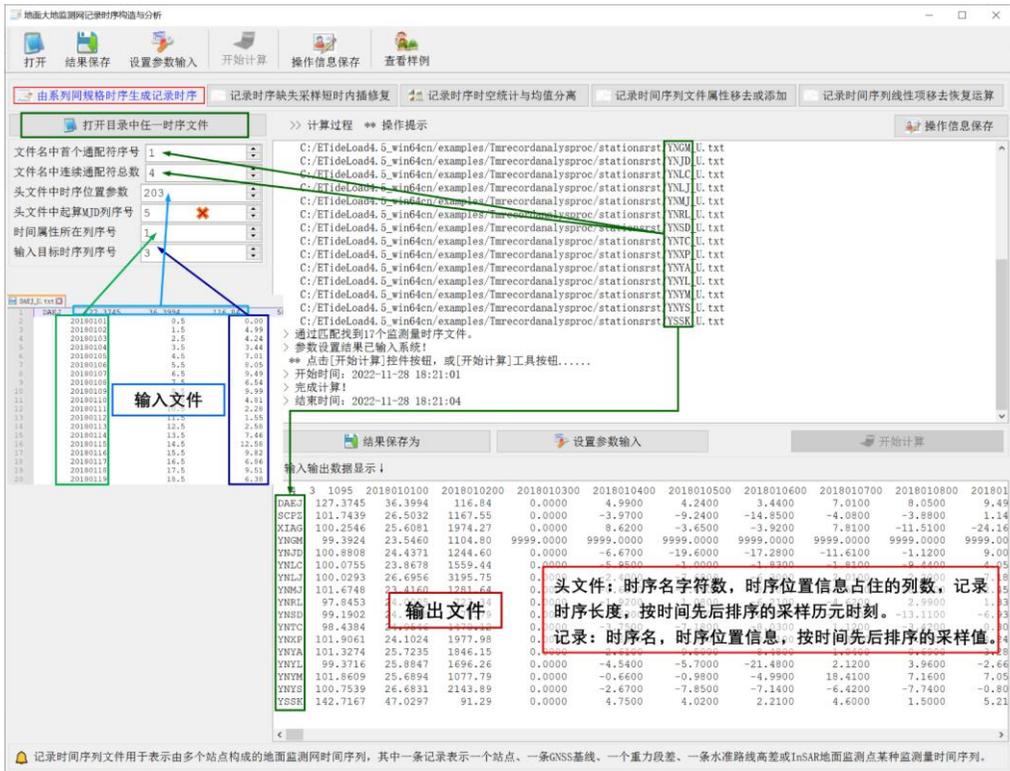
[功能]先以记录为单元，统计该时序监测量在整个采样时期的时间平均值、标准差、最小值和最大值；再以采样历元时刻为单元，统计所有监测量的空间平均值、标准差、最小值和最大值；最后，计算全部监测量在整个采样时段内的时空平均值、标准差、最小值和最大值。程序要求记录时序头文件中采样时刻与记录中时序采样值一一对应。

[输出]记录时序时间统计文件，记录时序空间统计值时序文件，以及移去每个采样时刻空间平均值后的记录时序文件，移去每个监测量时序时间平均值后的记录时序文件。

(1) 记录时序时间统计文件。无头文件，记录格式：原记录中第 1 到首个采样值（不含首个采样值）之间属性，该记录时序的时间平均值、标准差、最小值和最大值。

(2) 记录时序空间统计值时序文件。

头文件：Epoch_statistics，监测网点经纬度和高度的平均值，全部采样在整个时间跨度上的时空平均值，标准差，最小值和最大值。记录格式：采样历元时刻，该时刻监测网有效采样数，空间平均值，标准差，最小值和最大值。



3.6.3 记录时序缺失采样短期内插修复

[功能]采用三次样条或高斯基函数插值方法，由临近采样值，短小时内插记录时序中缺失采样数据。程序不具备短时推估预报能力，较多采样缺失修复和推估请采用[不规则采样时序低通滤波及其信号重构]程序。输入输出记录时序格式相同。

当时序信号存在一定噪声或时序采样连续缺失时，建议采用高斯基函数插值。

3.6.4 记录时间序列文件采样属性移去

[功能]从记录时序文件记录中移去给定的若干列连续采样属性，同时移去头文件中对应的采样历元时刻。

The screenshot shows the software interface for '地面大地监测网记录时序构造与分析'. The '记录时间序列文件采样属性移去' (Remove sampling attributes of time series files) tab is active. The main panel displays a list of operations and instructions. The data table at the bottom shows the result of the operation, with columns 4, 5, and 6 removed from the original data. Red boxes highlight the '输入文件' (Input File) path, the '输出文件' (Output File) path, and the '移去的记录时序采样序号' (Removed record time series sampling serial number) '1005'. A red arrow points to the '移去第1个采样起连续5列采样' (Remove 5 consecutive samplings starting from the 1st sampling) operation.

Input File Path: C:/EtldeLoad4.5_win64cn/examples/Tmrecordanalysproc/stationrat/YNXL_u.txt

Output File Path: C:/EtldeLoad4.5_win64cn/examples/Tmrecordanalysproc/Tmrecordinterp.txt

Removed Sampling Serial Number: 1005

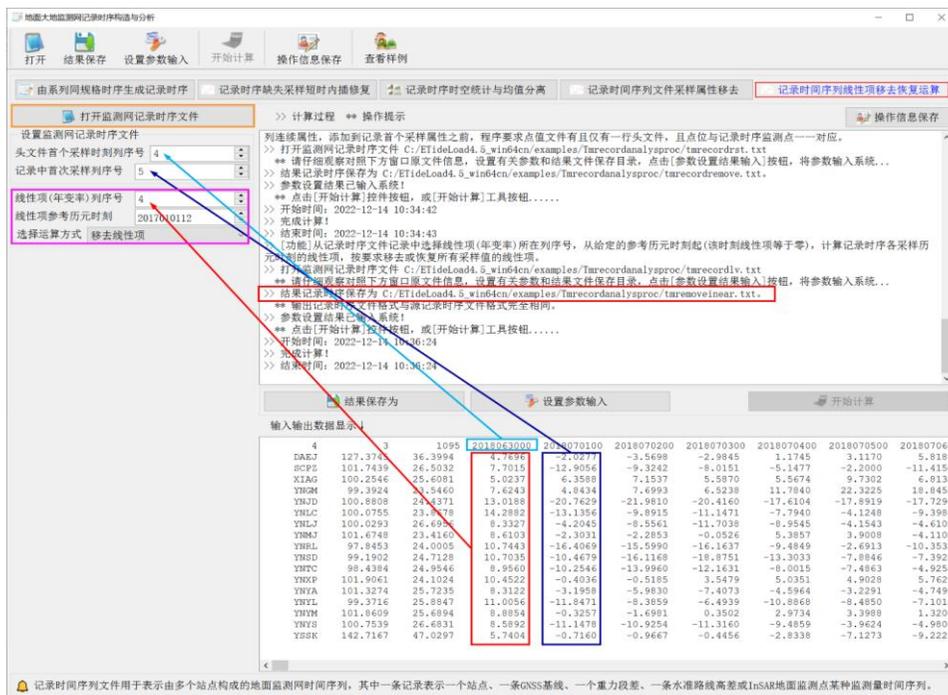
Removed Sampling Description: 移去第1个采样起连续5列采样

Station	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
DAEJ	127.3745	36.3994	116.84	0.0000	4.9900	4.2400	7.0100	8.0500	-2.4000	-7.6800	-6.3000	2.0100	2.2000	0.6800	-4.6400	-8.8000	-3.5900
SCFE	101.7439	26.5032	1167.55	0.0000	-3.9700	-9.2400	999.0000	4.0800	-1.9200	1.0800	-6.2100	-4.6200	2.9900	0.0000	-2.4000	-7.6800	-6.3000
XIAG	100.2546	25.6081	1974.27	0.0000	8.6200	-3.6500	-3.9200	999.0000	-11.6100	-1.9200	1.0800	-6.2100	-4.6200	2.9900	-6.7000	-19.6000	999.0000
YNJD	100.8808	24.4371	1244.60	0.0000	-6.7000	-19.6000	999.0000	-11.6100	-1.9200	1.0800	-6.2100	-4.6200	2.9900	-6.7000	-19.6000	999.0000	-11.6100
YNLJ	100.0755	23.8678	1555.44	0.0000	-5.9500	-1.0000	-1.8300	999.0000	-9.4400	2.2000	7.1800	-8.0300	1.1200	-3.4200	-2.4000	-7.6800	-6.3000
YNLX	100.0293	26.6956	3195.75	0.0000	-2.4000	-7.6800	-6.3000	2.0100	2.2000	7.1800	-8.0300	1.1200	-3.4200	-2.4000	-7.6800	-6.3000	2.0100
YNTC	98.4384	24.9546	1470.12	0.0000	-3.7500	-4.2000	1.1200	-3.4200	-0.6600	-0.9800	-4.9900	18.4100	7.1600	0.0000	-4.5400	-5.7000	6.4500
YNRP	99.1453	24.0005	723.34	0.0000	-1.9200	1.0800	-6.2100	-4.6200	2.9900	2.6100	-9.5000	-2.0400	0.6900	0.0000	-1.9200	1.0800	-6.2100
YNRS	99.1902	24.7128	1479.79	0.0000	-7.6300	-0.9200	1.0400	3.6000	4.7500	4.0200	2.2100	4.6000	1.5000	-1.9200	1.0800	-6.2100	-4.6200
YNM3	101.6748	23.4160	1281.64	0.0000	-0.6800	-4.6400	-8.8000	-3.5900	-8.5100	6.6900	-0.0600	-0.9800	-4.9900	18.4100	7.1600	0.0000	-4.5400
YNRL	97.8453	24.0005	723.34	0.0000	-1.9200	1.0800	-6.2100	-4.6200	2.9900	2.6100	-9.5000	-2.0400	0.6900	0.0000	-1.9200	1.0800	-6.2100
YNSD	101.9661	24.1024	1977.90	0.0000	6.6900	4.6500	3.3600	6.4500	4.7500	4.0200	2.2100	4.6000	1.5000	-1.9200	1.0800	-6.2100	-4.6200
YNVA	101.3274	25.7335	1846.15	0.0000	-2.4000	-7.6800	-6.3000	2.0100	2.2000	7.1800	-8.0300	1.1200	-3.4200	-2.4000	-7.6800	-6.3000	2.0100
YNVL	99.3716	25.8947	1696.26	0.0000	-4.5400	-5.7000	999.0000	2.1200	3.9600	4.7500	4.0200	2.2100	4.6000	1.5000	-1.9200	1.0800	-6.2100
YNVM	101.8609	25.6384	1077.79	0.0000	-0.6800	-4.9900	-8.4900	18.4100	7.1600	0.0000	-4.5400	-5.7000	999.0000	2.1200	3.9600	4.7500	4.0200
YNYS	100.7539	26.6931	2143.89	0.0000	-2.6700	-7.8500	-7.1400	-6.4200	-7.7400	-7.8500	-7.1400	-6.4200	-7.7400	-7.8500	-7.1400	-6.4200	-7.7400
YNSX	142.7167	47.0297	91.29	0.0000	4.7500	4.0200	2.2100	4.6000	1.5000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

3.6.5 记录时间序列线性项移去恢复运算

[功能]从记录时序文件记录中选择线性项（年变率）所在列序号，从给定的参考历元时刻起（该时刻线性项等于零），计算记录时序各采样历元时刻的线性项，按要求移去或恢复所有采样值的线性项。

程序只移去或恢复线性项，不涉及常数项的移去或恢复问题。



3.7 监测量（向量）格网时间序列处理分析

[目标]对存放于指定目录下的大地测量监测量格网（向量）时间序列进行参考历元变换、差分与统计分析运算。（向量）格网时间序列文件按指定的通配符提取。

大地测量监测量（向量）格网时间序列由一系列格网规格完全相同的采样历元时刻某种监测量（向量）格网文件构成，（向量）格网头文件第7个属性约定为系统时间格式的采样历元时刻。

3.7.1 格网时间序列参考历元变换

[功能]通过减去指定采样历元时刻的监测量（向量）格网，将（向量）格网时序归算到参考历元时刻。归算后，参考历元时刻监测量（向量）格网的格值恒为零。

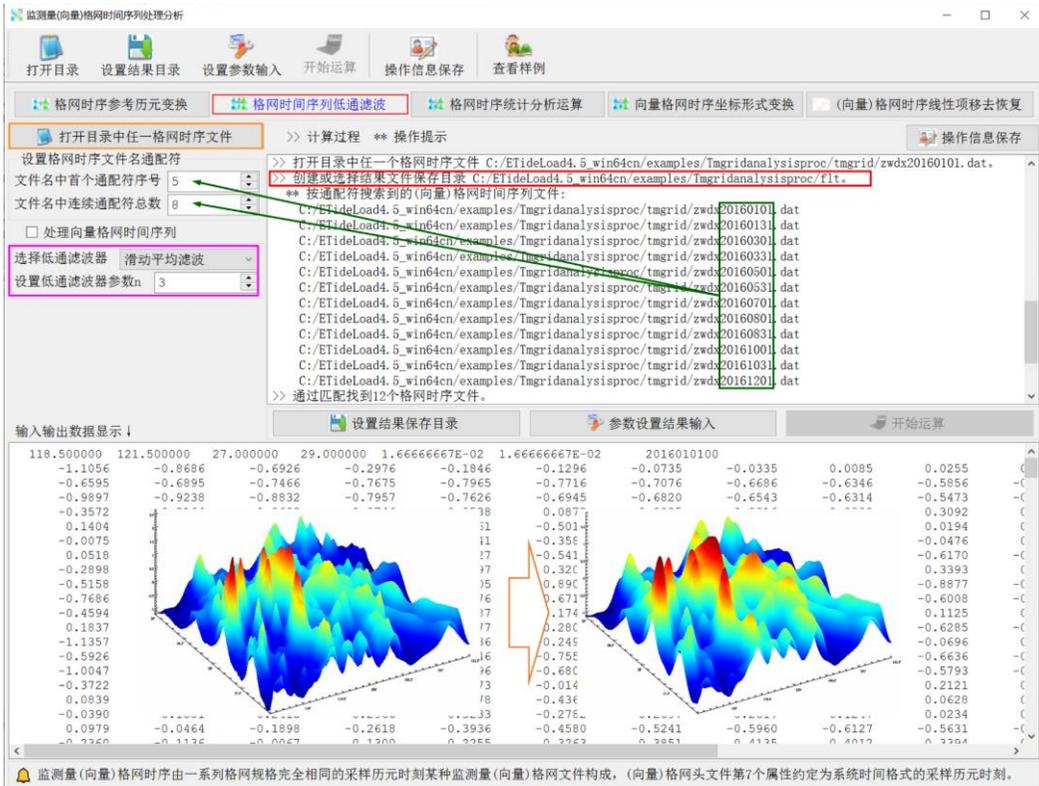
[输入]大地测量监测量（向量）格网时间序列文件。

3.7.2 格网时间序列低通滤波

[功能]采用滑动平均、高斯滤波、指数型或巴特沃斯等低通滤波器，对格网时间序列进行低通滤波。滤波前后，格网的规格（范围和分辨率）不变。

[输入]大地测量监测量格网时间序列文件。

对于滑动平均滤波器，滤波参数 n 越大滤波强度越大；对于“高斯型”“指数型”或“巴特沃斯”滤波器， n 越小滤波强度越大。



3.7.3 格网时序统计分析运算

[功能]计算 (向量) 格网时间序列每个采样历元时刻的空间平均值、标准差、最小值和最大值，生成由空间平均值、标准差、最小值和最大值属性时序组成的时间序列，并从每个采样历元时刻格网中移去各自的空间平均值；同时计算每个单元 (向量) 格网格网时间序列的时间平均值、标准差、最小值和最大值，生成格网时序的时间平均值、标准差、最小值和最大值 (向量) 格网。

[输出] (1) 格网空间平均值、标准差、最小值和最大值时间序列文件 gridstatsqu.txt。

(2) 移去空间平均值后的 (向量) 格网时间序列文件 removeavr*.dat, *为采样历元时刻。

(3) 单元格网监测量格网时间序列的时间平均值、标准差、最小值和最大值 (向量) 格网文件 gridtmavr.dat、gridtmstd.dat、gridtminv.dat 和 gridtmaxv.dat。

统计时序文件 gridstatsqu.txt 格式。头文件格式：tmgridstatistics, 格网中心点经度, 纬度, 零值。记录格式：格网时序采样历元时刻, 该历元时刻格网的空间平均值, 标准差, 最小值和最大值。

3.7.4 向量格网时序坐标形式变换

[功能]向量格网时序中的向量表示方式在平面极坐标形式 (r,a) 和直角坐标形式 (E,N) 之间相互变换。

监测量(向量)格网时间序列处理分析

打开目录 设置结果目录 设置参数输入 开始运算 操作信息保存 查看样例

格网时序参考历元变换 格网时间序列低通滤波 格网时序统计分析运算 向量格网时序坐标形式变换 (向量)格网时序线性项移去恢复

打开目录中任一格网时序文件

设置格网时序文件名通配符
 文件名中首个通配符序号 5
 文件名中连续通配符总数 8

通过匹配找到12个格网时序文件。
 参数设置结果已输入系统。
 点击[开始运算]按钮按钮,或[开始运算]工具按钮.....
 开始时间: 2023-04-20 16:51:11
 完成12个格网时间序列文件的统计分析运算!
 程序在当前目录下输出(向量)格网时序平均、标准差、最小值和最大值时间序列文件gridstatsm.txt。
 头文件格式: tmgridstatistics, 格网中心经度, 纬度, 零值。记录格式: 格网时序采样历元时刻, 该历元时刻格网的空间平均值, 标准差, 最小值和最大值。
 同时输出单元格网监测量格值时间序列的时间平均值、标准差、最小值和最大值(向量)格网文件gridtmavr.dat, gridtmstd.dat, gridtminv.dat和gridtmavx.dat。
 (向量模)格网时序总体时空平均值、标准差、最小值和最大值分别为: 0.0247, 0.4276, -1.2081和2.8191。
 结束时间: 2023-04-20 16:51:11

输入输出数据信息显示

118.500000	121.500000	27.000000	29.000000	1.6666667E-02	1.6666667E-02	201601100														
-1.1056	-0.8686	-0.6926	-0.2976	-0.1846	-0.1296	-0.0735	-0.0335	0.0085	0.0255											
-0.6595	-0.6895	-0.7466	-0.7675	-0.7965	-0.7716	-0.7076	-0.6686	-0.6346	-0.5856											
-0.9897	-0.9238	-0.8832	-0.7957	-0.7626	-0.6945	-0.6820	-0.6543	-0.6314	-0.5473											
-0.3572	-0.2164	-0.0602	0.0746	0.0538	0.0873	-0.0085	0.0916	0.0808	0.3092											
0.1404	-0.0935	-0.2655	-0.3976	-0.4761	-0.5015	-0.4547	-0.3250	-0.1511	0.0194											
-0.0075	-0.2017	-0.3002	-0.3934	-0.4041	-0.3580	-0.3506	-0.3576	-0.1966	-0.0476											
0.0518	-0.0975	-0.2300	-0.3409	-0.4527	-0.5410	-0.5882	-0.6401	-0.6647	-0.6170											
-0.2898	-0.1284	-0.0375	0.2122	0.1297	0.3205	0.3802	0.4106	0.3992	0.3393											
-0.5158	-0.6231	-0.7270	-0.7993	-0.8705	-0.8907	-0.9221	-0.9149	-0.8160	-0.8877											

监测量(向量)格网时序由一系列格网规格完全相同的采样历元时刻某种监测量(向量)格网文件构成, (向量)格网头文件第7个属性约定为系统时间格式的采样历元时刻。

监测量(向量)格网时间序列处理分析

打开目录 设置结果目录 设置参数输入 开始运算 操作信息保存 查看样例

格网时序参考历元变换 格网时间序列低通滤波 格网时序统计分析运算 向量格网时序坐标形式变换 (向量)格网时序线性项移去恢复

打开任一一个向量格网时序文件

设置格网时序文件名通配符
 文件名中首个通配符序号 9
 文件名中连续通配符总数 8

通过匹配找到10个格网时序文件。
 参数设置结果已输入系统。

向量变换方式 直角坐标→极坐标

输入输出数据信息显示

118.500000	121.500000	27.000000	29.000000	1.6666667E-02	1.6666667E-02	2015013106																	
-1.3621E+01	-7.1405E+00	-1.0866E+01	2.5797E+00	1.4446E-01	1.3136E+01	9.7614E+00	1.5901E+01	1.1402E+01	1.4560E+01	1.0319E+01	1.1412E+01	-1.2547E+01	-8.2240E+00	-9.7098E+00	1.6510E+00	1.6303E+00	1.2413E+01	1.0886E+01	1.6453E+01				
0.5129E+00	2.2372E+01	0.6613E+00	0.6941E+00	0.0422E+01	0.6255E+01	0.5849E+00	1.062	0.5746	0.068	0.2814	0.2765E+01	0.6583E+01	-1.1505E+01	0.7860E+00	0.5074E+00	0.4416E+00	0.8740E+00	1.3982E+01	1.2011E+01	1.5313E+01			
-1.3538E+01	-6.0364E+00	-1.2021E+01	-9.3	2.7	1.4	1.0	1.5	1.1	1.3	1.0	1.0	-1.2	-6.8	4.3	4.2100E+00	1.0123E+01	4.9220E+00	1.0824E+01	1.0154E+01	1.4456E+01			
-8.4097E+00	-5.0974E+00	-1.1784E+01	-4.9529E+00	1.930E+00	5523E+00	3132E+00	4890E+01	1175E+01	5426E+01	1000E+01	3538E+01	8749E+00	1630E+00	2506E+01	9745E+00	6968E+00	6649E+00	5.8404E+00	1.2295E+01	1.5599E+01	1.2393E+01	1.54	
-1.3466E+01	-7.82	1.930E+00	5523E+00	3132E+00	4890E+01	1175E+01	5426E+01	1000E+01	3538E+01	8749E+00	1630E+00	2506E+01	9745E+00	6968E+00	6649E+00	5.8404E+00	1.2295E+01	1.5599E+01	1.2393E+01	1.54			

监测量(向量)格网时序由一系列格网规格完全相同的采样历元时刻某种监测量(向量)格网文件构成, (向量)格网头文件第7个属性约定为系统时间格式的采样历元时刻。

3.7.5 格网时序线性项的移去恢复

[功能]输入监测量年变率（向量）格网，从给定的参考历元时刻起（该时刻线性项恒等于零），计算格网时序各采样历元时刻的线性项，按要求移去或恢复所有采样值格网的线性项。

3.8 格网时序多种形式时空插值推估运算

[目标]从位于某一目录下大地测量监测量格网时间序列文件中，采用指定的空间插值和时间插值方式，按照给定点位和采样规格，构造监测量时间序列。格网时间序列文件按指定的通配符提取。

待插值的时空点，其经纬度不应超出格网时序的经纬度范围，插值时刻不应超出格网时序的采样时间范围太多。

当（向量）格网或（向量）格网时序存在较大噪声或较多缺省值时，建议空间选择高斯基函数插值方式，时间插值选择三角函数推估方式。

3.8.1 格网时序内插不规则时序

[功能]由大地测量监测量（向量）格网时序文件，采用选定的空间二维和时间一维插值方式，按照给定不规则时序的点位和采样规格，构造监测量不规则时间序列。

格网时序多种形式时空插值运算

打开格网时序 结果保存 设置参数输入 开始运算 操作信息保存 查看样例

格网时序内插不规则时序 格网时序内插给定记录时序 指定时间位置格网时序插值 规格采样生成离散点记录时序 格网时序给定时空分辨率推估

打开目录中任一格网时序文件 >> 计算过程 ** 操作提示

设置格网时序文件名通配符
文件中首个通配符序号 5
文件中连续通配符总数 8

□ 忽略格网时序
打开待插值的时序文件
头文件中起始MJD列序号 4
记录中时间属性列序号 1

选择空间插值方式 高斯基函数插值
选择时间插值方式 三角函数推估

>> 参数设置结果已输入系统!
** 点击[开始运算]控件按钮,或[开始运算]工具按钮.....
>> 开始时间: 2022-11-29 09:31:59
>> 完成计算。共有37个格网时间序列文件参与运算!
>> 结束时间: 2022-11-29 09:32:00

结果文件保存为 参数设置结果输入 开始运算

输入输出数据显示 ↓ 框口数据保存

DONT_ID	21_0901	27.5005	86.0	0.0802
20150101120000	-3.7134	-32.3690	0.0000	0.0802
20150102120000	-2.8017	-30.4790	1.0000	0.0803
20150103120000	-2.2391	-23.8790	2.0000	0.0804
20150104120000	-1.9136	-20.9390	3.0000	0.0805
20150105120000	-1.7452	-23.1090	4.0000	0.0805
20150106120000	-1.6777	-24.4290	5.0000	0.0806
20150107120000	-1.6720	-16.6890	6.0000	0.0807
20150108120000	-1.7019	-10.1890	7.0000	0.0809
20150109120000	-1.7503	-11.8290	8.0000	0.0810
20150110120000	-1.8061	-10.5790	9.0000	0.0811
20150111120000	-1.8626	-2.8390	10.0000	0.0812
20150112120000	-1.9159	-13.4090	11.0000	0.0813
20150113120000	-1.9638	-23.7590	12.0000	0.0815
20150114120000	-2.0051	-19.7890	13.0000	0.0816
20150115120000	-2.0392	-25.7090	14.0000	0.0818
20150116120000	-2.0659	-38.6090	15.0000	0.0820
20150117120000	-2.0849	-34.9890	16.0000	0.0821
20150118120000	-2.0962	-33.9890	17.0000	0.0823
20150119120000	-2.0995	-27.8290	18.0000	0.0825
20150120120000	-2.0949	-22.6590	19.0000	0.0827
20150121120000	-2.0821	-15.7990	20.0000	0.0830
20150122120000	-2.0611	-11.0790	21.0000	0.0832
20150123120000	-2.0322	-8.5390	22.0000	0.0835

待插值的时空点，其经纬度不应超出格网时序的经纬度范围，插值时刻不应超出格网时序的采样时间范围太多。当（向量）格网或（向量）格网时序存在较大噪声或较多缺省值时，建议空间选择高斯基函数插值方式，时间插值选择三角函数推估方式。

[输入]大地测量监测量（向量）格网时序文件，待插值的地面站点监测量不规则时间序

列文件。

[输出]插值后的监测不规则时间序列文件。

头文件同输入监测量时序文件，文件记录在输入时序记录的基础上，增加一列插值结果时序。

3.8.2 格网时序内插给定记录时序

[功能]由大地测量格网时序文件，按选定的空间二维插值和时间一维插值方式，内插给定的输入记录时序在对应时空点处的全部采样值。结果记录文件格式与给定的记录时序文件相同。

[输入]大地测量监测量（向量）格网时序文件，待插值的监测记录时序文件。

[参数设置]格网时序文件名通配符参数，记录时间序列文件格式参数，空间插值方式和时间插值方式。

[输出]插值结果记录时序文件。将输入监测量记录时序文件中的监测量时序，全部用插值时序替换。

Station ID	Longitude	Latitude	Time Series Data
FDIQ	120.1226	27.2007	50.54
JINH	119.3833	29.1304	1191.60
JINX	119.2245	29.0415	84.79
JMZE	119.3815	27.5835	286.78
JSAN	119.5546	28.2741	71.54
LISH	119.5546	28.2741	71.54
LOHQ	119.0759	28.0451	233.28
LUOY	119.4218	27.3309	552.52
PCHQ	118.2644	28.1005	405.43
PCJM	118.2644	28.1005	405.43
QIYU	119.0445	27.3717	412.75
QNYN	118.5750	27.3657	429.33
QUZH	118.5327	28.5937	90.79
QZLY	119.1109	29.0201	73.91
SHNQ	119.3010	27.2727	827.01
SNYN	119.3033	28.2716	182.71
SUIC	119.1610	28.3542	247.34
WENC	120.0501	27.4709	118.65
YAYA	120.0233	27.2335	555.71
YONK	120.0101	28.5420	116.22
ZHQF	119.5328	27.1356	696.45
ZJZN	119.3808	27.5932	257.63

程序在当前目录下输出剩余量记录时序文件 rnt。格式同输入记录时序文件，剩余量记录时序采样值等于原记录时序采样值与格网时序内插值之差（结果可用于区域形变场或时变重力场移去恢复法逼近）。

3.8.3 指定时间位置格网时序插值

[功能]由大地测量格网时序文件，按选定的空间二维和时间一维插值方式，内插推估离散点值在指定时间的采样值。

[输入]大地测量监测格网时序文件，待插值的离散点值文件（文件记录有一列是时间属性）。

[参数设置]格网时序文件名通配符参数，离散点值文件格式参数，空间插值方式和时间插值方式。

3.8.4 按采样规格插值生成记录时序

[功能]输入不规则离散点文件，给定采样时间跨度和采样时间间隔，由监测格网时序文件，按选定的空间二维和时间一维插值方式，生成由离散点记录时序构成的监测记录时序文件。

格网时序内插不规则时序

打开格网时序 结果保存 设置参数输入 开始运算 操作信息保存 查看样例

格网时序内插不规则时序 格网时序内插给定记录时序 指定时间位置格网时序插值 规格采样生成离散点记录时序 格网时序给定时空分辨率推估

打开目录中任一格网时序文件

设置格网时序文件名通配符

文件名中首个通配符序号 5

文件名中连续通配符总数 8

打开待插值的点值文件

选择空间插值方式 高斯函数插值

选择时间插值方式 三角函数推估

设置头文件占住行数 0

目标时序开始时间 20150120

时序采样结束时间 20171215

规则时序采样间隔 7.000 天

计算过程 ** 操作提示

>> [功能]输入不规则离散点文件，给定采样时间跨度和采样时间间隔，由监测格网时序文件，按选定的空间二维和时间一维插值方式，生成由离散点记录时序构成的监测记录时序文件。

>> 打开目录中任一格网时序文件 C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Tmgrdinterpolation/tmgrid/zwd20150101.dat.

>> 打开待插值的点值文件 C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Tmgrdinterpolation/Tsqlinear2.txt.

>> 查看下方窗口文件信息，设置输入文件格式参数，输入结果保存文件名后，点击[参数设置结果输入]按钮，将参数输入系统...

** 结果文件保存为 C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Tmgrdinterpolation/pntrecordtrst.txt.

** 按通配符搜索到的格网时序文件：

C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Tmgrdinterpolation/tmgrid/zwd20150101.dat

C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Tmgrdinterpolation/tmgrid/zwd20150131.dat

C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Tmgrdinterpolation/tmgrid/zwd20150301.dat

C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Tmgrdinterpolation/tmgrid/zwd20150331.dat

C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Tmgrdinterpolation/tmgrid/zwd20150501.dat

C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Tmgrdinterpolation/tmgrid/zwd20150531.dat

C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Tmgrdinterpolation/tmgrid/zwd20150701.dat

C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Tmgrdinterpolation/tmgrid/zwd20150731.dat

C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Tmgrdinterpolation/tmgrid/zwd20150801.dat

C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Tmgrdinterpolation/tmgrid/zwd20150831.dat

结果文件保存为 参数设置结果输入 开始运算

输入输出数据展示 ↓

	153	2015012000	2015012700	2015020300	2015021000	2015021700	2015022400	2015030300	2015031000	2015031700	2015032400	2015033100	2015040700
FDIQ	120.1226	27.2007	50.54	90	2015010705	-0.7796	-0.7840	-0.7903	-0.7982	-0.8060	-0.8116	-0.8123	-0.8051
JINH	119.3833	29.1304	1191.60	90	2015010705	NaN							
JINX	119.2245	29.0415	84.79	90	2015010705	-0.4684	-0.4791	-0.4861	-0.4863	-0.4788	-0.4646	-0.4469	-0.4299
JNYE	119.3815	27.5835	296.78	90	2015010705	0.8990	0.8602	0.8337	0.8294	0.8510	0.8949	0.9512	1.0063
JSAN	119.5546	28.2741	71.54	90	2015010705	0.3543	0.3802	0.4078	0.4332	0.4529	0.4644	0.4665	0.4604
LISH	119.5546	28.2741	71.54	90	2015010705	0.3543	0.3802	0.4078	0.4332	0.4529	0.4644	0.4665	0.4604
LOQJ	119.0759	28.0451	233.28	90	2015010705	0.3543	0.3802	0.4078	0.4332	0.4529	0.4644	0.4665	0.4604
LUOY	119.4218	27.3309	552.52	90	2015010705	0.3543	0.3802	0.4078	0.4332	0.4529	0.4644	0.4665	0.4604
PCJM	118.2644	28.1005	405.43	90	2015010705	0.3543	0.3802	0.4078	0.4332	0.4529	0.4644	0.4665	0.4604
QIYU	119.0445	27.3717	412.75	90	2015010705	0.3543	0.3802	0.4078	0.4332	0.4529	0.4644	0.4665	0.4604
QNYN	118.5750	27.3657	429.39	90	2015010705	0.3543	0.3802	0.4078	0.4332	0.4529	0.4644	0.4665	0.4604
QUGR	118.5327	28.5937	90.79	90	2015010705	0.3543	0.3802	0.4078	0.4332	0.4529	0.4644	0.4665	0.4604
QQLY	119.1109	29.0201	73.91	90	2015010705	0.3543	0.3802	0.4078	0.4332	0.4529	0.4644	0.4665	0.4604
SHNG	119.3010	27.2727	827.01	90	2015010705	0.3543	0.3802	0.4078	0.4332	0.4529	0.4644	0.4665	0.4604
SNYN	119.3033	28.2716	182.77	90	2015010705	0.3543	0.3802	0.4078	0.4332	0.4529	0.4644	0.4665	0.4604
SUIC	119.1610	28.3542	247.34	90	2015010705	0.3543	0.3802	0.4078	0.4332	0.4529	0.4644	0.4665	0.4604
WENC	120.0501	27.4709	118.65	90	2015010705	0.3543	0.3802	0.4078	0.4332	0.4529	0.4644	0.4665	0.4604
YATA	120.0233	27.2335	555.71	90	2015010705	0.3543	0.3802	0.4078	0.4332	0.4529	0.4644	0.4665	0.4604
YONK	120.0101	28.5420	116.22	90	2015010705	0.3543	0.3802	0.4078	0.4332	0.4529	0.4644	0.4665	0.4604
ZHRQ	119.5328	27.1356	696.45	90	2015010705	0.3543	0.3802	0.4078	0.4332	0.4529	0.4644	0.4665	0.4604
ZJUN	119.3808	27.5932	257.65	90	2015010705	0.3543	0.3802	0.4078	0.4332	0.4529	0.4644	0.4665	0.4604
ZJYH	119.4124	28.1558	130.05	90	2015010705	0.3543	0.3802	0.4078	0.4332	0.4529	0.4644	0.4665	0.4604

待插值的时空点，其经纬度不应超出格网时序的经纬度范围，插值时刻不应超出格网时序的采样时间范围太多。当(向量)格网或(向量)格网时序存在较大噪声或较多缺省值时，建议空间选择高斯函数插值方式，时间插值选择三角函数推估方式。

3.8.5 格网时序给定时空分辨率推估

[功能]输入格网空间分辨率，给定时间采样规格，按选定的空间二维和时间一维插值推估方式，提高或降低格网时序的空间和时间分辨率，计算其一阶时间导数 (/周)。

[输入]监测量(向量)格网时间序列文件。

[输出]时空插值推估的(向量)格网时序文件 grdtmsp*.dat 及其对时间的导数格网时序文件 grdtmdf*.dat (/周)。*为采样历元时刻。

格网时间序列多种形式时空插值运算

打开格网时序 结果保存 设置参数输入 开始运算 操作信息保存 查看样例

格网时序内插不规则时序 格网时序内插给定记录时序 指定时间位置格网时序插值 规格格网生成离散点记录时序 格网时序给定时空分辨率插估

打开目录中任一格网时序文件 >> 计算过程 ** 操作提示

设置格网时序文件名通配符 >> [功能]输入格网空间分辨率, 给定时间采样规格, 按选定的空间二维和时间一维插值插估方式, 提高或降低格网时序的空间和时间分辨率, 计算其一阶时间导数值(单位: /采样间隔)。
 文件中首个通配符序号 5 >> 打开目录中任一格网时序文件 C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Tmgrdinterpolation/tmgrid/zwd/20150101.dat。
 文件名中连续通配符总数 8 >> 创建或选择结果时序保存目录 C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Tmgrdinterpolation/intprgridtm。
 >> 选择输出时空插值插估的(向量)格网时序文件 grdtmsp*.dat 及其对时间的导数格网时序文件 grdtmfd*.dat 单位: /采样间隔)。
 ** 按选择按搜索到的格网时间序列文件:

向量格网时序 格网分辨率 2.500°
 选择空间插值方式 高斯基函数插值
 选择时间插值方式 三角函数插值

目标时序开始时间 20150120
 时序采样结束时间 20171215
 规则时序采样间隔 7.000 天

创建结果保存目录 参数设置结果输入 开始运算

输入输出数据显示 ↓ 框口数据保存

118.50000000	121.50000000	27.00000000	29.00000000	1.666666667E-02	1.666666667E-02	20150101	-1.0504	-1.0292	-0.9963
-1.0362	-1.0442	-1.0488	-1.0508	-1.0510	-1.0568	-1.0600	-1.0598	-1.0292	-0.9963
-0.8437	-0.8347	-0.8359	-0.8482	-0.8734	-0.9044	-0.9146	-0.9146	-0.8734	-0.8437
-1.0294	-1.0294	-1.0294	-1.0294	-1.0294	-1.0294	-1.0294	-1.0294	-1.0294	-1.0294
-0.5674	-0.5674	-0.5674	-0.5674	-0.5674	-0.5674	-0.5674	-0.5674	-0.5674	-0.5674
-0.1703	-0.1703	-0.1703	-0.1703	-0.1703	-0.1703	-0.1703	-0.1703	-0.1703	-0.1703
-0.2312	-0.2312	-0.2312	-0.2312	-0.2312	-0.2312	-0.2312	-0.2312	-0.2312	-0.2312
-0.0523	-0.0523	-0.0523	-0.0523	-0.0523	-0.0523	-0.0523	-0.0523	-0.0523	-0.0523
-0.4004	-0.4004	-0.4004	-0.4004	-0.4004	-0.4004	-0.4004	-0.4004	-0.4004	-0.4004
-0.5907	-0.5907	-0.5907	-0.5907	-0.5907	-0.5907	-0.5907	-0.5907	-0.5907	-0.5907
-1.2061	-1.2061	-1.2061	-1.2061	-1.2061	-1.2061	-1.2061	-1.2061	-1.2061	-1.2061
-1.1262	-1.1262	-1.1262	-1.1262	-1.1262	-1.1262	-1.1262	-1.1262	-1.1262	-1.1262
-0.3301	-0.3301	-0.3301	-0.3301	-0.3301	-0.3301	-0.3301	-0.3301	-0.3301	-0.3301
-1.0504	-1.0504	-1.0504	-1.0504	-1.0504	-1.0504	-1.0504	-1.0504	-1.0504	-1.0504
-0.8402	-0.8402	-0.8402	-0.8402	-0.8402	-0.8402	-0.8402	-0.8402	-0.8402	-0.8402
-1.0236	-1.0236	-1.0236	-1.0236	-1.0236	-1.0236	-1.0236	-1.0236	-1.0236	-1.0236
-0.5739	-0.5739	-0.5739	-0.5739	-0.5739	-0.5739	-0.5739	-0.5739	-0.5739	-0.5739
-0.1673	-0.1673	-0.1673	-0.1673	-0.1673	-0.1673	-0.1673	-0.1673	-0.1673	-0.1673
-0.2197	-0.2197	-0.2197	-0.2197	-0.2197	-0.2197	-0.2197	-0.2197	-0.2197	-0.2197
-0.0476	-0.0476	-0.0476	-0.0476	-0.0476	-0.0476	-0.0476	-0.0476	-0.0476	-0.0476
-0.3855	-0.2207	-0.0858	0.0753	0.1852	0.2916	0.34	-1.1223	-1.1564	-1.1751
-0.5935	-0.7189	-0.8527	-0.9411	-1.0299	-1.0932	-1.1223	-1.1564	-1.1751	-1.1819
-1.2062	-1.2087	-1.2122	-1.2153	-1.2179	-1.2198	-1.2202	-1.2200	-1.2194	-1.2173
									-1.2129

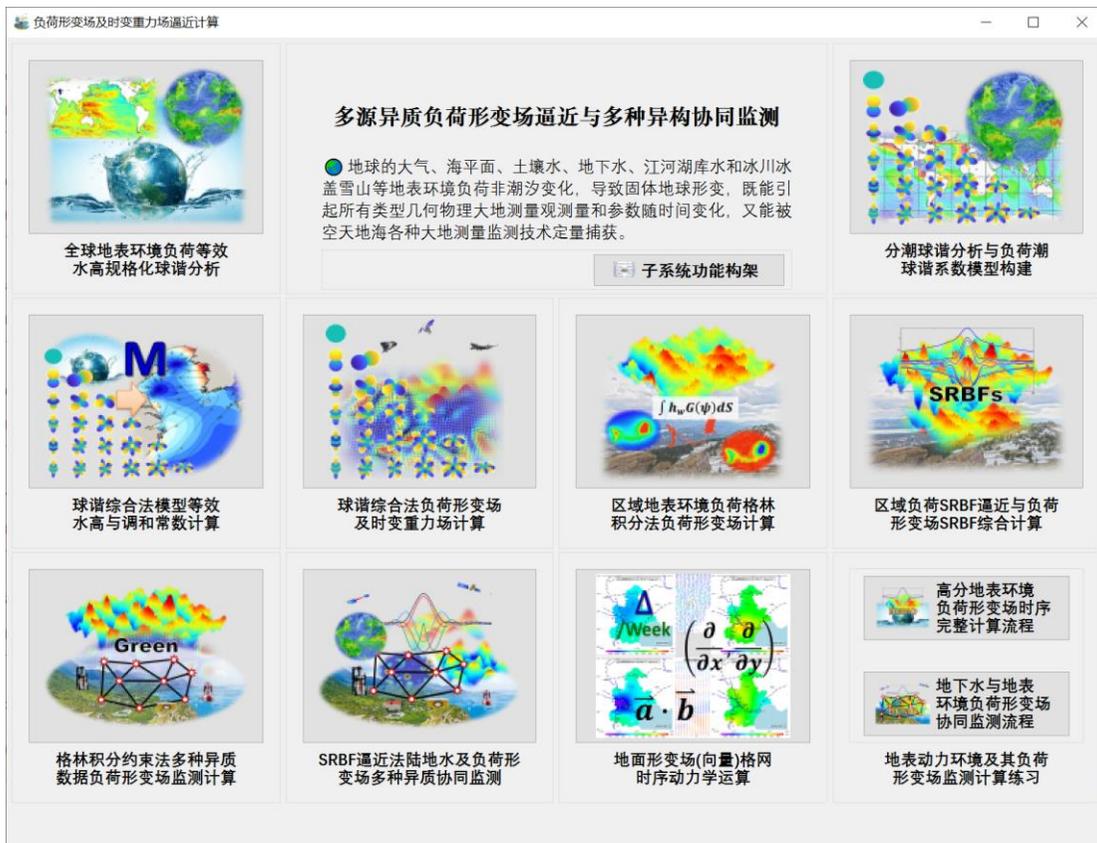
插值结果格网 时间导数格网

待插值的时空点, 其经纬度不应超出格网时序的经纬度范围, 插值时刻不应超出格网时序的采样时间范围太多。当(向量)格网或(向量)格网时序存在较大噪声或缺省值时, 建议空间选择高斯基函数插值方式, 时间插值选择三角函数插值方式。

第四章 多源异质负荷形变场逼近与异构协同监测

地球表层大气、海平面、土壤水、地下水、江河湖库水和冰川冰盖雪山等环境负荷非潮汐变化，导致固体地球形变，既引起所有类型几何物理大地测量观测量和参数随时间变化，又能被空天地海多种大地测量监测技术定量捕获。

多源异质负荷形变场逼近与协同监测程序集，主要用于精确计算全球和区域各种地表环境非潮汐负荷效应及负荷形变场，严格依据大地测量与固体地球动力学原理，约束同化多源异质大地测量监测量与地表环境观测数据的深度融合，实现陆地水时空变化、负荷形变场及时变重力场的多种异构技术协同监测。



构造一致的地球物理模型、相同的数值标准以及相容的解析算法，统一处理无处不在的大地测量非潮汐效应，是实现 1cm (20 μ Gal) 精度水平大地测量的重要基础，是多源异质数据深度融合，多种异构技术协同监测，以及高精度几何物理大地测量基准构建维持的必要条件与最低要求。

4.1 全球地表环境负荷格网时间序列球谱分析

[目标]对地面/海面大气压、大陆水和海平面变化等全球非潮汐负荷格网进行球谱分析，生成规格化地表环境负荷球谱系数模型，用于计算地面、海洋、航空及卫星高度等固体地球外部空间全要素大地测量非潮汐负荷效应模型值。

4.1.1 系列全球地表数据球坐标格网化

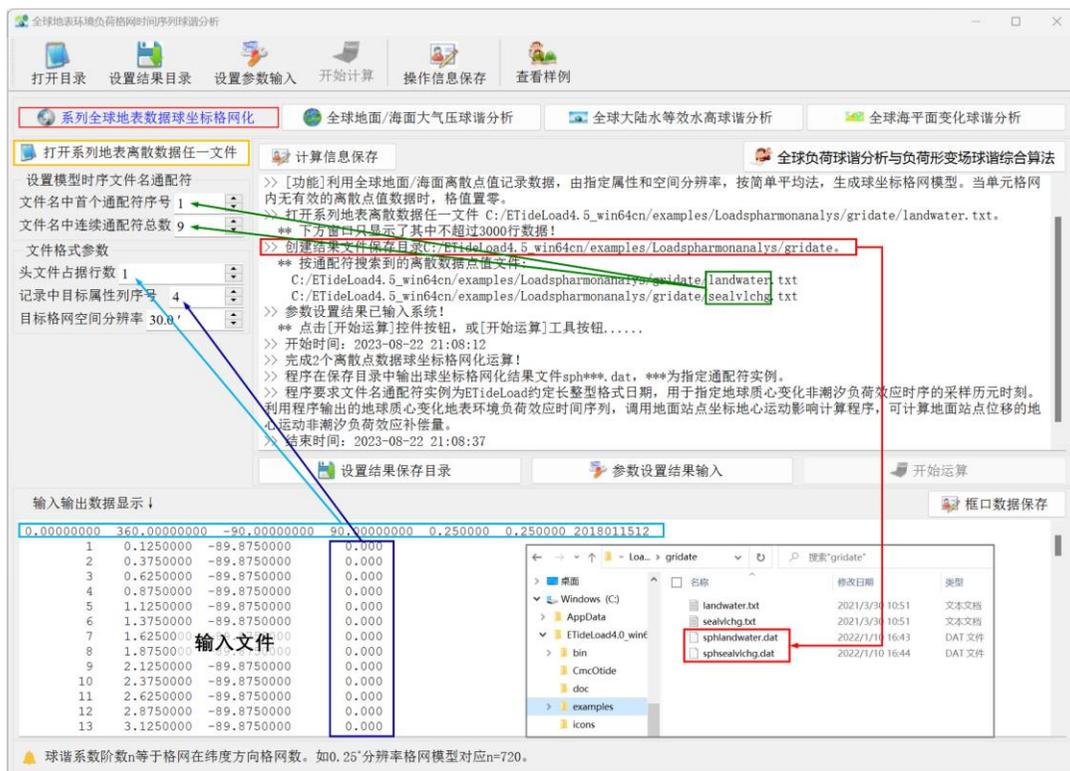
[功能]由系列全球地面/海面离散点值记录数据，按简单平均法和指定空间分辨率，生成系列球坐标格网模型。当单元格网内无有效离散点数据时，格值置零。

[输入]存放于某一目录下若干覆盖全球的离散点值数据文件。

记录格式：点号或点名，经度，纬度（度小数），…，待格网化属性，…。

[参数设置]设置用于提取多个离散点文件的文件名通配符参数，输入离散点文件的头文件行数和记录中目标属性所在列序号。

[输出]与输入系列离散点值文件一一对应的系列球坐标格网文件。



4.1.2 全球地面/海面大气压球谱分析

[功能]对全球地面/海面大气压球坐标格网模型（hPa）时间序列，进行批量规格化球谱分析，生成非潮汐大气压负荷球谐系数模型（m）时间序列。球坐标格网时间序列文件按指定的通配符提取。

[输入]存放于某一目录下若干全球地面/海面大气压球坐标格网文件。

[参数设置]输入用于提取多个全球地面/海面大气压球坐标格网文件的文件名通配符参数，迭代终止条件参数。

程序要求文件名通配符实例为 ETideLoad 约定长整型格式日期，用于指定地球质心变化非潮汐负荷效应时序的采样历元时刻。

迭代终止条件：当残差格网的格值标准差小于原格网格值标准差的 a%时，或者上一步

迭代残差标准差与当前残差标准差之差，小于原格网值标准差的 $b\%$ 时，迭代终止。

[输出]大气压负荷球谐系数模型时间序列文件 airpress***cs.dat，迭代过程统计信息文件 pro***.ini 和残差格网文件 rnt***.dat。其中，***为指定通配符实例。同时生成地球质心变化全球地面大气压负荷效应时间序列文件 geocentairpr.txt，如图。

大气压负荷球谐系数模型 airpress***cs.dat。头文件：地心引力常数 GM ($\times 10^{14}m^3/s^2$)，地球长半轴 a (m)，零阶项 $a\Delta C_{00}$ (hPa)，相对误差 θ (%)。 θ 为最终迭代残差标准差与源格网标准差的百分比， GM, a 也称为球谐系数模型的尺度参数，表示球谐系数模型中的面谐函数定义在半径等于地球长半轴 a 的球面上。

球谐系数阶数 n 等于全球地表负荷格网在纬度方向格网数。如 0.25° 分辨率格网模型对应 $n=720$ 。

The screenshot shows the software interface with several key elements highlighted by red boxes and arrows:

- Settings Panel:**
 - 文件名中首个通配符序号: 7
 - 文件名中连续通配符总数: 10
 - 残差标准差阈值 α : 1.0%
 - 迭代增量终止条件 β : 1.0%
- Results Panel:**
 - 180阶球谐系数
 - 球谐系数的尺度参数
 - 零阶项(hPa) 相对误差(%)
- Table:**

迭代次数	残差平均值	标准差	最小值	最大值
0	0.7495	6.4294	-26.2276	24.8602
1	-0.0001	1.0126	-4.5367	4.0258
2	0.0000	0.2271	-3.2268	2.2665
3	0.0000	0.1235	-2.1964	1.7883
4	0.0000	0.0962	-1.5266	1.3247
5	0.0000	0.0869	-1.3249	1.1328
6	0.0000	0.0805	-1.2698	1.1281
7	0.0000	0.0765	-1.2514	1.1263
8	0.0000	0.0738	-1.2512	1.1252
9	0.0000	0.0720	-1.2512	1.1244
10	0.0000	0.0706	-1.2514	1.1238
11	0.0000	0.0696	-1.2517	1.1234
12	0.0000	0.0690	-1.2510	1.1231
13	0.0000	0.0690	-1.2510	1.1231
14	0.0000	0.0690	-1.2510	1.1231
15	0.0000	0.0690	-1.2510	1.1231

零阶项代表大气压变化导致的全球大气总质量的变化，在地球大气质量守恒条件下无意义，后续计算一般忽略零阶项。3 个一阶项球谐系数 ($\Delta C_{10}, \Delta C_{11}, \Delta S_{11}$) 代表大气压变化引起的地球质心变化。

4.1.3 全球大陆水等效水高球谐分析

[功能]对全球大陆水等效水高球坐标格网模型 (cm) 时间序列，进行批量规格化球谐分析，生成非潮汐大陆水负荷球谐系数模型 (m) 时间序列。球坐标格网时间序列文件按指定的通配符提取。

[输入]存放于某一目录下若干全球大陆水等效水高球坐标格网文件，用于陆海区域分离

的全球陆海地形球坐标格网文件。

程序要求陆海地形球坐标格网的分辨率不低于大陆水等效水高球坐标格网的分辨率。

[参数设置]输入用于提取多个全球大陆水等效水高球坐标格网文件的文件名通配符参数, 迭代终止条件参数。

程序要求文件名通配符实例为 ETideLoad 约定长整型格式日期, 用于指定地球质心变化非潮汐负荷效应时序的采样历元时刻。

[输出]大陆水负荷球谐系数模型时序文件 Indwater***cs.dat, 迭代过程统计信息文件 pro***.ini 和残差格网文件 rnt***.dat。***为指定通配符实例。同时生成地球质心变化全球陆地水负荷效应时间序列文件 geocenterlandw.txt。

3 个一阶项球谐系数(ΔC_{10} , ΔC_{11} , ΔS_{11})代表陆地水变化引起的地球质心变化。零阶项的大小可通过调整时间基准将其控制在一个很小的值。

面谱函数定义在半径等于地球长半轴a的球面上

球谐系数的尺度参数

迭代次数	残差平均值	标准差	最小值	最大值
1	0.00000000	0.00000000	-90.00000000	90.00000000
2	0.00000000	0.00000000	-90.00000000	90.00000000
3	0.00000000	0.00000000	-90.00000000	90.00000000
4	0.00000000	0.00000000	-90.00000000	90.00000000
5	0.00000000	0.00000000	-90.00000000	90.00000000
6	0.00000000	0.00000000	-90.00000000	90.00000000
7	0.00000000	0.00000000	-90.00000000	90.00000000
8	0.00000000	0.00000000	-90.00000000	90.00000000
9	0.00000000	0.00000000	-90.00000000	90.00000000
10	0.00000000	0.00000000	-90.00000000	90.00000000
11	0.00000000	0.00000000	-90.00000000	90.00000000
12	0.00000000	0.00000000	-90.00000000	90.00000000
13	0.00000000	0.00000000	-90.00000000	90.00000000
14	0.00000000	0.00000000	-90.00000000	90.00000000
15	0.00000000	0.00000000	-90.00000000	90.00000000

球谐系数阶数n等于格网在纬度方向格网数, 如0.25°分辨率格网模型对应n=720。

4.1.4 全球海平面变化球谐分析

[功能]对全球海平面变化球坐标格网模型 (cm) 时间序列, 进行批量规格化球谐分析, 生成非潮汐海平面变化负荷球谐系数模型 (m) 时间序列。

[输入]存放于某一目录下若干全球海平面变化球坐标格网文件, 用于陆海区域分离的全球陆海地形球坐标格网文件。

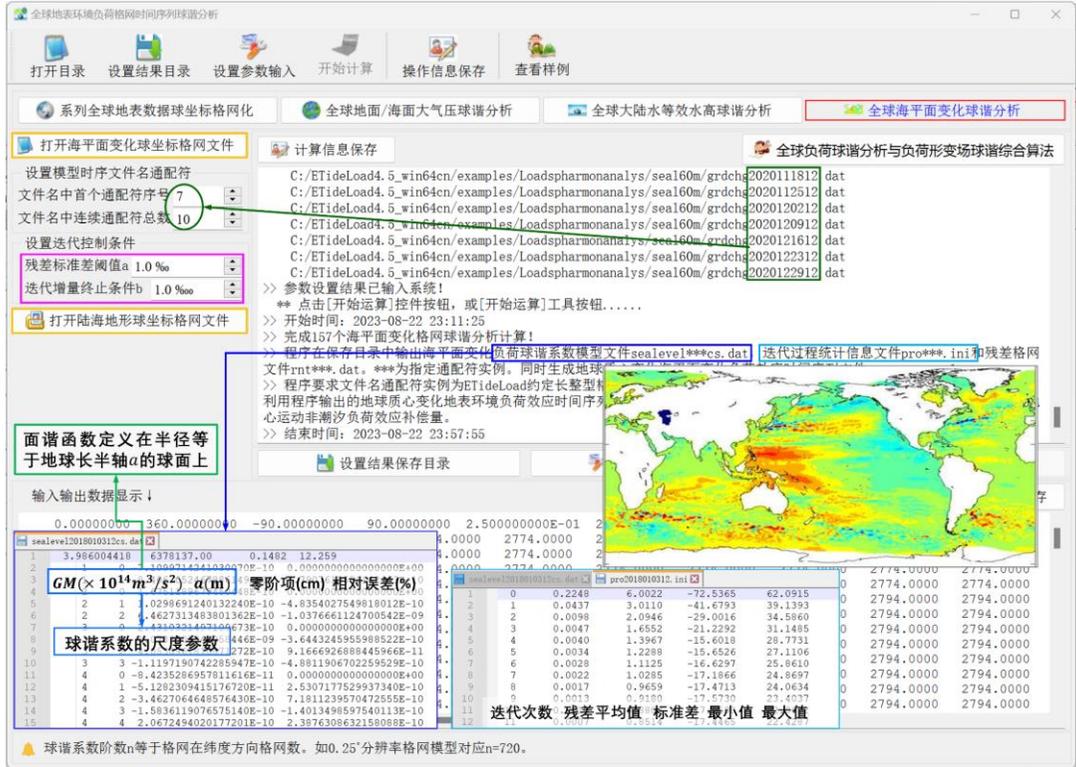
程序要求陆海地形球坐标格网的分辨率不低于海平面变化球坐标格网的分辨率。

[参数设置]输入用于提取多个全球海平面变化球坐标格网文件的文件名通配符参数, 迭

代终止条件参数。

程序要求文件名通配符实例为 ETideLoad 约定长整型格式日期, 用于指定地球质心变化非潮汐负荷效应时序的采样历元时刻。

迭代终止条件: 当残差格网的格值标准差小于原网格格值标准差的 a%时, 或者上一步迭代残差标准差与当前残差标准差之差, 小于原网格格值标准差的 b‰时, 迭代终止。



[输出]海平面变化负荷球谐系数模型时序文件 sealevel***cs.dat, 迭代过程统计信息文件 pro***.ini 和残差格网文件 rnt***.dat。***为指定通配符实例。同时生成地球质心变化全球海平面变化负荷效应时间序列文件 geocentersealv.txt, 如图。

类似地, 3 个一阶项球谐系数($\Delta C_{10}, \Delta C_{11}, \Delta S_{11}$)代表海平面变化引起的地球质心变化。零阶项的大小可通过调整时间基准将其控制在一个很小的值。

对于全球性大地测量目的, 应考虑增加任意历元时刻海陆气负荷零阶项之和等于零约束, 即全球海平面变化、陆地水变化和大气压变化总负荷是守恒的。

利用程序输出的地球质心变化地表环境负荷效应时间序列, 调用 2.5.2 节大地测量地球质心变化效应程序, 可计算由于非潮汐负荷变化, 导致地面或其外部全要素大地测量的地球质心变化效应。

4.2 分潮球谐分析与负荷潮球谐系数模型构建

[目标]对全球地面/海面大气压分潮、海洋潮高分潮的调和常数格网进行球谐分析, 生成规格化大气压潮、海潮负荷球谐系数模型(IERS2010 协议中的 FES2004 海潮模型约定格式),

用于计算地面、海洋、航空及卫星高度等固体地球外部全要素大地测量负荷潮效应模型值。

分潮调和常数单位与球谐系数单位相同。大气压分潮调和常数与球谐系数单位为 hPa，海潮分潮调和常数与球谐系数单位为 cm。

4.2.1 分潮调和常数球坐标格网化

[功能]利用系列地面/海面大气压分潮 (hPa) 或海洋潮高分潮 (cm) 调和常数点值记录数据, 由指定属性和空间分辨率, 按简单平均法, 生成球坐标调和常数向量格网(同相幅值, 异相幅值)模型。当单元格网内无有效数据时, 向量格值置零。

[输入]存放于某一目录下覆盖全球的各分潮调和常数离散点值数据文件。

程序要求分潮调和常数点值文件至少有 1 行头文件, 最后 1 行头文件中存在分潮名称和 doodson 常数属性。

[参数设置]设置用于提取多个离散点文件的文件名通配符参数, 输入文件记录中调和常数属性所在列序号。

[输出]与输入系列分潮调和常数点值文件一一对应的系列分潮调和常数球坐标向量格网文件。

分潮调和常数球坐标格网化

设置系列文件名通配符
文件中首个通配符序号 1
文件名中连续通配符总数 3
头文件占行数 1
调和常数分量2列序号 4
调和常数分量2列序号 5
目标格网空间分辨率 60.0
调和常数形式 同相/异相幅值
分潮名称在头文件中列序号 1
Doodson常数在头文件中列序号 2

计算过程 ** 操作提示

>> 从界面上方三个控件按钮中选择功能模块...
>> [功能]利用系列地面/海面大气压分潮(hPa)或海洋潮高分潮(cm)调和常数点值记录数据, 由指定属性和空间分辨率, 按简单平均法, 生成球坐标调和常数向量格网(同相幅值, 异相幅值)模型。当单元格网内没有有效的数据时, 向量格值置零。
** 程序要求分潮调和常数点值文件至少有1行头文件, 最后1行头文件记录中存在分潮名称和doodson常数属性。
>> 打开任一分潮调和常数点值文件 C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Loadtidespharmsynth/sphgridate/S1_airp.txt.
** 下方窗口只显示了其中不超过3000行数据!
>> 创建结果文件保存目录C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Loadtidespharmsynth/gridst.
** 按通配符搜索到的分潮调和常数点值文件:
C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Loadtidespharmsynth/sphgridate/S1_airp.txt
C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Loadtidespharmsynth/sphgridate/S2_airp.txt
C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Loadtidespharmsynth/sphgridate/Sa_airp.txt
C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Loadtidespharmsynth/sphgridate/Ssaairp.txt

参数设置结果已输入系统!
>> 点击[开始运算]控件按钮, 或[开始运算]工具按钮.....
>> 开始时间: 2023-08-23 10:55:06
>> 完成4个分潮调和常数点值数据球坐标格网化运算!
>> 程序在保存目录中输出球坐标向量格网化结果文件sph***.dat, ***为指定通配符实例。

输入输出数据显示 ↓

S1	Hcoag Hsing in hPa			
1	0.000000	-90.000000	0.05396	0.16694
2	0.250000	-90.000000	0.05396	0.16694
3	0.500000	-90.000000	0.05396	0.16694
4	0.750000	-90.000000	0.05396	0.16694
5	1.000000	-90.000000	0.05396	0.16694
6	1.250000	-90.000000	0.05396	0.16694
7	1.500000	-90.000000	0.05396	0.16694
8	1.750000	-90.000000	0.05396	0.16694
9	2.000000	-90.000000	0.05396	0.16694
10	2.250000	-90.000000	0.05396	0.16694
11	2.500000	-90.000000	0.05396	0.16694
12	2.750000	-90.000000	0.05396	0.16694
13	3.000000	-90.000000	0.05396	0.16694
14	3.250000	-90.000000	0.05396	0.16694
15	3.500000	-90.000000	0.05396	0.16694
16	3.750000	-90.000000	0.05396	0.16694
17	4.000000	-90.000000	0.05396	0.16694
18	4.250000	-90.000000	0.05396	0.16694
19	4.500000	-90.000000	0.05396	0.16694

examples > Loadtidespharmsynth > gridst

名称

- sphS1_dat
- sphS2_dat
- sphSa_dat
- sphSsa_dat

修改日期

- 2022/1/11 10:30
- 2022/1/11 10:31
- 2022/1/11 10:31
- 2022/1/11 10:31

输出文件

分潮调和常数单位与球谐系数单位相同, 大气压分潮调和常数和球谐系数单位为hPa, 海潮分潮调和常数和球谐系数单位为cm。
分潮Doodson常数(整数, 如M分潮Doodson常数为255555)是系统识别分潮类型和计算分潮频率的依据, 应确保正确无误。

4.2.2 系列大气压分潮球谐分析

[功能]对全球地面/海面大气压系列分潮调和常数球坐标向量格网模型 (hPa), 进行批量规格化球谐分析, 生成与 IERS2010 协议中 FES2004 海潮模型格式相同的大气压潮负荷球谐

系数模型 (hPa)。分潮调和常数球坐标向量格网文件按指定的通配符提取。

[输入]全球大气压全部分潮的调和常数球坐标向量格网模型文件 (本例有周日、半日、周年和半年 4 个分潮)。

迭代终止条件: 当残差格网的格值标准差小于原网格格值标准差的 a%时, 或者上一步迭代残差标准差与当前残差标准差之差, 小于原网格格值标准差的 b‰时, 迭代终止。

[输出] (1) 大气压潮负荷球谐系数模型文件 Airtloadcs.dat。(2) 大气压潮负荷一阶项同相异相幅值文件 AirtOne.dat。(3) 大气压分潮负荷球谐系数模型文件 airptide***cs.dat, 迭代过程统计信息文件 pro***.ini 和残差格网文件 rnt***.dat。其中, ***为指定通配符实例。

大气压分潮负荷球谐系数模型 airptide***cs.dat。头文件 (第二行): 地心引力常数GM ($\times 10^{14}m^3/s^2$), 地球长半轴a (m), 零阶项 $a\Delta C_{00}$ (hPa), 相对误差 θ (%)。 θ 为最终迭代残差标准差与源格网标准差的百分比, GM,a也称为球谐系数模型的尺度参数, 表示球谐系数模型中的面谐函数定义在半径等于地球长半轴a的球面上。

The screenshot shows the '分潮调和与负荷球谐系数模型构建' (Tidal Harmonic and Load Spherical Harmonic Coefficient Model Construction) software interface. The main window displays a list of files and a command prompt with the following text:

```

>> 计算过程 ** 操作提示
>> 创建结果文件保存目录C:\Etideload4.5_win64cn/examples/Loadtidespharmsynth/airptidescs.
** 按通配符搜索到的分潮调和常数向量格网文件:
C:\Etideload4.5_win64cn/examples/Loadtidespharmsynth/gridrst/sp1.dat
C:\Etideload4.5_win64cn/examples/Loadtidespharmsynth/gridrst/sp2.dat
C:\Etideload4.5_win64cn/examples/Loadtidespharmsynth/gridrst/sp3.dat
C:\Etideload4.5_win64cn/examples/Loadtidespharmsynth/gridrst/sp4.dat
>> 参数设置结果已输入系统!
>> 点击[开始运算]控件按钮, 或[开始运算]工具按钮....
>> 开始时间: 2023-08-23 11:00:37
>> 完成4个全球大气压分潮球谐系数计算!
>> 程序在当前目录中输出大气压潮负荷球谐系数模型文件Airtloadcs.dat和大气压潮负荷一阶项同相异相幅值文件AirtOne.dat可用于地面站点位移的大气压潮负荷地球质心变化计算, 头文件: 地心引力常数GM ( $\times 10^{14} m^3/s^2$ )、地球长半轴a (m)、零阶项 $a\Delta C_{00}$  (hPa)、相对误差 $\theta$  (%), 记录格式: 分潮符号, Doodson数, C10同相幅值, C10异相幅值, C11同相幅值, C11异相幅值, S11同相幅值, S11异相幅值 (hPa)。
>> 同时输出大气压分潮负荷球谐系数模型文件airptide***cs.dat, 迭代过程统计信息文件pro***.ini和残差格网文件rnt***.dat。其中, ***为指定通配符实例。
>> 结束时间: 2023-08-23 11:02:42
  
```

The results table at the bottom shows the following data:

球谐系数的尺度参数	迭代次数, 残差平均, 标准差, 最小值, 最大值
180阶球谐系数	164556 S1
GM ($\times 10^{14} m^3/s^2$) a (m), 零阶项 (Pa) 相对误差 (%)	
1	0.000000000
2	0.06
3	0.06
4	0.06
5	0.06
6	0.06
7	0.06
8	0.06
9	0.06
10	0.06
11	0.06
12	0.06
13	0.06
14	0.06
15	0.06
16	0.06
17	0.06
18	0.06
19	0.06
20	0.06
21	0.06
22	0.06
23	0.06
24	0.06
25	0.06
26	0.06
27	0.06
28	0.06
29	0.06
30	0.06
31	0.06
32	0.06
33	0.06
34	0.06

大气压潮负荷一阶项同相异相幅值文件 AirtOne.dat, 用于地球质心变化大气压潮负荷效应预报计算。头文件 (第二行): 地心引力常数 GM ($\times 10^{14}m^3/s^2$), 地球长半轴 a (m); 记录格式: 分潮符号, Doodson 数, C₁₀同相幅值, C₁₀异相幅值, C₁₁同相幅值, C₁₁异相幅值, S₁₁同相幅值, S₁₁异相幅值 (hPa)。

1	Surface atmospheric tidal load normalized spherical harmonic coefficient model in hPa or mbar.											
2	Created by ETideLoad, ZHANG Chuanyin, Chinese Academy of Surveying and Mapping.											
3	Doodson name	n	m	Csin+	Ccos+	Csin-	Ccos-	C+	C-	eps+	eps-	
4	164.556	S1	1	0	-0.01044593	0.00562824	-0.01044593	0.00562824	0.011866	298.3157	0.011866	298.3157
5	164.556	S1	1	1	-0.02016686	-0.30983778	-0.02700702	0.03082551	0.310493	183.7240	0.040983	318.7776
6	164.556	S1	2	0	-0.00808087	0.02708492	-0.00808087	0.02708492	0.028481	341.9854	0.028481	341.9854
7	164.556	S1	2	1	-0.00267857	-0.06099820	-0.02133630	0.03899757	0.061057	182.5144	0.044451	331.3192
8	164.556	S1	2	2	0.04746516	-0.07024418	-0.05104501	-0.01871795	0.084777	145.9525	0.054369	249.8623
9	164.556	S1	3	0	0.02424426	0.01222005	0.02424426	0.01222005	0.027150	63.2501	0.027150	63.2501
10	164.556	S1	3	1	-0.00065416	0.08663644	0.01517276	0.03225602	0.086639	359.5674	0.035646	25.1916
11	164.556	S1	3	2	0.05672425	-0.01538354	0.00625213	-0.04261689	0.058773	105.1736	0.043073	171.6539
12	164.556	S1	3	3	0.01546691	0.03548381	-0.06617256	0.00859525	0.038708	23.5517	0.066728	277.4008
13	164.556	S1	4	0	0.01956420	-0.01827060	0.01956420	-0.01827060	0.026769	133.0418	0.026769	133.0418
14	164.556	S1	4	1	-0.01459744	0.00148107	0.03555613	-0.00398511	0.014672	275.7935	0.035779	96.3950
15	164.556	S1	4	2	0.01934232	0.02790035	0.01483035	-0.01817240	0.033949	34.7322	0.023456	140.7824
16	164.556	S1	4	3	0.05868605	0.05584202	0.02090025	-0.06381922	0.001009	46.4225	0.067154	161.8668
17	164.556	S1	4	4	0.05071872	-0.00993816	-0.02940598	0.00988633	0.051683	101.0865	0.031023	288.5827

1	3.986004418	6378137.00									
2	name	Doodson	C10+	C10-	C11+	C11-	S11+	S11-			
3	S1	164.556	-0.32755435E-08	0.17648553E-08	-0.73961840E-08	-0.43745105E-07	-0.53411096E-07	-0.10724379E-08			
4	S2	273.555	-0.63049967E-09	0.13744707E-08	0.80115817E-10	0.52363295E-08	0.33900139E-08	-0.10865938E-08			
5	Sa	56.565	0.82105514E-07	-0.16159915E-06	-0.35243498E-07	-0.82919083E-08	0.35037721E-07	-0.12165101E-06			
6	Ssa	57.555	0.65256321E-08	0.64837464E-07	-0.35845502E-07	-0.25039833E-07	0.12771654E-07	0.24911463E-07			

4.2.3 系列海洋潮高分潮球谐分析

[功能]对系列全球海洋潮高分潮调和常数球坐标向量格网模型 (cm)，进行批量规格化球谐分析，生成与 IERS2010 协议中 FES2004 海潮模型格式相同的海潮负荷球谐系数模型 (cm)。分潮调和常数球坐标向量格网文件按指定的通配符提取。

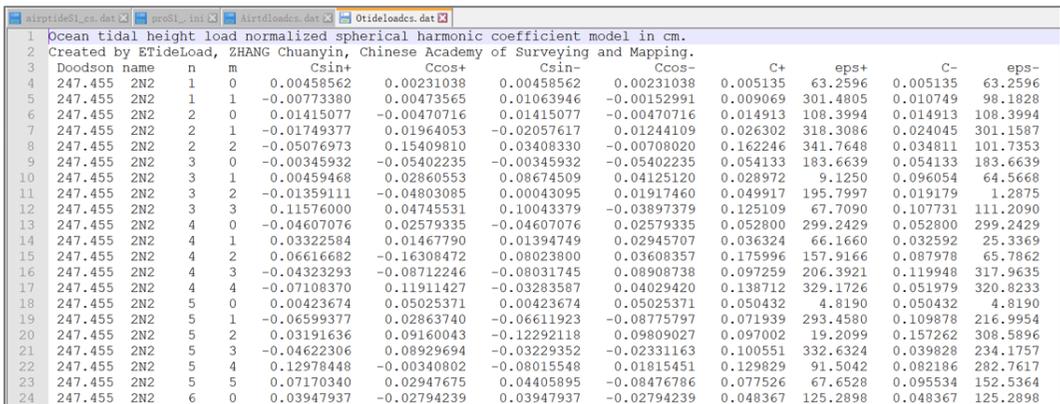
[输入] (1) 全球海洋全部分潮的调和常数球坐标向量格网模型文件 (本例共有 34 个分潮，来源于 FES2014 模型)。(2) 全球陆地地形球坐标格网模型。用于海潮调和常数的陆地分离，其分辨率应不低于海洋分潮调和常数格网分辨率。

The screenshot displays the software interface for 'Series Ocean High Tide Harmonic Analysis'. It includes a menu bar, a toolbar, and several panels. The main panel shows a table of spherical harmonic coefficients for various tidal constituents. The table has columns for 'name', 'Doodson', 'C10+', 'C10-', 'C11+', 'C11-', 'S11+', and 'S11-'. The coefficients are listed in scientific notation. A map of the world is shown in the bottom right corner, with a color scale indicating tidal amplitudes. The interface also includes a 'Parameters' section with fields for iteration count, residual mean, and standard deviation.

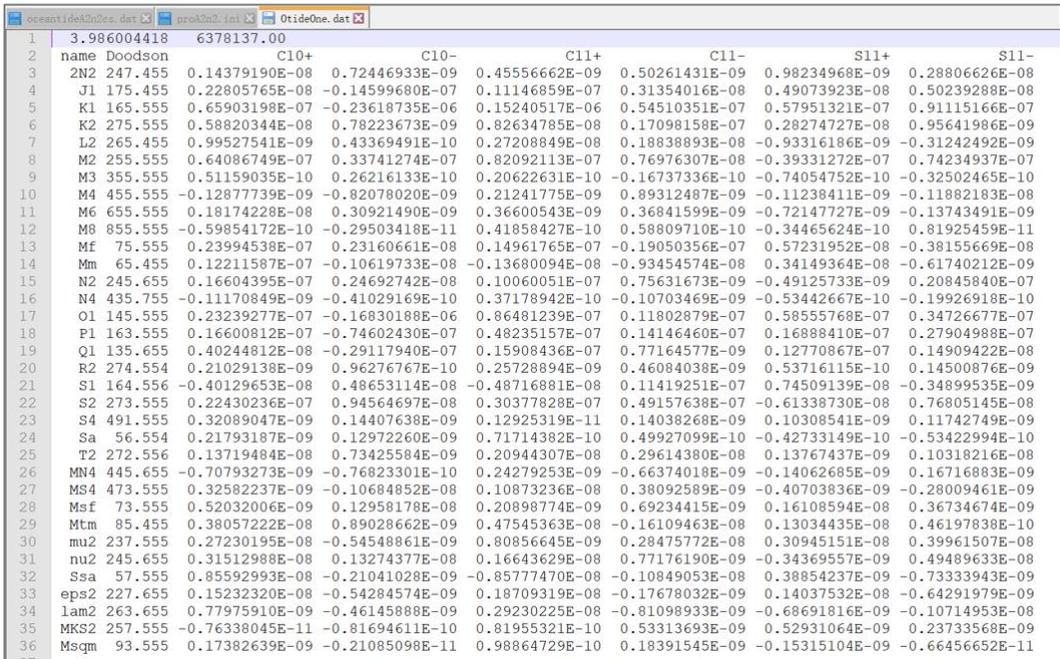
[输出] (1) 海潮负荷球谐系数模型文件 Otideloadcs.dat。(2) 海潮负荷一阶项同相异相幅值文件 OtideOne.dat。(3) 海洋分潮负荷球谐系数模型文件 oceantide***cs.dat, 迭代过程统计信息文件 pro***.ini 和残差格网文件 rnt***.dat。其中, ***为指定通配符实例 (34 个分潮)。(3) 输出数据文件见样例。

海洋分潮负荷球谐系数模型文件 oceantide***cs.dat。头文件 (第二行): 地心引力常数 GM ($\times 10^{14}m^3/s^2$), 地球长半轴 a (m), 零阶项 $a\Delta C_{00}$ (hPa), 相对误差 θ (%)。 θ 为最终迭代残差标准差与源格网标准差的百分比, GM, a 也称为球谐系数模型的尺度参数, 表示球谐系数模型中的面谐函数定义在半径等于地球长半轴 a 的球面上。

海潮负荷一阶项同相异相幅值文件 OtideOne.dat, 用于地球质心变化海潮负荷效应预报计算。头文件 (第二行): 地心引力常数 GM ($\times 10^{14}m^3/s^2$), 地球长半轴 a (m); 记录格式: 分潮符号, Doodson 数, C_{10} 同相幅值, C_{10} 异相幅值, C_{11} 同相幅值, C_{11} 异相幅值, S_{11} 同相幅值, S_{11} 异相幅值 (cm)。



1	Ocean tidal height load normalized spherical harmonic coefficient model in cm.										
2	Created by EtideLoad, ZHANG Chuanyin, Chinese Academy of Surveying and Mapping.										
3	Doodson name	n	m	Csin+	Ccos+	Csin-	Ccos-	C+	eps+	C-	eps-
4	247.455 2N2	1	0	0.00458562	0.00231038	0.00458562	0.00231038	0.005135	63.2596	0.005135	63.2596
5	247.455 2N2	1	1	-0.006773380	0.00473565	0.01063946	-0.00152991	0.009609	301.4805	0.010749	98.1828
6	247.455 2N2	2	0	0.01415077	-0.00470716	0.01415077	-0.00470716	0.014913	108.3994	0.014913	108.3994
7	247.455 2N2	2	1	-0.01749377	0.01964053	-0.02057617	0.01244109	0.026302	318.3086	0.024045	301.1587
8	247.455 2N2	2	2	-0.05076973	0.15409810	0.03408330	-0.00708020	0.162246	341.7648	0.034811	101.7353
9	247.455 2N2	3	0	-0.00345932	-0.05402235	-0.00345932	-0.05402235	0.054133	183.6639	0.054133	183.6639
10	247.455 2N2	3	1	0.00459468	0.02860553	0.08674509	0.04125120	0.028972	9.1250	0.096054	64.5668
11	247.455 2N2	3	2	-0.01359111	-0.04803085	0.00043095	0.01917460	0.049917	195.7997	0.019179	1.2875
12	247.455 2N2	3	3	0.01157600	0.04745531	0.10043379	-0.03897379	0.125109	67.7090	0.107731	111.2090
13	247.455 2N2	4	0	-0.04667076	0.02579335	-0.04667076	0.02579335	0.052800	299.2429	0.052800	299.2429
14	247.455 2N2	4	1	0.03322584	0.01467790	0.01394749	0.02945707	0.036324	66.1660	0.032592	25.3369
15	247.455 2N2	4	2	0.06616682	-0.16308472	0.08023800	0.03608357	0.175996	157.9166	0.087978	65.7862
16	247.455 2N2	4	3	-0.04323293	-0.08712246	-0.08031745	0.08908738	0.097259	206.3921	0.119948	171.9635
17	247.455 2N2	4	4	-0.07108370	0.11911427	-0.03283587	0.04029420	0.138712	329.1726	0.051979	320.8233
18	247.455 2N2	5	0	0.00423674	0.05025371	0.00423674	0.05025371	0.050432	4.8190	0.050432	4.8190
19	247.455 2N2	5	1	-0.06599377	0.02863740	-0.06611923	-0.08775797	0.071939	293.4580	0.109878	216.9954
20	247.455 2N2	5	2	0.03191636	0.09160043	-0.12292118	0.09809027	0.097002	19.2099	0.157262	308.5896
21	247.455 2N2	5	3	-0.04622306	0.08296994	-0.03228352	-0.02331163	0.100551	332.6324	0.039828	234.1757
22	247.455 2N2	5	4	0.12978448	-0.00340802	-0.08015548	0.01815451	0.129829	91.5042	0.082186	282.7617
23	247.455 2N2	5	5	0.07170340	0.02947675	0.04405895	-0.08476786	0.077526	67.6528	0.095534	152.5364
24	247.455 2N2	6	0	0.03947937	-0.02794239	0.03947937	-0.02794239	0.048367	125.2898	0.048367	125.2898



1	Ocean tide one order coefficient model in cm.							
2	Created by EtideLoad, ZHANG Chuanyin, Chinese Academy of Surveying and Mapping.							
3	name	Doodson	C10+	C10-	C11+	C11-	S11+	S11-
4	2N2	247.455	0.14379190E-08	0.72446933E-09	0.45556662E-09	0.50261431E-09	0.98234968E-09	0.28806626E-08
5	J1	175.455	0.22805765E-08	-0.14599680E-07	0.11146859E-07	0.31354016E-08	0.49073923E-08	0.50239288E-08
6	K1	165.555	0.65903198E-07	-0.23618735E-06	0.15240517E-06	0.54510351E-07	0.57951321E-07	0.91115166E-07
7	K2	275.555	0.58820344E-08	0.78223673E-09	0.82634785E-08	0.17098158E-07	0.28274727E-08	0.95641986E-09
8	L2	265.455	0.99527541E-09	0.43369491E-10	0.27208849E-08	0.18838893E-08	-0.93316186E-09	-0.31242492E-09
9	M2	255.555	0.64086749E-07	0.33741274E-07	0.82092113E-07	0.76976307E-08	-0.39331272E-07	0.74234937E-07
10	M3	355.555	0.51159035E-10	0.26216133E-10	0.20622631E-10	-0.16737336E-10	-0.74054752E-10	-0.32502465E-10
11	M4	455.555	-0.12877739E-09	-0.82078020E-09	0.21241775E-09	0.89312487E-09	-0.11238411E-09	-0.11882183E-08
12	M6	655.555	0.18174228E-08	0.30921490E-09	0.36600543E-09	0.36841599E-09	-0.72147727E-09	-0.13743491E-09
13	M8	855.555	-0.59854172E-10	-0.29503418E-11	0.41858427E-10	0.58809710E-10	-0.34465624E-10	-0.81925459E-11
14	Mf	75.555	0.23994538E-07	0.23160661E-08	0.14961765E-07	-0.19050356E-07	0.57231952E-08	-0.38155669E-08
15	Mm	65.455	0.12211587E-07	-0.10619733E-08	-0.13680094E-08	-0.93454574E-08	0.34149364E-08	-0.61740212E-09
16	N2	245.655	0.16604395E-07	0.24692742E-08	0.10060051E-07	0.75631673E-09	-0.49125733E-09	0.20845840E-07
17	N4	435.755	-0.11170849E-09	-0.41029169E-10	0.37178942E-10	-0.10703469E-09	-0.53442667E-10	-0.19926918E-10
18	O1	145.555	0.23239277E-07	-0.16830188E-06	0.86481239E-07	0.11802879E-07	0.58555768E-07	0.34726677E-07
19	P1	163.555	0.16600812E-07	-0.74602430E-07	0.48235157E-07	0.14146460E-07	0.16888410E-07	0.27904988E-07
20	Q1	135.655	0.40244812E-08	-0.29117940E-07	0.15908436E-07	0.77164577E-09	0.12770867E-07	0.14909422E-08
21	R2	274.554	0.21029138E-09	0.96276767E-10	0.25278894E-09	0.46084038E-09	0.53716115E-10	0.14500876E-09
22	S1	164.555	-0.40129653E-08	0.48653114E-08	-0.48716881E-08	0.11419251E-07	0.74509139E-08	-0.34899535E-08
23	S2	273.555	0.22430236E-07	0.94564697E-08	0.30377828E-07	0.49157638E-07	-0.61338730E-08	0.76805145E-08
24	S4	491.555	0.32089047E-09	0.14407638E-09	0.12925319E-11	0.14038268E-09	0.10308541E-09	0.11742749E-09
25	Sa	56.554	0.21793187E-09	0.12972260E-09	0.71714382E-10	0.49927098E-10	-0.42773149E-10	-0.53422994E-10
26	T2	272.556	0.13719484E-08	0.73425584E-09	0.20944307E-08	0.29614308E-08	0.13767437E-09	0.10318216E-08
27	MN4	445.655	-0.70793273E-09	-0.76823301E-10	0.24279253E-09	-0.66374018E-09	-0.14062685E-09	0.16716883E-09
28	MS4	473.555	0.32582237E-09	-0.10684852E-08	0.10873236E-08	0.38092589E-09	-0.40703836E-09	-0.28009461E-09
29	Msf	73.555	0.52032006E-09	0.12958178E-08	0.20898774E-09	0.69234415E-09	0.16108594E-08	0.36734674E-09
30	Mtm	85.455	0.38057222E-08	0.89028662E-09	0.47545363E-08	-0.16109463E-08	0.13034435E-08	0.46197838E-08
31	mu2	237.555	0.27230195E-08	-0.54548861E-09	0.80856645E-09	0.28475772E-08	0.30945151E-08	0.39961507E-08
32	nu2	245.655	0.31512988E-08	0.13274377E-08	0.16643629E-08	0.77176190E-09	-0.34369557E-09	0.49489633E-08
33	Ssa	57.555	0.85592993E-08	-0.21041028E-09	-0.85777470E-08	-0.10849053E-08	0.38854237E-09	-0.73333943E-09
34	eps2	227.655	0.15232320E-08	-0.54284574E-09	0.18709319E-08	-0.17678032E-09	0.14037532E-08	-0.64291979E-09
35	lam2	263.655	0.77975910E-09	-0.46145888E-09	0.29230225E-08	-0.81098933E-09	-0.68691816E-09	-0.10714953E-08
36	MKS2	257.555	-0.76338045E-11	-0.81694611E-10	0.81955321E-10	0.53313693E-09	0.52931064E-09	0.23733568E-09
37	Msqm	93.555	0.17382639E-09	-0.21085098E-11	0.98864729E-10	0.18391545E-09	-0.15315104E-09	-0.66456652E-11

4.3 球谐综合法模型等效水高与调和常数计算

[目标]由全球规格化负荷潮球谐系数模型或地表非潮汐负荷球谐系数模型，计算潮汐调和常数或非潮汐地表负荷的模型值。

此项功能常用于负荷潮球谐系数模型移去恢复法高分区域负荷潮效应精化，和负荷球谐系数模型移去恢复法高分区域负荷形变场精化（模型值移去流程）。

4.3.1 地表环境负荷等效水高模型值计算

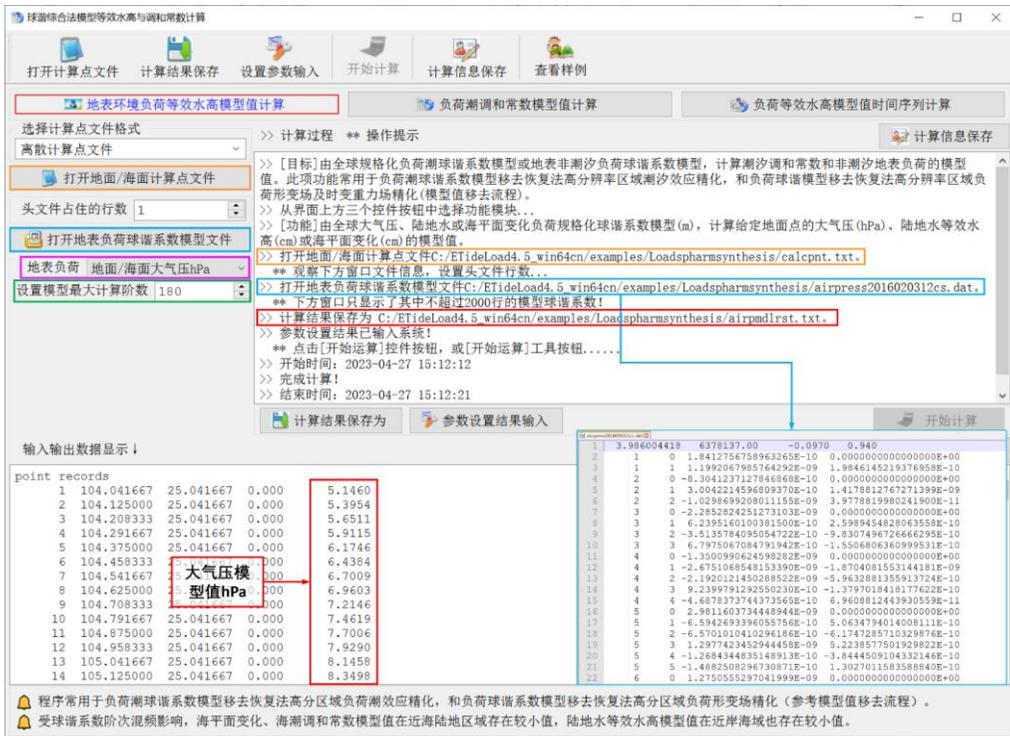
[功能]由全球大气压、陆地水或海平面变化负荷规格化球谐系数模型（m），计算给定地面点的大气压（hPa）、陆地水等效水高（cm）或海平面变化（cm）的模型值。

[输入]计算点文件，全球大气压、陆地水或海平面变化负荷规格化球谐系数模型文件。

计算点文件可以是离散地面/海面计算点文件，也可以是计算面高度格网文件。

[参数设置]选择计算点文件格式，地表负荷类型，输入负荷规格化球谐系数模型最大计算阶数。

模型最大计算阶数：程序自动选择模型最大阶数和输入最大阶数中的最小值作为计算阶数。



[输出]计算点地表等效水高模型值文件。

当输入离散地面/海面计算点文件时，程序输出离散计算点地表等效水高模型值文件。

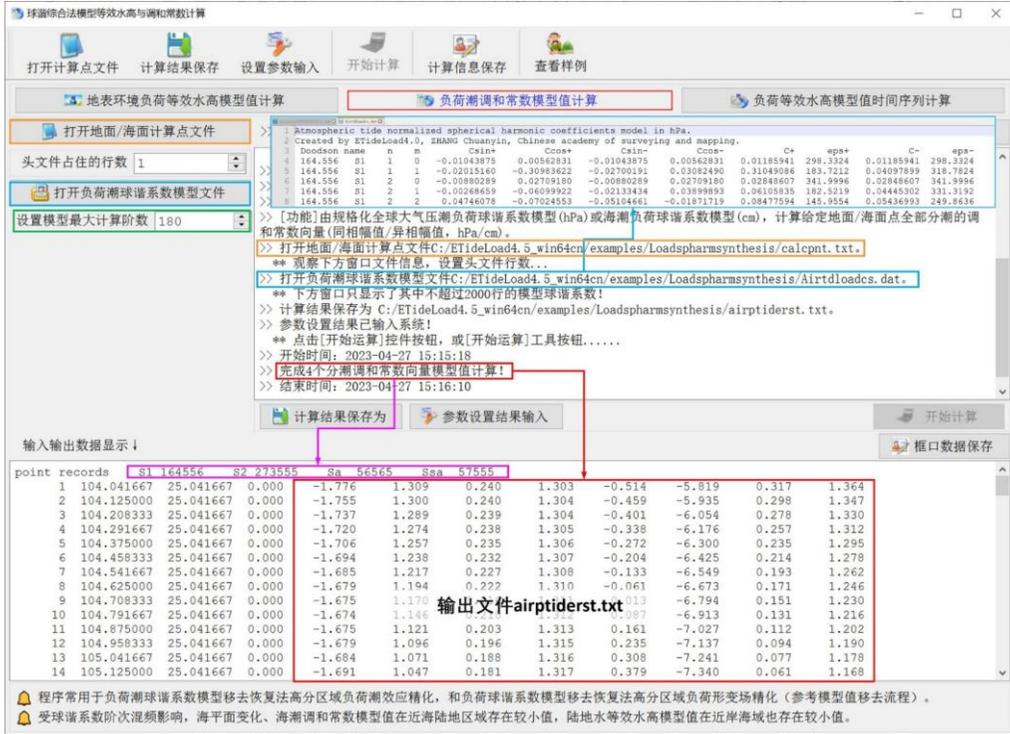
输出头文件同输入计算点文件，文件记录在输入计算点文件记录的基础上，增加一列模型值计算结果。

当输入计算面高度格网文件时，程序输出格网规格相同的计算点地表等效水高模型值格

网文件。

4.3.2 全部分潮调和常数模型值计算

[功能]由规格化全球大气压潮负荷球谐系数模型 (hPa) 或海潮负荷球谐系数模型 (cm), 计算给定地面/海面点全部分潮的调和常数向量 (同相幅值/异相幅值, hPa/cm)。



[输入]离散计算点文件, 规格化全球大气压潮负荷球谐系数模型 (hPa) 或海潮负荷球谐系数模型 (cm)。

[参数设置]计算点文件的头文件行数, 负荷潮球谐模型最大计算阶数。

[输出]计算点处全部分潮调和常数模型值文件。

头文件同输入计算点文件, 文件记录在输入计算点文件记录的基础上, 增加全部分潮调和常数模型值计算结果。本例 4 个分潮, 共 8 个属性值。

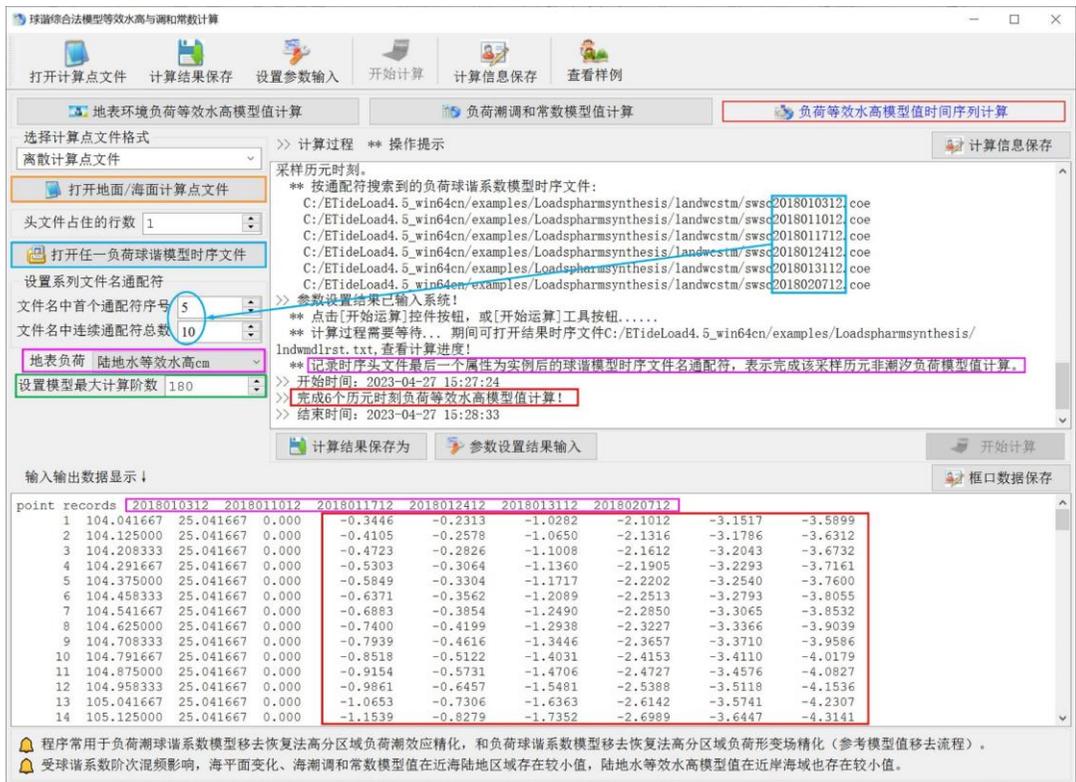
4.3.3 负荷等效水高模型值时间序列计算

[功能]由全球大气压、陆地水或海平面变化负荷规格化球谐系数模型 (m) 时间序列, 计算给定地面点大气压 (hPa)、陆地水等效水高 (cm) 或海平面变化 (cm) 模型值的记录时间序列。球谐系数模型时间序列文件按指定的通配符提取。

[输入]计算点文件。全球大气压、陆地水或海平面变化负荷规格化球谐系数模型 (m) 时间序列文件。

计算点文件可以是离散计算点文件, 也可以是计算面格网文件。

本例输入 6 个采样历元时刻的 360 阶陆地水负荷规格化球谐系数模型周变化时间序列, 最大计算阶数为 180 阶。



[输出]地表等效水高模型值时间序列文件。

当输入离散计算点文件时，程序输出地表等效水高模型值记录时间序列文件。记录时序头文件在计算点文件的头文件后面，增加实例化球谐系数模型时序文件的通配符，以标识记录时序的采样历元时刻。

当输入计算面格网文件时，程序输出地表等效水高模型值格网时间序列文件。格网时序头文件中最后一个属性为实例后的球谐模型时序文件名通配符，表示已完成这些采样历元时刻的非潮汐负荷模型值计算。

计算过程需要等待...期间可打开结果文件，查看计算进度!

受球谐系数阶次混频影响，海平面变化、海潮调和常数模型值在近海陆地区域存在较小值，陆地水等效水高模型值在近岸海域也存在较小值。

4.4 球谐综合法负荷形变场及时变重力场计算

[目标]利用全球大气压、陆地水和海平面变化负荷球谐系数模型(m)，按球谐综合算法，计算地面各种大地测量观测量或参数的非潮汐负荷效应或固体地球外部空间(包括海洋、航空或卫星高度)的非潮汐负荷摄动。

计算海平面变化负荷效应时，输入计算点的高度为正(常)高;计算大气或陆地水负荷效应时，计算点的高度为计算点相对于地面的高度。

4.4.1 地表环境负荷形变场球谐综合计算

[功能]由全球大气压、陆地水或海平面变化负荷球谐系数模型 (m)，按球谐综合算法，计算空间点的高程异常 (mm)、地面重力 (μGal)、扰动重力 (μGal)、地倾斜 (SW 南向/西向 mas)、垂线偏差 (SW 南向/西向 mas)、水平位移 (EN 东向/北向 mm)、地面径向 (大地高 mm)、地面正 (常) 高 (mm)、扰动重力梯度 ($10\mu\text{E}$) 或水平重力梯度 (NE 北向/西向 $10\mu\text{E}$) 的非潮汐负荷效应。

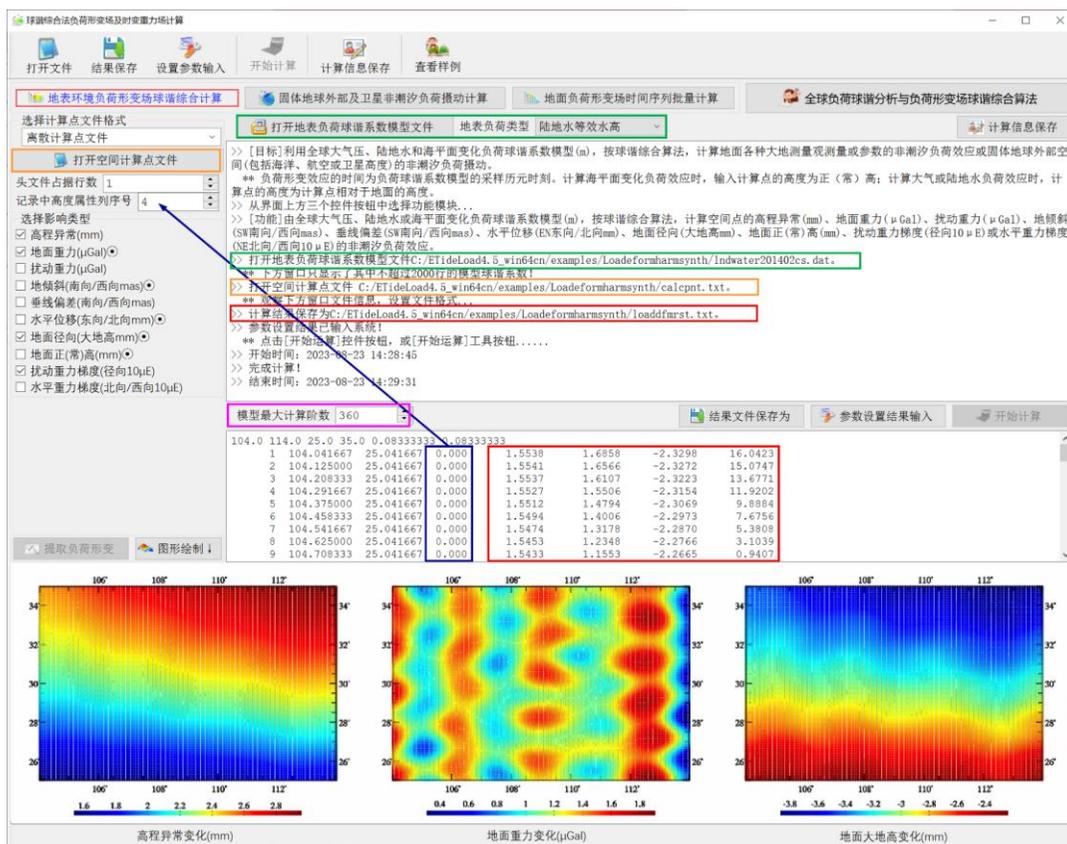
[输入]地面或地球外部计算点文件，全球大气压、陆地水或海平面变化负荷球谐系数模型 (m) 文件。

计算点文件可以是离散计算点文件，也可以是计算面格网文件。

[参数设置]选择计算点文件格式，地表负荷类型，输入负荷规格化球谐系数模型最大计算阶数，选择影响类型 (本例选择高程异常、扰动重力、地面径向和扰动重力梯度)，输入结果文件名。

[输出]计算点负荷形变效应文件。

当输入离散空间计算点文件时，输出头文件取输入计算点文件头，记录在输入文件记录的基础上，增加用户选择要素的负荷效应模型值属性。本例增加高程异常、扰动重力、地面径向和扰动重力梯度环境负荷效应共 4 个属性。



当输入计算面高度格网文件时，程序按用户选择的负荷效应类型，输出格网规格相同的

负荷形变效应模型值格网文件*.*. *为输入文件名。

扩展名*.* = ksi, gra, rga, dft, vdf, dph, dpr, nmh, grr 或 hgd, 分别表示高程异常、地面重力、扰动重力、地倾斜向量、垂线偏差向量、水平位移向量、地面径向、地面正(常)高、扰动重力梯度或水平重力梯度向量格网文件。

4.4.2 固体地球外部及卫星非潮汐负荷摄动计算

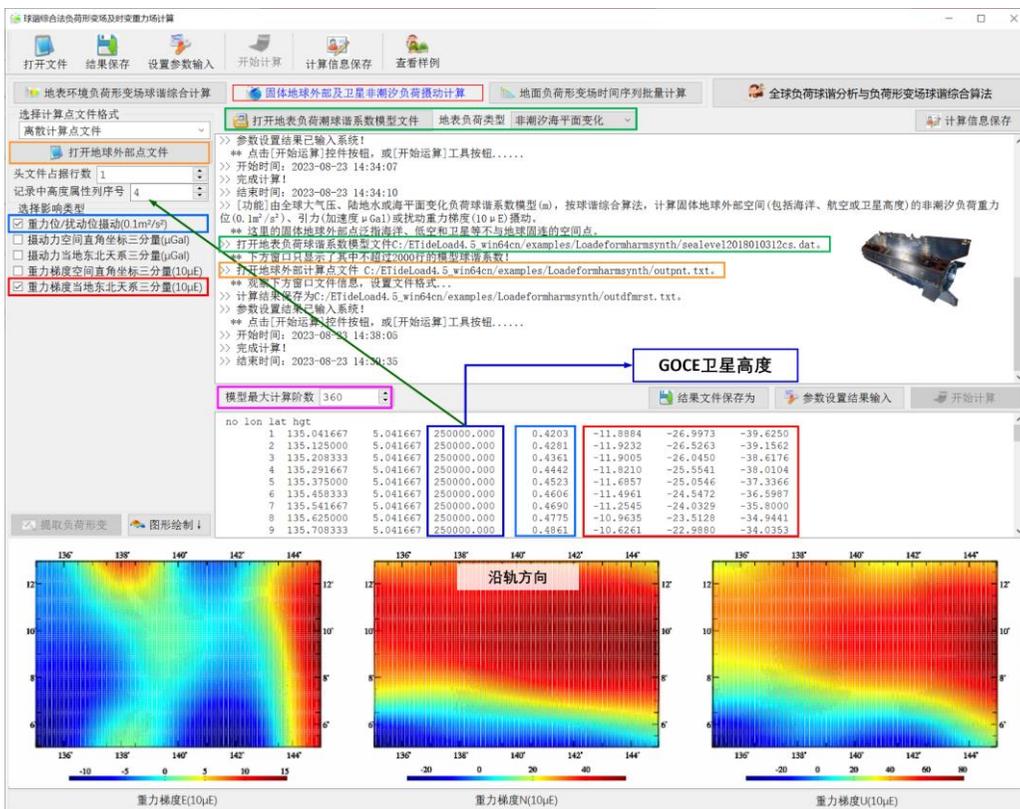
[功能]由全球大气压、陆地水或海平面变化负荷球谐系数模型 (m), 按球谐综合算法, 计算固体地球外部空间 (包括海洋、航空或卫星高度) 的非潮汐负荷重力位 (0.1m²/s²)、引力 (加速度 μGal) 或扰动重力梯度 (10μE) 摄动。

这里的固体地球外部点泛指海洋、低空和卫星等不与地球固连的空间点。

[输入]固体地球外部计算点文件, 全球大气压、陆地水或海平面变化负荷球谐系数模型 (m) 文件。

计算点文件可以是离散计算点文件, 也可以是计算面大地高格网文件。

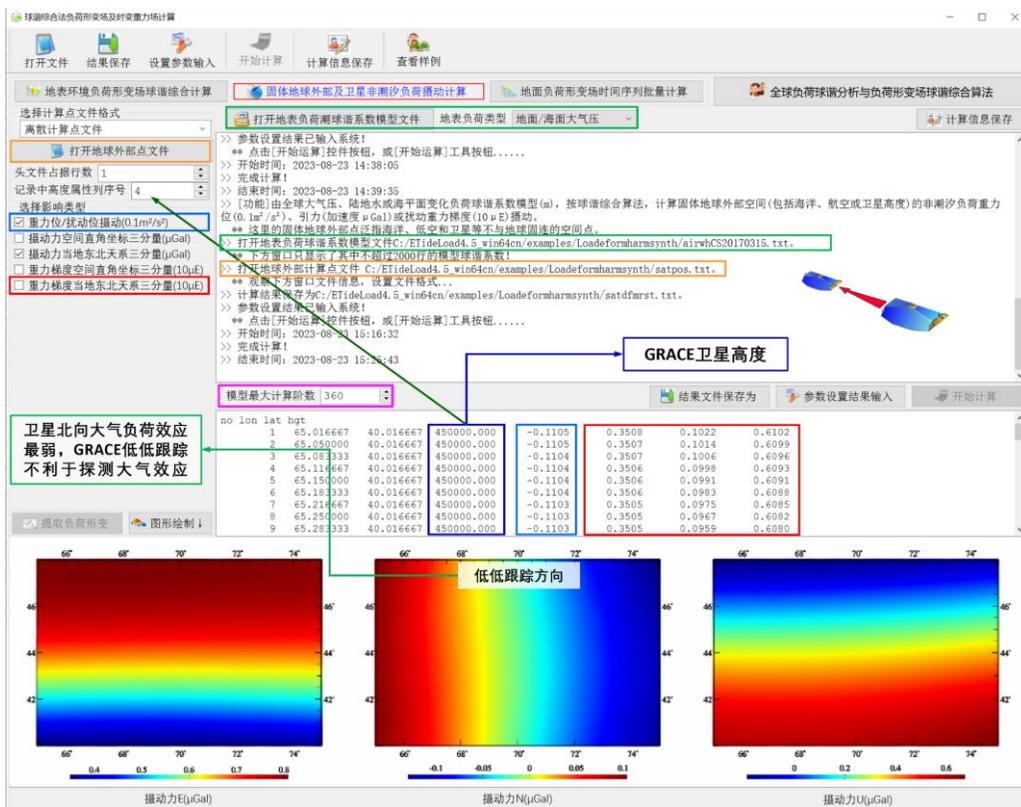
[参数设置] 选择计算点文件格式, 地表负荷类型, 输入负荷规格化球谐系数模型最大计算数, 选择影响类型, 输入结果文件名。



[输出]计算点负荷形变效应文件。

当输入离散空间计算点文件时, 输出头文件取输入计算点文件头, 记录在输入文件记录的基础上, 增加用户选择要素的负荷效应模型值属性。

当输入计算面高度格网文件时，程序按用户选择的负荷效应类型，输出格网规格相同的负荷形变效应模型值格网文件*.*.*。*为输入文件名。



扩展名*.*.* = gpv, pvx, pvy, pvz, pve, pvn, pvr, vxx, vyy, vzz, vee, vnn, vrr, 分别表示位摄动、摄动力 x,y,z 分量、摄动力东北天分量、重力梯度 x,y,z 分量、重力梯度东北天分量格网文件。

4.4.3 地面负荷形变场时间序列批量计算

[功能]由全球大气压、陆地水或海平面变化负荷球谐系数模型 (m) 时间序列，按球谐综合算法，计算各种大地测量负荷形变效应时间序列。球谐系数模型 (m) 时间序列文件按指定的通配符提取。负荷形变效应的时间为球谐系数模型的采样历元时刻。

[输入]地面或地球外部计算点文件，全球大气压、陆地水或海平面变化负荷球谐系数模型时间序列文件。

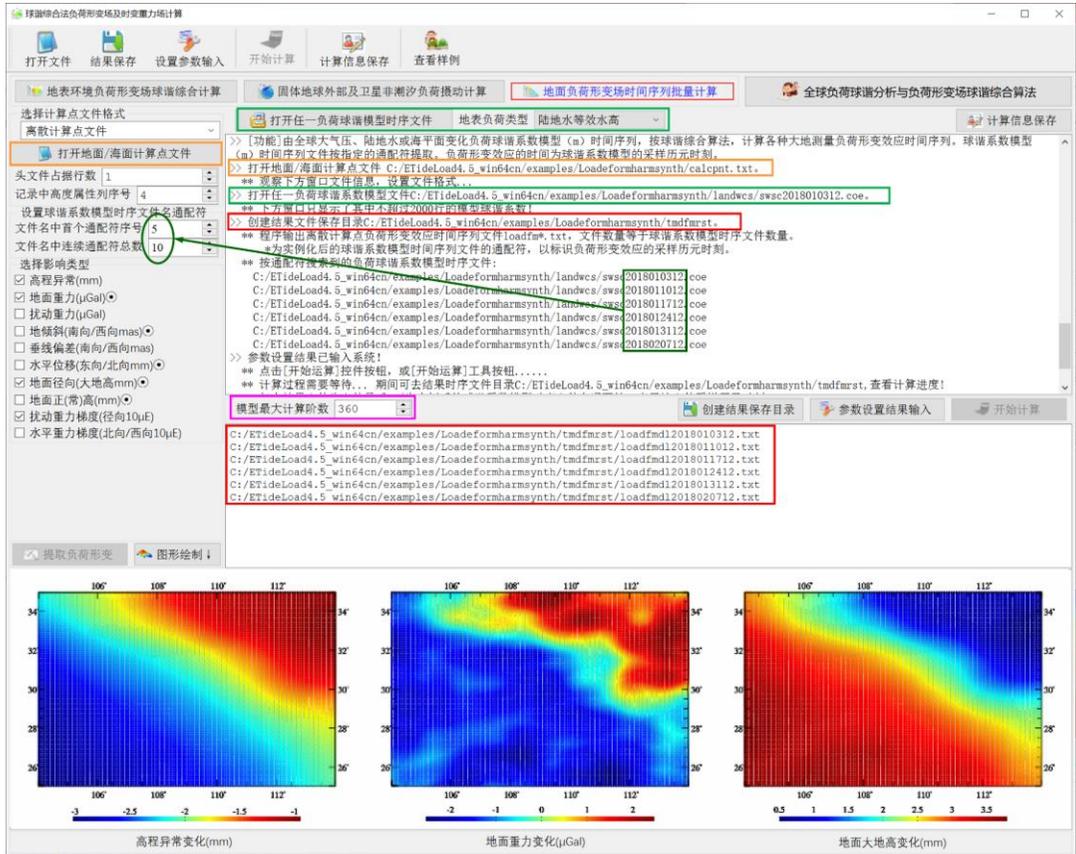
计算点文件可以是离散计算点文件，也可以是计算面高度格网文件。

[输出]计算点负荷形变效应时间序列文件。

当输入离散空间计算点文件时，程序输出离散计算点负荷形变效应时间序列文件 loadfm*.txt，文件数量等于球谐系数模型时序文件数量。头文件取输入计算点文件头，记录在输入文件记录的基础上，增加用户选择要素的负荷效应模型值属性。

当输入计算面高度格网文件时，程序按用户选择的负荷效应类型，输出负荷形变效应模

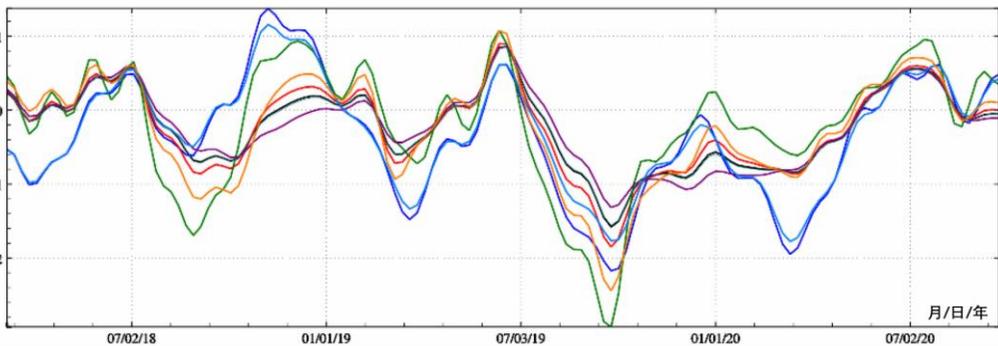
型值格网时间序列文件 loadfmdl*.???.



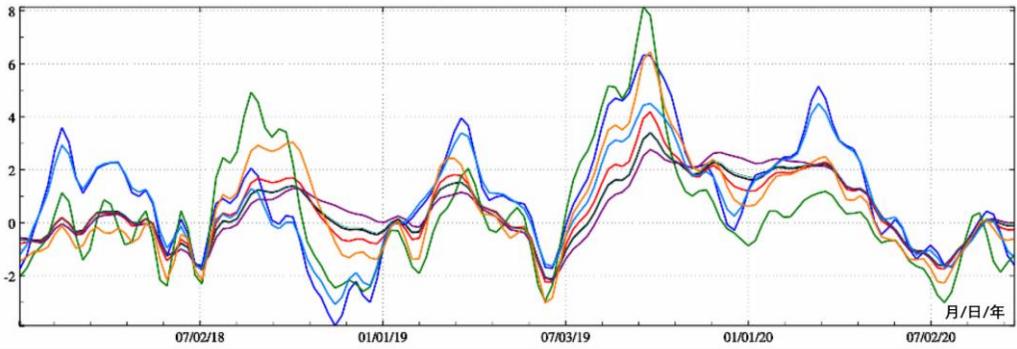
扩展名??? = ksi, gra, rga, dft, vdf, dph, dpr, nmh, grr 或 hgd, 分别表示高程异常、地面重力、扰动重力、地倾斜向量、垂线偏差向量、水平位移向量、地面径向、地面正(常)高、扰动重力梯度或水平重力梯度向量格网文件。*为实例化后的球谐系数模型时间序列文件的通配符, 以标识负荷形变效应的采样历元时刻。

计算过程需要等待...期间可去结果时序文件目录, 查看计算进度!

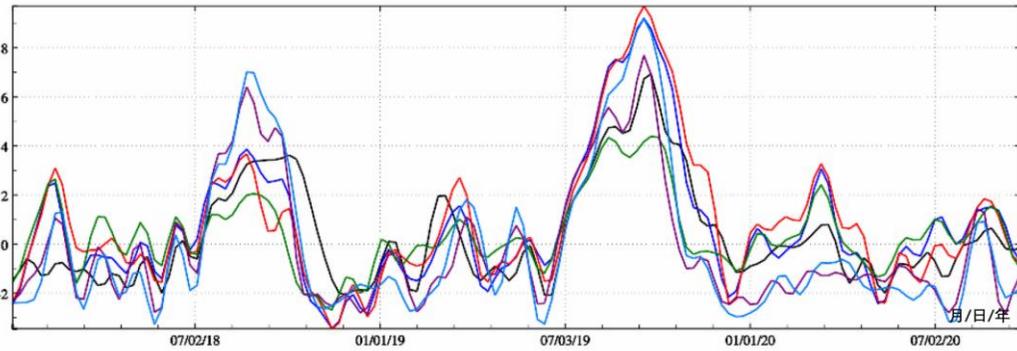
程序在当前目录下还输出一、二阶位系数、地球质心变化和形状极移的地表环境负荷效应时间序列文件 Loadfmcmsfptm.txt。这是一个系统内部测试文件。



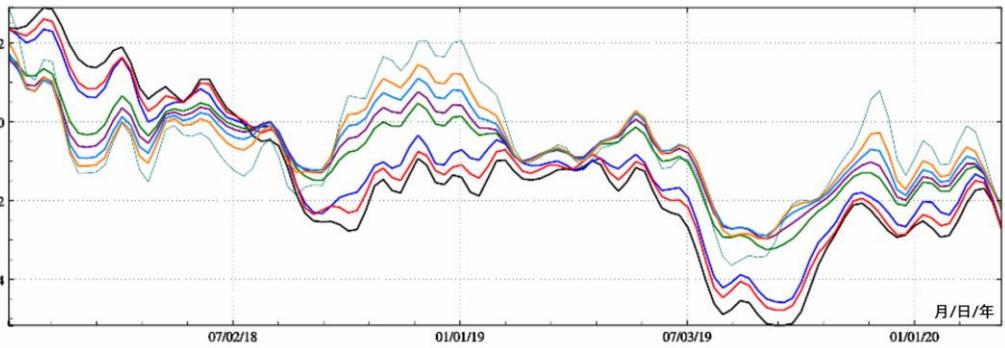
中国大陆土壤水变化负荷形变时变特征 (360阶) -大地水准面变化mm



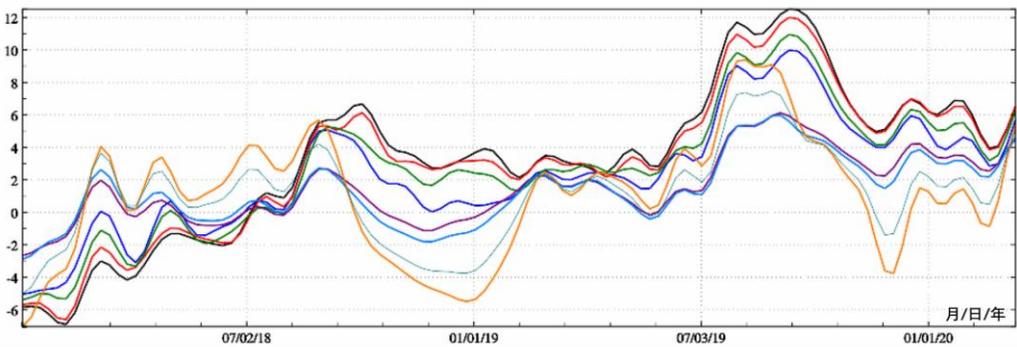
中国大陆土壤水变化负荷形变时变特征 (360阶) -地面正 (常) 高变化mm



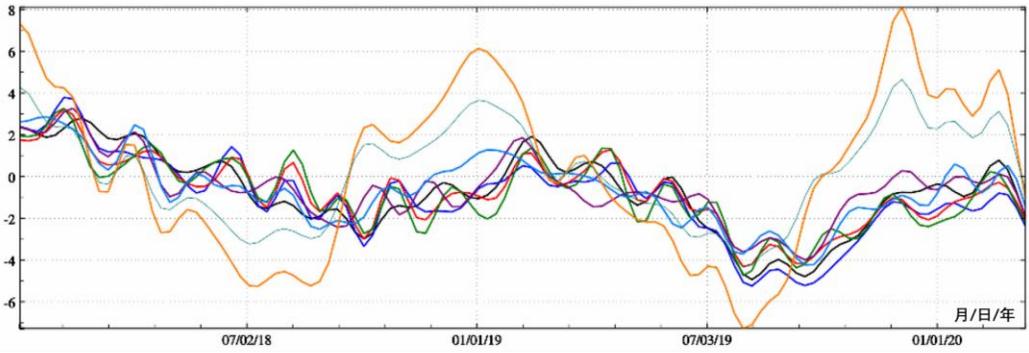
中国大陆土壤水变化负荷形变时变特征 (360阶) -地面重力变化 μ Gal



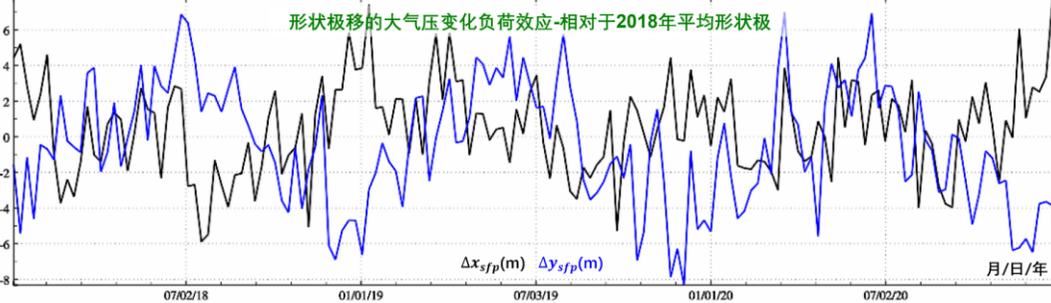
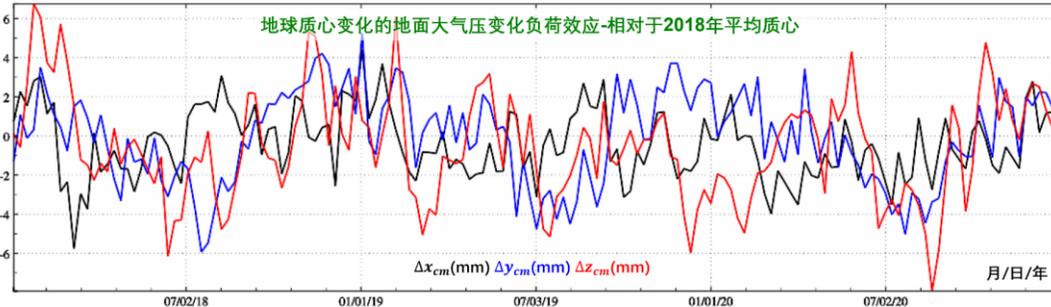
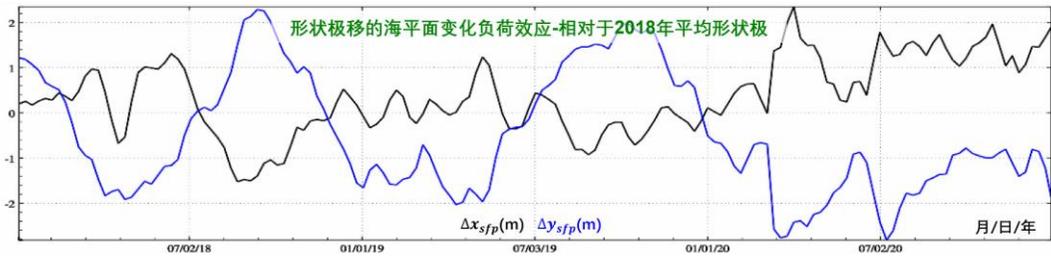
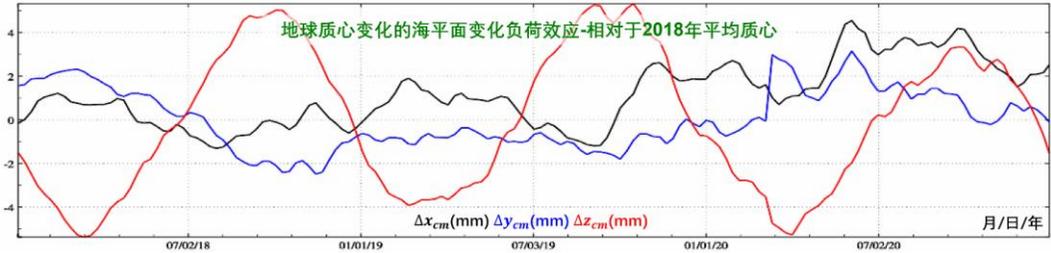
沿海地区海平面变化负荷形变时变特征 (360阶) -大地水准面变化mm



沿海地区海平面变化负荷形变时变特征 (360阶) -地面正 (常) 高变化mm

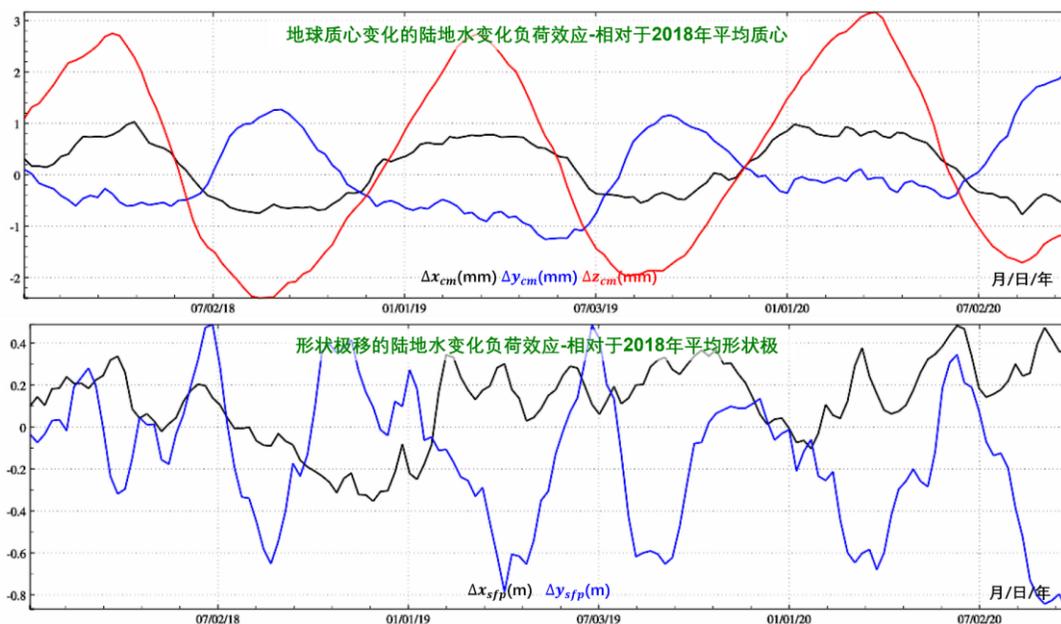


中国沿海地区海平面变化负荷形变时变特征 (360阶) -地面重力变化 μGal



头文件占住一行, 记录格式: 文件名通配符实例 (表示时间), 8 列一、二阶规格化位系数的地表负荷效应 $\Delta\bar{C}_{10}, \Delta\bar{C}_{11}, \Delta\bar{S}_{11}, \Delta\bar{C}_{20}, \Delta\bar{C}_{21}, \Delta\bar{S}_{21}, \Delta\bar{C}_{22}, \Delta\bar{S}_{22}$ ($\times 10^{-10}$), 3 列地球质心变化

的地表负荷效应 $\Delta x_{cm}, \Delta y_{cm}, \Delta z_{cm}$ (单位 mm), 2 列地球形状极移的地表负荷效应 $\Delta x_{sfp}, \Delta y_{sfp}$ (地固空间直角坐标系 x 方向/y 方向, 单位 m)。



利用全球大气压、陆地水和海平面变化监测数据，确定地表环境负荷引起的（非潮汐）时变地球重力场，包括重力位系数和地面及地球外部全要素扰动重力场元的非潮汐负荷效应，可标定重力卫星关键测量载荷的多种参数，有效提升和检核卫星重力场时变监测的质量、可靠性、精度与时变重力场监测水平。

4.5 区域地表环境负荷格林积分法负荷形变场计算

[目标]由区域大气压、陆地水或海平面变化非潮汐地表负荷格网，利用[球谐综合法模型等效水高与调和常数计算]程序，计算并移去负荷模型值，获得残差负荷等效水高格网；按负荷格林函数积分算法，计算残差负荷形变场及时变重力场参数；再由[球谐综合法负荷形变场及时变重力场计算程序]，计算并恢复模型负荷效应值，从而实现高分辨率区域负荷形变场及时变重力场的高精度逼近。

程序要求地表负荷残差格网范围必须大于计算点分布范围，以吸收边缘效应。计算海平面变化负荷效应时，输入计算点的高度为正（常）高；计算大气或陆地水负荷效应时，输入计算点相对于地面的高度。

4.5.1 区域残差地表负荷形变场格林积分法计算

[功能]由移去全球负荷球谐系数模型值的区域大气压、陆地水、海平面变化、江河湖库水、冰川雪山等地表环境负荷等效水高变化 (cm) 残差格网，按负荷格林函数积分法，计算地面或近地空间任意点高程异常 (mm)、地面重力 (μGal)、扰动重力 (μGal)、地倾斜 (SW 南向/西向 mas)、垂线偏差 (SW 南向/西向 mas)、水平位移 (EN 东向/北向 mm)、地面径向 (大地高 mm)、地面正（常）高 (mm)、扰动重力梯度 (径向 mE) 与水平重力梯

度 (NE 北向/西向 mE) 负荷效应的残差值。

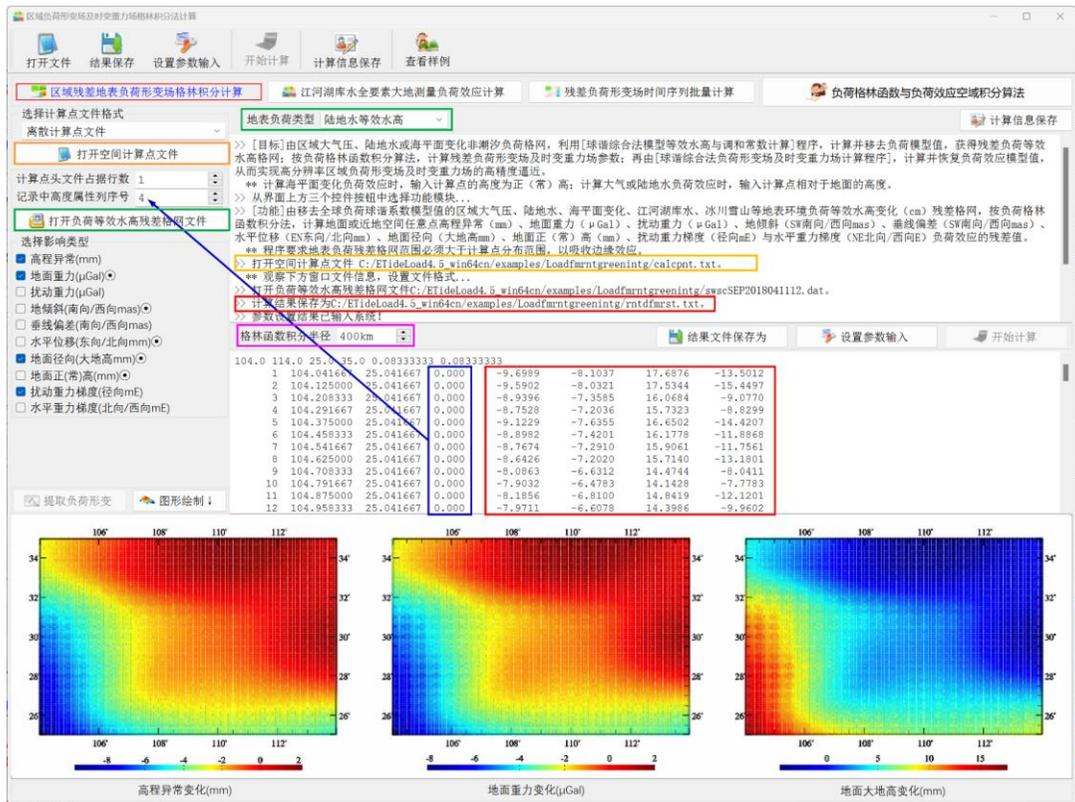
[输入]空间计算点文件, 区域大气压 (hPa)、陆地水或海平面变化 (cm) 等负荷等效水高残差格网文件。

计算点文件可以是离散计算点文件, 也可以是计算面高度格网文件。

[参数设置]选择计算点文件格式, 地表负荷类型, 选择负荷效应类型 (本例选择高程异常、扰动重力、地面径向和扰动重力梯度), 输入格林函数积分半径和结果文件名输入结果文件名。

[输出]计算点残差负荷形变效应文件。

当输入离散计算点文件时, 程序输出离散计算点残差负荷形变效应文件。输出头文件同输入计算点文件, 文件记录在输入计算点文件记录的基础上, 增加用户选择要素的残差负荷形变效应属性。本例增加高程异常、扰动重力、地面径向与扰动重力梯度残差负荷效应共 4 列属性。



当输入计算面高度格网文件时, 程序按用户选择的负荷效应类型, 输出格网规格相同的残差负荷形变效应格网文件*???. *为输入文件名。

扩展名??? = ksi, gra, rga, dft, vdf, dph, dpr, nmh, grr 或 hgd, 分别表示高程异常、地面重力、扰动重力、地倾斜向量、垂线偏差向量、水平位移向量、地面径向、地面正(常)高、扰动重力梯度或水平重力梯度向量格网文件。

残差负荷效应短波占优, 负荷格林函数在近区存在高阶振荡, 收敛性差, 因此, 一般要

求被积的残差负荷等效水高格网具有一定的空间分辨率，以反映其短波特性，否则，格林函数积分结果可能出现不稳定现象。

4.5.2 江河湖库水全要素大地测量负荷效应计算

[功能]将江河湖库水、冰川雪山等内陆水体变化用负荷等效水高变化格网 (cm) 表示，按格林函数积分算法，计算地面或近地空间任意点高程异常 (mm)、地面重力 (μGal)、扰动重力 (μGal)、地倾斜 (SW 南向/西向 mas)、垂线偏差 (SW 南向/西向 mas)、水平位移 (EN 东向/北向 mm)、地面径向 (大地高 mm)、地面正 (常) 高 (mm)、扰动重力梯度 (径向 mE) 与水平重力梯度 (NE 北向/西向 mE) 的负荷形变效应。

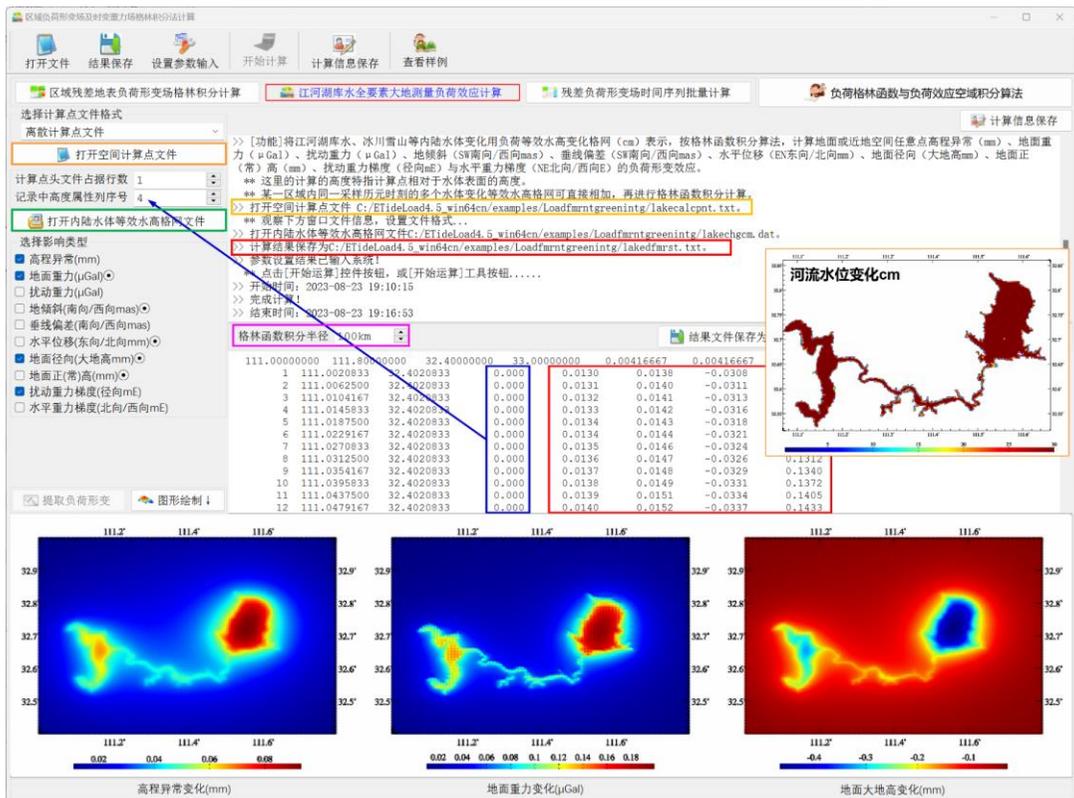
[输入]空间计算点文件，内陆水体等效水高变化格网 (cm) 文件。

计算点文件可以是离散计算点文件，也可以是计算面高度格网文件。这里的高度特指计算点相对于水体表面的高度。

[参数设置]选择计算点文件格式，选择负荷效应类型 (本例选择高程异常、扰动重力、地面径向和扰动重力梯度)，输入格林函数积分半径和结果文件名输入结果文件名。

[输出]同 4.5.1。

某一区域内同一采样历元时刻的多个水体变化等效水高格网可直接相加，再进行格林函数积分计算。



4.5.3 残差负荷形变场时间序列批量计算

[功能]由移去全球负荷球谐系数模型值的区域大气压、陆地水、海平面变化、江河湖库

水、冰川雪山等地表环境负荷等效水高变化 (cm) 残差格网时间序列, 按格林函数积分算法, 计算全要素大地测量非潮汐负荷效应的残差值时间序列。负荷等效水高变化 (cm) 残差格网时间序列文件按指定的通配符提取。

残差负荷形变效应的采样历元时刻为负荷等效水高变化 (cm) 残差格网对应的采样历元时刻。

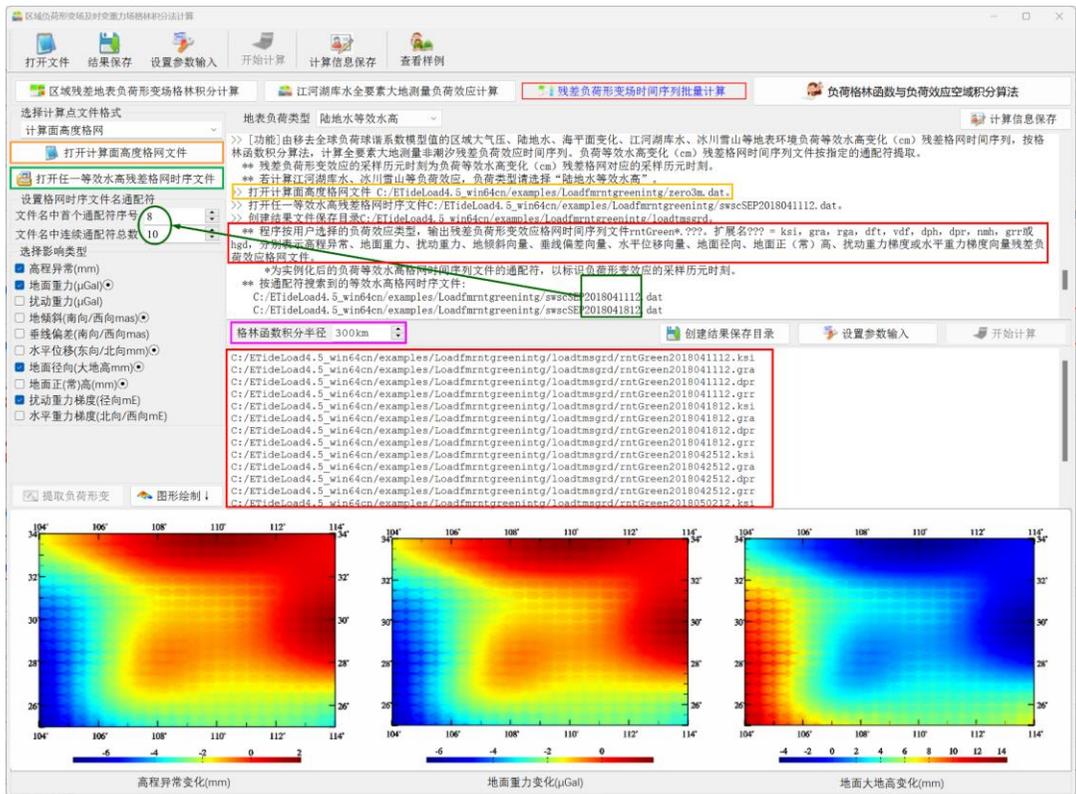
若计算江河湖库水、冰川雪山等负荷效应, 负荷类型请选择“陆地水等效水高”。

[输入]空间计算点文件, 区域负荷等效水高变化 (cm) 残差格网时间序列文件。

计算点文件可以是离散计算点文件, 也可以是计算面高度格网文件。

[输出]计算点残差负荷形变效应时间序列文件。

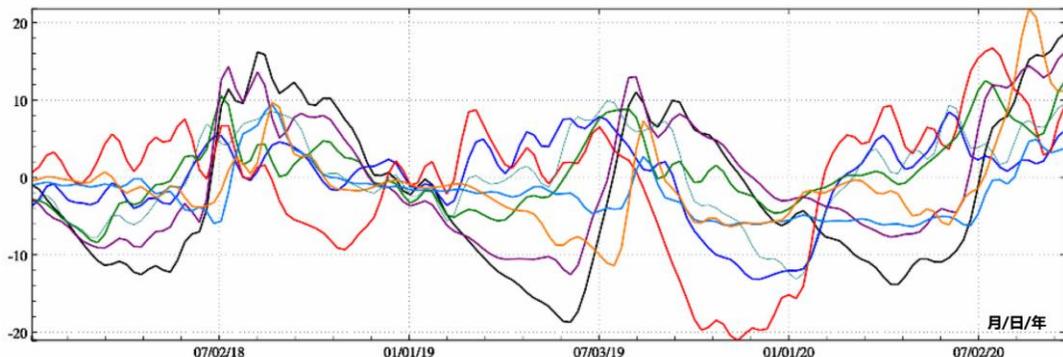
当输入离散空间计算点文件时, 程序输出离散计算点残差负荷形变效应时间序列文件 rentGreen*.txt, 文件数量等于残差负荷等效水高格网时序文件数量。头文件取输入计算点文件头, 记录在输入文件记录的基础上, 增加用户选择要素的负荷效应模型值属性。



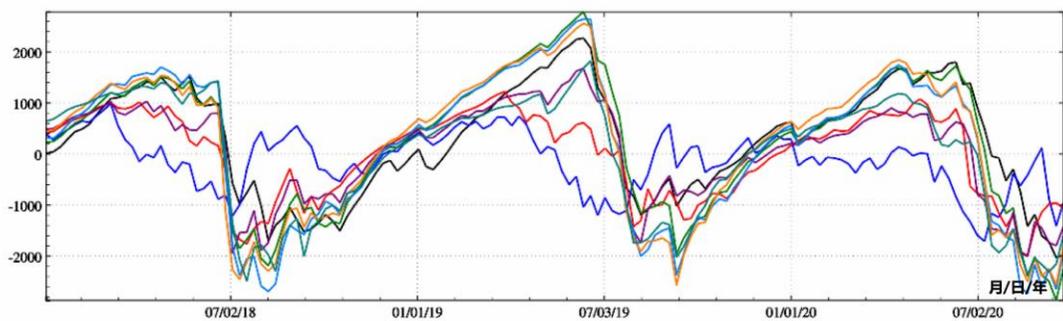
当输入计算面高度格网文件时, 程序按用户选择的负荷效应类型, 输出残差负荷形变效应格网时间序列文件 rntGreen*.*???.

扩展名??? = ksi, gra, rga, dft, vdf, dph, dpr, nmh, grr 或 hgd, 分别表示高程异常、地面重力、扰动重力、地倾斜向量、垂线偏差向量、水平位移向量、地面径向、地面正(常)高、扰动重力梯度或水平重力梯度向量残差负荷效应格网文件。*为实例化后的残差负荷等效水高格网时间序列文件的通配符, 以标识负荷形变效应的采样历元时刻。

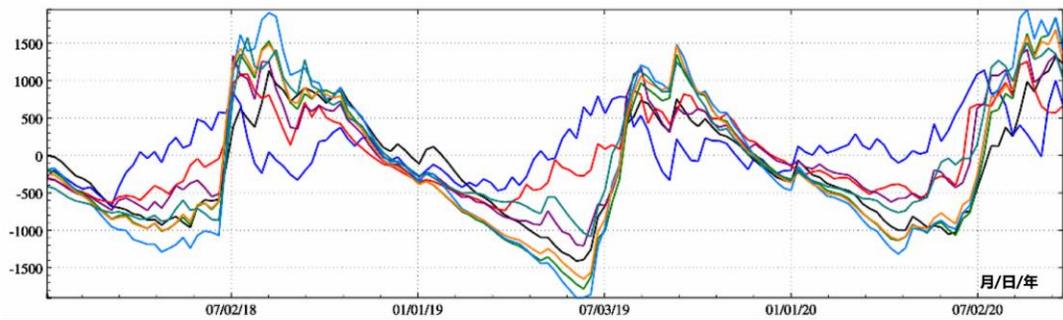
计算过程需要等待...期间可去结果时序文件目录，查看计算进度!



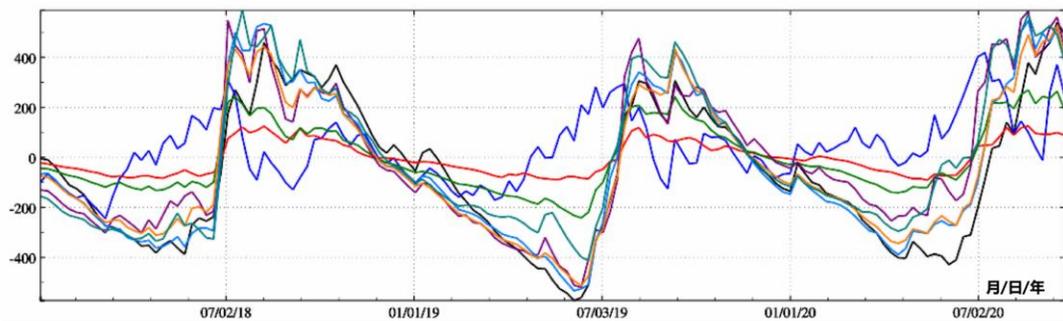
2018~2020年中国大陆30'×30'残差土壤水变化负荷形变 (Green积分) -地面重力变化 μGal



2018~2020年中国大陆30'×30'残差土壤水变化负荷形变 (Green积分) -扰动重力梯度变化 (径向, mE)



2018~2020年中国大陆30'×30'残差土壤水变化负荷形变 (Green积分) -水平重力梯度变化 (北向, mE)



2018~2020年中国大陆30'×30'残差土壤水变化负荷形变 (Green积分) -水平梯度变化 (西向, mE)

计算显示，中短波 (30'空间分辨率) 的残差土壤水变化，能引起 E 级重力梯度时变，且

时变特征复杂多变（难以模型化）。中国大陆南北土壤水变化差异大，水平梯度土壤水负荷效应在南北方向上明显大于东西方向。

叠加超短波地表水和地下水负荷效应后，地面重力梯度负荷效应的时变量级会增大数倍以上。如何有效处理这种复杂时空特征的地表动力学环境负荷效应，是地面重力梯度高精度测量必须面对的关键问题。

4.6 区域负荷 SRBF 逼近及负荷形变场 SRBF 综合计算

[目标]由移去全球负荷球谐系数模型值的区域陆地水、海平面变化、江河湖库水、冰川雪山等地表环境负荷等效水高残差格网，按球面径向基函数(SRBF)谱域逼近法，估计区域地表负荷 SRBF 系数模型，进而按 SRBF 系数谱域负荷形变效应综合法，计算区域负荷形变场及时变重力场。

程序要求地表负荷残差格网范围必须大于计算点分布范围，以吸收边缘效应。负荷格林函数在近区存在高阶振荡，收敛性差，空域格林积分法与负荷球谐系数模型相结合的移去恢复方案，无法控制负荷效应频谱的单调连续性，ETideLoad4.5 区域负荷 SRBF 逼近与负荷效应综合算法。

4.6.1 地表残差负荷谱域 SRBF 逼近与负荷形变综合

[功能]由移去全球负荷球谐系数模型值的区域陆地水、海平面变化、江河湖库水、冰川雪山等地表环境负荷等效水高残差格网，按谱域球面径向基函数(SRBF)逼近与负荷效应综合算法，计算负荷残差等效水高逼近值 (cm, 用于质量评估)，以及高程异常 (mm)、地面重力 (μGal)、扰动重力 (μGal)、地倾斜 (SW 南向/西向 mas)、垂线偏差 (SW 南向/西向 mas)、水平位移 (EN 东向/北向 mm)、地面径向 (大地高 mm)、地面正 (常) 高 (mm)、扰动重力梯度 (径向 mE) 与水平重力梯度 (NE 北向/西向 mE) 的残差负荷形变效应。

[输入]负荷等效水高残差格网文件和空间计算点文件。

计算点文件可以是离散计算点文件，也可以是计算面高度格网文件。

[参数设置]选择计算点文件格式，设置 SRBF 算法与控制参数。

SRBF 参数设置优化与累积逼近有效性原则：①负荷形变场空间连续可微，②负荷等效水高的残差标准差明显减小，残差统计平均值趋于零。

选择球面径向基函数形式。径向多级子核函数，Poisson 小波核函数。零次径向多级子核函数即为点质量核函数，零次 Poisson 小波核函数即为 Poisson 核函数。

勒让德函数最小最大阶数。最小阶数对结果监测量残差统计平均值有影响；最大阶数影响负荷形变场的连续可微性，且对残差统计标准差有较大影响。

Bjerhammar 球面埋藏深度 (km)：Bjerhammar 球面相对地面的平均深度 (km)。

SRBF 中心作用距离。作用距离也称影响半径 = 球面角距 \times 地球平均半径。SRBF 中心作用距离等效于负荷格林函数积分半径。程序采用固定不变的作用距离，以保证负荷形变场谱域空域结构的协调一致性。

Reuter 格网等级 K。程序将球面分割为 K 个平行纬圈，纬度间隔为 $180^\circ/K$ 。K 值越大，球面 Reuter 格网的空间分辨率越大。 $180^\circ/K$ 的适宜值与等效水高平均间距相当。

累积逼近次数。每次逼近等价于以上次负荷形变场为参考场，按移去恢复法精化残差负荷形变场。一般累积 1~2 次可达到稳定解。

可先让累积逼近次数等于零，优化调整首次逼近的合适参数，再固定首次逼近参数，优化调整累积逼近参数。

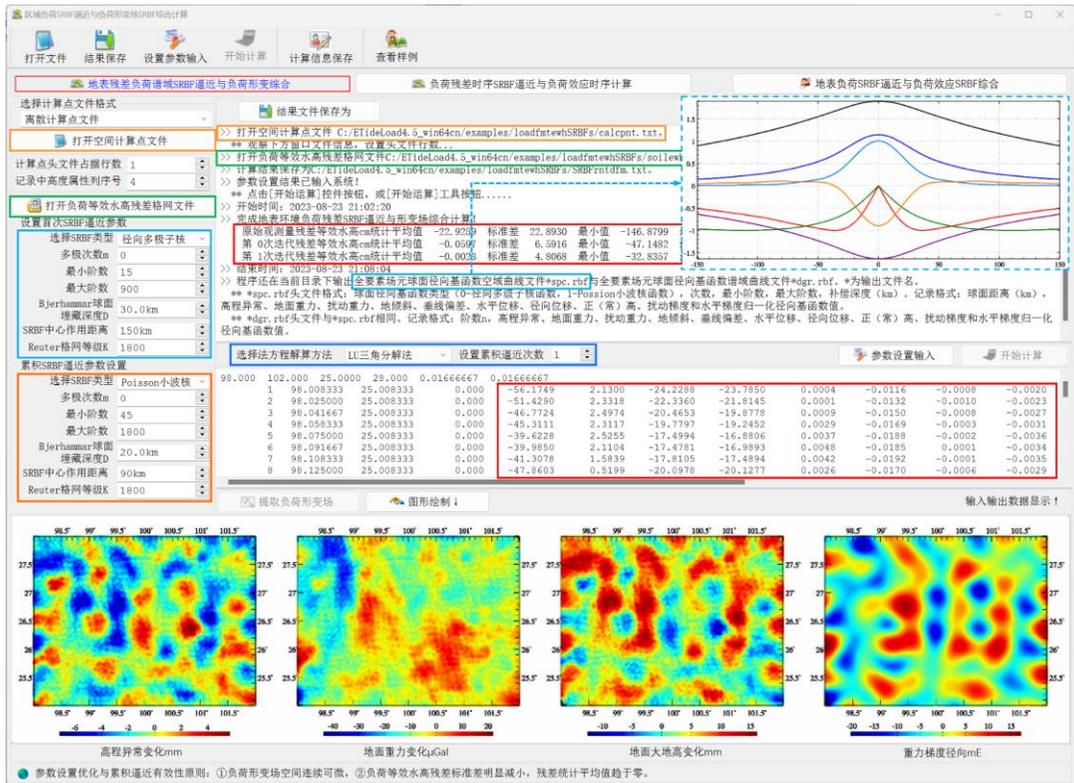
选择法方程解算方法。程序采用边缘效应抑制法，法方程无需正则化和迭代计算。

[输出]计算点全要素残差负荷形变效应文件。

当输入离散计算点文件时，程序输出离散计算点全要素残差负荷形变效应文件。输出头文件同输入计算点文件，文件记录在输入计算点文件记录的基础上，增加残差等效水高逼近值（用于质量评估）与全要素残差负荷效应共 15 列属性。

当输入计算面高度格网文件时，程序输出格网规格相同的全要素残差负荷形变效应格网文件*.*。*为输入文件名。

扩展名*.* = ewh, ksi, gra, rga, rga, dft, vdf, vdf, dph, dpr, nmh, grr 或 hgd, 分别表示残差等效水高逼近值、高程异常、地面重力、扰动重力、地倾斜向量、垂线偏差向量、水平位移向量、地面径向、地面正（常）高、扰动重力梯度或水平重力梯度向量格网文件。



程序还在当前目录下输出全要素场元球面径向基函数空域曲线文件*spc.rbf 与全要素场元球面径向基函数谱域曲线文件*dgr.rbf。*为输入文件名。

*spc.rbf 头文件格式：球面径向基函数类型 (0-径向多级子核函数, 1-Poisson 小波核函数), 次数, 最小阶数, 最大阶数, 补偿深度 (km)。记录格式：球面距离 (km), 高程异常、地面重力、扰动重力、地倾斜、垂线偏差、水平位移、径向位移、正 (常) 高、扰动梯度和水平梯度归一化径向基函数值。

*dgr.rbf 头文件与*spc.rbf 相同。记录格式：阶数 n, 高程异常、地面重力、扰动重力、地倾斜、垂线偏差、水平位移、径向位移、正 (常) 高、扰动梯度和水平梯度归一化径向基函数值。

4.6.2 负荷残差时序 SRBF 逼近与负荷效应时序计算

[功能]由移去全球负荷球谐系数模型值的区域陆地水、海平面变化、江河湖库水、冰川雪山等地表环境负荷等效水高残差格网时间序列, 按谱域球面径向基函数(SRBF)逼近与负荷效应综合算法, 计算负荷等效水高逼近值 (cm, 用于质量评估), 以及以及高程异常 (mm)、地面重力 (μGal)、扰动重力 (μGal)、地倾斜 (SW 南向/西向 mas)、垂线偏差 (SW 南向/西向 mas)、水平位移 (EN 东向/北向 mm)、地面径向 (大地高 mm)、地面正 (常) 高 (mm)、扰动重力梯度 (径向 mE) 与水平重力梯度 (NE 北向/西向 E) 残差负荷形变效应时间序列。

[输入]空间计算点文件和负荷等效水高变化残差格网时间序列文件。

计算点文件可以是离散计算点文件, 也可以是计算面高度格网文件。

负荷等效水高变化(cm)残差格网时间序列文件按指定的通配符提取。残差负荷形变效应的采样历元时刻为负荷等效水高变化 (cm) 残差格网对应的采样历元时刻。

程序要求负荷等效水高变化 (cm) 残差格网范围必须大于计算点分布范围, 以吸收边缘效应。

[参数设置]直接采用[地表环境负荷残差 SRBF 逼近与形变场综合计算]中的算法参数, 计算残差负荷形变效应时间序列。

SRBF 参数设置优化与累积逼近有效性原则：①负荷形变场空间连续可微, ②负荷等效水高的残差标准差明显减小, 残差统计平均值趋于零。

[输出]计算点残差负荷形变效应时间序列文件。

当输入离散计算点文件时, 程序输出离散计算点全要素残差负荷形变效应文件 rntSRBFs*.txt, 输出头文件同输入计算点文件, 文件记录在输入计算点文件记录的基础上, 增加残差负荷等效水高逼近值 (用于质量评估) 与全要素残差负荷效应共 15 列属性。

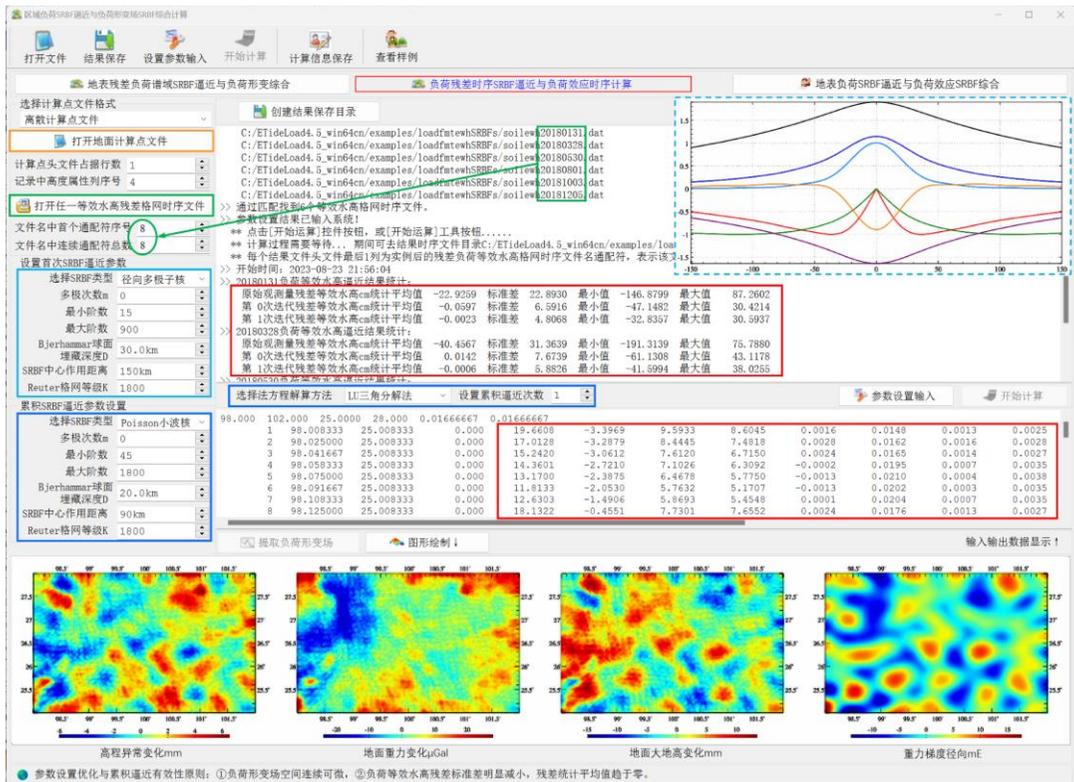
当输入计算面高度格网文件时, 程序输出格网规格相同的残差负荷逼近值与全要素负荷形变效应格网文件 rntSRBFs*.*???

扩展名??? = ewh, ksi, gra, rga, dft, vdf, dph, dpr, nmh, grr 或 hgd, 分别表示残差等效水高逼近值, 高程异常、地面重力、扰动重力、地倾斜向量、垂线偏差向量、水平位移向量、地面径向、地面正 (常) 高、扰动重力梯度或水平重力梯度向量负荷形变效应格网文件。

*为实例化后的残差负荷格网模型时序文件的通配符, 以标识残差负荷形变效应的采样

历元时刻。

计算过程需要等待...期间可去结果时序文件目录，查看计算进度!



水平重力梯度负荷效应以超短波分量为主，对SRBF逼近的稳定性有严格要求，通常需要单独仔细地调整参数，以获得可接受的逼近效应。

移去中长波地表环境负荷效应后，水平位移的区域残差负荷效应很小，可忽略不计。

4.7 格林积分约束法多种异质数据负荷形变场监测计算

[目标]融合 CORS 站、重力固体潮站或流动 GNSS、流动重力或流动水准监测网等各种地面大地测量监测数据，以负荷格林函数积分为动力学约束，实现陆地水及其全要素负荷形变场（时变重力场）的多种异构大地测量技术协同监测。

技术上要求，所有参与计算的监测量，应事先采用相同的地表负荷模型和相容的非潮汐效应（历元归算）算法，统一大地测量监测基准和参考历元。同时，移去负荷形变场的长波部分，以满足局部格林函数积分条件。

大地测量监测量可包括如下 5 种类型中的一种或多种：1（GNSS 水准网点）高程异常变化 mm，2（流动重力 GNSS 或固体潮 CORS 并置站点）扰动重力变化 μGal ，3（流动重力或固体潮站点）地面重力变化 μGal ，4（CORS 站点或流动 GNSS 点）大地高变化 mm，5（流动水准网点）正常高变化 mm。

4.7.1 多源异质监测量空域格林积分法负荷形变场估计

[功能]由 CORS 站或流动 GNSS、固体潮站或流动重力、流动水准监测网等观测的 GNSS

水准高程异常(mm)、扰动重力(μGal)、地面重力(μGal)、地面大地高(mm)或正(常)高(mm)等地面大地测量监测量,以负荷格林函数积分为动力学约束,估计区域陆地水及其负荷形变场格网,包括地表负荷等效水高(cm),高程异常(大地水准面 mm)、地面重力(μGal)、扰动重力(μGal)、地倾斜(mas)、垂线偏差(mas)、地面水平位移(mm)、大地高(mm)、正(常)高(mm)、扰动重力梯度(径向 mE)与水平重力梯度(NE 北向/西向 E)的负荷形变效应格网。

[输入]地面站点监测量记录时序文件和计算面高度格网文件。

站点监测量记录时序文件。头文件含时序长度,以及按时序长度依次排列的采样历元时刻。记录格式: 站点名称, 经度, 纬度, ..., 监测量权, 监测量类型, ..., 按时序长度依次排列的时序采样值(缺省值 9999.0000)。

监测量类型 = 1 高程异常变化 mm, 2 扰动重力变化 μGal , 3 地面重力变化 μGal , 4 大地高变化 mm, 5 正常高变化 mm。

计算面高度为计算点相对于地面的高度。若计算地面负荷形变场时,输入零值格网。计算面高度格网规格用于指定待估陆地水格网的经纬度范围和空间分辨率。

程序要求计算面高度格网范围必须大于站点分布范围,以吸收边缘效应。结果陆地水等效水高及负荷形变场格网的实际有效范围将小于各种站点的覆盖范围。

[参数设置]设置监测量记录时序文件参数,设置算法与控制参数。

参数设置优化与累积逼近有效性原则: ①负荷及其形变场空间连续可微, ②监测量的残差标准差明显减小,残差统计平均值趋于零。

监测量权值列序号。权值仅用于区分同类型监测量中不同站点监测量的质量。不同类型监测量的质量,由调控监测量贡献率调节。

当前监测量列序号。程序每次计算一个历元时刻的陆地水负荷及其形变场格网,需要指定各种大地测量监测量在记录中的列序号。

监测站点平均间距(km)。输入监测站点实际平均间距的近似值。不宜人为大幅减小,否则会严重影响参数估计速度和解的稳定性。监测站点平均间距大小与待估陆地水负荷空间分辨率无直接联系。

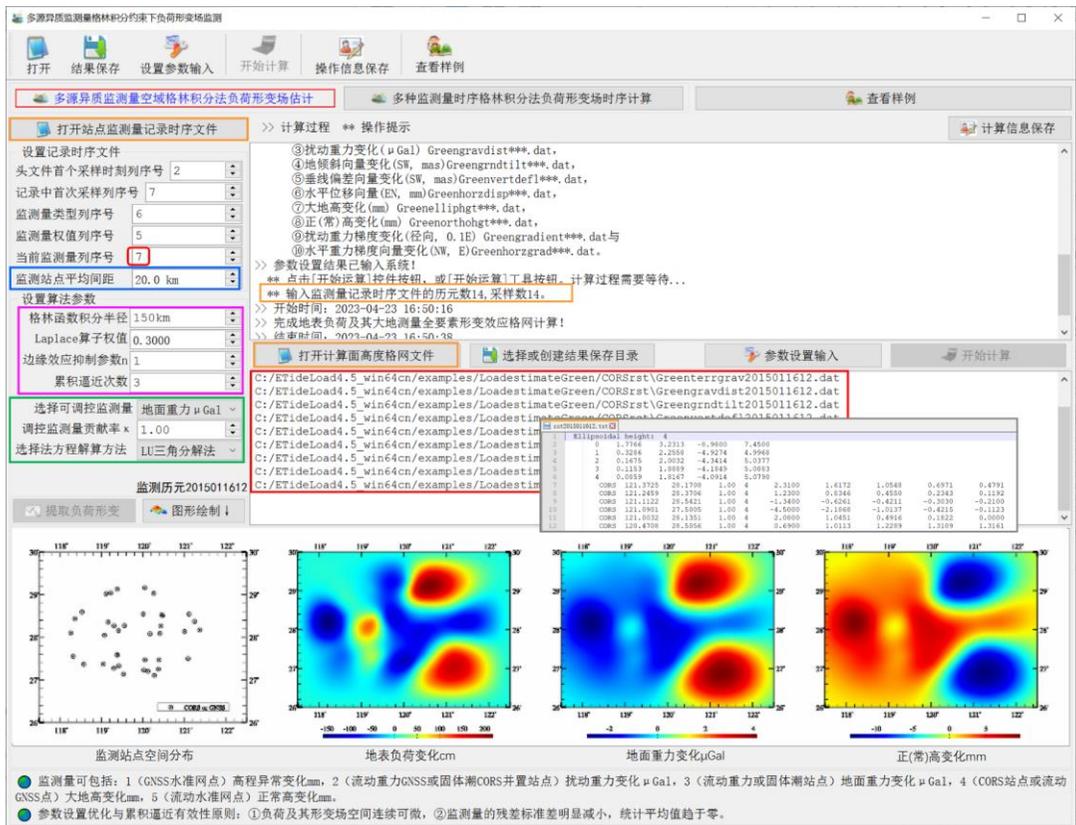
格林函数积分半径(km)。程序采用固定半径的格林函数积分作为动力学约束条件,以维持陆地水负荷及其形变场空间解析结构的一致性。

Laplace 算子权值 p 。用于抑制空间噪声,权值越大,空间滤波强度越大。 $p=0$ 不平滑; $p > 1$ 平滑增强; $p < 1$ 平滑减弱。

边缘效应抑制参数 n 。程序令格网边缘宽度为 n 个单元格网的未知数等于零,将其作为观测方程,以抑制边缘和远区效应。

累积逼近次数。每次逼近等价于以上次负荷形变场为参考场,按移去恢复法精化残差负荷及其形变场。一般累积1~3次可达到稳定解。

选择可调控监测量,调控监测量贡献率 κ 。程序将可调控监测量的法方程系数矩阵与常数项分别乘以贡献率 κ ,以提高($\kappa > 1$)或降低($\kappa < 1$)可调控监测量的贡献率。



选择法方程解算方法。程序采用法方程系数阵对角线非零元素均方根法，组合多源异质观测方程，再引入边缘效应抑制法后，法方程已不再需要正则化和迭代计算，且能有效避免负荷形变场（时变重力场）的解析结构受监测量误差影响，提高算法的普适性和可靠性。

ETideLoad4.5 的这些策略，能有效保证联合 CORS 站网、固体潮站网监测量时间序列，实现负荷形变场（时变重力场）时间序列的规模化批量监测计算。

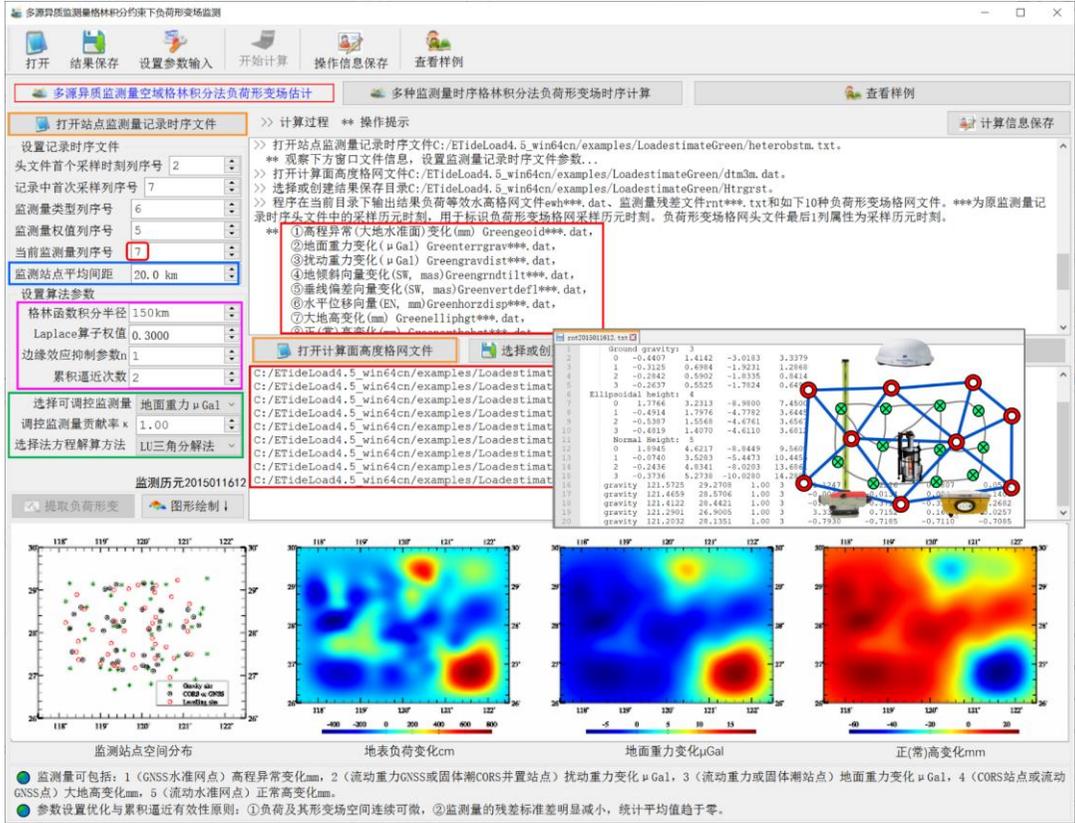
[输出]陆地水负荷等效水高及其全要素负荷形变场格网文件，累积逼近过程中的监测量残差文件。

程序在当前目录下输出结果负荷等效水高格网文件 `ewh***.dat`、监测量残差记录文件 `rnt***.txt` 和如下 10 种负荷形变场格网文件。① 高程异常(大地水准面)变化(mm)`Greengoid***.dat`，② 地面重力变化(μGal)`Greenterrgrav***.dat`，③ 扰动重力变化(μGal)`Greengravdist***.dat`，④ 地倾斜变化(mas)向量 `Greengrndtilt***.dat`，⑤ 垂线偏差变化(mas)向量 `Greenvertdefl***.dat`，⑥ 水平位移(mm)向量 `Greenhorzdisp***.dat`，⑦ 大地高变化(mm)`Greenelliphgt***.dat`，⑧ 正(常)高变化(mm)`Greenorthohgt***.dat`，⑨ 扰动重力梯度变化(径向, mE)`Greengradient***.dat` 与⑩ 水平重力梯度变化(E)向量 `Greenhorzgrad***.dat`。

***为原监测量记录时序头文件中的采样历元时刻，用于标识负荷形变场格网采样历元时刻。负荷形变场格网头文件最后 1 列属性为采样历元时刻。

计算完成后，打开残差监测量文件，观察残差监测量的标准差、平均值及其随累积次数

变化情况，以优化参数设置和累积次数。之后，重新计算等效水高及其负荷效应。



典型技术特色：①对不同数量类型的站点无要求；②能选择监测量并调节其贡献；③算法性能与监测量误差无关。

4.7.2 多种监测量时序格网积分法负荷形变场时序计算

[功能]由各种大地测量监测量时间序列，以负荷格林函数积分为动力学约束，计算地表负荷等效水高(cm)，高程异常(大地水准面 mm)、地面重力(μGal)、扰动重力(μGal)、地倾斜(mas)、垂线偏差(mas)、地面水平位移(mm)、大地高(mm)、正(常)高(mm)、扰动重力梯度(mE)与水平重力梯度(E)负荷形变效应格网时间序列。

[输入]地面站点监测量记录时序文件和计算面高度格网文件。

站点监测量记录时序文件。头文件含时序长度，以及按时序长度依次排列的采样历元时刻。记录格式：站点名称，经度，纬度，…，监测量权，监测量类型，…，按时序长度依次排列的时序采样值（缺省值 9999.0000）。

监测量类型 = 1 高程异常变化 mm，2 扰动重力变化 μGal ，3 地面重力变化 μGal ，4 大地高变化 mm，5 正常高变化 mm。

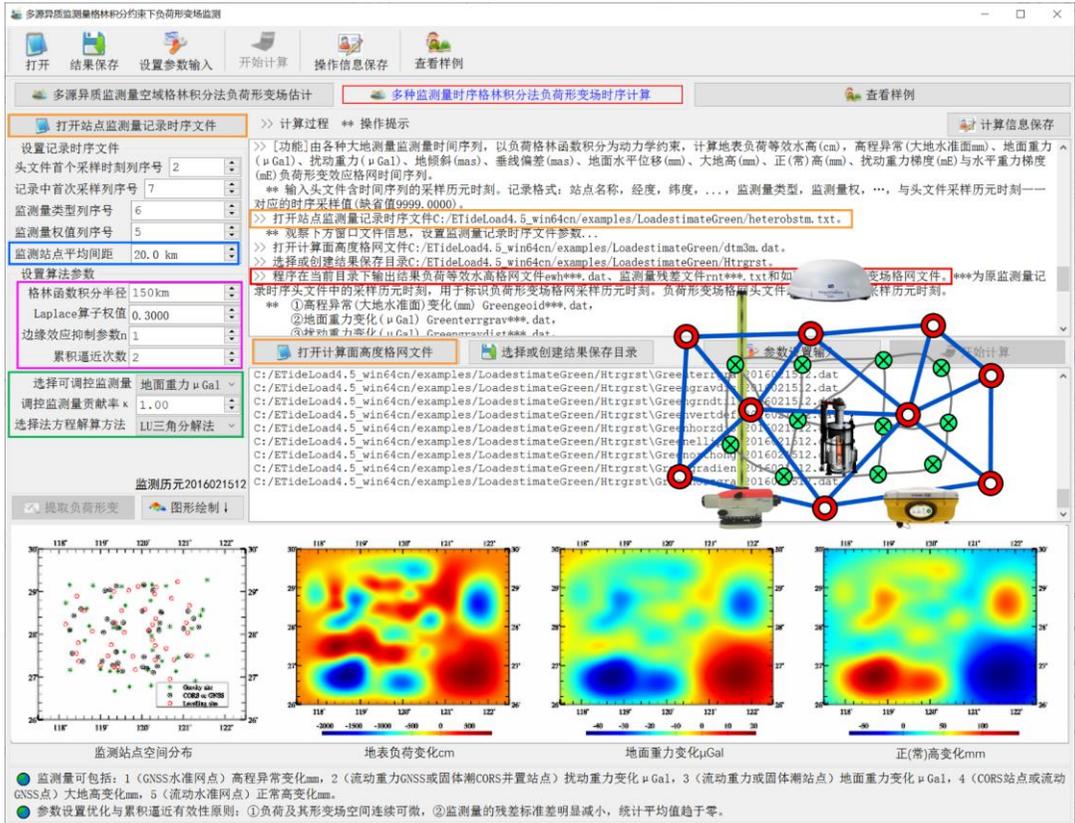
计算面高度为计算点相对于地面的高度。若计算地面负荷形变场时，输入零值格网。计算面高度格网规格用于指定待估陆地水格网的经纬度范围和空间分辨率。

程序要求计算面高度格网范围必须大于站点分布范围，以吸收边缘效应。结果陆地水等

效水高及负荷形变场格网的实际有效范围将小于各种站点的覆盖范围。

[参数设置]直接采用[多源异质监测量空域格林积分法负荷形变场估计]中的算法参数，进行批量陆地水负荷及其形变场格网时间序列逼近计算。

监测期间，当监测点空间分布（监测网形）、监测量类型基本不变时，算法参数也会保持不变，这是 ETideLoad4.5 多源异质监测量负荷形变场格林积分约束逼近算法的典型特点。这种算法设计特别有利于多种异构多期或连续大地测量监测网自动化处理。



[输出]陆地水负荷等效水高及其全要素负荷形变场格网时间序列文件，累积逼近过程中的监测量残差时间序列文件。

程序在当前目录下输出结果负荷等效水高格网 ewh***.dat、监测量残差记录 rnt***.txt 和如下 10 种负荷形变场格网时间序列文件。① 高程异常(大地水准面)变化(mm)Greengeoid***.dat, ② 地面重力变化(μGal)Greenterrgrav***.dat, ③ 扰动重力变化(μGal)Greengravidist***.dat, ④ 地倾斜变化(mas)向量 Greengrndtilt***.dat, ⑤ 垂线偏差变化(mas)向量 Greenvertdefl***.dat, ⑥ 水平位移(mm)向量 Greenhorzdisp***.dat, ⑦ 大地高变化(mm)Greenelliphgt***.dat, ⑧ 正(常)高变化(mm)Greenorthohgt***.dat, ⑨ 扰动重力梯度变化(径向, mE)Greengradient***.dat 与⑩水平重力梯度变化(E)向量 Greenhorzgrad***.dat。

***为原监测量记录时序头文件中的采样历元时刻，用于标识负荷形变场格网采样历元时刻。负荷形变场格网头文件最后 1 列属性为采样历元时刻。

批量计算完成后，打开每个历元时刻的残差监测文件，观察残差监测量的标准差、平均值及其随累积次数变化情况，确认所有历元时刻累积逼近的有效性。期间，应特别注意监测点分布或监测量类型有较大改变的监测历元。

4.8 SRBF 逼近法陆地水及负荷形变场多种异质协同监测

[目标]融合 CORS 站、重力固体潮站或流动 GNSS、流动重力、流动水准监测网或水文监测站等各种地面监测数据，采用谱域球面径向基函数(SRBF)负荷形变场逼近算法，实现陆地水及其全要素负荷形变场（时变重力场）的多种异构大地测量技术协同监测。

技术上要求，所有参与计算的监测量，应事先采用相同的地表负荷模型和相容的非潮汐效应（历元归算）算法，统一大地测量监测基准和参考历元。同时，移去负荷形变场的长波部分，以满足负荷形变场局部 SRBF 逼近条件。

地面监测量可包括如下 6 种类型中的一种或多种：1（GNSS 水准网点）高程异常变化 mm，2（流动重力 GNSS 或固体潮 CORS 并置站点）扰动重力变化 μGal ，3（流动重力或固体潮站点）地面重力变化 μGal ，4（CORS 站点或流动 GNSS 点）大地高变化 mm，5（流动水准网点）正常高变化 mm，6（水文监测站）等效水高变化 cm。

对于地下水监测站，可事先利用时间长度不少于 2 年、采样数不少于 20 的其它类型大地测量监测量时间序列，估计区域地下水等效水高变化格网时间序列，进而标定地下水监测站的水文地质参数，将其水位监测量转换为地下水量变化监测量。

4.8.1 多种监测量陆地水及负荷形变场球面径向基函数逼近

[功能]由 CORS 站或流动 GNSS、固体潮站或流动重力、流动水准监测网、水文监测站等观测的 GNSS 水准高程异常(mm)、扰动重力(μGal)、地面重力(μGal)、地面大地高(mm)、正(常)高(mm)、等效水高(cm)等地面监测量，按照谱域球面径向基函数负荷形变场逼近算法，估计区域陆地水及其负荷形变场格网，包括地表负荷等效水高(cm)，高程异常(大地水准面 mm)、地面重力(μGal)、扰动重力(μGal)、地倾斜(mas)、垂线偏差(mas)、地面水平位移(mm)、大地高(mm)、正(常)高(mm)、扰动重力梯度(mE)与水平重力梯度(E)负荷形变效应格网。

[输入]地面站点监测量记录时序文件和计算面高度格网文件。

站点监测量记录时序文件。头文件含时序长度，以及按时序长度依次排列的采样历元时刻。记录格式：站点名称，经度，纬度，…，监测量权，监测量类型，…，按时序长度依次排列的时序采样值（缺省值 9999.0000）。

监测量类型 = 1 高程异常变化 mm，2 扰动重力变化 μGal ，3 地面重力变化 μGal ，4 大地高变化 mm，5 正常高变化 mm，6 等效水高变化 cm。

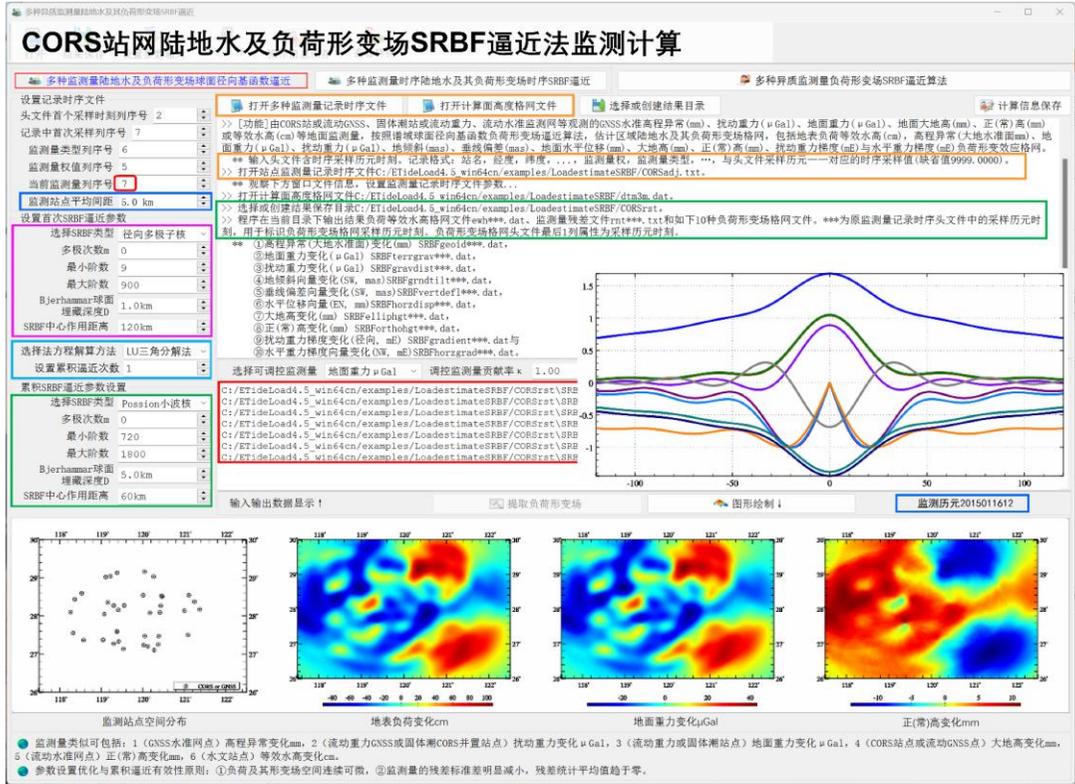
计算面高度为计算点相对于地面的高度。若计算地面负荷形变场时，输入零值格网。计算面高度格网规格用于指定待估陆地水格网的经纬度范围和空间分辨率。

程序要求计算面高度格网范围必须大于站点分布范围，以吸收边缘效应。结果陆地水等效水高及负荷形变场格网的实际有效范围将小于各种站点的覆盖范围。

[参数设置]设置测量记录时序文件参数，设置算法与控制参数。

参数设置优化与累积逼近有效性原则：①负荷及其形变场空间连续可微，②监测量的残差标准差明显减小，残差统计平均值趋于零。

监测量权值列序号。权值仅用于区分同类型监测量中不同站点监测量的质量。不同类型监测量的质量，由调控监测量贡献率调节。



当前监测量列序号。程序每次计算一个历元时刻的陆地水负荷及其形变场格网，需要指定各种大地测量监测量在记录中的列序号。

监测站点平均间距 (km)。输入监测站点实际平均间距的近似值。不宜人为大幅减小，否则会严重影响参数估计速度和解的稳定性。监测站点平均间距大小影响 SRBF 中心点数，但与待估陆地水负荷空间分辨率无直接联系。

选择球面径向基函数形式。径向多级子核函数，Poisson 小波核函数。零次径向多级子核函数即为点质量核函数，零次 Poisson 小波核函数即为 Poisson 核函数。

勒让德函数最小最大阶数。最小阶数对结果监测量残差统计平均值有影响；最大阶数影响负荷形变场的连续可微性，且对残差统计标准差有较大影响。

Bjerhammar 球面埋藏深度 (km)：Bjerhammar 球面相对所有监测站点平均高度面的深度 (km)。

SRBF 中心作用距离。作用距离也称影响半径 = 球面角距×地球平均半径。SRBF 中心作用距离等效于负荷格林函数积分半径。程序采用固定不变的作用距离，以保证负荷形变场谱

域空域结构的协调一致性。

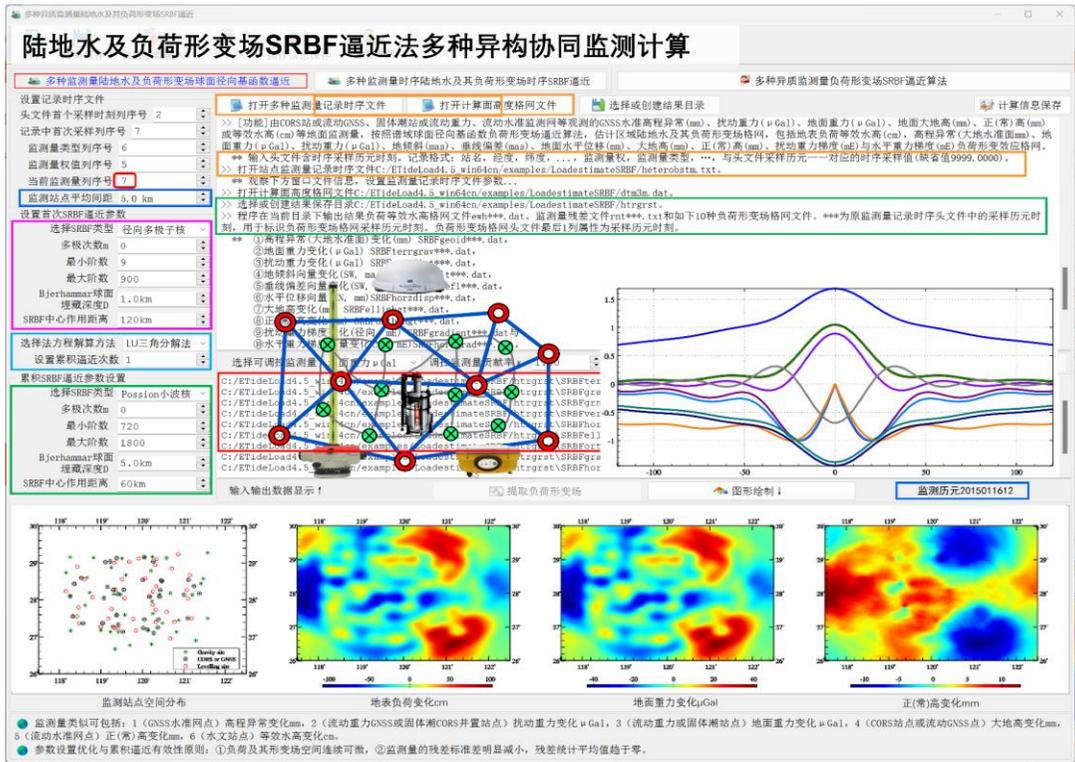
累积逼近次数。每次逼近等价于以上次负荷形变场为参考场，按移去恢复法精化残差负荷及其形变场。一般累积1~2次可达到稳定解。

可先让累积逼近次数等于零，优化调整首次逼近的合适参数，再固定首次逼近参数，优化调整累积逼近参数。

选择可调控监测量，调控监测量贡献率 κ 。程序将可调控监测量的法方程系数矩阵与常数项分别乘以贡献率 κ ，以提高($\kappa > 1$)或降低($\kappa < 1$)可调控监测量的贡献率。

选择法方程解算方法。程序采用法方程系数阵对角线非零元素均方根法，组合多源异质观测方程，并引入边缘效应抑制法后，法方程已不再需要正则化和迭代计算，能有效避免负荷形变场(时变重力场)的解析结构受监测量误差影响，提高算法的普适性和可靠性。

ETideLoad4.5的这些策略，能有效保证联合CORS站网、固体潮站网、地下水监测站等多种异质监测量时间序列，实现陆地水及负荷形变场(时变重力场)时间序列的规模化批量监测计算。



[输出]陆地水负荷等效水高及其全要素负荷形变场格网文件，累积逼近过程中的监测量残差文件。

程序在当前目录下输出结果负荷等效水高格网文件 ewh***.dat、监测量残差记录文件 rnt***.txt 和如下10种负荷形变场格网文件。

① 高程异常(大地水准面)变化(mm) SRBFgeoid***.dat, ② 地面重力变化(μGal) SRBFterrgrav***.dat, ③ 扰动重力变化(μGal) SRBFgravdist***.dat, ④ 地倾斜变化(mas)向量

SRBFgrndtilt***.dat, ⑤垂线偏差变化(mas)向量 SRBFvertdefl***.dat, ⑥水平位移 (mm)向量 SRBFhorzdisp***.dat, ⑦大地高变化(mm) SRBFelliphgt***.dat, ⑧正(常)高变化(mm) SRBForthohgt***.dat, ⑨扰动重力梯度变化(径向, mE) SRBFgradient***.dat 与⑩水平重力梯度变化(E)向量 SRBFhorzgrad***.dat。

***为原监测量记录时序头文件中的采样历元时刻, 用于标识负荷形变场格网采样历元时刻。负荷形变场格网头文件最后 1 列属性为采样历元时刻。

程序还在当前目录下输出 11 种监测量球面径向基函数空域曲线文件 SRBFspc.rbf 与谱域曲线文件 SRBFdgr.rbf。

SRBFspc.rbf 头文件格式: 球面径向基函数类型 (0-径向多级子核函数, 1-Poisson 小波核函数), 次数, 最小阶数, 最大阶数, 补偿深度 (km)。记录格式: 球面距离 (km), 负荷等效水高、高程异常、地面重力、扰动重力、地倾斜、垂线偏差、水平位移、大地高、正常高、扰动梯度与水平梯度变化量的归一化径向基函数值。

SRBFdgr.rbf 的头文件与 SRBFspc.rbf 相同。记录格式: 阶数 n, 负荷等效水高、高程异常、地面重力、扰动重力、地倾斜、垂线偏差、水平位移、大地高、正常高、扰动梯度与水平梯度变化量 n 阶归一化径向基函数值。

首次计算完成后, 打开残差监测量文件, 观察残差监测量的标准差、平均值及其随累积次数变化情况, 确认累积逼近的有效性和合适的累积次数。之后, 采用合适的累积逼近次数, 其他参数不变, 重新计算等效水高及其负荷效应。

4.8.2 多种监测量时序陆地水及其负荷形变场时序 SRBF 逼近

[功能]由各种地面监测量时间序列, 按照谱域球面径向基函数负荷形变场逼近算法, 计算地表负荷等效水高(cm), 高程异常(大地水准面 mm)、地面重力(μGal)、扰动重力(μGal)、地倾斜(mas)、垂线偏差(mas)、地面水平位移(mm)、大地高(mm)、正(常)高(mm)、扰动重力梯度(mE)与水平重力梯度(E)负荷形变效应格网时间序列。

技术上要求各种监测量时序的监测基准或参考历元统一, 如通过让参考历元时刻各种监测量恒等于零, 统一参考历元。

[输入]地面站点监测量记录时序文件和计算面高度格网文件。

站点监测量记录时序文件。头文件含时序长度, 以及按时序长度依次排列的采样历元时刻。记录格式: 站点名称, 经度, 纬度, ..., 监测量权, 监测量类型, ..., 按时序长度依次排列的时序采样值 (缺省值 9999.0000)。

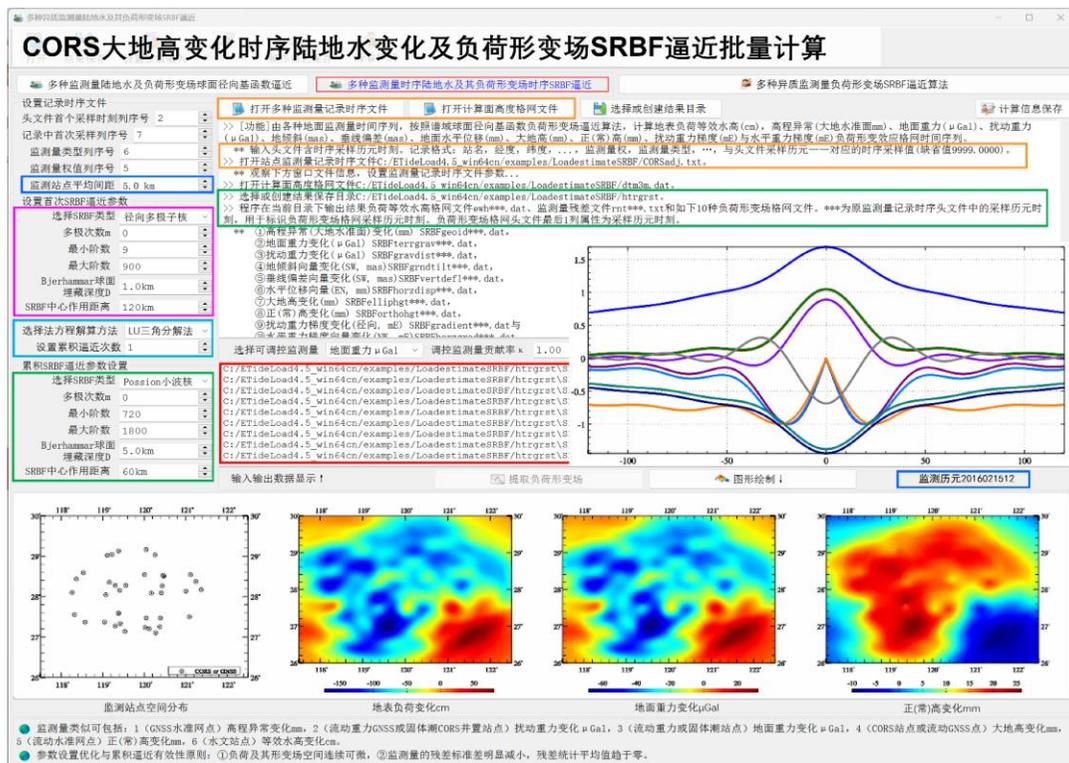
监测量类型 = 1 高程异常变化 mm, 2 扰动重力变化 μGal , 3 地面重力变化 μGal , 4 大地高变化 mm, 5 正常高变化 mm, 6 等效水高变化 cm。

计算面高度为计算点相对于地面的高度。若计算地面负荷形变场时, 输入零值格网。计算面高度格网规格用于指定待估陆地水格网的经纬度范围和空间分辨率。

程序要求计算面高度格网范围必须大于站点分布范围, 以吸收边缘效应。结果陆地水等效水高及负荷形变场格网的实际有效范围将小于各种站点的覆盖范围。

[参数设置]直接采用[多种监测量负荷及其形变场球面径向基函数逼近]中的算法参数，进行批量陆地水负荷及其形变场格网时间序列逼近计算。

监测期间，当监测点空间分布（监测网形）、监测量类型基本不变时，算法参数也会保持不变，这是 ETideLoad4.5 多源异质监测量负荷形变场 SRBF 逼近算法的典型特点。这种算法设计特别有利于多种异构多期或连续监测网自动化处理。



[输出]陆地水负荷等效水高及其全要素负荷形变场格网时间序列文件，累积逼近过程中的监测量残差时间序列文件。

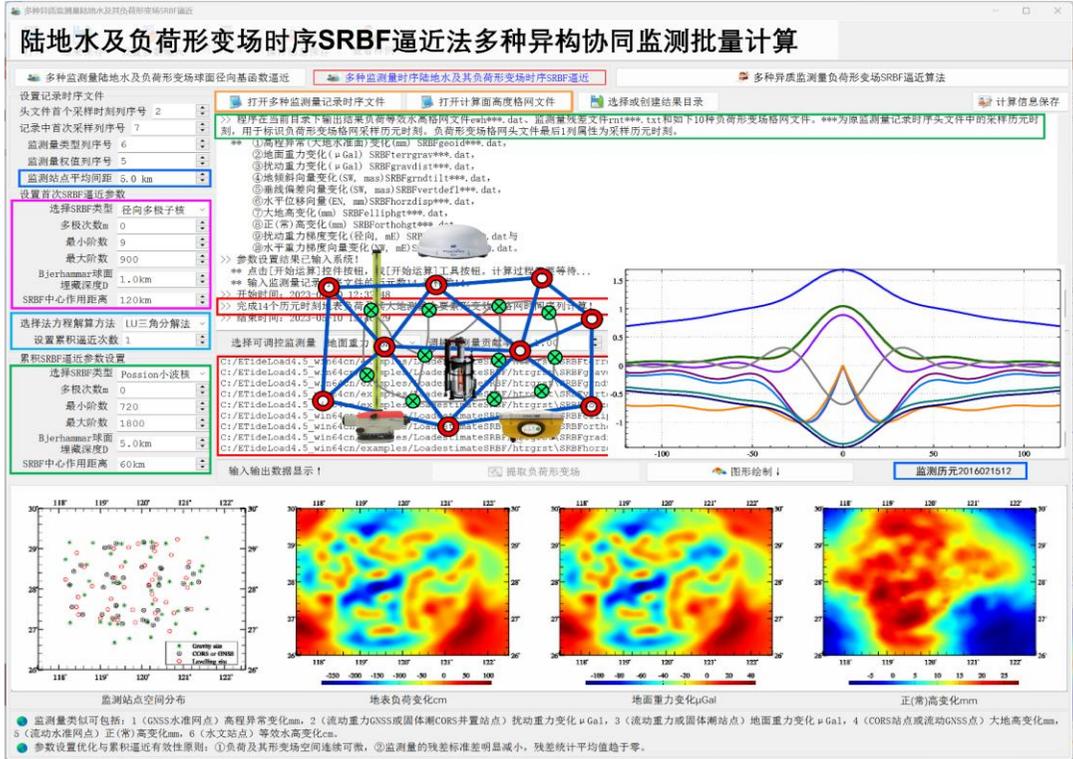
程序在当前目录下输出结果负荷等效水高格网 ewh***.dat、监测量残差记录 rnt***.txt 和如下 10 种负荷形变场格网时间序列文件。

① 高程异常(大地水准面)变化(mm) SRBFgeoid***.dat，② 地面重力变化(μGal) SRBFterrgrav***.dat，③ 扰动重力变化(μGal) SRBFgravdist***.dat，④ 地倾斜变化(mas)向量 SRBFgrndtilt***.dat，⑤ 垂线偏差变化(mas)向量 SRBFvertdefl***.dat，⑥ 水平位移 (mm)向量 SRBFhorzdisp***.dat，⑦ 大地高变化(mm) SRBFelliphgt***.dat，⑧ 正(常)高变化(mm) SRBForthohgt***.dat，⑨ 扰动重力梯度变化(径向, mE) SRBFgradient***.dat 与⑩ 水平重力梯度变化(E)向量 SRBFhorzgrad***.dat。

***为原监测量记录时序头文件中的采样历元时刻，用于标识负荷形变场格网采样历元时刻。负荷形变场格网头文件最后 1 列属性为采样历元时刻。

批量计算完成后，打开每个历元时刻的残差监测量文件，观察残差监测量的标准差、平均值及其随累积次数变化情况，确认所有历元时刻累积逼近的有效性。期间，应特别注意监

测点分布或监测量类型有较大改变的监测历元。



4.9 地面形变场（向量）格网时序动力学运算

[目标]对地面形变场（时变重力场）格网时序进行分析运算，包括格网时序的时间差分运算、水平梯度计算，两组向量格网时序内积运算等，以显示区域形变场（时变重力场）的时空动力学特征。

4.9.1（向量）格网时序差分运算

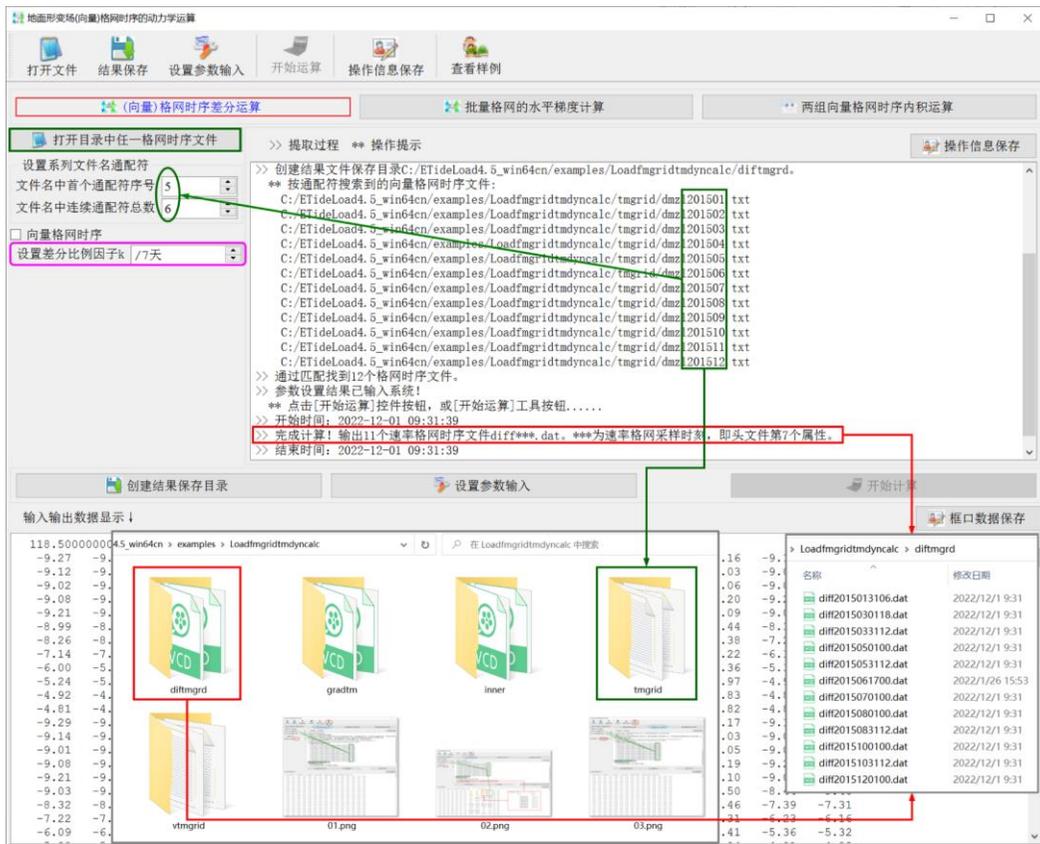
[功能]对输入的（向量）格网时序文件按采样历元时刻（头文件第7个属性）进行排序，计算（向量）格网时序后一个采样历元时刻格值相对于前一个采样历元时刻格值的变化率（/k天），k为给定的差分比例因子），生成（向量）格网速率时间序列，采样历元时刻取（向量）格网时序前后采样历元时刻的平均值。

[输入]监测量（向量）格网时序文件。

监测量（向量）格网时序文件按给定的通配符提取。若输入向量格网时序，程序要求向量格网为EN、NE或SW水平直角坐标形式。

[参数设置]设置用于提取多个监测量（向量）格网文件名的通配符参数，输入差分比例因子k（/k天）。

[输出]监测量（向量）格网速率时间序列。



4.9.2 批量格网的水平梯度计算

[功能]由存放于某一目录中格网规格相同的系列格网文件，批量计算监测量水平梯度向量格网 (/km)，水平梯度向量可选择用极坐标或 EN 水平坐标形式输出。系列格网文件按给定的通配符提取。

[输入]格网规格相同的系列监测量格网文件。

[参数设置]设置用于提取多个监测量格网文件名的通配符参数，选择输出的梯度向量格网形式。

[输出]与输入监测量格网规格相同的系列监测量水平梯度向量格网文件。

4.9.3 两组向量格网时序内积运算

[功能]输入格网规格相同的 EN 水平直角坐标形式的两组向量格网时序文件，计算向量内积的格网时间序列。

[输入]两组格网规格相同、采样历元一一对应的向量格网时间序列文件。

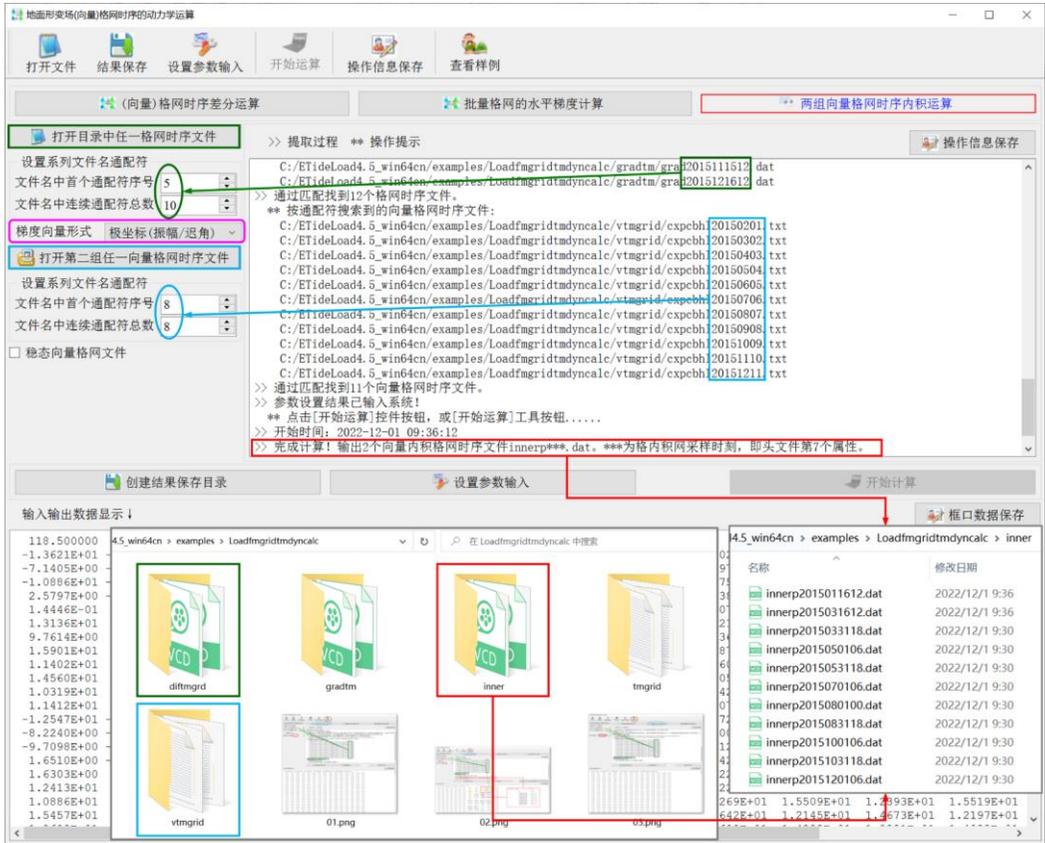
两组向量格网容许其中一组只有一个向量格网文件。当两组都为向量格网时序时，程序要求两组时序的采样历元时刻一一对应。

[参数设置]设置用于提取向量格网文件名的通配符参数，选择向量格网形式。

[输出]两组向量内积格网时间序列文件。

程序自动搜索两组向量格网时序中格网规格和采样历元完全对应的向量格网对，且只计

算采样历元时刻配对的两个向量格网的内积。



4.10 地表动力环境及其负荷形变场监测计算练习

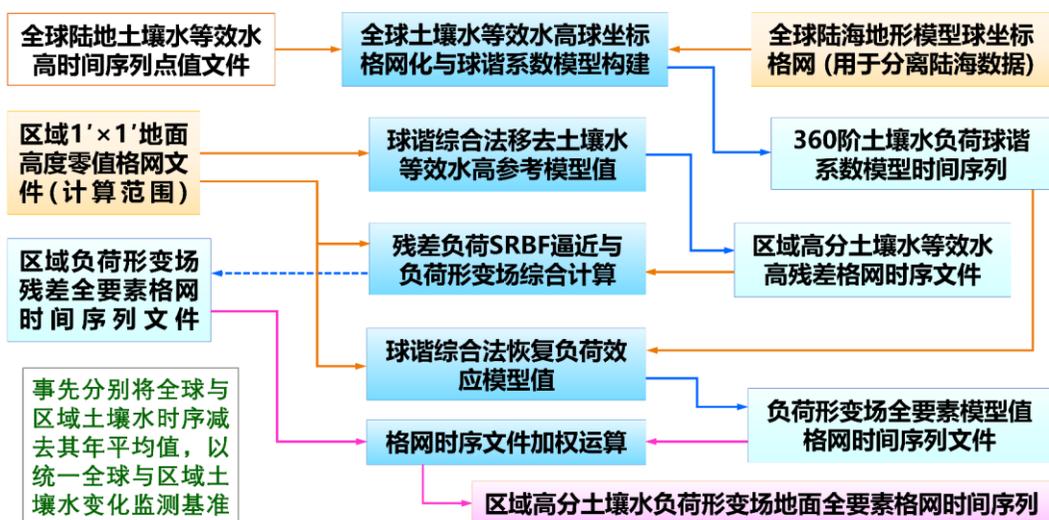
4.10.1 高分地表环境负荷形变场时序完整计算流程

以区域陆地土壤水变化为例，采用负荷球谐系数模型与区域负荷 SRFB 逼近组合的移去恢复方案，四步实现近地空间、任意区域、高精度、高分辨率负荷形变场全要素格网时间序列计算。

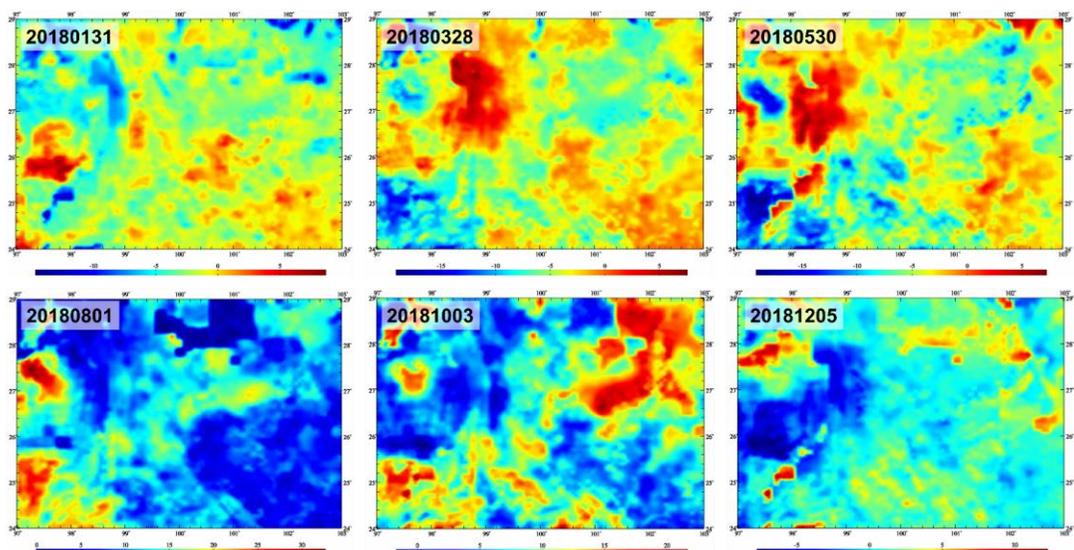
这里的土壤水，包括 4m 以浅土壤水与湿地、植被、冰川雪山水含量，不包括河流水和地下水。

监测基准统一：事先分别将全球陆地土壤水等效水高时间序列、区域高分土壤水等效水高时间序列减去各自的年平均值（或某个参考历元时刻的土壤水等效水高），以统一全球和区域陆地土壤水变化监测基准。

高分地表环境负荷形变场全要素时序的完整计算流程由全球地表环境负荷球谐分析、负荷形变场球谐综合、区域残差地表环境负荷谱域 SRBF 分析与残差负荷形变场 SRBF 综合共四步构成。



高分辨率土壤水负荷形变场地面全要素格网时间序列完整计算流程



区域1'x1'土壤水等效水高(cm)格网时间序列

第一步：构造全球陆地土壤水等效水高球坐标格网时序，构建全球陆地土壤水变化负荷球谐系数模型时序。

调用[系列全球地表数据球坐标格网化]功能，由全球陆地土壤水等效水高时间序列点值文件，构造球坐标系全球陆地土壤水等效水高格网时间序列文件 gsoilewh*.dat。*为采样历元，如*=20180131 表示 2018 年 1 月 31 日。本例省略此过程。

调用[全球大陆水等效水高球谐分析]功能，输入分辨率不低于土壤水等效水高格网的全球陆海地形球坐标格网 sphETOPOnC30m.dat（用于陆海分离，海域土壤水等效水高自动置零），由全球陆地土壤水等效水高格网时间序列文件 gsoilewh*.dat，构造全球土壤水负荷球谐系数模型时间序列文件 lndwater*cs.dat。

第一步：构造全球陆地土壤水等效水高球坐标格网时序，构建全球陆地土壤水变化负荷球谐系数模型时序

系列全球地表数据球坐标格网化 | 全球地面/海面大气压球谐分析 | **全球大陆水等效水高球谐分析** | 全球海面变化球谐分析

打开任一大陆水球坐标格网文件 >> 计算过程 ** 操作提示

设置模型时序文件名通配符
 文件中首个通配符序号 10
 文件名中连续通配符总数 8

设置迭代控制条件
 残差标准差阈值a 1.0‰
 迭代增量终止条件b 3.0‰

打开陆海地形球坐标格网文件

面谐函数定义在半径等于地球长半轴a的球面上

计算过程 ** 操作提示

```

  >> 打开任一大陆水球坐标格网文件 C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Loadfmdcalcdemo/gloilewh20180131cm.dat.
  ** 下方窗口只显示了其中不超过3000行数据!
  >> 打开陆海地形球坐标格网文件 C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Loadfmdcalcdemo/sphETOP030m.dat.
  ** 创建结果文件保存目录C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Loadfmdcalcdemo/sphcsmodel.
  ** 按通配符搜索到的球坐标格网时序文件:
  C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Loadfmdcalcdemo/gloilewh20180131cm.dat
  C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Loadfmdcalcdemo/gloilewh20180328cm.dat
  C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Loadfmdcalcdemo/gloilewh20180801cm.dat
  C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Loadfmdcalcdemo/gloilewh20180801cm.dat
  C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Loadfmdcalcdemo/gloilewh20181003cm.dat
  C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Loadfmdcalcdemo/gloilewh20181205cm.dat
  C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Loadfmdcalcdemo/gloilewh20181205cm.dat
  >> 参数设置结果已输入系统!
  ** 点击[开始运算]控件按钮, 或[开始运算]工具按钮.....
  >> 开始时间: 2023-05-04 13:04:53
  >> 完成6个全球大陆水格网球谐分析计算!
  >> 程序在保存目录中输出大陆水负荷球谐系数模型文件Indwater***cs.dat 迭代过程统计信息文件pro***.ini和残差格网文件rnt***.dat. ***为指定通配符实例。
  
```

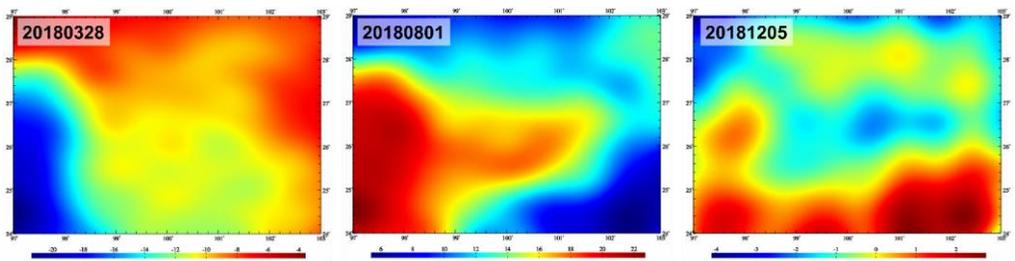
设置结果保存目录 参数设置结果输入 开始运算

迭代次数	残差平均值	标准差	最小值	最大值	
1	0	0.6721	3.2792	-46.8962	101.1671
2	1	0.0000	0.9831	-36.4558	78.2553
3	2	0.0000	0.6294	-29.5272	71.0895
4	3	0.0000	0.5630	-29.4347	68.2698
5	4	0.0000	0.5380	-30.4293	67.2374
6	5	0.0000	0.5247	-30.8438	66.8759
7	6	0.0000	0.5165	-31.0211	66.7593
8	7	0.0000	0.5109	-31.0974	66.7274
9	8	0.0000	0.5070	-31.1297	66.7218
10	9	0.0000	0.5039	-31.1430	66.7228
11	10	0.0000	0.5016	-31.1482	66.7244
12	11	0.0000	0.4997	-31.1503	66.7251
13	12	0.0000	0.4981	-31.1511	66.7250
14	13	0.0000	0.4968	-31.1516	66.7245
15	14	0.0000	0.4956	-31.1520	66.7237
16	15	0.0000	0.4946	-31.1522	66.7232
17	16	0.0000	0.4938	-31.1523	66.7229

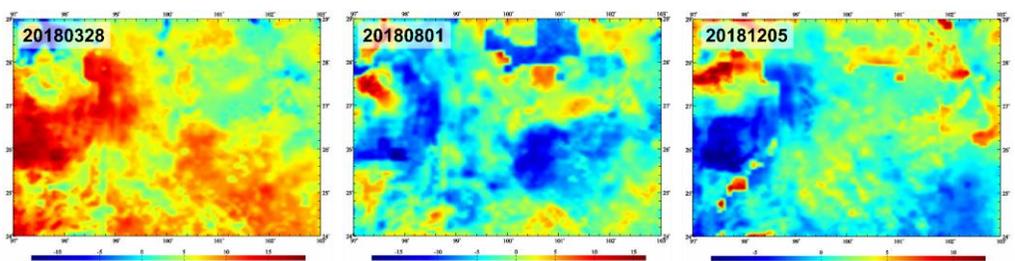
球谐系数阶数n等于格网在纬度方向格网数。如0.25°分辨率格网模型对应n=720。

第二步：计算并移去全球土壤水等效水高参考模型值格网时序，构造区域高分土壤水等效水高残差格网时序。

调用[负荷等效水高模型值时间序列计算]功能，输入计算范围 1'零值格网文件 zero1m.dat (表示计算面为地面)，地表负荷选择"陆地水等效水高 cm"，最大计算阶数 360，由全球土壤水负荷球谐系数模型时间序列 Indwater*cs.dat, 计算区域土壤水等效水高模型值格网时间序列 Idewh*.dat。



区域1'×1'土壤水等效水高(cm)参考模型值格网时间序列



区域1'×1'土壤水等效水高(cm)残差格网时间序列

调用[两组同规格格网时序文件加权运算] (或[格网值加权运算]) 功能, 将计算区域 1' 土壤水等效水高格网时序 soilewh*.dat 减去土壤水等效水高模型值格网 ldewh*.dat, 生成区域高分土壤水等效水高残差格网时序 wghcalc*.dat。

第二步：计算并移去全球土壤水等效水高参考模型值格网时序，构造区域高分土壤水等效水高残差格网时序

第二步：计算并移去全球土壤水等效水高参考模型值格网时序，构造区域高分土壤水等效水高残差格网时序

选择计算点文件格式
计算格网文件
打开地面/海面高度格网文件
打开任一负荷球谐模型时序文件
设置系列文件通配符
文件名单首个通配符序号 9
文件中连续通配符总数 8
地表负荷 陆地水等效水高cm
设置模型最大计算阶数 360

面谱函数定义在半径等于地球半长轴 a 的球面上

输入输出数据显示 ↓

球谐系数的尺度参数	360阶项(cm) 相对误差(%)
0	3.986004418 6378137.00 5.5725 14.965
1	9.245798483177256E-09 0.0000000000
2	1.0268261171846593E-09 -4.7574699109
2	-2.7890225156693954E-10 -9.9007464883
3	5.3846E-08 0.0000000000
3	5.655984850 5.4106603357
3	-1.2507021848221179E-09 4.4584743416
4	-8.9924002754411464E-10 0.0000000000
4	1.45991119267751478E-09 5.5019729538
4	7.6291238594266317E-10 6.8922342550
4	3.7885942352571047E-10 2.8188192014
4	-5.7623582418334400E-09 2.7890305434

程序常用于负荷球谐系数模型移去恢复高分区域负荷效应精化, 和负荷球谐系数模型移去恢复高分区域负荷形变场精化 (参考模型移去流程)。
受球谐系数阶次频影响, 海面变化、海潮调和常数模型值在近海陆地区域存在较小值, 陆地等效水高模型值在近岸海域也存在较小值。

第三步：按负荷 SRBF 逼近与综合法，计算区域土壤水负荷形变场残差全要素格网时间序列。

调用[地表环境负荷残差 SRBF 逼近与形变场综合计算]功能, 输入成果范围 1' 零值格网文件 zero1mrst.dat (移去格网 zero1m.dat 四周 1°区域), 由任意历元时刻的区域高分土壤水等效水高残差格网 rntewh*.dat, 计算区域负荷形变效应全要素残差格网 ttt.???. 其目的是, 依据界面下方给出的参数设置优化与累积逼近有效性原则, 设计合理的设置参数。

调用[负荷残差时序 SRBF 逼近与负荷形变场时序计算]功能, 输入成果范围 1' 零值格网文件 zero1mrst.dat (移去格网 zero1m.dat 四周 1°区域), 按已设计好的参数, 由区域高分土壤水等效水高残差格网时序 rntewh*.dat, 统一计算区域负荷形变效应地面全要素残差格网时间序列 rntSRBFs*.???.

扩展名??? = ksi, gra, rga, dft, vdf, dph, dpr, nmh, gr 或 hgd, 分别表示高程异常、地面重力、扰动重力、地倾斜向量、垂线偏差向量、水平位移向量、地面径向、地面正(常)高、扰动重力梯度或水平重力梯度向量残差格网文件。

*为实例化后的残差等效水高格网模型时序文件的通配符, 以标识残差负荷形变效应的采样历元时刻。

第三步：按负荷SRBF逼近与综合法，计算区域土壤水负荷形变场残差格网时间序列

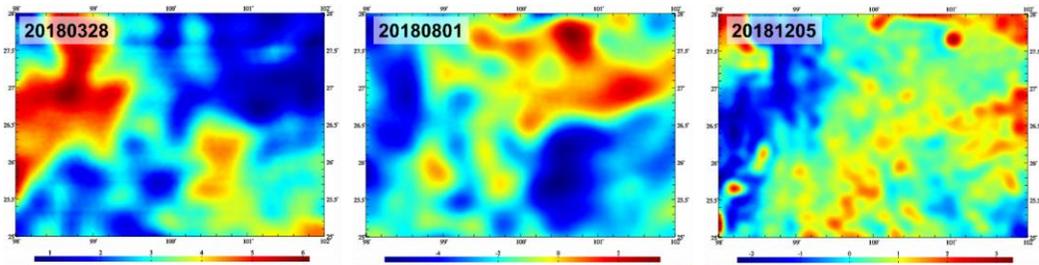
先依据参数设置优化与累积逼近有效性原则，设计合理的设置参数。

● 参数设置优化与累积逼近有效性原则：① 负荷形变场空间连续可微，② 负荷等效水高残差标准差明显减小，残差统计平均值趋于零。

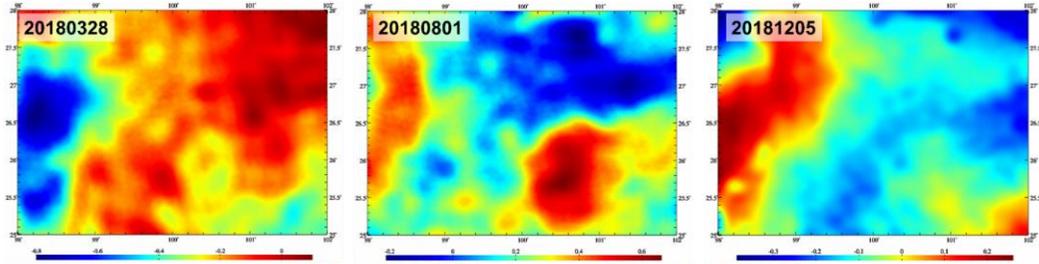
第三步：按负荷SRBF逼近与综合法，计算区域土壤水残差负荷形变格网时间序列

按设计好的参数，统一计算土壤水残差负荷形变格网时间序列。

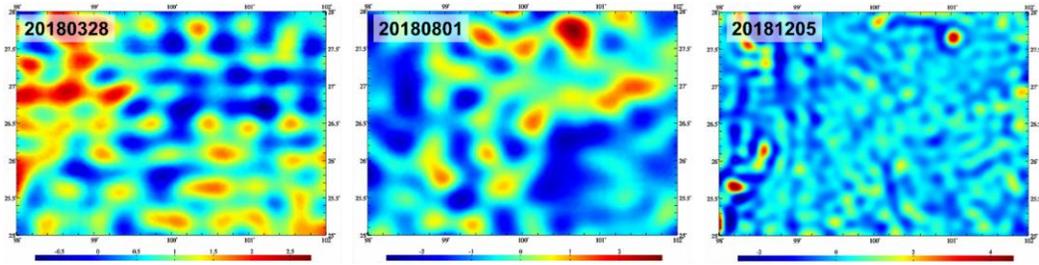
● 参数设置优化与累积逼近有效性原则：① 负荷形变场空间连续可微，② 负荷等效水高残差标准差明显减小，残差统计平均值趋于零。



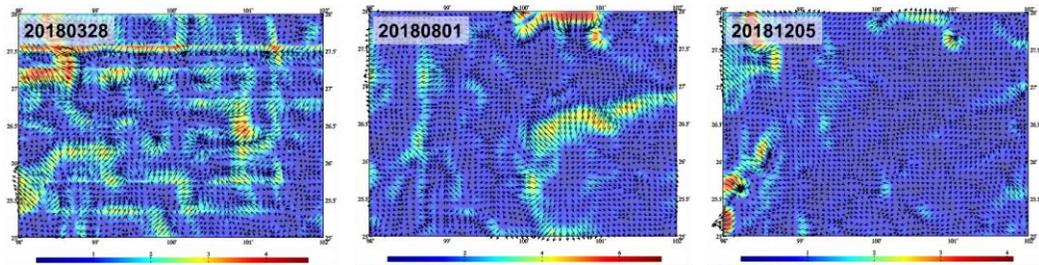
1'×1'地面重力土壤水负荷效应(μGal)残差格网时间序列



1'×1'地面大地高土壤水负荷效应(mm)残差格网时间序列



1'×1'重力梯度土壤水负荷效应(mE)残差格网时间序列



1'×1'地倾斜向量土壤水负荷效应(ms)残差格网时间序列

第四步：计算并恢复土壤水负荷形变场参考模型值格网时间序列，生成区域高分辨率负荷形变场全要素格网时间序列。

调用[地面负荷形变场时间序列批量计算]功能，输入成果范围 1'零值格网文件 zero1mrst.dat(移去格网 zero1m.dat 周边 1°区域)，地表负荷类型选择“陆地水等效水高 cm”，由全球土壤水负荷球谐系数模型时间序列 Indwater*cs.dat，最大计算阶数 360，计算土壤水负荷形变参考模型值格网时间序列 loadfmdl*.*???

扩展名??? = ksi, gra, rga, dft, vdf, dph, dpr, nmh, grr 或 hgd，分别表示高程异常、地面重力、扰动重力、地倾斜向量、垂线偏差向量、水平位移向量、地面径向、地面正

(常)高、扰动重力梯度或水平重力梯度向量模型值格网文件。

*为实例化后的负荷球谐系数模型时序文件的通配符，以标识土壤水负荷形变参考模型值格网的采样历元时刻。

第四步：计算并恢复土壤水负荷形变场参考模型值格网时间序列，生成区域高分辨率土壤水负荷形变场全要素格网时间序列

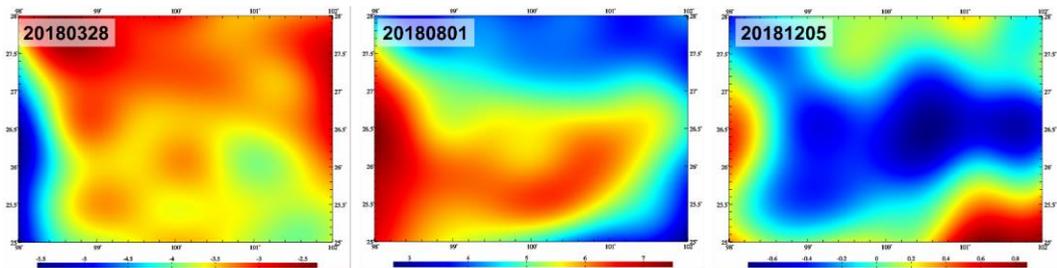
The screenshot displays the ETideLoad4.5 software interface. The main window is titled "地面负荷形变场时间序列批量计算". The left sidebar contains various calculation options, with "打开地面/海面高度格网文件" selected. The central panel shows the configuration for loading spherical harmonic coefficients, including a list of files and a list of output parameters (ksl, gra, rgs, dft, vdf, dph, dpr, mmh, grt, or hgd). Below the configuration, three maps are shown: "高程异常变化(mm)", "地面重力变化(μGal)", and "扰动重力变化(μGal)". Each map displays a spatial distribution of values over a geographic area, with a color scale at the bottom of each map.

1'×1'大地水准面土壤水负荷效应参考模型值(mm)格网时间序列

调用[格网格值加权运算] (或[两组同规格格网时序文件加权运算]) 功能，将结果区域 1' 土壤水负荷形变场全要素参考模型值格网时间序列 loadfm*???, 与负荷形变效应残差格网时间序列 rntSRFBs*???, 直接相加，生成区域高分土壤水负荷形变场全要素格网时间序列 soilloadfm*???

区域大气压、海平面变化负荷形变场全要素格网时间序列的计算流程完全相同。

ETideLoad4.5 负荷形变场 SRFB 逼近算法，可有效解决重力、地倾斜和重力梯度等扰动位微分量负荷格林函数的高阶振荡与不收敛问题、格林函数积分的频谱泄漏与奇异性问题。



1'×1'地面重力土壤水负荷效应参考模型值 (μGal)格网时间序列

同规格时间序列文件编辑运算

两组同规格（向量）格网时间序列文件加权运算

两个同规格监测记录时序加权运算 系列点值文件生成监测记录时序 **两组同规格格网时序文件加权运算** 两组同规格向量格网时序加权运算

打开第一组任一格网时序文件

设置文件名通配符
 文件名中首个通配符序号 9
 文件名中连续通配符总数 8

打开第二组任一格网时序文件

设置文件名通配符
 文件名中首个通配符序号 9
 文件名中连续通配符总数 8

选择运算方式
 相加 +
 权值设置
 权值一 1.00 权值二 1.00

计算过程 ** 操作提示

```

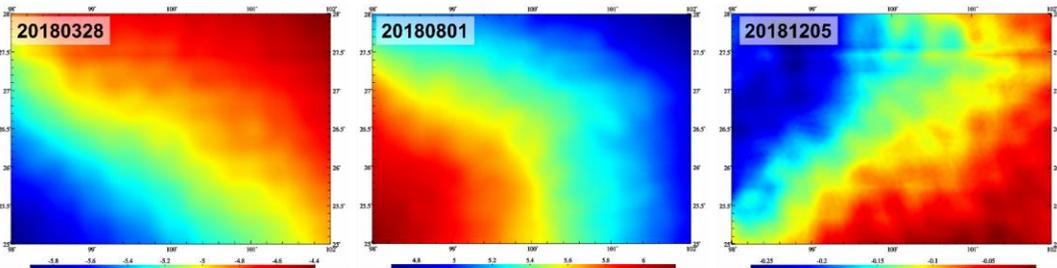
C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Loadmfcdalcdemo/rstmdldfm/loadfmd20180131 ksi
C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Loadmfcdalcdemo/rstmdldfm/loadfmd20180328 ksi
C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Loadmfcdalcdemo/rstmdldfm/loadfmd20180530 ksi
C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Loadmfcdalcdemo/rstmdldfm/loadfmd20180801 ksi
C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Loadmfcdalcdemo/rstmdldfm/loadfmd20181003 ksi
C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Loadmfcdalcdemo/rstmdldfm/loadfmd20181205 ksi
** 按通配符搜索到的第2组格网时序文件:
C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Loadmfcdalcdemo/rstrntdfm/rntSRBF20180131 ksi
C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Loadmfcdalcdemo/rstrntdfm/rntSRBF20180328 ksi
C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Loadmfcdalcdemo/rstrntdfm/rntSRBF20180530 ksi
C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Loadmfcdalcdemo/rstrntdfm/rntSRBF20180801 ksi
C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Loadmfcdalcdemo/rstrntdfm/rntSRBF20181003 ksi
C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/Loadmfcdalcdemo/rstrntdfm/rntSRBF20181205 ksi
  
```

参数设置结果已输入系统!
 ** 点击[开始运算]控件按钮, 或[开始运算]工具按钮.....
 ** 开始时间: 2023-05-04 23:22:33
 >> 完成两组同规格格网时序文件加权运算! 有6个格网时序文件参与计算。

创建结果保存目录 设置参数输入 开始计算

输入输出数据显示:

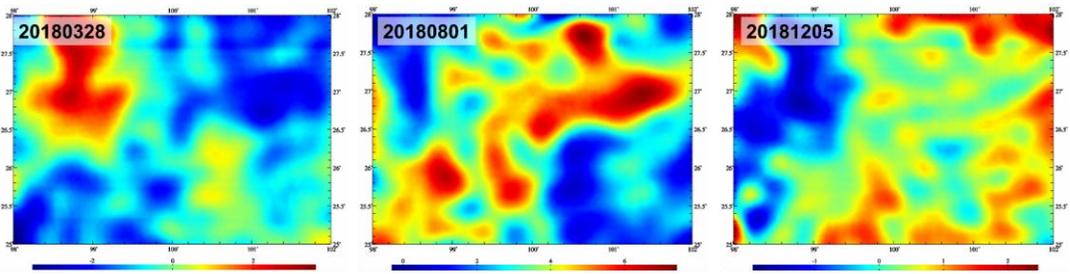
98.0000000	102.000000	25.000000	28.000000	0.01666667	0.01666667	20180131		
-0.0037	-0.0093	-0.0014	0.0014	0.0026	0.0049	0.0058	0.0072	0.0086
0.0176	0.0184	0.0207	0.0207	0.0239	0.0247	0.0270	0.0270	0.0246
0.0282	0.0273	0.0289	0.0289	0.0279	0.0279	0.0279	0.0279	0.0305
0.0342	0.0343	0.0366	0.0366	0.0366	0.0366	0.0366	0.0366	0.0383
0.0297	0.0297	0.0217	0.0217	0.0217	0.0217	0.0217	0.0217	0.0139
0.0196	0.0196	0.0212	0.0212	0.0212	0.0212	0.0212	0.0212	0.0263
0.0279	0.0279	0.0279	0.0279	0.0279	0.0279	0.0279	0.0279	0.259
0.0232	0.0232	0.0309	0.0309	0.0309	0.0309	0.0309	0.0309	0.319
0.0293	0.0293	0.166	0.166	0.166	0.166	0.166	0.166	1.487
0.0221	0.0239	0.0225	0.0225	0.0212	0.0225	0.0225	0.0225	0.0270
0.0266	0.0263	0.0281	0.0281	0.0283	0.0270	0.0281	0.0276	0.0272
0.0315	0.0316	0.0314	0.0314	0.0330	0.0343	0.0353	0.0356	0.0354
0.0369	0.0381	0.0368	0.0368	0.0379	0.0376	0.0375	0.0383	0.0390
0.0433	0.0432	0.0425	0.0425	0.0440	0.0473	0.0478	0.0462	0.0453
0.0465	0.0465	0.0425	0.0425	0.0425	0.0425	0.0425	0.0425	0.0473



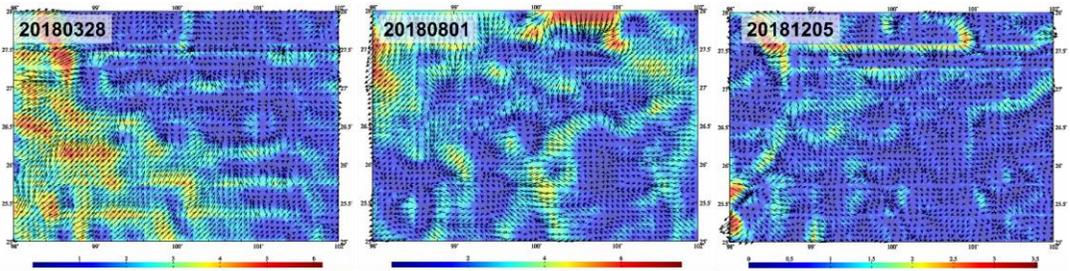
1'×1'大地水准面土壤水负荷效应(mm)格网时间序列成果

地表环境负荷形变场，可用于精确标定大地测量卫星关键载荷，检核卫星大地测量监测能力，有效提升监测性能、质量、可靠性与精度水平。

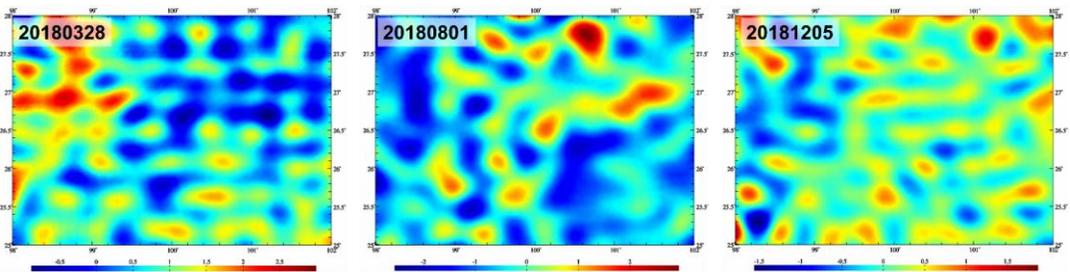
将区域地表环境负荷形变场，用于 GNSS、水准、重力等各种高精度观测的历元归算，可支撑多源异构大地测量基准实现与协同维持。



1'×1'地面重力土壤水负荷效应(μGal)格网时间序列成果



1'×1'地倾斜向量土壤水负荷效应 (ms)格网时间序列成果



1'×1'重力梯度土壤水负荷效应 (mE)格网时间序列成果

将地表环境负荷形变场，用于监测量历元归算与监测基准统一，是大地测量多源异质数据深度融合与多种异构技术协同监测的基本要求。

4.10.2 地下水与地表环境负荷形变场协同监测流程

联合 CORS 站网、固体潮站网与地下水监测站网等多种监测量记录时间序列，按已知地面负荷移去恢复法，五步实现地下水与地表环境负荷形变场全要素格网时间序列的多种技术协同监测。

目标区域：98°~101°E, 24°~26.5°N；监测数据分布：97.5°~101.5°E, 23.5°~27.0°N；时间跨度：2019 年 3 月至 2019 年 8 月；时间分辨率：1 周；空间分辨率：1'×1'。

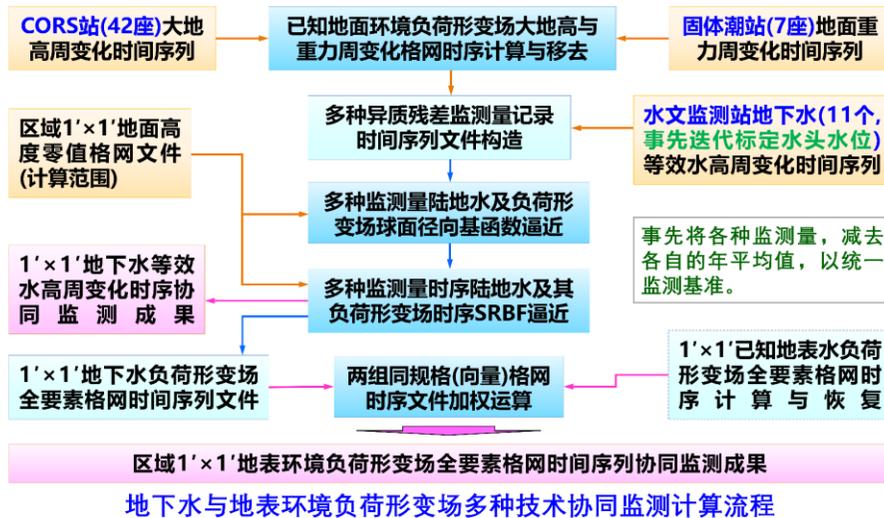
第一步：多种大地测量及地表环境负荷观测数据准备与预处理计算

(1) CORS 站网数据处理与 42 座 CORS 站大地高周变化时间序列计算，固体潮站网数据处理与 7 座固体潮站重力周变化时间序列计算。

(2) 统一监测基准。事先将全部大地测量和地表环境监测量时间序列，分别减去各自的年平均值，以统一全球和区域地面监测量时序的监测基准。

(3) 水文监测站（11 个）地下水等效水高周变化时间序列计算。

事先由 CORS 站和固体潮站监测数据，按本节流程，计算不少于两年的区域地下水等效水高周变化网格时间序列，之后，内插至水文监测站点，标定地下水监测站参数，从而将（水头）水位变化转换为地下水等效水高变化。



类似地，可迭代标定或分离固体潮站观测时序中与负荷形变场空域或谱域不相关的仪器参数（如非线性漂移、温控参数等），以提高固体潮站的中长期监测能力。

第二步：计算并移去已知地表环境负荷形变效应，构造多种异质残差监测记录时间序列文件。

按照 4.10.1 流程，计算地面大气压、土壤植被水、江河湖库水、海平面变化等已知地面负荷形变场的大地高周变化和地面重力周变化格网时间序列。地面大地高的大气压非潮汐负荷效应大，需要准确计算并移去。本例省略此过程。

调用[格网时序内插给定记录时序]，输入固体潮站重力周变化记录时间序列文件，由地面负荷形变场重力周变化格网时间序列，移去固体潮站重力周变化时序中的地面负荷形变效应，生成固体潮站网残差重力周变化记录时间序列文件。

采用相同的计算流程，由地面负荷形变场大地高周变化格网时间序列，移去 CORS 站大地高周变化时序中的地面负荷形变效应，生成 CORS 站残差大地高周变化记录时间序列文件。

将水文监测站地下水等效水高周变化、固体潮站残差重力周变化和 CORS 站残差大地高周变化记录时间序列，按约定格式要求合并，生成多种异质残差监测周变化记录时间序列文件。

多种异质残差监测周变化记录时间序列头文件含时序长度，以及按时序长度依次排列的采样历元时刻。

记录格式：站号/名，经度，纬度，…，监测量权，监测量类型，…，按时序长度依次排列的时序采样值（缺省值 9999.0000）。

监测量类型 = 3 地面重力变化 μGal ，4 大地高变化 mm，6 等效水高变化 cm。

第二步：计算并移去已知地表环境负荷形变效应，构造多种异质残差监测记录时间序列文件

格网时序内插不规则时序 格网时序内插给定记录时序 指定时间位置格网时序插值 规格采样生成离散点记录时序 格网时序给定时空分辨率推估

打开目录中任一格网时序文件 计算过程 操作提示 操作信息保存

设置格网时序文件名称通配符
 文件名中首个通配符序号 4
 文件名中连续通配符总数 10

打开源记录时间序列文件
 头文件首个采样时刻列序号 5
 记录中首次采样列序号 7
 选择空间插值方式 高斯基函数数值
 选择时间插值方式 三角函数插值

>> 计算过程 ** 操作提示
 >> [功能]由大地测量格网时序文件，按选定的空间二维和时间一维插值方式，内插时给定记录时序在对应时空点处的全部采样值，结果记录文件格式与给定的记录时序文件相同。
 >> 打开目录中任一格网时序文件 C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/landwdfmonitordemo/surfwatereff_grav/grd2019010212.dat
 >> 打开源记录时间序列文件 C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/landwdfmonitordemo/gravobs.txt
 >> 查看下方窗口文件信息，设置输入文件格式参数，输入结果保存文件名后，点击[参数设置结果输入]按钮，将参数输入系统。
 >> 结果文件保存为 C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/landwdfmonitordemo/gravsrfw.txt.
 >> 程序在当前目录下输出剩余量记录时序文件 C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/landwdfmonitordemo/gravsrfw.rnt。格式同给定的源记录时序文件，剩余量记录时序采样值等于源记录时序采样值与格网时序内插值之差(结果可用于区域形变场或时变重力场移去恢复法逼近)。
 ** 按通配符搜索到的格网时序文件:
 C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/landwdfmonitordemo/surfwatereff_grav/grd2019010212.dat
 C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/landwdfmonitordemo/surfwatereff_grav/grd2019010912.dat
 C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/landwdfmonitordemo/surfwatereff_grav/grd2019011612.dat
 C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/landwdfmonitordemo/surfwatereff_grav/grd2019012312.dat
 C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/landwdfmonitordemo/surfwatereff_grav/grd2019013012.dat
 C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/landwdfmonitordemo/surfwatereff_grav/grd2019020612.dat
 C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/landwdfmonitordemo/surfwatereff_grav/grd2019021312.dat
 C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/landwdfmonitordemo/surfwatereff_grav/grd2019022012.dat
 C:/ETideLoad4.5_win64cn/examples/landwdfmonitordemo/surfwatereff_grav/grd2019022712.dat

结果文件保存为

输入输出数据显示 ↓

4	6	1	26	2019022712	2019030612	2019031312	2019032012	2019032712	2019040312
Gravtd	98.0147	26.3549	0	1.0	3	-4.4977	-4.6250	-4.8507	
Gravtd	98.6582	26.0442	0	1.0	3	-7.7705	-7.8214	-9.1306	
Gravtd	100.7779	25.6125	0	1.0	3	-5.9367	-5.9056	-6.0923	
Gravtd	100.4539	26.2831	0	1.0	3	-4.4210	-4.5406	-4.7794	
Gravtd	99.5602	25.1185	0	1.0	3	-4.5239	-4.5828	-4.8460	
Gravtd	98.7893	24.9545	0	1.0	3	-5.3455	-5.5663	-5.7431	
Gravtd	100.6808	24.2371	0	1.0	3	-4.8397	-4.9158	-5.1177	

移去地面大气压、海平面变化、土壤植被水、江河湖库水等已知地表环境负荷形变效应

构造多种异质监测记录时序文件

heterobstm.txt

1	4	6	1	26	2019022712	2019030612	2019031312	2019032012	2019032712	2019040312
2	Gravtd	98.0147	26.3549	0	1.0	3	0.3682	-0.4066	-0.5870	-0.9507
3	Gravtd	98.6582	26.0442	0	1.0	3	0.4895	-0.3106	-0.3382	-0.6489
4	Gravtd	100.7779	25.6125	0	1.0	3	0.4197	0.0443	-0.2116	-0.9992
5	Gravtd	100.4539	26.2831	0	1.0	3	0.7248	0.0443	-0.2116	-0.7004
6	Gravtd	99.5602	25.1185	0	1.0	3	0.7275	0.1915	-0.1027	-0.8650
7	Gravtd	98.7893	24.9545	0	1.0	3	0.4227	0.5677	0.9668	-1.1046
8	Gravtd	100.6808	24.2371	0	1.0	3	0.9835	0.1915	-0.1027	-0.7727
9	Groundw	97.9611	25.4165	0	1.0	6	6.9853	0.5677	0.9668	-2.4974
10	Groundw	98.0147	25.4165	0	1.0	6	-17.9751	-17.4566	-10.0307	-6.5621
11	Groundw	98.6582	24.8678	0	1.0	6	-2.4838			
12	Groundw	98.6582	24.8678	0	1.0	6	-3.9630			
13	Groundw	98.6582	25.7235	0	1.0	6	-9.1540			
14	Groundw	100.4211	25.0306	0	1.0	6	-6.9553			
15	Groundw	99.9602	26.1185	0	1.0	6	-12.4726			
16	Groundw	100.4287	25.0616	0	1.0	6	-9.3451			
17	Groundw	99.6155	25.4606	0	1.0	6	-7.1664			
18	Groundw	99.3902	25.0128	0	1.0	6	8.7624			
19	Groundw	98.3716	25.9847	0	1.0	6	0.2453			
20	BAIS	98.1335	25.7597	0	1.0	4	2.7636			
21	EJIA	101.2457	24.4573	0	1.0	4	2.7837			
22	HQIN	100.1664	26.5621	0	1.0	4	2.8909			
23	JIGU	100.7302	24.1054	0	1.0	4	1.5699			
24	LJGC	100.2215	26.1009	0	1.0	4	1.9811			
25	MENT	99.6325	24.5268	0	1.0	4	7.6030	8.7689	8.4174	9.2064
26	MYON	99.7582	23.9442	0	1.0	4	2.4876	3.9290	3.3716	3.5119
27	QINA	100.6244	26.3091	0	1.0	4		3.6994	3.6994	4.7430
28	SAN1	101.0779	26.0125	0	1.0	4		3.6994	3.6994	5.1418
29	TDIA	99.5277	26.5430	0	1.0	4		3.6994	3.6994	6.3106
30	WANM	101.0125	26.4526	0	1.0	4		3.6994	3.6994	0.8977
31	WYIN	100.1285	25.1540	0	1.0	4		3.6994	3.6994	0.1292
32	XIFU	101.2905	23.6286	0	1.0	4		3.6994	3.6994	1.985
33	XYUN	100.5590	25.4876	0	1.0	4		3.6994	3.6994	0.9830
34	YNCX	101.0928	25.0495	0	1.0	4		3.6994	3.6994	4.6290
35	Y NJD	100.8808	24.4371	0	1.0	4	-1.4566	0.6380	0.5221	0.8202

监测点高度-相对地面
 监测量类型

第1周采样历元时刻
 第1周各站点监测量

多种异质监测记录时序heterobstm.txt =
 1. 固体潮残差重力周变化记录时序，第6列=3 +
 2. 水文站地下水等效水高变化记录时序，第6列=6 +
 3. CORS站残差大地高周变化记录时序，第6列=4

第三步：调用[多种监测陆地水及负荷形变场球面径向基函数逼近]，设计批量 SRBF 逼近的适当参数集合。

调用[多种监测陆地水及负荷形变场球面径向基函数逼近]功能，输入计算范围 1'×1'

零值格网文件 zero60s.dat (相对于地面高度格网, 高度等于零表示地面), 由任意历元时刻的多种异质残差监测量周变化, 计算该历元时刻的残差等效水高, 以及 10 种残差负荷形变场格网。期间, 依据界面下方给出的参数设置优化与累积逼近有效性原则, 调整并设计合理的设置参数。

第四步: 按 SRBF 逼近法估计地下水等效水高及其负荷形变场全要素格网时间序列。

调用[多种监测量时序陆地水及其负荷形变场时序 SRBF 逼近]功能, 输入计算范围 1' 零值格网文件 zero60s.dat, 按已设计好的参数, 由多种异质残差监测量周变化记录时间序列, 输出残差等效水高格网 ewh***.dat、监测量残差记录 rnt***.txt 和如下 10 种负荷形变场残差格网时间序列文件。

第三步: 调用[多种监测量陆地水及负荷形变场球面径向基函数逼近], 设计批量SRBF逼近的适当参数集合

依据参数设置优化与累积逼近有效性原则, 设计合理的设置参数。

输入输出数据显!

监测历元2019022712

● 监测量类似可包括: 1 (GNSS水准网点) 高程异常变化, 2 (流动重力/GNSS或固体潮CORIS并置站点) 扰动重力变化 μGal , 3 (流动重力或固体潮站点) 地面重力变化 μGal , 4 (CORIS站点或流动GNSS点) 大地高变化mm, 5 (流动水准网点) 正(常)高变化, 6 (水准站点) 等效水高变化cm。

● 参数设置优化与累积逼近有效性原则: ①负荷及其形变场空间连续可微, ②监测量的残差标准明显减小, 残差统计平均趋于零。

① 高程异常(大地水准面)变化(mm) SRBFgeoid***.dat, ② 地面重力变化(μGal) SRBFterrgrav***.dat, ③ 扰动重力变化(μGal) SRBFgravdist***.dat, ④ 地倾斜变化(mas)向量 SRBFgrndtilt***.dat, ⑤ 垂线偏差变化(mas)向量 SRBFvertdefl***.dat, ⑥ 水平位移 (mm)向量 SRBFhorzdisp***.dat, ⑦ 大地高变化(mm) SRBFelliphgt***.dat, ⑧ 正(常)高变化(mm) SRBForthohgt***.dat, ⑨ 扰动重力梯度变化(径向, mE) SRBFgradient***.dat 与 ⑩ 水平重力梯度变化(E)向量 SRBFhorzgrad***.dat。

***为原监测量记录时序头文件中的采样历元时刻, 用于标识负荷形变场格网采样历元时刻。负荷形变场格网头文件最后 1 列属性为采样历元时刻。

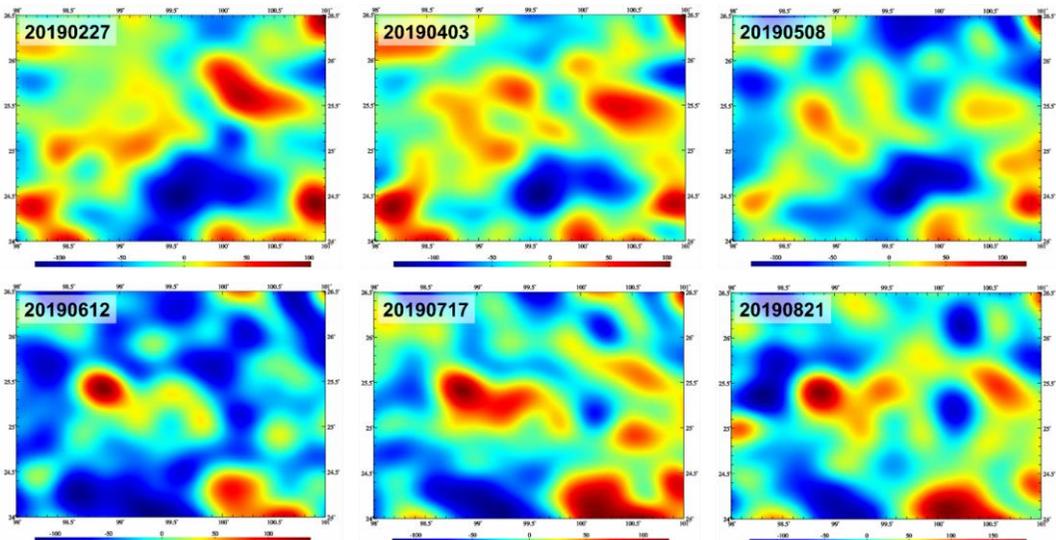
第四步：按SRBF逼近法估计地下水等效水高及其负荷形变场全要素格网时间序列

The screenshot shows the SRBF software interface with the following components:

- Parameter Settings (Left Panel):**
 - 记录时文件: 多种测量量时序地下水及其负荷形变场SRBF逼近
 - 打开多种测量记录时序文件: 打开计算面高度格网文件
 - 选择或创建结果目录: 计算信息保存
 - 设置记录时文件: 头文件首个采样时列序号 5
 - 记录中首次采样时列序号 7
 - 监测量类型列序号 6
 - 监测量权值列序号 5
 - 监测站平均间距 6.0 km
 - 设置首次SRBF逼近参数: 选择SRBF类型 径向多极子核
 - 多极子阶数 0
 - 最大阶数 9
 - 最大阶数 900
 - Bjerthammer球面埋藏度(m) 1.0km
 - SRBF中心作用距离 200km
 - 选择方程解算法 LU三角解法
 - 设置累积逼近次数 1
 - 累积SRBF逼近参数设置: 选择SRBF类型 Positen小波核
 - 多极子阶数 0
 - 最大阶数 720
 - 最大阶数 1800
 - Bjerthammer球面埋藏度(m) 5.0km
 - SRBF中心作用距离 60km
- Code/Log Area (Middle):**
 - ①功能: 由各种地面监测量时序列, 按照地球表面径向基函数负荷形变逼近算法, 计算地表负荷等效水高(cm)、高程异常(大地水准面mm)、地面重力(μGal)、地倾斜(mas)、垂线偏差(mas)、地面水平位移(mm)、大地高(mm)、正(高)高(mm)、扰动重力梯度(mE)与水平重力梯度(mE)负荷形变等效格网时间序列。
 - ** 输入头文件时序采样历元时刻, 记录格式: 站名, 经度, 精度, ...; 监测量权, 监测量类型, ...; 与头文件采样历元一一对应的时序采样值(缺省值9999.0000)。
 - >> 打开站址监测量记录时序文件: ET/IdLoad4_5_win64cn/examples/landwdfmonitordemo/heterobstm.txt.
 - ** 观察下方窗口文件信息, 设置监测量记录时序文件参数...
 - >> 打开计算面高度格网文件C:\ET/IdLoad4_5_win64cn/examples/landwdfmonitordemo/zero60e.dat.
 - >> 选择或创建结果保存目录:C:\ET/IdLoad4_5_win64cn/examples/landwdfmonitordemo/GrondsSRBFatim.
 - >> 程序在当前目录下输出结果负荷等效水高格网文件wb****.dat, 监测量残差文件zr****.txt和如下10种负荷形变格网文件。***为原监测量记录时序文件中的采样历元时刻, 用于标识负荷形变格网采样历元时刻, 负荷形变格网头文件最后一列属性为采样历元时刻。
 - ** ①高程异常(大地水准面)变化(mm) SRBFgeoid***.dat,
 - ②地面重力变化(μGal) SRBFtergravn***.dat,
 - ③扰动重力变化(μGal) SRBFgravdist***.dat,
 - ④地倾斜向量变化(CW, mas) SRBFgrndtilt***.dat,
 - ⑤垂线偏差向量变化(CW, mas) SRBFvertdefl***.dat,
 - ⑥水平位移向量(EN, mm) SRBFhorzdisap***.dat,
 - ⑦大地高变化(mm) SRBFelliphtg***.dat,
 - ⑧正(高)高变化(mm) SRBForthoght***.dat,
 - ⑨扰动重力梯度(东分, mE) SRBFgrdist***.dat与
 - ⑩扰动重力梯度(北分, mE) SRBFgrdist***.dat与
- Monitoring Results (Bottom):**
 - 输入输出数据显示: 提取负荷形变场
 - 图形绘制: 监测历元2019082112
 - 监测站点空间分布: 显示监测站分布图
 - 地表负荷变化cm: 地表负荷变化热图
 - 地面重力变化 μGal : 地面重力变化热图
 - 正(高)高变化mm: 正(高)高变化热图

按设计好的参数, 统一计算地下水等效水高及其负荷形变场全要素格网时间序列。

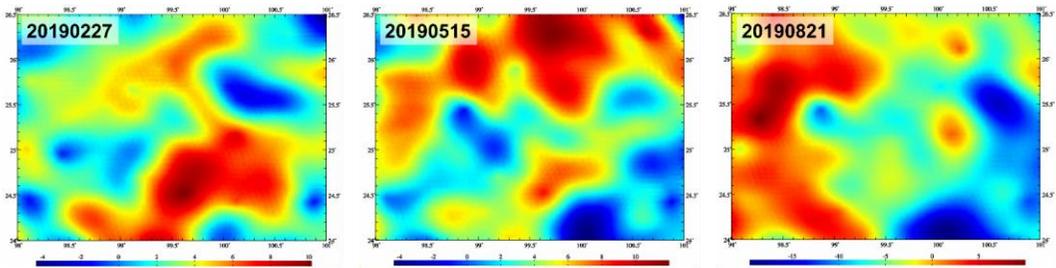
CORS站(42座)、固体潮站(7座)与地下水监测站(11个)协同监测



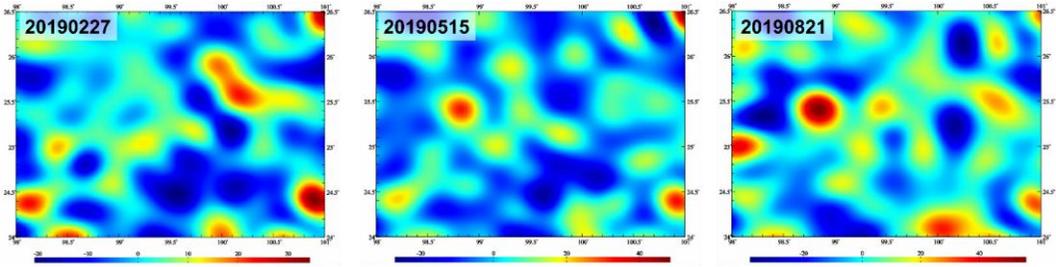
1'x1'区域地下水等效水高周变化(cm)格网时间序列多种技术协同监测成果

这里的负荷形变场残差全要素格网时间序列, 不含已知地面负荷形变场, 可认为是地下水负荷形变场全要素格网时间序列。

程序输出的残差等效水高格网时间序列, 在移去有边缘效应的格网四周 1° 区域后, 即为42座CORS站、7座固体潮站与11个水文站协同监测的区域高分地下水等效水高周变化时间序列成果。



1'x1'地下水负荷形变场地面正常高变化(mm)格网时间序列



1'x1'地下水负荷形变场重力梯度变化(mE) 格网时间序列

第五步：计算并恢复地表水负荷形变场全要素格网时间序列，生成陆地水负荷形变场全要素格网时间序列协同监测成果。

第五步：计算并恢复已知地面负荷形变场全要素格网时间序列，生成地表环境负荷形变场全要素格网时间序列协同监测成果

两组同规格（向量）格网时间序列文件加权运算

两个同规格监测量记录时序加权运算 系列点值文件生成监测量记录时序 **两组同规格格网时序文件加权运算** 两组同规格向量格网时序加权运算

打开第一组任一格网时序文件 >> 计算过程 ** 操作提示 操作信息保存

设置文件名通配符
 文件名中首个通配符序号 4
 文件名中连续通配符总数 10

打开第二组任一格网时序文件
 设置文件名通配符
 文件名中首个通配符序号 4
 文件名中连续通配符总数 10

选择运算方式
 相加 +
 权值设置
 权值一 1.00 权值二 1.00

参数设置结果已输入系统！
 ** 点击[开始运算]控件按钮，或[开始运算]工具按钮.....
 >> 开始时间：2023-05-06 16:50:31
 >> 完成两组同规格格网时间序列文件加权运算！有26个格网时间序列文件参与计算。
 >> 结束时间：2023-05-06 16:50:32

创建结果保存目录 设置参数输入 开始计算

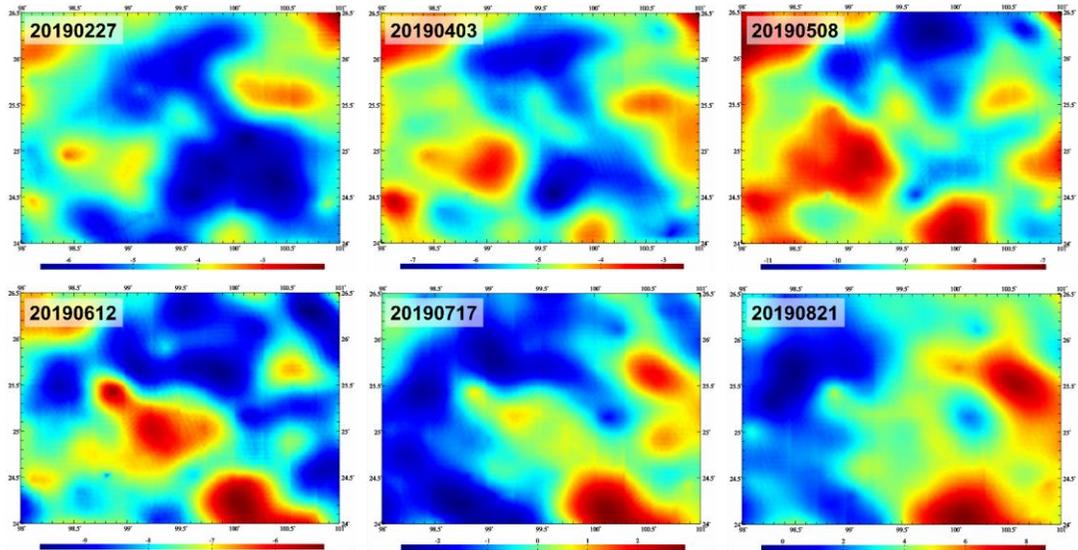
输入输出数据显示 ↓

98.000000	101.000000	24.000000	26.500000	0.01666667	0.01666667	2019022712.00			
5.1438	5.1026	5.0606	5.0146	4.9679	4.9373	4.9178	4.9048	4.8966	
4.8916	4.8910	4.8907	4.8920	4.8956	4.9018	4.9131	4.9329	4.9677	
4.9019	4.8484	4.8056	4.7709	4.7437	4.7226	4.7076	4.6991	4.6967	
4.7734	4.7932	4.8130	4.8329	4.8524	4.8704	4.8879	4.8979	4.9077	
4.9121	4.9023	4.8925	4.8827	4.8735	4.8639	4.8544	4.8467	4.8387	
4.8065	4.8122	4.8180	4.8238	4.8294	4.8352	4.8410	4.8467	4.8524	
5.1148	5.1148	5.1148	5.1148	5.1148	5.1148	5.1148	5.1148	5.1148	
6.1148	6.1148	6.1148	6.1148	6.1148	6.1148	6.1148	6.1148	6.1148	
5.9735	5.9735	5.9735	5.9735	5.9735	5.9735	5.9735	5.9735	5.9735	
6.1556	6.1556	6.1556	6.1556	6.1556	6.1556	6.1556	6.1556	6.1556	
5.1279	5.0882	5.0496	5.0110	4.9724	4.9338	4.8952	4.8566	4.8180	
4.8612	4.8577	4.8542	4.8507	4.8472	4.8437	4.8402	4.8367	4.8332	
4.8770	4.8735	4.8700	4.8665	4.8630	4.8595	4.8560	4.8525	4.8490	

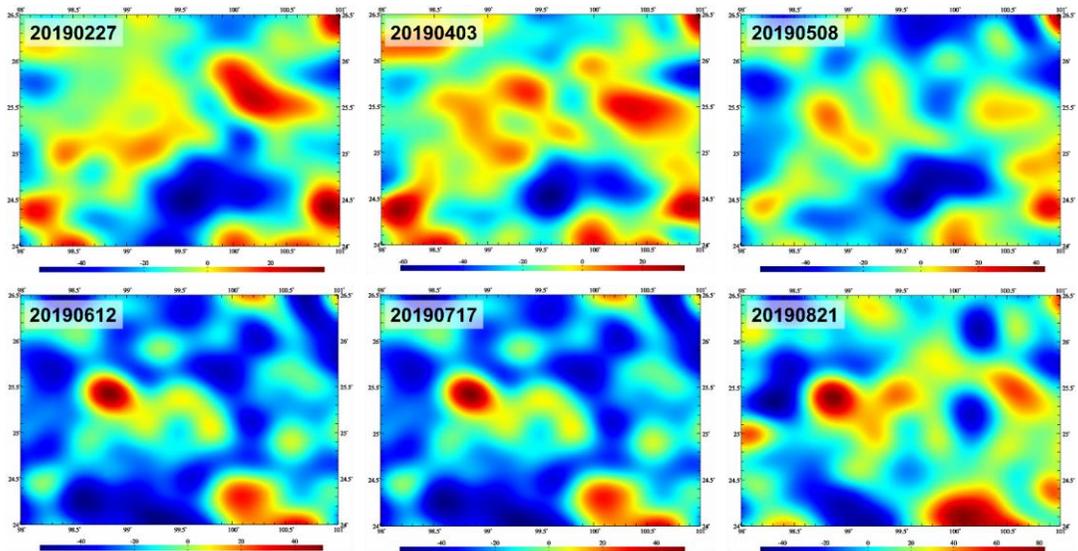
按照 4.10.1 流程，计算 1'x1'地面大气压、土壤植被水、江河湖库水、海平面变化等已知地面负荷形变场全要素（10 种）周变化格网时间序列。本例省略此过程。

调用[同规格时间序列文件编辑运算]，分别将 10 种类型的 1'x1'已知地面负荷形变场周

变化格网时间序列与地下水负荷形变场周变化格网时间序列相加，生成 1'×1'地表环境负荷形变场全要素格网时间序列协同监测成果。



1'×1'地表环境负荷形变场大地水准面周变化(mm)格网时间序列多种技术协同监测成果



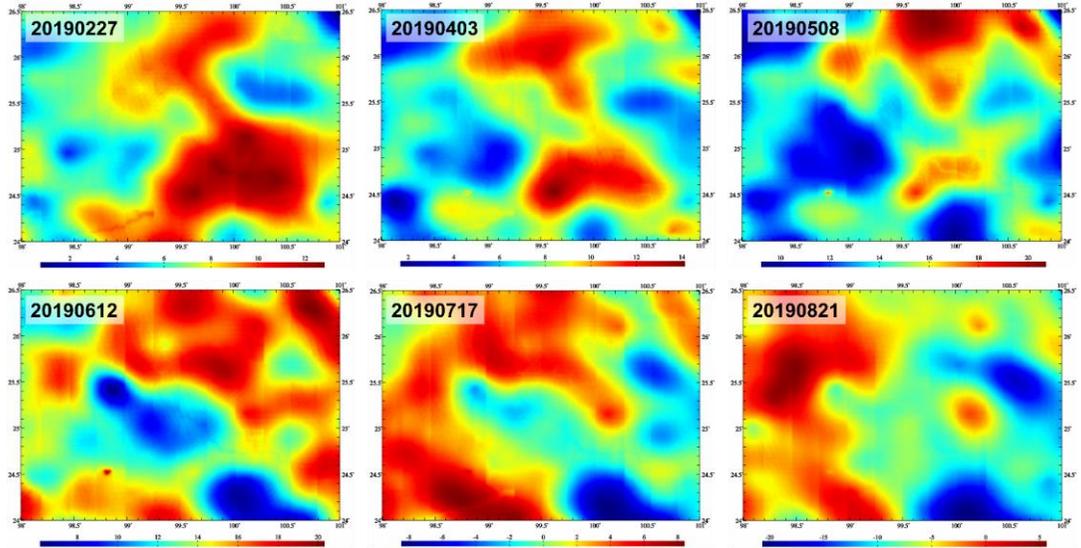
1'×1'地表环境负荷形变场地面重力周变化(μGal)格网时间序列多种技术协同监测成果

ETideLoad4.5 多源异质大地测量与环境负荷协同监测算法的主要技术特点：

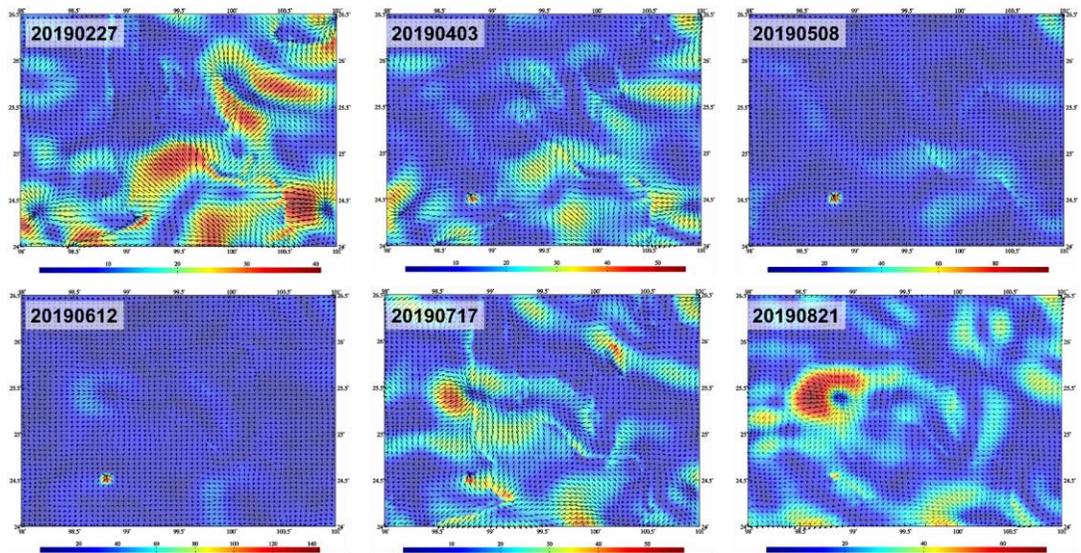
(1) 有效解决了负荷格林函数的高阶振荡与不收敛问题、格林函数积分的频谱泄漏与奇异性问题，采用固体地球物理解析约束，严密实现了 GNSS、重力、水准、地倾斜与地下水等多种异构技术协同监测。

(2) 以各种监测量解析关系为观测方程，按法方程系数阵对角线非零元素均方根法实现多源异质深度融合，控制负荷形变场解析结构免受监测误差影响，普适性稳定性高，适合规模化高频次协同监测计算。

(3) 具备地球物理信号空域谱域分离和测量设备检测及参数标定功效，可提升固体潮站、地下水站与地倾斜站的中长期监测能力，增强空天地海大地测量及地表动力环境协同监测水平。



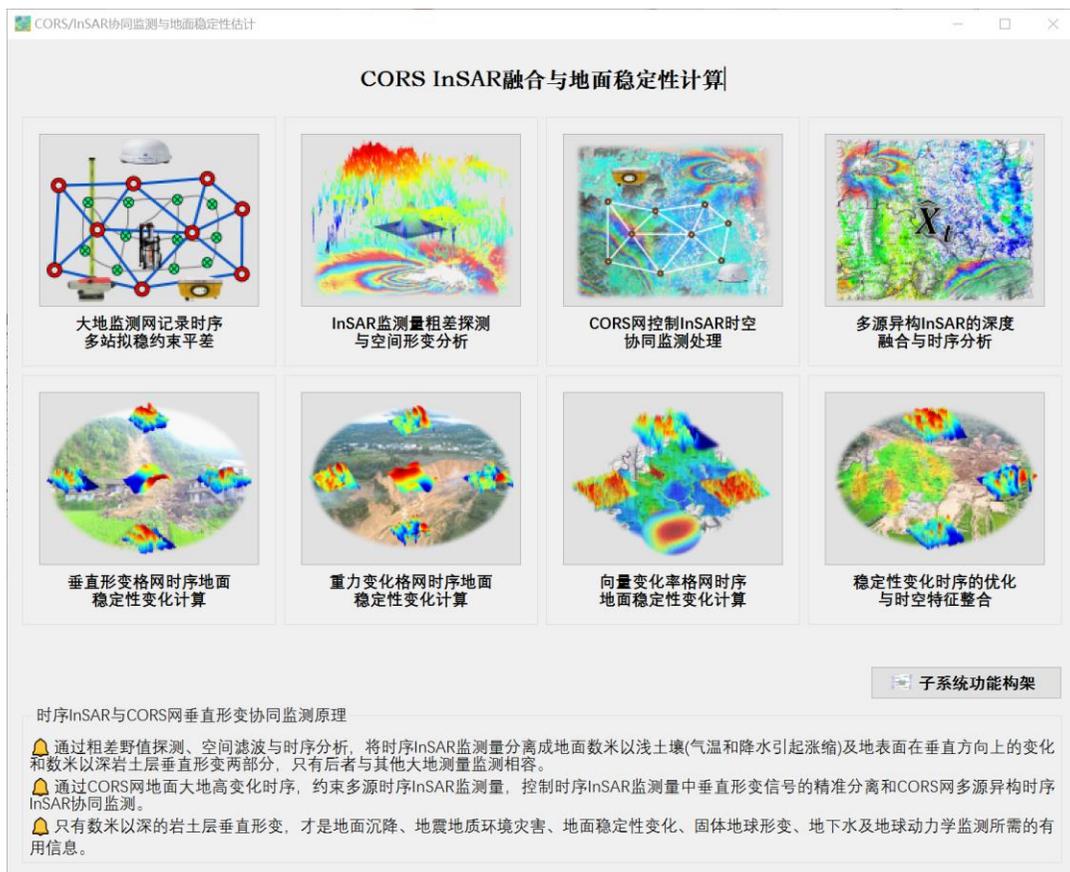
1'×1'地表环境负荷形变场地面大地高周变化(mm)格网时间序列多种技术协同监测成果



1'×1'地表环境负荷形变场地倾斜周变化(ms)向量格网时间序列多种技术协同监测成果

第五章 CORS InSAR 融合与地面稳定性计算

CORS InSAR 融合与地面稳定性计算，旨在构建区域统一、长期稳定、高抗差性能的几何物理时空监测基准，开展 CORS 网、时序 InSAR 与多源大地测量数据融合计算；按客观自然规律，由大地测量几何物理场时序，构造稳定性降低的定量辨识准则，实现地面稳定性变化无缝连续监测与短时预报。



(1) 时序 InSAR 与 CORS 网垂直形变协同监测原理

①通过粗差野值探测、空间滤波与时序分析，将时序 InSAR 监测量分离成地面数米以浅土壤（气温和降水引起涨缩）及地表面在垂直方向上的变化和数米以深岩土层垂直形变两部分，后者与其他大地测量监测相容。

②利用 CORS 网地面大地高变化时序，约束多源时序 InSAR 监测量，控制时序 InSAR 监测量中垂直形变信号的精准分离和 CORS 网多源异构时序 InSAR 协同监测。

③只有数米以深岩土层垂直形变，才是地面沉降、地震地质环境灾害、地面稳定性变化、固体地球形变、地下水及地球动力学监测所需的信息。

从时序 InSAR 监测量中分离出的地表面及浅层土壤垂直变化，可用于土壤、湿地与水环境监测，以及地质环境调查监测、灾情监测灾后评估和水文气象研究等。

(2) 区域地面稳定性变化无缝连续定量监测原则

①基于多源异质数据融合的地面垂直形变、重力与地倾斜变化格网时序，构建地面稳定性降低的确定性准则，实现区域地面稳定性变化定量连续监测。

②地面稳定性降低定量准则(依据确定性的客观自然规律):地面大地高增大/重力减小,大地高/重力变化水平梯度大,地倾斜变化与地形坡度内积大等。

③参考已发生的地质灾害事件,优化整合多种大地测量地面稳定性变化格网时序,建成适应当地环境地质的地面稳定性变化格网时序,夯实稳定性变化监测能力。

5.1 大地监测网记录时序多站拟稳约束平差

[功能]以构建区域统一、长期稳定、高抗差性能的高精度几何物理时空监测基准为目的,由 CORS 站网(GNSS 监测网)基线一维分量、水准网测段高差或重力网段差变化量时序(监测记录时序文件),以给定的一组地面站点基准值记录时序为拟稳基准,采用附有拟稳基准约束的间接最小二乘平差法,计算站点坐标分量变化、正(常)高变化或重力变化记录时序的平差值。

程序要求所有监测量在每一采样历元时刻的时间严格同步,且要求所有监测量时序的参考历元统一。这是监测网构网和平差的前提条件。

[输入]大地监测网基线或测段记录时序文件,拟稳基准点记录时序文件。

监测网基线或测段记录时序。头文件含按时序长度依次排列的采样历元时刻,记录格式:基线或测段名称,两端点经纬度和高度, ..., 按时序长度依次排列的时序采样值(缺省值 9999)。

拟稳基准点记录时序文件。头文件含按时序长度依次排列的采样历元时刻,记录格式:站点名称,经度,纬度,高度, ..., 按时序长度依次排列的时序采样值(缺省值 9999)。

The screenshot displays a software application for geodesy data processing. It features three main data tables:

- 监测网记录时序 (Monitoring Network Record Time Series):** A table with columns for station names (e.g., CHAN, DONG, FSIQ), coordinates (Easting, Northing, Height), and time series values.
- 拟稳基准点记录时序 (Stable Reference Point Record Time Series):** A table with columns for station names (e.g., CHAN, DONG, FSIQ), coordinates, and time series values.
- 站点监测量平差结果记录时序 (Station Measurement Adjustment Result Record Time Series):** A table with columns for station names, coordinates, and adjusted time series values.

The interface includes various input fields, buttons like '计算过程' (Calculation Process) and '参数设置' (Parameter Settings), and a 3D visualization of a station network with red and green nodes connected by lines. The software is titled '大地监测网记录时序多站拟稳约束平差'.

大地监测网的基线或测段与拟稳基准点之间的关联,通过其名称字符实现。基线或测段名约定为由两端站名 A、B 构成 (B***A),并要求所有站点名(如 A、B)的字符数相等。基线或测段名的字符数,不小于站点名字符数的两倍。

[参数设置]输入大地监测网基线或测段监测网记录时序与拟稳基准点记录时序文件格式参数，选择拟稳基准约束方式。

当选择“基准值加权平均”约束时，程序要求监测量记录时序与基准值记录时序的采样历元时刻一一对应。当选择“基准值加权零平均”约束时，站点监测量平差结果时序的空间监测尺度不会大于站点分布覆盖区域（即局部区域相对形变，形变性质与时序 InSAR 监测量类似）。

[输出]站点变化量平差值记录时序文件，基准站点平差结果文件。

站点变化量平差值记录时序文件。头文件取基准点记录时序头文件，记录格式：站点名称，经度，纬度，高度，按时序长度依次排列的采样时刻平差值。

基准站点平差结果文件。头文件取基准点记录时序头文件，记录格式：站点名称，经度，纬度，高度，权值，按时序长度依次排列的采样时刻平差值。

当选择“基准值加权平均”约束时，基准站点平差结果文件最后一行为基准站点原基准值加权平均记录时间序列。

5.2 InSAR 监测量粗差探测与空间形变分析

[目标]依据地质和负荷动力作用下地面沉降（垂直形变）空间变化固有特征，构造 InSAR 监测量空间分析算法，分离 InSAR 监测量野值和粗差，抑制削弱地形面破碎、覆盖层土壤局部变化影响，生成与其他大地测量形变监测（地面数米以深岩土层垂直形变）相容的 InSAR 地面垂直形变记录时序。

时序 InSAR 监测量约定为监测点记录时序格式，采样历元时刻约定为系统时间格式。

5.2.1 InSAR 监测量记录时序粗差探测分离

[功能]按照动力学地面形变量的空间高相关特点，以 InSAR 监测量采样历元时刻为单元，由给定的低通滤波器，构造低通监测量参考面，分离 InSAR 监测量野值、粗差和突变等非动力学形变信号，以及 SAR 多路径效应和复杂粗糙地表环境干扰。

[输入]InSAR 监测量记录时序文件。

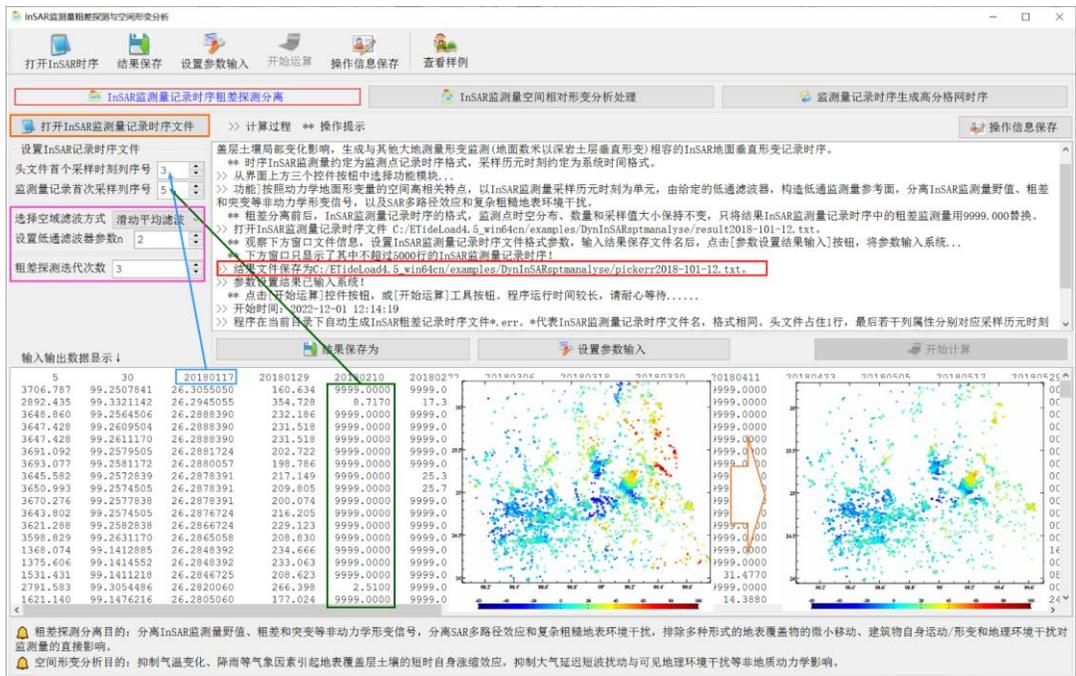
[参数设置]输入 InSAR 监测量记录时序文件格式参数，选择空域滤波方式，输入低通滤波参数和粗差探测迭代次数。

[输出]无粗差的 InSAR 监测量记录时序文件，InSAR 粗差记录时序文件。

粗差分离前后，InSAR 监测量记录时序的格式，监测点时空分布、数量和采样值大小保持不变，只将结果 InSAR 监测量记录时序中的粗差监测量用 9999.000 替换。

InSAR 粗差记录时序文件*.err。*是无粗差的 InSAR 监测量记录时序文件名，文件格式与 InSAR 监测量记录时序文件相同。头文件占住 1 行，最后若干列属性分别对应采样历元时刻 InSAR 监测量的粗差率（百分比）。

粗差监测量记录时序中缺省值 9999.00 表示该 InSAR 监测量不是粗差，非缺省值表示该 InSAR 监测量是粗差，数值为原 InSAR 监测量值。



粗差探测分离目的：分离 InSAR 监测量野值、粗差和突变等非动力学形变信号，分离 SAR 多路径效应和复杂粗糙地表环境干扰，排除多种形式的地表覆盖物的微小移动、建筑物自身运动/形变和地理环境干扰对监测量的直接影响。

5.2.2 InSAR 监测量空间相对形变分析处理

[功能]按照动力学地面垂直形变量与动力源/作用点距离或距离平方近似反比的空间变化性质，以 InSAR 监测量采样历元时刻为单元，按给定的空间滤波算法，抑制或削弱非地质动力学作用的极浅地表局部变化影响。

[输入]InSAR 监测量记录时序文件。

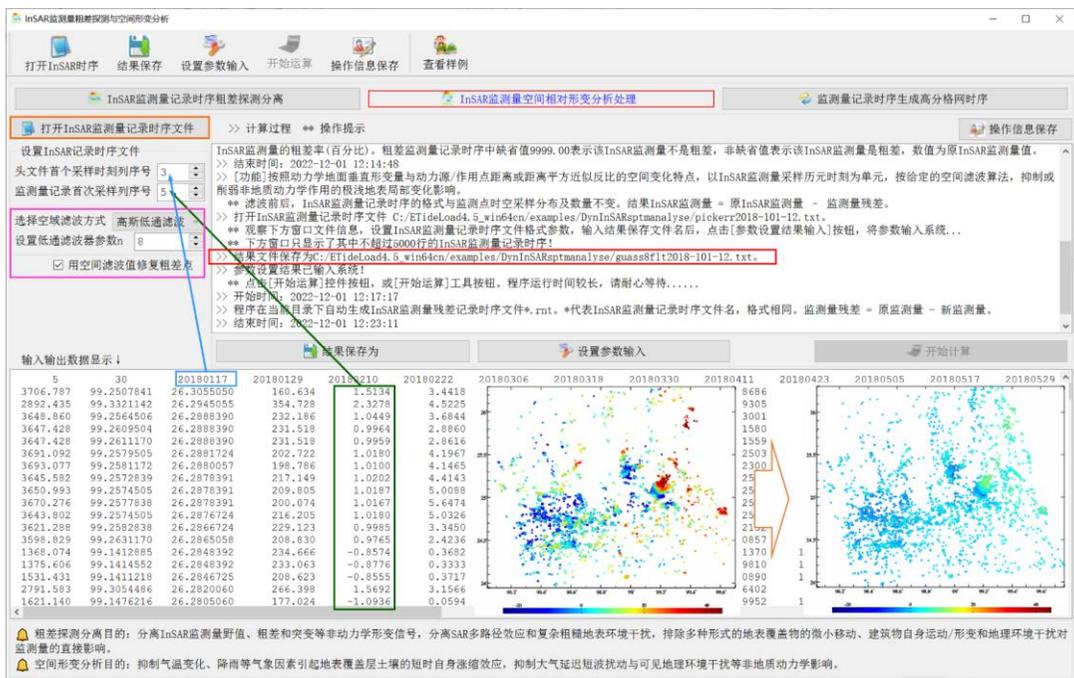
[参数设置]输入 InSAR 监测量记录时序文件格式参数，选择空域滤波方式，输入低通滤波参数，选择是否用空间滤波值修复粗差点。

[输出]滤波后的 InSAR 监测量记录时序文件，InSAR 监测量残差记录时序文件。

滤波前后，InSAR 监测量记录时序的格式与监测点时空采样分布及数量不变。结果 InSAR 监测量 = 原 InSAR 监测量 - 监测量残差。

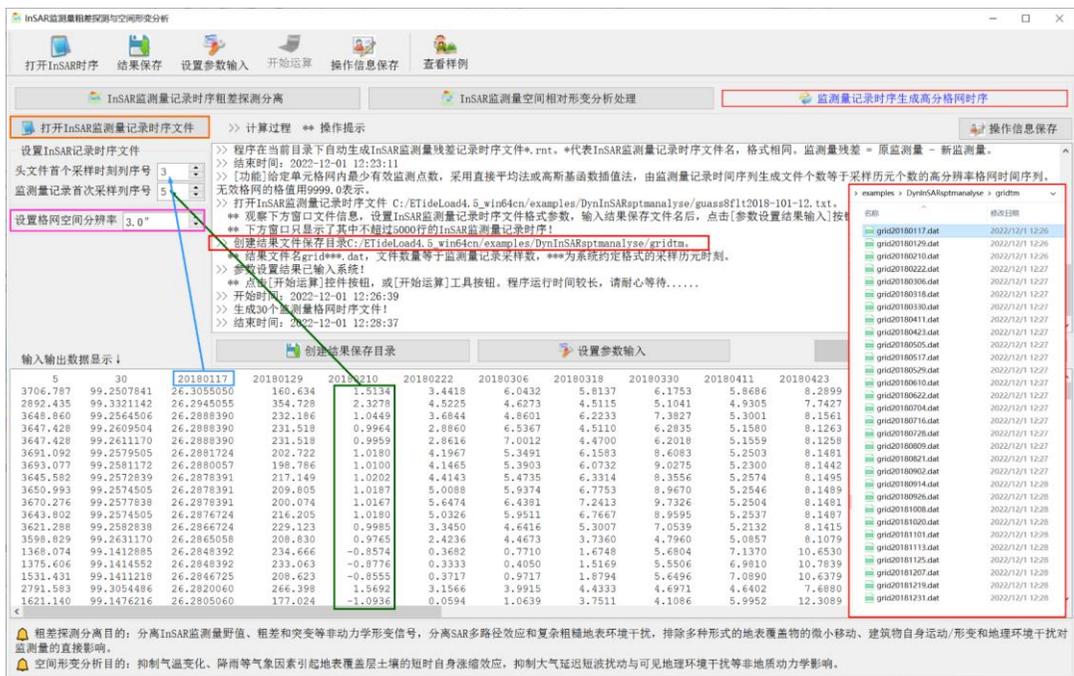
InSAR 监测量残差记录时序文件*.rnt。*是滤波后的 InSAR 监测量记录时序文件名，格式与 InSAR 监测量记录时序文件相同。监测量残差 = 原监测量 - 新监测量。

空间形变分析目的：抑制气温变化、降雨等气象因素引起地表覆盖层土壤的短时自身涨缩效应，抑制大气延迟短波扰动与可见地理环境干扰等非地质动力学影响。



5.2.3 监测量记录时序生成高分格网时序

[功能]给定单元格网内最少有效监测点数，采用直接平均法或高斯基函数插值法，由监测量记录时间序列生成文件个数等于采样历元个数的高分辨率格网时间序列。无效格网单元的格值用 9999.0 表示。



5.3 CORS网控制 InSAR 时空协同监测处理

[目标]统一多源异构时序 InSAR 监测量（已分离地表及浅层土壤垂直变化）与 CORS 网大地高变化记录时序的参考历元，通过 CORS 网 InSAR 垂直形变的相容性分析，CORS 网时空监测基约束 InSAR 监测量整体平差等运算，实现时序 InSAR 监测量时空基准的高度统一，控制时序 InSAR 监测量误差随时间累积。

时序 InSAR 监测量文件约定为监测点记录时序文件格式，采样历元时刻约定为 ETideLoad 长整数格式。

地面 CORS 网控制时空 InSAR 协同监测目的：①高精度修复 InSAR 监测量的潮汐和非潮汐负荷效应，补偿空间中长波对流层模型误差；②当 CORS 站不少于 3 座时，能精密修复差分干涉尺度误差，补偿其他各种空间中长波误差影响；③高精度修复空间尺度大于 InSAR 监测区域的时变信息，精密控制时序 InSAR 监测量随时间的累积误差。

5.3.1 监测量记录时序参考历元统一

[功能]设置参考历元时刻（也称监测基准时间），按三次样条插值、高斯基函数插值或时域滤波分析方式，估计所有监测点时序在参考历元时刻的采样值，并将其从相应记录时序采样值中移去，从而实现全部监测点的参考历元统一。所有记录时序在参考历元时刻的采样值恒为零。

The screenshot displays the software interface for CORS network control InSAR spatial-temporal collaborative monitoring. The main window is titled "CORS网控制InSAR时空协同监测处理". A dialog box titled "监测量记录时序参考历元统一" is open, showing the following fields and values:

- 打开InSAR监测量记录时序文件: [Empty]
- 设置InSAR记录时序: 3
- 监测量记录首次采样序号: 5
- 输入参考历元时刻: 2019050812
- 选择时间插值方式: 高斯基函数插值

The dialog box also contains a "计算过程" (Calculation Process) section with the following text:

一、控制时序InSAR监测量误差随时间累积。
** 时序InSAR监测量约定为监测点记录时序格式，采样历元时刻约定为系统时间格式。
** 从界面上方三个控件按钮中选择功能模块...
** [功能]设置参考历元时刻(也称监测基准时间)，按三次样条插值、高斯基函数插值或时域滤波分析方式，估计所有监测点时序在参考历元时刻的采样值，并将其从相应记录时序采样值中移去，从而实现全部监测点的参考历元统一。所有记录时序在参考历元时刻的采样值恒为零。
** 当参考历元时刻监测量采样值无效时，程序将该监测量记录时序分离到文件***.rep.
** 打开InSAR监测量记录时序文件 C:\ETideLoad4.5_win64cn\examples\DynCORSctrlInSAR\guass6f1t2019-101-12.txt.
** 显示***窗口文件信息，设置InSAR监测量记录时序文件格式参数...
** 下方窗口只显示其中不超过5000行的InSAR监测量记录时序！
** 结果文件保存为C:\ETideLoad4.5_win64cn\examples\DynCORSctrlInSAR\guass6f1t2019-101-12ep.txt.
** 结束文件第一个数据为参考历元时刻。
** 参数设置结果已输入系统！
** 点击[开始运算]控件按钮，或[开始运算]工具按钮.....
** 开始时间: 2022-12-01 13:00:00
** 完成监测量记录时序参考历元统一计算！
** 结束时间: 2022-12-01 13:00:06

Below the dialog box, there is a table showing input and output data for various monitoring points. The table has columns for input data and output data for different reference years.

Input Data	2019050812	20190124	20190205	20190217	20190301	20190313	20190325	20190406	20190430	20190511			
3638.931	99.2412845	26.3083382	138.029	1.6340	4.5939	8.2610	-0.7521	1.2282	-0.6846	-1.3457	-0.0400		
3638.931	99.2412845	26.3081716	138.029	2.1989	4.5324	26.4266	-0.6111	-0.5111	-0.6400	-3.3619	0.0000		
3688.435	99.2432844	26.3073383	151.494	1.3589	3.1835	1	5	28	1	5	28		
3693.478	99.2436177	26.3066176	91.102	4.2504	5.3221	3	3638.931	99.2412845	26.3081716	138.029	-11.0502	-11.0502	-1.3830
3641.662	99.2437844	26.3061716	122.215	7.4359	4.5853	3	3638.931	99.2412845	26.3081716	138.029	-13.2342	-10.9007	-7.3566
3638.264	99.2434511	26.3060050	105.500	8.7021	4.4570	4	3688.435	99.2432844	26.3073383	151.494	-15.5666	-13.7420	-8.6483
3614.724	99.2432844	26.3055050	113.108	9.2743	4.4373	5	3693.478	99.2436177	26.3066176	91.102	-14.6982	-13.4275	-8.9099
3588.857	99.2429511	26.3053383	102.809	8.7374	4.4519	6	3641.662	99.2437844	26.3061716	122.215	-9.2857	-12.1363	-8.1947
3747.716	99.2509508	26.3045050	-36.574	16.2598	14.5560	7	3638.264	99.2434511	26.3060050	105.500	-8.8257	-12.7708	-8.6310
3495.068	99.2447844	26.3025051	38.425	10.5116	5.2354	8	3614.724	99.2432844	26.3055050	113.108	-2.5356	-4.2394	-5.3806
2147.368	99.1116230	26.2835059	45.125	1.8613	2.5223	9	3588.857	99.2429511	26.3053383	102.809	-6.4449	-10.7304	-7.2778
3511.911	99.2631170	26.2793394	-178.770	3.9216	2.4083	10	3495.068	99.2447844	26.3025051	38.425	-4.4449	-4.2394	-5.3806
3170.213	99.2541173	26.2783394	43.796	12.2205	10.8640	11	2147.368	99.1116230	26.2835059	45.125	-4.6100	-3.9490	-4.5344
2217.898	99.2302849	26.2690056	179.906	2.0891	-2.8369	12	3511.911	99.2631170	26.2793394	-178.770	-1.5400	-3.0533	-4.4840
2738.596	99.2929491	26.2655066	59.076	15.3391	11.9739	13	3170.213	99.2541173	26.2783394	43.796	-1.4602	-2.8167	-7.3350
1610.268	99.1304556	26.2476740	10.316	3.1182	2.9676	14	2217.898	99.2302849	26.2690056	179.906	-1.5604	-6.4864	-5.3034
1597.445	99.1437884	26.2341745	60.312	7.9680	8.5205	15	2738.596	99.2929491	26.2655066	59.076	-6.1245	-6.5034	-6.0074
2622.976	99.1156229	26.2253415	137.279	1.3582	0.7416	16	1610.268	99.1304556	26.2476740	10.316	-3.6370	-3.7876	-2.9901
3803.835	99.2016194	26.2058423	-415.811	2.3389	1.8390	17	1597.445	99.1437884	26.2341745	60.312	-4.0771	-3.5246	-6.3567
2519.717	99.1602877	26.2040091	-51.331	2.3405	1.1678	18	2622.976	99.1156229	26.2253415	137.279	-2.2586	-2.8764	-3.6179
2479.463	99.1599544	26.2035091	-40.762	2.3423	1.1676	19	3803.835	99.2016194	26.2058423	-415.811	-2.0618	-2.5617	-3.4914
						20	2519.717	99.1602877	26.2040091	-51.331	-1.0519	-2.2246	-3.4704
						21	2479.463	99.1599544	26.2035091	-40.762	-1.0461	-2.2008	-3.4678
						22	1913.282	99.1427884	26.2033424	20.677	-1.3872	-2.3914	-3.4614
						23	3781.985	99.2024827	26.2015092	-470.562	-1.8393	-2.3966	-3.4718
						24	2384.009	99.3139483	26.1903429	293.680	-6.8375	-5.8878	-3.9271

At the bottom of the interface, there is a section titled "地面CORS网控制时空InSAR协同监测目的" (Purpose of CORS network control InSAR spatial-temporal collaborative monitoring on the ground), which lists the following objectives:

- 高精度修复InSAR监测量的潮汐和非潮汐负荷影响，补偿空间中长波对流层模型误差；
- 当CORS站不少于3座时，能精密修复差分干涉尺度误差，补偿其他各种空间中长波误差影响；
- 高精度修复空间尺度大于InSAR监测区域的时变信息，精密控制时序InSAR监测量随时间的累积误差。

[输入]InSAR 监测量记录时序文件。

[参数设置]输入 InSAR 监测量记录时序文件格式参数，输入参考历元时刻，选择参考历元时刻监测量插值方式。

当监测量记录时序信号有噪声或缺失采样较多时，建议选择高斯基函数插值或时域滤波分析方式。

当参考历元超出有效监测时段范围时，若仍选择三次样条插值时，程序会自动按高斯基函数法外推参考历元监测量（采样值）。

[输出]参考历元统一后的 InSAR 监测量记录时序文件，格式不变。

当参考历元时刻监测量采样值无效时，程序将该监测量记录时序分离到文件***.rep。***为输入文件名。

5.3.2 CORS 网 InSAR 垂直形变监测相容性分析

[功能]由 CORS 站周边 InSAR 监测点的监测量，按直接平均法计算 CORS 站处 InSAR 监测量，由 CORS 网站点大地高变化记录时序，按时间内插 InSAR 采样历元时刻的 CORS 站大地高变化；进而对 CORS 站进行全组合构成基线网，分别计算每条 CORS 基线的 CORS 站大地高双差值时序和 InSAR 监测量双差值时序，用于评估 CORS 网和 InSAR 监测量之间垂直形变的相容性，评价 InSAR 监测量粗差探测与空间分析算法的有效性。

输出CORS站大地高变化与InSAR监测量比较文件CORSInSARpntcomp.txt

Station ID	Year	X (m)	Y (m)	Z (m)	...		
19	17997	20190124	20190205	20190217	20190301	20190313	...
CHA3	99.6148	24.8248	1630.6	-8.5564	-3.3881	-6.5837	...
CHA3	99.6148	24.8248	1630.6	4.9582	-9.1400	-15.6493	...
MENT	99.6325	24.8248	1630.6	53	53	53	...
MENT	99.6325	24.5268	1048.9	-10.7378	-4.9710	-7.6137	...
MENT	99.6325	24.5268	1048.9	27.2030	11.7049	2.2538	...
MENT	99.6325	24.5268	1048.9	5	5	5	...
YNSD	99.1902	24.7128	1478.8	-9.6885	-4.1335	-6.6074	...
YNSD	99.1902	24.7128	1478.8	14.6424	5.5687	0.3281	...

地面CORS网控制时空InSAR协同监测目的

- 高精度修复InSAR监测量的潮汐和非潮汐负荷影响，补偿空间中长时间对流程模型误差；
- 当CORS站不少于3座时，能精密修复差分干涉误差，补偿其他各种空间中长时间误差影响；
- 高精度修复空间尺度大于InSAR监测区域的时变信息，精密控制时序InSAR监测量随时间的累积误差。

[输入]InSAR 监测量记录时序文件， CORS 网大地高变化记录时序文件。

程序要求 InSAR 监测量记录时序和 CORS 网大地高变化记录时序的参考历元统一。

[参数设置]输入 InSAR 监测量记录时序文件和 CORS 网大地高变化记录时序文件格式参数，输入参考历元时刻，选择 CORS 网时序插值方式，输入 CORS 站周边搜索半径及最少 InSAR 监测点数。

当监测量记录时序信号有噪声或缺失采样较多时，建议选择高斯基函数插值或时域滤波分析方式。

当参考历元超出有效监测时段范围时，若仍选择三次样条插值时，程序自动按高斯基函数法外推参考历元采样值。

[输出]CORS 站大地高变化与 InSAR 监测量比较文件 CORSInSARpntcomp.txt, 系列 CORS 基线大地高双差与 InSAR 监测量双差记录时序文件 dblediff*.txt。

比较文件 CORSInSARpntcomp.txt。头文件包括 InSAR 监测范围 CORS 站总数，InSAR 监测点数量，采样历元时刻；每座基准 CORS 站参数记录由 3 行构成，第 1 行是 CORS 站在 InSAR 采样时刻的大地高变化值记录时序，第 2 行是 CORS 站周边 InSAR 监测点的监测量平均记录时序，第 3 行是参与平均计算的 InSAR 监测点数记录时序。

系列双差记录时序文件 dblediff*.txt。* $=1\sim n/2$ 表示时间差分的采样间隔倍数， n 为采样历元数，即最大差分时间间隔约为时序长度的一半。头文件包括差分采样历元数 $n/2$ ， $n/2$ 个起始采样历元。每条 CORS 基线双差记录时序由两行记录组成，第 1 行记录为 CORS 基线的 InSAR 监测量双差时序，第 2 行为 CORS 网基线的大地高双差时序。

CORS 网基线 InSAR 监测量双差算法。先由 CORS 站周边 InSAR 监测点的当前历元监测量，按直接平均法计算 CORS 站处 InSAR 监测量，再计算 InSAR 采样历元时刻基线两端监测量之差，最后计算后续历元监测量差与当前历元监测量差的时间差分，生成 CORS 基线 InSAR 监测量双差时序。

5.3.3 InSAR 监测量记录时序时空基准约束平差

[功能]由[CORS 网 InSAR 垂直形变监测相容性分析]模块生成的基准 CORS 站大地高变化与 InSAR 监测量比较文件 CORSInSARpntcomp.txt，构造时空监测基准传递参数，建立时空基准条件约束方程，对全部 InSAR 监测量进行整体平差，实现时序 InSAR 监测量 CORS 网时空监测基准的高度统一与高精度传递。

[输入]延续 CORS 网 InSAR 垂直形变监测相容性分析输入输出文件（无需用户输入）。

[参数设置]设置检核框[CORS 网基线变化线性空间尺度约束]。

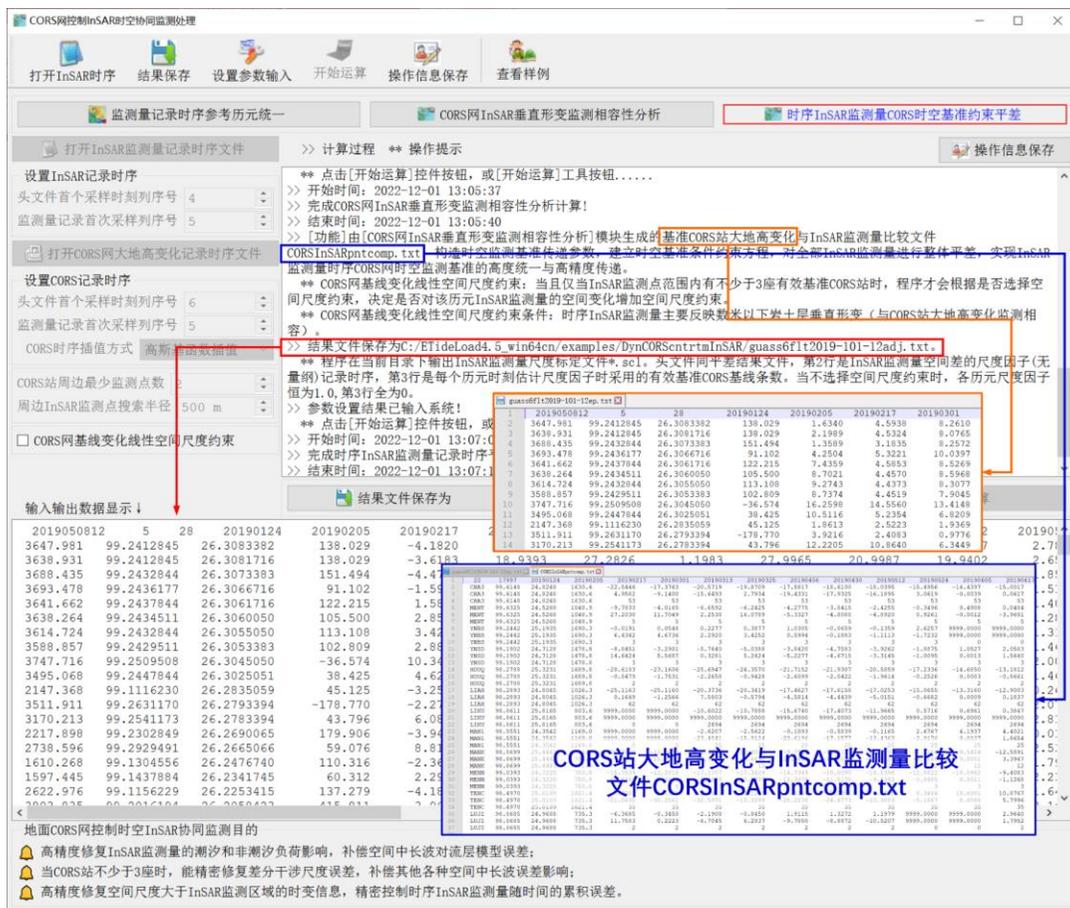
当且仅当 InSAR 监测点范围内有不少于 3 座有效基准 CORS 站时，程序才会根据用户要求是否选择空间尺度约束，决定是否对该历元 InSAR 监测量的空间变化增加空间尺度约束。

[输出]InSAR 监测量平差值记录时序文件，格式同 InSAR 监测量记录时序；InSAR 监测量尺度标定文件*.scl，*为平差值记录时序文件名。

尺度标定文件*.scl 的头文件同 InSAR 监测量平差值记录时序文件，第 2 行是 InSAR 监测量空间差的尺度因子记录时序，第 3 行是每个历元时刻尺度因子估计时采用的有效基准 CORS 基线条数。当不选择空间尺度约束时，各历元尺度因子恒为 1.0，第 3 行全为 0。

尺度因子是评价 InSAR 监测质量的重要量化指标。尺度因子超出 (0.5, 2.0) 的历元时刻，该期 InSAR 监测量垂直形变分离不充分，或监测质量较差。

CORS 网基线变化线性空间尺度约束条件：时序 InSAR 监测量主要反映数米以下岩土层垂直形变（与 CORS 站大地高变化监测相容）。



5.4 多源异构 InSAR 的深度融合与时序分析

[目标]先对 CORS 网时空监测基准或参考历元统一后的多源异构时序 InSAR 监测量按时间和空间进行深度融合，再以每个 InSAR (监测点的) 监测量记录时序为单元，进行时序分析，从而实现多源异构的时序 InSAR 协同监测与时序形变分析。

5.4.1 同轨时序 InSAR 监测量长时序拼接

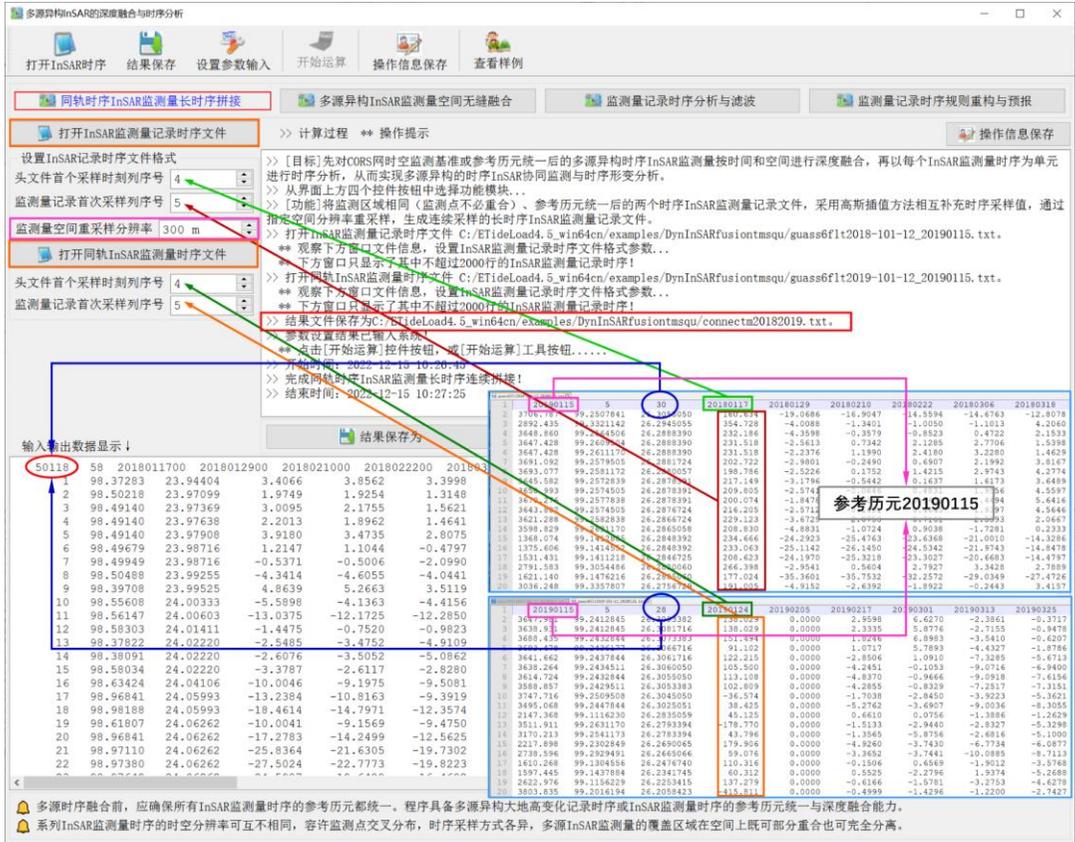
[功能]将监测区域相同 (监测点不必重合)、参考历元统一后的两个时序 InSAR 监测量记录文件，采用高斯插值方法相互补充时序采样值，通过指定空间分辨率重采样，生成连续采样的长时序 InSAR 监测量记录文件。

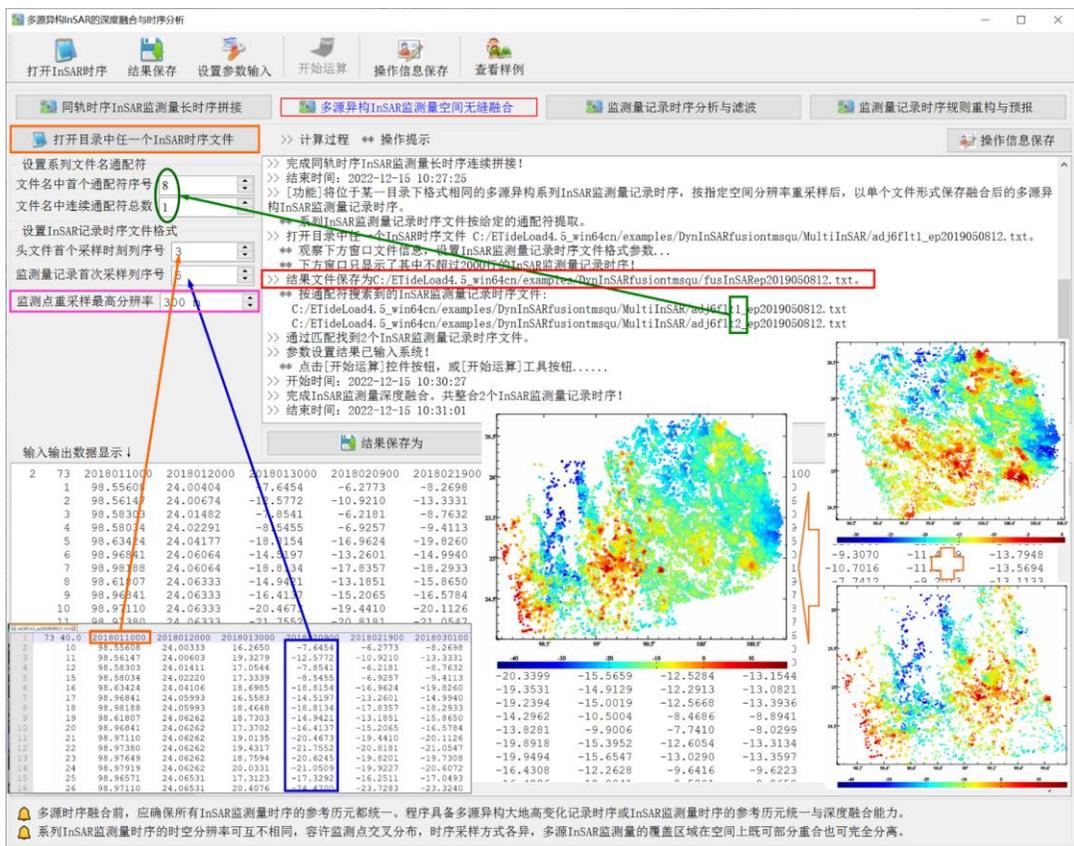
[输入]同一轨迹（测区）两个相邻（或部分重合）时段 InSAR 监测记录时序文件。

程序要求：(1) 两个 InSAR 监测记录时序，在空间覆盖上基本重合，在监测时段上或前后相邻，或部分时段重合，以满足参考历元时刻统一的条件；(2) 两组 InSAR 监测记录时序的参考历元必须统一，本例事先采用高斯基函数插值法将两个 InSAR 监测记录时序的参考历元统一到 20190115。

[参数设置]设置两组 InSAR 监测记录时序文件的格式参数，输入监测点空间重采样分辨率。

[输出]长时序 InSAR 监测记录文件。





[参数设置]多个 InSAR 监测量时序文件名通配符参数, InSAR 监测量记录时序文件格式参数, 监测点空间重采样分辨率。

[输出]空间融合后的 InSAR 监测量记录文件。

5.4.3 监测量记录时序分析与滤波

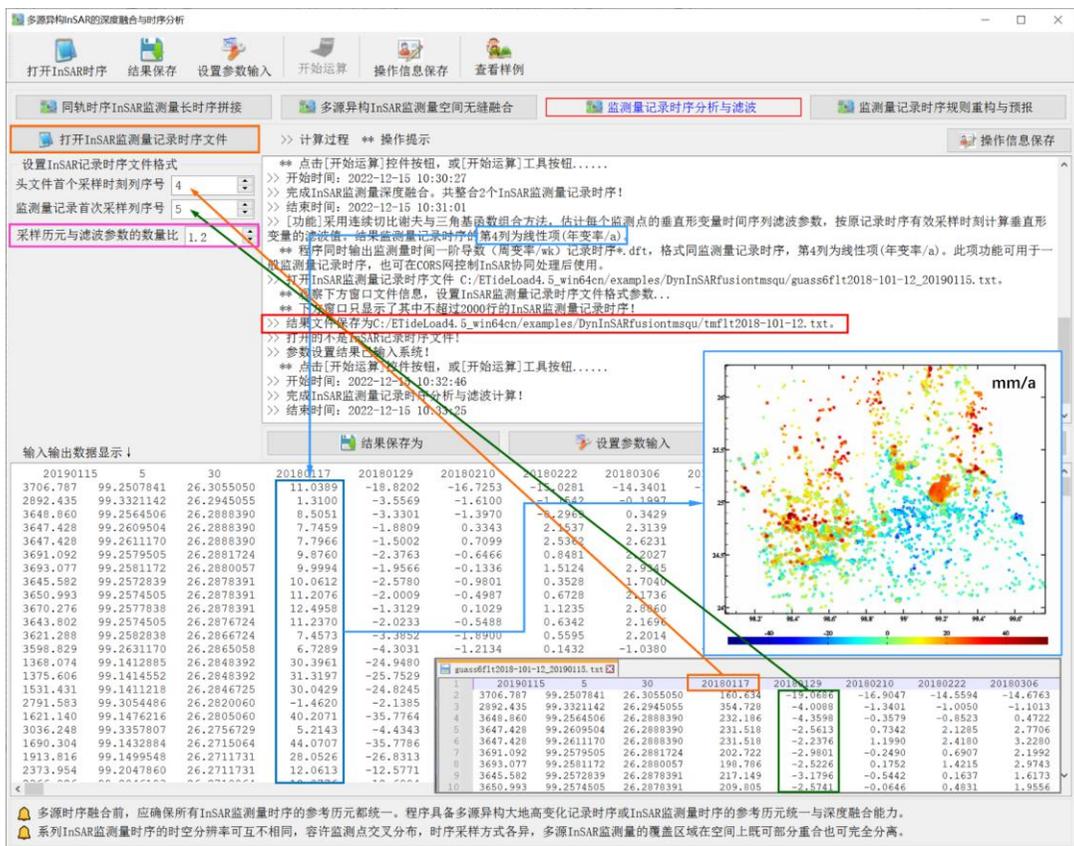
[功能]采用连续切比谢夫与三角基函数组合方法, 估计每个监测点的垂直形变量时间序列滤波参数, 按原记录时序有效采样时刻计算垂直形变量的滤波值。结果监测量记录时序的第 4 列为线性项 (年变率/a)。

[输入]监测量记录时序文件。

[参数设置]设置监测量记录时序文件格式参数, 输入参考历元 (监测点采样数) 与滤波参数个数的比值。

[输出]时域滤波后的监测量记录时序文件, 监测量时间一阶导数 (周变率/wk) 记录时序 *.dft。*为输入文件名。两个文件记录的第 4 均为线性项 (年变率/a)。

此项功能可用于一般监测量记录时序分析滤波, 也可在 CORS 网控制 InSAR 协同处理后使用。



5.4.4 监测记录时序规则重构与预报

[功能]采用连续切比谢夫与三角基函数组合方法, 估计每个监测点的垂直形变时间序列滤波参数, 按给定时间序列采样方式, 重构监测记录时序。结果监测记录时序的第4列为线性项(年变率/a)。

[输入]监测记录时序文件。

[参数设置]设置监测记录时序文件格式参数, 输入参考历元(监测点采样数)与滤波参数个数的比值。

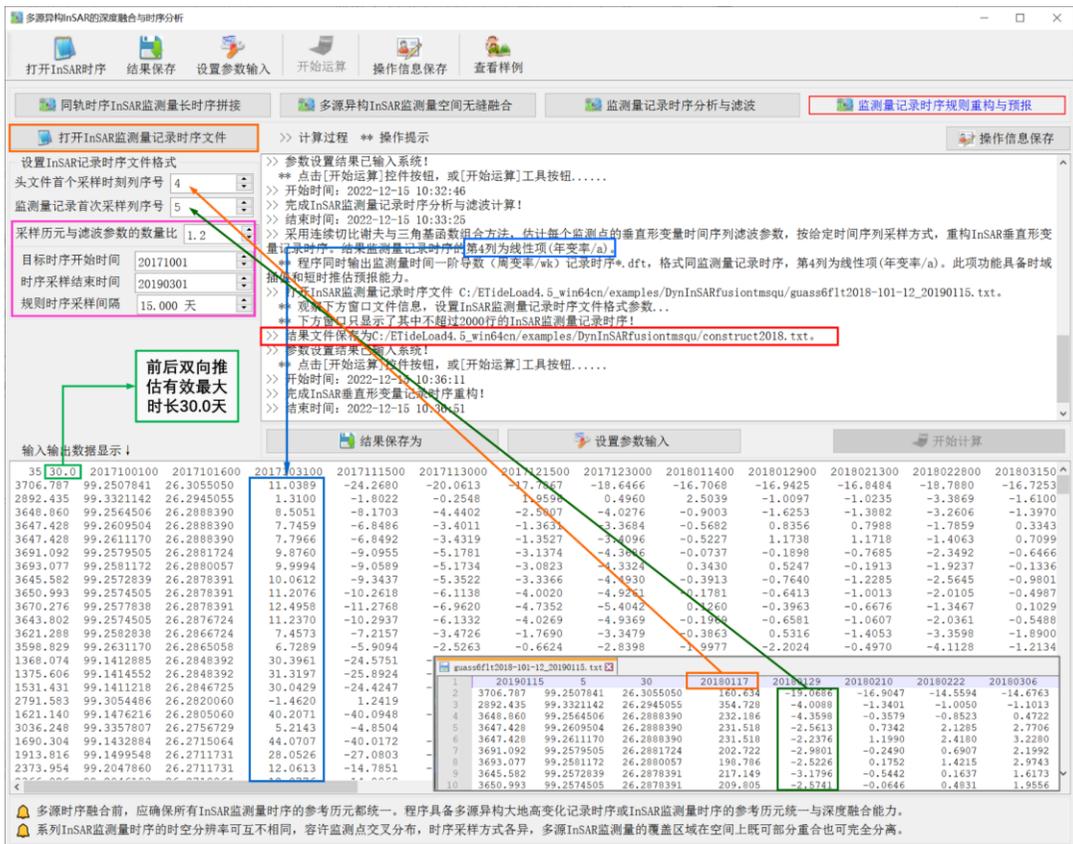
[输出]重构的监测记录时序文件, 监测时间一阶导数(周变率/wk)记录时序*.dft。*为输入文件名。两个文件记录的第4均为线性项(年变率/a)。

当开始时间早于原监测记录时序首个采样历元时刻时, 程序强制令开始时间 = 首个采样历元时刻 - 采样间隔 * 采样总数 * 5%。

当结束时间迟于原监测记录时序最后一个采样历元时刻时, 程序强制令结束时间 = 最后一个采样历元时刻 + 采样间隔 * 采样总数 * 5%。

时序最大推估时长。前后推估的最大时长 $dt = \text{最大外推步长} * \text{采样间隔}$ 。当 $dt > \text{采样间隔} * \text{采样总数} * 5\%$ 时, 程序强制 $dt = \text{采样间隔} * \text{采样总数} * 5\%$ 。

输出头文件格式: 采样历元数, 时序最大推估时长 dt , 采样历元时刻。



此项功能具备时域插值和短时推估预报能力。

多源时序融合前,应确保所有监测量记录时序的参考历元和时空监测基准完全统一。

系列 InSAR 监测量的时空分辨率可以互不相同,容许监测点位交叉分布,监测量时序采样方式各异,多源 InSAR 监测量的覆盖区域在空间上既可部分重合也可完全分离。

5.5 垂直形变格网时序地面稳定性变化计算

[目标]由地面垂直形变速率及其水平梯度格网模型,按照 ETideLoad 定义的地面稳定性降低定量辨识准则,采用统计规格化整合算法,定量估计地面稳定性变化(地面稳定性降低/稳态/增大,无量纲)格网。

程序要求地面垂直形变梯度格网采样历元时刻必须与垂直形变速率采样历元时刻相同,即头文件第 7 个属性数值相等。

地面稳定性变化格网时序,用于定量表达地面稳定性降低现象发生的时间和位置、持续影响时间和空间影响范围。

基于垂直形变格网时序的地面稳定性降低定量辨识准则(客观规律,确定性/无疑义准则,ETideLoad 自定义):
 ①地面垂直形变速率较大(大于零),此时此地,地面向上抬升。
 ②地面垂直形变率水平梯度(模)较大,此时此地,地面出现局部不均匀扭曲。
 ③地形坡度值较大。

地面垂直形变可以是地面大地高变化，也可以是地面正（常）高变化（mm）。

监测量时序统计规格化整合算法，请参考[地面稳定性变化时序优化整合与短时预报]程序界面说明。

监测量所赋权值和指数不随时间变化，仅用于大致区分不同类型监测量对地质环境响应的空间差异性，粗略估计或调整可满足需要。

地面稳定性变化（无量纲）动力学含义：某采样时刻某单元格网处的格值大于零，代表此时此地的稳定性正在降低，格值小于零代表此时此地的稳定性正在提高。

5.5.1 单单元规格化地面稳定性变化格网估计

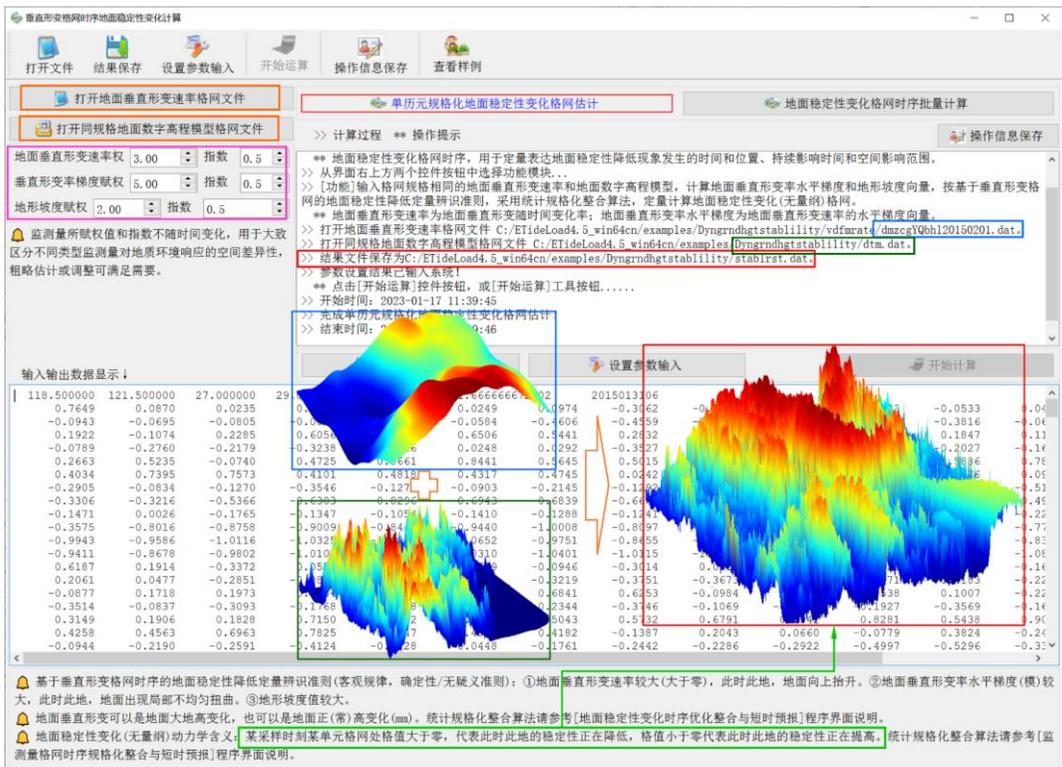
[功能]输入格网规格相同的地面垂直形变速率和地面数字高程模型，计算地面垂直形变率水平梯度和地形坡度向量，按基于垂直形变格网的地面稳定性降低定量辨识准则，采用统计规格化整合算法，定量计算地面稳定性变化（无量纲）格网。

[输入]格网规格相同的地面垂直形变速率格网文件和地面数字高程模型格网文件。

[参数设置]地面垂直形变速率、垂直形变速率水平梯度和地形坡度的权值和指数。

[输出]规格化的地面稳定变化格网文件。

地面垂直形变速率为地面垂直形变随时间变化率；地面垂直形变率水平梯度为地面垂直形变速率的水平梯度向量。



5.5.2 地面稳定性变化格网时间序列计算

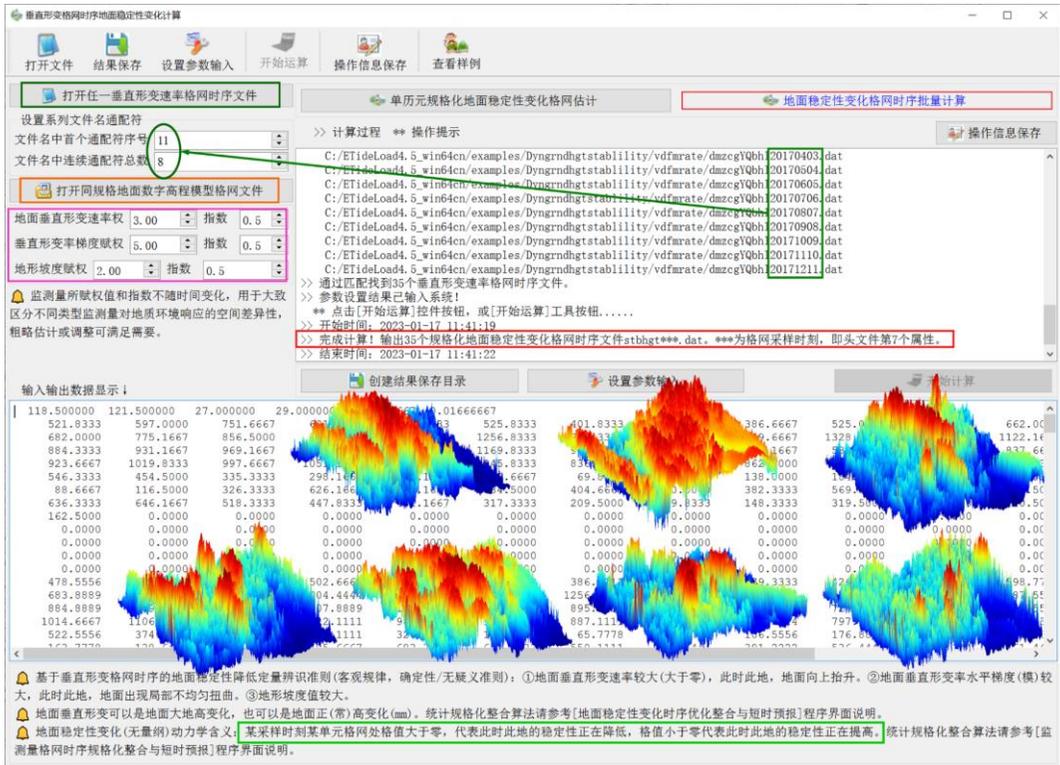
[功能]输入格网规格相同的地面垂直形变速率格网时序和地面数字高程模型格网，计算

地面垂直形变率水平梯度向量格网时序和地形坡度向量格网，按基于垂直形变格网的地面稳定性降低定量辨识准则，采用统计规格化整合算法，定量计算规格化地面稳定性变化（无量纲）格网时间序列。

[输入]地面重力速率格网时间序列文件和扩展的地面数字高程模型格网文件。

[参数设置]输入地面重力速率、重力速率水平梯度和扰动重力局部地形影响的权值和指数。

[输出]规格化地面稳定性变化格网时序文件 stbhgt***.dat。***为格网采样时刻，即头文件第7个属性。



5.6 重力变化格网时序地面稳定性变化计算

[目标]由地面重力（扰动重力）速率及其水平梯度格网模型，按照 ETideLoad 定义的地面稳定性降低定量辨识准则，采用统计规格化整合算法，定量估计地面稳定性变化（地面稳定性降低/稳态/增大，无量纲）格网。

基于重力变化格网时序的地面稳定性降低定量辨识准则（客观规律，确定性/无疑义准则，ETideLoad 自定义）：①地面重力/扰动重力速率较大（小于零），此时此地，地面向上回弹。②地面重力速率水平梯度（模）较大，此时此地，地面存在局部不均匀作用力，产生剪切。③扰动重力的局部地形影响值（反号）较大。

扰动重力的局部地形影响，用于定量表达地形起伏的剧烈程度。程序要求地面数字高程模型格网的经纬度范围应在地面重力速率格网的基础上，外扩不少于 50km，用于积分法抗

动重力局部地形影响计算。

5.6.1 单历元规格化地面稳定性变化格网估计

[功能]由地面重力速率格网计算其水平梯度（极坐标形式），由扩展的地面数字高程模型格网（经纬度范围外扩不少于 50km）计算扰动重力局部地形影响，按基于地面重力变化格网的地面稳定性降低定量辨识准则，采用统计规格化整合算法，定量计算地面稳定性变化（无量纲）格网。

[输入]地面重力速率格网文件和扩展的地面数字高程模型格网文件。

[参数设置]输入地面重力速率、重力速率水平梯度和扰动重力局部地形影响的权值和指数。

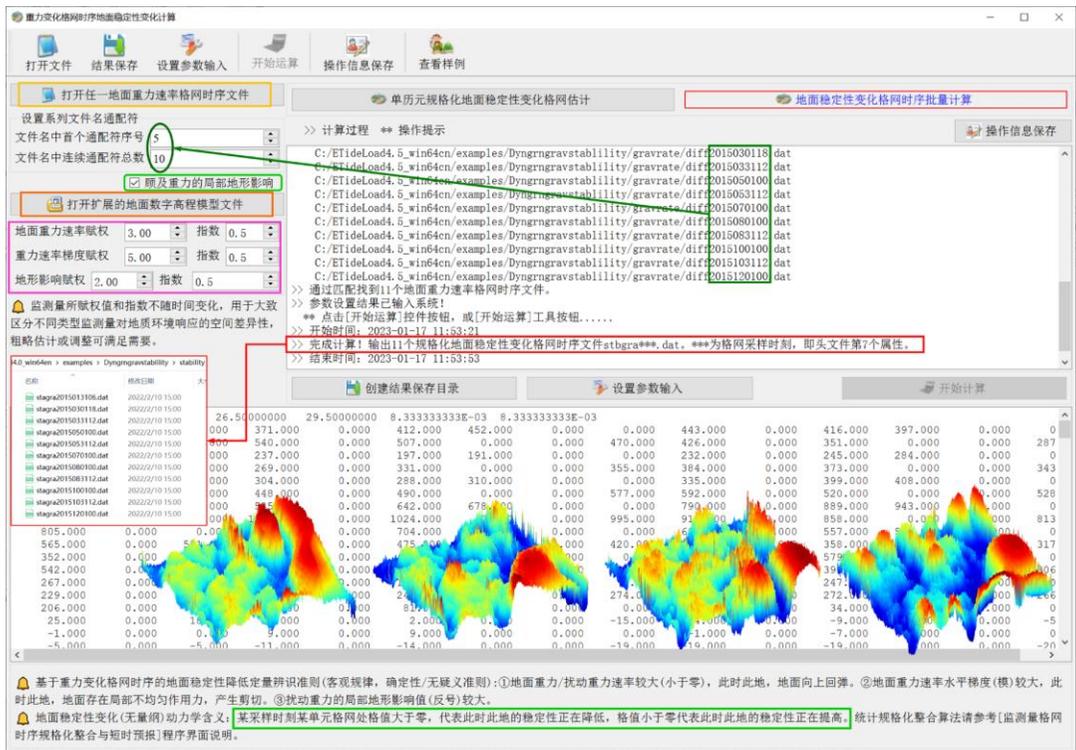
[输出]规格化的地面稳定变化格网文件。

118.50000000	121.50000000	27.00000000	29.00000000	0.01666667	0.16666667	2015013106
0.8524	0.5934	0.8504	0.3567	0.3348	0.4529	0.4042
0.6365	0.5987	0.6464	0.7315	0.7333	0.6563	0.7057
0.4897	0.4605	0.5265	0.6167	0.6167	0.6110	0.6582
1.1245	0.7552	0.8229	1.0852	0.7722	0.7033	1.0845
0.5414	0.5122	0.5385	0.3513	0.2937	0.3033	0.0769
0.1748	0.2181	0.2620	0.3313	0.4121	0.4060	0.5971
1.2196	1.0652	1.0743	1.1796	1.0169	1.0796	0.6990
0.1401	0.1350	0.1090	0.0886	0.0645	0.0645	0.1511
-0.1335	-0.1003	-0.0872	-0.2034	-0.1165	-0.2183	-0.48
-0.1500	-0.2072	-0.3075	-0.3126	-0.3010	-0.2154	-0.74
-0.2318	-0.2613	-0.2264	-0.2795	-0.3434	-0.2707	-0.30
-0.3132	-0.3766	-0.3613	-0.3989	-0.4732	-0.4878	-0.17
0.2799	0.5596	0.4495	0.3069	0.2787	0.3553	0.5117
0.6394	0.5900	0.6213	0.6799	0.6161	0.6633	0.6861
0.4076	0.4833	0.4521	0.5278	0.44	0.5319	0.5018
0.7399	0.7576	1.0819	1.1099	0.944	1.0227	0.9713
0.4446	0.4845	0.5031	0.3663	0.4732	0.4878	0.0724
0.2057	0.2276	0.2370	0.3791	0.3111	0.3553	0.5466
1.1255	0.9348	1.0515	1.1057	0.9083	1.116	0.7820
0.1333	0.0979	0.1081	0.1176	0.0902	0.0994	0.0279

5.6.2 地面稳定性变化格网时间序列计算

[功能]输入格网规格相同的地面重力速率格网时序，计算地面重力速率水平梯度向量（极坐标形式）格网时序，由扩展的地面数字高程模型格网（经纬度范围外扩不少于 50km）计算扰动重力局部地形影响，按基于地面重力变化格网的地面稳定性降低定量辨识准则，采用统计规格化整合算法，定量计算规格化地面稳定性变化格网时间序列。

[输出]规格化地面稳定性变化格网时序文件 stbhgt***.dat。***为格网采样时刻，即头文件第 7 个属性。



5.7 向量变化格网时序地面稳定性变化计算

[目标]由地面垂线偏差（地倾斜或水平形变）速率向量格网和地面数字高程模型，按照ETideLoad定义的地面稳定性降低定量辨识准则，采用统计规格化整合算法，定量估计地面稳定性变化（无量纲）格网。

基于向量变化格网时序的地面稳定性降低定量辨识准则（客观规律，确定性/无疑义准则）：①垂线偏差（地倾斜/水平形变）变化方向聚集或发散，此时此地，垂线偏差（地倾斜/水平形变）速率水平梯度较大，附近地面出现挤压或拉伸现象。②垂线偏差（地倾斜/水平形变）速率与地形水平梯度的向量内积较大（大于零），此时此地，沿地形坡度方向出现牵引力。

地面稳定性变化（无量纲）动力学含义：某采样时刻某单元格网处的格值大于零，代表此时此地的稳定性正在降低，格值小于零代表此时此地的稳定性正在提高。

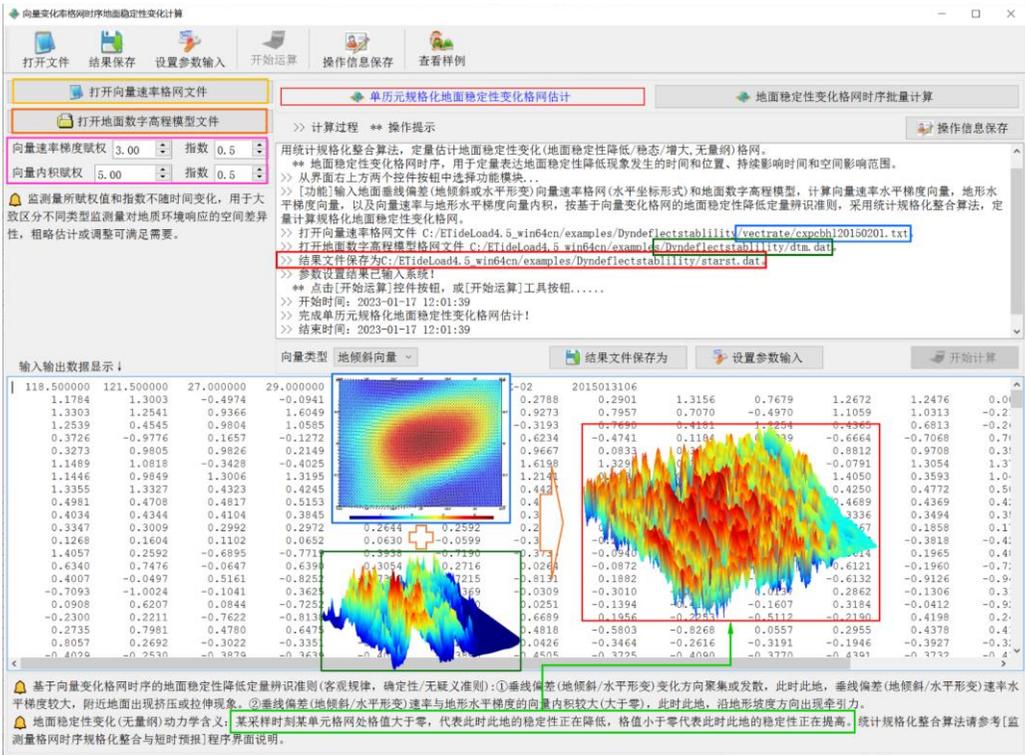
5.7.1 单兀元规格化地面稳定性变化格网估计

[功能]输入地面垂线偏差（地倾斜或水平形变）向量速率格网（水平坐标形式）和地面数字高程模型，计算向量速率水平梯度向量，地形水平梯度向量，以及向量速率与地形水平梯度向量内积，按基于向量变化格网的地面稳定性降低定量辨识准则，采用统计规格化整合算法，定量计算规格化地面稳定性变化格网。

[输入]地面垂线偏差（地倾斜或水平形变）向量速率格网（水平坐标形式）文件和地面数字高程模型文件。

[参数设置]向量形变速率和向量内积的权值和指数。

[输出]规格化的地面稳定变化格网文件。



5.7.2 地面稳定性变化格网时间序列计算

[功能]输入地面垂线偏差（地倾斜或水平形变）向量速率（水平坐标形式）格网时序和地面数字高程模型，计算向量速率水平梯度向量格网时序，以及向量速率与地形水平梯度内积格网时序，按基于向量变化格网的地面稳定性降低定量辨识准则，采用统计规格化整合算法，定量计算规格化地面稳定性变化格网时间序列。

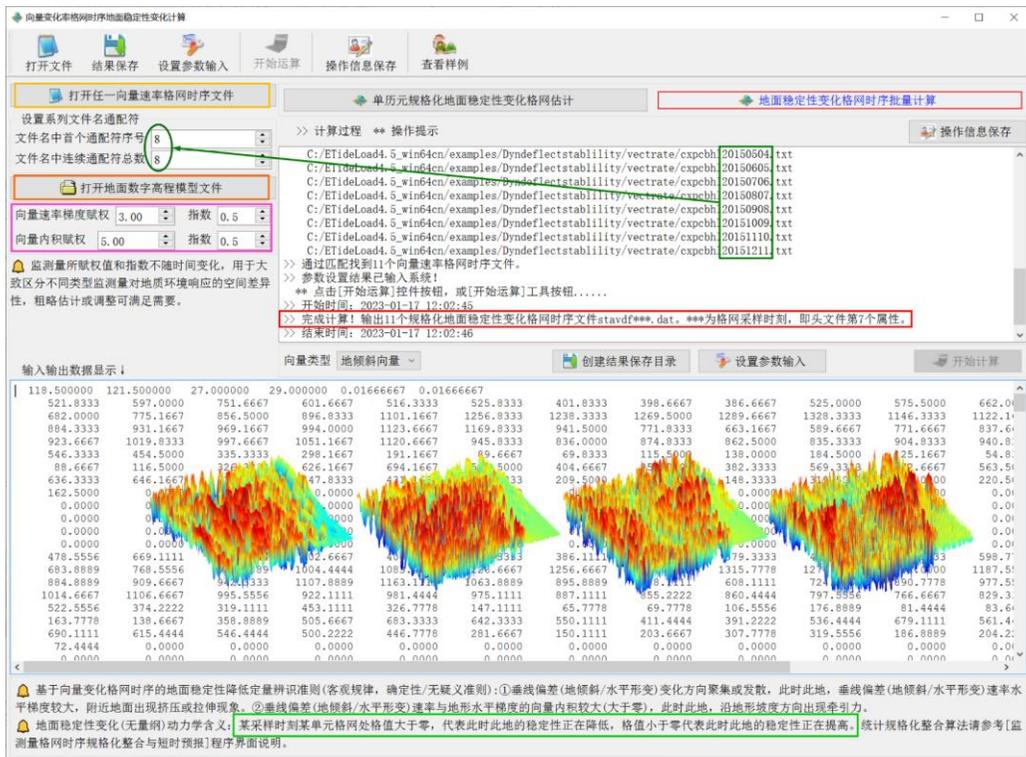
5.8 稳定性变化时序的优化与时空特征整合

[目标]采用统计规格化整合算法，以监测时段内历史地灾或险情事件为参考，通过微调基于各种监测量时序的地面稳定性变化权值和指数，优化地面稳定性变化格网时序，以体现或突出区域地面稳定性变化的时空特征。

5.8.1 两组监测量格网时序规格化整合

[功能]将格网规格相同、采样历元时刻一一对应的两组监测量格网时间序列，进行加权统计规格化整合，生成综合监测量格网时序，用于体现两种技术联合监测的时空动力学效应。当存在向量格网文件，程序自动取第一分量格网参与运算。

若将监测量格网时序文件名的所有字符都设置成通配符，则该组监测量格网时序只包含该文件格网的单个采样，此时程序实现一组监测量格网时序与单个要素格网或两个单个要素格网的规格化整合。



程序会自动搜索两组格网时序中格网规格和采样历元时刻相同的格网对，只有完全配对的两组监测量格网才会参与整合运算。本例中，第一组格网时序有 35 个文件，第二组格网时序有 11 个文件，但只有其中 3 对监测量格网的采样历元时刻配对，因此，最终完成 3 对监测量格网的规格化整合。

监测量 a, b 格网时序统计规格化整合 x 算法：

$$x = \text{sgn}(A)|A|^{n_a}Q_a + \text{sgn}(B)|B|^{n_b}Q_b$$

式中： $A = (a - \bar{a})/\sigma_a, B = (b - \bar{b})/\sigma_b$;

$$Q_a = \frac{q_b}{q_a + q_b}, Q_b = \frac{q_a}{q_a + q_b}; \text{sgn}(\ast) \text{ 为符号函数。}$$

重复运行[两组格网时序统计规格化整合]功能模块 $n-1$ 次，可实现 n 种监测量格网时序的统计规格化整合。此时，可事先一次性设计 n 种监测量格网时序的权值和指数，在进行第 m ($<n$) 次整合时，前 $m-1$ 次整合后的监测量时序的权值为前 $m-1$ 次权值之和，指数为 1。

5.8.2 三组地面稳定性变化时序优化整合

[功能]将格网规格相同、采样历元时刻一一对应的三组地面稳定性变化格网时间序列，进行加权统计规格化整合，生成时空动力学特征信息较为丰富的、灵敏度和可靠性较高的地面稳定性变化格网时序。

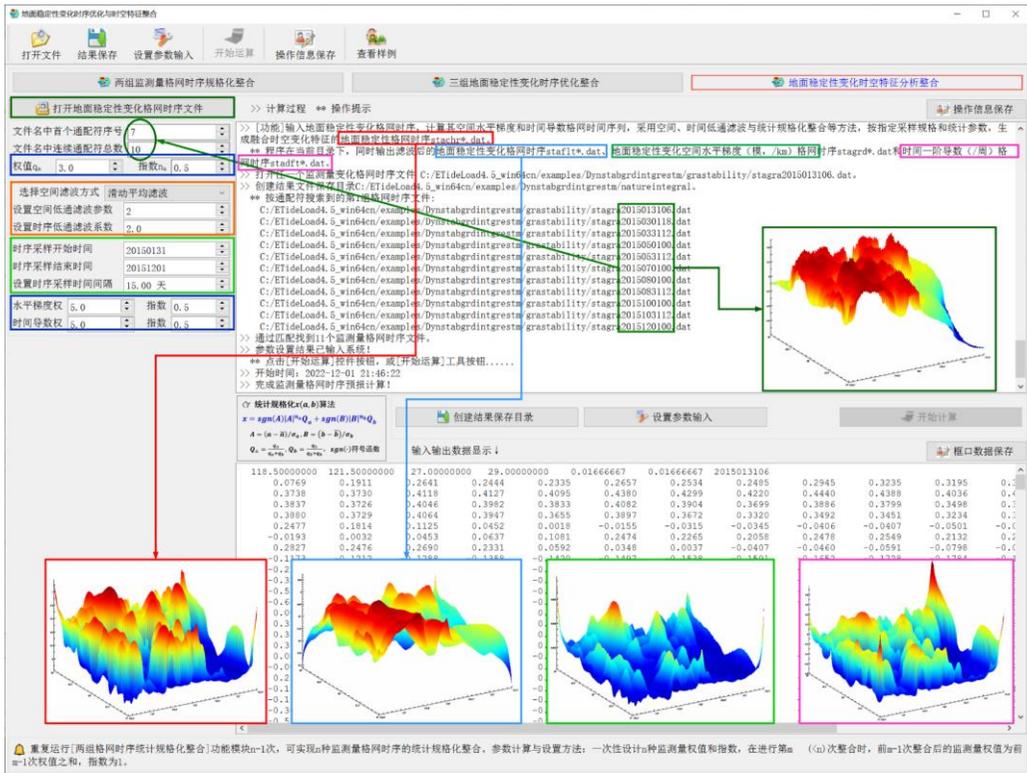
程序会自动搜索三组格网时序中格网规格和采样历元时刻都匹配的格网，只有完全匹配的 3 组监测量格网才参与整合运算。

基于垂直形变的地面稳定性变化监测，空间作用范围大，但近距离敏感性较弱；扰动重力地面稳定性变化监测，近距离剪强敏感性强，但空间作用范围小；垂线偏差地面稳定性变化监测，能辨识不同方向的地面稳定性变化信息。将三组地面稳定性变化格网时序进一步整合，能有效提高地面稳定性变化格网的灵敏度和可靠性。

5.8.3 地面稳定性变化时空特征分析整合

[功能]输入地面稳定性变化格网时序，计算其空间水平梯度和时间导数格网时间序列，采用空间、时间低通滤波与统计规格化整合等方法，按指定采样规格和统计参数，生成融合时空变化特征的地面稳定性格网时序 stachr*.dat。

[输入]地面稳定性变化格网时间序列文件。



[参数设置]输入地面稳定性变化、稳定性变化水平梯度与稳定性变化时间导数的权值和指数，设置格网空间和时域低通滤波参数，设置预报格网时序采样规格参数。

[输出]融合时空变化特征的地面稳定性格网时序 stachr*.dat，滤波后的地面稳定性变化格网时序 stafft*.dat、地面稳定性变化空间水平梯度（模，/km）格网时序 stagrd*.dat 和时间一阶导数（/周）格网时序 stadft*.dat。

第六章 大地测量数据编辑、计算与可视化

大地测量数据文件编辑与计算程序集，主要用于标准数据文件构造、格式转换，插值与格网化，数据提取、分离与合并，向量及格网数据处理，多组数据基本运算，以及其他数据预处理等。



ETideLoad4.5 采用自定义格式的 5 种类型大地测量稳态数据文件和 5 种类型大地测量时间序列数据文件。

[文本记录数据文件标准化提取]，[大地测量监测站网批量时间序列规格化]模块，是 ETideLoad4.5 接受外部文本格式数据的重要接口。利用[固体潮地面大地测量全要素全球预报]、[海潮及其负荷地面大地测量全要素全球预报]或[大气压潮及其负荷效应全球预报]模块，可以构造指定位置和采样规格的地面监测时间序列文件；利用[区域数据格网生成与构造]，可以构造指定规格的大地测量数值格网文件。其他程序或模块，只接受 ETideLoad 本身产生的格式数据。

6.1 文本记录数据标准化提取

[功能]将不同来源、非标准格式的文本记录文件，转换为 ETideLoad 约定格式的离散点值文件或监测时间序列文件。

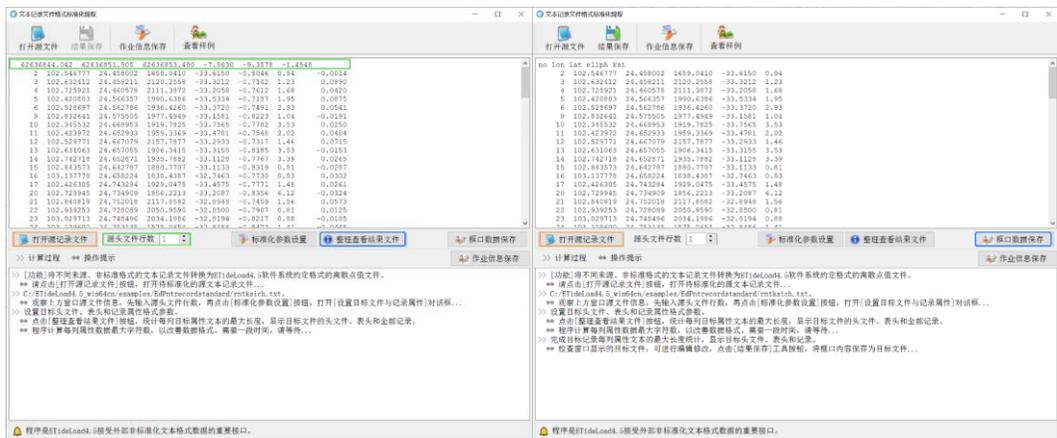
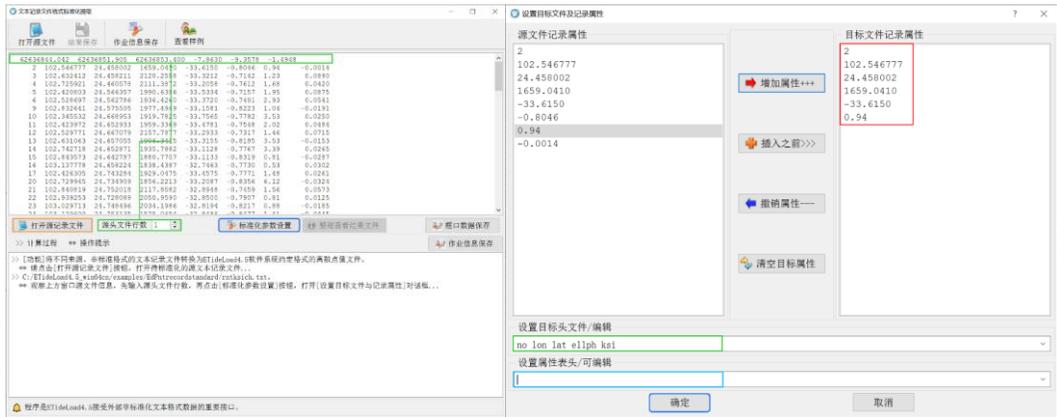
打开源文本文件，观察上方窗口源文件信息，先输入源头文件行数，再点击[标准化参数

设置]按钮，弹出对话框，选择需要的属性数据，并按需排列属性顺序，再设置目标头文件、表头和记录属性格式参数。

当目标文件不需要头文件或表头时，请将对应输入文本框的文字清空。

点击[确定]按钮关闭对话框，再点击[整理查看结果文件]按钮，程序统计每列目标属性文本的最大长度，并在文本框中显示目标文件的头文件、表头和全部记录。

目标属性统计整理过程需要时间，请耐心等待...



检查文本窗显示的目标文件，必要时可进行编辑修改。最后，点击[结果保存]工具按钮，将文本框中内容保存为目标文件。

6.2 数据插值、提取与区域分离

6.2.1 插值法改变网格分辨率

[功能]按输入的网格分辨率和选定的插值方法提高或降低网格的分辨率。

[输入]大地测量数值网格文件。

[参数设置]输入目标网格空间分辨率、选择空间插值方式。

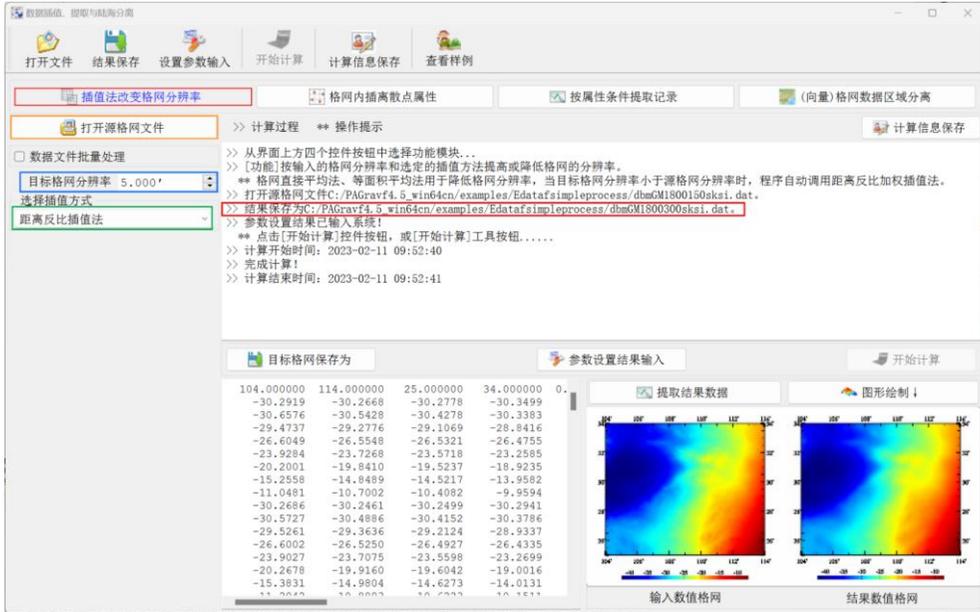
空间插值方式：距离反比插值法，高斯基函数插值，曲面样条插值法，网格直接平均法或网格等面积平均法。

[输出]目标大地测量数值网格文件。

格网直接平均法，将目标格网范围内的原格网有效格值求和，再除以有效格网数。格网等面积平均法，将目标格网范围内的原格网有效格值求和，再除以全部格网数。

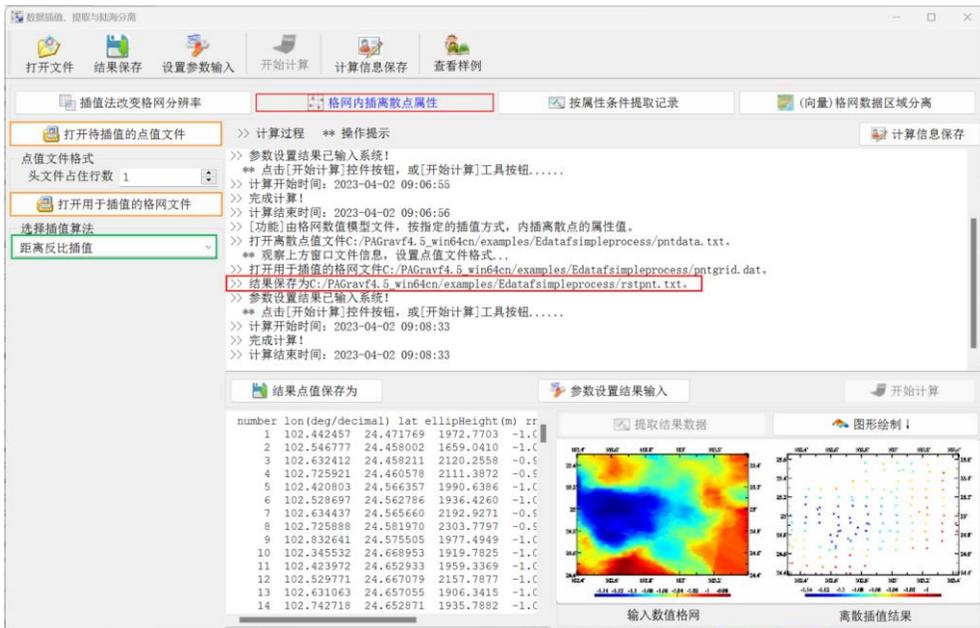
格网直接平均法、等面积平均法用于降低格网分辨率，当目标格网分辨率小于源格网分辨率时，程序自动调用距离反比加权插值法。

程序可一次实现多个格网分辨率改变。



6.2.2 格网内插离散点属性

[功能]由格网数字模型文件，按指定的插值方式，内插离散点的属性值。



[输入]待插值的离散点值文件（用于提供插值点的位置），用于插值的大地测量数值格网

文件。

[参数设置]输入离散点值文件头文件行数，选择插值方法。

[输出]插值后的离散点文件。头文件同待插值的离散点值文件，记录在待插值离散点值文件记录的基础上，增加一列插值属性。

6.2.3 按属性条件提取记录

[功能]按所指定属性的最大最小值范围，提取离散点值文件记录。

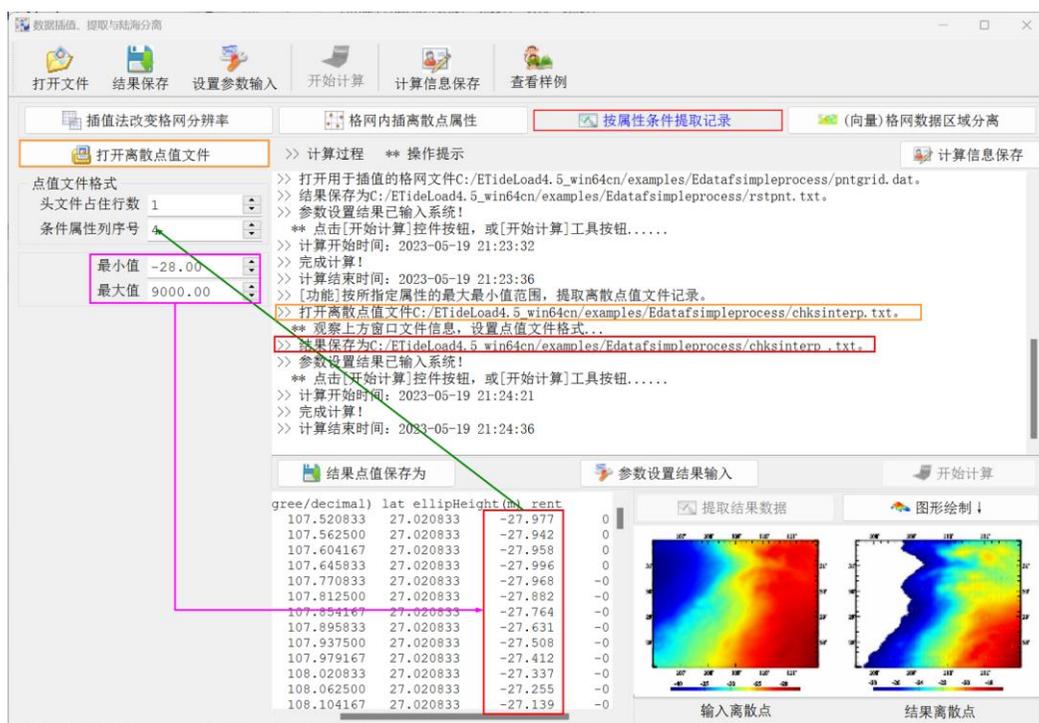
[输入]源离散点值文件。

[参数设置]输入离散点值文件头占据的行数，选择用于构造条件的属性 A，输入属性最大最小值范围 (a,b)。

程序提取离散点值记录中属性 A 满足 $a < A < b$ 的记录，按结果文件存储。

[输出]结果离散点值文件。

头文件即为源离散点值文件头。记录格式与源离散点值文件格式相同。

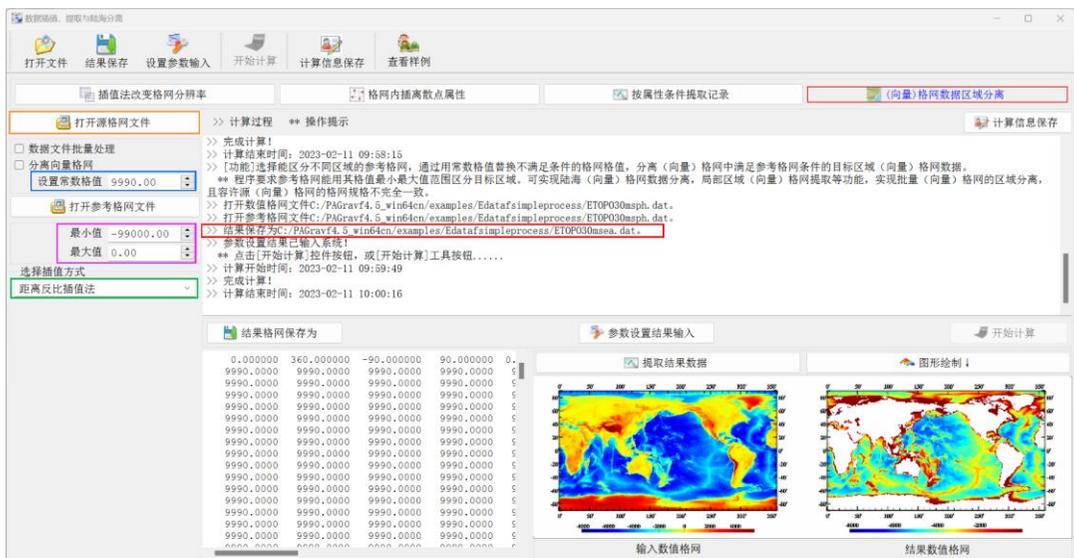


6.2.4 (向量) 格网数据区域分离

[功能]选择能区分不同区域的参考格网，通过用常数格值替换不满足条件的格网格值，分离 (向量) 格网中满足参考格网条件的目标区域 (向量) 格网数据。

程序要求参考格网能用其格值最小最大值范围区分目标区域。

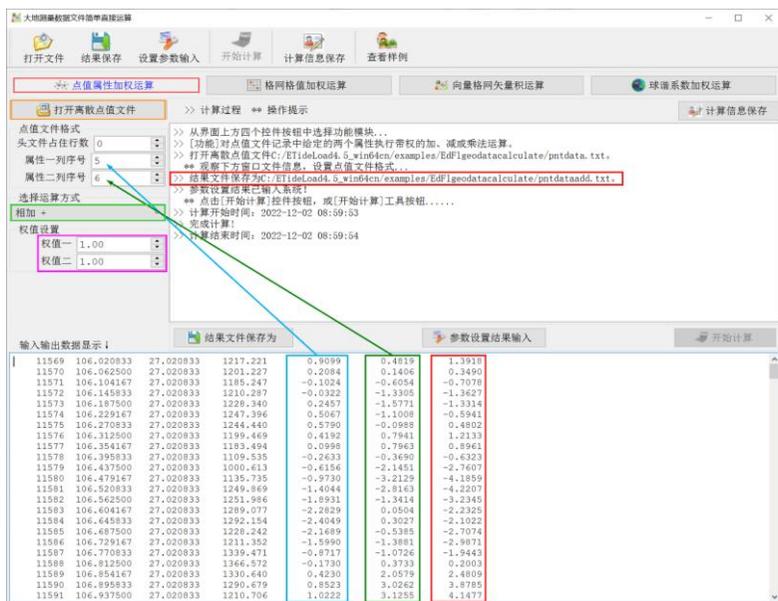
程序可实现陆海 (向量) 格网数据分离，局部区域 (向量) 格网提取等功能，实现批量 (向量) 格网的区域分离，且容许源 (向量) 格网的格网规格不完全一致。



6.3 数据文件的简单直接运算

6.3.1 点值属性加权运算

[功能]对点值文件记录中给定的两个属性执行带权的加、减或乘法运算。



6.3.2 网格格值加权运算

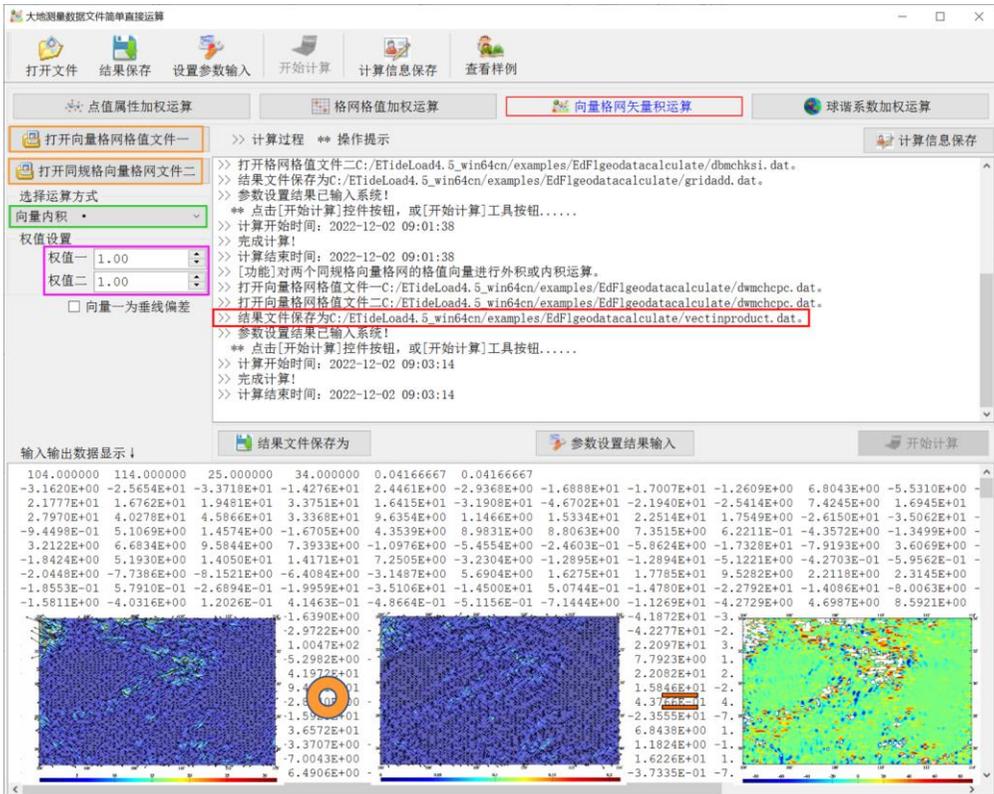
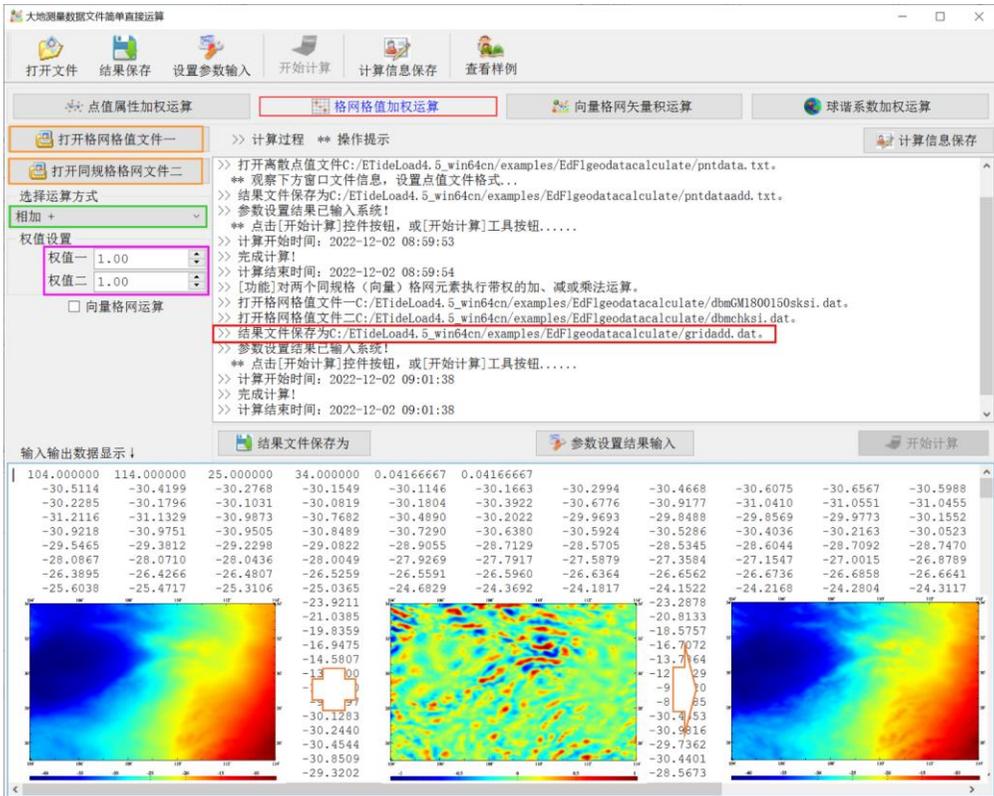
[功能]对两个同规格（向量）网格元素执行带权的加、减或乘法运算。

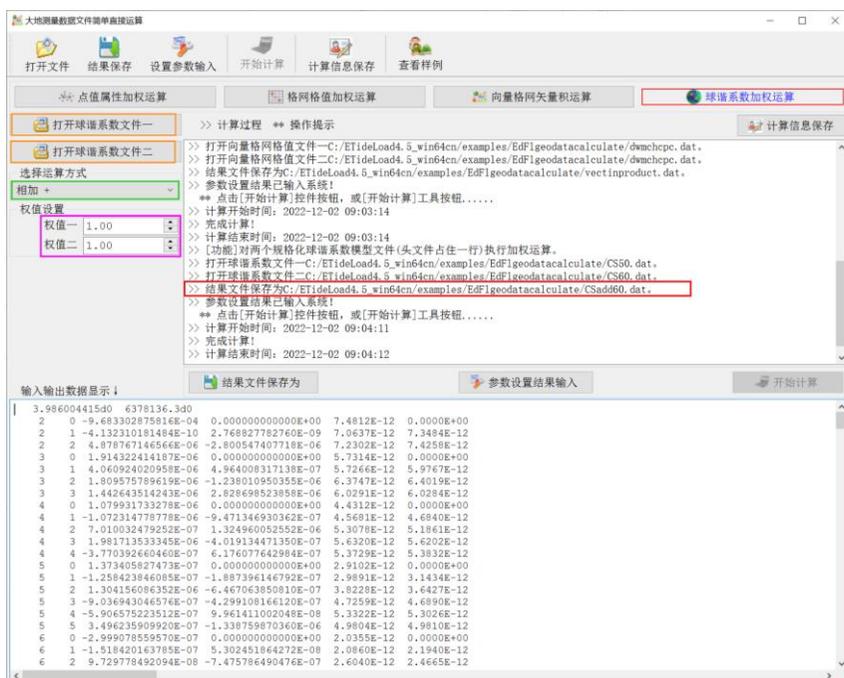
6.3.3 向量格网矢量积运算

[功能]对两个同规格向量格网的格值向量进行外积或内积运算。

6.3.4 球谐系数加权运算

[功能]对两个规格化球谐系数模型文件（头文件占住一行）执行加权运算。





6.4 同规格时间序列文件编辑运算

6.4.1 两个同规格监测记录时序加权运算

[功能]对两个同规格监测记录时序中采样历元时刻相同的监测量，执行带权的加、减或乘法运算。

程序要求两个记录时序中所有监测点的位置、数量和先后顺序均相同。两个记录时序中采样历元时刻不相同的监测量不参与计算。

[输出]加权运算后的监测记录时序文件。

头文件：加权运算类型（0-相加，1-相减，2-乘积），记录中监测点位置信息列数 n ，时序采样个数 m ， m 个采样历元时刻。

记录格式：取原第一个监测记录时序的前 n 列属性，结果记录时序的 m 个采样值。本例中， n 为 5， m 等于 11。

6.4.2 系列点值文件生成监测记录时序

[功能]从带有采样历元时刻的系列同规格点值文件中，提取指定属性监测量，按采样历元时刻先后顺序组成时间序列，生成由若干监测点时序构成的监测记录时序文件。

[输入]系列同规格离散点值文件。

程序要求，系列点值文件的头文件占住一行，且存在长整型的采样历元时刻。要求所有参与合并的点值文件，其监测点的经纬度位置一一对应，但容许不同点值文件的记录长度不同。

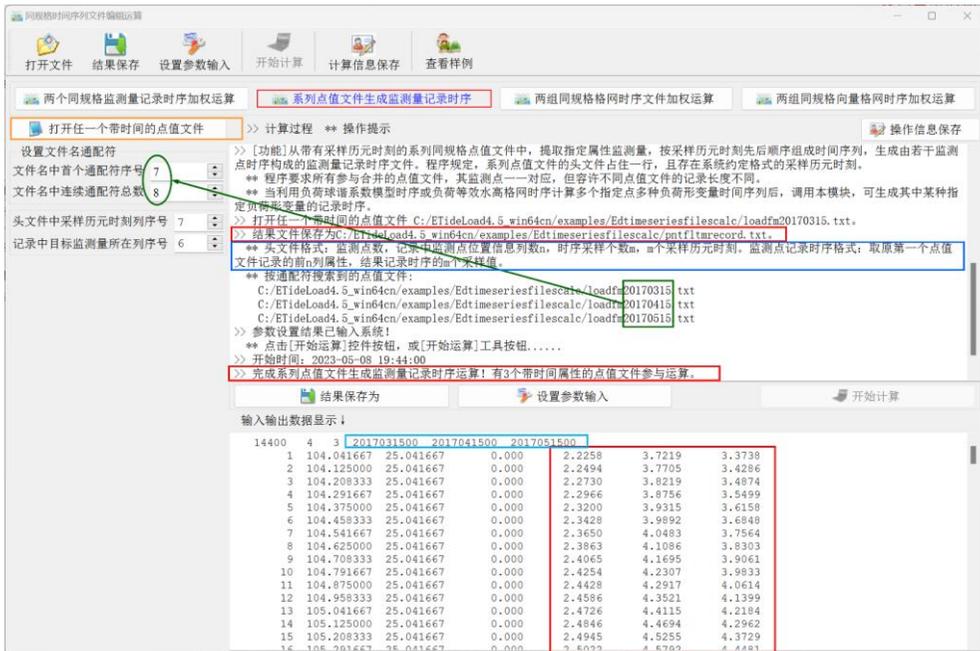
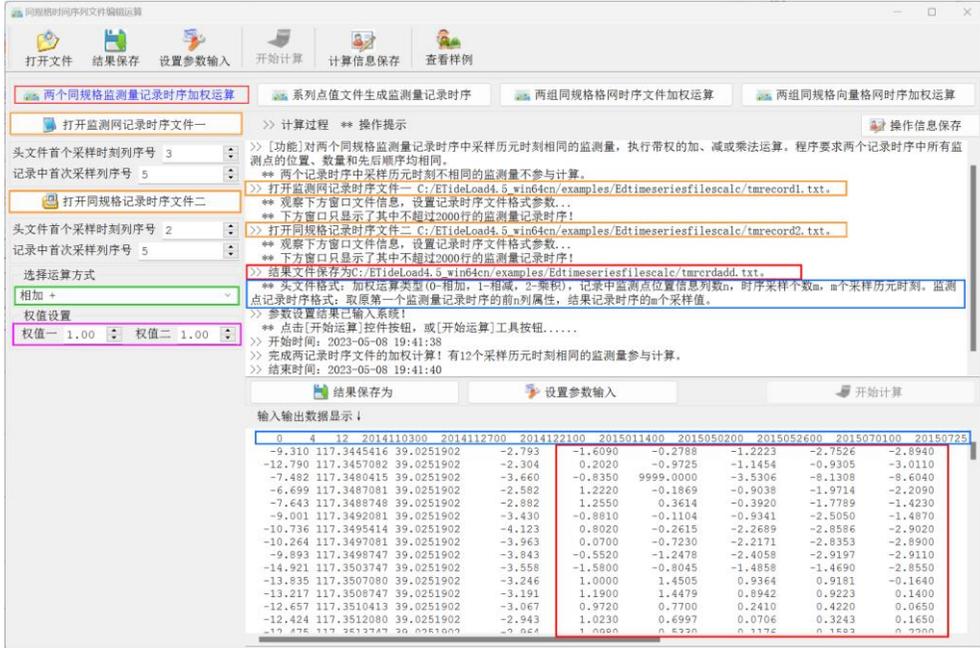
[参数设置] 设置系列点值文件名的通配符和文件格式参数，输入头文件中采样历元时刻属性列序号和记录中目标属性列序号。

[输出] 指定属性监测量记录时间序列文件。

头文件：监测点数，4，时序长度 n，n 个采样历元时刻。

文件记录：原点值文件记录前 4 列，n 个采样时刻的监测量采样值。

当利用负荷球谐系数模型时序或负荷等效水高格网时序计算多个指定点多种负荷形变量时间序列后，调用本模块，可生成其中某种指定负荷形变量的记录时序。



6.4.3 两组同规格格网时序文件加权运算

[功能]对两组同规格监测量格网时序中采样历元时刻相同的监测量格网，执行带权的加、

减或乘法运算。

[输入]两组格网规格相同、采样历元——对应的格网时间序列文件。

[参数设置]设置用于提取格网文件名的通配符参数，选择运算方式，设置权值参数。

[输出]两组格网时间序列加权运算结果格网时间序列文件。

程序将两组同规格监测量格网时间序列文件中，采样历元时刻相同的监测量格网配对后，执行加权运算。

采样历元时刻不能——对应的监测量格网文件将自动被忽略。

6.4.4 两组同规格向量格网时序加权运算

[功能]对两组同规格监测量向量格网时序中采样历元时刻相同的监测量向量格网，执行带权的加、减或外积运算。

[输入]两组格网规格相同、采样历元——对应的向量格网时间序列文件。

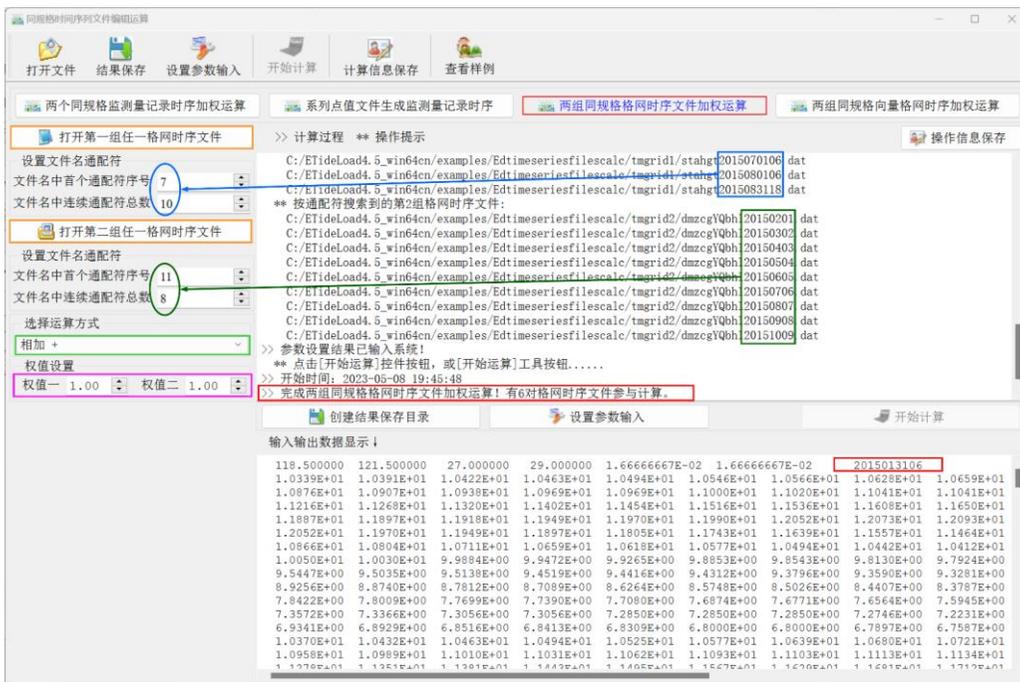
[参数设置]设置用于提取格网文件名的通配符参数，选择运算方式，设置权值参数。

两向量加权(w_1, w_2)外积定义为： $(a_1, a_2) \times (b_1, b_2) = w_1 a_1 b_2 - w_2 a_2 b_1$ 。

[输出]两组格网时间序列加权运算结果(向量)格网时间序列文件。

程序将两组同规格监测量向量格网时间序列文件中，采样历元时刻相同的监测量向量格网配对后，执行加权运算。两组向量格网时序外积结果输出的是格网时序。

采样历元时刻不能——对应的监测量向量格网文件将自动被忽略。

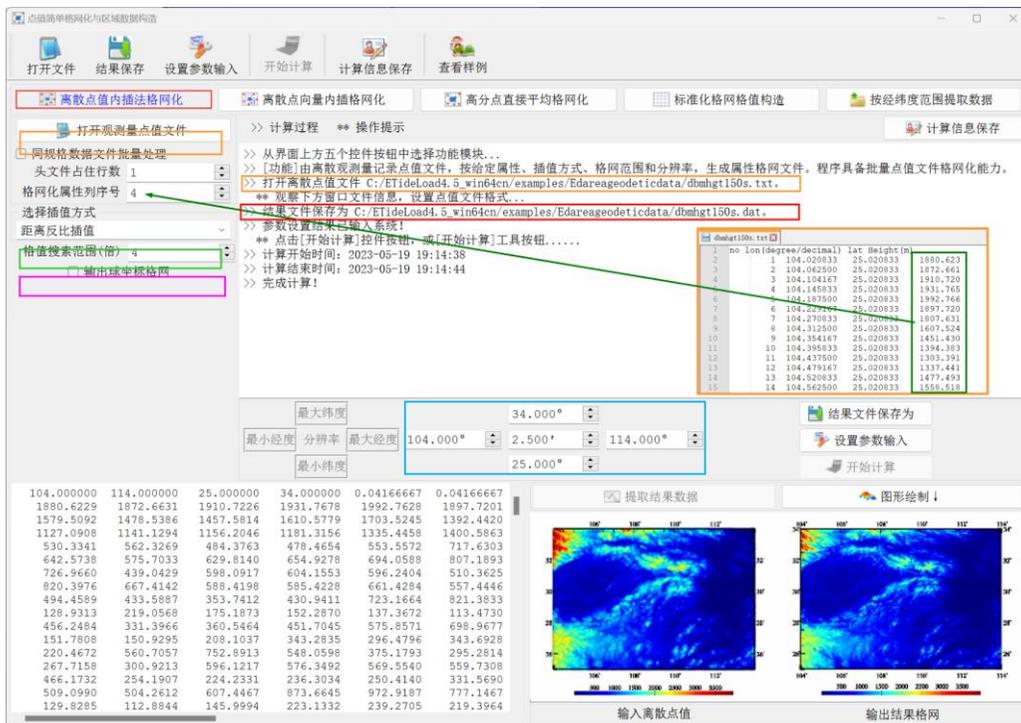


6.5 区域数据格网生成与构造

6.5.1 离散点值内插法格网化

[功能]由离散观测记录点值文件，按给定属性、插值方式、格网范围和空间分辨率，

生成属性格网文件。程序具备批量点值文件格网化能力。



6.5.2 离散点向量内插格网化

[功能]由离散观测向量记录点值文件，按给定向量分量属性、插值方式、格网范围和分辨率，生成向量格网文件。程序具备批量向量点值文件格网化能力。

6.5.3 高分点直接平均格网化

[功能]采用直接平均法，将高分辨率离散点观测测量数据进行格网化。

6.5.4 标准化格网值构造

[功能]按给定的经纬度范围和分辨率，生成标准化的常数值、随机数、二维数组索引值、二维高斯曲面格网。

6.5.5 按经纬度范围提取数据

[功能]按给定的经纬度范围，提取点值文件、格网文件或向量格网文件中的数据，按源文件格式输出。程序具备批量数据文件提取能力。

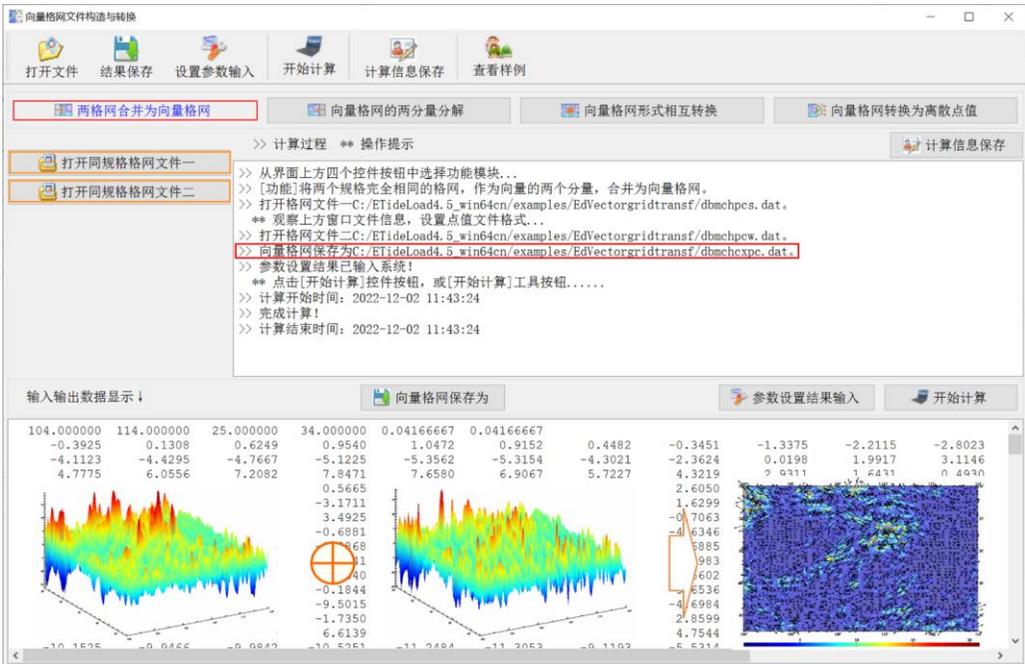
6.6 向量格网文件构造与转换

6.6.1 两格网合并为向量格网

[功能]将两个规格完全相同的格网，作为向量的两个分量，合并为向量格网。

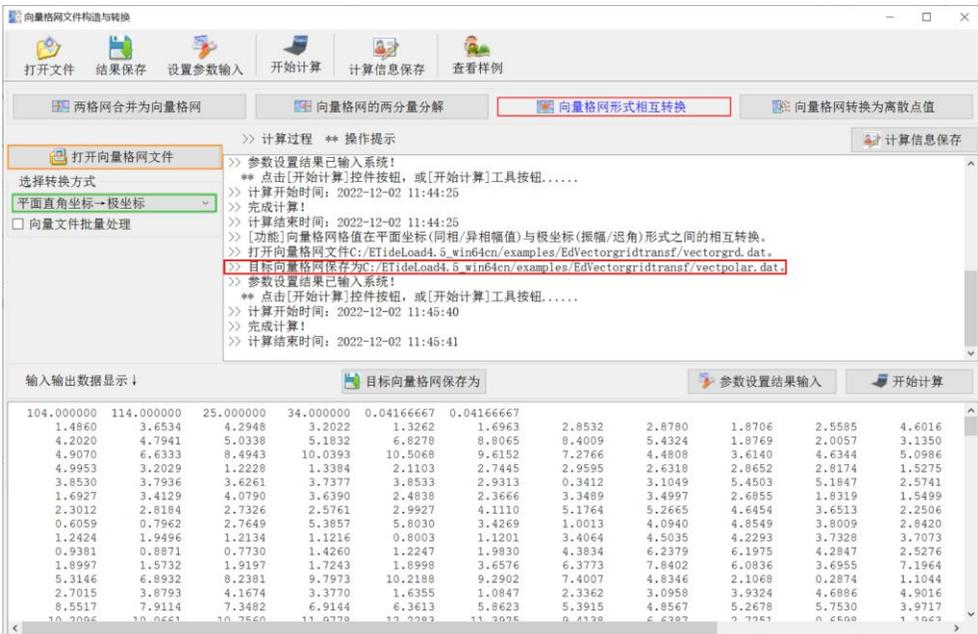
6.6.2 向量格网的两分量分解

[功能]将向量格网文件分解为两个分量格网文件。



6.6.3 向量格网形式相互转换

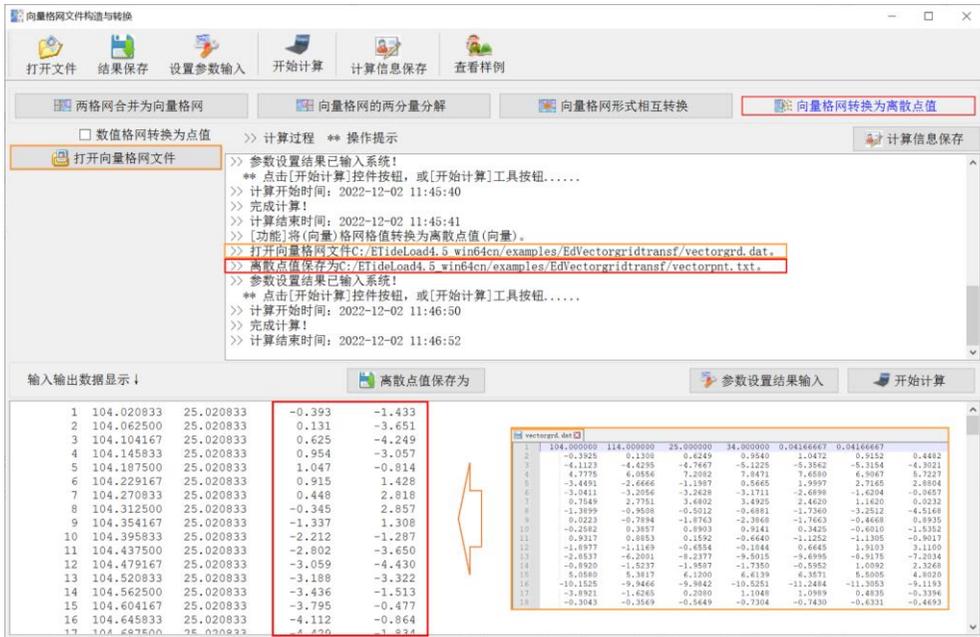
[功能]向量格网格值在平面直角坐标(同相/异相幅值)与极坐标(振幅/迟角)形式之间相互转换。



6.6.4 向量格网转换为离散点值

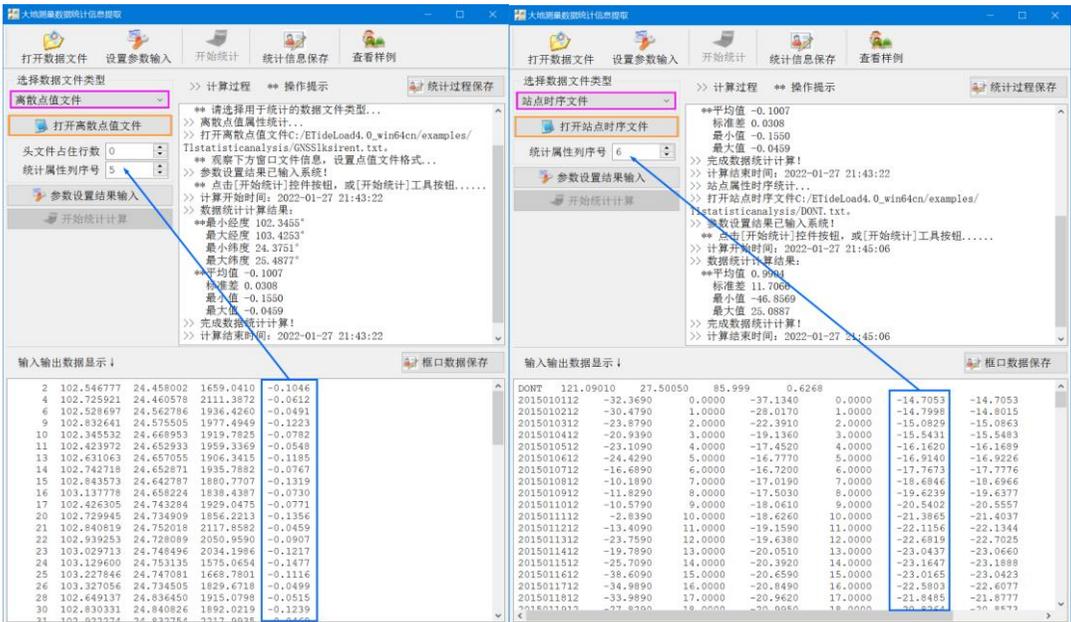
[功能]将(向量)格网格值转换为离散点值(向量)。

[输出]离散点值文件。无头文件。记录格式:点号,经纬度(度小数),转换后的(向量)格值。经纬度取单元格网中心点的经纬度。



6.7 大地测量数据统计信息提取

[功能]提取点值文件指定属性、站点时序文件指定属性时序、格网或向量格网文件数据的经纬度范围，平均值、标准差、最小值、最大值等统计信息。



6.8 粗差探测与加权基函数格网化

6.8.1 参考面支持的观测量粗差探测

[功能]选择低通格网作为参考面，内插离散点处指定属性的参考值，并计算残差值。由离散点残差值的统计性质，探测并分离粗差记录。

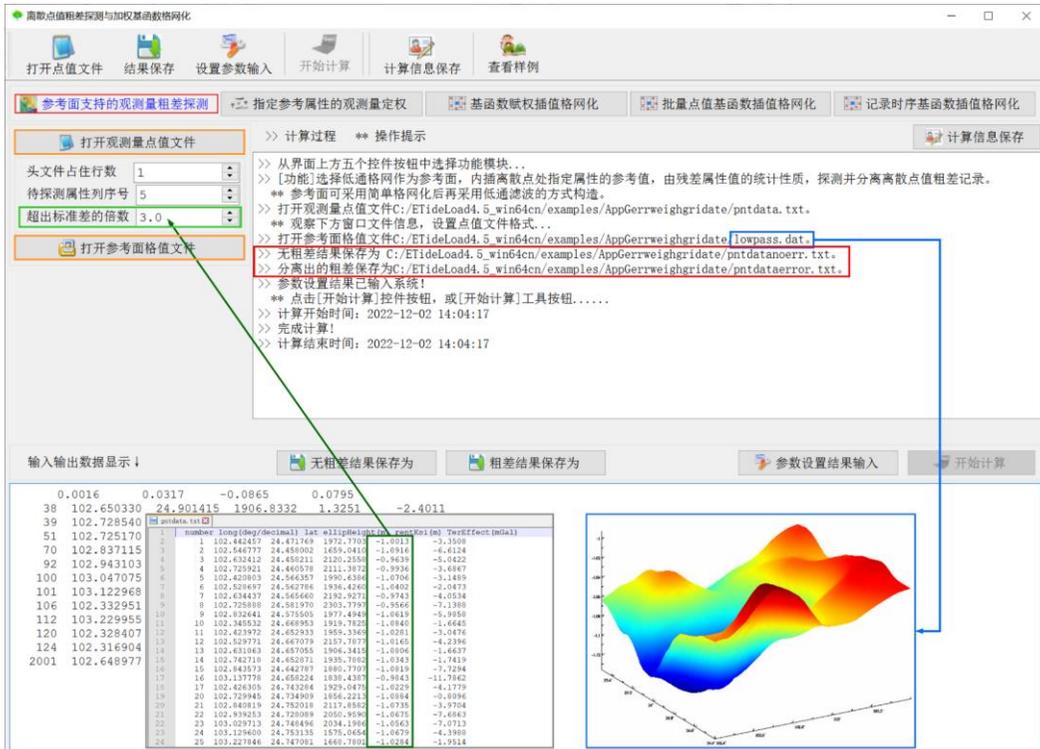
[输入]含探测属性的离散点值文件，用于属性参考面的低通滤波格网文件。

参考面可采用简单格网化后再采用低通滤波的方式构造，也可迭代使用后面的基函数赋权插值格网化作为参考面。

[参数设置]输入离散点值文件头文件行数，待探测属性所在列序号，以及超出标准差倍数（用于判定粗差）。

当属性值与其平均值之差的绝对值大于 n 倍属性标准差时，该记录是粗差记录。

[输出]粗差离散点值文件（头文件为指定属性残差平均值，标准差，最小值和最大值），无粗差的离散点值文件（格式同输入离散点值文件）。



6.8.2 指定参考属性观测量定权

[功能]指定点值文件记录中的参考属性，依据其统计性质，按 ETideLoad 自定义的权函数形式，估计权值。

[输入]含参考属性的离散点值文件。

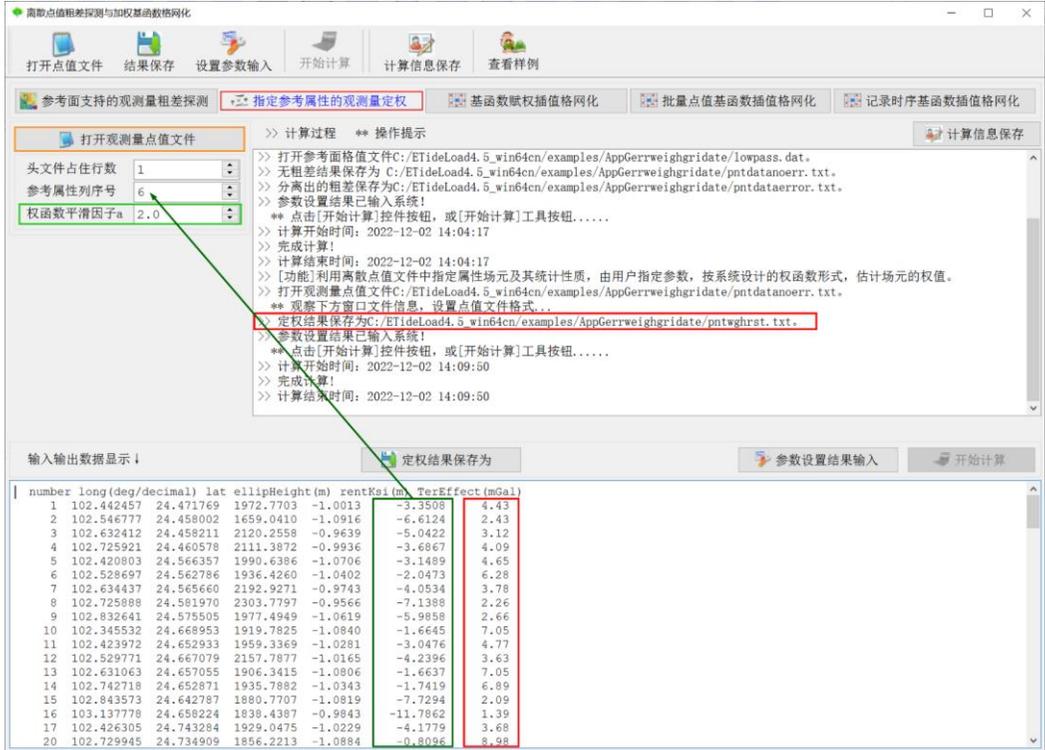
本例中，参数属性是扰动重力局部地形影响，由数字高程模型数据事先按积分法计算，用于定量反映布局地形起伏程度。

[参数设置]输入离散点值文件头文件行数，参考属性 x 在文件记录中的列序号，以及权函数平滑因子。

定权函数： $w(x, a) = 10\sigma\sqrt{\sigma^2 + (ax)^2}$ ， x 为参考属性， a 为给定的权函数平滑因子， σ 为程序自动计算的 x 的标准差。

[输出]离散点定权结果文件。在输入文件记录的基础上，增加一列权值属性。

本例中，扰动重力局部地形影响绝对值越大，局部地形起伏约剧烈，权值越小。



6.8.3 基函数赋权插值格网化

[功能]按输入的格网规格和选定的基函数形式及参数值，采用加权基函数插值方法，对离散点值数据进行格网化。

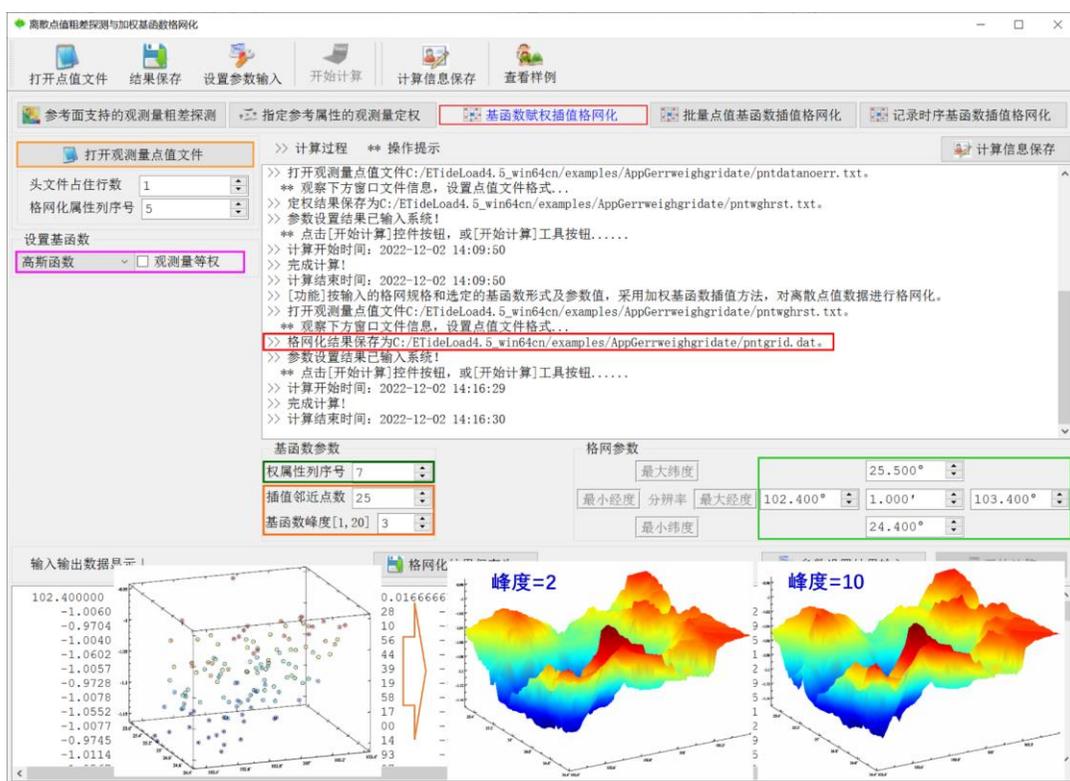
[输入]待格网化的离散点值文件。

[参数设置]输入待格网化的离散点属性列序号，选择基函数形式（余弦函数、高斯函数或指数函数），插值邻近点数和权函数峰度，输入设置格网分辨率和经纬度范围。

基函数峰度越小（基函数随距离衰减越慢），插值邻近点数越大，格网化过程的低通滤波能力越强，插值越平滑，边缘效应越弱，对稀疏数据的插值能力也越强。

计算插值点数值时，程序将离散点记录属性中的权值与基函数（插值点与离散点之间距离的函数）相乘，作为离散点权值。

基函数赋权插值格网化，是 ETideLoad4.5 基于一般地球物理场性质专门设计，适合各种单一类型多源异质地球物理场格网化。



6.8.4 批量点值基函数插值格网化

[功能]按输入的格网规格和选定的基函数形式及参数值，采用加权基函数插值方法，对某一目录中同规格点值文件记录的指定属性进行格网化。

[输入文件]系列同规格离散点值文件。

[参数设置]设置输入离散文件名通配符，输入离散点文件头文件行数与格网化属性在文件记录中的列序号。选择基函数，设置基函数参数（插值临近点参数、基函数峰度等），设置输出格网规格参数。

[输出文件]与离散点值文件一一对应的数值格网文件 bsfgrd***.dat。***为输入文件名通配符实例，用以标识数值格网文件采样历元时刻。

6.8.5 记录时序基函数插值格网化

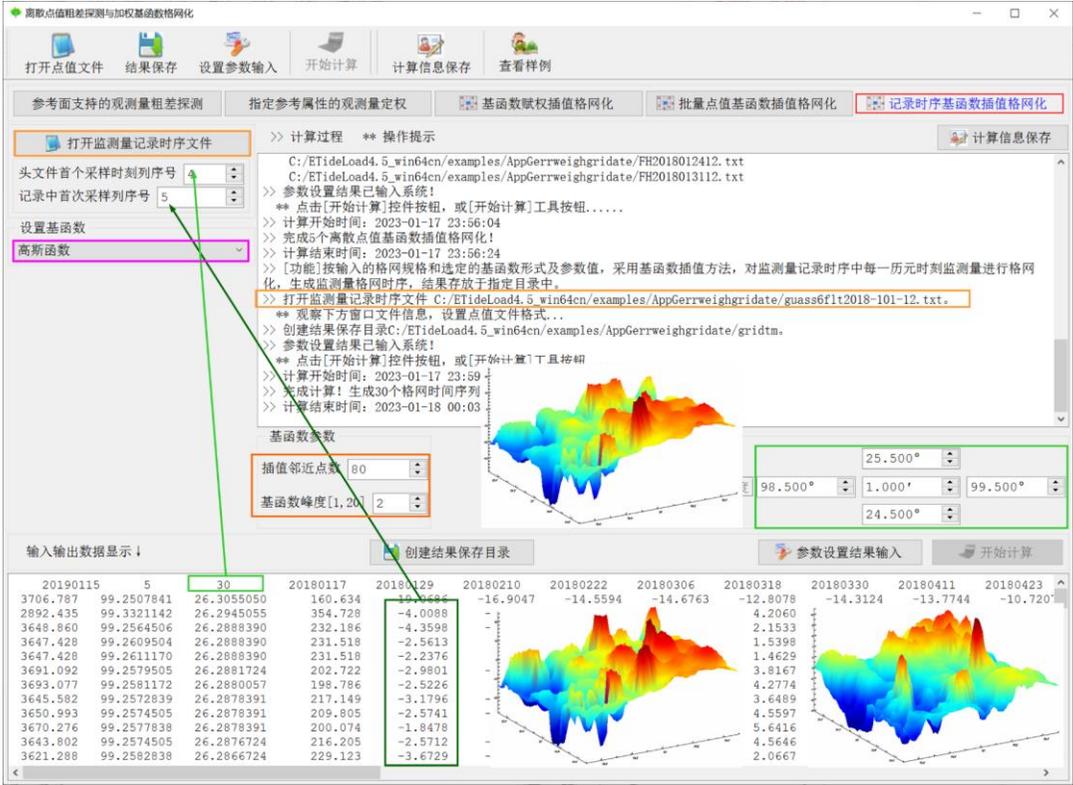
[功能]按输入的格网规格和选定的基函数形式及参数值，采用基函数插值方法，对监测量记录时序中每一历元时刻监测量进行格网化，生成监测量格网时序，结果存放于指定目录中。

[输入文件]监测量记录时序文件。

[参数设置]设置输入离散文件名通配符，输入离散点文件头文件行数与格网化属性在文件记录中的列序号。选择基函数，设置基函数参数（插值临近点参数、基函数峰度），设置输出格网规格参数。

[输出文件]数量等于监测量记录采样数的监测量格网文件 bfngrd*.dat。***为监测量格网

文件的采样历元时刻。



6.9 大地测量数据可视化绘图工具

6.9.1 地面监测多属性时序可视化

[功能]绘制地面监测多个属性时间序列曲线。

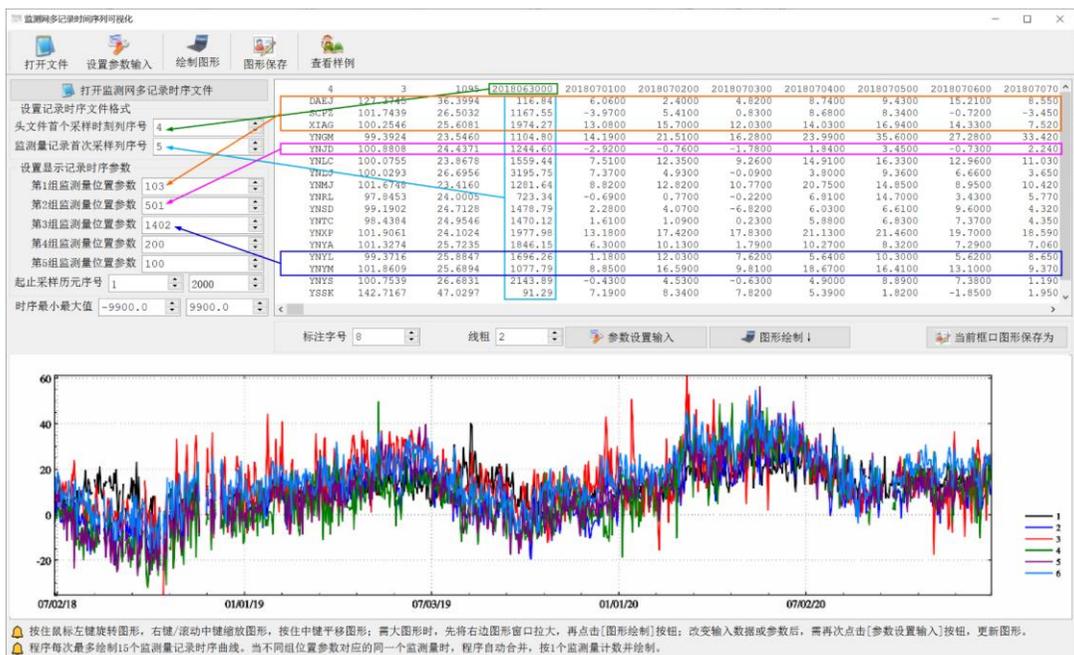
[输入]地面监测时间序列文件。

[参数设置]依据打开的地面监测时间序列文件，选择采样历元时间格式，输入采样历元时刻属性在文件记录中的列序号，设置待绘制时间序列在记录中的位置参数，输入监测时间序列的最小最大值和起止采样历元序号。

当时序位置参数对应的记录列序号大于记录最大列序号，程序自动将时间序列序号设为记录最大列序号。

当终止采样历元序号大于采样数时，程序自动将终止采样历元序号设为采样数。

按住鼠标左键旋转图形，右键/滚动中键缩放图形，按住中键平移图形。需要更大图形时，先将右边图形窗口拉大，再点击[图形绘制]按钮。改变输入数据或参数后，需再次点击[参数设置输入]按钮，更新图形。



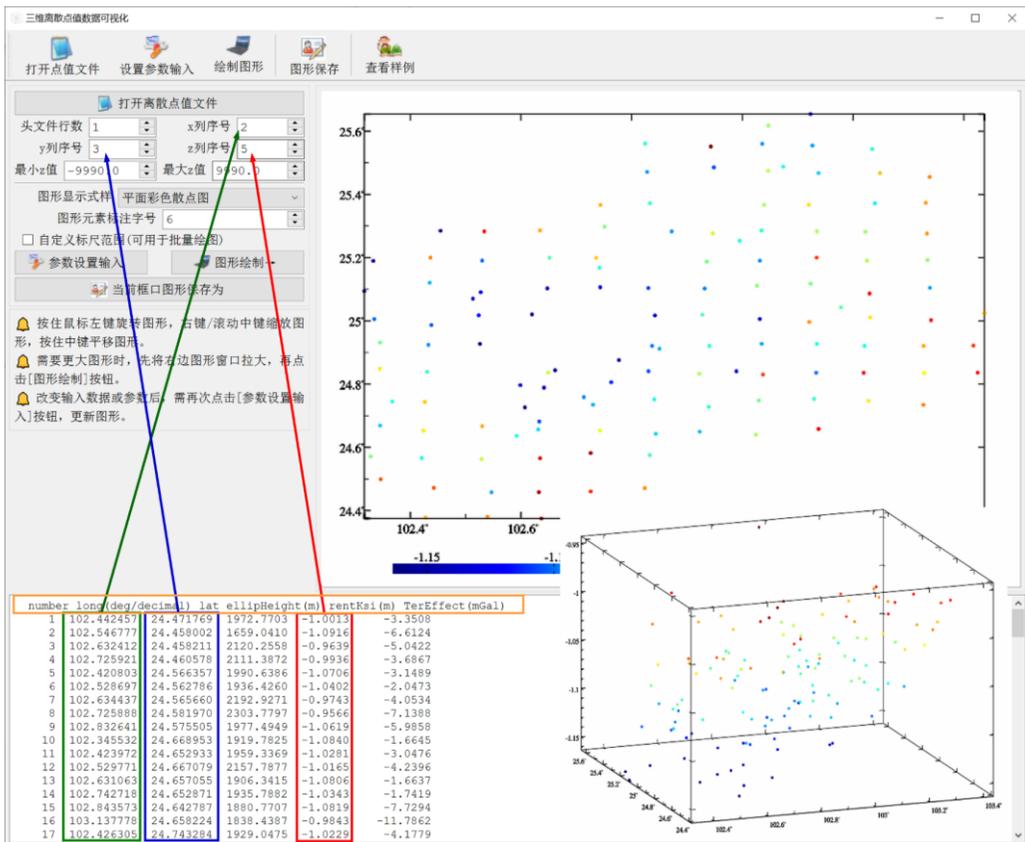
式参数，设置待绘制时间序列在文件中的位置参数（行号），输入起止采样历元序号。

程序每次最多绘制 15 个监测记录时序曲线。当不同组位置参数对应的同一个监测量时，程序自动合并，按 1 个监测记录时序计数并绘制。

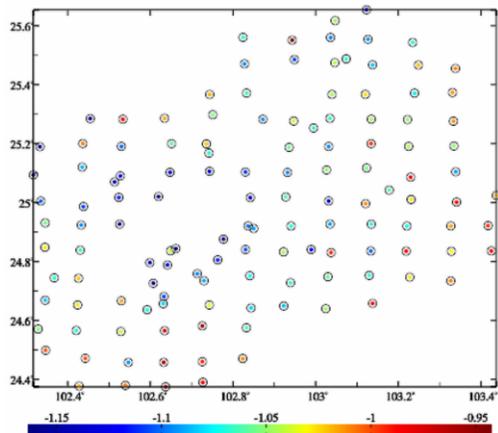
6.9.3 三维离散点值数据可视化

[功能]展示离散点值文件中的点位分布和指定属性大小。

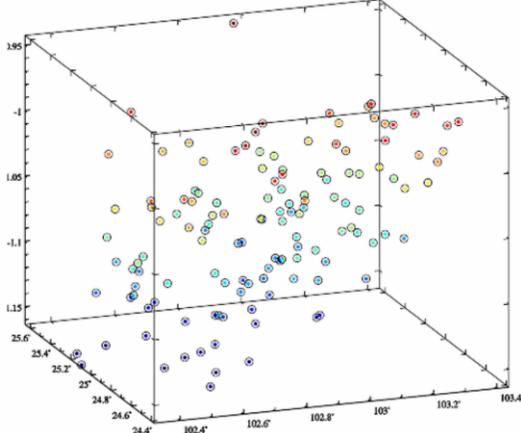
[输入]大地测量离散点值文件。



Plane color scatter + O plot



3D color scatter + O plot



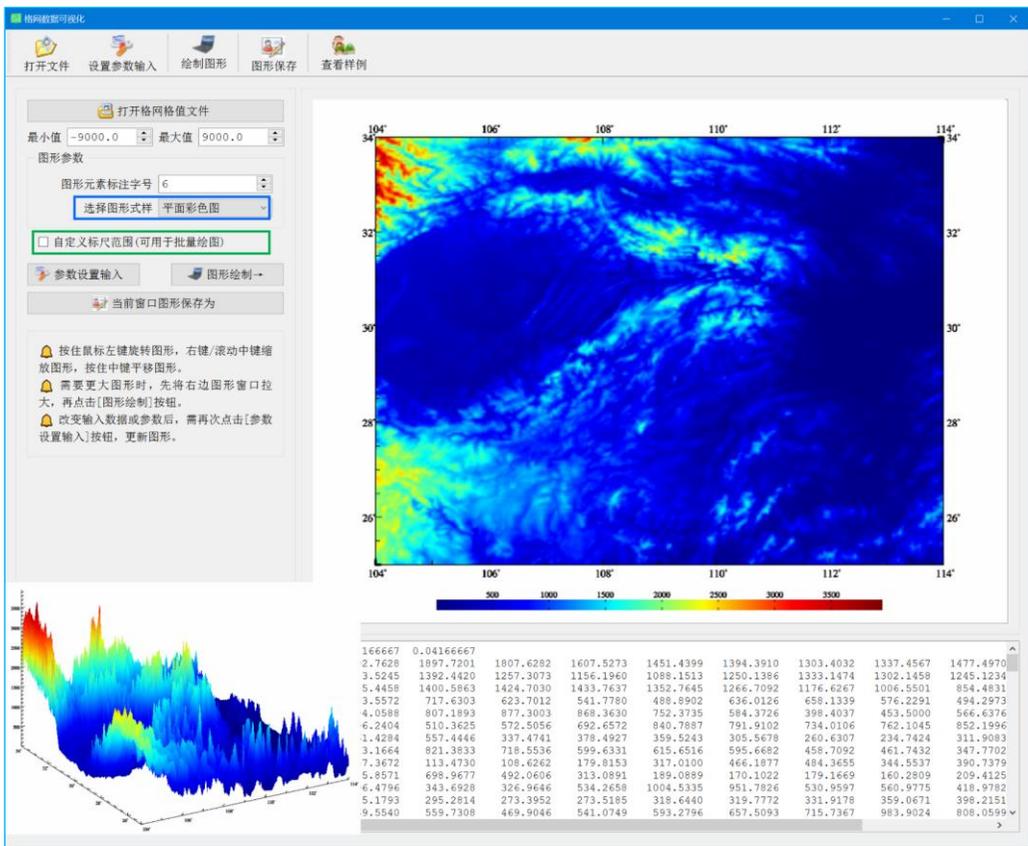
可通过固定标尺范围，统一批量图形标尺。绘制批量图形前，先将右方图形窗口大小和图形调整到合适情形，再进行批量图形绘制。批量图形绘制期间，请保持参数和图形窗口大小不变，不对图形进行鼠标操作。

6.9.4 格网及其时间序列可视化

[功能]大地测量格网或格网时间序列可视化绘图。

[输入]大地测量数值格网文件。

[参数设置]选择绘图风格，设置是否启用限定格值大小范围的固定标尺。



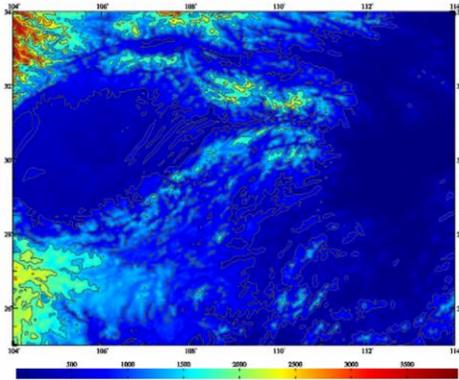
程序容许将向量格网的第一分量当作格网数据直接显示。启用固定标尺后，可用按统一标尺绘制格网时间序列图。

程序可通过控制格网值最小值、最大值范围，或调整固定标尺范围两种方式，来调节绘图性质。

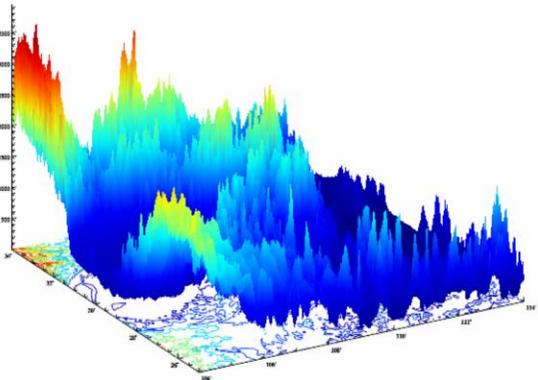
可随时点击控制按钮[当前窗口保存为]，将界面右上方窗口中绘制的图形，保存到指定的图形文件中。

可通过固定标尺范围，统一批量图形标尺。绘制批量图形前，先将右方图形窗口大小和图形调整到合适情形，再进行批量图形绘制。批量图形绘制期间，请保持参数和图形窗口大小不变，不对图形进行鼠标操作。

2D color + Contour



3D color + Contour



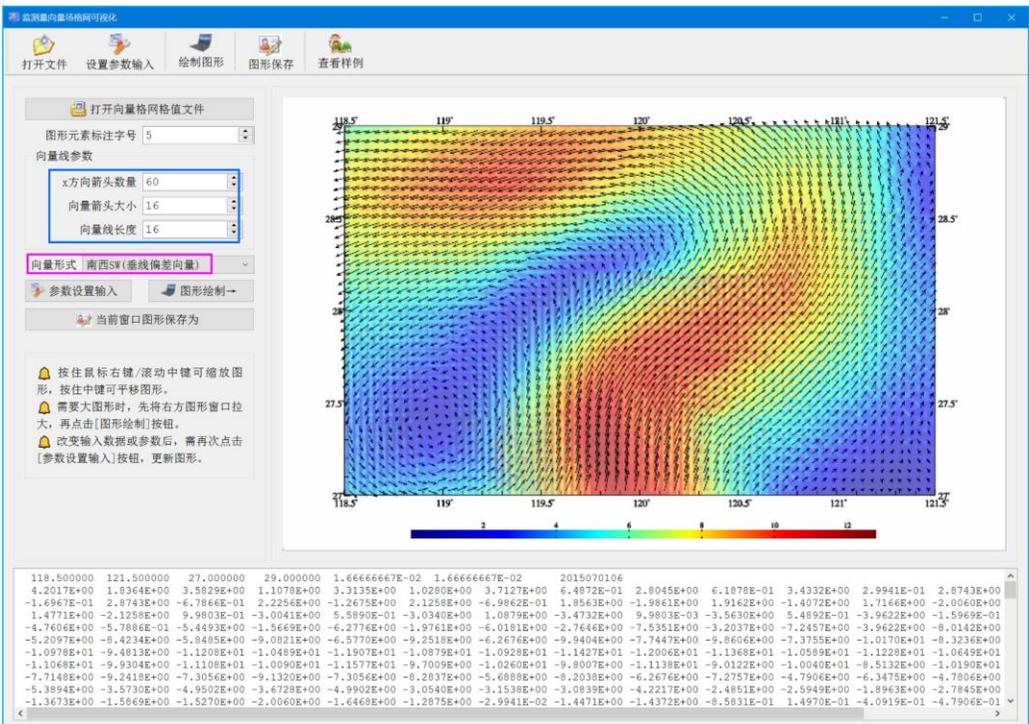
6.9.5 监测量向量场格网可视化

[功能]大地测量向量场格网可视化绘图。

[参数设置]选择输入向量场的向量形式。

程序要求向量是平面坐标格式。向量形式可以是东北 EN (水平位移向量), 南西 SW (垂线偏差向量), 或北东 NE (水平重力梯度)。

ETideLoad 绘图坐标系的 xy 轴, 分别指向东北 EN, 方向同水平位移向量。



可随时点击控制按钮[当前窗口保存为], 将界面右上方窗口中绘制的图形, 保存到指定的图形文件中。

第七章 文件格式、地球物理模型与数值标准

7.1 ETideLoad4.5 大地测量数据文件

ETideLoad 采用自定义格式的大地测量稳态数据和大地测量时间序列数据。其中，大地测量稳态数据有五种形式，即离散点大地测量数据记录、大地控制网观测量记录、大地测量数值格网、大地测量向量格网和球谐系数模型。大地测量时间序列数据也有五种形式，即地面监测时间序列、监测网站点记录时间序列、监测网观测量记录时间序列、监测量(向量)数值格网时间序列和球谐系数模型时间序列。

[文本记录数据文件标准化提取]，[大地测量监测站网批量时间序列规格化]模块，是 ETideLoad 接受外部文本格式数据的重要接口。利用各种潮汐效应的全球预报功能模块，可以构造指定位置和采样规格的地面监测时间序列文件；利用[区域数据格网生成与构造]，可以构造指定规格的大地测量数值格网文件。其他程序或模块，只接受 ETideLoad 自身产生的格式数据。

7.2 稳态大地测量数据文件约定格式

7.2.1 离散点大地测量数据记录文件

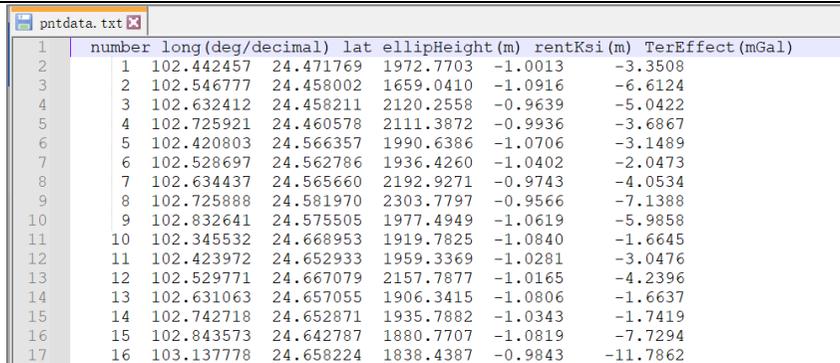
(1) 容许有多行头文件，头文件内容和格式不受限制。

(2) 离散点大地测量数据有多个记录组成，每个记录的属性依次为：点号(点名)，经度(度小数)，纬度(度小数)，高度(米)，属性5，……，属性 n 。如图。

(3) 记录属性约定为数值格式，属性数 n 的最大值为80，属性之间用空格隔开。

(4) 一个记录的 Fortran 语言读取语句为：

```
read(fileno,*)(record(i),i=1,n) ! record(n)为文件记录数组
```



	number	long(deg/decimal)	lat	ellipHeight (m)	rentKsi (m)	TerEffect (mGal)
1	1	102.442457	24.471769	1972.7703	-1.0013	-3.3508
2	2	102.546777	24.458002	1659.0410	-1.0916	-6.6124
3	3	102.632412	24.458211	2120.2558	-0.9639	-5.0422
4	4	102.725921	24.460578	2111.3872	-0.9936	-3.6867
5	5	102.420803	24.566357	1990.6386	-1.0706	-3.1489
6	6	102.528697	24.562786	1936.4260	-1.0402	-2.0473
7	7	102.634437	24.565660	2192.9271	-0.9743	-4.0534
8	8	102.725888	24.581970	2303.7797	-0.9566	-7.1388
9	9	102.832641	24.575505	1977.4949	-1.0619	-5.9858
10	10	102.345532	24.668953	1919.7825	-1.0840	-1.6645
11	11	102.423972	24.652933	1959.3369	-1.0281	-3.0476
12	12	102.529771	24.667079	2157.7877	-1.0165	-4.2396
13	13	102.631063	24.657055	1906.3415	-1.0806	-1.6637
14	14	102.742718	24.652871	1935.7882	-1.0343	-1.7419
15	15	102.843573	24.642787	1880.7707	-1.0819	-7.7294
16	16	103.137778	24.658224	1838.4387	-0.9843	-11.7862

7.2.2 大地控制网观测量记录文件

一个大地控制网观测量文件可存储 CORS 网(GNSS 网)一维基线解、水准控制网水准路线高差观测量或重力控制网重力段差观测量数据。

(1) 头文件占据一行，格式为：基线或路线名字符数，站点名字符数，…

(2) 记录格式：基线或测段名称，起点经纬度和高度，终点经纬度和高度，…，观测量(缺省值 9999)。

(3) 大地控制网的基线或测段与站点之间的关联，通过其名称字符实现。基线或测段名称约定由两端站点名 A、B 构成 (B***A)，并要求所有站点名称 (如 A、B) 的字符数相等。因此基线或测段名称的字符数，不小于站点名称字符数的两倍。

如图第一个记录中，水准路线名为 CANN_DONT，水准点名 A 为“DONT”，水准点名 B 为“CANN”，水准点名字符数等于 4。“***”为用户自定义字符，要求对于所有水准路线，字符数保持不变，图中“***”为“_”，字符数等于 1。

Line No.	Route Name	Point A	Point B	Value 1	Value 2	Value 3	Value 4
1	9 4						
2	CANN_DONT	120.424700	27.522580	121.150270	27.834630	79493.9	
3	CANN_FDIQ	120.424700	27.522580	120.207320	27.335310	29876.4	
4	CANN_JHYW	120.424700	27.522580	120.078380	29.272690	196899.1	
5	CANN_JINH	120.424700	27.522580	119.642580	29.217830	202930.8	
6	CANN_JINX	120.424700	27.522580	119.379220	29.070950	199897.1	
7	CANN_JNJZ	120.424700	27.522580	119.637540	27.976350	92473.9	
8	CANN_JSAN	120.424700	27.522580	118.608560	28.727950	222881.6	
9	CANN_LHAI	120.424700	27.522580	121.189470	28.905910	170695.1	
10	CANN_LISH	120.424700	27.522580	119.929490	28.461260	114864.2	
11	CANN_LONQ	120.424700	27.522580	119.133090	28.080720	141509.7	
12	CANN_LUOY	120.424700	27.522580	119.705090	27.552460	71164.3	

7.2.3 大地测量数值格网文件

(1) 头文件占住一行，用于表示格网经纬度范围和空间分辨率。格式为：最小、最大经度，最小、最大纬度，格网的经度间隔、纬度间隔。单位都是度小数。

(2) 格网的格值按行纬度、列经度递增方式依次存放，直到放完全部数据。

(3) 格值文件的整个格网数据 Fortran 语言读取程序为：

```

open(unit=fileno,file=filename,status="old")
read(fileno,*)(hd(i),i=1,6)      ! hd(6)为头文件
nlat=nint((hd(4)-hd(3))/hd(6))  ! nlat 为格网行数，即北方向单元格网数
nlon=nint((hd(2)-hd(1))/hd(5))  ! nlon 为格网列数，即东方向单元格网数
do i=1,nlat
  read(fileno,*)(gr(i,j),j=1,nlon) ! gr(nlat,nlon)为存放格网数据的二维数组
enddo

```

Line No.	Min Lon	Max Lon	Min Lat	Max Lat	Delta Lon	Delta Lat
1	104.000000	114.000000	25.000000	34.000000	0.04166667	0.04166667
2	1880.6233	1872.6612	1910.7203	1931.7653	1992.7665	1897.7199
3	1579.5158	1478.5360	1457.5736	1610.5877	1703.5435	1392.4407
4	1127.0862	1141.1257	1156.1979	1181.3065	1335.4466	1400.5901
5	530.3264	562.3283	484.3702	478.4546	553.5518	717.6379
6	642.5849	575.7052	629.8202	654.9330	694.0609	807.1985
7	726.9670	439.0212	598.0862	604.1542	596.2404	510.3528
8	820.4032	667.4105	588.4110	585.4184	661.4350	557.4490
9	494.4559	433.5850	353.7288	430.9312	723.1754	821.3956
10	128.9223	219.0560	175.1799	152.2779	137.3618	113.4669
11	456.2471	331.3871	360.5383	451.7036	575.8641	698.9905
12	151.7805	150.9271	208.1027	343.2925	296.4793	343.6893
13	220.4542	560.7228	752.9326	548.0788	375.1834	295.2821
14	267.7073	300.9139	596.1386	576.3569	569.5556	559.7308
15	466.1608	254.1723	224.2118	236.2868	250.4018	331.5582
16	509.1123	504.2678	607.4595	873.6999	972.9491	777.1609
17	129.8216	112.8806	145.9967	223.1369	239.2738	219.4003
18	1868.6248	1859.6737	1903.7419	2051.7911	2088.7992	1910.7605

格网单元的格值代表格网单元平均值。数值积分运算时，取格网单元中心点位置作为平均被积场元的位置，计算面元到计算点的积分距离。

7.2.4 大地测量向量格网文件

向量格值文件是在标准格值文件的基础上，增加一个无头文件的、格网范围和分辨率完全相同的格网数据。ETideLoad 中的垂线偏差向量、水平梯度向量等格网，采用向量格值文件形式存放。

7.2.5 球谐系数文件约定格式

重力场位系数模型和负荷球谐系数模型采用球谐系数文件格式存储。

(1) 头文件占住一行，至少由两个属性数据构成，即地心引力常数 GM ($\times 10^{14}m^3/s^2$)、椭圆长半轴 a (m)。

GM, a 称为球谐系数模型的尺度参数，表示模型中的面谐函数定义在半径等于地球长半轴 a 的球面上。不同的球谐系数模型， GM, a 不一定相同。

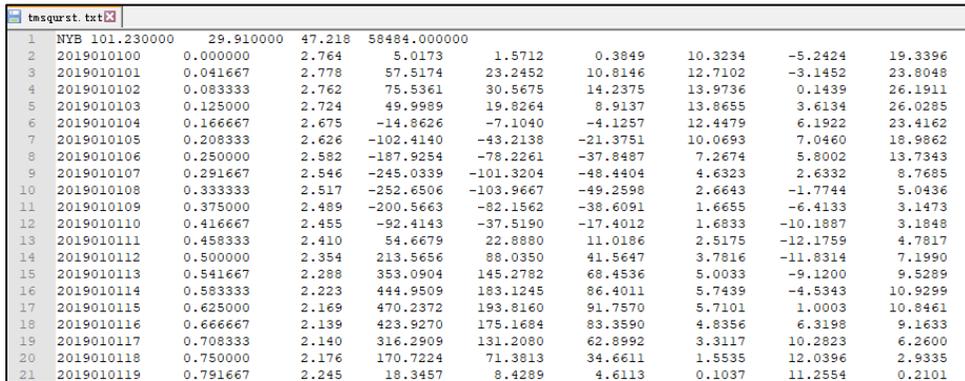
(2) 球谐系数模型由若干个记录组成，每个记录的属性格式：阶 n ，次 m ，球谐系数 C_{nm} ， S_{nm} (C_{nm} 中误差， S_{nm} 中误差)。每个记录的属性之间用空格隔开。

ETideLoad4.5 不要求球谐系数阶次按顺序排列，容许阶次不充分。对于非充分阶次的球谐系数文件，程序自动将非充分阶次的球谐系数值置零。

7.3 大地测量时间序列文件约定格式

7.3.1 地面大地监测量时间序列文件

一个地面大地测量监测量时序文件可存储某一站点、某条基线或测量路线多种属性监测量时间序列数据，各种属性的采样历元时刻完全相同，如图。如 CORS 站坐标解时间序列、固体潮站观测与分析成果时间序列、GNSS 某条基线解时间序列等。



Line	Station	Longitude	Latitude	Height
1	NYB	101.230000	29.910000	47.218	58484.000000				
2	2019010100	0.000000	2.764	5.0173	1.5712	0.3849	10.3234	-5.2424	19.3396
3	2019010101	0.041667	2.778	57.5174	23.2452	10.8146	12.7102	-3.1452	23.8048
4	2019010102	0.083333	2.762	75.5361	30.5675	14.2375	13.9736	0.1439	26.1911
5	2019010103	0.125000	2.724	49.9989	19.8264	8.9137	13.8655	3.6134	26.0285
6	2019010104	0.166667	2.675	-14.8626	-7.1040	-4.1257	12.4479	6.1922	23.4162
7	2019010105	0.208333	2.626	-102.4140	-43.2138	-21.3751	10.0693	7.0460	18.9862
8	2019010106	0.250000	2.582	-187.9254	-78.2261	-37.8487	7.2674	5.8002	13.7343
9	2019010107	0.291667	2.546	-245.0339	-101.3204	-48.4404	4.6323	2.6332	8.7685
10	2019010108	0.333333	2.517	-252.6506	-103.9667	-49.2598	2.6643	-1.7744	5.0436
11	2019010109	0.375000	2.489	-200.5663	-82.1562	-38.6091	1.6655	-6.4133	3.1473
12	2019010110	0.416667	2.455	-92.4143	-37.5190	-17.4012	1.6833	-10.1887	3.1848
13	2019010111	0.458333	2.410	54.6679	22.8880	11.0186	2.5175	-12.1759	4.7817
14	2019010112	0.500000	2.354	213.5656	88.0350	41.5647	3.7816	-11.8314	7.1990
15	2019010113	0.541667	2.288	353.0904	145.2782	68.4536	5.0033	-9.1200	9.5289
16	2019010114	0.583333	2.223	444.9509	183.1245	86.4011	5.7439	-4.5343	10.9299
17	2019010115	0.625000	2.169	470.2372	193.8160	91.7570	5.7101	1.0003	10.8461
18	2019010116	0.666667	2.139	423.9270	175.1684	83.3590	4.8356	6.3198	9.1633
19	2019010117	0.708333	2.140	316.2909	131.2080	62.8992	3.3117	10.2823	6.2600
20	2019010118	0.750000	2.176	170.7224	71.3813	34.6611	1.5535	12.0396	2.9335
21	2019010119	0.791667	2.245	18.3457	8.4289	4.6113	0.1037	11.2554	0.2101

(1) 头文件占据一行。点名/点号，经度，纬度（度小数），高度（m，相对于椭球面、海平面或地面的高度，可选），起算 MJD（可选），...

(2) 从第二行起，每行记录表示时序的一个历元时刻采样，其中至少有 1 个属性为采样历元时刻，其余各列代表不同属性监测量时序。

(3) 监测量时间序列文件记录中每个属性（除采样历元时间属性外）代表一种类型监测量时序，不同类型监测量采样历元时刻相同。

(4) 起算 MJD0 为采样历元时刻的起算时间，仅当采样历元时刻为 MJD 格式时有效。

此时，起算 MJD0 与当前采样时间（天数）相加，为当前采样历元时刻 MJD。当采样历元时刻为 ETideLoad 约定的长整型格式时，头文件中可以没有起算 MJD0，程序自动识别并忽略选择。

7.3.2 监测网站点记录时间序列文件

一个监测网站点记录时序文件可存储大地监测网多个地面站点一种类型监测量的时间序列数据。如 CORS 站网坐标解（一维）、水准网点高程、固体潮站网、验潮站网时间序列，以及时序 InSAR 监测量等。

(1) 头文件占据一行，格式：站点名称字符数（可选），记录时序长度（可选），按时间先后排序的采样历元时刻。

(2) 从第二行起，每行记录存储一个站点监测量时序数据。格式：站点名，站点经纬度、高度，…，按时间先后排序的监测量时间序列采样值。

(3) ETideLoad 规定，头文件中采样历元时刻的数量与记录中采样值的数量相等，采样历元时刻与监测量采样值一一对应。

(4) 从程序界面输入站点记录时间序列文件时，一般要求指定头文件中第一个采样历元时刻对应的列序号，和记录中监测量时序第一个采样值所在的列序号。

	4	0	36		2015011612	2015021500	2015031612	2015041600	2015051612	2015061600	
1	JINH	119.64226	29.2178	1191.60	1.0	-4.9145	9.3944	3.7319	0.4720	1.1566	2.7777
2	JINX	119.3792	29.0709	84.79	1.0	-4.3724	1.6001	6.6220	0.8372	2.9622	1.8461
3	JNJZ	119.6375	27.9764	286.78	1.0	-4.1680	3.2284	3.1467	-0.4777	2.3145	1.8212
4	JSAN	118.6086	28.7279	71.54	1.0	4.8394	10.8248	7.4036	2.4828	0.3532	-2.2769
5	LISH	119.9295	28.4613	71.54	1.0	4.8394	10.8248	7.4036	2.4828	0.3532	-2.2769
6	LONQ	119.1331	28.0807	233.28	1.0	-4.9987	3.4121	3.3682	-2.0458	-2.0137	-1.6199
7	QIYU	119.0793	27.6213	412.75	1.0	-2.9713	5.7773	7.2012	1.1874	-3.3157	-3.4728
8	QNYN	118.9638	27.6157	429.39	1.0	0.7446	7.2540	6.9323	0.2500	-1.3013	-1.8433
9	QUZH	118.8908	28.9937	90.79	1.0	-1.0815	5.9656	5.1221	-1.1572	0.5323	-1.6064
10	QZLY	119.1858	29.0336	73.91	1.0	-1.3703	6.4829	8.4987	1.9209	1.5578	0.7378
11	SHNQ	119.5028	27.4576	827.01	1.0	-6.5350	3.4134	3.8402	1.0473	3.2554	-2.4524
12	SHYN	119.5093	28.4546	182.77	1.0	-5.6627	3.1365	4.4180	0.4287	2.1431	2.2420
13	YAYA	120.0425	27.3930	555.71	1.0	-2.1462	5.1836	4.0938	3.6248	4.5640	1.2865

	5	37		20141103	20141127	20141221	20150114	20150207	20150408	20150502	20150526	
1	-9.310	117.3445416	39.0251902	-2.793	-0.3091	0.0966	0.0482	0.2194	0.2865	0.5720	0.3395	0.4760
2	-12.790	117.3457082	39.0251902	-2.304	-0.1796	0.2752	0.1906	0.2887	0.3340	0.5632	0.2861	0.2759
3	-7.482	117.3480415	39.0251902	-3.660	-0.3846	9999.0000	-0.0523	0.0135	0.1783	-0.0167	-0.5455	-0.1440
4	-6.699	117.3487081	39.0251902	-2.582	-0.2325	0.2301	0.0701	0.2610	0.4179	0.7154	0.4377	0.7507
5	-7.643	117.3488748	39.0251902	-2.882	-0.1876	0.3087	0.1757	0.3743	0.5347	0.9182	0.6967	0.9859
6	-9.001	117.34952081	39.0251902	-3.430	-0.2356	0.2486	0.2282	0.4480	0.5863	1.0390	0.8643	1.1080
7	-10.736	117.3495414	39.0251902	-4.123	-0.2211	0.1605	0.0977	0.4040	0.4816	1.0206	0.9163	1.0519
8	-10.264	117.3497081	39.0251902	-3.963	-0.2530	0.0627	0.0174	0.2817	0.3735	0.9470	0.9182	0.9979
9	-9.993	117.3498747	39.0251902	-3.943	-0.2733	0.0120	-0.0156	0.2078	0.3072	0.9895	0.8993	0.9588
10	-14.921	117.3503747	39.0251902	-3.558	-0.2906	0.0654	0.0359	0.2029	0.2907	0.8569	0.8558	0.8677
11	-13.835	117.3507080	39.0251902	-3.246	-0.1282	0.2632	0.1912	0.3657	0.4738	1.0396	1.0551	1.0863
12	-13.217	117.3508747	39.0251902	-3.191	-0.0641	0.3903	0.2465	0.4314	0.5473	1.1231	1.1658	1.2188
13	-12.657	117.3510413	39.0251902	-3.067	0.0039	0.3831	0.2929	0.4991	0.6149	1.2231	1.3072	1.3714
14	-12.424	117.3512080	39.0251902	-2.943	0.0099	0.3579	0.2776	0.4952	0.6110	1.2489	1.3458	1.3795
15	-12.475	117.3513747	39.0251902	-2.964	0.0053	0.3075	0.2478	0.4779	0.5912	1.2806	1.3846	1.3793

7.3.3 监测网观测量记录时间序列文件

一个大地监测网观测量记录时序文件可存储 CORS 网（GNSS 网）一维基线解、水准控制网水准路线高差观测量或重力控制网重力段差观测量时间序列数据。

(1) 头文件占据一行，格式为：基线或路线名称字符数，站点名称字符数，时间序列长度（可选）…，按时序长度依次排列的采样时间。

(2) 记录格式：基线或测段名称，起点经纬度和高度，终点经纬度和高度，…，按时序长度依次排列的时序值（缺省值 9999）。

(3) 大地监测网的基线或测段与站点之间的关联，通过其名称字符实现。基线或测段

名称约定由两端站点名 A、B 构成 (B***A)，并要求所有站点名称 (如 A、B) 的字符数相等。因此基线或测段名称的字符数，不小于站点名称字符数的两倍。

	TsqvrbwU.txt	TsqvrbwU.txt																		
1	9	0	36																	
2	CANN_DONT	120.4247	27.5226	0.00	121.1503	27.8346	0.00	6.4092	3.5311	-0.6494	3.4902	1.9057	-0.3761							
3	CANN_FTHQ	120.4247	27.5226	0.00	119.5295	28.4613	0.00	7.5566	9999.0000	9.9866	4.2906	4.5791	-0.7531	-4.0081						
4	CANN_JHW	120.4247	27.5226	0.00	120.0764	29.2727	0.00	3.3886	1.7941	-0.5867	-0.4076	0.7054	-0.2796							
5	CANN_JINH	120.4247	27.5226	0.00	119.6426	29.2178	0.00	2.8530	-0.7712	-1.3292	1.3058	-1.2947	-2.4476							
6	CANN_JJNX	120.4247	27.5226	0.00	119.3792	29.0709	0.00	4.3333	1.6376	2.9746	3.5908	1.9899	-1.6367							
7	CANN_JNJZ	120.4247	27.5226	0.00	119.6375	27.9764	0.00	4.9006	3.1138	1.0930	0.3909	0.8296	-1.6116							
8	CANN_JSAN	120.4247	27.5226	0.00	119.6086	28.7279	0.00	2.5860	0.7616	-0.7290	-0.5568	-4.1410	-5.3632							
9	CANN_LHAI	120.4247	27.5226	0.00	121.1895	28.9059	0.00	1.0756	-1.6069	-1.8127	-0.4355	-0.0362	-0.7623							
10	CANN_LISH	120.4247	27.5226	0.00	119.5295	28.4613	0.00	13.8711	10.5935	3.5993	4.5791	-0.7531	-4.0081							
11	CANN_LONG	120.4247	27.5226	0.00	119.1331	28.0807	0.00	7.3816	6.1923	2.8486	1.8460	-1.9823	-3.9091							
12	CANN_LUOY	120.4247	27.5226	0.00	119.7051	27.5525	0.00	8.3132	9.4984	3.5027	4.0624	0.1673	-1.3212							
13	CANN_PANA	120.4247	27.5226	0.00	120.4367	29.0542	0.00	0.2485	-2.0512	-4.4740	-2.9385	-0.0623	-0.7816							
14	CANN_PCHQ	120.4247	27.5226	0.00	119.5422	27.9232	0.00	5.5253	5.7473	3.2665	1.6373	-1.4516	-6.3300							
15	CANN_PCJM	120.4247	27.5226	0.00	119.4454	28.1680	0.00	14.2248	12.7588	7.9740	8.5291	3.1970	1.6813							
16	CANN_QINT	120.4247	27.5226	0.00	120.2900	28.1394	0.00	7.1517	4.5782	2.4621	4.4460	-0.4966	-3.3975							
17	CANN_QJHQ	120.4247	27.5226	0.00	119.0793	27.6213	0.00	7.1481	6.6556	4.4206	1.9230	-5.9045	-7.7402							
18	CANN_QJNY	120.4247	27.5226	0.00	119.9638	27.6197	0.00	10.9311	7.9045	4.5820	1.4154	-3.5702	-5.8564							
19	CANN_GUZH	120.4247	27.5226	0.00	118.8908	28.9937	0.00	8.1029	5.9283	1.7235	1.2962	-0.8214	-5.2339							
20	CANN_QZLY	120.4247	27.5226	0.00	119.1858	29.0336	0.00	7.1312	6.3296	4.8051	4.9249	0.4817	-2.6667							
21	CANN_RUIA	120.4247	27.5226	0.00	120.6490	27.7833	0.00	8.9624	7.8483	0.2735	0.8812	-0.2184	-3.3412							
22	CANN_SHNQ	120.4247	27.5226	0.00	119.5028	27.4576	0.00	4.8563	4.6628	0.3999	3.4718	0.5071	-6.6786							
23	CANN_SJNY	120.4247	27.5226	0.00	119.5093	28.4546	0.00	3.3183	3.1267	1.3992	1.8621	1.0732	-1.1970							
24	CANN_SJIC	120.4247	27.5226	0.00	119.2693	28.5951	0.00	14.7246	7.6396	10.1070	4.5706	6.3427	0.2411							
25	CANN_TAIZ	120.4247	27.5226	0.00	121.4164	28.6183	0.00	4.0291	3.2741	0.3639	1.5962	-0.2033	-1.0270							

7.3.4 数值 (向量) 格网时间序列文件

数字模型 (向量) 格网时间序列，由一系列带时间信息的某一种类型监测量 (向量) 格网文件构成，每个格网头文件第 7 个属性约定为该格网数据的采样历元时刻。如陆地水等效水高、海平面变化格网时序，各种地面负荷形变场格网时序，时变重力场格网时间序列等，如图。数字模型 (向量) 格网格式约定见 7.2。

	rwzd20150331.dat	rwzd20150531.dat	rwzd20150831.dat																	
1	118.500000	121.500000	27.000000	29.000000	1.666666E-02	1.666666E-02			2015033118											
2	-0.3746	-0.5686	-0.6666	-0.9356	-1.0686	-1.0836	-1.0606	-1.0586	-1.0586	-1.0586	-1.0566									
3	-0.5445	-0.4746	-0.4986	-0.6746	-0.8176	-0.8646	-0.9356	-0.9356	-0.9356	-0.9356	-0.9565									
4	-0.9326	-0.9128	-0.9132	-0.8647	-0.7606	-0.7255	-0.6170	-0.5403	-0.4534	-0.4873										
5	-0.5622	-0.5214	-0.4842	-0.4644	-0.4832	-0.4767	-0.5045	-0.4994	-0.4972	-0.4458										
6	-0.1776	-0.0795	0.0535	0.0904	0.1088	0.0885	-0.0087	-0.1460	-0.2341	-0.2686										
7	-0.0685	0.1893	0.3498	0.4787	0.5169	0.4660	0.2675	0.1964	0.1144	0.0974										
8	0.1248	-0.0175	-0.1520	-0.2620	-0.3917	-0.4810	-0.5751	-0.6501	-0.7137	-0.7640										
9	-0.2918	-0.1304	0.0015	0.1363	0.2607	0.3785	0.4382	0.4686	0.4562	0.3953										
10	-0.4998	-0.6231	-0.7580	-0.8453	-0.9315	-0.9857	-1.0331	-1.0529	-1.0680	-1.0697										
11	-1.0796	-1.0936	-1.0966	-1.0966	-1.0996	-1.1006	-1.1006	-1.0996	-1.0997	-1.0978										
12	-1.0184	-0.9872	-0.9330	-0.8807	-0.8047	-0.7382	-0.6460	-0.5719	-0.4788	-0.3955										
13	-0.2513	-0.3094	-0.3723	-0.4617	-0.5417	-0.6397	-0.7159	-0.7967	-0.8500	-0.8985										
14	-0.4647	-0.6176	-0.7077	-0.9746	-1.0456	-1.0596	-1.0546	-1.0526	-1.0576	-1.0416										
15	-0.4536	-0.6335	-0.4356	-0.6346	-0.7596	-0.8306	-0.9016	-0.9016	-0.9385	-0.9385										
16	-0.9086	-0.9138	-0.9142	-0.8636	-0.7696	-0.7325	-0.6810	-0.6283	-0.5264	-0.5533										
17	-0.5762	-0.5344	-0.5152	-0.4914	-0.5093	-0.5217	-0.5505	-0.5446	-0.5243	-0.4589										
18	-0.1982	-0.1410	-0.0271	0.0068	0.0242	0.0178	-0.0763	-0.1896	-0.2368	-0.2702										
19	-0.0970	0.1349	0.3035	0.4214	0.4327	0.4208	0.2203	0.1393	0.0383	0.0864										
20	0.0868	-0.0434	-0.1649	-0.2578	-0.4047	-0.5100	-0.5791	-0.6770	-0.7527	-0.7781										

	rwzd20150331.dat	rwzd20150531.dat	rwzd20150831.dat																	
1	118.500000	121.500000	27.000000	29.000000	1.666666E-02	1.666666E-02			2015083118											
2	-0.5726	-0.5146	-0.4696	-0.3526	-0.3026	-0.2786	-0.2246	-0.1846	-0.1386	-0.1066										
3	-0.0786	-0.1136	-0.1836	-0.1926	-0.2206	-0.2516	-0.2506	-0.2406	-0.2656	-0.3146										
4	-0.6867	-0.6808	-0.6722	-0.6367	-0.5896	-0.5565	-0.5190	-0.4613	-0.3744	-0.2933										
5	0.0678	0.1756	0.3518	0.5076	0.5198	0.5373	0.5285	0.5466	0.5997	0.7823										
6	1.0474	1.0315	1.0045	0.8744	0.8088	0.7405	0.6753	0.6110	0.6498	0.6394										
7	0.4535	0.3733	0.3578	0.3606	0.3549	0.3880	0.4304	0.4904	0.6103	0.7434										
8	1.1988	0.9995	0.8420	0.7620	0.6712	0.6139	0.6138	0.5539	0.4073	0.3240										
9	0.2442	0.2776	0.2575	0.2883	0.3467	0.4195	0.4542	0.4566	0.4312	0.3573										
10	-0.5308	-0.6581	-0.8080	-0.8983	-0.9905	-1.0457	-1.0961	-1.1219	-1.1400	-1.1467										
11	-1.1806	-1.1796	-1.1816	-1.1806	-1.1826	-1.1826	-1.1846	-1.1826	-1.1817	-1.1788										
12	-1.0974	-1.0642	-1.0110	-0.9607	-0.8867	-0.8182	-0.7280	-0.6529	-0.5628	-0.4925										
13	-0.3523	-0.4064	-0.4673	-0.5537	-0.6327	-0.7247	-0.7999	-0.8787	-0.9290	-0.9745										
14	-0.5867	-0.5536	-0.4687	-0.3766	-0.3276	-0.3046	-0.2476	-0.2086	-0.1786	-0.1306										
15	0.0144	-0.0116	-0.0596	-0.1056	-0.1586	-0.2066	-0.2116	-0.2416	-0.2786	-0.3276										

和采样历元时刻 (ETideLoad 约定的长整型格式) 3 个属性构成。 GM, a 称为球谐系数模型的尺度参数, 表示球谐系数模型中的面谐函数定义在半径等于地球长半轴 a 的球面上。

(2) 球谐系数模型由若干个记录组成, 每个记录的属性格式: 阶 n , 次 m , 球谐系数 C_{nm} , S_{nm} (C_{nm} 中误差, S_{nm} 中误差)。记录的属性之间用空格隔开。

(3) ETideLoad 不要求球谐系数阶次按顺序排列, 容许阶次不充分。对于非充分阶次的位系数文件, 程序自动将非充分阶次的位系数数值置零。

7.4 主要地球物理模型与数值标准

ETideLoad 默认情况下, 以 IERS2010 协议推荐的地球物理模型和数值标准为基础, 用户可根据实际需要对其更新, 并在[地球物理模型与数值标准设置]程序中指定使用。这些地球物理模型和数值标准以文件形式存储。

7.4.1 大气压潮球谐系数模型文件

360 阶大气压潮负荷球谐系数模型 ECMWF2006.dat。采用欧洲中期气候预报中心 ECMWF-DCDA2006 的大气压周日 S_1 、半日 S_2 、半年 S_{6a} 和年周期 S_{12a} 分潮的 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 全球调和常数格网, 由 ETideLoad4.5 有关程序按球谐分析方法生成, 以满足厘米级大地测量基本需要。

ECMWF-DCDA2006 模型的大气压周日 S_1 、半日 S_2 分潮可构成 RP03 模型。地面大气压单位: hPa。

ECMWF2006.dat													
1 Atmospheric tide model: ECMWF-DCDA2006 normalized model up to (360,360) in hPa													
2	半日/周日/半年/年周期	Doodson	Darw	n	m	Csin+	CCos+	Csin-	CCos-	C+	eps+	C-	eps-
4	164.556	S1	1	0	0	-0.01055351	0.00555959	-0.01055351	0.00555959	0.01192835	297.7803	0.01192835	297.7803
5	164.556	S1	2	0	0	-0.00898730	0.02713172	-0.00898730	0.02713172	0.02858149	341.6727	0.02858149	341.6727
6	164.556	S1	3	0	0	0.02416514	0.01232573	0.02416514	0.01232573	0.02712707	62.9756	0.02712707	62.9756
7	164.556	S1	4	0	0	0.01971779	-0.01808456	0.01971779	-0.01808456	0.02675523	132.5261	0.02675523	132.5261
8	164.556	S1	5	0	0	0.00538826	-0.01556217	0.00538826	-0.01556217	0.01646859	160.9021	0.01646859	160.9021
9	164.556	S1	6	0	0	-0.01896560	-0.00055330	-0.01896560	-0.00055330	0.01897366	268.3289	0.01897366	268.3289
10	164.556	S1	7	0	0	0.00163224	0.00711629	0.00163224	0.00711629	0.00730108	12.9183	0.00730108	12.9183
11	164.556	S1	8	0	0	0.00341644	0.00607435	0.00341644	0.00607435	0.00696920	29.3550	0.00696920	29.3550
12	164.556	S1	9	0	0	-0.00469730	-0.00311697	-0.00469730	-0.00311697	0.00563739	236.4331	0.00563739	236.4331
13	164.556	S1	10	0	0	0.00442735	-0.01563001	0.00442735	-0.01563001	0.01624496	164.1847	0.01624496	164.1847
14	164.556	S1	11	0	0	0.00941838	-0.00082619	0.00941838	-0.00082619	0.00945455	95.0132	0.00945455	95.0132
15	164.556	S1	12	0	0	-0.00454013	0.00688423	-0.00454013	0.00688423	0.00824654	326.5953	0.00824654	326.5953
16	164.556	S1	13	0	0	-0.01227672	0.00310149	-0.01227672	0.00310149	0.01266243	284.1781	0.01266243	284.1781
17	164.556	S1	14	0	0	0.00203678	0.00166923	0.00203678	0.00166923	0.00263340	50.6638	0.00263340	50.6638
18	164.556	S1	15	0	0	0.00253994	0.00381849	0.00253994	0.00381849	0.00458608	33.6306	0.00458608	33.6306
19	164.556	S1	16	0	0	0.00613602	-0.00041704	0.00613602	-0.00041704	0.00615017	93.8882	0.00615017	93.8882
20	164.556	S1	17	0	0	-0.00113104	-0.00413462	-0.00113104	-0.00413462	0.00428652	195.2992	0.00428652	195.2992
21	164.556	S1	18	0	0	-0.00311700	0.00136741	-0.00311700	0.00136741	0.00340375	293.6868	0.00340375	293.6868
22	164.556	S1	19	0	0	-0.00217138	0.00053937	-0.00217138	0.00053937	0.00223737	283.9498	0.00223737	283.9498
23	164.556	S1	20	0	0	-0.00017645	0.00369644	-0.00017645	0.00369644	0.00370065	357.2671	0.00370065	357.2671

7.4.2 海潮负荷球谐系数模型文件

海潮负荷规格化球谐系数与负荷位系数的关系如 IERS2010 协议标准 (6.15) 式。系统中的 100 阶海潮负荷规格化球谐系数模型 FES2004S1.dat 如图。

为满足卫星、近岸和海洋重力梯度数据处理的基本需要, 我们采用 AVISO+ 的 FES2014b 潮高调和常数模型, 经 ETideLoad4.5[分潮球谐分析与负荷潮球谐系数模型构建], 生成了 720 阶 FES2014 海潮负荷规格化球谐系数模型 FES2014b720cs.dat。FES2014b720cs.dat 包括 36 个分潮 ($\Omega_1, \Omega_2; 2N_2, Eps_2, J_1, K_1, K_2, L_2, La_2, M_2, M_3, M_4, M_6, M_8, M_f, MKS_2, M_m, MN_4, MS_4, MS_f, MS_qm, Mtm, Mu_2, N_2, N_4, Nu_2, O_1, P_1, Q_1, R_2, S_1, S_2, S_4, S_a, S_{sa}, T_2$) 潮高球谐系数, 其中平衡潮 Ω_1, Ω_2 球谐系数来源于 FES2004S1.dat。

Ocean tide model: FES2004 normalized model (fev. 2004) up to (100,100) in cm												
(long period from FES2002 up to (50,50) + equilibrium Om1/Om2, atmospheric tide NOT included)												
Doodson	Darw	n	m	Csin+	Ccos+	Csin-	Ccos-	C+	eps+	C-	eps-	
4	55.565	Om1	2	0	-0.540594	0.000000	0.000000	0.000000	0.5406	270.000	0.0000	0.0000
5	55.575	Om2	2	0	-0.005218	0.000000	0.000000	0.000000	0.0052	270.000	0.0000	0.0000
6	56.554	Sa	1	0	0.017233	0.000013	0.000000	0.000000	0.0172	89.957	0.0000	0.0000
7	56.554	Sa	2	0	-0.046604	-0.000903	0.000000	0.000000	0.0466	268.890	0.0000	0.0000
8	56.554	Sa	3	0	-0.000889	0.000049	0.000000	0.000000	0.0009	273.155	0.0000	0.0000
9	56.554	Sa	4	0	0.012069	-0.000413	0.000000	0.000000	0.0121	91.960	0.0000	0.0000
10	56.554	Sa	5	0	-0.009780	-0.000421	0.000000	0.000000	0.0098	267.535	0.0000	0.0000
11	56.554	Sa	6	0	0.006895	0.000043	0.000000	0.000000	0.0069	89.643	0.0000	0.0000
12	56.554	Sa	7	0	-0.010515	-0.000287	0.000000	0.000000	0.0105	268.437	0.0000	0.0000
13	56.554	Sa	8	0	0.002067	-0.000011	0.000000	0.000000	0.0021	90.305	0.0000	0.0000
14	56.554	Sa	9	0	-0.004236	-0.000110	0.000000	0.000000	0.0042	268.512	0.0000	0.0000
15	56.554	Sa	10	0	-0.001781	-0.000085	0.000000	0.000000	0.0018	267.268	0.0000	0.0000
16	56.554	Sa	11	0	-0.001372	-0.000068	0.000000	0.000000	0.0014	267.163	0.0000	0.0000
17	56.554	Sa	12	0	-0.004081	-0.000048	0.000000	0.000000	0.0041	269.326	0.0000	0.0000
18	56.554	Sa	13	0	-0.000116	-0.000041	0.000000	0.000000	0.0001	250.534	0.0000	0.0000
19	56.554	Sa	14	0	-0.003043	-0.000007	0.000000	0.000000	0.0030	269.868	0.0000	0.0000
20	56.554	Sa	15	0	0.001109	-0.000028	0.000000	0.000000	0.0011	91.446	0.0000	0.0000
21	56.554	Sa	16	0	-0.002596	-0.000034	0.000000	0.000000	0.0026	269.250	0.0000	0.0000
22	56.554	Sa	17	0	-0.000674	0.000022	0.000000	0.000000	0.0007	271.870	0.0000	0.0000
23	56.554	Sa	18	0	0.000546	0.000006	0.000000	0.000000	0.0005	89.370	0.0000	0.0000
24	56.554	Sa	19	0	-0.000024	0.000023	0.000000	0.000000	0.0000	313.781	0.0000	0.0000
25	56.554	Sa	20	0	0.000867	0.000014	0.000000	0.000000	0.0009	89.075	0.0000	0.0000

7.4.3 地球负荷勒夫数文件

地球负荷勒夫数，也称地球负荷形变系数。系统采用球对称无旋转弹性地球模型 REF6371 计算的负荷勒夫数 Love_load_cm.dat（来源于区域地面回弹计算器 REAR1.0, 2015.11）。文件包括了 0 至 32768 阶的径向位移、水平位移和（重力）位负荷勒夫数 $(h'_n, l'_n, k'_n), n = 0, \dots, 32768$ ，取 $k'_0 = k'_1 = 0$ ，如图。

The load Love numbers from the REAR package are attached. There are no more of these oscillations at high degree, and they go up to degree 32768. November 20, 2015. Jean-Paul			
CM: center of mass reference frame			
n	h' (vert)	l' (horiz)	k' (potent)
0	0.0000000000D+00	0.0000000000D+00	0.0000000000D+00
1	-0.0287112988D+01	0.1045044062D+00	0.0000000000D+00
2	-0.9945870591D+00	0.2411251588D-01	-0.3057703360D+00
3	-0.1054653021D+01	0.7085493677D-01	-0.1962722363D+00
4	-0.1057783895D+01	0.5958723183D-01	-0.1337905897D+00
5	-0.1091185915D+01	0.4702627503D-01	-0.1047617976D+00
6	-0.1149253656D+01	0.3940811757D-01	-0.9034958051D-01
7	-0.1218363201D+01	0.3499400649D-01	-0.8205733906D-01
8	-0.1290473661D+01	0.3225123202D-01	-0.7652348967D-01
9	-0.1361847865D+01	0.3038562458D-01	-0.7239287690D-01
10	-0.1430981761D+01	0.2902258995D-01	-0.6907768441D-01
11	-0.1497377458D+01	0.2798156018D-01	-0.6629382122D-01
12	-0.1560934855D+01	0.2716367080D-01	-0.6388475059D-01
13	-0.1621715593D+01	0.2650554043D-01	-0.6175536119D-01
14	-0.1679770379D+01	0.2596800569D-01	-0.5983856019D-01
15	-0.1735198310D+01	0.2551661917D-01	-0.5808965155D-01
16	-0.1788088250D+01	0.2512667367D-01	-0.5647488828D-01
17	-0.1838448069D+01	0.2478452380D-01	-0.5496610314D-01
18	-0.1886440474D+01	0.2447083426D-01	-0.5354901315D-01
19	-0.1932084480D+01	0.2417919471D-01	-0.5220607051D-01
20	-0.1975465902D+01	0.2389862142D-01	-0.5092726303D-01
21	-0.2016677975D+01	0.2362510597D-01	-0.4970406011D-01
22	-0.2055800328D+01	0.2335504487D-01	-0.4853059813D-01
23	-0.2092911079D+01	0.2308664225D-01	-0.4740132374D-01
24	-0.2128152865D+01	0.2281672671D-01	-0.4631386954D-01
25	-0.2161524726D+01	0.2254486326D-01	-0.4526257393D-01
26	-0.219319725D+01	0.2227090304D-01	-0.4424709694D-01

为抑制负荷格林函数的高频震荡，ETideLoad 程序将实际负荷格林函数计算到 54000 阶，超过 32768 阶的负荷勒夫数用其渐进公式计算： $h'_n = -6.209114$ ， $l'_n = 1.890061/n$ ， $k'_n = -2.682697/n$ 。

7.4.4 IERS 地球定向参数 EOP 文件

IERSEOP_C04 格式产品，实测或预报 EOP。对于未来历元，可以使用预报产品，预报时间控制在半年以内为宜。ETideLoad 中的 EOP 文件 IERSeopc04.dat (ITRF2014) 如图。

INTERNATIONAL EARTH ROTATION AND REFERENCE SYSTEMS SERVICE
EARTH ORIENTATION PARAMETERS
EOP (IERS) 14 C04

FORMAT (3 (I4), 17, 2 (F11.6), 2 (F12.7), 2 (F11.6), 2 (F11.6), 2 (F11.7), 2 (F12.6))

Date (0h UTC)	MJD	X "	Y "	UT1-UTC s	LOD s	dx "	dy "	X Err "	Y Err "	UT1-UTC Err s	LOD Err s	dx Err "	dy Err "
2001 1 1 51510	-0.073506	0.398095	0.0931626	0.0006630	0.000150	-0.000109	0.000061	0.000048	0.0000107	0.0000131	0.000028	0.000030	
2001 1 2 51911	-0.072651	0.399806	0.0924546	0.0007596	0.000141	-0.000092	0.000061	0.000048	0.0000070	0.0000131	0.000028	0.000031	
2001 1 3 51912	-0.071557	0.401864	0.0916573	0.0008515	0.000132	-0.000074	0.000061	0.000047	0.0000034	0.0000131	0.000028	0.000031	
2001 1 4 51913	-0.071024	0.403840	0.0907195	0.0008969	0.000149	-0.000084	0.000061	0.000047	0.0000084	0.0000132	0.000029	0.000031	
2001 1 5 51914	-0.070723	0.405333	0.0897667	0.0008872	0.000174	-0.000103	0.000060	0.000047	0.0000163	0.0000132	0.000029	0.000031	
2001 1 6 51915	-0.070378	0.406725	0.0889292	0.0008068	0.000199	-0.000122	0.000060	0.000047	0.0000221	0.0000132	0.000029	0.000031	
2001 1 7 51916	-0.070068	0.408041	0.0882375	0.0006463	0.000224	-0.000141	0.000060	0.000047	0.0000163	0.0000132	0.000029	0.000031	
2001 1 8 51917	-0.070205	0.409479	0.0876861	0.0004933	0.000250	-0.000160	0.000060	0.000047	0.0000104	0.0000132	0.000029	0.000031	
2001 1 9 51918	-0.070220	0.410814	0.0872445	0.0004441	0.000275	-0.000179	0.000060	0.000046	0.0000046	0.0000132	0.000029	0.000032	
2001 1 10 51919	-0.069961	0.412336	0.0868199	0.0004186	0.000270	-0.000158	0.000060	0.000046	0.0000043	0.0000133	0.000029	0.000031	
2001 1 11 51920	-0.069830	0.414004	0.0864003	0.0004447	0.000155	-0.000180	0.000059	0.000046	0.0000039	0.0000133	0.000029	0.000031	
2001 1 12 51921	-0.069456	0.416120	0.0858451	0.0005855	0.000106	-0.000203	0.000059	0.000046	0.0000088	0.0000133	0.000028	0.000030	
2001 1 13 51922	-0.067463	0.418251	0.0851161	0.0007422	0.000095	-0.000222	0.000059	0.000046	0.0000138	0.0000133	0.000028	0.000030	
2001 1 14 51923	-0.066479	0.420226	0.0842390	0.0008823	0.000084	-0.000241	0.000059	0.000046	0.0000112	0.0000134	0.000028	0.000029	
2001 1 15 51924	-0.065406	0.422044	0.0833100	0.0009404	0.000072	-0.000259	0.000059	0.000046	0.0000086	0.0000134	0.000027	0.000028	
2001 1 16 51925	-0.063999	0.423541	0.0824180	0.0009155	0.000061	-0.000278	0.000059	0.000046	0.0000060	0.0000134	0.000027	0.000028	
2001 1 17 51926	-0.062602	0.425076	0.0816384	0.0007815	0.000050	-0.000297	0.000059	0.000046	0.0000034	0.0000135	0.000027	0.000027	
2001 1 18 51927	-0.061434	0.426438	0.0809369	0.0005717	0.000307	-0.000307	0.000060	0.000046	0.0000060	0.0000135	0.000026	0.000026	
2001 1 19 51928	-0.060301	0.428009	0.0803952	0.0004021	0.000387	-0.000305	0.000060	0.000046	0.0000114	0.0000135	0.000026	0.000025	
2001 1 20 51929	-0.059175	0.429380	0.0801026	0.0002618	0.000455	-0.000345	0.000060	0.000046	0.0000197	0.0000136	0.000025	0.000025	
2001 1 21 51930	-0.058122	0.430418	0.0799570	0.0000786	0.000484	-0.000385	0.000060	0.000046	0.0000198	0.0000136	0.000025	0.000024	
2001 1 22 51931	-0.056745	0.431190	0.0799904	-0.0000387	0.000522	-0.000424	0.000060	0.000047	0.0000199	0.0000136	0.000024	0.000023	
2001 1 23 51932	-0.055378	0.432155	0.0800354	-0.0000794	0.000580	-0.000464	0.000061	0.000047	0.0000200	0.0000137	0.000024	0.000022	
2001 1 24 51933	-0.054038	0.434299	0.0801054	-0.0000531	0.000619	-0.000513	0.000061	0.000047	0.0000090	0.0000137	0.000024	0.000022	
2001 1 25 51934	-0.052227	0.436048	0.0801105	0.0000481	0.000610	-0.000540	0.000061	0.000047	0.0000025	0.0000137	0.000023	0.000021	
2001 1 26 51935	-0.050435	0.438026	0.0799589	0.0001715	0.000611	-0.000525	0.000062	0.000048	0.0000160	0.0000137	0.000023	0.000021	
2001 1 27 51936	-0.049130	0.439812	0.0796787	0.0002940	0.000594	-0.000542	0.000062	0.000048	0.0000312	0.0000137	0.000022	0.000020	
2001 1 28 51937	-0.047602	0.441607	0.0794402	0.0004503	0.000586	-0.000522	0.000062	0.000048	0.0000276	0.0000137	0.000022	0.000019	
2001 1 29 51938	-0.045837	0.443509	0.0788122	0.0005621	0.000579	-0.000521	0.000063	0.000048	0.0000239	0.0000138	0.000021	0.000019	
2001 1 30 51939	-0.043660	0.444974	0.0782984	0.0006019	0.000572	-0.000511	0.000063	0.000048	0.0000203	0.0000138	0.000021	0.000018	
2001 1 31 51940	-0.042067	0.446396	0.0777060	0.0005437	0.000554	-0.000519	0.000063	0.000049	0.0000063	0.0000138	0.000021	0.000019	
2001 1 1 51941	-0.040463	0.447325	0.0772066	0.0004689	0.000528	-0.000511	0.000064	0.000049	0.0000064	0.0000138	0.000022	0.000020	
2001 2 2 51942	-0.039012	0.448060	0.0767917	0.0003692	0.000520	-0.000514	0.000064	0.000049	0.0000143	0.0000138	0.000022	0.000020	

7.4.5 地球质心变化时间序列文件

美国德克萨斯大学空间研究中心 UT/CSR 采用 LAGEOS-1/2, Stella, Starlette, AJISAI, BEC 和 LARES 共 7 颗卫星激光测距 (SLR), 实际测定的地球质心月变化时间序列产品 Monthly_geocenter_MK.txt (ITRF2014), 头文件占住一行, 如图。对于未来历元, 可以使用预报产品, 预报时间控制在 3 个月以内为宜。

Monthly_geocenter_MK.txt

1 Description for Geocenter variations from SLR
2 Column 1: Year equivalent of first day of month
3 Column 2-4: Lower Pass Filtered X,Y,Z (mm)
4 Column 5-7: SLR estimated X,Y,Z (mm)
5 Column 8-10: Sigma for X,Y,Z (mm)
6 Usage: (C11,S11,C10) = (X,Y,Z)/sqrt(3.0)/6378136000.0
7 Remark: Monthly station range bias and zenith delay adjusted
8 FORMAT(F9.1,F12.4,6F9.3,3F7.2)

1993.0000	5.077	-2.796	-1.605	6.477	1.797	-6.338	0.11	0.12	0.31
1993.0849	4.639	-3.300	-1.244	1.922	-2.697	2.723	0.10	0.10	0.29
1993.1615	3.765	-3.384	-1.106	5.188	-4.895	0.714	0.09	0.10	0.26
1993.2464	2.562	-2.788	-1.336	1.450	-6.692	-3.054	0.11	0.12	0.26
1993.3285	1.198	-1.521	-1.911	2.230	-4.670	-4.583	0.11	0.10	0.25
1993.4134	-0.126	0.137	-2.656	-0.187	3.425	0.901	0.10	0.10	0.25
1993.4956	-1.214	1.754	-3.323	-0.585	2.945	-1.864	0.10	0.09	0.21
1993.5804	-1.920	2.913	-3.678	-0.832	3.154	-1.596	0.09	0.08	0.21
1993.6653	-2.178	3.347	-3.579	-4.795	3.621	-10.809	0.09	0.08	0.20
1993.7474	-2.004	2.991	-3.037	-4.289	2.258	-4.667	0.08	0.07	0.21
1993.8323	-1.466	1.952	-2.253	2.444	3.179	2.852	0.09	0.09	0.27
1993.9144	-0.645	0.449	-1.614	0.122	1.610	1.299	0.09	0.09	0.22
1994.0000	0.397	-1.237	-1.600	-0.654	-4.129	-7.715	0.08	0.09	0.19
1994.0849	1.612	-2.802	-2.625	1.034	-5.735	1.035	0.09	0.09	0.20
1994.1615	2.931	-3.928	-4.840	2.030	-1.856	-5.718	0.08	0.08	0.21
1994.2464	4.228	-4.321	-7.998	3.979	-2.408	-5.872	0.09	0.08	0.20
1994.3285	5.313	-3.784	-11.461	8.049	-1.572	-11.862	0.10	0.09	0.20
1994.4134	5.965	-2.309	-14.360	5.917	-3.452	-22.300	0.09	0.10	0.24
1994.4956	6.014	-0.151	-15.860	2.151	-2.927	-10.555	0.09	0.10	0.25
1994.5804	5.420	2.179	-15.438	8.112	1.690	-10.840	0.10	0.09	0.21
1994.6653	4.304	4.032	-13.045	5.285	6.117	-16.892	0.10	0.09	0.23
1994.7474	2.904	4.824	-9.132	0.798	4.659	-9.078	0.09	0.08	0.22
1994.8323	1.475	4.256	-4.526	2.139	3.922	-6.683	0.09	0.09	0.20
1994.9144	0.177	2.468	-0.217	-0.136	3.443	2.904	0.10	0.09	0.20
1995.0000	-0.968	0.022	2.891	0.434	-0.752	3.934	0.10	0.10	0.21
1995.0849	-2.032	-2.269	4.202	-2.440	-3.165	2.200	0.09	0.09	0.23
1995.1615	-3.058	-3.612	3.589	-4.084	-3.805	1.904	0.07	0.07	0.19
1995.2464	-3.947	-3.513	1.441	-3.530	-1.276	0.026	0.08	0.08	0.21
1995.3285	-4.428	-1.925	-1.438	-4.641	-2.118	2.117	0.10	0.09	0.22
1995.4134	-4.161	0.745	-4.070	-5.138	-0.508	3.383	0.09	0.09	0.24
1995.4956	-2.932	3.793	-5.613	-1.071	2.425	-15.003	0.10	0.09	0.24
1995.5804	-0.841	6.436	-5.643	1.836	8.742	-9.854	0.10	0.10	0.26
1995.6653	1.645	8.023	-4.282	-2.748	6.453	-0.824	0.09	0.09	0.24
1995.7474	3.824	8.181	-2.115	3.454	10.701	0.202	0.08	0.08	0.24
1995.8323	5.037	6.875	0.053	3.433	3.855	2.904	0.08	0.08	0.22
1995.9144	4.950	4.393	1.504	10.443	6.059	4.592	0.11	0.11	0.30
1996.0000	3.701	1.271	1.837	5.026	2.478	-1.521	0.10	0.10	0.21
1996.0849	1.817	-1.823	1.057	-2.576	-3.164	-7.711	0.09	0.09	0.22

7.4.6 海洋潮高调和常数格网模型

(1) ETideLoad4.5 默认的海洋潮高调和常数模型是 GOT4.8 的 10 个分潮全球 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 潮高调和常数模型格网。

(2) 同一海潮模型的各分潮（剩余）调和常数文件独立存放在一个目录中（如 C:\ETideLoad4.5_win64cn\OceanTide），不同分潮模型的格网规格完全相同。

(3) 分潮类型由分潮模型格网头文件的第 7 个属性 Doodson 常数识别，ETideLoad 程序对分潮模型文件的命名形式没有特殊要求。

(4) 海潮潮高调和常数模型可以是全球的，也可以是区域的，程序能自动识别。

(5) 分潮潮高单位 cm，陆地区域分潮调和常数置零。

1	0.000000	360.000000	-90.000000	90.000000	0.50000000	0.50000000	255555							
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

7.4.7 行星星历 JEPH 文件

JPL 月球和行星星历文件 JEPH.440。JPL 月球和行星星历 DE440/LE440 起止时间 1850 年至 2250 年。

7.4.8 勒夫数频率相关系数文件

勒夫数频率相关系数文件 frqadjlovekhl.txt。通过改造 IERS2010 协议标准中的表 6.5a、6.5b、6.5c、7.2、7.3a 和 7.3b，增加 Cartwright-Tayler 相应分潮平衡潮高全球最大振幅（ $10^{-5}m$ ）生成，用于统一计算与频率相关的高精度全要素大地测量固体潮效应校正值。

1	doodson	°/hr	l	l'	F	D	Ω	(δR δI)	[2~72, e-5; 73~120, e-4]	H (e-5m)
2	245655	28.43973	1	0	2	0	2	2	0	12099
3	255555	28.98410	0	0	2	0	2	2	0	63192
4	125755	12.85429	2	0	2	0	2	-29	3	-664
5	127555	12.92714	0	0	2	2	2	-30	3	-802
6	135645	13.39645	1	0	2	0	1	-45	5	-947
7	135655	13.39866	1	0	2	0	2	-46	5	-5020
8	137455	13.47151	-1	0	2	2	2	-49	5	-954
9	145545	13.94083	0	0	2	0	1	-82	7	-4946
10	145555	13.94303	0	0	2	0	2	-83	7	-26221
11	147555	14.02517	0	0	0	2	0	-91	9	343
12	153655	14.41456	1	0	2	-2	2	-168	14	194
13	155445	14.48520	-1	0	2	0	1	-193	16	137
14	155455	14.48741	-1	0	2	0	2	-194	16	741
15	155655	14.49669	1	0	0	0	0	-197	16	2062
16	155665	14.49890	1	0	0	0	1	-198	16	414
17	157455	14.56955	-1	0	0	2	0	-231	18	394
18	157465	14.57176	-1	0	0	2	1	-233	18	87

7.4.9 Desai 海洋极潮系数文件

位系数与极移参数和极潮系数之间关系采用 Desai (2002) 的自适应海洋潮汐质量平衡算法, 如 IERS2010 协议标准式 (6.23)。ETideLoad 中的 360 阶海潮极潮系数模型文件 desaiscopolecoef.txt 如图。

1	n	m	Am (Real)	Bm (Real)	Am (Imaginary)	Bm (Imaginary)
2	1	0	1.8736759805448e-02	0.0000000000000e+00	2.9688884960424e-02	0.0000000000000e+00
3	1	1	2.8258913146935e-02	2.1774643075236e-02	2.3898264393684e-02	5.6771602236635e-02
4	2	0	-3.955099024374e-03	0.0000000000000e+00	6.8390464271953e-04	0.0000000000000e+00
5	2	1	-2.4325330521304e-01	5.4680741193318e-03	5.4680741193318e-03	-1.9252111185300e-01
6	2	2	1.9102047023374e-02	1.1158297399424e-02	-1.5123770169928e-02	-2.4857839911518e-04
7	3	0	-2.0869478248378e-02	0.0000000000000e+00	-1.0775272844125e-02	0.0000000000000e+00
8	3	1	3.0809252024051e-02	7.4552838003486e-03	5.5937937407386e-03	6.6496877724041e-02
9	3	2	2.3295703062692e-02	3.7984356463618e-02	-2.1678456242839e-03	1.1232359168959e-02
10	3	3	7.9776020803848e-03	1.2502542787182e-02	-2.2341399966187e-02	-2.2979590161975e-02
11	4	0	-1.0612668622736e-02	0.0000000000000e+00	-1.5569196271270e-02	0.0000000000000e+00
12	4	1	1.3606306893006e-04	2.2051992576636e-03	2.0130037501025e-03	1.6323514549038e-02
13	4	2	1.1139374002795e-02	1.7031544962514e-02	-7.9621127289889e-03	-8.4440848505132e-04
14	4	3	-1.6100794768731e-02	1.4681986705593e-02	9.5178410813713e-03	-2.1017136590507e-02
15	4	4	4.3132021252707e-03	-4.6836271624465e-03	-2.9309550249205e-03	1.3175690530653e-02
16	5	0	7.0731357453056e-03	0.0000000000000e+00	-1.8023029843730e-03	0.0000000000000e+00
17	5	1	2.5644907587134e-03	-1.0076857169607e-02	-9.6273922883022e-03	-1.1684145258283e-02
18	5	2	-7.9615162895536e-03	2.0820461332209e-03	-3.0274671879191e-03	-1.0475800274156e-02
19	5	3	-1.1818705609675e-02	1.2063416189422e-02	-1.6584597520384e-02	-2.8253596831795e-02
20	5	4	9.2731253376468e-03	1.8353138561674e-02	-1.0870088052722e-02	4.7120935900411e-03
21	5	5	1.4460712893968e-02	-8.5510747244577e-03	8.9167437380844e-04	1.6048852898081e-02
22	6	0	7.4439256593180e-03	0.0000000000000e+00	-1.0670986469176e-03	0.0000000000000e+00
23	6	1	1.8261459881891e-02	-3.7775168887123e-03	-3.6768716254667e-03	-1.4329108864964e-03
24	6	2	-8.4568708595335e-03	2.5640802224787e-03	8.0976103423504e-03	-6.3983905389798e-03
25	6	3	-1.5355186088842e-02	1.8642889355748e-03	-9.6956523287846e-03	-2.2353328754893e-02
26	6	4	1.4142224508565e-03	-2.2076728030274e-03	-6.1060835758971e-03	1.4301205310949e-02

7.4.10 海潮负荷球谐系数一阶项同相异相幅值文件

(1) 海潮负荷球谐系数一阶项同相异相幅值文件 OtideOne.dat, 可用于地球质心变化海潮负荷效应和大地测量全要素海潮负荷质心效应预报。

(2) 海潮负荷球谐系数一阶项同相异相幅值文件由 ETideLoad4.5 系列海洋潮高分潮球谐分析程序生成。下图为由 FES2014b 模型 34 个分潮调和常数球谐分析后生成的海潮负荷球谐系数一阶项同相异相幅值文件。

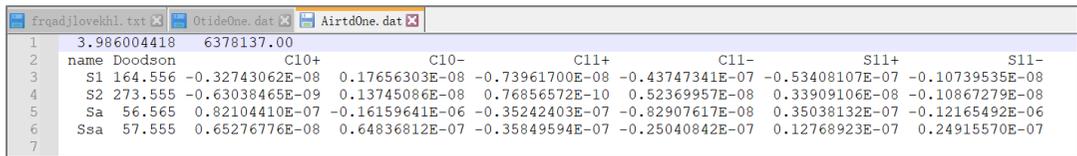
1	name	C10+	C10-	C11+	C11-	S11+	S11-
2	3.986004418	6378137.00					
3	2N2	247.455	0.14379190E-08	0.72446933E-09	0.45556662E-09	0.50261431E-09	0.98234968E-09
4	J1	175.455	0.22809765E-08	-0.14599680E-07	0.11146859E-07	0.31354016E-08	0.49073923E-08
5	K1	165.555	0.65903198E-07	-0.23618735E-06	0.15240517E-06	0.54510351E-07	0.57951321E-07
6	L2	275.555	0.58820344E-08	0.78223673E-09	0.82634785E-08	0.17098158E-07	0.28274727E-08
7	K2	265.455	0.99527541E-09	0.43369491E-10	0.27208849E-08	0.18838893E-08	-0.93316186E-09
8	M2	255.555	0.64086749E-07	0.33741274E-07	0.82092113E-07	0.76976307E-08	-0.39331272E-07
9	M3	355.555	0.51159035E-10	0.26216133E-10	0.20622631E-10	-0.16737336E-10	-0.74054752E-10
10	M4	455.555	-0.12877739E-09	-0.82078020E-09	0.21241775E-09	0.89312487E-09	-0.11238411E-09
11	M6	655.555	0.18174228E-08	0.30921490E-09	0.36605439E-09	0.36841599E-09	-0.72147727E-09
12	M8	855.555	-0.59854172E-10	-0.29503418E-11	0.41858427E-10	0.58809710E-10	-0.34465624E-10
13	Mf	75.555	0.23994538E-07	0.23160661E-08	0.14961765E-07	-0.19050356E-07	0.57231952E-08
14	Mm	65.455	0.12211587E-07	-0.10619733E-08	-0.13680094E-08	-0.93454574E-08	0.34149364E-08
15	N2	245.655	0.16604395E-07	0.24692742E-08	0.10060051E-07	0.75631673E-09	-0.49125733E-09
16	N4	435.755	-0.11170849E-09	-0.41029169E-10	0.37178942E-10	-0.10703469E-09	-0.53442667E-10
17	O1	145.555	0.23239277E-07	-0.16830188E-06	0.86481239E-07	0.11802879E-07	0.58555768E-07
18	P1	163.555	0.16600812E-07	-0.74602430E-07	0.48235157E-07	0.14146460E-07	0.16888410E-07
19	Q1	135.655	0.40244812E-08	-0.29117940E-07	0.15908436E-07	0.77164577E-09	0.12770867E-07
20	R2	274.554	0.21029138E-09	0.96276767E-10	0.25728894E-09	0.46084038E-09	0.53716115E-10
21	S1	164.556	-0.40129635E-08	0.48653114E-08	-0.48716881E-08	0.11419251E-07	0.744509139E-08
22	S2	273.555	0.22403023E-07	0.94564697E-08	0.30377828E-07	0.49157638E-07	-0.61338730E-08
23	S4	491.555	0.32089047E-09	0.14407638E-09	0.12925319E-11	0.14038268E-09	0.10308541E-09
24	Sa	56.554	0.21793187E-09	0.12972260E-09	0.71714382E-10	0.49927099E-10	-0.42733149E-10
25	T2	272.556	0.13719484E-08	0.73425584E-09	0.20944307E-08	0.29614380E-08	0.13767437E-09
26	MN4	445.655	-0.70793273E-09	-0.76823301E-10	0.24279253E-09	-0.66374018E-09	-0.14062685E-09
27	M4	473.555	0.32582237E-09	-0.10684852E-08	0.10873236E-08	0.38092589E-09	-0.40703836E-09
28	Msf	73.555	0.52032006E-08	0.12958178E-08	0.20898774E-09	0.69234415E-09	0.16108549E-08
29	Mtm	85.455	0.38057022E-08	0.89020662E-09	0.47545363E-08	-0.16109463E-08	0.13034435E-08
30	mu2	237.555	0.27230195E-08	-0.54548861E-09	0.80856645E-09	0.28475772E-08	0.30945151E-08
31	nu2	245.655	0.31512988E-08	0.13274377E-08	0.16643292E-08	0.771716190E-09	-0.34369557E-09
32	Ssa	57.555	0.85592993E-08	-0.21041028E-09	-0.85777470E-08	-0.10849053E-08	0.38854237E-09
33	eps2	227.655	0.15232320E-08	-0.54284574E-09	0.18709319E-08	-0.17678032E-09	0.14037532E-08
34	lam2	263.655	0.77975910E-09	-0.46145888E-09	0.29230225E-08	-0.81098933E-09	-0.66691816E-09
35	MKS2	257.555	-0.76338045E-11	-0.81694611E-10	0.81955321E-10	0.53313693E-09	0.52931064E-09
36	Msqm	93.555	0.17382639E-09	-0.21085098E-10	0.98864729E-10	-0.18391545E-09	-0.15315104E-09
37							

(3) 文件格式：第一行至少由两个属性数据构成，即地心引力常数 GM ($\times 10^{14}m^3/s^2$)、椭圆长半轴 a (m)；第二行 Doodson 符号，Doodson 数，海潮负荷规格化一阶项 \bar{C}_{10} 的同相幅值和异相幅值 (cm)， \bar{C}_{11} 的同相幅值和异相幅值 (cm)， \bar{S}_{11} 的同相幅值和异相幅值 (cm)。

7.4.11 地面大气压潮负荷球谐系数一阶项同相异相幅值文件

(1) 大气压潮负荷球谐系数一阶项同相异相幅值文件 AirtOne.dat，可用于地球质心变化海潮负荷效应和大地测量全要素大气压潮负荷质心效应预报。

(2) 地面大气压潮负荷球谐系数一阶项同相异相幅值文件由 ETideLoad4.5 系列地面气压分潮球谐分析程序生成。下图为由欧洲中期气候预报中心 ECMWF-DCDA2006 的地面大气压周日 S_1 、半日 S_2 、半年 S_{Sa} 和年周期 S_a 分潮调和常数球谐分析后，生成的地面大气压潮负荷球谐系数一阶项同相异相幅值文件 AirtOne.dat。



Line	Parameter	Value	Parameter	Value	Parameter	Value	Parameter	Value	Parameter	Value
1		3.986004418		6378137.00						
2	name	Doodson	C10+	C10-	C11+	C11-	S11+	S11-		
3	S1	164.556	-0.32743062E-08	0.17656303E-08	-0.73961700E-08	-0.43747341E-07	-0.53408107E-07	-0.10739535E-08		
4	S2	273.555	-0.63038465E-09	0.13745086E-08	0.76856572E-10	0.52369957E-08	0.33909106E-08	-0.10867279E-08		
5	Sa	56.565	0.82104410E-07	-0.16159641E-06	-0.35242403E-07	-0.82907617E-08	0.35038132E-07	-0.12165492E-06		
6	Ssa	57.555	0.65276776E-08	0.64836812E-07	-0.35849594E-07	-0.25040842E-07	0.12768923E-07	0.24915570E-07		
7										

(3) 文件格式：第一行至少由两个属性数据构成，即地心引力常数 GM ($\times 10^{14}m^3/s^2$)、椭圆长半轴 a (m)；第二行 Doodson 符号，Doodson 数，地面大气压潮负荷规格化一阶项 \bar{C}_{10} 的同相幅值和异相幅值 (hPa)， \bar{C}_{11} 的同相幅值和异相幅值 (hPa)， \bar{S}_{11} 的同相幅值和异相幅值 (hPa)。

第八章 ETideLoad4.5 主要算法及公式

8.1 地面及地球外部大地测量固体潮效应

地球外部天体引潮位直接引起地面及地球外部重力位变化，并激发固体地球形变，导致地球内部的质量重新分布，产生附加引力位。前者是天体引潮位的直接影响（即引潮位自身），后者是引潮位的间接影响，两者之和就是地面及地球外部重力位的固体潮效应，简称体潮效应。

8.1.1 地面及其外部固体潮效应统一表示

8.1.1.1 地球外部天体的地球引潮位计算

地球外部引力场可用位系数模型 $(\bar{C}_{nm}, \bar{S}_{nm})$ 表示，引潮位也是保守力位，同样，任意历元 t ，外部天体作用于地球空间质点的引潮位，可用位系数随时间变化 $(\Delta\bar{C}_{nm}, \Delta\bar{S}_{nm})$ 统一表示为：

$$\Delta\bar{C}_{nm} - i\Delta\bar{S}_{nm} = \frac{1}{2n+1} \sum_{j=2}^{10} \frac{GM_j}{GM} \left(\frac{a}{r_j}\right)^{n+1} \bar{P}_{nm}(\cos\theta_j) e^{im\lambda_j} \quad (1.1)$$

式中： $\Delta\bar{C}_{nm} - i\Delta\bar{S}_{nm}$ 为引潮位对 n 阶 m 次位系数的直接影响； $e^{im\lambda_j} = \cos m\lambda_j + i\sin m\lambda_j$ ； GM_j 为引潮天体 j 的引力常数； $r_j = r_j(t)$ 为引潮天体的地心距； $j = 2\sim 10$ ，分别代表月球($n = 2, 3, 4, 5, 6$)、太阳($n = 2, 3$)、水星、金星、火星、木星、土星、天王星和海王星($n = 2$)； $\theta_j = \theta_j(t)$ 为地固坐标系中引潮天体的地心余纬； $\lambda_j = \lambda_j(t)$ 为地固坐标系中引潮天体的经度。式

(1.1) 省略了时间变量 t 。

任意历元 t ，太阳系天体在地固坐标系中的球坐标 $(r_j, \theta_j, \lambda_j)$ ，可用太阳系星历表计算。比较著名的历表是美国喷气推进实验室 JPL 每年基于观测数据更新并持续改进的系列太阳系星历表。从 2003 年起，JPL 采用国际天球参考框架 ICRF，推出了 DE405/LE405 星历表，2008 年、2014 年和 2021 年又推出 DE421/LE421、DE432 和 DE440/LE440 星历表。其他国家也发布了一系列星历表。利用 JPL 太阳系星历表，可以计算引潮天体在任意历元 t 的地心天球坐标。国际天文联合会 IAU 负责讨论并制定国际通用的天文标准，包括常用的天文常数，有关地球自转轴运动的岁差、章动和极移等。SOFA 软件包是 IAU 编写的有关天文基础标准的子程序库，旨在为天文计算提供权威有效的算法程序和常数数值，可进行天文历法计算、时间计算、星历表计算、岁差章动计算、恒星空间运动计算和主要星表参考系转换。

8.1.1.2 地面及其外部全要素固体潮效应表示

按引力位球谐展开理论，地面或地球外部任意点 (r, φ, λ) 处的 n 阶引潮位 $\Delta V_n(r, \theta, \lambda)$ 和 n 阶引潮力 $\Delta g_n(r, \theta, \lambda)$ 可用 n 阶位系数变化 $(\Delta\bar{C}_{nm}, \Delta\bar{S}_{nm})$ 表示为：

$$\begin{aligned} \Delta V_n(r, \theta, \lambda) &= \frac{GM}{r} \left(\frac{a}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n (\Delta\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta\bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \\ \Delta g_n(r, \theta, \lambda) &= \frac{GM}{r^2} (n+1) \left(\frac{a}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n (\Delta\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta\bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \end{aligned} \quad (1.2)$$

对于球对称非旋转弹性地球，位勒夫数 k_n 和位移勒夫数 (h_n, l_n) 是实数($n = 2, 3$)。当 $n \geq 4$ 时， $k_n = h_n = l_n = 0$ 。

由 n 阶引潮位 ΔV_n 引起的地球重力位系数变化($\Delta\bar{C}_{nm}, \Delta\bar{S}_{nm}$), 按球谐综合算法, 可导出地面及其外部各种大地测量观测量或参数(要素)的固体潮效应表达式。

地面或地球外部空间任意点(r, φ, λ)处的重力位固体潮效应 $\Delta V(r, \varphi, \lambda)$, 等于该点处各阶引潮位 $\Delta V_n(r, \theta, \lambda)$ 与附加位 $\Phi_n^a(r, \theta, \lambda) = k_n \Delta V_n(r, \theta, \lambda)$ 之和

$$\begin{aligned}\Delta V(r, \theta, \lambda) &= \sum_{n=2}^6 [\Delta V_n(r, \theta, \lambda) + \Phi_n^a(r, \theta, \lambda)] = \sum_{n=2}^6 (1 + k_n) \Delta V_n(r, \theta, \lambda) \\ &= \frac{GM}{r} \sum_{n=2}^6 \left(\frac{a}{r}\right)^n (1 + k_n) \sum_{m=0}^n (\Delta\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta\bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos\theta)\end{aligned}\quad (1.3)$$

按是否直接包含位移勒夫数作用下固体地球形变贡献划分, 大地测量观测量或参数(要素)的固体潮效应分成两类。一类大地测量要素的固体潮效应, 不直接包含位移勒夫数(h_n, l_n)作用下的固体地球形变贡献, 如地球外部重力位、重力、垂线偏差、重力梯度等; 另一类是大地测量要素所属点位与固体地球固连, 其固体潮效应包含位移勒夫数(h_n, l_n)作用下的固体地球形变贡献, 如地面站点重力、地倾斜、位移、水准高差的固体潮效应。

类似重力位固体潮效应表达式推导过程, 可得地面或固体地球外部高程异常(大地水准面)固体潮效应表达式为:

$$\begin{aligned}\Delta\zeta(r, \theta, \lambda) &= \frac{GM}{\gamma r} \sum_{n=2}^6 \left(\frac{a}{r}\right)^n (1 + k_n) \\ &\quad \sum_{m=0}^n (\Delta\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta\bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos\theta)\end{aligned}\quad (1.4)$$

地面或固体地球外部扰动重力固体潮效应表达式

$$\begin{aligned}\Delta g^\delta(r, \theta, \lambda) &= \frac{GM}{r^2} \sum_{n=2}^6 (n+1) \left(\frac{a}{r}\right)^n (1 + k_n) \\ &\quad \sum_{m=0}^n (\Delta\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta\bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos\theta)\end{aligned}\quad (1.5)$$

地面或固体地球外部垂线偏差固体潮效应表达式

$$\begin{aligned}\text{南向: } \Delta\xi(r, \theta, \lambda) &= \frac{GM}{\gamma r^2} \sin\theta \sum_{n=2}^6 \left(\frac{a}{r}\right)^n (1 + k_n) \\ &\quad \sum_{m=0}^n (\Delta\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta\bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \frac{\partial}{\partial\theta} \bar{P}_{nm}(\cos\theta)\end{aligned}\quad (1.6)$$

$$\begin{aligned}\text{西向: } \Delta\eta(r, \theta, \lambda) &= \frac{GM}{\gamma r^2 \sin\theta} \sum_{n=2}^6 \left(\frac{a}{r}\right)^n (1 + k_n) \\ &\quad \sum_{m=1}^n m (\Delta\bar{C}_{nm} \sin m\lambda - \Delta\bar{S}_{nm} \cos m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos\theta)\end{aligned}\quad (1.7)$$

地面或固体地球外部重力梯度径向固体潮效应表达式

$$\begin{aligned}\Delta T_{rr}(r, \theta, \lambda) &= \frac{GM}{r^3} \sum_{n=2}^6 (n+1)(n+2) \left(\frac{a}{r}\right)^n (1 + k_n) \\ &\quad \sum_{m=0}^n (\Delta\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta\bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos\theta)\end{aligned}\quad (1.8)$$

地面或固体地球外部水平重力梯度固体潮效应表达式

$$\begin{aligned}\text{北向: } \Delta T_{NN}(r, \theta, \lambda) &= -\frac{GM}{r^3} \sum_{n=2}^6 \left(\frac{a}{r}\right)^n (1 + k_n) \\ &\quad \sum_{m=0}^n (\Delta\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta\bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \frac{\partial^2}{\partial\theta^2} \bar{P}_{nm}(\cos\theta)\end{aligned}\quad (1.9)$$

$$\begin{aligned}\text{西向: } \Delta T_{WW}(r, \theta, \lambda) &= \frac{GM}{r^3 \cos^2\varphi} \sum_{n=2}^6 \left(\frac{a}{r}\right)^n (1 + k_n) \\ &\quad \sum_{m=1}^n m^2 (\Delta\bar{C}_{nm} \sin m\lambda + \Delta\bar{S}_{nm} \cos m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos\theta)\end{aligned}\quad (1.10)$$

与固体地球固连的地面站点, 其位移固体潮效应表达式 \odot

$$\begin{aligned} \text{东向: } \Delta e(r, \theta, \lambda) &= -\frac{GM}{\gamma r \sin \theta} \sum_{n=2}^3 \left(\frac{a}{r}\right)^n l_n \\ &\quad \sum_{m=1}^n m(\Delta \bar{C}_{nm} \sin m\lambda - \Delta \bar{S}_{nm} \cos m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos \theta) \end{aligned} \quad (1.11)$$

$$\begin{aligned} \text{北向: } \Delta n(r, \theta, \lambda) &= -\frac{GM}{\gamma r} \sin \theta \sum_{n=2}^3 \left(\frac{a}{r}\right)^n l_n \\ &\quad \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \frac{\partial}{\partial \theta} \bar{P}_{nm}(\cos \theta) \end{aligned} \quad (1.12)$$

$$\begin{aligned} \text{径向: } \Delta r(r, \theta, \lambda) &= \frac{GM}{\gamma r} \sum_{n=2}^3 \left(\frac{a}{r}\right)^n h_n \\ &\quad \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos \theta) \end{aligned} \quad (1.13)$$

与固体地球固连的地面站点，其地面重力固体潮效应表达式为⊙

$$\begin{aligned} \Delta g^s(r, \varphi, \lambda) &= \frac{GM}{r^2} \sum_{n=2}^6 (n+1) \left(\frac{a}{r}\right)^n \left(1 + \frac{2}{n} h_n - \frac{n+1}{n} k_n\right) \\ &\quad \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos \theta) \end{aligned} \quad (1.14)$$

与固体地球固连的地面站点，其地倾斜固体潮效应表达式⊙

$$\begin{aligned} \text{南向: } \Delta \xi^s(r, \theta, \lambda) &= \frac{GM}{\gamma r^2} \sin \theta \sum_{n=2}^6 \left(\frac{a}{r}\right)^n (1 + k_n - h_n) \\ &\quad \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \frac{\partial}{\partial \theta} \bar{P}_{nm}(\cos \theta) \end{aligned} \quad (1.15)$$

$$\begin{aligned} \text{西向: } \Delta \eta^s(r, \theta, \lambda) &= \frac{GM}{\gamma r^2 \sin \theta} \sum_{n=2}^6 \left(\frac{a}{r}\right)^n (1 + k_n - h_n) \\ &\quad \sum_{m=1}^n m(\Delta \bar{C}_{nm} \sin m\lambda - \Delta \bar{S}_{nm} \cos m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos \theta) \end{aligned} \quad (1.16)$$

不难看出，上述标注⊙的大地测量观测量或参数（要素），只有在其点位与地球固连情况下有效，其余大地测量要素适合地面及固体地球外部空间。

为统一表示海潮、大气潮、外部天体与非潮汐负荷对地面及固体地球外部各种大地测量要素（观测量或参数）的影响，本书将引潮位的直接影响与间接影响之和，统称为固体潮效应（一些文献仅将引潮位的间接影响称为固体潮效应）。

8.1.1.3 天体的引潮位与引潮力及其时变分析

利用太阳系历表，由 (1.1) 和 (1.2) 式，可计算太阳系中地球外部天体在地固空间中的 n 阶引潮位（引潮力），进而分析大地测量学精度要求，确定参与计算的天体及其引潮位展开阶数 n ，计算并考察不同阶次引潮位（引潮力）的周期性、量级与时变规律。

外部天体的地球引潮位和引潮力大小，与计算点在地固坐标系中的位置有关。这里以东经 105° ，北纬 20° ，大地高 100m 的地面点为计算点，记 $P(N105^\circ, E20^\circ, H100\text{m})$ ，由 (1.2) 式，计算太阳系中 10 个地球外部天体 2~6 阶地球引潮位 ΔV_n （单位 $10^{-5}\text{m}^2/\text{s}^2$ ）和引潮力 Δg_n （单位 $\text{nGal}=10^{-8}\text{mGal}=10^{-11}\text{m}/\text{s}^2$ ）。统计 10 个天体的各阶地球引潮位（引潮力）的最大值与最小值之差，如表 1.1，表中 0.0000 表示计算结果四舍五入后接近零，空白表示值太小（比 0.0000 更小），无需计算。

由表 1.1 可以看出，地球引潮位和引潮力计算时，若取截断阈值为 $10^{-8}\text{m}^2/\text{s}^2$ 或 $11^{-14}\text{m}/\text{s}^2$ 时，月球需展开计算至 6 阶，太阳需展开至 3 阶，金星、木星、火星、水星、土星均只需计算 2 阶，天王星、海王星、冥王星不需要参与计算。

表 1.1 引潮天体的 n 阶地球引潮位（引潮力）最大最小值之差统计

天体	ΔV_2	\dot{g}_2	ΔV_3	\dot{g}_3	ΔV_4	\dot{g}_4
月球	247660.1100	116532.1527	6176.8512	2906.4098	174.7919	124.7522
太阳	92514.4904	43531.0825	5.6041	2.6369	0.0004	0.0003
金星	10.8438	5.1023	0.0014	0.0007	0.0000	0.0000
木星	1.4120	0.6644	0.0000	0.0000		
火星	0.4041	0.1901	0.0000	0.0000		
水星	0.0815	0.0383	0.0000	0.0000		
土星	0.0383	0.0164	0.0000	0.0000		
天王星	0.000566	0.000266				
海王星	0.000194	0.000091				
冥王星	0.00000002	0.00000001				
	ΔV_5	\dot{g}_5	ΔV_6	\dot{g}_6	ΔV_7	\dot{g}_7
月球	3.0696	2.7402	0.0531	0.0567	0.0000	0.0000

图 1.1 为月球和太阳的 2 阶地球引潮位（引潮力）时间序列，图 1.2 为月球的 3、4、5 阶地球引潮位（引潮力）时间序列。时间跨度 2020 年 7 月 1 日 0 时至 2022 年 7 月 7 日 24 时（7 天），时间间隔 10 分钟。

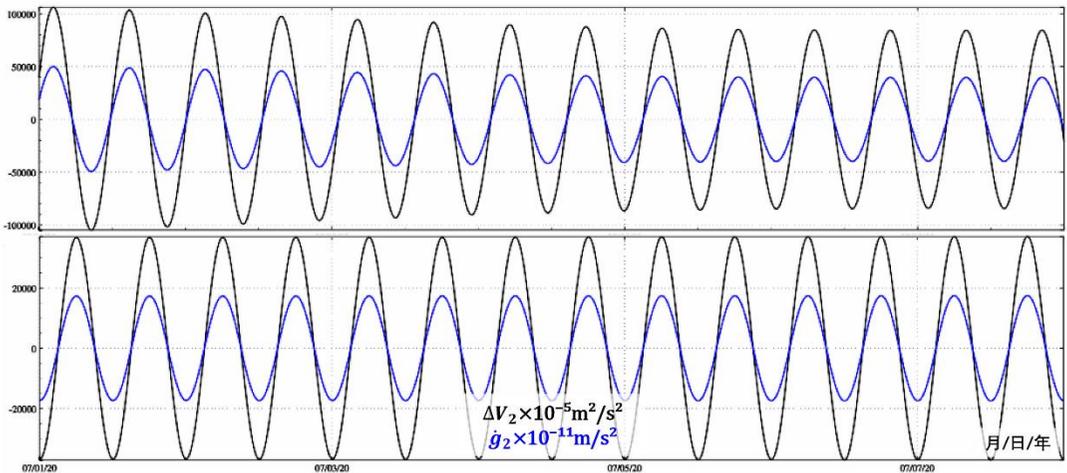


图 1.1 月球和太阳 2 阶地球引潮位（引潮力）7 天时间序列

图 1.3 为金星、木星和火星 2 阶地球引潮位（引潮力）时间序列，时间跨度 2010 年 1 月 1 日至 2022 年 12 月 31 日（12 年），时间间隔 2 小时。图 1.4 为 2020 年 1 月 1 日至 2022 年 12 月 31 日（2 年）月球和太阳 3 阶地球引潮位（引潮力）时间序列。

图 1.5~图 1.7 为地球外部天体引潮位对地球重力位系数直接影响时间序列。图中显示，田谐($m = 1$)位系数主要呈现周日变化；扇谐位系数($m = 2$)主要呈现半日变化；带谐($m = 0$)位系数，主要呈现长周期变化。

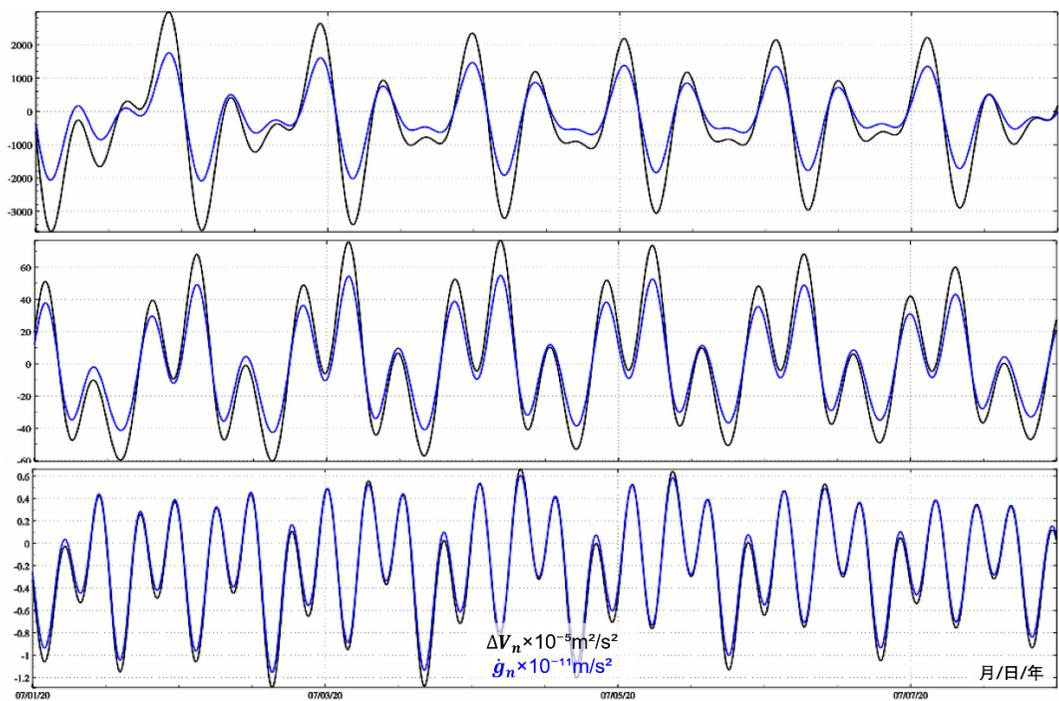
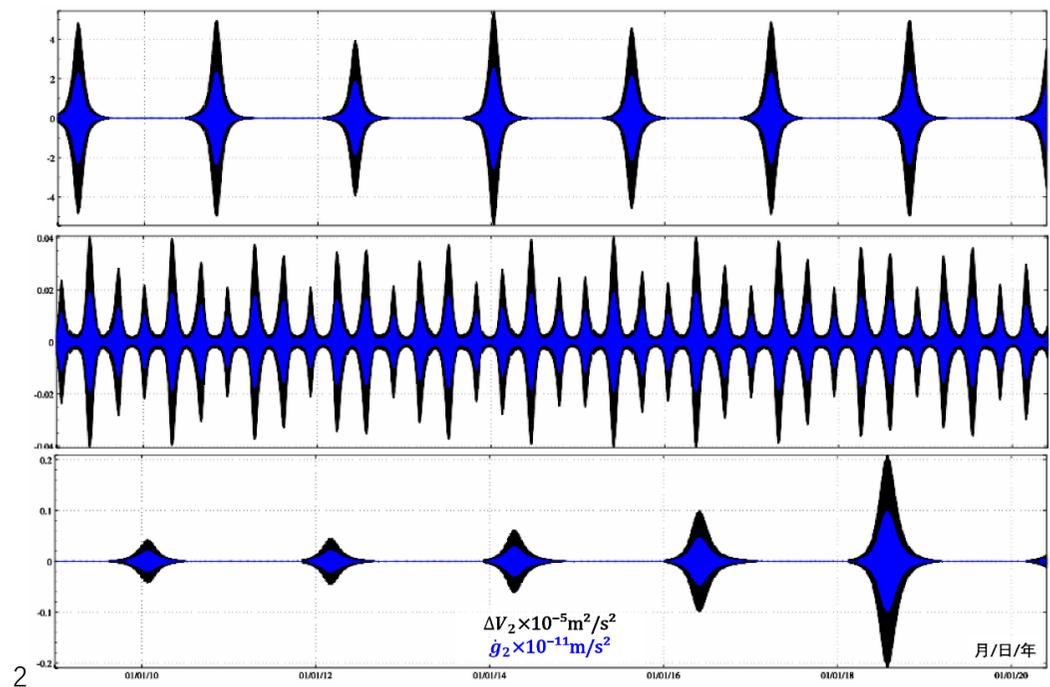


图 1.2 月球 3 阶、4 阶和 5 阶地球引潮位（引潮力）1 周时间序列



2

图 1.3 金星、木星和火星 2 阶地球引潮位（引潮力）12 年时间序列

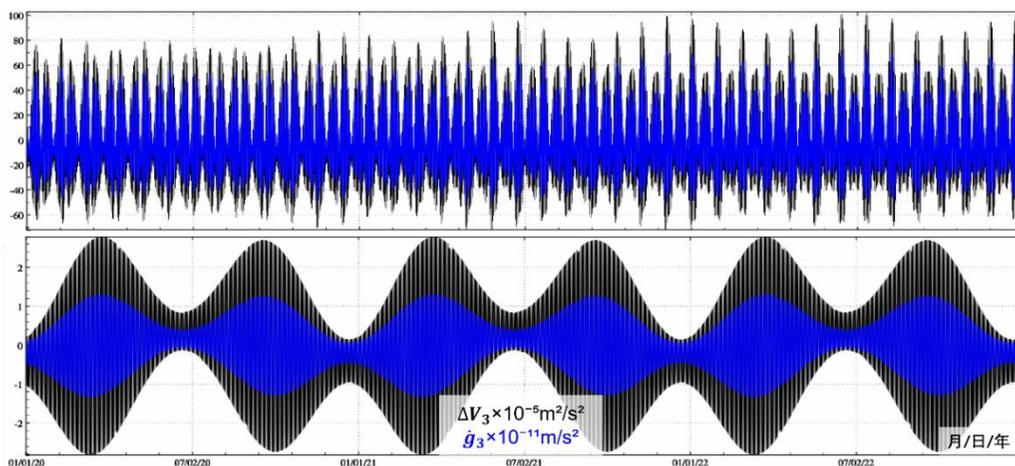


图 1.4 月球和太阳 3 阶地球引潮位（引潮力）2 年时间序列

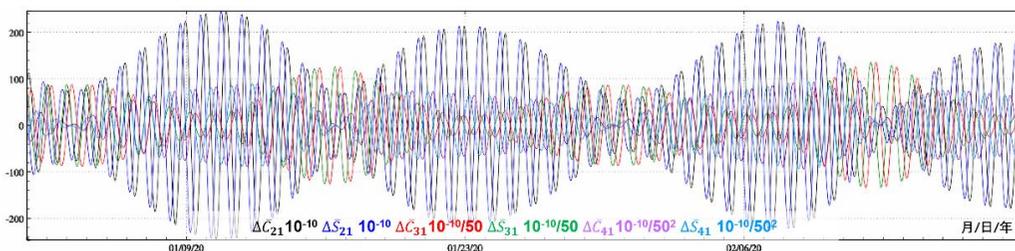


图 1.5 外部天体引潮位对田谐位系数的直接影响（周日潮簇）时间序列

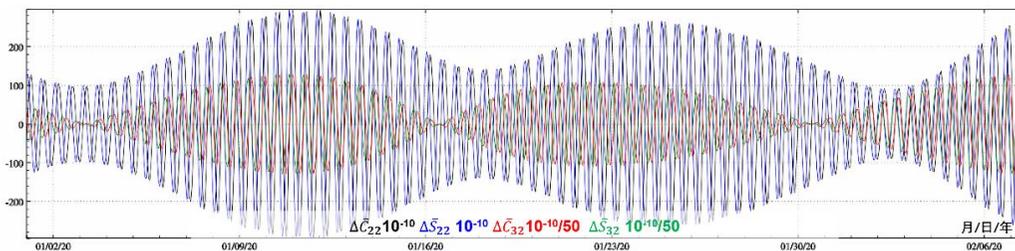


图 1.6 外部天体引潮位对扇谐位系数的直接影响（半日潮簇）时间序列

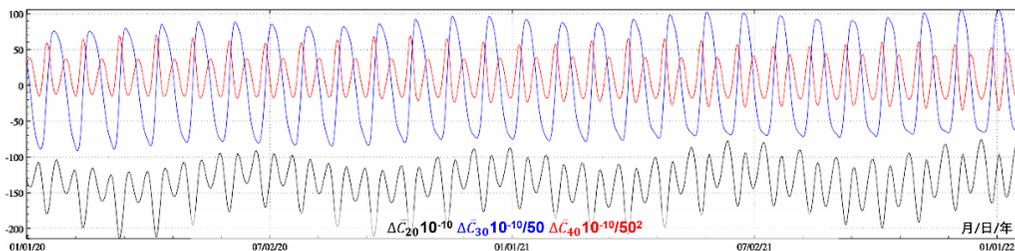


图 1.7 外部天体引潮位对带谐位系数的直接影响（长周期潮簇）时间序列

8.1.2 自转微椭非弹性地球的体潮勒夫数

大地测量要素的固体潮效应，用体潮勒夫数的线性组合即固体潮因子 $\delta = \mathcal{L}(k, h, l)$ 来表征。体潮勒夫数有三种，即位勒夫数 k 、径向（位移）勒夫数 h 与水平（位移）勒夫数 l 。

8.1.2.1 非球形自转地球体潮勒夫数取值

弹性地球的非球形椭率和地球自转，使得勒夫数的表达变得复杂。引潮位引起固体地球形变， n 阶 m 次引潮位激发的地面站点位移形变解为：

$$\mathbf{u} = \frac{W_{mn}}{g_0} [\mathbf{e}_r (h^0 Y_{nm} + h^+ Y_{n+2,m} + h^- Y_{n-2,m}) + \mathbf{e}_\theta \left(l^0 \frac{\partial Y_{nm}}{\partial \theta} + \omega^+ \frac{m}{\sin \theta} Y_{n+1,m} + \omega^- \frac{m}{\sin \theta} Y_{n-1,m} + l^+ \frac{\partial Y_{n+2,m}}{\partial \theta} + l^- \frac{\partial Y_{n-2,m}}{\partial \theta} \right) + i \mathbf{e}_\lambda \left(l^0 \frac{m}{\sin \theta} \frac{\partial Y_{nm}}{\partial \theta} + \omega^+ \frac{m}{\sin \theta} \frac{\partial Y_{n+1,m}}{\partial \theta} + \omega^- \frac{m}{\sin \theta} \frac{\partial Y_{n-1,m}}{\partial \theta} + l^+ \frac{m Y_{n+2,m}}{\sin \theta} + l^- \frac{m Y_{n-2,m}}{\sin \theta} \right)] \quad (1.17)$$

式中： $W_{mn} Y_{nm} = W_{mn}(a) Y_{nm}(\theta, \lambda)$ 为 n 阶 m 次引潮位， $g_0 = g_0(a)$ 为地面平均重力，显然 $W_{mn} Y_{nm}/g_0$ 是 n 阶 m 次平衡潮高； h^0, l^0 为位移勒夫数的球对称部分； h^+, l^+, h^-, l^- 为相应勒夫数的球型耦合部分； ω^+, ω^- 为相应勒夫数的环型耦合部分。

式 (1.17) 指出，对于球对称非旋转弹性地球，只需 2 个参数 (h 与 l) 就可表示潮汐位移场；但对于自转、微椭地球，则需要 8 个参数。因为椭率和自转导致 n 阶球型位移场 (2 个参数) 中耦合进了 $n+1$ 阶和 $n-1$ 阶环型位移场 (2 个参数) 以及 $n+2$ 阶和 $n-2$ 阶球型位移场 (4 个参数)，形成位移勒夫数的纬度依赖部分。

引潮位引起地球表面和内部介质发生形变，导致地球内部密度的重新分布，产生形变附加位。在 (r, θ, λ) 处的形变附加位可表示为：

$$\Phi^a(r, \theta, \lambda) = W_{mn} \left[k^0 \left(\frac{a}{r} \right)^{n+1} Y_{nm} + k^+ \left(\frac{a}{r} \right)^{n+3} Y_{n+2,m} + k^- \left(\frac{a}{r} \right)^{n-1} Y_{n-2,m} \right] \quad (1.18)$$

与位移形变解类似，式中 k^0 代表位勒夫数的球对称部分， k^+ 和 k^- 代表相应勒夫数的球型耦合部分。由于环型位移不涉及体膨胀，不会导致地球引力位的扰动，因此，位勒夫数 k 中不会出现环形耦合项。

微椭弹性地球的勒夫数仍然是实数，与频率无关，取值如表 1.2。

表 1.2 微椭弹性地球体潮勒夫数取值

n	m	潮汐周期	k_{nm}	h_{nm}	l_{nm}
2	0	长周期	0.29525	0.6078	0.0847
2	1	周日	0.29470	0.6078	0.0847
2	2	半日	0.29801	0.6078	0.0847
3	0	长周期	0.093	0.2920	0.0150
3	1	周日	0.093	0.2920	0.0150
3	2	半日	0.093	0.2920	0.0150
3	3	1/3 日	0.094	0.2920	0.0150
4	0~4	长周期~1/4 日	0.041	0.175	0.010
5			0.025	0.129	
6			0.017	0.197	

8.1.2.2 自转地球位移勒夫数的纬度依赖

地球椭率和地球自转破坏了潮汐响应的对称性，微椭地球自转离心力导致位移勒夫数

(h_{nm}, l_{nm}) 呈现纬度依赖性。二阶位移勒夫数的纬度依赖公式:

$$\begin{cases} h_{2m}(\varphi) = h_{2m} + h^\varphi \frac{3\sin^2\varphi - 1}{2} \\ l_{2m}(\varphi) = l_{2m} + l^\varphi \frac{3\sin^2\varphi - 1}{2} \end{cases} \quad (1.19)$$

式中: $\varphi = \pi/2 - \theta$ 为地面站点的地心纬度; (h_{2m}, l_{2m}) 为微椭非旋转弹性地球的位移勒夫数, 取值如表 1.2; $[h_{2m}(\varphi), l_{2m}(\varphi)]$ 为顾及站点处纬度依赖性的位移勒夫数; (h^φ, l^φ) 为位移勒夫数纬度依赖系数, IERS 协议 2010 中, $h^\varphi = -0.0006, l^\varphi = 0.0002$ 。

三阶位移勒夫数的纬度依赖性很弱, 可不加改正。

8.1.2.3 地幔的粘滞性与勒夫数频率相关

地幔的粘滞性导致固体地球对引潮位的形变响应产生延迟, 使得各潮簇(半日 $m = 2$ 、周日 $m = 1$ 与长周期潮簇 $m = 0$)的体潮勒夫数(包括球对称部分和纬度依赖因子)变成复数, 存在相对微小的虚部, 其绝对值不足实部的 1%。另一方面, 地幔的粘滞性还在不同程度上放大了地球潮汐形变, 导致体潮勒夫数的频率相关性随分潮周期的增加而增强, 使得体潮勒夫数的实部和虚部同时发生微小变化。

长周期潮波 ($m = 0$, 也称带谐潮波, 分潮周期为 8 天至 18.6 年) 的频率较低, 时间跨度大, 地幔的粘滞性因此导致长周期带谐潮波的勒夫数出现较强的频率相关性。对于半日潮波 ($m = 2$), 径向勒夫数 h 增大 1.4%; 对于周日分潮潮波 ($m = 1$), h 增大 1.4%, 位勒夫数 k 增大 1.7%; 对于长周期潮波 ($m = 0$, 如 M_f), 地幔的粘滞性导致 h 增大 2.5%, k 增大 3% (许厚泽, 2010)。

为表示粘滞性形变地球附加位引起的 n 阶 m 次位系数变化, 需要用到 3 种形式的位勒夫数 ($k_{nm}^{(0)}, k_{nm}^{(\pm)}$)、径向勒夫数 ($h_{nm}^{(0)}, h_{nm}^{(\pm)}$) 与水平勒夫数 ($l_{nm}^{(0)}, l_{nm}^{(\pm)}$) 来表征 n 阶 m 次 ($n \geq 2$) 引潮位的间接影响。考虑到地球质量守恒, 当 $n = 2$ 时, $k_{2m}^{(-)} = 0, h_{2m}^{(-)} = 0, l_{2m}^{(-)} = 0$, 只有 2 种位勒夫数 ($k_{2m}^{(0)}, k_{2m}^{(+)}$), 2 种径向勒夫数 ($h_{2m}^{(0)}, h_{2m}^{(+)}$) 和 2 种水平勒夫数 ($l_{2m}^{(0)}, l_{2m}^{(+)}$)。

地幔的粘滞性导致地球对引潮位的响应产生延迟, 使得勒夫数随频率变化, (k_{2m}^0, k_{2m}^+), ($h_{2m}^{(0)}, h_{2m}^{(+)}$) 和 ($l_{2m}^{(0)}, l_{2m}^{(+)}$) 存在小的虚部。

三阶勒夫数的频率相关性很弱, 可忽略其潮汐形变滞后效应。为计算方便, 以下将表 1.3 中粘弹性地球的二阶长周期 ($m = 0$)、周日 ($m = 1$) 和半日 ($m = 2$) 潮簇的位勒夫数, 记为 $k_{2m} = Re(k_{2m}) + i Im(k_{2m})$, 作为标称的位勒夫数; 而将表 1.2 中的微椭弹性地球的位移勒夫数 $h_{2m} = 0.6078, l_{2m} = 0.0847$, 作为标称的位移勒夫数。

表 1.3 粘弹性地球体潮位勒夫数 k 的频率相关

nm		潮汐周期	弹性地球		粘弹性地球		
n	m		k_{nm}	$k_{2m}^{(+)}$	$Re(k_{nm})$	$Im(k_{nm})$	$k_{2m}^{(+)}$
2	0	长周期	0.29525	-0.00087	0.30190	-0.00000	-0.00089
2	1	周日	0.29470	-0.00079	0.29830	-0.00144	-0.00080
2	2	半日	0.29801	-0.00057	0.30102	-0.00130	-0.00057

3	0	长周期	0.093	...			
3	1	周日	0.093	...			
3	2	半日	0.093	...			
3	3	1/3 日	0.094	...			

8.1.3 二阶勒夫数的频率相关性及其校正

8.1.3.1 地球近周日摆动与勒夫数共振参数

地球近周日自由摆动的激发，导致与本征频率接近的周日固体潮（如 P_1 、 K_1 、 ψ_1 和 ϕ_1 分潮）及相应的自由章动观测中出现明显的共振放大现象。地球摆动伴随的离心力位变化，激发固体地球形变，导致地球惯性矩耦合变化，对周日分潮勒夫数的贡献与地球及其核的摆动响应成正比。周日潮波的体潮或负荷勒夫数 L （如 $k_{21}^{(0)}$ 或 $k_{21}^{(+)}$ ）的频率相关值，可用共振公式表示为潮波频率 σ 的函数

$$L(\sigma) = L_0 + \sum_{\alpha=1}^3 \frac{L_{\alpha}}{\sigma - \sigma_{\alpha}} \quad (1.20)$$

式中： L 表示任意的周日体潮或负荷勒夫数， L_0 为其与频率无关的部分；下标 α 表示地球或其核的自由摆动，取值1、2、3分别对应钱德勒摆动（CW）、逆向和正向近周日自由摆动3个简正模， σ_{α} 、 L_{α} 分别为 α 的本征谐振频率和响应系数（导纳）。

潮汐频率 σ 与本征谐振频率 σ_{α} 通常用每恒星日的周期数（cpsd）表示，正负频率代表逆向（正向）谐振波。通常也用度每小时（°/hr）表示潮汐角频率 ω ，有

$$\omega = 15\kappa\sigma, \quad \kappa = 1.002737909 \quad (1.21)$$

式中： $\kappa = 1.002737909$ 为恒星日与平太阳日的比值，是天文常数。Mathews等（2002）通过分析甚长基线干涉测量（VLBI）数据，获得了进动速率和章动幅度，进而按章动理论拟合估计得到本征谐振频率 σ_{α} 。

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= -0.0026010 - 0.0001361i \\ \sigma_2 &= 1.0023181 + 0.000025i \\ \sigma_3 &= 0.9999026 + 0.000780i \end{aligned} \quad (1.22)$$

表 1.4 为由周日潮波共振公式（1.20）计算的周日位勒夫数（ $k_{21}^{(0)}, k_{21}^{(+)}$ ）的共振参数。

表 1.4 体潮周日位勒夫数（ $k_{21}^{(0)}, k_{21}^{(+)}$ ）共振参数

α	$k_{21}^{(0)}$		$k_{21}^{(+)}$	
	Re(L_{α})	Im(L_{α})	Re(L_{α})	Im(L_{α})
0	0.29954	-0.1412×10^{-2}	-0.804×10^{-3}	0.237×10^{-5}
1	-0.77896×10^{-3}	-0.3711×10^{-4}	0.209×10^{-5}	0.103×10^{-6}
2	0.90963×10^{-4}	-0.2963×10^{-5}	-0.182×10^{-6}	0.650×10^{-8}
3	-0.11416×10^{-5}	0.5325×10^{-7}	-0.713×10^{-9}	-0.330×10^{-9}

表 1.5 给出了负荷勒夫数（ $k'_{21}, h'_{21}, l'_{21}$ ）的共振参数。这些共振参数与海洋潮汐负荷引起的固体地球形变及其附加位变化有关。表中忽略了很小的虚部。

表 1.5 周日负荷勒夫数($k'_{21}, h'_{21}, l'_{21}$)共振参数

α	k'_{21}	h'_{21}	l'_{21}
0	-0.30808	-0.99500	0.02315
1	8.1874×10^{-4}	1.6583×10^{-3}	2.3232×10^{-4}
2	1.4116×10^{-4}	2.8018×10^{-4}	-8.4659×10^{-6}
3	3.4618×10^{-7}	5.5852×10^{-7}	1.0724×10^{-8}

水平位移勒夫数的共振效应需要顾及勒夫数的纬度依赖和海潮负荷激发的共振效应。联合 (1.19) 和 (1.20) 式, 可计算位移勒夫数及其纬度依赖系数的共振参数, 如表 1.6。

表 1.6 体潮位移勒夫数及其纬度依赖系数的共振参数

α	h_{2m}		h^φ	
	$\text{Re}(L_\alpha)$	$\text{Im}(L_\alpha)$	$\text{Re}(L_\alpha)$	$\text{Im}(L_\alpha)$
0	0.60671	-0.2420×10^{-2}	-0.615×10^{-3}	-0.122×10^{-4}
1	-0.15777×10^{-2}	-0.7630×10^{-4}	0.160×10^{-5}	0.116×10^{-6}
2	0.18053×10^{-3}	-0.6292×10^{-5}	0.201×10^{-6}	0.279×10^{-8}
3	-0.18616×10^{-5}	0.1379×10^{-6}	-0.329×10^{-7}	-0.217×10^{-8}
α	l_{2m}		l^φ	
	$\text{Re}(L_\alpha)$	$\text{Im}(L_\alpha)$	$\text{Re}(L_\alpha)$	$\text{Im}(L_\alpha)$
0	0.84963×10^{-1}	-0.7395×10^{-3}	0.19334×10^{-3}	-0.3819×10^{-5}
1	-0.22107×10^{-3}	-0.9646×10^{-5}	-0.50331×10^{-6}	-0.1639×10^{-7}
2	-0.54710×10^{-5}	-0.2990×10^{-6}	-0.66460×10^{-8}	0.5076×10^{-9}
3	-0.29904×10^{-7}	-0.7717×10^{-8}	0.10372×10^{-7}	0.7511×10^{-9}

8.1.3.2 周日勒夫数海潮负荷贡献与频率相关性校正

周日共振导致负荷勒夫数也呈现频率相关性, 并通过海潮负荷离心力位引起地球形变(极潮效应)而导致地球惯性矩耦合变化, 地幔粘滞性、核幔耦合与潮汐摩擦耗散机制作用, 导致周日潮波($mn = 21$)的体潮勒夫数呈现频率相关性, 使得体潮勒夫数的实部和虚部都发生微小变化。

考虑周日共振效应后, 周日潮波负荷勒夫数需由(k'_2, h'_2, l'_2)变为($k'_{21}, h'_{21}, l'_{21}$)。频率为 σ 的海潮周日潮波, 对相同频率周日体潮勒夫数的主要贡献为(Wahr和Sasao, 1981):

$$\delta k_{21}^{ol}(\sigma) = [k'_{21}(\sigma) - k'_2] \frac{4\pi G \rho_w}{5g_0} R A_{21}(\sigma) \quad (1.23)$$

式中: $k = k, h$ 或 l ; g_0 为地面平均重力; $k'_{21}(\sigma)$ 为顾及周日共振效应的负荷勒夫数, 简称周日共振负荷数, 是分潮频率 σ 的函数, 由表 1.6 按 (1.20) 式计算; $k'_2 = k'_2, h'_2$ 或 l'_2 为球对称非旋转弹性地球(PREM)的二阶负荷勒夫数(实数); $A_{21}(\sigma)$ 为分潮 σ 的体潮勒夫数修正量与负荷勒夫数修正量的比例因子(导纳), 可通过对全球海潮调和常数模型进行调和分析后按下式计算:

$$A_{21}(\sigma) = H_{21}^{otide}(\sigma) / H_{21}^{TGP}(\sigma) \quad (1.24)$$

式中： $H_{21}^{TGP}(\sigma)$ 是引潮天体周日分潮 σ 平衡潮高振幅的全球最大值（单位 m）； $H_{21}^{otide}(\sigma)$ 是经规格化调和与分析后，海潮（潮高）周日分潮 σ 的规格化调和幅值（m）。

周日体潮勒夫数频率相关性校正值计算公式为：

$$\delta k_{21}(\sigma) = k_{21}^{(0)}(\sigma) + \delta k_{21}^{ol}(\sigma) - k_{21} \quad (1.25)$$

式中： $k = k, h$ 或 l ； $k_{21}^{(0)}(\sigma)$ 为顾及地幔粘滞性及分潮 σ 近周日共振的体潮勒夫数（复数），是分潮 σ 的函数，由表 1.5 或表 1.6 中的共振参数，按（1.20）式计算； k_{21} 为标称周日勒夫数，标称勒夫数取值参见表 1.3 或表 1.2。

下面简要说明周日体潮频率相关性校正值的三步计算方案。取二阶标称负荷勒夫数 $k_2' = -0.3075$ ， $h_2' = -1.001$ ， $l_2' = 0.0295$ ；标称周日位勒夫数 $k_{21} = 0.29830 - 0.00144i$ （取自表 1.3），与标称周日位移勒夫数 $h_{21} = 0.6078$ ， $l_{21} = 0.0847$ （取自表 1.2）。

第一步，由式（1.22）、表 1.4、表 1.5 和表 1.6，按式（1.20），计算顾及周日共振效应的共振体潮勒夫数 $k_{21}^o(\sigma)$ 和共振负荷勒夫数 $k_{21}'(\sigma)$ ；第二步，将周日共振负荷勒夫数 $k_{21}'(\sigma)$ 代入（1.23）式，计算周日体潮勒夫数的海潮负荷贡献 $\delta k_{21}^{ol}(\sigma)$ ；第三步，将周日共振体潮勒夫数 $k_{21}^o(\sigma)$ 与海潮负荷贡献 $\delta k_{21}^{ol}(\sigma)$ 代入（1.25）式，计算周日位勒夫数频率相关性校正值 $\delta k_{21}(\sigma)$ ，结果如表 1.7，以及周日位移勒夫数频率相关性校正值 $\delta h_{21}(\sigma)$ ， $\delta l_{21}(\sigma)$ ，结果如表 1.8 和表 1.9。

表 1.7 二阶周日位勒夫数 $k_{2m}^{(0)}$ 频率相关性校正值

周日潮	Doodson	角速率 ω°/hr	$\delta k_{21}^R \times 10^{-5}$	$\delta k_{21}^I \times 10^{-5}$	最大平衡潮高振幅 $H_{21}^{TGP} \times 10^{-5}\text{m}$
$2Q_1$	125,755	12.85429	-29	3	-664
σ_1	127,555	12.92714	-30	3	-802
	135,645	13.39645	-45	5	-947
Q_1	135,655	13.39866	-46	5	-5020
ρ_1	137,455	13.47151	-49	5	-954
	145,545	13.94083	-82	7	-4946
O_1	145,555	13.94303	-83	7	-26221
τ_1	147,555	14.02517	-91	9	343
$N\tau_1$	153,655	14.41456	-168	14	194
	155,445	14.48520	-193	16	137
Lk_1	155,455	14.48741	-194	16	741
No_1	155,655	14.49669	-197	16	2062
	155,665	14.49890	-198	16	414
χ_1	157,455	14.56955	-231	18	394
	157,465	14.57176	-233	18	87

π_1	162,556	14.91787	-834	58	-714
	163,545	14.95673	-1117	76	137
P_1	163,555	14.95893	-1138	77	-12203
	164,554	15.00000	-1764	104	103
S_1	164,556	15.00000	-1764	104	289
	165,345	15.02958	-3048	92	7
	165,535	15.03665	-3630	195	4
	165,545	15.03886	-3845	229	-730
K_1	165,555	15.04107	-4084	262	36878
	165,565	15.04328	-4355	297	5001
	165,575	15.04548	-4665	334	-108
	166,455	15.07749	85693	21013	-0.6
	166,544	15.07993	35203	2084	1.1
ψ_1	166,554	15.08214	22794	358	293
	166,556	15.08214	22780	358	-4.5
	166,564	15.08434	16842	-85	5
	167,355	15.11392	3755	-189	18
	167,365	15.11613	3552	-182	5
ϕ_1	167,555	15.12321	3025	-160	525
	167,565	15.12542	2892	-154	-20
	168,554	15.16427	1638	-93	31
θ_1	173,655	15.51259	370	-20	395
	173,665	15.51480	369	-20	78
	175,445	15.58323	325	-17	-61
J_1	175,455	15.58545	324	-17	2062
	175,465	15.58765	323	-16	409
So_1	183,555	16.05697	194	-8	342
	185,355	16.12989	185	-7	169
Oo_1	185,555	16.13911	184	-7	1129
	185,565	16.14131	184	-7	723
	185,575	16.14352	184	-7	151
v_1	195,455	16.68348	141	-4	216
	195,465	16.68569	141	-4	138
半日潮	Doodson	角速率 ω°/hr	$\delta k_{22}^R \times 10^{-5}$	$\delta k_{22}^I \times 10^{-5}$	$H_{22}^{TGP} \times 10^{-5} \text{m}$
N_2	245,655	28.43973	2	0	12099

M_2	255,555	28.98410	2	0	63192
-------	---------	----------	---	---	-------

表 1.8 二阶周日径向勒夫数 $h_{2m}^{(0)}$ 频率相关性校正与纬度依赖性

周日潮	Doodson	角速率 ω°/hr	$\delta h_{21}^R \times 10^{-4}$	$\delta h_{21}^I \times 10^{-4}$	最大平衡潮高振幅 $H_{21}^{TGP} \times 10^{-5}\text{m}$
$2Q_1$	125,755	12.85429	-39	-27	-664
σ_1	127,555	12.92714	-39	-26	-802
	135,645	13.39648	-42	-26	-947
Q_1	135,655	13.39866	-42	-26	-5020
ρ_1	137,455	13.47151	-43	-26	-954
	145,545	13.94082	-50	-25	-4946
O_1	145,555	13.94303	-50	-25	-26221
τ_1	147,555	14.02517	-52	-25	343
$N\tau_1$	153,655	14.41456	-67	-24	194
NO_1	155,655	14.49669	-73	-23	2062
χ_1	157,455	14.56955	-80	-23	394
π_1	162,556	14.91787	-200	-15	-714
P_1	163,555	14.95893	-261	-11	-12203
S_1	164,556	15.00000	-386	-4	289
	165,545	15.03881	-795	23	-730
K_1	165,555	15.04107	-842	30	36878
	165,565	15.04333	-896	36	5001
	165,575	15.04543	-958	43	-108
ψ_1	166,554	15.08214	4491	36	293
	166,564	15.08439	3309	-50	5
ϕ_1	167,555	15.12321	567	-59	525
θ_1	173,655	15.51259	39	-30	395
J_1	175,455	15.58545	30	-30	2062
Oo_1	185,555	16.13911	2	-28	1129
半日潮	Doodson	角速率 ω°/hr	$\delta h_{22}^R \times 10^{-4}$	$\delta h_{22}^I \times 10^{-4}$	$H_{22}^{TGP} \times 10^{-5}\text{m}$
M_2	255,555	28.98410	0	-22	12099

表 1.9 二阶周日水平勒夫数 $l_{2m}^{(0)}$ 频率相关性校正与纬度依赖性

周日潮	Doodson	角速率 ω°/hr	$\delta l_{21}^R \times 10^{-4}$	$\delta l_{21}^I \times 10^{-4}$	最大平衡潮高振幅 $H_{21}^{TGP} \times 10^{-5}\text{m}$
Q_1	135,655	13.39866	-1	-6	-5020

	145,545	13.94082	-1	-6	-4946
O_1	145,555	13.94303	-1	-6	-26221
No_1	155,655	14.49669	0	-6	2062
P_1	163,555	14.95893	6	-6	-12203
	165,545	15.03886	22	-6	-730
K_1	165,555	15.04107	23	-6	36878
	165,565	15.04328	25	-6	5001
ψ_1	166,554	15.08214	-137	-20	293
ϕ_1	167,555	15.12321	-19	-7	525
J_1	175,455	15.58545	-2	-6	395
Oo_1	185,555	16.13911	-1	-6	1129
半日潮	Doodson	角速率 ω°/hr	$\delta l_{22}^R \times 10^{-4}$	$\delta l \times 10^{-4}$	$H_{22}^{TGP} \times 10^{-5} \text{m}$
M_2	255,555	28.98410	0	-7	12099

8.1.3.3 粘弹性地球长周期勒夫数频率相关性校正

地幔的粘滞性，进一步增强了长周期分潮 ($nm = 20$, 带谐) 体潮勒夫数频率相关性。设长周期分潮频率为 σ ，顾及频率相关性的长周期勒夫数可表达为：

$$k_{20}(\sigma) = 0.29525 - 5.796 \times 10^4 \left\{ \text{ctg} \frac{\epsilon\pi}{2} \left[1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma} \right)^\epsilon \right] + i \left(\frac{\sigma_m}{\sigma} \right)^\epsilon \right\} \quad (1.26)$$

$$h_{20}(\sigma) = 0.5998 - 9.96 \times 10^4 \left\{ \text{ctg} \frac{\epsilon\pi}{2} \left[1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma} \right)^\epsilon \right] + i \left(\frac{\sigma_m}{\sigma} \right)^\epsilon \right\} \quad (1.27)$$

$$l_{20}(\sigma) = 0.0831 - 3.01 \times 10^4 \left\{ \text{ctg} \frac{\epsilon\pi}{2} \left[1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma} \right)^\epsilon \right] + i \left(\frac{\sigma_m}{\sigma} \right)^\epsilon \right\} \quad (1.28)$$

式 (1.26) ~ (1.28) 中， σ_m 是周期为 200s 的参考频率； $\epsilon = 0.15$ 。

取 $k_{20} = 0.30190$, $h_{20} = 0.6078$, $l_{20} = 0.0847$ ，则粘弹性地球二阶长周期勒夫数频率相关性校正公式为：

$$\delta k_{20}(\sigma) = k_{20}(\sigma) - k_{20}, \quad (k = k, h, l) \quad (1.29)$$

将 (1.26) ~ (1.28) 式分别代入 (1.29) 式，计算粘弹性地球二阶长周期勒夫数频率相关性校正值，结果如表 1.10~表 1.12。

表 1.10 二阶长周期位勒夫数 $k_{20}^{(0)}$ 频率相关性校正

长周期潮	Doodson	角速率 ω°/hr	$\delta k_{20}^R \times 10^{-5}$	$\delta k_{20}^I \times 10^{-5}$	最大平衡潮高振幅 $H_{20}^{TGP} \times 10^{-5} \text{m}$
Ω_1	55,565	0.00221	1347	-541	2793
Ω_2	55,575	0.00441	1124	-488	-27
S_a	56,554	0.04107	547	-349	-492
S_{sa}	57,555	0.08214	403	-315	-3100
	57,565	0.08434	398	-313	77

S_{ta}	58,554	0.12320	326	-296	-181
M_{sm}	63,655	0.47152	101	-242	-673
	65,445	0.54217	80	-237	231
M_m	65,455	0.54438	80	-237	-3518
	65,465	0.54658	79	-237	229
	65,655	0.55366	77	-236	188
M_{sf}	73,555	1.01590	-9	-216	-583
	75,355	1.08875	-18	-213	-288
M_f	75,555	1.09804	-19	-213	-6663
	75,565	1.10024	-19	-213	-2762
	75,575	1.10245	-19	-213	-258
M_{stm}	83,655	1.56956	-65	-202	-242
M_{tm}	85,455	1.64241	-71	-201	-1276
	85,465	1.64462	-71	-201	-529
M_{sqm}	93,555	2.11394	-102	-193	-204
M_{qm}	95,355	2.18679	-106	-192	-169

表 1.11 二阶长周期径向勒夫数 $h_{20}^{(0)}$ 频率相关性校正与纬度依赖性

长周期潮	Doodson	角速率 ω°/hr	$\delta h_{20}^R \times 10^{-4}$	$\delta h_{20}^I \times 10^{-4}$	最大平衡潮高振幅 $H_{20}^{TGP} \times 10^{-5}\text{m}$
Ω_1	55,565	0.00221	266	-93	2793
S_{sa}	57,555	0.08214	104	-54	-3100
M_m	65,455	0.54438	48	-41	-3518
M_f	75,555	1.09804	31	-37	-6663
	75,565	1.10024	31	-37	-2762

表 1.12 二阶长周期水平勒夫数 $l_{2m}^{(0)}$ 频率相关性校正与纬度依赖性

长周期潮	Doodson	角速率 ω°/hr	$\delta l_{20}^R \times 10^{-4}$	$\delta l_{20}^I \times 10^{-4}$	最大平衡潮高振幅 $H_{20}^{TGP} \times 10^{-5}\text{m}$
Ω_1	55,565	0.00221	89	-28	2793
S_{sa}	57,555	0.08214	39	-16	-3100
M_m	65,455	0.54438	23	-12	-3518
M_f	75,555	1.09804	17	-11	-6663
	75,565	1.10024	17	-11	-2762

8.1.3.4 位系数变化的勒夫数频率相关性校正

不同频率分潮 σ 对二阶位勒夫数的贡献不同，需逐一计算每个分潮的频率相关性校正

δk_{2m} 。若勒夫数的某分潮 σ 频率相关性校正值为 $\delta k_{2m}(\sigma)$ ，该分潮 σ 对二阶 m 次位系数的直接影响为 $\Delta\bar{C}_{2m}^{(\sigma)} - i\Delta\bar{S}_{2m}^{(\sigma)}$ ，则两者乘积就是勒夫数按该分潮 σ 进行频率相关性校正后，引起的二阶 m 次位系数的变化。对所有分潮 σ 求和，才是位勒夫数频率相关性校正对二阶 m 次位系数的总贡献。

将二阶 m 次潮波的位勒夫数频率相关性校正记为 $\delta k_{2m} = \delta k_{2m}^R + i\delta k_{2m}^I$ ，可得二阶周日、半日潮波位勒夫数频率相关性校正，引起的二阶田谐、扇谐位系数变化分别为：

$$\begin{aligned} \Delta\bar{C}_{2m}^{\delta} - i\Delta\bar{S}_{2m}^{\delta} &= \\ \sum_{\sigma} \delta k_{2m}(\sigma) \left(\Delta\bar{C}_{2m}^{(\sigma)} - i\Delta\bar{S}_{2m}^{(\sigma)} \right) &= \eta_m \left(\sum_{\tau=1}^{\tau_{20}} A_m \delta k_{2m}^{\tau} H_{2m}^{\tau} e^{i\phi^{\tau}} \right) = \eta_m A_m \\ &\sum_{\tau=1}^{\tau_{2m}} H_{2m}^{\tau} [(\delta k_{2m}^{\tau R} \cos\phi^{\tau} - \delta k_{2m}^{\tau I} \sin\phi^{\tau}) + i(\delta k_{2m}^{\tau R} \sin\phi^{\tau} + \delta k_{2m}^{\tau I} \cos\phi^{\tau})] \end{aligned} \quad (1.30)$$

$$\begin{aligned} \Delta\bar{C}_{21}^{\delta} - i\Delta\bar{S}_{21}^{\delta} &= \\ A_1 \sum_{\tau=1}^{\tau_{20}} H_{21}^{\tau} [(\delta k_{21}^{\tau R} \sin\phi^{\tau} + \delta k_{21}^{\tau I} \cos\phi^{\tau}) - i(\delta k_{21}^{\tau R} \cos\phi^{\tau} - \delta k_{21}^{\tau I} \sin\phi^{\tau})] \end{aligned} \quad (1.31)$$

$$\begin{aligned} \Delta\bar{C}_{22}^{\delta} - i\Delta\bar{S}_{22}^{\delta} &= \\ A_2 \sum_{\tau=1}^{\tau_{20}} H_{22}^{\tau} [(\delta k_{22}^{\tau R} \cos\phi^{\tau} - \delta k_{22}^{\tau I} \sin\phi^{\tau}) + i(\delta k_{22}^{\tau R} \sin\phi^{\tau} + \delta k_{22}^{\tau I} \cos\phi^{\tau})] \end{aligned} \quad (1.32)$$

类似地，二阶长周期潮波位勒夫数频率相关性校正，引起的二阶带谐位系数变化为：

$$\begin{aligned} \Delta\bar{C}_{20}^{\delta} &= \text{Re} \left[\sum_{\sigma} \delta k_{20}(\sigma) \Delta\bar{C}_{20}^{\sigma} \right] = \text{Re} \left(\sum_{\tau=1}^{\tau_{20}} \delta k_{20}^{\tau} A_0 H_{20}^{\tau} e^{i\phi^{\tau}} \right) \\ &= A_0 \sum_{\tau=1}^{\tau_{20}} H_{20}^{\tau} (\delta k_{20}^{\tau R} \cos\phi^{\tau} - \delta k_{20}^{\tau I} \sin\phi^{\tau}) \end{aligned} \quad (1.33)$$

式 (1.30) ~ (1.33) 中， $\eta_1 = -i$ ， $\eta_2 = 1$ ；

$$A_0 = \frac{1}{R\sqrt{4\pi}} = 4.4228 \times 10^{-8} \quad (\text{单位为/m})$$

$$A_m = \frac{(-1)^m}{R\sqrt{8\pi}} = (-1)^m (3.1274 \times 10^{-8}) \quad (\text{单位为/m}), \quad m = 1, 2$$

式中： τ_{2m} ($m = 0, 1, 2$) 为二阶 m 次潮波的有效分潮个数 (表 1.6 中， $\tau_{20} = 21$ ， $\tau_{21} = 48$ ， $\tau_{22} = 2$)； H_{2m}^{τ} 为与固体潮频率相同的引潮天体分潮全球最大平衡潮高振幅 (m)，即表 1.6 中最后一列； ϕ^{τ} 为分潮 τ 的天文幅角 (单位为弧度)，可由 Doodson 数或 Delaunay 变量计算。

8.1.3.5 位移勒夫数频率相关性校正等效处理

与地球固连的地面站点，当其大地测量要素的固体潮效应包含位移勒夫数表征的潮汐形变效应 (贡献) 时，需要考虑位移勒夫数频率相关性校正。位移勒夫数表征引潮位引起的地面站点位移，其对大地测量要素的作用总是以比例因子 (比例系数) 形式出现。由 8.1.1 节不难发现，在地面站点径向与水平位移、地面重力和地倾斜的固体潮效应表达式中，同阶次位移勒夫数与位系数直接影响总是以乘积形式出现。由固体地球形变力学理论可知，地面站点位移固体潮效应是调和的，可表示成球谐级数形式。同阶次潮波的位移勒夫数频率相关性校正与位系数直接影响的乘积，就是该阶次潮波位移勒夫数频率相关性校正对同阶次位移球谐系数的贡献。可见，由二阶位移勒夫数频率相关性校正，导致的二阶位移球谐系数变化可表达为：

$$\Delta\hat{C}_{2m}^{\delta} - i\Delta\hat{S}_{2m}^{\delta} = \sum_{\sigma} \delta h_{2m}(\sigma) \left(\Delta\bar{C}_{2m}^{(\sigma)} - i\Delta\bar{S}_{2m}^{(\sigma)} \right) \quad (1.34)$$

$$\Delta\bar{C}_{2m}^{\delta} - i\Delta\bar{S}_{2m}^{\delta} = \sum_{\sigma} \delta l_{2m}(\sigma) \left(\Delta\bar{C}_{2m}^{(\sigma)} - i\Delta\bar{S}_{2m}^{(\sigma)} \right) \quad (1.35)$$

对比位系数变化的位勒夫数频率相关性校正算法公式，可得二阶周日、半日径向勒夫数频率相关性校正，引起的二阶田谐、扇谐径向位移球谐系数变化 ($m = 1, 2$) 为：

$$\Delta\hat{C}_{2m}^{\delta} - i\Delta\hat{S}_{2m}^{\delta} = \sum_{\sigma} \delta h_{2m}(\sigma) \left(\Delta\bar{C}_{2m}^{(\sigma)} - i\Delta\bar{S}_{2m}^{(\sigma)} \right) = \eta_m \left(\sum_{\tau=1}^{\tau_{20}} A_m \delta h_{2m}^{\tau} H_{2m}^{\tau} e^{i\phi^{\tau}} \right) = \eta_m A_m \sum_{\tau=1}^{\tau_{20}} H_{2m}^{\tau} [(\delta h_{2m}^{\tau R} \cos\phi^{\tau} - \delta h_{2m}^{\tau I} \sin\phi^{\tau}) + i(\delta h_{2m}^{\tau R} \sin\phi^{\tau} + \delta h_{2m}^{\tau I} \cos\phi^{\tau})] \quad (1.36)$$

二阶长周期径向勒夫数频率相关性校正，引起的二阶带谐径向位移球谐系数变化为：

$$\Delta\hat{C}_{20}^{\delta} = Re \left[\sum_{\sigma} \delta h_{20}(\sigma) \Delta\bar{C}_{20}^{(\sigma)} \right] = Re \left(\sum_{\tau=1}^{\tau_{20}} \delta h_{20}^{\tau} A_0 H_{20}^{\tau} e^{i\phi^{\tau}} \right) = A_0 \sum_{\tau=1}^{\tau_{20}} H_{20}^{\tau} (\delta h_{20}^{\tau R} \cos\phi^{\tau} - \delta h_{20}^{\tau I} \sin\phi^{\tau}) \quad (1.37)$$

类似地，可得二阶周日、半日水平勒夫数频率相关性校正，引起的二阶田谐、扇谐水平位移球谐系数变化 ($m = 1, 2$) 为：

$$\Delta\hat{C}_{2m}^{\delta} - i\Delta\hat{S}_{2m}^{\delta} = \sum_{\sigma} \delta l_{2m}(\sigma) \left(\Delta\bar{C}_{2m}^{(\sigma)} - i\Delta\bar{S}_{2m}^{(\sigma)} \right) = \eta_m \left(\sum_{\tau=1}^{\tau_{20}} A_m \delta l_{2m}^{\tau} H_{2m}^{\tau} e^{i\phi^{\tau}} \right) = \eta_m A_m \sum_{\tau=1}^{\tau_{20}} H_{2m}^{\tau} [(\delta l_{2m}^{\tau R} \cos\phi^{\tau} - \delta l_{2m}^{\tau I} \sin\phi^{\tau}) + i(\delta l_{2m}^{\tau R} \sin\phi^{\tau} + \delta l_{2m}^{\tau I} \cos\phi^{\tau})] \quad (1.38)$$

二阶长周期水平勒夫数频率相关性校正，引起的二阶带谐水平位移球谐系数变化为：

$$\Delta\hat{C}_{20}^{\delta} = Re \left[\sum_{\sigma} \delta k_{20}(\sigma) \Delta\bar{C}_{20}^{(\sigma)} \right] = Re \left(\sum_{\tau=1}^{\tau_{20}} \delta k_{20}^{\tau} A_0 H_{20}^{\tau} e^{i\phi^{\tau}} \right) = A_0 \sum_{\tau=1}^{\tau_{20}} H_{20}^{\tau} (\delta k_{20}^{\tau R} \cos\phi^{\tau} - \delta k_{20}^{\tau I} \sin\phi^{\tau}) \quad (1.39)$$

将位勒夫数频率相关性校正公式表达成位移量的球谐系数变化，与位系数变化的勒夫数频率相关性校正公式在形式上相同。这样做的目的是，便于规范各种大地测量要素固体潮效应计算流程，实现各种几何和物理大地测量要素固体潮效应的算法相容和统一计算。

5.1.4 大地测量全要素体潮效应统一算法

采用相容的算法、相同的数值标准与地球物理模型，统一计算地面及其外部空间各种大地测量要素（观测量或参数）固体潮效应，是形变地球大地测量学的基本原则，是多种异构大地测量协同观测和多源异质大地测量数据深度融合的最低要求。

5.1.4.1 固体潮效应的勒夫数频率相关性校正算法

首先，选择合适的标称体潮勒夫数，使得勒夫数频率相关性校正包含所有勒夫数虚部的贡献，取标称勒夫数为实数，以简化固体潮效应计算方案。

为满足这种情况，这里以表 1.2 微椭非旋转弹性地球位勒夫数为基础，将位勒夫数取值用表 1.3 中粘弹性地球的二阶位勒夫数的实部替换，作为标称体潮勒夫数。而将表 1.3 中粘弹性地球的二阶位勒夫数的虚部，纳入位勒夫数频率相关性校正算法中一并计算，即将表 1.6 中二阶周日位勒夫数的虚部统一加上-0.00144，变为 $\delta k_{21}^I(\sigma) = \delta k_{21}^I(\sigma) - 0.00144$ ，将二阶半日位勒夫数的虚部统一加上-0.00130，变为 $\delta k_{22}^I(\sigma) = \delta k_{22}^I(\sigma) - 0.00130$ 。这样处理后的标称体潮勒夫数取值如表 1.13。

二阶位系数固体潮效应的勒夫数频率相关性校正算法，已由 (1.30) ~ (1.33) 式给出。

表 1.13 标称体潮勒夫数取值

n	m	潮汐周期	k_{nm}	h_{nm}	l_{nm}
-----	-----	------	----------	----------	----------

2	0	长周期	0.30190	0.6078	0.0847
2	1	周日	0.29830	0.6078	0.0847
2	2	半日	0.30102	0.6078	0.0847
3	0	长周期	0.093	0.2920	0.0150
3	1	周日	0.093	0.2920	0.0150
3	2	半日	0.093	0.2920	0.0150
3	3	1/3 日	0.094	0.2920	0.0150

将地球重力位系数固体潮效应的勒夫数频率相关性校正 $\Delta\bar{C}_{2m}^\delta - i\Delta\bar{S}_{2m}^\delta$, 代入高程异常(大地水准面)固体潮效应表达式(1.4), 可得地面或固体地球外部高程异常(大地水准面)固体潮效应的二阶勒夫数频率相关性校正公式为:

$$\delta\zeta(r, \theta, \lambda) = \frac{GM}{\gamma r} \left(\frac{a}{r}\right)^2 \sum_{m=0}^2 (\Delta\bar{C}_{2m}^\delta \cos m\lambda + \Delta\bar{S}_{2m}^\delta \sin m\lambda) \bar{P}_{2m}(\cos\theta) \quad (1.40)$$

式中: $\Delta\bar{S}_{20}^\delta = 0$ 。

同理, 可得地面或固体地球外部重力固体潮效应的二阶勒夫数频率相关性校正公式

$$\delta g^\delta = 3 \frac{GM}{r^2} \left(\frac{a}{r}\right)^2 \sum_{m=0}^2 (\Delta\bar{C}_{2m}^\delta \cos m\lambda + \Delta\bar{S}_{2m}^\delta \sin m\lambda) \bar{P}_{2m}(\cos\theta) \quad (1.41)$$

垂线偏差固体潮效应的二阶勒夫数频率相关性校正公式

$$\text{南向: } \delta\xi = \frac{GM \sin\theta}{\gamma r^2} \left(\frac{a}{r}\right)^2 \sum_{m=0}^2 (\Delta\bar{C}_{2m}^\delta \cos m\lambda + \Delta\bar{S}_{2m}^\delta \sin m\lambda) \frac{\partial}{\partial\theta} \bar{P}_{2m}(\cos\theta) \quad (1.42)$$

$$\text{西向: } \delta\eta = \frac{GM}{\gamma r^2 \sin\theta} \left(\frac{a}{r}\right)^2 \sum_{m=1}^2 m (\Delta\bar{C}_{2m}^\delta \sin m\lambda - \Delta\bar{S}_{2m}^\delta \cos m\lambda) \bar{P}_{2m}(\cos\theta) \quad (1.43)$$

重力梯度径向固体潮效应的二阶勒夫数频率相关性校正公式

$$\delta T_{rr} = 12 \frac{GM}{r^3} \left(\frac{a}{r}\right)^2 \sum_{m=0}^2 (\Delta\bar{C}_{2m}^\delta \cos m\lambda + \Delta\bar{S}_{2m}^\delta \sin m\lambda) \bar{P}_{2m}(\cos\theta) \quad (1.44)$$

水平重力梯度固体潮效应的二阶勒夫数频率相关性校正公式

$$\text{北向: } \delta T_{NN} = -\frac{GM}{r^3} \left(\frac{a}{r}\right)^2 \sum_{m=0}^2 (\Delta\bar{C}_{2m}^\delta \cos m\lambda + \Delta\bar{S}_{2m}^\delta \sin m\lambda) \frac{\partial^2}{\partial\theta^2} \bar{P}_{2m}(\cos\theta) \quad (1.45)$$

$$\text{西向: } \delta T_{WW} = \frac{GM}{r^3 \sin^2\theta} \left(\frac{a}{r}\right)^2 \sum_{m=1}^2 m^2 (\Delta\bar{C}_{2m}^\delta \cos m\lambda + \Delta\bar{S}_{2m}^\delta \sin m\lambda) \bar{P}_{2m}(\cos\theta) \quad (1.46)$$

地面位移固体潮效应 \odot (凡标注 \odot , 表示其点位与地球固连)二阶勒夫数频率相关性校正公式

$$\text{东向: } \delta e = -\frac{GM}{\gamma r \sin\theta} \left(\frac{a}{r}\right)^2 \sum_{m=1}^2 m (\Delta\hat{C}_{2m}^\delta \sin m\lambda - \Delta\hat{S}_{2m}^\delta \cos m\lambda) \bar{P}_{2m}(\cos\theta) \quad (1.47)$$

$$\text{北向: } \delta n = -\frac{GM \sin\theta}{\gamma r} \left(\frac{a}{r}\right)^2 \sum_{m=0}^2 (\Delta\hat{C}_{2m}^\delta \cos m\lambda + \Delta\hat{S}_{2m}^\delta \sin m\lambda) \frac{\partial}{\partial\theta} \bar{P}_{2m}(\cos\theta) \quad (1.48)$$

$$\text{径向: } \delta r = \frac{GM}{\gamma r} \left(\frac{a}{r}\right)^2 \sum_{m=0}^2 (\Delta\hat{C}_{2m}^\delta \cos m\lambda + \Delta\hat{S}_{2m}^\delta \sin m\lambda) \bar{P}_{2m}(\cos\theta) \quad (1.49)$$

地面重力固体潮效应 \odot 的二阶勒夫数频率相关性校正公式

$$\delta g^s(r, \varphi, \lambda) = \frac{3GM}{r^2} \left(\frac{a}{r}\right)^2 \sum_{m=0}^2 \left[\left(\Delta\hat{C}_{2m}^\delta - \frac{3}{2} \Delta\bar{C}_{2m}^\delta \right) \cos m\lambda + \left(\Delta\hat{S}_{2m}^\delta - \frac{3}{2} \Delta\bar{S}_{2m}^\delta \right) \sin m\lambda \right] \bar{P}_{2m}(\cos\theta) \quad (1.50)$$

地倾斜固体潮效应 \odot 的二阶勒夫数频率相关性校正公式

$$\begin{aligned} \text{南向: } \delta\xi^s &= \frac{GM \sin\theta}{\gamma r^2} \left(\frac{a}{r}\right)^2 \\ &\sum_{m=0}^2 [(\Delta\bar{C}_{2m}^\delta - \Delta\hat{C}_{2m}^\delta)\cos m\lambda + (\Delta\bar{S}_{2m}^\delta - \Delta\hat{S}_{2m}^\delta)\sin m\lambda] \frac{\partial}{\partial\theta} \bar{P}_{2m}(\cos\theta) \end{aligned} \quad (1.51)$$

$$\begin{aligned} \text{西向: } \delta\eta^s &= \frac{GM}{\gamma r^2 \sin\theta} \left(\frac{a}{r}\right)^2 \\ &\sum_{m=1}^2 m [(\Delta\bar{C}_{2m}^\delta - \Delta\hat{C}_{2m}^\delta)\sin m\lambda - (\Delta\bar{S}_{2m}^\delta - \Delta\hat{S}_{2m}^\delta)\cos m\lambda] \bar{P}_{2m}(\cos\theta) \end{aligned} \quad (1.52)$$

5.1.4.2 固体潮效应的 4 阶地球重力位系数变化贡献

4 阶重力位系数的固体潮效应, 采用与频率相关的二阶勒夫数 k_{2m}^+ , ($m = 0, 1, 2$), 由二阶重力位系数的直接影响 $(\Delta\bar{C}_{2m} - i\Delta\bar{S}_{2m})$ (二阶引潮位) 计算

$$\Delta\bar{C}_{4m} - i\Delta\bar{S}_{4m} = k_{2m}^+(\Delta\bar{C}_{2m} - i\Delta\bar{S}_{2m}), \quad m = 0, 1, 2 \quad (1.53)$$

虽然 4 阶重力位系数的固体潮效应按 (1.53) 式, 由二阶位系数的直接影响计算, 但其对大地测量各要素的贡献应按 4 阶位系数变化计算。将 (1.53) 式, 代入 (1.4) ~ (1.16) 式, 可得地面或固体地球外部高程异常 (大地水准面) 固体潮效应的 4 阶重力位系数变化的贡献为:

$$\varepsilon\zeta(r, \varphi, \lambda) = \frac{GM}{\gamma r} \left(\frac{a}{r}\right)^4 \sum_{m=0}^2 k_{2m}^+ (\Delta\bar{C}_{2m} \cos m\lambda + \Delta\bar{S}_{2m} \sin m\lambda) \bar{P}_{4m}(\cos\theta) \quad (1.54)$$

4 阶重力位系数变化对地面或固体地球外部重力与地面重力固体潮效应贡献相等, 即

$$\varepsilon g^\delta = \frac{5GM}{r^2} \left(\frac{a}{r}\right)^4 \sum_{m=0}^2 k_{2m}^+ (\Delta\bar{C}_{2m} \cos m\lambda + \Delta\bar{S}_{2m} \sin m\lambda) \bar{P}_{4m}(\cos\theta) \quad (1.55)$$

4 阶重力位系数变化对地面或固体地球外部垂线偏差与地倾斜固体潮效应贡献相等, 即

$$\text{南向: } \varepsilon\xi = \frac{GM \sin\theta}{\gamma r^2} \left(\frac{a}{r}\right)^4 \sum_{m=0}^2 k_{2m}^+ (\Delta\bar{C}_{2m} \cos m\lambda + \Delta\bar{S}_{2m} \sin m\lambda) \frac{\partial}{\partial\theta} \bar{P}_{4m}(\cos\theta) \quad (1.56)$$

$$\text{西向: } \varepsilon\eta = \frac{GM}{\gamma r^2 \sin\theta} \left(\frac{a}{r}\right)^4 \sum_{m=1}^2 k_{2m}^+ m (\Delta\bar{C}_{2m} \sin m\lambda - \Delta\bar{S}_{2m} \cos m\lambda) \bar{P}_{4m}(\cos\theta) \quad (1.57)$$

重力梯度径向固体潮效应的 4 阶重力位系数变化的贡献

$$\varepsilon T_{rr} = \frac{30GM}{r^3} \left(\frac{a}{r}\right)^4 \sum_{m=0}^2 k_{2m}^+ (\Delta\bar{C}_{2m} \cos m\lambda + \Delta\bar{S}_{2m} \sin m\lambda) \bar{P}_{4m}(\cos\theta) \quad (1.58)$$

水平重力梯度固体潮效应的 4 阶重力位系数变化的贡献

$$\text{北向: } \varepsilon T_{NN} = -\frac{GM}{r^3} \left(\frac{a}{r}\right)^4 \sum_{m=0}^2 k_{2m}^{(+)} (\Delta\bar{C}_{2m} \cos m\lambda + \Delta\bar{S}_{2m} \sin m\lambda) \frac{\partial^2}{\partial\theta^2} \bar{P}_{4m} \quad (1.59)$$

$$\text{西向: } \varepsilon T_{WW} = \frac{GM}{r^3 \sin^2\theta} \left(\frac{a}{r}\right)^4 \sum_{m=1}^2 m^2 k_{2m}^+ (\Delta\bar{C}_{2m} \sin m\lambda + \Delta\bar{S}_{2m} \cos m\lambda) \bar{P}_{4m} \quad (1.60)$$

4 阶重力位系数变化对与地球固连的地面站点位移固体潮效应没有贡献, 恒为零。

5.1.4.3 大地测量全要素固体潮效应统一计算流程

(1) 直接由 (1.1) 式, 计算引潮位引起的位系数变化 $\Delta\bar{C}_{nm} - i\Delta\bar{S}_{nm}$, ($n = 2, 3, 4, 5, 6$)。

(2) 采用实数值的标称勒夫数 (表 1.13), 且由标称的位移勒夫数和计算点地心纬度 φ , 按 (1.19) 式计算顾及纬度依赖性的位移勒夫数, 进而按 (1.3) ~ (1.16) 式, 由位系数变化 $\Delta\bar{C}_{nm} - i\Delta\bar{S}_{nm}$, 计算各种大地测量要素固体潮效应的标称值, 记为 x^0 。

(3) 采用与频率相关的勒夫数 k_{2m}^+ , ($m = 0, 1, 2$), 由二阶位系数变化 $\Delta\bar{C}_{2m} - i\Delta\bar{S}_{2m}$, 按

式 (1.54) ~ (1.60) 计算大地测量要素固体潮效应的 4 阶重力位系数变化贡献, 记为 εx 。

(4) 由二阶勒夫数频率相关性校正值和海潮调和幅值, 分别按 (1.30) 与 (1.31)、(1.36) 与 (1.37), 计算位系数变化、位移球谐系数变化的勒夫数频率相关性校正值 $(\Delta\tilde{C}_{2m}^{\delta} - \Delta\hat{C}_{2m}^{\sigma})$ 、 $(\Delta\hat{C}_{2m}^{\sigma} - i\Delta\hat{S}_{2m}^{\sigma})$ 和 $(\Delta\tilde{C}_{2m}^{\sigma} - i\Delta\tilde{S}_{2m}^{\sigma})$, 进而按 (1.40) ~ (1.52) 式, 计算地面或地球外部各种大地测量要素固体潮效应的二阶勒夫数频率相关性校正, 记为 δx 。

二阶勒夫数频率相关性校正值和海潮调和幅值见表 1.6~表 1.11, 其中位勒夫数频率相关性校正, 统一加上表 1.3 中粘弹性地球的二阶位勒夫数的虚部, 即 $\delta k_{21}^I(\sigma) = \delta k_{21}^I(\sigma) - 0.00144$, $\delta k_{22}^I(\sigma) = \delta k_{22}^I(\sigma) - 0.00130$ 。

(5) 将 (2) ~ (3) 步计算得到的相应大地测量要素固体潮效应的标称值 x^0 、4 阶重力位系数变化贡献 εx 与二阶勒夫数频率相关性校正 δx 相加, 就是地面及固体地球外部计算点处各种大地测量要素固体潮效应的高精度计算结果。

8.1.5 大地测量固体潮效应的特点及分析

固体潮效应与大地测量要素类型、时间以及计算点在地固坐标系中的位置有关。下面计算地面点 $P(N105^{\circ}, E20^{\circ}, H100m)$ 固体潮效应及其各部分贡献的时间序列, 来考察各种大地测量要素固体潮效应的时变性质。

(1) 全要素大地测量的固体潮效应

首先, 顾及固体潮效应中各种贡献, 计算地面点 $P(N105^{\circ}, E20^{\circ}, H100m)$ 处全要素大地测量的固体潮效应时间序列。时间跨度为 2020 年 6 月 1 日 0 时至 2020 年 6 月 7 日 24 时 (7 天), 时间间隔 10 分钟。如图 1.8。

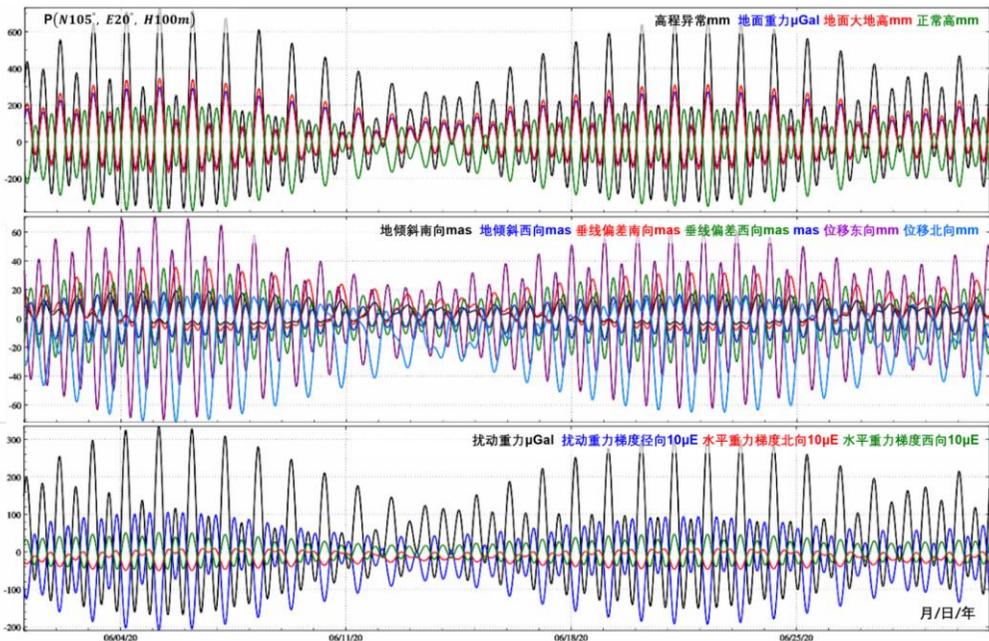


图 1.8 地面站点全要素大地测量固体潮效应时间序列

在分析固体潮效应时序曲线的时变性质时, 一般可重点考察各种类型大地测量要素固体

潮效应的幅值大小及其随时间的变化情况，考察不同类型大地测量要素固体潮效应之间的相位变化关系。由于固体潮效应时序的最大最小值之差，与参考历元无关，因而固体潮效应最大最小值之差，可有效体现不同类型大地测量要素固体潮效应之间的关系。

图 1.8 显示，大地水准面固体潮效应（当地面点大地高与大地水准面高相差不大时，地面高程异常的固体潮效应即为大地水准面的固体潮效应）最大最小值之差可达 0.99m，地面大地高固体潮效应最大最小值之差可达 0.51m，正常高固体潮效应最大最小值之差可达 0.58m，地面重力固体潮效应最小最大值之差可达 447.5 μ Gal，地倾斜固体潮效应最大最小值之差可到 45mas，水平位移最大最小值之差可达 0.16m，重力梯度径向固体潮效应最大最小值之差可达 3.20mE，水平重力梯度最大最小值之差可达 1.15mE。

地面点的大地高固体潮效应与正常高固体潮效应异相（同一时刻符号相反），地倾斜（垂线偏差）南向与西向的固体潮效应异相，水平重力梯度的北向与西向固体潮效应异相。地面点的水平位移、地倾斜（垂线偏差）及水平重力梯度向量的固体潮效应，在东西方向上的幅度一般大于南北方向。

(2) 地球外部行星的固体潮效应

为考察地球外部行星对固体潮效应的贡献及其时变情况，这里以地球外部全部行星为引潮天体，计算地面点 $P(N105^\circ, E20^\circ, H100m)$ 处全要素大地测量的行星固体潮效应时间序列，时间跨度 2020 年 1 月 1 日至 2022 年 12 月 31 日 (12 年)，时间间隔 2 小时，如图 1.9。行星固体潮效应不含勒夫数频率相关性贡献。

图 1.9 显示，地球外部行星的固体潮效应很小，一般只在高精度卫星大地测量、较大时空尺度或全球地球动力学监测或研究中需要顾及。行星固体潮效应包含两个较明显的周期信号，较大幅值的信号周期约为 560 天，第二个信号的周期约为 250 天。

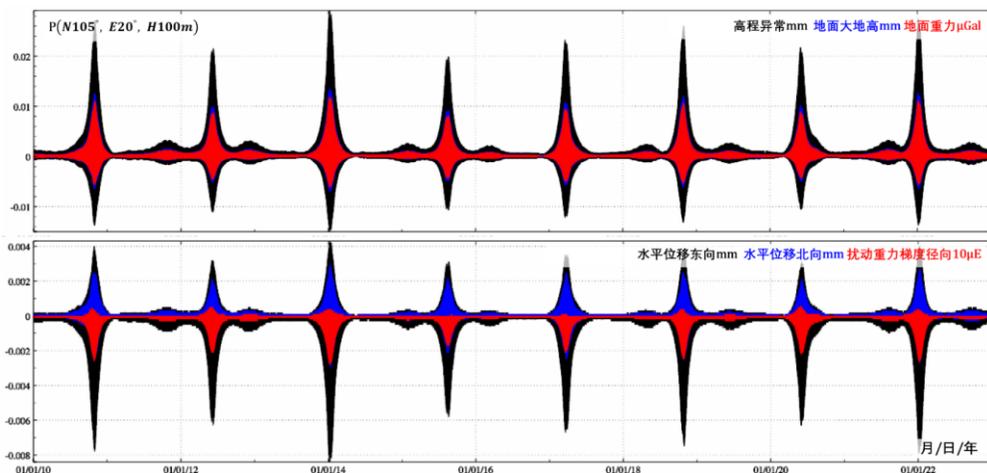


图 1.9 地球外部行星的地面大地测量固体潮效应时间序列

(3) 引潮位对大地测量要素的间接影响

固体潮效应中的引潮位间接影响部分，是引潮位通过勒夫数作用后对大地测量要素的贡献。一些文献将间接影响称为固体潮效应。图 1.10 为地面点 $P(N105^\circ, E20^\circ, H100m)$ 处引

潮位对大地测量要素的间接影响时间序列，时间跨度为 2020 年 6 月 1 日 0 时至 2020 年 6 月 7 日 24 时 (7 天)，时间间隔 10 分钟。

图 1.10 显示，大地水准面固体潮间接影响最大最小值之差可达到 0.24m，地面重力固体潮间接影响最大最小值之差可达 40 μ Gal，重力梯度径向固体潮效应间接影响最大最小值之差可达 0.7mE。与固体潮效应（引潮位直接影响和间接影响之和）相比，不同类型大地测量要素固体潮间接影响之间的相位关系不完全一致。

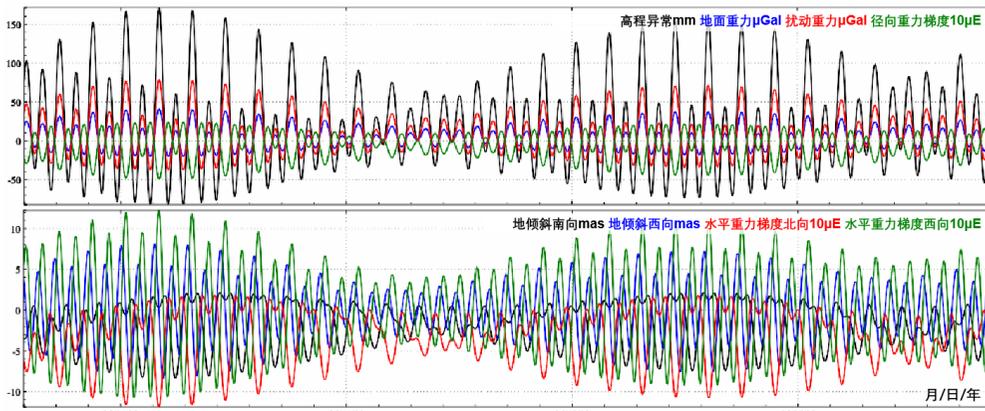


图 1.10 地面大地测量固体潮效应中的引潮位间接影响

(4) 勒夫数频率相关性校正总贡献

高精度、全球性或区域性、大时间跨度的大地测量与地球动力学，离不开精密潮汐理论支持，固体潮效应需要顾及勒夫数频率相关性。下面计算勒夫数频率相关性校正（不含径向、水平勒夫数纬度依赖性贡献）对地面点处全要素大地测量固体潮效应的贡献，时间跨度 2018 年 1 月 1 日至 2018 年 1 月 31 日 (1 个月)，时间间隔 30 分钟，结果如图 1.11。

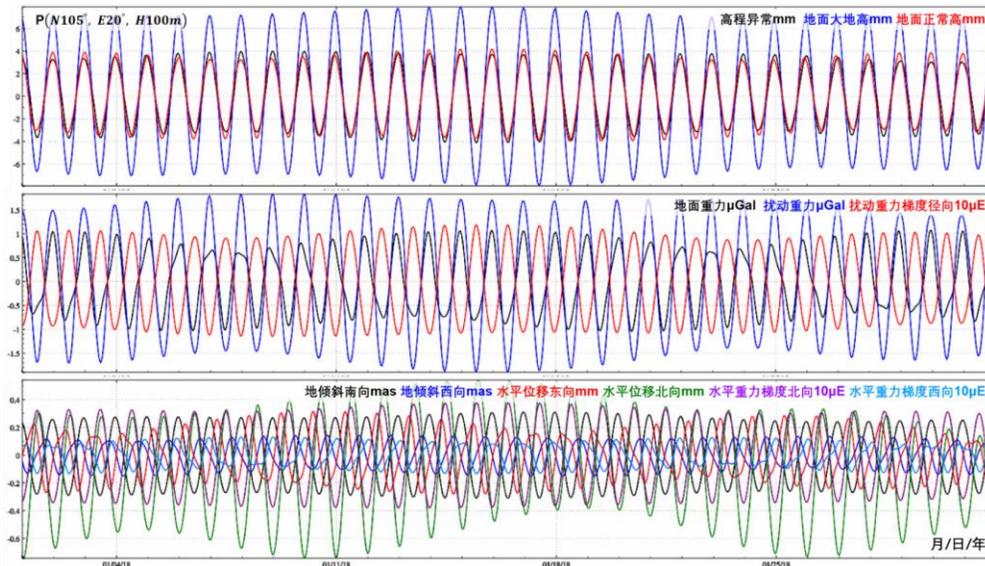


图 1.11 地面大地测量固体潮效应中勒夫数频率相关性贡献

8.2 全球负荷球谐分析与负荷形变场球谐综合

8.2.1 地表负荷等效水高球谐级数表示

地球表层大气、土壤水、江河湖库水、冰川冰盖雪山、地下水和海平面变化等地表非潮汐负荷变化，可用地面等效水高变化 h_w 或地表单位点质量负荷 $q_w = \rho_w h_w$ （也称地表面密度， ρ_w 为水的密度）统一表示。

地表非潮汐负荷变化 h_w （地表物质迁移）直接引起地球外部重力位变化，对地面或地球外部点 (r, θ, λ) 重力位产生直接影响 $\Delta V^*(r, \theta, \lambda)$ ，可表示为：

$$\Delta V^*(r, \theta, \lambda) = \frac{GM}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{a}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm}^* \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm}^* \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \quad (2.1)$$

式中： r 为计算点的地心向径（地心距）， $(\Delta \bar{C}_{nm}^*, \Delta \bar{S}_{nm}^*)$ 为地表非潮汐负荷变化（即地面等效水高变化 h_w ）直接引起的规格化重力位系数变化，即全球重力位模型 Stokes 系数的直接影响，可按面密度引力位定义计算：

$$\begin{cases} \Delta \bar{C}_{nm}^* \\ \Delta \bar{S}_{nm}^* \end{cases} = \frac{3\rho_w}{4\pi a \rho_e (2n+1)} \left(\frac{r}{a}\right)^n \int_S h_w \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \begin{cases} \cos m\lambda \\ \sin m\lambda \end{cases} \sin\theta d\theta d\lambda dr \quad (2.2)$$

式中： $\int_S \cdot dS$ 为全球地面积分， $dS = \sin\theta d\theta d\lambda dr$ ， ρ_e 为地球平均密度。

地面点 $(r_0 \approx a, \theta, \lambda)$ 的等效水高变化 h_w 也可表示为规格化负荷球谐函数级数

$$h_w(r_0, \theta, \lambda) = r_0 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{a}{r_0}\right)^n \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm}^w \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm}^w \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \quad (2.3)$$

式中： $\Delta \bar{C}_{nm}^w, \Delta \bar{S}_{nm}^w$ 为 n 阶 m 次规格化负荷球谐系数。

考虑到一般情况下全球地表非潮汐变化负荷中长波占优， n 不会太大，而地面负荷的地心向径 $r_0 \approx a$ ，因此有 $\left(\frac{a}{r_0}\right)^n \approx 1$ ，则式（2.3）可简化为：

$$h_w = a \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm}^w \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm}^w \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \quad (2.4)$$

比较（2.2）和（2.4）式，可得：

$$\begin{cases} \Delta \bar{C}_{nm}^* \\ \Delta \bar{S}_{nm}^* \end{cases} = \frac{3\rho_w}{\rho_e} \frac{1}{2n+1} \begin{cases} \Delta \bar{C}_{nm}^w \\ \Delta \bar{S}_{nm}^w \end{cases} \quad (2.5)$$

式（2.5）即为任意 n 阶 m 次地面等效水高规格化球谐系数变化 $\{\Delta \bar{C}_{nm}^w, \Delta \bar{S}_{nm}^w\}$ 与规格化重力位系数直接影响 $(\Delta \bar{C}_{nm}^*, \Delta \bar{S}_{nm}^*)$ 之间的关系式。

8.2.2 负荷形变场规格化球谐级数展开

由负荷形变理论可知，地面等效水高变化 h_w 还导致固体地球形变，致使地球质量进一步重新调整，产生附加引力位，间接引起地球重力位变化，称为地面等效水高变化的间接影响，用负荷勒夫数或负荷潮因子表征。

任意 n 阶 m 次地面等效水高变化规格化球谐系数 $\{\Delta \bar{C}_{nm}^w, \Delta \bar{S}_{nm}^w\}$ ，对重力位系数的总影响，等于其直接影响和间接影响之和，称为重力位系数变化的负荷效应，即

$$\begin{cases} \Delta \bar{C}_{nm} \\ \Delta \bar{S}_{nm} \end{cases} = (1 + k'_n) \begin{cases} \Delta \bar{C}_{nm}^* \\ \Delta \bar{S}_{nm}^* \end{cases} = \frac{3\rho_w}{\rho_e} \frac{1+k'_n}{2n+1} \begin{cases} \Delta \bar{C}_{nm}^w \\ \Delta \bar{S}_{nm}^w \end{cases} \quad (2.6)$$

式中： k'_n 为 n 阶位负荷勒夫数。

由扰动重力场球谐展开式与负荷形变理论可得，由地面等效水高球谐系数变化 $\{\Delta\bar{C}_{nm}^w, \Delta\bar{S}_{nm}^w\}$ ，计算地面或地球外部点 (r, θ, λ) 处，重力位负荷效应 $\Delta V(r, \theta, \lambda)$ 的球谐综合算法公式为：

$$\Delta V = \frac{GM}{r} \frac{3\rho_w}{\rho_e} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{a}{r}\right)^n \frac{1+k'_n}{2n+1} \sum_{m=0}^n (\Delta\bar{C}_{nm}^w \cos m\lambda + \Delta\bar{S}_{nm}^w \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \quad (2.7)$$

由 Bruns 公式得，地面或地球外部点 (r, θ, λ) 处高程异常负荷效应 $\Delta\zeta(r, \theta, \lambda)$ 的球谐综合公式：

$$\Delta\zeta = \frac{GM}{r\gamma} \frac{3\rho_w}{\rho_e} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{a}{r}\right)^n \frac{1+k'_n}{2n+1} \sum_{m=0}^n (\Delta\bar{C}_{nm}^w \cos m\lambda + \Delta\bar{S}_{nm}^w \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \quad (2.8)$$

式中： γ 为计算点的正常重力。同理，可得地面重力负荷效应球谐综合计算式 \odot

$$\Delta g^s(r_0, \theta, \lambda) = \frac{GM}{r_0^2} \frac{3\rho_w}{\rho_e} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n+1}{2n+1} \left(1 + \frac{2}{n} h'_n - \frac{n+1}{n} k'_n\right) \left(\frac{a}{r_0}\right)^n \sum_{m=0}^n (\Delta\bar{C}_{nm}^w \cos m\lambda + \Delta\bar{S}_{nm}^w \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \quad (2.9)$$

式中： h'_n 为 n 阶径向负荷勒夫数； (r_0, θ, λ) 为地面计算点的球坐标。

地面或地球外部点 (r, θ, λ) 处扰动重力负荷效应球谐综合计算式：

$$\Delta g^\delta(r, \theta, \lambda) = \frac{GM}{r^2} \frac{3\rho_w}{\rho_e} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n+1}{2n+1} (1+k'_n) \left(\frac{a}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n (\Delta\bar{C}_{nm}^w \cos m\lambda + \Delta\bar{S}_{nm}^w \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \quad (2.10)$$

与 (2.9) 式相比，(2.10) 式不含地面径向位移影响，因此，(2.9) 式仅适用于计算点位与地球固连的重力负荷效应，而 (2.10) 式适用于计算地面及地面外部空间任意点（如航空高度、卫星高度或海洋空间）的重力负荷效应。为区分这两种情况，这里将仅适用于点位与地球固连情况下的计算式标注 \odot 。

正常重力场是扰动重力场及其随时间变化的起算基准，不随时间变化，因此，重力、扰动重力与空间重力异常的潮汐或非潮汐效应，没有区别。式 (2.10) 中的“扰动”重力负荷效应，特指负荷效应不含径向形变影响，下同。

地倾斜负荷效应球谐综合计算式 \odot ：

$$\text{南向：} \Delta\xi^s(r_0, \theta, \lambda) = \frac{GM}{r_0^2} \frac{3\rho_w}{\gamma\rho_e} \sin\theta \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1+k'_n-h'_n}{2n+1} \left(\frac{a}{r_0}\right)^n \sum_{m=0}^n (\Delta\bar{C}_{nm}^w \cos m\lambda + \Delta\bar{S}_{nm}^w \sin m\lambda) \frac{\partial}{\partial\theta} \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \quad (2.11)$$

$$\text{西向：} \Delta\eta^s(r_0, \theta, \lambda) = \frac{GM}{r_0^2 \sin\theta} \frac{3\rho_w}{\gamma\rho_e} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1+k'_n-h'_n}{2n+1} \left(\frac{a}{r_0}\right)^n \sum_{m=1}^n m (\Delta\bar{C}_{nm}^w \sin m\lambda - \Delta\bar{S}_{nm}^w \cos m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \quad (2.12)$$

地面或地球外部空间点 (r, θ, λ) 处垂线偏差负荷效应球谐综合计算式：

$$\text{南向：} \Delta\xi(r, \theta, \lambda) = \frac{GM}{r^2} \frac{3\rho_w}{\gamma\rho_e} \sin\theta \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1+k'_n}{2n+1} \left(\frac{a}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n (\Delta\bar{C}_{nm}^w \cos m\lambda + \Delta\bar{S}_{nm}^w \sin m\lambda) \frac{\partial}{\partial\theta} \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \quad (2.13)$$

$$\text{西向：} \Delta\eta(r, \theta, \lambda) = \frac{GM}{r^2 \sin\theta} \frac{3\rho_w}{\gamma\rho_e} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1+k'_n}{2n+1} \left(\frac{a}{r}\right)^n \sum_{m=1}^n m (\Delta\bar{C}_{nm}^w \sin m\lambda - \Delta\bar{S}_{nm}^w \cos m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \quad (2.14)$$

地面站点(r_0, θ, λ)位移负荷效应球谐综合计算式 \odot :

$$\begin{aligned} \text{东向: } \Delta e(r_0, \theta, \lambda) = & -\frac{GM}{r_0 \gamma \sin \theta} \frac{3\rho_w}{\rho_e} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{l'_n}{2n+1} \left(\frac{a}{r_0}\right)^n \\ & \sum_{m=1}^n m(\Delta \bar{C}_{nm}^w \sin m\lambda - \Delta \bar{S}_{nm}^w \cos m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos \theta) \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} \text{北向: } \Delta n(r_0, \theta, \lambda) = & -\frac{GM}{r_0 \gamma} \frac{3\rho_w}{\rho_e} \sin \theta \sum_{n=1}^{\infty} \frac{l'_n}{2n+1} \left(\frac{a}{r_0}\right)^n \\ & \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm}^w \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm}^w \sin m\lambda) \frac{\partial}{\partial \theta} \bar{P}_{nm}(\cos \theta) \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} \text{径向: } \Delta r(r_0, \theta, \lambda) = & \frac{GM}{r_0 \gamma} \frac{3\rho_w}{\rho_e} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{h'_n}{2n+1} \left(\frac{a}{r_0}\right)^n \\ & \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm}^w \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm}^w \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos \theta) \end{aligned} \quad (2.17)$$

地面或地球外部空间点(r, θ, λ)处重力梯度径向负荷效应球谐综合计算式:

$$\begin{aligned} \Delta T_{rr}(r, \theta, \lambda) = & \frac{GM}{r^3} \frac{3\rho_w}{\rho_e} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(n+1)(n+2)}{2n+1} (1+k'_n) \left(\frac{a}{r}\right)^n \\ & \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm}^w \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm}^w \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos \theta) \end{aligned} \quad (2.18)$$

地面或地球外部空间点(r, θ, λ)处水平重力梯度负荷效应球谐综合计算式:

$$\begin{aligned} \text{北向: } \Delta T_{NN}(r, \theta, \lambda) = & -\frac{GM}{r^3} \frac{3\rho_w}{\rho_e} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1+k'_n}{2n+1} \left(\frac{a}{r}\right)^n \\ & \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm}^w \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm}^w \sin m\lambda) \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \bar{P}_{nm}(\cos \theta) \end{aligned} \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned} \text{西向: } \Delta T_{WW}(r, \theta, \lambda) = & -\frac{GM}{r^3 \sin^2 \theta} \frac{3\rho_w}{\rho_e} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1+k'_n}{2n+1} \left(\frac{a}{r}\right)^n \\ & \sum_{m=1}^n m^2 (\Delta \bar{C}_{nm}^w \sin m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm}^w \cos m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos \theta) \end{aligned} \quad (2.20)$$

在 (2.8) ~ (2.20) 中, 凡标注 \odot 的大地测量要素 (观测量或参数), 只有其点位与地球固连情况下有效。其中, 一阶项($n=1$)表示地表负荷形变引起地球质心变化, 对大地测量要素的影响, 表征大地测量要素的地球质心变化效应。地球质心变化在形变大地测量学中具有重要地位, 上述各式中的一阶项不能忽略。

依据 Farrell 地表负荷形变理论, 采用球对称无旋转弹性地球模型 PREM 有关参数, 可计算地表单位点质量负荷 (地表面密度, 1 kg/m^2) 作用下的负荷勒夫数。 n 阶径向、水平和位负荷勒夫数 h'_n 、 l'_n 和 k'_n 如表 2.1。

表 2.1 负荷勒夫数取值

阶数 n	h'_n	l'_n	k'_n
1	-0.2871129880	0.1045044062	0
2	-0.9945870591	0.0241125159	-0.3057703360
3	-1.0546530210	0.0708549368	-0.1962722363
4	-1.0577838950	0.0595872318	-0.1337905897
5	-1.0911859150	0.0470262750	-0.1047617976
6	-1.1492536560	0.0394081176	-0.0903495805
7	-1.2183632010	0.0349940065	-0.0820573391
8	-1.2904736610	0.0322512320	-0.0765234897
9	-1.3618478650	0.0303856246	-0.0723928769

10	-1.4309817610	0.0290225900	-0.0690776844
12	-1.5609348550	0.0271636708	-0.0638847506
14	-1.6797703790	0.0259680057	-0.0598385602
16	-1.7880882500	0.0251266737	-0.0564748883
18	-1.8864404740	0.0244708343	-0.0535490132
20	-1.9754659020	0.0238986214	-0.0509272630
25	-2.1615247260	0.0225448633	-0.0452625739
30	-2.3044581340	0.0211578086	-0.0405033192
35	-2.4152406280	0.0197609745	-0.0364524519
40	-2.5028874800	0.0184188171	-0.0329970228
45	-2.5741299450	0.0171690959	-0.0300450548
50	-2.6337485520	0.0160264262	-0.0275153569
60	-2.7300189390	0.0140651027	-0.0234487653
70	-2.8076818590	0.0124702089	-0.0203629907
80	-2.8746338100	0.0111640070	-0.0179658948
90	-2.9350553590	0.0100800427	-0.0160636283
100	-2.9913054190	0.0091686192	-0.0145257169
120	-3.0965116190	0.0077267323	-0.0122109806
140	-3.1965444360	0.0066448758	-0.0105711243
150	-3.2455767690	0.0062018042	-0.0099238838
160	-3.2942117980	0.0058106942	-0.0093636844
180	-3.3907532400	0.0051551676	-0.0084470364
200	-3.4867370690	0.0046324760	-0.0077337989
250	-3.7248624300	0.0037212221	-0.0065109062
300	-3.9588101480	0.0031642726	-0.0057493979
350	-4.1853482260	0.0028105951	-0.0052320414
400	-4.4014325530	0.0025772705	-0.0048534799
450	-4.6045856190	0.0024162122	-0.0045579733
500	-4.7931516890	0.0022987082	-0.0043145187
600	-5.1234075730	0.0021315364	-0.0039191204
700	-5.3914177940	0.0020034613	-0.0035936423
800	-5.6025165630	0.0018887552	-0.0033104524
1000	-5.8875374130	0.0016743075	-0.0028324828
1500	-6.1543113080	0.0012327687	-0.0020071634
2000	-6.2038470670	0.0009427101	-0.0015226332
3000	-6.2137113920	0.0006307787	-0.0010176493
4000	-6.2144649520	0.0004731032	-0.0007634795
5000	-6.2148224370	0.0003784752	-0.0006108869
6000	-6.2150593160	0.0003153917	-0.0005091296
8000	-6.2153555850	0.0002365398	-0.0003819009
12000	-6.2156520860	0.0001576905	-0.0002546364
18000	-6.2158498910	0.0001051258	-0.0001697735

25000	-6.2159607070	0.0000756901	-0.0001222433
30000	-6.2160082030	0.0000630749	-0.0001018717
32768	-6.2160282710	0.0000577468	-0.0000932672
∞	-6.2091440000	0.0000000000	0.0000000000

8.2.3 规格化缔合勒让德函数及对 θ 导数

用 (2.8) ~ (2.20) 球谐综合式计算大地测量要素负荷效应时, 需要计算规格化缔合勒让德函数 $\bar{P}_{nm}(\cos\theta)$ 及其对 θ 的一、二阶导数, 这里令 $t = \cos\theta, u = \sin\theta$, 直接给出几种快速算法。

(1) $\bar{P}_{nm}(t)$ 标准前向列递推算法($n < 1900$)

$$\begin{cases} \bar{P}_{nm}(t) = a_{nm}t\bar{P}_{n-1,m}(t) - b_{nm}\bar{P}_{n-2,m}(t) & \forall n > 1, m < n \\ \bar{P}_{nn}(t) = u\sqrt{\frac{2n+1}{2n}}\bar{P}_{n-1,n-1} & n > 1 \end{cases} \quad (2.21)$$

$$a_{nm} = \sqrt{\frac{(2n-1)(2n+1)}{(n+m)(n-m)}}, \quad b_{nm} = \sqrt{\frac{(2n+1)(n+m-1)(n-m-1)}{(2n-3)(n+m)(n-m)}}$$

$$\bar{P}_{00}(t) = 1, \quad \bar{P}_{10}(t) = \sqrt{3}t, \quad \bar{P}_{11}(t) = \sqrt{3}u \quad (2.22)$$

(2) $\bar{P}_{nm}(t)$ 改进 Belikov 递推算法($n < 64800$)

当 $n = 0, 1$ 时, 采用 (2.22) 式; 当 $n \geq 2$ 时:

$$\bar{P}_{n0}(t) = a_n t \bar{P}_{n-1,0}(t) - b_n \frac{u}{2} \bar{P}_{n-1,1}(t), \quad m = 0 \quad (2.23)$$

$$\bar{P}_{nm}(t) = c_{nm} t \bar{P}_{n-1,m}(t) - d_{nm} u \bar{P}_{n-1,m+1}(t) + e_{nm} u \bar{P}_{n-1,m-1}(t), \quad m > 0 \quad (2.24)$$

$$a_n = \sqrt{\frac{2n+1}{2n-1}}, \quad b_n = \sqrt{\frac{2(n-1)(2n+1)}{n(2n-1)}} \quad (2.25)$$

$$c_{nm} = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{(n+m)(n-m)(2n+1)}{2n-1}}, \quad d_{nm} = \frac{1}{2n} \sqrt{\frac{(n-m)(n-m-1)(2n+1)}{2n-1}} \quad (2.26)$$

当 $m > 0$ 时, 有

$$e_{nm} = \frac{1}{2n} \sqrt{\frac{2}{2-\delta_0^{m-1}}} \sqrt{\frac{(n+m)(n+m-1)(2n+1)}{2n-1}} \quad (2.27)$$

(3) $\bar{P}_{nm}(t)$ 函数跨阶次递推算法($n < 20000$)

当 $n = 0, 1$ 时, 采用 (2.22) 式; 当 $n \geq 2$ 时:

$$\bar{P}_{nm}(t) = \alpha_{nm} \bar{P}_{n-2,m}(t) + \beta_{nm} \bar{P}_{n-2,m-2}(t) - \gamma_{nm} \bar{P}_{n,m-2}(t) \quad (2.28)$$

$$\alpha_{nm} = \sqrt{\frac{(2n+1)(n-m)(n-m-1)}{(2n-3)(n+m)(n+m-1)}}$$

$$\beta_{nm} = \sqrt{1 + \delta_0^{m-2}} \sqrt{\frac{(2n+1)(n+m-2)(n+m-3)}{(2n-3)(n+m)(n+m-1)}} \quad (2.29)$$

$$\gamma_{nm} = \sqrt{1 + \delta_0^{m-2}} \sqrt{\frac{(n-m+1)(n+m-3)}{(n+m)(n+m-1)}}$$

(4) $\frac{\partial}{\partial \theta} \bar{P}_{nm}(\cos\theta)$ 的非奇异递推算法

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \bar{P}_{nm}(\cos\theta) = -\sin\theta \frac{\partial}{\partial t} \bar{P}_{nm}(t) \quad (2.30)$$

为 $\bar{P}_{nm}(\cos \theta)$ 对 θ 的一阶偏导数。

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial \theta} \bar{P}_{n0}(t) = -\sqrt{\frac{n(n+1)}{2}} \bar{P}_{n1}(t), & \frac{\partial}{\partial \theta} \bar{P}_{n1}(t) = \sqrt{\frac{n(n+1)}{2}} \bar{P}_{n0} - \frac{\sqrt{(n-1)(n+2)}}{2} \bar{P}_{n2} \\ \frac{\partial}{\partial \theta} \bar{P}_{nm}(t) = \frac{\sqrt{(n+m)(n-m+1)}}{2} \bar{P}_{n,m-1}(t) - \frac{\sqrt{(n-m)(n+m+1)}}{2} \bar{P}_{n,m+1}(t), & m > 2 \end{cases} \quad (2.31)$$

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \bar{P}_{00}(t) = 0, \quad \frac{\partial}{\partial \theta} \bar{P}_{10}(t) = -\sqrt{3}u, \quad \frac{\partial}{\partial \theta} \bar{P}_{11}(t) = \sqrt{3}t \quad (2.32)$$

(5) $\frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \bar{P}_{nm}$ 的非奇异递推算法

$$\begin{cases} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \bar{P}_{n0}(t) = -\frac{n(n+1)}{2} \bar{P}_{n0}(t) + \sqrt{\frac{n(n-1)(n+1)(n+2)}{8}} \bar{P}_{n2}(t) \\ \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \bar{P}_{n1}(t) = -\frac{2n(n+1)+(n-1)(n+2)}{4} \bar{P}_{n1}(t) + \frac{\sqrt{(n-2)(n-1)(n+2)(n+3)}}{4} \bar{P}_{n3}(t) \end{cases} \quad (2.33)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \bar{P}_{nm}(t) &= \frac{\sqrt{(n-m+1)(n-m+2)(n+m-1)(n+m)}}{4} \bar{P}_{n,m-2}(t) \\ &\quad - \frac{(n+m)(n-m+1)+(n-m)(n+m+1)}{4} \bar{P}_{nm}(t) \\ &\quad + \frac{\sqrt{(n-m-1)(n-m)(n+m+1)(n+m+2)}}{4} \bar{P}_{n,m+2}(t), \quad m > 2 \end{aligned} \quad (2.34)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \bar{P}_{00}(t) = 0, \quad \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \bar{P}_{10}(t) = -\sqrt{3}t, \quad \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \bar{P}_{11}(t) = -\sqrt{3}u \quad (2.35)$$

8.2.4 海平面变化球谐分析与负荷形变场球谐综合

不失一般性，我们总可以将全球海水质量变化和运输分解为两种作用效应，一种是在海水密度不随时间变化情况下的海平面变化，另一种是在海水体积和空间分布不变情况下（此时海平面高度不变）的海水密度变化。第一种海平面变化，是所有因素作用后的总海平面变化，显然也包括海水温盐效应引起的海平面高度变化，这部分海平面变化对全球海水质量变化和运输的贡献达到 98%以上，且可利用验潮站和多种海洋测高卫星高效精准监测；而海水密度变化，由于不再包括温盐效应引起的海平面高度变化，因而对全球海水质量变化和运输的贡献一般不到 2%，且难以准确监测。大多数大地测量应用中，可用海平面变化代表全球海水质量变化和运输，而将海水密度随时间变化的影响留给更高水平的大地测量技术（如卫星大地测量结合现场水文监测）去解决。

8.2.4.1 海平面变化球谐分析与负荷球谐模型构建

全球海平面变化球谐分析可采用 (2.4) 式，按快速 Fourier 算法计算。此时，先综合各种海面高观测数据，构造球坐标系下海平面变化格网时间序列（统一移去某一参考历元时刻的海面高格网，或某段时期内平均海面高格网），再分别对每一采样历元时刻的海平面变化格网按 (2.4) 式进行球谐分析，生成海平面变化负荷球谐系数模型时间序列。海平面变化格网的空间分辨率决定了其负荷球谐模型的最大阶数，负荷球谐系数模型时间序列的采样历元时刻与海平面变化格网时间序列一一对应。

式 (2.4) 将海平面高度变化直接表示为半径等于地球长半轴 a 球面上面谐函数的线性组合，因此，采用累积迭代球谐分析法，可有效提高海平面变化负荷球谐系数模型的逼近水平。

图 2.1 为 ETideLoad4.5 全球海平面变化球谐分析程序计算结果，程序输入 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 全

球海平面变化球坐标格网时间序列（其中，第一个历元时刻海平面变化格网如右中图，陆地区域置零），按（2.4）式，采用迭代累积逼近方法（迭代残差变化如右下图），构造 360 阶海平面变化负荷球谐系数模型时间序列（其中，第一个历元时刻海平面变化负荷球谐系数模型如左下图）。

海平面变化负荷球谐系数模型（左下图）的头文件分别是地心引力常数 GM ($\times 10^{14}m^3/s^2$)，地球长半轴 a (m)，零阶项 $a\Delta C_{00}$ (cm)，相对误差 θ (%)。 θ 为最终迭代残差标准差与输入原格网标准差的百分比。球谐系数最大阶数 n 等于全球地表负荷格网在纬度方向格网数，本例输入 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 分辨率格网模型，对应最大阶数 $n = 360$ 。

GM, a 也称为负荷球谐系数模型的尺度参数，表示球谐系数的面谐基函数定义在半径等于地球长半轴 a 的球面上。零阶项 $a\Delta C_{00}$ 代表海平面变化导致的全地球海洋总质量的变化，在地球质量守恒条件下无意义，实际计算一般忽略零阶项。3 个一阶项球谐系数 ($\Delta\bar{C}_{10}^{sea}, \Delta\bar{C}_{11}^{sea}, \Delta\bar{S}_{11}^{sea}$) 代表海平面变化引起的地球质心变化。

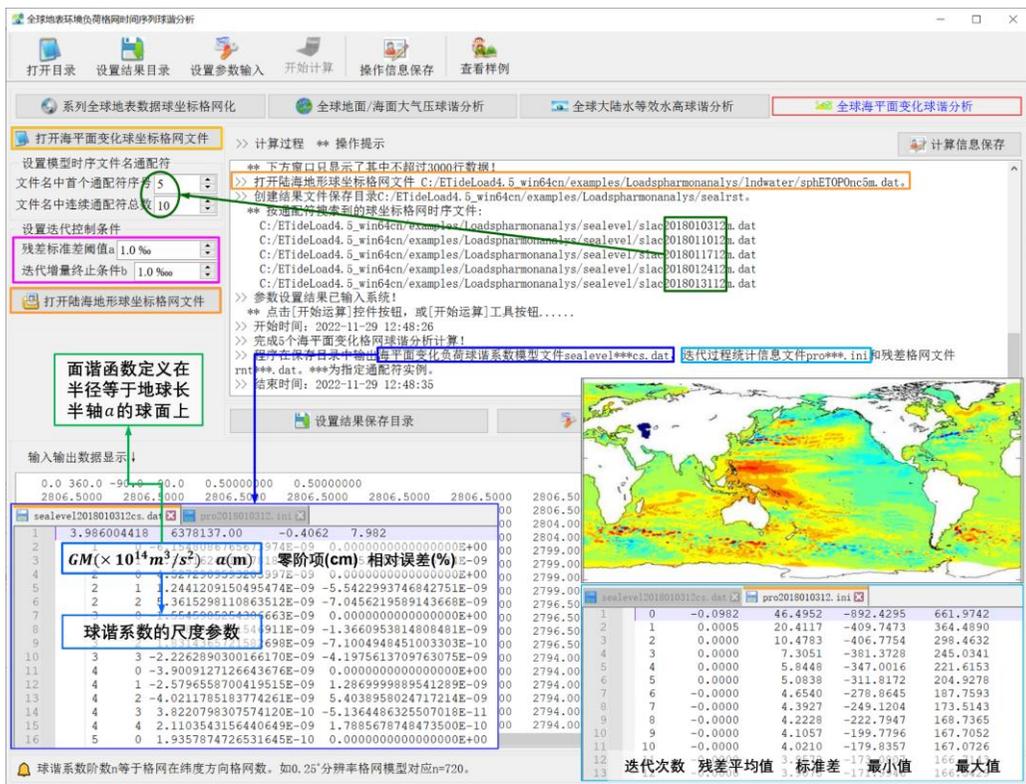


图 2.1 全球海平面变化球谐分析与负荷球谐模型构建

对于高精度大地测量，全球海平面变化短波成分不可忽略，需要一定分辨率的格网模型才能满足精度要求，相应地，需要较大阶数球谐系数模型表示。负荷球谐系数模型最大阶数基本由负荷的全球频谱结构与负荷效应的精度要求决定。表 2.1 给出某一历元时刻全球海平面变化负荷球谐分析结果随格网分辨率（最大阶数）变化情况。

表 2.2 显示，该历元时刻全球海平面变化的中短波成分明显，兼顾精度与计算效率，该

历元时刻的海平面变化负荷球谐系数模型的适宜最大阶数可选择 360 阶。

表 2.2 海平面变化负荷球谐分析残差随格网分辨率变化情况

输入格网分辨率	最大阶数	零阶项 cm	一阶项 $\times 10^{-10}$			残差相对误差 %
			ΔC_{10}^{sea}	ΔC_{11}^{sea}	ΔS_{11}^{sea}	
1°×1°	180	0.1278	-7.14017	-0.74191	6.93210	6.519
30'×30'	360	0.1419	-7.29329	-0.81169	7.57094	5.075
15'×15'	720	0.1273	-7.19655	-0.71797	6.86062	3.566

8.2.4.2 海平面变化负荷效应球谐综合计算

已知海平面变化负荷球谐系数模型，就可按 (2.8) ~ (2.20) 式的球谐综合算法，计算全球地面或地球外部任意空间点的高程异常、地面重力、扰动重力、地倾斜 (SW 南向/西向)、垂线偏差 (SW 南向/西向)、水平位移 (EN 东向/北向)、地面径向 (大地高)、地面正 (常) 高、扰动重力梯度或水平重力梯度的 (非潮汐) 海平面变化负荷 (形变) 效应，计算固体地球外部空间 (包括海洋、航空或卫星高度) 的海平面变化负荷重力位、引力 (加速度) 或扰动重力梯度扰动。

图 2.2 为 ETideLoad4.5 海平面变化负荷形变效应球谐综合程序计算结果，程序输入计算区域数字高程模型格网 (用于指定计算点位置和范围)，由海平面变化负荷球谐系数模型时间序列，选择最大计算阶数 360，按 (2.8) ~ (2.20) 式，计算地面大地测量全要素海平面变化负荷形变效应格网时间序列。

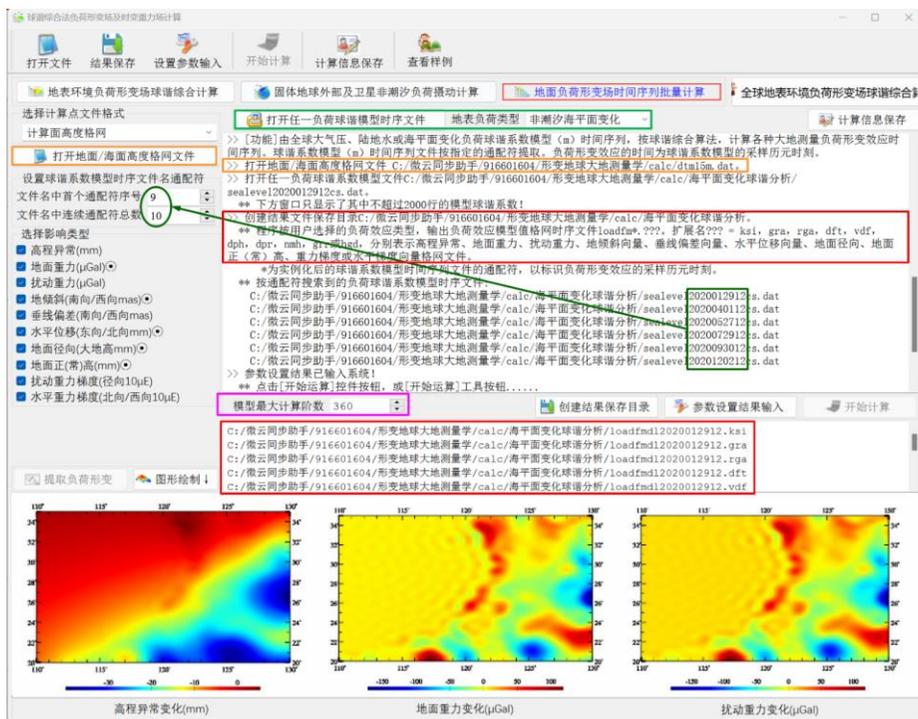


图 2.2 海平面变化负荷效应格网时间序列计算

也可以直接将 (2.3) 式用作观测方程, 以全球海平面变化为观测量, 严格按最小二乘法估计海平面变化负荷球谐系数, 从而直接在谱域中构建海平面变化负荷球谐系数模型, 则由该负荷球谐系数模型计算的海平面变化负荷也会严格位于海平面上, 这样, 计算点与负荷流动面元的空间坐标都在同一地球坐标系中, 计算点的高度, 与海平面变化负荷所在位置的高度完全统一。但是, 若用批量的全球海平面变化时间序列, 按最小二乘法估计负荷球谐系数模型时间序列, 由于待估负荷球谐系数的数量 $(N + 1)^2$ 随最大阶数 N 快速递增, 计算量因此迅速增大, 计算效率快速降低, 实际计算时很少采用。

由 (2.4) 式按快速 Fourier 算法构建的海平面变化负荷球谐系数模型时, 已假设海平面变化负荷位于半径等于地球长半轴 a 的球面上, 因此, 用该负荷球谐系数模型计算的海平面变化负荷也位于该球面上。当计算点位于海岸带、海域的地面或近地空间, 可将负荷形变效应的计算点高度取计算点相对于平均海面高度, 即正 (常) 高, 以保证计算点与海平面上负荷流动面元之间准确的空间位置关系。与按计算点大地高和严密最小二乘估计的球谐系数模型的计算结果相比, 近距离负荷效应最大近似误差为二阶近似 $O^2((a - b + \zeta)/R) < 1.25 \times 10^{-6}$, ζ 为计算点处的高程异常, a, b, R 为分别为地球的长半轴、短半轴和平均半径), 即小于总负荷效应的 10^{-6} , 完全可以忽略不计。当计算点远离海岸带的大陆地区、10 千米以上的高空或卫星高度时, 可用大地高直接代替正常高。

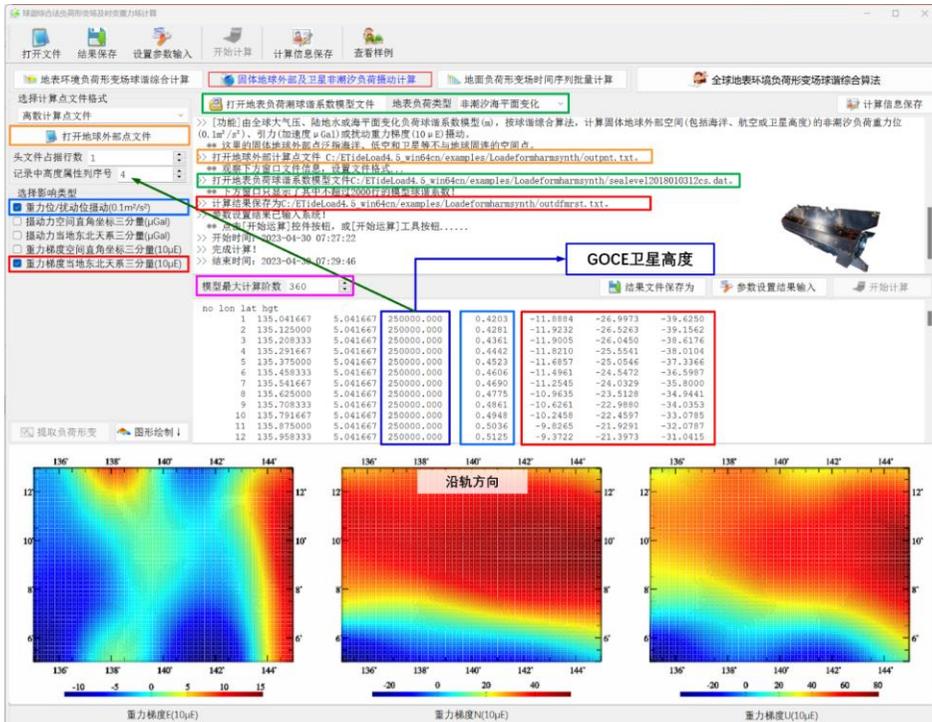


图 2.3 地球卫星海平面变化负荷扰动计算

图 2.3 为地球卫星海平面变化负荷的扰动位与重力梯度扰动计算结果。

下面直接利用 Aviso 多种海洋测高卫星联合的 $15' \times 15'$ 全球海平面周变化(海平面距平), 扣除 2018 年平均值后, 构造 2018 年 1 月至 2020 年 12 月 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 全球海平面周变化(cm) 球坐标格网时间序列 (共 157 个采样历元), 之后采用 (2.4) 式, 按快速 Fourier 算法, 构建 360 阶海平面变化负荷球谐系数周变化模型 (m) 时间序列, 最后, 再按 (2.8) ~ (2.20) 式的负荷效应球谐综合算法, 计算中国沿海 12 座验潮站处 (纬度 $18^\circ\text{N} \sim 40^\circ\text{N}$) 地面全要素海平面变化负荷效应。

图 2.4~图 2.7 分别为 12 座验潮站处 2018 年 1 月至 2020 年 12 月全球海平面周变化负荷引起的大地水准面周变化时间序列 mm、地面重力周变化时间序列 μGal 、地面大地高周变化时间序列 mm 和扰动重力梯度周变化时间序列 $10\mu\text{E}$ 曲线。

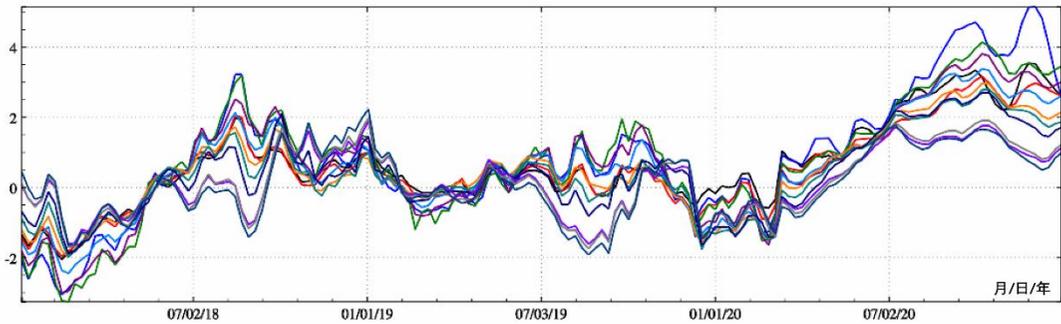


图 2.4 中国沿海 12 座验潮站处海平面变化负荷效应-大地水准面周变化 mm

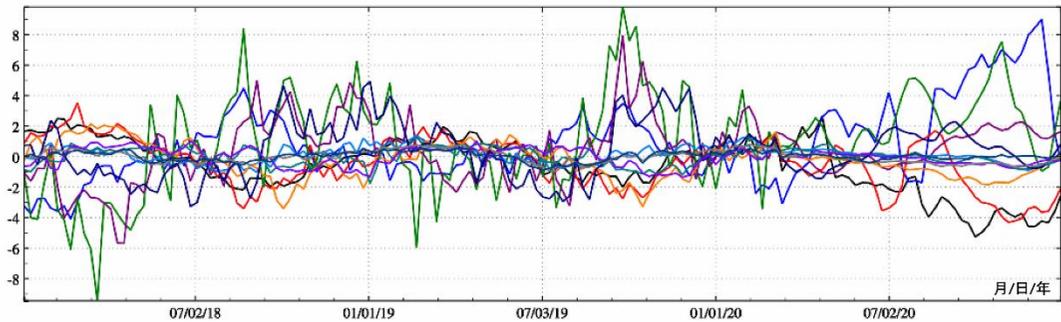


图 2.5 中国沿海 12 座验潮站处海平面变化负荷效应-地面重力周变化 μGal

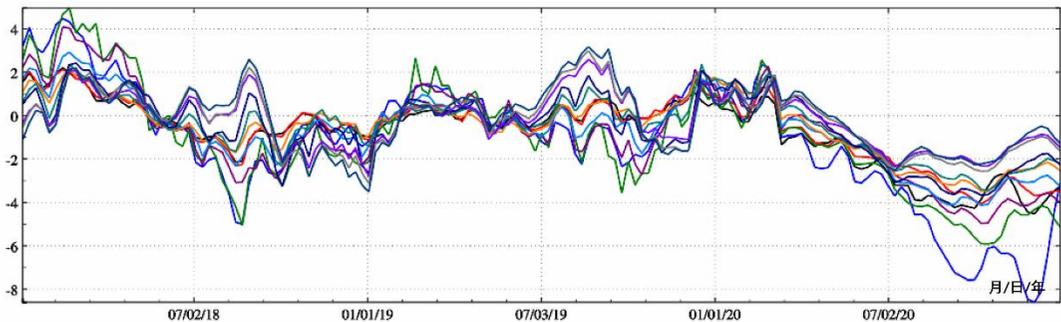


图 2.6 中国沿海 12 座验潮站处海平面变化负荷效应-地面大地高周变化 mm

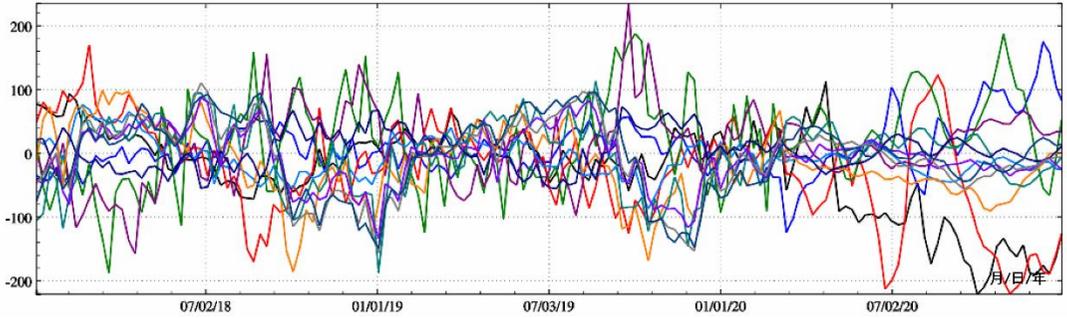


图 2.7 中国沿海 12 座验潮站处海平面变化负荷效应-扰动重力梯度周变化 $10\mu\text{E}$

8.2.5 大气压球谐分析与负荷形变场球谐综合计算

8.2.5.1 大气层密度变化负荷效应与地面大气压负荷效应

大气密度负荷效应原则上要对整个大气层空间密度变化进行三维积分。实际计算时，通常利用地面大气压变化与大气层空间密度变化之间的近似关系，由地面大气压变化，计算大气负荷效应。这种近似在大多数情况下能满足大地测量的精度要求（郭俊义，2010）。

这里推荐一种满足大地测量精度要求的简化计算方案。计算大气负荷间接影响时，假设大气压负荷集中于地面，且 1hPa (mbar) 与 1cm 等效水高负荷的贡献相当，即 $1\text{hPa} = 1\text{cm EWH}$ ，计算点高度 h 取点位相对于地面的高度。在计算重力、径向重力梯度大气压潮负荷直接影响时，假设地面高度 h 处的大气压 P_h 与地面大气压 P_0 存在比例关系：

$$P_h = P_0 \left(1 - \frac{h}{44330}\right)^{5225} \quad (2.36)$$

大气变化负荷效应实际计算时，不必已知当前计算历元时刻计算点处 P_h ，只需知道计算历元时刻 P_h 大气压相对于参考大气压 P_h^* 的差异 $\Delta P_h = P_h - P_h^*$ ，由当前历元时刻地面大气压 P_0 与参考历元时刻地面大气压 P_0^* 的差值，得到计算点处的大气压变化 ΔP_h ：

$$\begin{aligned} \Delta P_h &= P_h - P_h^* = P_0 \left(1 - \frac{h}{44330}\right)^{5225} - P_0^* \left(1 - \frac{h}{44330}\right)^{5225} \\ &\approx \Delta P_0 \left(1 - \frac{h}{44330}\right)^{5225} \end{aligned} \quad (2.37)$$

利用 (2.37) 式，可直接由地面大气压变化 ΔP_0 计算地面高度 h 处的大气压变化 ΔP_h ，而无需直接利用地面点在参考历元时刻的大气压值 P_0^* 。

8.2.5.2 地面大气压变化球谐分析与负荷球谐模型构建

全球地面大气压变化球谐分析流程，与海平面变化球谐分析完全相同，也可采用 (2.4) 式，按快速 Fourier 算法计算。先综合各种地面大气压观测数据，构建球坐标系下全球地面大气压变化格网时间序列（统一移去某一参考历元时刻的地面大气压格网，或某段时期内地面大气压平均值格网），再分别对每一采样历元时刻地面大气压变化格网按 (2.4) 式进行球谐分析，生成全球地面大气压变化负荷球谐系数模型时间序列。地面大气压变化格网的空间分辨率决定了其负荷球谐模型的最大阶数，负荷球谐系数模型时间序列的采样历元时刻与地面大气压变化格网时间序列一一对应。

同理，采用累积迭代球谐分析法，可有效提高全球地面大气压变化负荷球谐系数模型的

逼近水平。

图 2.8 为 ETideLoad4.5 全球地面大气压变化球谐分析程序计算结果，程序输入 $1^\circ \times 1^\circ$ 全球地面大气压变化球坐标格网时间序列，按 (2.4) 式，采用迭代累积逼近方法（迭代残差变化如右下图），构造 180 阶全球地面大气压变化负荷球谐系数模型时间序列（其中，第一个历元时刻全球地面大气压变化负荷球谐系数模型如左下图）。

全球地面大气压变化负荷球谐系数模型（左下图）的头文件分别是地心引力常数 GM ($\times 10^{14} \text{m}^3/\text{s}^2$)，地球长半轴 a (m)，零阶项 $a\Delta C_{00}$ (hPa)，相对误差 θ (%)。 θ 为最终迭代残差标准差与输入原格网标准差的百分比。

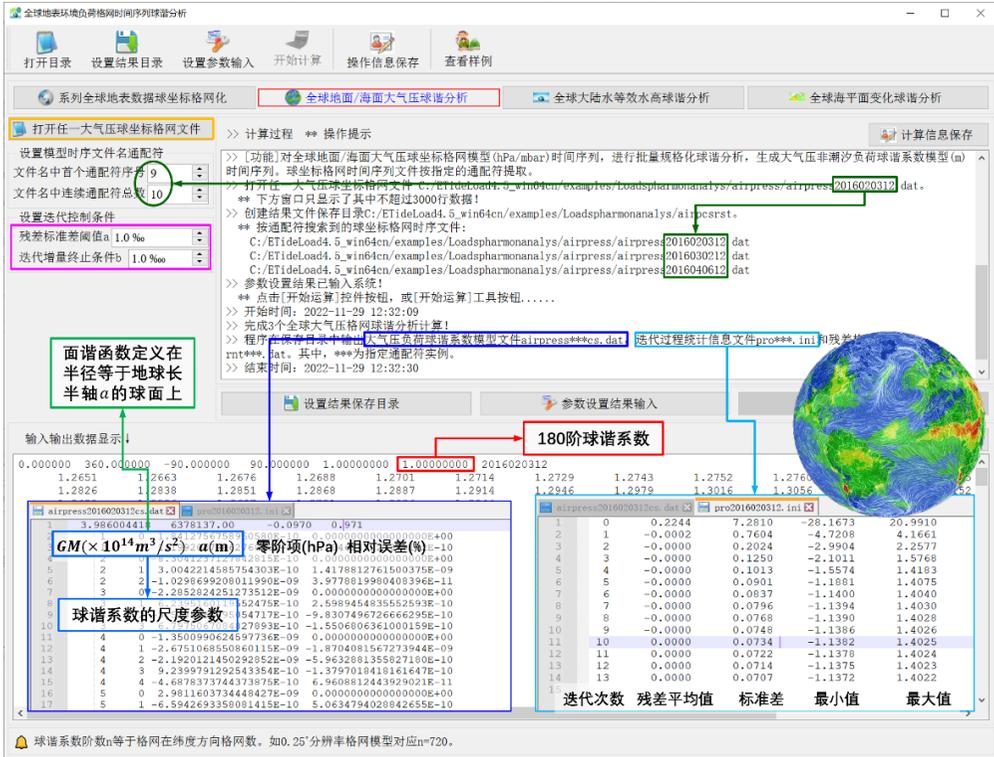


图 2.8 全球地面大气压变化球谐分析与负荷球谐模型构建

零阶项 $a\Delta C_{00}$ 代表地面大气压变化导致的全球大气总质量的变化，在地球大气质量守恒条件下无意义，实际计算一般忽略零阶项。3 个一阶项球谐系数 ($\Delta \bar{C}_{10}^{air}$, $\Delta \bar{C}_{11}^{air}$, $\Delta \bar{S}_{11}^{air}$) 代表全球地面大气压变化引起的地球质心变化。

类似于海平面变化球谐分析，地面大气压变化负荷球谐系数模型的最大阶数与地面大气压变化的实际频谱分布有关，表 2.3 给出某一历元时刻全球地面大气压变化负荷球谐分析结果随格网分辨率（最大阶数）变化情况。

表 2.3 地面大气压变化负荷球谐分析残差随格网分辨率变化情况

输入格网分辨率	最大阶数	零阶项 hPa	一阶项 $\times 10^{-10}$			残差相对误差 %
			$\Delta \bar{C}_{10}^{air}$	$\Delta \bar{C}_{11}^{air}$	$\Delta \bar{S}_{11}^{air}$	

2°×2°	90	-1.7539	0.55043	3.60270	-6.35702	2.707
1°×1°	180	-1.7614	0.54424	3.60695	-8.36343	1.215
0.5°×0.5°	360	-1.7620	0.54251	3.60748	-8.36912	2.043

表 2.3 指出，该历元时刻的全球地面大气压变化中长波占优，采用最大阶数不低于 180 阶的负荷球谐系数模型表示，基本够用。

8.2.5.3 地面大气压负荷效应球谐综合计算

已知全球地面大气压变化负荷球谐系数模型，就可按 (2.8) ~ (2.20) 式的负荷形变球谐综合算法，计算全球地面或地球外部任意空间点的高程异常、地面重力、扰动重力、地倾斜 (SW 南向/西向)、垂线偏差 (SW 南向/西向)、水平位移 (EN 东向/北向)、地面径向 (大地高)、地面正 (常) 高、扰动重力梯度或水平重力梯度的地面大气压变化负荷 (形变) 效应，计算固体地球外部空间 (包括海洋、航空或卫星高度) 的大气压变化负荷重力位、引力 (加速度) 或扰动重力梯度摄动。

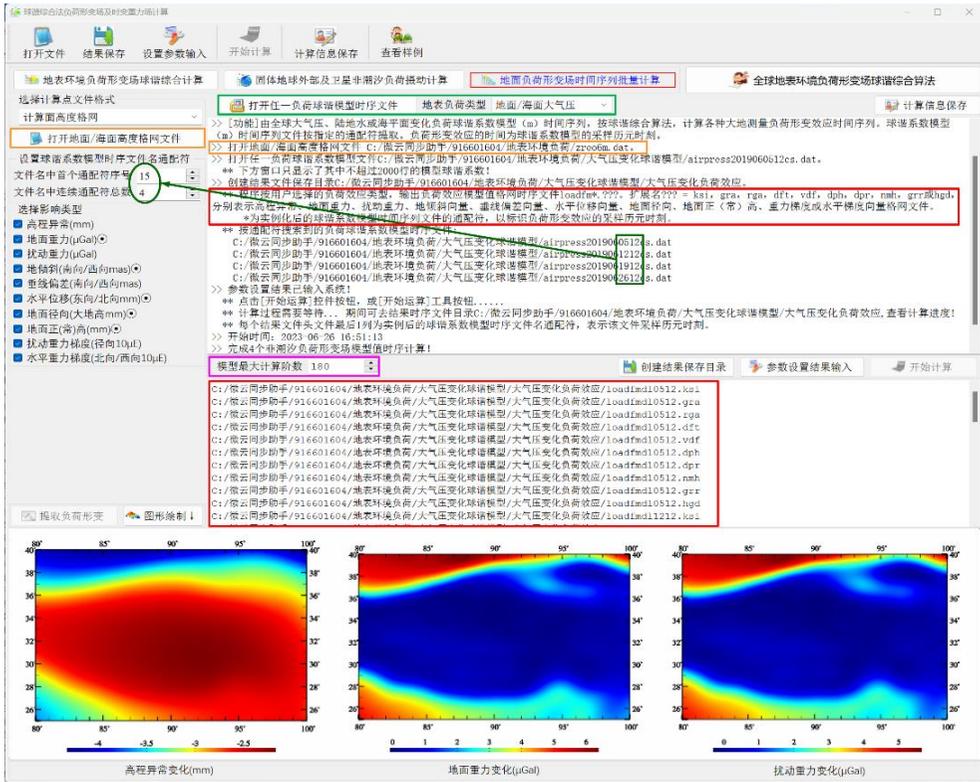


图 2.9 地面全要素大气压变化负荷效应格网时间序列计算

图 2.9 为 ETideLoad4.5 地面大气压变化负荷形变效应球谐综合程序计算结果，程序输入计算区域零值格网 (用于指定计算点位置和范围，零值表示计算点位于地面)，由全球地面大气压变化负荷球谐系数模型时间序列，选择最大计算阶数 180，按 (2.8) ~ (2.20) 式，计算地面大地测量全要素大气压变化负荷形变效应格网时间序列。

由 (2.4) 式按快速 Fourier 算法构建地面大气压变化负荷球谐系数模型时, 已假设地面大气压负荷位于半径等于 a 的球面上, 用该负荷球谐系数模型计算的大气压变化负荷也位于该球面上。对于地面或近地空间计算点, 为严格保证计算点与地面上负荷流动点的三维空间位置关系, 计算点高度应为计算点相对于地面的高度。

图 2.10 为地球卫星海平面变化负荷的扰动位与重力梯度摄动计算结果。

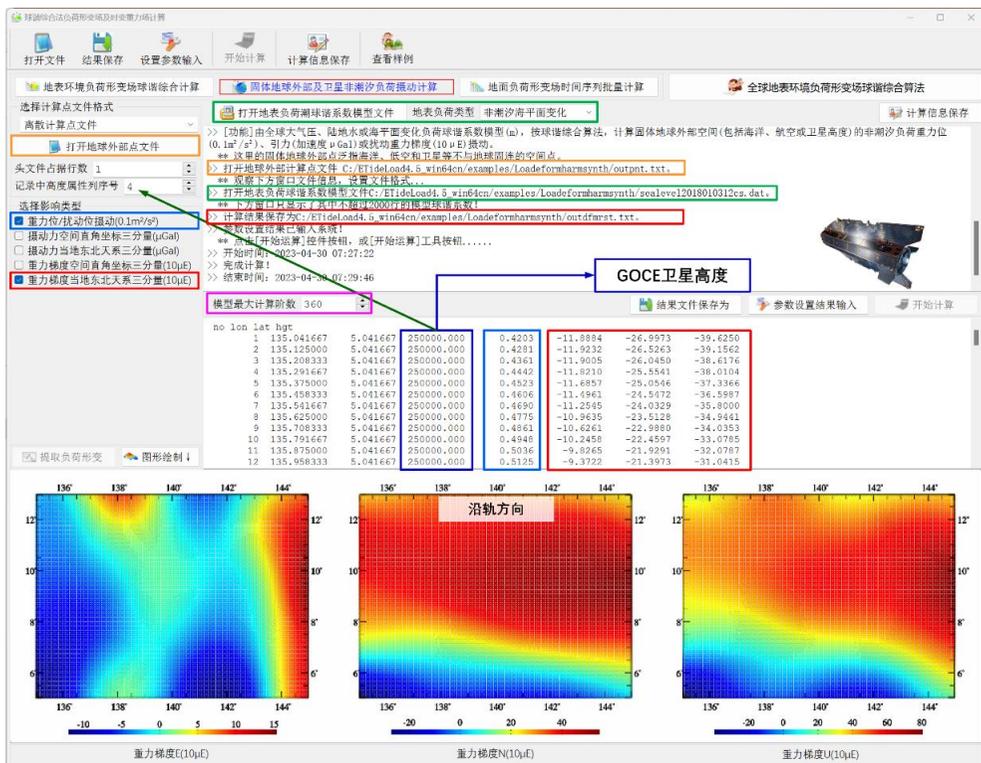


图 2.10 地球卫星地面大气压变化负荷摄动计算

下面利用欧洲中尺度天气预测中心 (ECMWF) 全球再分析数据 ERA-40/ERA-Interim 中的 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 地面/海面大气压日变化模型, 扣除 2018 年平均值后, 构造 2018 年 1 月至 2020 年 12 月 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 全球地面/海面大气压周变化 (hPa) 球坐标格网时间序列 (共 157 个采样历元), 采用 (2.4) 式, 按快速 Fourier 算法, 构建 180 阶全球大气压变化负荷球谐系数周变化 (hPa) 模型时间序列, 再按 (2.8) ~ (2.20) 式的负荷形变球谐综合算法, 计算中国大陆地区 14 座 CORS 站处地面全要素大气压变化负荷效应。

图 2.11~图 2.14 分别为中国大陆地区 14 座 CORS 站处 2018 年 1 月至 2020 年 12 月全球地面大气压周变化负荷引起的大地水准面周变化时间序列 mm、地面重力周变化时间序列 μGal 、地面大地高周变化时间序列 mm 和扰动重力梯度周变化时间序列 $10\mu\text{E}$ 曲线。

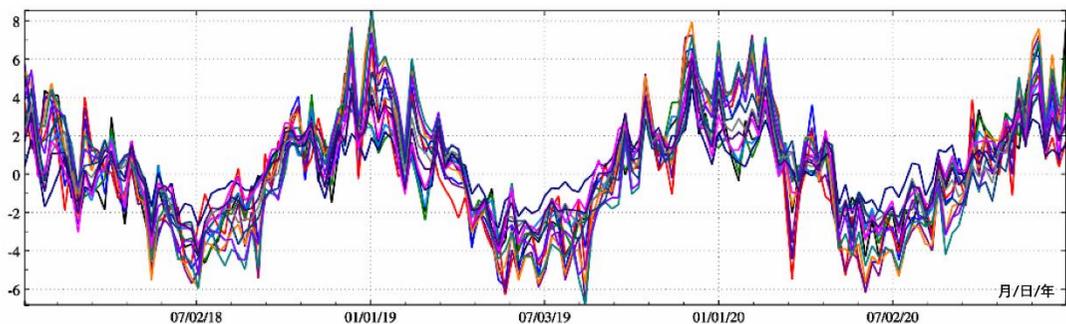


图 2.11 中国大陆地面大气压变化负荷形变 (180 阶) -大地水准面变化 mm

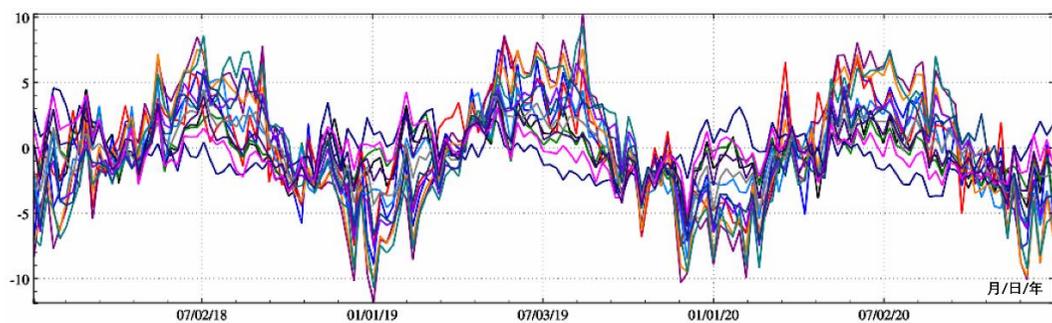


图 2.12 中国大陆地面大气压变化负荷形变 (180 阶) -地面重力变化 μGal

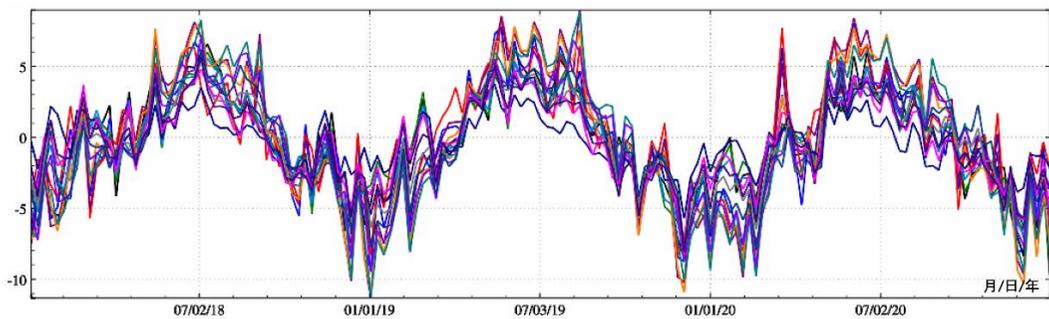


图 2.13 中国大陆地面大气压变化负荷形变 (180 阶) -地面大地高变化 mm

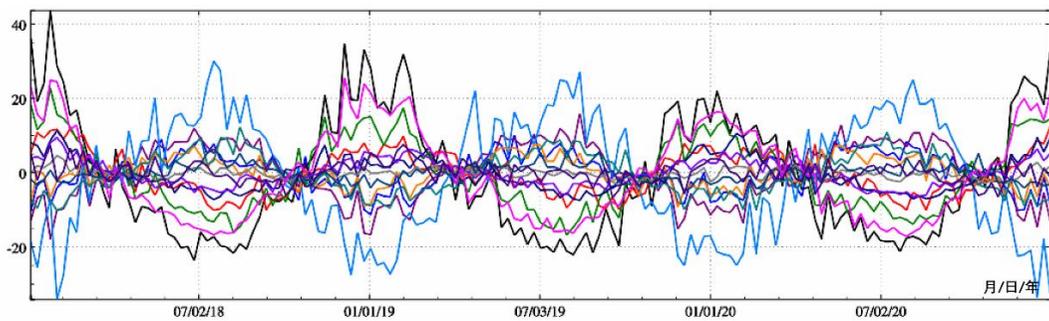


图 2.14 中国大陆地面大气压变化负荷形变 (180 阶) -扰动重力梯度变化 $10\mu\text{E}$

8.2.6 陆地水球谐分析与负荷形变场球谐综合计算

8.2.6.1 陆地水变化球谐分析与负荷球谐模型构建

全球陆地水变化球谐分析与全球海平面变化球谐分析方法完全相同。图 2.15 为 ETideLoad4.5 全球陆地水变化球谐分析程序计算结果，程序输入 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 全球陆地水变化球坐标格网时间序列（其中，第一个历元时刻陆地水变化格网如右中图，海洋置零），按 (2.4) 式，采用迭代累积逼近方法（迭代残差变化如右下图），构造 720 阶全球陆地水变化负荷球谐系数模型时间序列（其中，最后一个历元陆地水变化负荷球谐系数模型如左下图）。

陆地水变化负荷球谐系数模型（左下图）的头文件分别是地心引力常数 GM ($\times 10^{14} m^3/s^2$)，地球长半轴 a (m)，零阶项 $a\Delta C_{00}$ (cm)，相对误差 θ (%)。 θ 为最终迭代残差标准差与输入原格网标准差的百分比。球谐系数最大阶数 n 等于全球地表负荷格网在纬度方向格网数，本例输入 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 分辨率格网模型，对应最大阶数 $n = 720$ 。

零阶项 $a\Delta C_{00}$ 代表全球陆地水变化导致的地球总质量的变化，在地球质量守恒条件下无意义，实际计算一般忽略零阶项。3 个一阶项球谐系数 ($\Delta C_{10}, \Delta C_{11}, \Delta S_{11}$) 代表全球陆地水变化引起的地球质心变化。

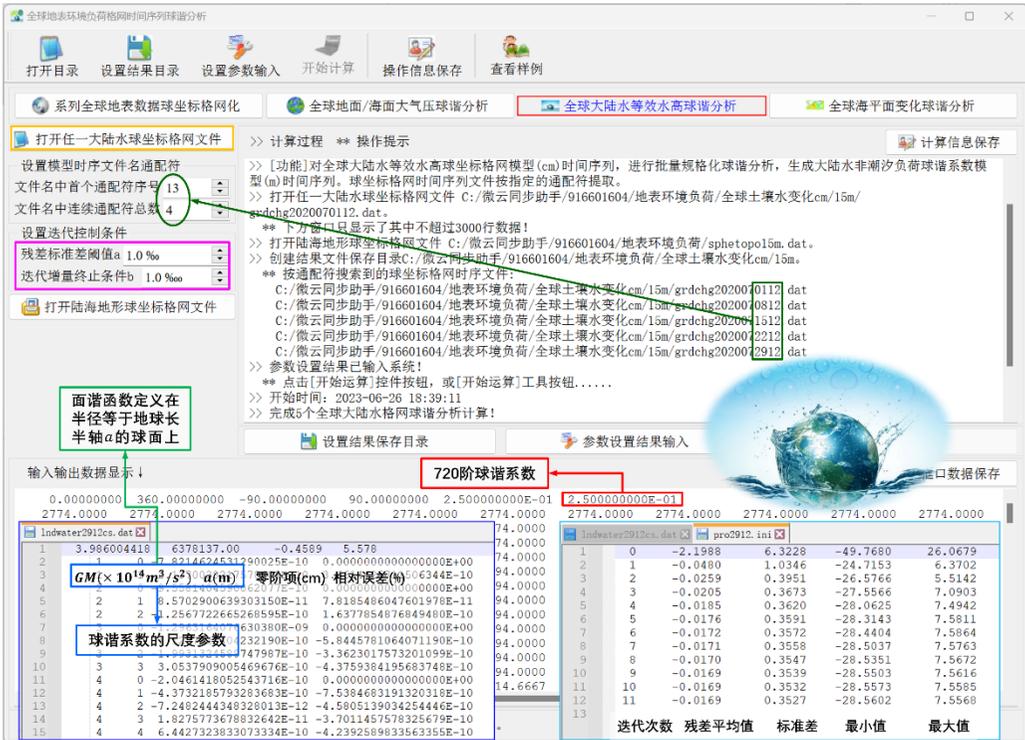


图 2.15 全球陆地水变化球谐分析与负荷球谐模型构建

表 2.4 给出某一历元时刻全球陆地水变化负荷球谐分析结果随格网分辨率（最大阶数）变化情况。

表 2.4 陆地水变化负荷球谐分析残差随格网分辨率变化情况

输入格网分辨率	最大阶数	零阶项 cm	一阶项 $\times 10^{-10}$			残差相对误差%
			$\Delta\bar{C}_{10}^{lnd}$	$\Delta\bar{C}_{11}^{lnd}$	$\Delta\bar{S}_{11}^{lnd}$	
30'×30'	360	0.3242	5.46047	1.49947	0.52091	5.851
15'×15'	720	0.3207	5.32556	1.51216	0.50261	4.291
9'×9'	1200	0.3236	5.43533	1.50154	0.51493	3.094

表 2.4 指出，该历元时刻的全球陆地水变化短波成分较为明显，其负荷球谐系数模型的适宜最大阶数可选择 720 阶。

8.2.6.2 陆地水变化负荷效应球谐综合计算

已知全球陆地水变化负荷球谐系数模型，可按 (2.8) ~ (2.20) 式的负荷形变球谐综合算法，计算全球地面或地球外部任意空间点的高程异常、地面重力、扰动重力、地倾斜 (SW 南向/西向)、垂线偏差 (SW 南向/西向)、水平位移 (EN 东向/北向)、地面径向 (大地高)、地面正 (常) 高、扰动重力梯度或水平重力梯度的陆地水变化负荷形变) 效应。

图 2.16 为 ETideLoad4.5 陆地水变化负荷形变效应球谐综合程序计算结果，程序输入计算区域零值格网 (用于指定计算点位置和范围，零值表示计算点位于地面)，由全球陆地水变化负荷球谐系数模型，选择最大计算阶数 360，按 (2.8) ~ (2.20) 式，计算地面高程异常、地面重力和地面大地高陆地水变化负荷形变效应。

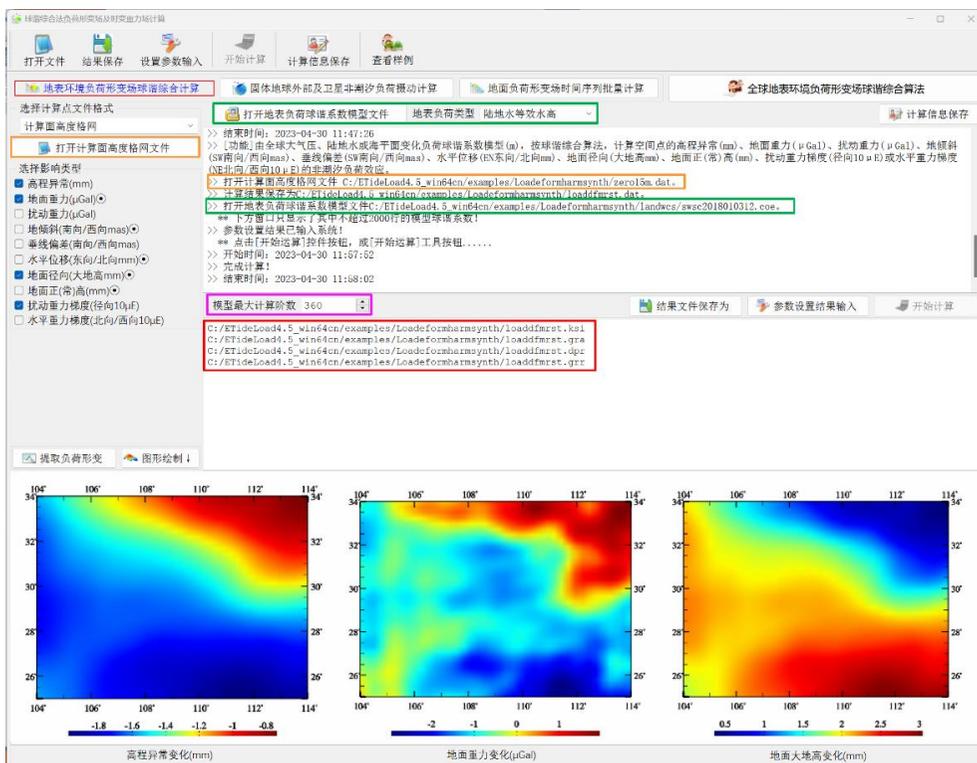


图 2.16 陆地水变化负荷效应球谐综合计算

由 (2.4) 式按快速 Fourier 算法构建陆地水变化负荷球谐系数模型时, 已假设陆地水负荷位于半径等于 a 的球面上, 用该负荷球谐系数模型计算的陆地水变化负荷也位于该球面上。对于地面或近地空间计算点, 为严格保证计算点与地面上负荷流动点的三维空间位置关系, 计算点高度应为计算点相对于地面的高度。

这里利用美国宇航局哥达航空中心和国家环境预报中心(NCEP)的全球水文模式 GLDAS 数据, 扣除 2018 年平均值后, 构造 2018 年 1 月至 2020 年 9 月 $15' \times 15'$ 全球陆地水周变化 (cm) 球坐标格网时间序列 (共 43 个采样历元), 采用 (2.4) 式, 构建 720 阶陆地水变化负荷球谐系数周变化 (m) 模型时间序列, 再按 (2.8) ~ (2.20) 式的球谐综合算法, 计算中国大陆地区 14 座 CORS 站处地面全要素陆地水变化负荷效应。

图 2.17~图 2.20 分别为中国大陆地区 14 座 CORS 站处 2018 年 1 月至 2020 年 9 月全球陆地水周变化负荷引起的大地水准面周变化时间序列 mm、地面重力周变化时间序列 μGal 、地面大地高周变化时间序列 mm 和扰动重力梯度周变化时间序列 $10\mu\text{E}$ 曲线。

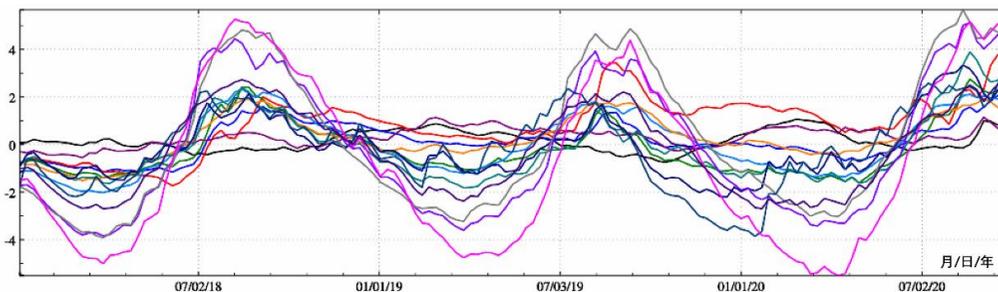


图 2.17 中国大陆陆地水变化负荷形变 (720 阶) -大地水准面变化 mm

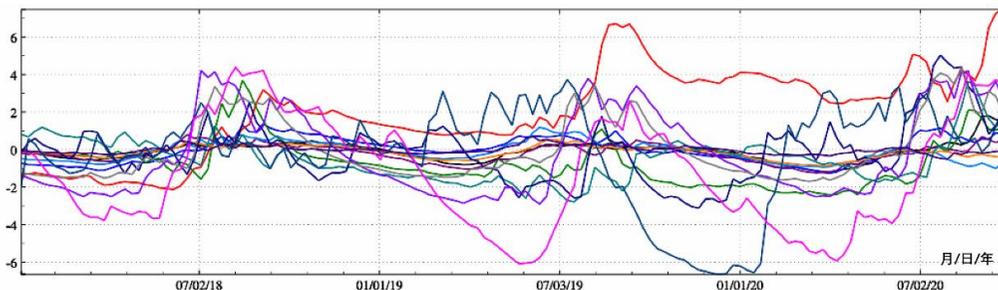


图 2.18 中国大陆土壤水变化负荷形变 (720 阶) -地面重力变化 μGal

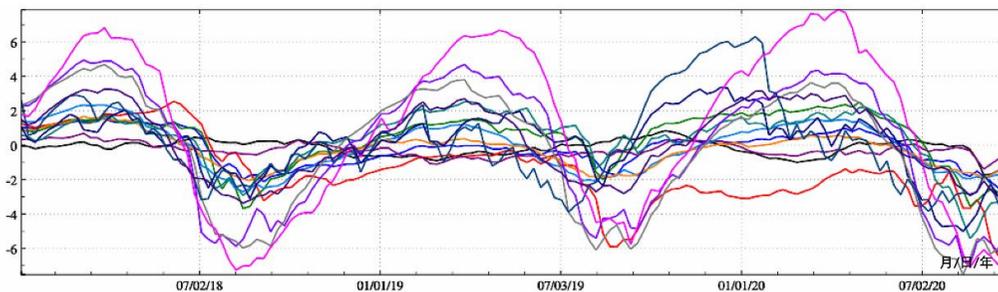


图 2.19 中国大陆陆地水变化负荷形变 (720 阶) -地面大地高变化 mm

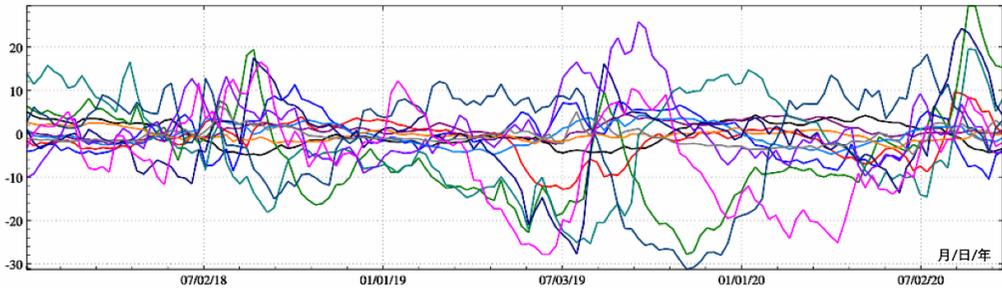


图 2.20 中国大陆陆地水变化负荷形变 (720 阶) -扰动重力梯度变化 $10\mu\text{E}$

这里的陆地水，包括了 4m 以浅土壤水与湿地、植被、冰川雪山水含量，但不包括河流水和地下水。

8.2.4~8.2.6 节的计算案例显示，全球海平面、大气压或陆地水非潮汐负荷变化引起的地球质心形变可达 1cm 以上，高精度大地测量需要考虑。

由于等效水高球谐展开及其负荷效应球谐展开都是线性的，因此，可以直接将海平面变化与陆地水变化格网相加后，再进行球谐分析，并按球谐综合方法计算地面或地球外部总负荷形变效应；也可以将海平面变化负荷球谐系数模型与陆地水变化负荷球谐系数模型直接相加，零阶项也相加，再按球谐综合方法计算地面或地球外部总负荷形变效应；分别按 8.2.5、8.2.4 节流程计算海平面变化和陆地水变化负荷形变效应后，再相加得到地面或地球外部总负荷形变效应。上述三种情况下计算的总负荷形变效应相等。

利用全球海平面、地面大气压、陆地水变化监测数据，确定地表环境负荷引起的（非潮汐）时变地球重力场，包括重力位系数和地面及地球外部全要素扰动重力场元的非潮汐负荷效应，可标定重力卫星关键测量载荷的多种参数，有效提升和检核卫星重力场时变监测的质量、可靠性、精度与时变重力场监测水平。

8.3 负荷格林函数与负荷效应空域积分算法

负荷格林函数定义为单位点质量负荷变化 (kg/m^2) 的响应函数，而大地测量要素的地面负荷效应，等于负荷格林函数与地面负荷面密度 $\sigma_w (= \rho_w h_w)$ 在全球地面上的卷积。一般地，类似于地球重力场理论中的 Stokes 积分公式，地面计算点处 (θ, λ) ，任意类型大地测量要素的负荷形变效应 $F(\theta, \lambda)$ ，可用球近似下负荷格林函数积分表示为：

$$F(\theta, \lambda) = R^2 \rho_w \iint_{\sigma} h_w G(\psi) d\sigma \quad (3.1)$$

式中： σ 为单位球面， R 为地球平均半径； ψ 为地面负荷流动面元 $d\sigma$ 到地面计算点 (θ, λ) 的球面角距， $G(\psi)$ 是以球面角距 ψ 为自变量的负荷格林函数，其形式与计算类型有关。将负荷格林函数积分 $F(\theta, \lambda)$ 拆分成两个部分，第一部分为负荷的直接影响，第二部分为负荷的间接影响。

$$F(\theta, \lambda) = F^d(\theta, \lambda) + R^2 \rho_w \iint_{\sigma} h_w G^i(\psi) d\sigma \quad (3.2)$$

式中： (θ, λ) 为地面计算点的球坐标； $F^d(\theta, \lambda)$ 为地面计算点处负荷效应的直接影响，可由负荷等效水高按严密积分计算； $G^i(\psi)$ 称为负荷间接影响格林函数。

8.3.1 地面要素负荷直接影响积分

(1) 地面重力位直接影响积分

已知地面负荷等效水高变化 h_w ，则负荷变化对计算点 (r, θ, λ) 处的重力位直接影响 V^d ，可按万有引力公式计算

$$V^d(r, \theta, \lambda) = G\rho_w \iint_S \frac{h_w}{L} dS, \quad L = \sqrt{r^2 + r'^2 - 2rr' \cos\psi} \quad (3.3)$$

式中： L 为计算点 (r, θ, λ) 与地面负荷流动点 (r', θ', λ') 之间的空间距离； $dS = R^2 d\sigma$ 为地面负荷流动积分面元； ψ 为地面流动点 (r', θ', λ') 到计算点 (r, θ, λ) 的球面角距，有

$$\begin{aligned} \cos\psi &= \cos\theta\cos\theta' + \sin\theta\sin\theta'\cos(\lambda' - \lambda), \\ \sin\psi &= \sin\theta\cos\theta' + \cos\theta\sin\theta'\cos(\lambda' - \lambda) \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \sin\psi\cos\alpha &= \sin\theta\cos\theta' - \cos\theta\sin\theta'\cos(\lambda' - \lambda), \\ \sin\psi\sin\alpha &= \sin\theta'\sin(\lambda' - \lambda) \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial\psi}{\partial\theta} = -\frac{\partial\psi}{\partial\varphi} = \cos\alpha, \quad \frac{\partial\psi}{\partial\lambda} = -\sin\alpha\sin\theta \quad (3.6)$$

其中， α 为 ψ 的大地方位角。顾及 $d\sigma = \psi d\psi d\alpha$ ，在地面，当计算点与流动点重合时，有

$$L = r\psi, \quad r - r'\cos\psi = r\psi^2/2 \quad (3.7)$$

$$A = dS = r^2 \int_{\alpha=0}^{2\pi} \int_0^{\psi_0} \psi d\psi d\alpha = \pi r^2 \psi_0^2 \rightarrow \psi_0 = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (3.8)$$

式中： $A = dS$ 为地面负荷所在的流动积分面元的面积。此时，积分 (3.3) 式在地面计算点处奇异，由 (3.7) 和 (3.8) 式，可得积分奇异值为：

$$V_d^0(r, \theta, \lambda) = G\rho_w r^2 \int_{\alpha=0}^{2\pi} \int_0^{\psi_0} \frac{h_w}{r\psi} \psi d\psi d\alpha = 2\pi G\rho_w h_w r \psi_0 \quad (3.9)$$

(2) 地面扰动重力直接影响积分

按照扰动重力定义，由 (3.3) 式得地面及地球外部计算点 (r, θ, λ) 处的扰动重力直接影响为：

$$\delta g^d(r, \theta, \lambda) = -\frac{\partial V^d(r, \theta, \lambda)}{\partial r} = -G\rho_w \iint_S h_w \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{L} \right) dS = G\rho_w \iint_S h_w \frac{r-r'\cos\psi}{L^3} dS \quad (3.10)$$

在地面上，当计算点与流动点重合时，积分 (3.10) 奇异，该积分面元处的奇异值为：

$$\delta g_0^d(r, \theta, \lambda) = 2\pi G\rho_w h_w \int_0^{\psi_0} \frac{\psi^2/2}{\psi^3} \psi d\psi = \pi G\rho_w h_w \psi_0 \quad (3.11)$$

(3) 地面垂线偏差直接影响积分

根据垂线偏差定义，由 (3.3) 式得，计算点 (r, θ, λ) 处的垂线偏差直接影响

$$\Theta^d(r, \theta, \lambda) = \frac{1}{\gamma r} \frac{\partial V^d(r, \theta, \lambda)}{\partial \psi} = \frac{G\rho_w}{\gamma r} \iint_S h_w \frac{\partial}{\partial \psi} \left(\frac{1}{L} \right) dS = -\frac{G\rho_w}{\gamma} \iint_S h_w r' \frac{\sin\psi}{L^3} dS \quad (3.12)$$

$$\xi^d(r, \theta, \lambda) = \Theta^d(r, \theta, \lambda) \frac{\partial \psi}{\partial \theta} = -\frac{G\rho_w}{\gamma} \iint_S h_w r' \frac{\sin\psi}{L^3} \cos\alpha dS,$$

$$\eta^d(r, \theta, \lambda) = -\Theta^d(r, \theta, \lambda) \frac{\partial \psi}{\partial \lambda} = -\frac{G\rho_w}{\gamma} \sin\theta \iint_S h_w r' \frac{\sin\psi}{L^3} \sin\alpha dS \quad (3.13)$$

式中： $\Theta^d(r, \theta, \lambda)$ 为计算点处总垂线偏差的直接影响。

8.3.2 负荷间接影响格林函数积分

将负荷球谐系数 $\{\Delta \bar{C}_{nm}^w, \Delta \bar{S}_{nm}^w\}$ 代入式 (2.7)，可得重力位负荷效应间接影响 $\Delta V^i(r, \theta, \lambda)$ 为：

$$\Delta V^i = \frac{GM}{r} \frac{3\rho_w}{\rho_e} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{k'_n}{2n+1} \left(\frac{a}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm}^w \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm}^w \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \quad (3.14)$$

令 $\mathbf{e} = (\theta, \lambda)$ 为单位球面上的点坐标, 将 (3.14) 式用规格化面球基函数 $\{\bar{Y}_{nm}(\mathbf{e}) = \bar{Y}_{nm}(\theta, \lambda)\}$ 的线性组合表示为:

$$\Delta V^i(r, \theta, \lambda) = \frac{GM}{r} \frac{3\rho_w}{\rho_e} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{k'_n}{2n+1} \left(\frac{a}{r}\right)^n \sum_{m=-n}^n \bar{F}_{nm}^w \bar{Y}_{nm}(\mathbf{e}) \quad (3.15)$$

其中: $\bar{F}_{nm}^w = \Delta \bar{C}_{nm}^w, m \geq 0$; $\bar{F}_{nm}^w = \Delta \bar{S}_{n|m|}^w, m < 0$ 。令

$$Y_n^w(\mathbf{e}) = \sum_{m=-n}^n \bar{F}_{nm}^w \bar{Y}_{nm}(\mathbf{e}) \quad (3.16)$$

则 (3.15) 式可表示为:

$$\Delta V^i(r, \theta, \lambda) = \frac{GM}{r} \frac{3\rho_w}{\rho_e} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{k'_n}{2n+1} \left(\frac{a}{r}\right)^n Y_n^w(\mathbf{e}) \quad (3.17)$$

将地面负荷等效水高球谐展开式 (2.3) 也用规格化面球基函数 $\{\bar{Y}_{nm}(\mathbf{e}) = \bar{Y}_{nm}(\theta, \lambda)\}$ 的线性组合表示为:

$$\begin{aligned} h_w(r \approx R, \theta, \lambda) &= h_w(\mathbf{e}) = R \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{a}{R}\right)^n \sum_{m=-n}^n \bar{F}_{nm}^w \bar{Y}_{nm}(\mathbf{e}) \\ &= R \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n \bar{F}_{nm}^w \bar{Y}_{nm}(\mathbf{e}) = a \sum_{n=1}^{\infty} Y_n^w(\mathbf{e}) \end{aligned} \quad (3.18)$$

依据球函数展开理论, 由 (3.17) 式得:

$$Y_n^w(\mathbf{e}) = \frac{2n+1}{4\pi a} \iint_{\sigma} h_w(\mathbf{e}') P_n(\psi) d\sigma \quad (3.19)$$

式中: ψ 为球面流动面元 \mathbf{e}' 到计算点 \mathbf{e} 的球面角距。

顾及 $dS = R^2 d\sigma$, 将 (3.19) 代入 (3.18) 式, 并交换求和与积分号, 得:

$$\begin{aligned} \Delta V^i(r, \theta, \lambda) &= \frac{1}{R^2} \iint_S \rho_w h_w(\mathbf{e}') \frac{GM}{4\pi r a \rho_e} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{a}{r}\right)^n k'_n P_n(\psi) dS \\ &= \rho_w \iint_S h_w(\mathbf{e}') G_V^i(\psi) dS \end{aligned} \quad (3.20)$$

其中,

$$G_V^i(\psi) = \frac{GM}{4\pi R^2 r a \rho_e} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{a}{r}\right)^n k'_n P_n(\psi) \quad (3.21)$$

即为重力位负荷间接影响格林函数的一般形式。

当计算点也位于地面, 即 $r \approx a \approx R$ (R 为地球平均半径), 顾及地球总质量 $M = \frac{4\pi}{3} R^3 \rho_e$, 则 (3.21) 式简化为:

$$G_V^i(\psi) = \frac{GM}{4\pi R^4 \rho_e} \sum_{n=0}^{\infty} k'_n P_n(\psi) = \frac{G}{R} \sum_{n=1}^{\infty} k'_n P_n(\psi) \quad (3.22)$$

式 (3.22) 为实用的地面重力位负荷间接影响格林函数, 表示地表单位点质量负荷 (kg/m²) 对地面重力位的间接影响。

(1) 类似地, 可得地面高程异常负荷间接影响格林函数为:

$$G_{\zeta}^i(\psi) = \frac{R}{M} \sum_{n=0}^{\infty} k'_n P_n(\psi) \quad (3.23)$$

(2) 地面重力负荷间接影响格林函数 \odot

$$G_g^i(\psi) = \frac{g_0}{M} \sum_{n=0}^{\infty} (n+1) \left(\frac{2}{n} h'_n - \frac{n+1}{n} k'_n\right) P_n(\psi) \quad (3.24)$$

式中: $g_0 = GM/R^2$ 。

(3) 扰动重力负荷间接影响格林函数

$$G_{\delta g}^i(\psi) = -\frac{g_0}{M} \sum_{n=0}^{\infty} (n+1) k'_n P_n(\psi) \quad (3.25)$$

(4) 地倾斜负荷间接影响格林函数 \odot

$$G_t^i(\psi) = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{\infty} (k'_n - h'_n) \frac{\partial P_n(\psi)}{\partial \psi} \quad (3.26)$$

(5) 地面垂线偏差负荷间接影响格林函数

$$G_{\theta}^i(\psi) = -\frac{1}{M} \sum_{n=0}^{\infty} k'_n \frac{\partial P_n(\psi)}{\partial \psi} \quad (3.27)$$

(6) 地面站点水平位移格林函数(⊙)

$$G_l^i(\psi) = \frac{R}{M} \sum_{n=0}^{\infty} l'_n \frac{\partial P_n(\psi)}{\partial \psi} \quad (3.28)$$

(7) 地面站点径向位移格林函数(⊙)

$$G_r^i(\psi) = \frac{R}{M} \sum_{n=0}^{\infty} h'_n \frac{\partial P_n(\psi)}{\partial \psi} \quad (3.29)$$

(8) 扰动重力梯度负荷间接影响格林函数

$$G_{V_{rr}}^i = \frac{g_0}{RM} \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)(n+2) k'_n P_n(\psi) \quad (3.30)$$

(9) 水平重力梯度负荷间接影响格林函数

$$G_{V_{ss}}^i(\psi) = \frac{g_0}{RM} \sum_{n=0}^{\infty} k'_n \frac{\partial^2 P_n(\psi)}{\partial \psi^2} \quad (3.31)$$

郭俊义(2001)进一步导出了地面点负荷格林函数的渐进公式,以抑制高阶负荷格林函数的振荡性。取其中负荷间接影响格林函数如下:

$$G_{\zeta}^i(\psi) = \frac{R}{M} \frac{k'_{\infty}}{2\sin\frac{\psi}{2}} + \frac{R}{M} \sum_{n=0}^{\infty} (k'_n - k'_{\infty}) P_n(\psi) \quad (3.32)$$

$$G_g^i(\psi) = -\frac{g_0}{M} \frac{k'_{\infty} - 2h'_{\infty}}{2\sin\frac{\psi}{2}} - \frac{g_0}{M} \sum_{n=0}^{\infty} [(n+1)k'_n - k'_{\infty} - 2(h'_n - h'_{\infty})] P_n(\psi) \quad (3.33)$$

$$G_{\delta g}^i(\psi) = -\frac{g_0}{M} \frac{k'_{\infty}}{2\sin\frac{\psi}{2}} - \frac{g_0}{M} \sum_{n=0}^{\infty} [(n+1)k'_n - k'_{\infty}] P_n(\psi) \quad (3.34)$$

$$G_t^i(\psi) = -\frac{1}{M} \frac{h'_{\infty} \cos\frac{\psi}{2}}{4\sin^2\frac{\psi}{2}} + \frac{1}{M} \frac{k'_{\infty} \cos\frac{\psi}{2} (1+2\sin\frac{\psi}{2})}{2\sin\frac{\psi}{2} (1+\sin\frac{\psi}{2})} - \frac{1}{M} \sum_{n=1}^{\infty} \left(k'_n - \frac{k'_{\infty}}{n} - h'_n + h'_{\infty} \right) \frac{\partial P_n(\psi)}{\partial \psi} \quad (3.35)$$

$$G_{\theta}^i(\psi) = \frac{1}{M} \frac{k'_{\infty} \cos\frac{\psi}{2} (1+2\sin\frac{\psi}{2})}{2\sin\frac{\psi}{2} (1+\sin\frac{\psi}{2})} - \frac{1}{M} \sum_{n=1}^{\infty} \left(k'_n - \frac{k'_{\infty}}{n} \right) \frac{\partial P_n(\psi)}{\partial \psi} \quad (3.36)$$

$$G_l^i(\psi) = -\frac{R}{M} \frac{l'_{\infty} \cos\frac{\psi}{2} (1+2\sin\frac{\psi}{2})}{2\sin\frac{\psi}{2} (1+\sin\frac{\psi}{2})} + \frac{R}{M} \sum_{n=1}^{\infty} \left(l'_n - \frac{l'_{\infty}}{n} \right) \frac{\partial P_n(\psi)}{\partial \psi} \quad (3.37)$$

$$G_r^i(\psi) = \frac{R}{M} \frac{h'_{\infty}}{2\sin\frac{\psi}{2}} + \frac{R}{M} \sum_{n=0}^{\infty} (h'_n - h'_{\infty}) P_n(\psi) \quad (3.38)$$

各种大地测量要素(观测量或参数)的负荷形变效应,等于其负荷直接影响积分与负荷间接影响格林函数积分之和。这里将负荷直接影响积分与负荷间接影响格林函数积分的组合,仍统称为负荷格林函数积分。

令 $G^i(l) = 2R\sin\frac{\psi}{2} G^i(\psi) = lG^i(\psi)$, 将负荷勒夫数代入式(3.23)~(3.31),求得地表单位点质量负荷 $q_w = 1$ (kg/m²)作用下,各种地面大地测量要素负荷间接影响格林函数,及负荷间接影响积分距离变化值,如表3.1。

表 3.1 地面站点的负荷间接影响格林函数取值

$l(\text{km})$	$G_{\zeta}^i \times 10^{-13}$	$G_g^i \times 10^{-17}$	$G_{\delta g}^i \times 10^{-18}$	$G_t^i \times 10^{-14}$	$G_{\theta}^i \times 10^{-19}$	$G_l^i \times 10^{-12}$	$G_r^i \times 10^{-11}$	$G_{V_{rr}}^i \times 10^{-15}$	$G_{V_{ss}}^i \times 10^{-15}$
----------------	-------------------------------	-------------------------	----------------------------------	-------------------------	--------------------------------	-------------------------	-------------------------	--------------------------------	--------------------------------

0.1	-0.0249	-11.3315	15.8795	42.2955	-2.1192	-0.8369	-42.1264	-40.7525	20.0337
0.2	-0.0439	-9.8972	29.6981	21.1510	-8.0632	-3.1842	-41.9553	-73.6102	34.1831
0.3	-0.0625	-8.8334	39.7946	14.1058	-16.6878	-6.5901	-41.7788	-92.3770	37.9744
0.4	-0.0804	-8.2348	45.2182	10.5853	-26.3601	-10.4097	-41.5956	-93.8712	29.4189
0.5	-0.0975	-8.1095	45.8894	8.4739	-35.3064	-13.9425	-41.4057	-78.5612	9.4993
0.6	-0.1139	-8.3807	42.5773	7.0657	-41.9834	-16.5790	-41.2101	-50.3867	-18.0490
0.7	-0.1294	-8.9073	36.7009	6.0583	-45.3905	-17.9241	-41.0109	-15.8142	-47.6055
0.8	-0.1444	-9.5157	30.0034	5.3006	-45.2558	-17.8704	-40.8109	17.6468	-72.9744
1.0	-0.1727	-10.3454	20.4992	4.2343	-36.8762	-14.5596	-40.4173	55.8494	-91.9157
1.2	-0.1998	-10.1321	21.4749	3.5210	-26.2416	-10.3574	-40.0402	39.6641	-61.0517
1.4	-0.2261	-9.1669	30.0077	3.0153	-22.8895	-9.0304	-39.6752	-8.4433	-7.5471
1.6	-0.2518	-8.3519	37.0350	2.6419	-28.6871	-11.3158	-39.3091	-42.4515	24.9158
2.0	-0.3003	-8.9633	28.5858	2.1198	-40.5309	-15.9830	-38.5476	4.3817	-24.2022
2.5	-0.3570	-9.1242	24.1119	1.6843	-25.9871	-10.2232	-37.6133	17.0612	-27.2278
3.0	-0.4112	-7.9718	32.8632	1.4080	-35.2424	-13.8576	-36.7093	-28.7167	17.2271
3.5	-0.4621	-8.9437	20.3140	1.2022	-32.5321	-12.7629	-35.7866	31.1746	-40.2655
4.0	-0.5112	-7.7218	29.8481	1.0465	-28.2814	-11.0562	-34.9109	-22.8507	15.9355
5.0	-0.6036	-7.8959	22.7679	0.8291	-26.3578	-10.2305	-33.1702	5.9459	-11.1019
6.0	-0.6903	-7.8527	18.1028	0.6858	-29.9324	-11.5649	-31.5082	23.6048	-28.4842
7.0	-0.7725	-7.2943	18.8748	0.5827	-33.7803	-12.9988	-29.9389	13.5281	-18.2480
8.0	-0.8510	-6.5206	22.0921	0.5013	-33.1161	-12.6452	-28.4652	-9.3638	5.3150
10.0	-0.9991	-6.0125	18.9937	0.3784	-24.7530	-9.1540	-25.7982	-5.3162	2.8950
12.0	-1.1387	-5.9045	13.1167	0.2999	-27.9718	-10.2454	-23.5296	16.1892	-18.4692
14.0	-1.2726	-4.9048	17.3988	0.2398	-26.5722	-9.5373	-21.6664	-13.0654	11.2087
16.0	-1.4019	-4.8896	12.8941	0.1911	-21.0009	-7.2164	-20.1480	4.3047	-5.5888
20.0	-1.6520	-4.0437	14.8205	0.1306	-20.9145	-7.0582	-18.0179	-12.2601	11.2369
25.0	-1.9534	-3.6904	13.7959	0.0872	-19.8016	-6.6584	-16.5317	-10.0949	9.3198
30.0	-2.2455	-3.5544	12.9067	0.0638	-18.9897	-6.5141	-15.7982	-5.5325	4.9129
35.0	-2.5296	-3.5250	12.0811	0.0505	-18.1729	-6.4230	-15.4331	-0.0753	-0.4331
40.0	-2.8059	-3.5272	11.4345	0.0423	-17.1945	-6.2698	-15.2297	4.7358	-5.1568
50.0	-3.3365	-3.4643	11.2395	0.0322	-14.9772	-5.7725	-14.9607	8.1685	-8.4622
60.0	-3.8395	-3.2518	12.5464	0.0262	-13.6029	-5.4612	-14.6941	2.7549	-2.9775
70.0	-4.3177	-3.0073	14.0654	0.0229	-13.9783	-5.7205	-14.3923	-4.6469	4.4506
80.0	-4.7741	-2.8804	14.3310	0.0210	-15.3999	-6.3101	-14.0649	-6.2127	6.0235
100.0	-5.6311	-2.9117	11.9306	0.0171	-15.7804	-6.3810	-13.3843	4.6763	-4.8316

120.0	-6.4270	-2.6545	12.4755	0.0129	-14.0249	-5.5346	-12.7235	-0.1761	0.0607
140.0	-7.1738	-2.4359	12.7461	0.0120	-15.5946	-5.9880	-12.0989	-3.7448	3.6348
160.0	-7.8804	-2.4586	10.7233	0.0100	-14.9953	-5.5941	-11.5133	-4.4893	-4.5820
200.0	-9.1986	-2.0952	11.1758	0.0080	-15.1075	-5.3733	-10.4758	-1.7439	1.6689
250.0	-10.7136	-1.8097	10.7082	0.0058	-14.0435	-4.7072	-9.3924	-3.2869	3.2307
300.0	-12.1238	-1.5962	10.1419	0.0042	-12.9077	-4.0819	-8.5118	-3.2916	3.2481
400.0	-14.7375	-1.3210	8.9521	0.0023	-11.1503	-3.1625	-7.2265	-0.4258	0.3969
500.0	-17.1749	-1.1331	8.3207	0.0016	-10.3019	-2.7029	-6.4078	2.1612	-2.1831
600.0	-19.4980	-0.9603	8.5053	0.0014	-9.8691	-2.4641	-5.9044	2.3040	-2.3219
800.0	-23.8986	-0.6720	9.9646	0.0010	-9.0007	-2.0628	-5.4405	-0.1041	0.0908

8.3.3 勒让德函数及对 ψ 一、二阶导数

计算各种大地测量要素的负荷间接影响格林函数时,需要计算勒让德函数 $P_n(\cos\psi)$ 及其对 ψ 一、二阶导数,这里令 $t = \cos\psi$, $u = \sin\psi$,直接给出其快速递推算公式。

$$P_n(t) = \frac{2n-1}{n}tP_{n-1}(t) - \frac{n-1}{n}P_{n-2}(t) \quad (3.39)$$

$$P_1 = t, \quad P_2 = \frac{1}{2}(3t^2 - 1) \quad (3.40)$$

$$\frac{\partial}{\partial\psi}P_n(t) = \frac{2n-1}{n}t\frac{\partial}{\partial\psi}P_{n-1}(t) - \frac{2n-1}{n}uP_{n-1}(t) - \frac{n-1}{n}\frac{\partial}{\partial\psi}P_{n-2}(t) \quad (3.41)$$

$$\frac{\partial}{\partial\psi}P_1(t) = -u, \quad \frac{\partial}{\partial\psi}P_2(t) = -3ut \quad (3.42)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial\psi^2}P_n(t) = \frac{2n-1}{n}\left(t\frac{\partial^2}{\partial\psi^2}P_{n-1} - 2u\frac{\partial}{\partial\psi}P_{n-1} - tP_{n-1}\right) - \frac{n-1}{n}\frac{\partial^2}{\partial\psi^2}P_{n-2} \quad (3.43)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial\psi^2}P_1(t) = -t, \quad \frac{\partial^2}{\partial\psi^2}P_2(t) = 3(1 - 2t^2) \quad (3.44)$$

8.3.4 江河湖库水变化负荷形变场计算

将江河湖库水、冰川雪山等内陆水体变化用负荷等效水高变化格网表示,按负荷格林函数积分算法(负荷直接影响积分与负荷间接影响格林函数积分组合),计算地面或近地空间任意点处各种大地测量要素(观测量或参数)的负荷形变效应。某一区域内同一采样历元时刻的多个水体等效水高变化格网可直接相加,再进行负荷格林函数积分计算。

这里将流水底地形与流水水位相结合,由流水水位监测数据,构建河流等效水高变化格网时间序列,进而按负荷格林函数积分算法,计算地面高程异常(mm)、地面重力(μGal)、和扰动重力梯度(径向 mE) 负荷形变效应格网时间序列。图 3.1 为其中一个采样时刻的地面负荷形变效应计算过程。

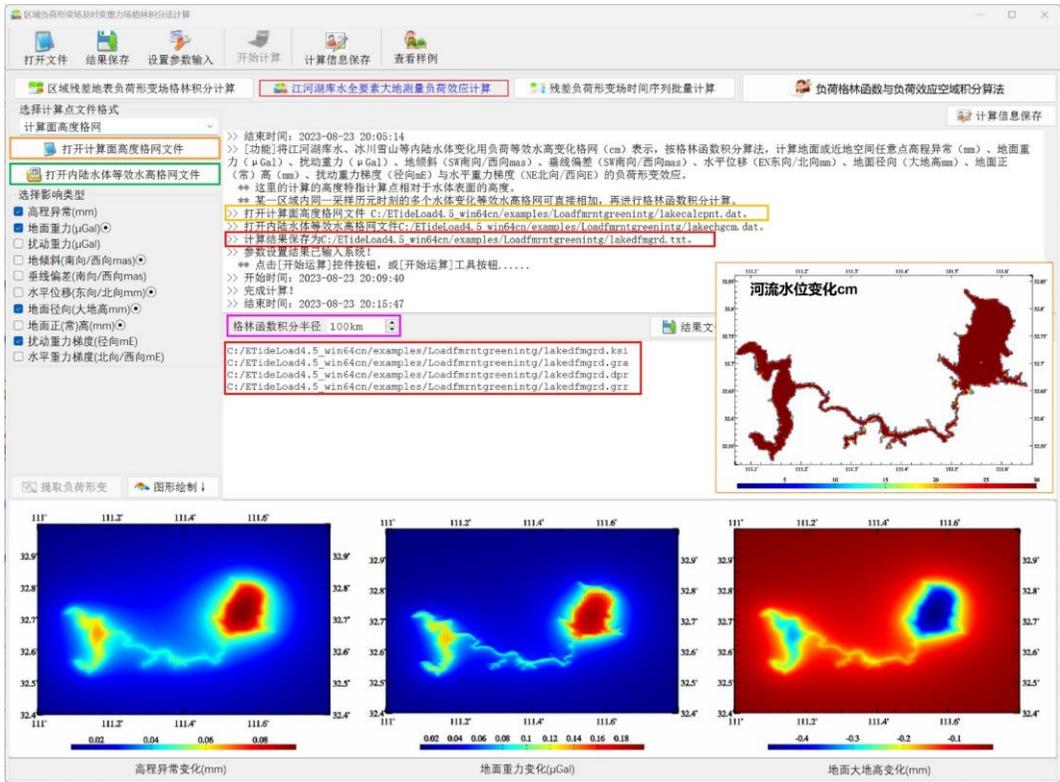


图 3.1 江河湖库水变化负荷形变场计算

8.3.5 区域负荷形变场移去恢复法逼近

由负荷等效水高变化格网,按负荷格林函数积分法计算地面或地球外部大地测量要素的负荷形变效应时,积分核函数自变量即球面角距 ψ 的定义域为 $[0,2\pi)$ 或 $[-\pi,\pi)$,是全球的。直接应用这些积分公式意味着计算任一点处的负荷形变效应就需要全球连续分布的地面等效水高变化数据。这对一个国家或地区这样的局部区域,负荷形变效应计算及应用非常不便,也不便利用局部区域的地表环境负荷数据优势改善区域负荷形变场。类似于物理大地测量学的局部重力场逼近方法,我们可以借助全球负荷球谐系数模型,利用局部地区地表环境负荷数据来计算地面或地球外部各种大地测量要素的负荷形变效应,精化该地区的负荷形变场(这里的负荷形变场,一般用某种或多种地面大地测量要素的负荷形变效应格网表示,有时也用时变重力场表示)。类似地,我们也将以全球负荷球谐系数模型为参考负荷形变场的区域负荷形变场精化过程称为局部负荷形变场逼近。

局部负荷形变场逼近同样可采用物理大地测量学中的移去-恢复方案。这种方法只需在已有负荷格林积分式中用区域残差负荷等效水高变化代替全球负荷等效水高变化,直接将积分域由全球变为局部区域,积分公式和核函数都不需要改化,其形式保持不变。

该方案基本流程(一个历元时刻):(1)由负荷球谐系数模型,计算区域负荷等效水高变化参考模型值;(2)从区域高分辨率负荷等效水高变化格网中,移去负荷等效水高变化参考模型值,得到区域负荷等效水高变化残差值格网,这个步骤称为“移去”;(3)采用较小的

积分半径,按负荷格林函数积分法计算高分辨率负荷形变场格网的残差值;(4)由负荷球谐系数模型,计算区域负荷形变场的分辨率参考模型值格网;(5)将区域高分辨率负荷形变场的参考模型值格网与残差值格网相加,就得到区域高分辨率负荷形变场的精化值,这个步骤称为“恢复”。整个流程可称为“移去-负荷格林函数积分-恢复”方案。

下面以中国南部某地区的地面大气压负荷形变场逼近为例,由2018年1月至2020年12月 $3.75' \times 3.75'$ 地面大气压周变化(hPa)格网时间序列(共157个采样历元,其中12个历元地面大气压变化格网如图3.2,图中左上角为采样历元时刻,如20180214表示2018年2月14日),按“移去-负荷格林函数积分-恢复”方案,精化地面大气压负荷形变场周变化格网时间序列。

参考负荷形变场模型时间序列,采用8.2.5节计算的2018年1月至2020年12月157个180阶全球地面大气压周变化负荷球谐系数模型时间序列。类似于区域大地水准面精化技术,一般要求负荷等效水高格网数据的区域范围(数据区域),应在负荷形变场精化区域(成果区域)基础上向四周扩展负荷格林函数积分半径,以抑制负荷格林函数积分的边缘效应。本例数据区域 $E96^{\circ} \sim 103^{\circ}$, $N22^{\circ} \sim 29^{\circ}$,成果区域 $E98^{\circ} \sim 101^{\circ}$, $N24^{\circ} \sim 27^{\circ}$ 。

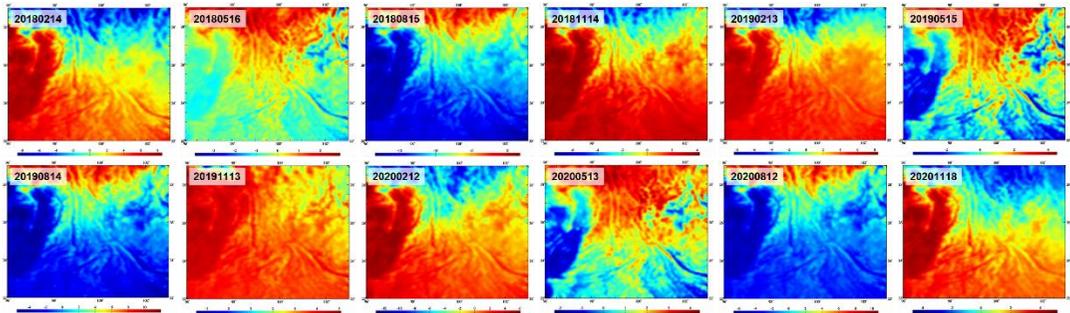


图 3.2 区域 $3.75' \times 3.75'$ 地面大气压周变化 (hPa) 格网时间序列

第一步:输入计算区域 $3.75' \times 3.75'$ 零值格网(零值表示相对地面的高度等于零),由全球地面大气压负荷球谐系数模型时间序列,选择最大计算阶数 180,计算区域地面大气压变化参考模型值格网时间序列。

第二步:将 $3.75' \times 3.75'$ 地面大气压周变化格网时间序列,减去地面大气压变化参考模型值格网时间序列,生成 $3.75' \times 3.75'$ 地面大气压周变化残差值格网时间序列。其中 12 个历元地面大气压残差变化格网如图 3.3。

第三步:输入成果区域 $3.75' \times 3.75'$ 零值格网(零值表示相对地面的高度等于零),选择积分半径 200km,由 $3.75' \times 3.75'$ 地面大气压周变化残差值格网时间序列,按负荷格林函数积分法,计算成果区域 $3.75' \times 3.75'$ 负荷形变场残差值格网时间序列。

第四步:输入成果区域 $3.75' \times 3.75'$ 零值格网(零值表示相对地面的高度等于零),由全球地面大气压负荷球谐系数模型时间序列,选择最大计算阶数 180,计算成果区域地面大气压变化负荷形变场参考模型值格网时间序列。

第五步:将成果区域 $3.75' \times 3.75'$ 负荷形变场残差值格网时间序列,与地面大气压变化负

荷形变场参考模型值格网时间序列相加，获得成果区域 $3.75' \times 3.75'$ 地面大气压变化负荷形变场格网时间序列成果。其中 12 个历元地面高程异常、地面重力、地倾斜、地面大地高和扰动重力梯度的地面大气压变化负荷效应格网分别如图 3.4~图 3.8。

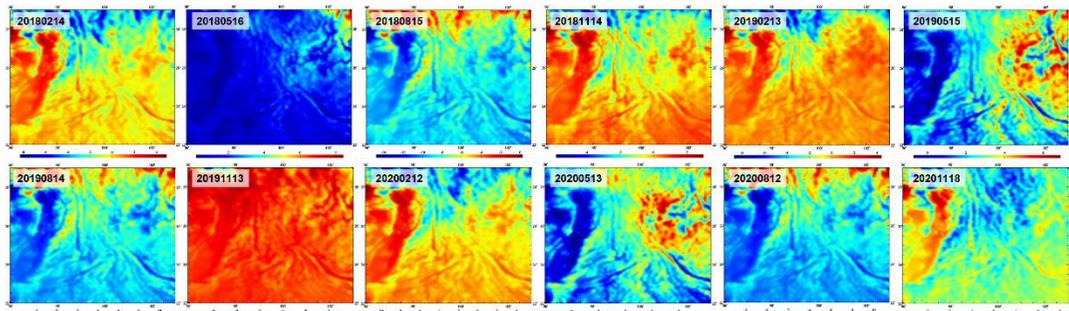


图 3.3 区域 $3.75' \times 3.75'$ 地面大气压周变化 (hPa) 残差值格网时间序列

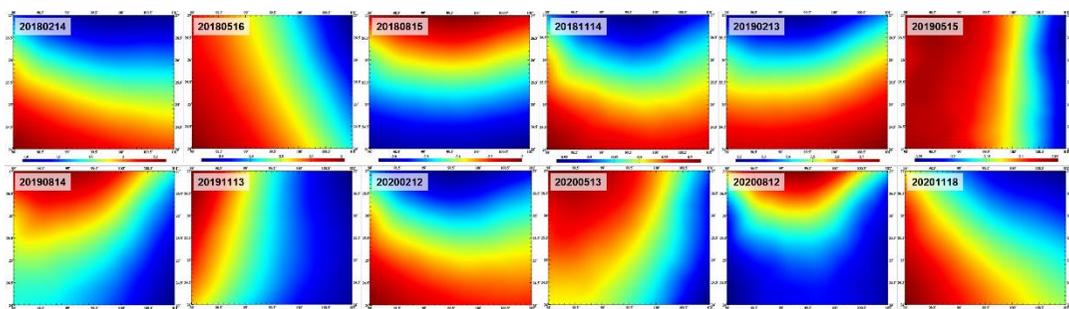


图 3.4 区域 $3.75' \times 3.75'$ 地面高程异常大气压变化负荷效应 (mm) 格网时间序列

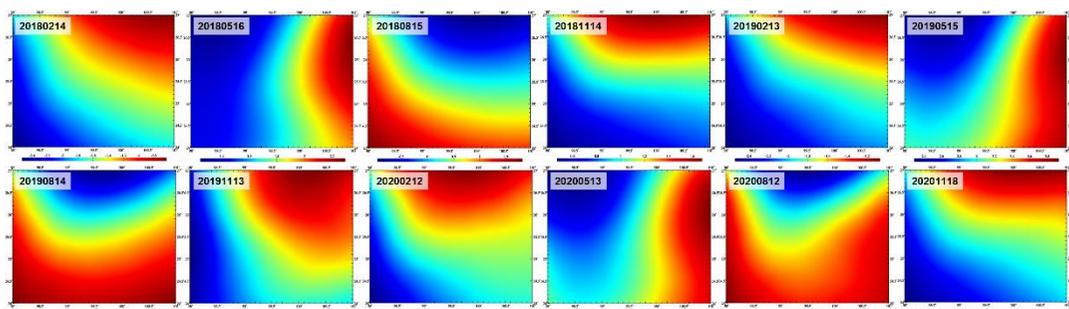


图 3.5 区域 $3.75' \times 3.75'$ 地面重力大气压变化负荷效应 (mGal) 格网时间序列

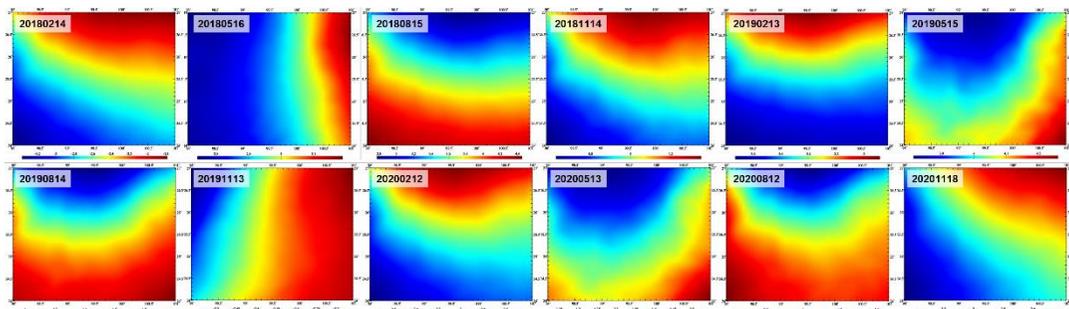


图 3.6 区域 $3.75' \times 3.75'$ 地面大地高大气压变化负荷效应 (mm) 格网时间序列

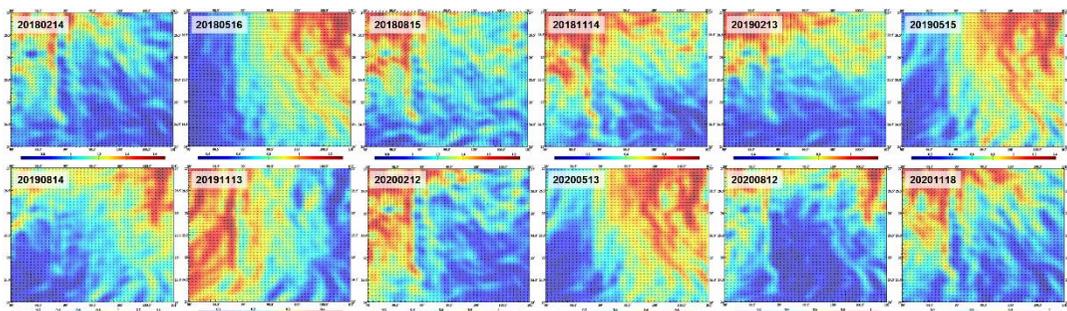


图 3.7 区域 3.75'×3.75'地倾斜大气压变化负荷效应 (mas) 格网时间序列

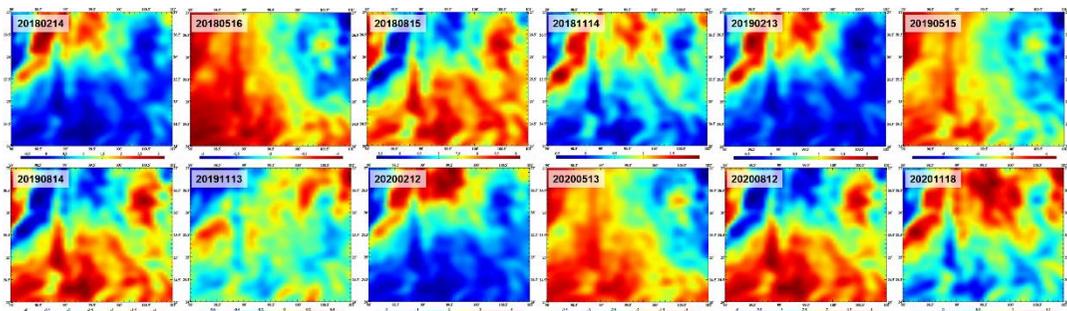


图 3.8 区域 3.75'×3.75'径向重力梯度大气压变化负荷效应 (mE) 格网时间序列

为直观显示该地区各种地面大地测量要素大气压变化负荷效应随时间变化规律, 以及不同类型大地测量要素大气压变化负荷效应之间的定量关系, 下面按上述移去恢复方法, 计算区域中心地面点处 2018 年 1 月至 2020 年 12 月地面高程异常周变化 (mm)、地面重力周变化 (μGal)、地面大地高周变化 (mm) 和扰动重力梯度周变化 (mE) 大气压负荷效应时间序列, 如图 3.9。

采用较大积分半径, 如 500~800km, 直接由地面负荷等效水高变化格网, 按负荷格林函数积分计算地面大地测量要素的负荷形变效应, 是目前大地测量和地球物理领域普遍方案 (以下简称负荷格林函数直接积分法)。这里以中国大陆地面大气压变化负荷效应为例, 分别采用移去恢复法和负荷格林函数直接积分法, 计算地面大地测量要素的大气压变化负荷效应时间序列, 分析负荷格林函数直接积分法的近似误差。

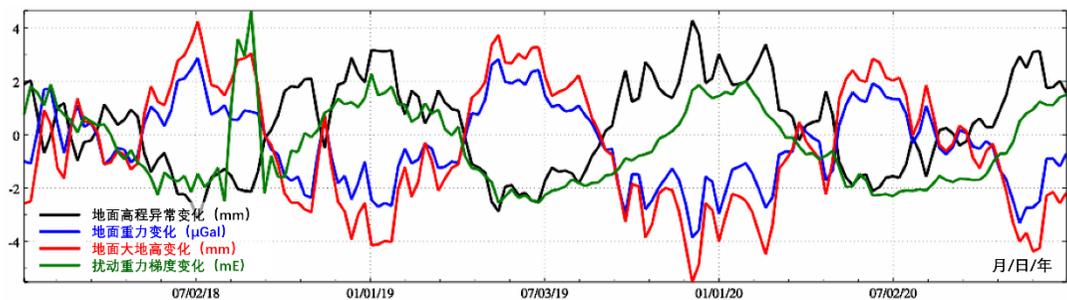


图 3.9 区域中心点处地面大地测量要素周变化大气压负荷效应时间序列

这里利用欧洲中尺度天气预测中心 (ECMWF) 全球再分析数据 ERA-40/ERA-Interim 中

的 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 地面/海面大气压日变化模型, 扣除 2018 年平均值后, 构造 2018 年 1 月至 2020 年 12 月中国大陆及周边 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 地面/海面大气压周变化 (hPa) 格网时间序列 (共 157 个采样历元)。

参考负荷形变场模型时间序列, 采用 8.2.5 节计算的 2018 年 1 月至 2020 年 12 月 157 个 180 阶全球地面大气压周变化负荷球谐系数模型时间序列。先按移去恢复算法, 残差负荷格林函数积分半径 200km, 计算中国大陆 6 座 CORS 站处地面高程异常、地面重力、地面大地高和扰动重力周变化大气压负荷效应时间序列; 再按负荷格林函数积分法, 直接由中国大陆及周边 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 地面/海面大气压周变化 (hPa) 格网时间序列, 积分半径选择 800km, 计算中国大陆 6 座 CORS 站处地面高程异常、地面重力、地面大地高和扰动重力周变化大气压负荷效应时间序列。

两种方法计算的中国大陆 6 座 CORS 站处负荷效应周变化时间序列曲线如图 3.10~图 3.13, 每个图的上图为移去恢复法计算结果, 下图为负荷格林函数积分法计算结果。表 3.2 给出用两种方案计算中国大陆 6 个 CORS 站处地面大地测量要素大气压变化负荷效应时间序列及其差异的统计情况。表中 ksi、gra、hgt 和 grr 分别代表地面高程异常周变化、地面重力周变化、地面大地高周变化和扰动重力周变化大气压负荷效应时间序列。

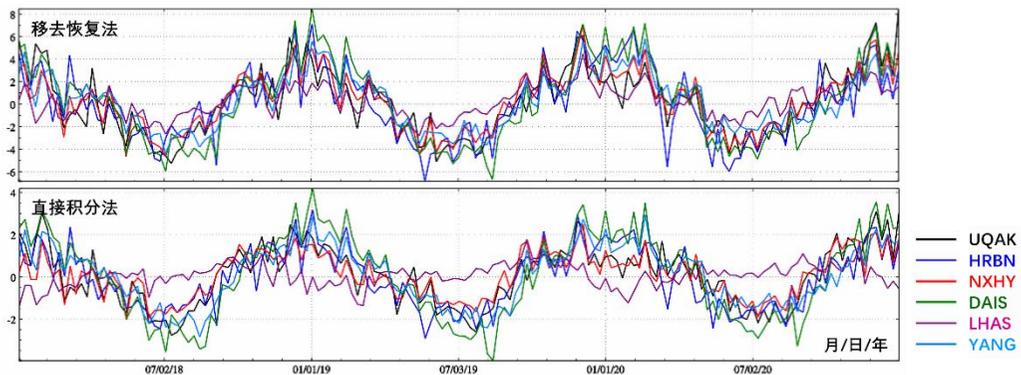


图 3.10 两种方法计算 CORS 站地面高程异常周变化大气压负荷效应 (mm) 时间序列

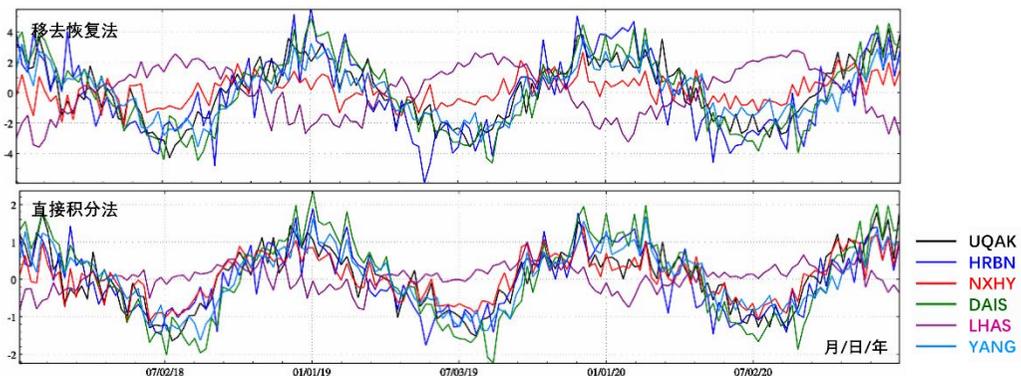


图 3.11 两种方法计算 CORS 站地面重力周变化大气压负荷效应 (mGal) 时间序列

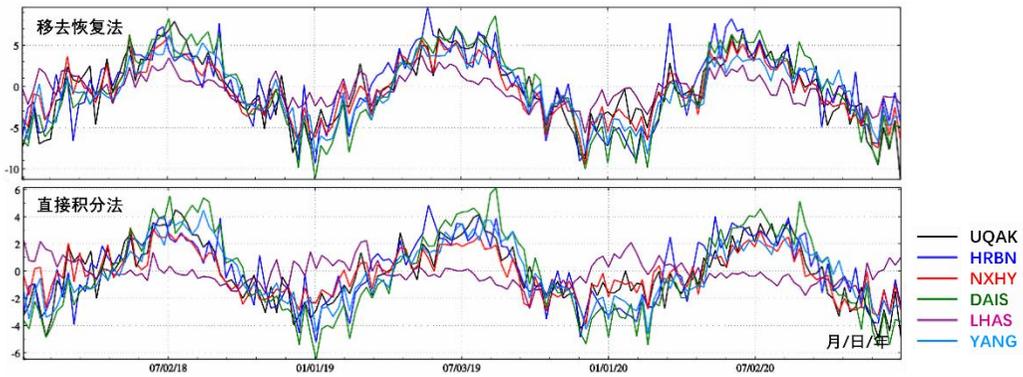


图 3.12 两种方法计算 CORS 站地面大地高周变化大气压负荷效应 (mm) 时间序列

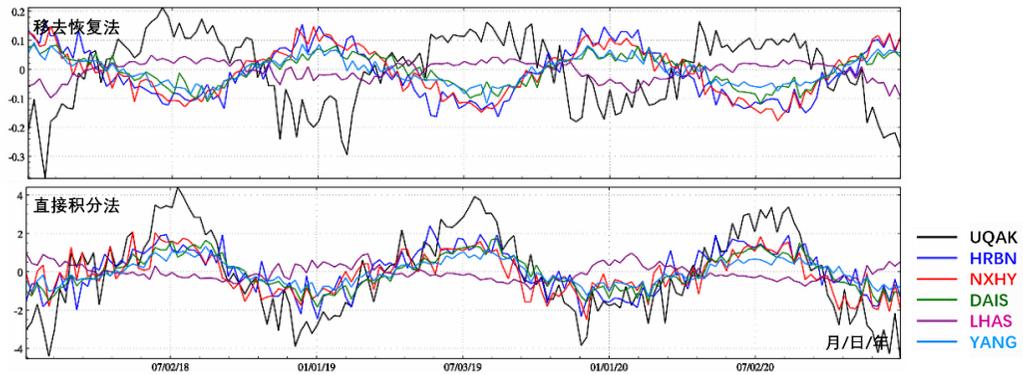


图 3.13 两种方法计算 CORS 站扰动重力梯度周变化大气压负荷效应 (mE) 时间序列

表 3.2 两种方案计算的大气压变化负荷效应时间序列及其差异统计

站名 (经度 纬度)	负荷效应对象	单位	移去恢复法		直接积分法		两者之差	
			平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
UQAK E87.97° N47.10°	ksi	mm	0.1618	2.9040	0.0669	1.3829	0.0949	1.6514
	gra	mGal	0.1363	2.0060	0.0382	0.8115	0.0982	1.2499
	hgt	mm	-0.2201	4.0837	-0.1053	2.2224	-0.1148	2.0922
	grr	mE	-0.0029	0.1224	-0.0582	2.1550	0.0553	2.0549
HRBN E126.62° N45.70°	ksi	mm	0.0335	3.1523	-0.0208	1.4114	0.0542	1.8525
	gra	mGal	-0.0628	2.5363	-0.0148	0.8494	-0.0479	1.7076
	hgt	mm	0.0053	4.3568	0.0411	2.3354	-0.0357	2.2104
	grr	mE	-0.0111	0.0883	0.0308	1.1439	-0.0419	1.2281
NXHY E105.63° N36.55°	ksi	mm	0.3069	2.6001	0.0994	1.0561	0.2075	1.6745
	gra	mGal	0.1592	0.9325	0.0576	0.6012	0.1016	0.4970
	hgt	mm	-0.3920	3.4507	-0.1589	1.6570	-0.2331	2.0348
	grr	mE	-0.0073	0.0818	-0.1068	1.0503	0.0995	1.1172
DAIS	ksi	mm	0.2630	3.5502	0.0907	1.9842	0.1722	1.6910

E122.20° N30.23°	gra	mGal	0.1284	2.4349	0.0522	1.1244	0.0763	1.3303
	hgt	mm	0.3564	4.7804	-0.1429	3.0833	-0.2135	1.9432
	grr	mE	-0.0026	0.0517	-0.0441	0.8954	0.0415	0.9444
LHAS E91.10° N29.65°	ksi	mm	0.3231	1.3847	0.0826	0.5451	0.2405	1.2880
	gra	mGal	0.1167	1.6451	0.0464	0.3234	0.0703	1.4307
	hgt	mm	-0.4104	1.8119	-0.1262	0.8929	-0.2842	1.6980
	grr	mE	-0.0043	0.0325	-0.0425	0.3946	0.0383	0.4219
YANG E109.22° N19.77°	ksi	mm	0.3055	2.4528	0.0904	1.3640	0.2151	1.2191
	gra	mGal	0.0748	1.6494	0.0499	0.7787	0.0249	0.8961
	hgt	mm	-0.4103	3.4732	-0.1365	2.1386	-0.2738	1.5685
	grr	mE	-0.0041	0.0461	-0.0344	0.6216	0.0303	0.6665

图 3.10~图 3.13 显示, 两种方案计算的负荷形变效应, 其时间序列曲线的几何形态基本一致, 但数值大小存在明显差异。表 3.2 显示, 当积分半径达到 800km, 负荷格林函数直接积分法的误差 (用两种方法负荷效应时间序列差异的标准差代表) 还会超过计算信号本身 (用直接积分法负荷效应时间序列的标准差代表), 这是因为, 只要积分半径小于 $\sqrt{2}R$ (R 为地球平均半径), 负荷格林函数直接积分都未能实现全球地面积分, 所计算的负荷形变效应信号不充分。多数情况下, 负荷格林函数直接积分法难以满足高精度大地测量的技术要求, 建议采用理论上较为严密的移去-负荷格林函数积分-恢复法。

8.4 地球外部海洋及大气压负荷潮效应

海洋潮汐使得海水质量重新分布, 引起地球重力位变化, 同时通过负荷勒夫数作用, 激发固体地球形变, 产生附加重力位; 类似地, 大气潮汐使得大气层密度重新分布, 引起地球重力位变化, 同时通过负荷勒夫数作用, 产生附加位。

8.4.1 全球海潮负荷球谐系数模型构建方法

海潮和固体潮都由日月引潮力作用产生, 具有相同的周期变化特征, 如周日及半日周期变化, 因此一般难以用数学方法将大地测量要素中的海潮负荷效应从其固体潮效应中完全分离出来, 通常采用负荷格林函数和海面潮高卷积的方法, 或海潮负荷球谐分析与球谐综合法, 计算大地测量要素海潮负荷形变效应。海潮负荷位于地表, 需采用高阶负荷勒夫数计算负荷格林函数, 负荷球谐系数模型也需展开成高阶或超高级数形式。

8.4.1.1 全球海潮球谐分析与球谐系数模型构建

全球负荷潮规格化球谐系数模型 (IERS 协议 2010 中 FES2004 海潮模型格式) 构建流程一般分三步: 第一步, 利用全球海洋各分潮调和常数格网模型, 采用球谐分析方法, 分别生成各分潮调和常数规格化球谐系数模型; 第二步, 按照分潮天文潮高算法公式, 将分潮调和常数规格化球谐系数转换为分潮负荷规格化球谐系数; 第三步, 组合全部分潮负荷规格化球谐系数, 生成全球海潮负荷规格化球谐系数模型。

历元 t 的瞬时天文潮高 $T(t)$ ，可用瞬时天文潮位面相对于当地长期平均海面的高度表示，等于多个海洋分潮瞬时潮高的叠加

$$T(\theta, \lambda, t) = \sum_{i=1}^M T_i(\theta, \lambda, t) = \sum_{i=1}^M H_i(\theta, \lambda) \cos[\phi_i(t) - g_i(\theta, \lambda)] \quad (4.1)$$

式中： M 为分潮 σ_i 的个数； $\phi_i(t)$ 为分潮 σ_i 的天文幅角； H_i 、 g_i 分别为分潮 σ_i 的振幅和迟角。

将 (4.1) 中任意分潮 σ_i 的瞬时天文潮高 $T_i(\varphi, \lambda, t)$ 展开为：

$$\begin{aligned} T_i(\theta, \lambda, t) &= H_i(\theta, \lambda) \cos g_i(\theta, \lambda) \cos \phi_i(t) + H_i(\theta, \lambda) \sin g_i(\theta, \lambda) \sin \phi_i(t) \\ &= H_i^+(\theta, \lambda) \cos \phi_i(t) + H_i^-(\theta, \lambda) \sin \phi_i(t) = H_i^+ \cos \phi_i + H_i^- \sin \phi_i \end{aligned} \quad (4.2)$$

另一方面，通过球谐分析，任意分潮 σ_i 的瞬时潮高 $T_i(\varphi, \lambda, t)$ 又可表示为规格化球谐级数形式：

$$T_i(\theta, \lambda, t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n [T_{i, nm}^+(\lambda, t) + T_{i, nm}^-(\lambda, t)] \bar{P}_{nm}(\cos \theta) \quad (4.3)$$

其中，
$$T_{i, nm}^+(\lambda, t) = \bar{C}_{i, nm}^+ \cos(\phi_i + m\lambda) + \bar{S}_{i, nm}^+ \sin(\phi_i + m\lambda) \quad (4.4)$$

$$T_{i, nm}^-(\lambda, t) = \bar{C}_{i, nm}^- \cos(\phi_i - m\lambda) + \bar{S}_{i, nm}^- \sin(\phi_i - m\lambda) \quad (4.5)$$

式 (4.4) 和 (4.5) 中，上标+为分潮 σ_i 同相幅值 ($H_i \cos g_i$) 的规格化球谐系数，上标-为分潮 σ_i 异相幅值 ($H_i \sin g_i$) 的规格化球谐系数。

将式 (4.4) 和 (4.5) 中的三角函数展开后，得：

$$\begin{aligned} T_{i, nm}^+(\lambda, t) &= \bar{C}^+ [\cos \phi_i \cos m\lambda - \sin \phi_i \sin m\lambda] + \bar{S}^+ [\sin \phi_i \cos m\lambda + \cos \phi_i \sin m\lambda] \\ &= [\bar{C}^+ \cos m\lambda + \bar{S}^+ \sin m\lambda] \cos \phi_i + [-\bar{C}^+ \sin m\lambda + \bar{S}^+ \cos m\lambda] \sin \phi_i \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} T_{i, nm}^-(\lambda, t) &= \bar{C}^- [\cos \phi_i \cos m\lambda + \sin \phi_i \sin m\lambda] + \bar{S}^- [\sin \phi_i \cos m\lambda - \cos \phi_i \sin m\lambda] \\ &= [\bar{C}^- \cos m\lambda - \bar{S}^- \sin m\lambda] \cos \phi_i + [\bar{C}^- \sin m\lambda + \bar{S}^- \cos m\lambda] \sin \phi_i \end{aligned} \quad (4.7)$$

比较式 (4.2) 与 (4.3)，对于任意海潮分潮 σ_i ，有 (以下省略分潮序号 i)

$$H^+ = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \bar{P}_{nm} [(\bar{C}^+ + \bar{C}^-) \cos m\lambda + (\bar{S}^+ - \bar{S}^-) \sin m\lambda] \quad (4.8)$$

$$H^- = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \bar{P}_{nm} [(\bar{S}^+ + \bar{S}^-) \cos m\lambda + (-\bar{C}^+ + \bar{C}^-) \sin m\lambda] \quad (4.9)$$

$$\bar{C}^+ = \hat{C}^+ \sin \varepsilon^+, \quad \bar{C}^- = \hat{C}^- \sin \varepsilon^-, \quad \bar{S}^+ = \hat{C}^+ \cos \varepsilon^+, \quad \bar{S}^- = \hat{C}^- \cos \varepsilon^- \quad (4.10)$$

式 (4.10) 中， ε_i 为分潮 σ_i 的相位偏差，由分潮 σ_i 的平衡潮高全球最大振幅 H_i 的符号定义 (Cartwright & Eden, 1973)，如表 4.1。 H_i 取值见表 1.7~表 1.12 中的最后一列。

表 4.1 分潮 σ_i 的相位偏差值

		$H_i > 0$	$H_i < 0$
$m = 0$	长周期潮	π	0
$m = 1$	周日分潮	$\pi/2$	$-\pi/2$
$m = 2$	半日分潮	0	π

8.4.1.2 海潮负荷对地球重力位系数的直接影响

全球瞬时海面潮高直接引起地面点 (φ, λ) 处地面重力位变化 $V^{ot}(\varphi, \lambda, t)$ ，可用全球积分表示为：

$$V^{ot}(\theta, \lambda, t) = G\rho_w \iint_S \frac{H(\theta', \lambda', t)}{L} dS \quad (4.11)$$

式中： $H(\theta', \lambda', t)$ 为历元 t 海面流动面元 (θ', λ') 的瞬时潮高； S 为整个海面； L 为地面计算点 $e =$

(θ, λ) 和海面流动面元 $\mathbf{e}' = (\theta', \lambda')$ 之间空间距离, 可用勒让德函数级数表示为:

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{R} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{R}{r}\right)^{n+1} P_n(\cos\psi) \quad (4.12)$$

由球谐函数加法定理得:

$$P_n(\psi_k) = P_n(\mathbf{e}, \mathbf{e}_k) = \frac{4\pi}{2n+1} \sum_{m=-n}^n \bar{Y}_{nm}(\mathbf{e}) \bar{Y}_{nm}(\mathbf{e}_k) \quad (4.13)$$

将 (4.13) 代入 (4.12) 式, 再将 (4.12) 代入 (4.11) 式, 可得全球瞬时潮高 H 及其引起的重力位系数变化 $(\Delta\bar{C}_{nm}, \Delta\bar{S}_{nm})$ (全球瞬时潮高对位系数的直接影响) 之间具有如下积分关系式:

$$\begin{bmatrix} \Delta\bar{C}_{nm} \\ \Delta\bar{S}_{nm} \end{bmatrix} = \frac{G\rho_w}{g_0(2n+1)} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi H \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \begin{bmatrix} \cos m\lambda \\ \sin m\lambda \end{bmatrix} \sin\theta d\theta d\lambda \quad (4.14)$$

式中: $g_0 \approx GM/R^2$, 取海面平均重力。

用同相幅值 $H_i \cos g_i$ 和异相幅值 $H_i \sin g_i$ 的球谐函数替换分潮 σ_i 的振幅 H_i 和迟角 g_i , 代入 (4.1) 式, 从而将瞬时潮高 $H(\theta, \lambda, t)$ 展开为:

$$H(\theta, \lambda, t) = \sum_{\sigma_i} \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \bar{P}_{nm}(\sin\theta) \sum_{\pm} H_{i,nm}^{\pm}(\lambda, t) \quad (4.15)$$

$$H_{i,nm}^{\pm}(\lambda, t) = \bar{C}_{i,nm}^{\pm} \cos(g_i + \varepsilon_i \pm m\lambda) + \bar{S}_{i,nm}^{\pm} \sin(g_i + \varepsilon_i \pm m\lambda) \quad (4.16)$$

式中: $(\bar{C}_{i,nm}^{\pm}, \bar{S}_{i,nm}^{\pm})$ 称为分潮 σ_i 的 n 阶 m 次正向前行 (prograde) 和逆向后退 (retrograde) 的规格化球谐系数, 也称分潮 σ_i 的 n 阶 m 次调和幅值, 可进一步用幅值 $\hat{C}_{i,nm}^{\pm}$ 和相位偏差 $\varepsilon_{i,nm}^{\pm}$ 将其表示为:

$$\bar{C}_{i,nm}^{\pm} = \hat{C}_{i,nm}^{\pm} \sin \varepsilon_{i,nm}^{\pm}, \quad \bar{S}_{i,nm}^{\pm} = \hat{C}_{i,nm}^{\pm} \cos \varepsilon_{i,nm}^{\pm} \quad (4.17)$$

将 (4.15) 代入 (4.14) 式, 顾及 (4.16) 和 (4.17) 式, 则位系数变化可表示为:

$$\Delta\bar{C}_{nm} - i\Delta\bar{S}_{nm} = \sum_{\sigma_i} (C_{i,nm}^{\pm} \mp iS_{i,nm}^{\pm}) e^{\pm i\phi_i} \quad (4.18)$$

比较 (4.18) 和 (4.16) 式得:

$$C_{i,nm}^{\pm} = \frac{4\pi G\rho_w}{g_0(2n+1)} \hat{C}_{i,nm}^{\pm} \sin(\varepsilon_{i,nm}^{\pm} + \varepsilon_i) \quad (4.19)$$

$$S_{i,nm}^{\pm} = \frac{4\pi G\rho_w}{g_0(2n+1)} \hat{C}_{i,nm}^{\pm} \cos(\varepsilon_{i,nm}^{\pm} + \varepsilon_i) \quad (4.20)$$

利用 (4.19) 和 (4.20) 式, 可将以分潮振幅和迟角表示的海潮调和常数格网模型转换为分潮负荷位的调和幅值, 按 (4.18) 式计算海潮负荷对位系数的直接影响 $(\Delta\bar{C}_{nm}, \Delta\bar{S}_{nm})$ 。进而在 (2.6) ~ (2.20) 中, 将地面负荷规格化球谐系数 $\{\Delta\bar{C}_{nm}^w, \Delta\bar{S}_{nm}^w\}$ 直接替换为海潮负荷对位系数的直接影响 $(\Delta\bar{C}_{nm}, \Delta\bar{S}_{nm})$, 就是全要素大地测量海潮负荷效应的算法公式。

同样, 由全球地面大气压潮汐调和常数格网模型, 经规格化球谐分析, 可得到地面大气压负荷潮球谐系数模型, 进而采用完全相同的方法, 由半日、周日、半年、周年 4 个周期的地面大气压分潮调和常数模型, 构造大气压负荷潮球谐系数模型。

8.4.2 海潮与大气压潮负荷效应计算及分析

8.4.2.1 海潮与大气压潮负荷球谐系数模型构建

下面以法国国家空间研究中心 CNES 的全球潮汐模型 FES2014b-extrapolated (34 个海洋潮高分潮调和常数模型) 为例, 介绍全球海潮调和与分析与海潮负荷球谐系数构建过程。

FES2014 是 CNES 于 2016 年推出的基于流体动力学的全球同化海潮模型，FES2014 同化了 1990 年以来多种卫星测高数据和全球验潮站实测数据，其中 FES2014b-extrapolated 模式通过卫星测高波形重采样，优化了近岸浅水海域的海面测高数据覆盖。FES2014 由 34 个海洋潮高分潮 ($2N_2$ 、 Eps_2 、 J_1 、 K_1 、 K_2 、 L_2 、 La_2 、 M_2 、 M_3 、 M_4 、 M_6 、 M_8 、 M_f 、 MKS_2 、 M_m 、 MN_4 、 MS_4 、 MSf 、 $MSqm$ 、 Mtm 、 Mu_2 、 N_2 、 N_4 、 Nu_2 、 O_1 、 P_1 、 Q_1 、 R_2 、 T_2 、 S_1 、 S_2 、 S_4 、 Sa 和 Ssa) 调和常数模型构成，空间分辨率 $3.75' \times 3.75'$ 。

首先，我们将 FES2014b-extrapolated 海潮模型的 34 个分潮调和常数，按球坐标进行全球格网化（陆地地区置零），分别生成 34 个分潮 $1^\circ \times 1^\circ$ 、 $30' \times 30'$ 、 $15' \times 15'$ 和 $10' \times 10'$ 调和常数球坐标格网模型。四种空间分辨率将用于分析海潮负荷球谐系数模型最大合适阶数。

接下来，对任意分潮调和常数球坐标格网模型，参考 (4.4) ~ (4.6) 式，按快速 FFT 算法分别对 34 个分潮 σ_i 的同相幅值 ($H_i \cos g_i$) 和异相幅值 ($H_i \sin g_i$) 全球格网进行球谐分析，生成 34 个分潮 σ_i 同相幅值和异相幅值的规格化球谐系数模型 (\bar{C}_i^+ , \bar{S}_i^+ , \bar{C}_i^- , \bar{S}_i^-), $i = 1, \dots, 34$ 。类似于 3.2 节非潮汐地表负荷球谐分析，采用累积迭代球谐分析法，可有效提高分潮负荷球谐系数模型的逼近水平。

然后，参考 (4.20) ~ (4.22) 式，按规定格式要求，将 34 个分潮 σ_i 同相幅值和异相幅值的规格化球谐系数模型 (\bar{C}_i^+ , \bar{S}_i^+ , \bar{C}_i^- , \bar{S}_i^-) 进行组合，就可获取全球海潮负荷规格化球谐系数模型。这里采用 IERS 协议 2010 中 FES2004 全球海潮负荷球谐系数模型格式。

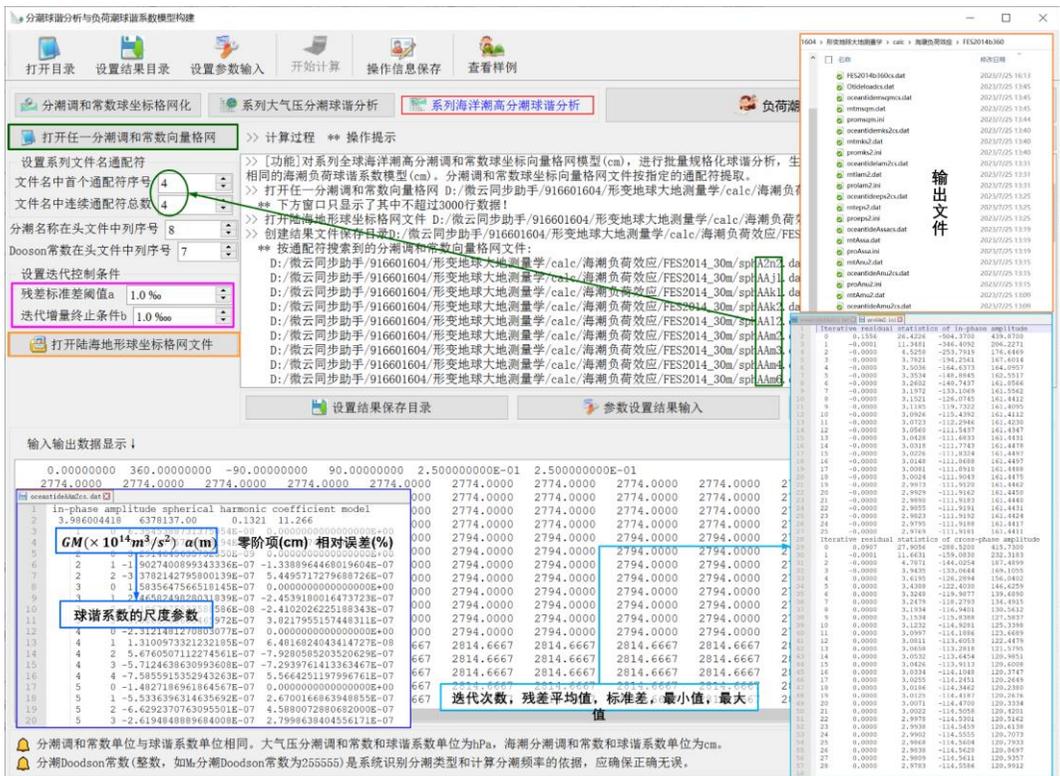


图 4.1 全球海潮调和与分析与负荷球谐系数模型构建程序

最后,在上述 34 个分潮负荷球谐系数模型基础上,从 IERS 协议 2010 的 FES2004S1.dat 海潮负荷球谐系数模型中选取平衡潮 Ω_1 、 Ω_2 负荷球谐系数,一并组成由 36 分潮构成的 FES2014b 海潮负荷球谐系数模型。

分潮调和常数格网在纬度方向上的格网数,等于该分潮负荷球谐模型的最大阶数。不同分潮的格网分辨率或其球谐系数模型最大阶数可以不一致。海潮负荷球谐系数模型的最大阶数,一般是各分潮最大阶数中的最大值。海潮负荷球谐系数模型是潮高调和常数格网在谱域中的线性泛函形式,可直接用于瞬时潮高全球预报,海潮负荷球谐系数的单位与潮高单位一致。本例单位为 cm。

图 4.1 为全球海潮调和与分析负荷球谐系数模型构建程序,程序自动依次读取 34 个分潮 $30' \times 30'$ 调和常数球坐标格网(陆地区域置零),采用迭代累积逼近方法,对每个分潮调和常数进行球谐分析,其中, M_2 分潮球谐系数模型如左下图,迭代残差变化如右下图),构造 360 阶 FES2014b 全球海潮负荷球谐系数模型,如图 4.2。

Ocean tidal load normalized spherical harmonic coefficient model in cm.												
Created by ETideLoad, ZHANG Chuanyin, Chinese Academy of Surveying and Mapping.												
Doodson name	n	m	Csin+	Ccos+	Csin-	Ccos-	C+	eps+	C-	eps-		
247.455	2N2	1	0	0.00458562	0.00231038	0.00458562	0.00231038	0.005135	63.2596	0.005135	63.2596	
247.455	2N2	1	1	-0.00773380	0.00473565	0.01063946	-0.00152991	0.009069	301.4805	0.010749	98.1828	
247.455	2N2	2	0	0.01415077	-0.00470716	0.01415077	-0.00470716	0.014913	108.3994	0.014913	108.3994	
247.455	2N2	2	1	-0.01749377	0.01964053	-0.02057617	0.01244109	0.026302	318.3086	0.024045	301.1587	
247.455	2N2	2	2	-0.05076973	0.15409810	0.03408330	-0.00708020	0.162246	341.7648	0.034811	101.7353	
247.455	2N2	3	0	-0.00345932	-0.05402235	-0.00345932	-0.05402235	0.054133	183.6639	0.054133	183.6639	
247.455	2N2	3	1	0.00459468	0.02860553	0.08674509	0.04125120	0.028972	9.1250	0.096054	64.5668	
247.455	2N2	3	2	-0.01359111	-0.04803085	0.00043095	0.01917460	0.049917	195.7997	0.019179	1.2875	
247.455	2N2	3	3	0.11576000	0.04745531	0.10043379	-0.03897379	0.125109	67.7090	0.107731	111.2090	
247.455	2N2	4	0	-0.04607076	0.02579335	-0.04607076	0.02579335	0.052800	299.2429	0.052800	299.2429	
247.455	2N2	4	1	0.03322584	0.01467790	0.01394749	0.02945707	0.036324	66.1660	0.032592	25.3369	
247.455	2N2	4	2	0.06616682	-0.16308472	0.08023800	0.03608357	0.175996	157.9166	0.087978	65.7862	
247.455	2N2	4	3	-0.04323293	-0.08712246	-0.08031745	0.08908738	0.097259	206.3921	0.119948	317.9635	
247.455	2N2	4	4	-0.07108370	0.11911427	-0.03283587	0.04029420	0.138712	329.1726	0.051979	320.8233	
247.455	2N2	5	0	0.00423674	0.05025371	-0.00423674	-0.05025371	0.050432	4.8190	0.050432	4.8190	
247.455	2N2	5	1	-0.06599377	0.02863740	0.02863740	-0.08775797	0.071939	293.4580	0.109878	216.9954	
247.455	2N2	5	2	0.03191636	0.09160043	-0.12292118	0.09809027	0.097002	19.2099	0.157262	308.5896	
247.455	2N2	5	3	-0.04622306	0.08929694	-0.03229352	-0.02331163	0.100551	332.6324	0.039828	234.1757	
247.455	2N2	5	4	0.12978448	-0.00340802	-0.08015548	0.01815451	0.129829	91.5042	0.082186	282.7617	
247.455	2N2	5	5	0.07170340	0.02947675	0.04405895	-0.08476786	0.077526	67.6528	0.095534	152.5364	
247.455	2N2	6	0	0.03947937	-0.02794239	0.03947937	-0.02794239	0.048367	125.2898	0.048367	125.2898	
247.455	2N2	6	1	-0.03340601	-0.04901155	0.00654233	-0.02479353	0.059314	214.2781	0.025642	165.2182	
247.455	2N2	6	2	0.01502432	0.05093430	-0.00472606	-0.04361353	0.053104	16.4347	0.043869	186.1846	
247.455	2N2	6	3	0.00272363	0.04846491	-0.00102382	0.02626808	0.048541	3.2165	0.026288	357.7680	
247.455	2N2	6	4	0.05940714	-0.01371178	0.06957119	0.00812134	0.060969	102.9969	0.070044	83.3418	
247.455	2N2	6	5	-0.06310363	-0.02281638	0.02184442	0.02667029	0.067102	250.1215	0.034474	39.3193	
247.455	2N2	6	6	0.06505389	0.01875362	0.05082476	0.11432385	0.067703	73.9189	0.125112	23.9684	

图 4.2 全球海潮负荷球谐系数模型 FES2014b 数据文件

每个分潮负荷球谐系数模型,由格式相同的同相幅值球谐系数模型和异相幅值球谐系数模型构成。头文件分别是地心引力常数 GM ($\times 10^{14}m^3/s^2$),地球长半轴 a (m),零阶项 $a\Delta C_{00}$ (cm),相对误差 θ (%)。 θ 为最终迭代残差标准差与输入原格网标准差的百分比。

GM, a 也称为负荷球谐系数模型的尺度参数,表示球谐系数的面球函数定义在半径等于地球长半轴 a 的球面上。零阶项 $a\Delta C_{00}$ 是由于输入分潮的潮高起算基准(当地平均海面)偏离长期平均海面引起的,海潮负荷效应计算时可直接去掉。3个一阶项球谐系数的同相幅值和异相幅值($\Delta \bar{C}_{10}^+, \Delta \bar{C}_{10}^-, \Delta \bar{C}_{11}^+, \Delta \bar{C}_{11}^-, \Delta \bar{S}_{11}^+, \Delta \bar{S}_{11}^-$)可用于计算该分潮引起的地球质心变化。

对于高精度大地测量,海潮负荷效应短波成分不可忽略,需要较大阶数球谐系数模型表示。表 4.2 给出全球海潮负荷球谐分析残差随分潮调和常数格网分辨率(负荷球谐系数模型最大阶数)的变化情况。

表 4.2 海潮负荷球谐分析残差随格网分辨率变化情况

输入格网分辨率	最大阶数	分潮	同相/异相幅值	一阶项 $\times 10^{-8}$			残差相对误差%
				$\Delta\bar{C}_{10}$	$\Delta\bar{C}_{11}$	$\Delta\bar{S}_{11}$	
$1^\circ \times 1^\circ$	180	K_1	同相	6.5903	15.2405	5.7951	15.109
			异相	-23.6187	5.4510	9.1115	13.080
		M_2	同相	6.4087	8.2092	-3.9331	16.593
			异相	3.3741	0.7698	7.4235	14.206
$30' \times 30'$	360	K_1	同相	6.7466	14.4650	5.6522	10.522
			异相	-23.9366	5.5500	9.2329	9.785
		M_2	同相	6.3545	7.5901	-4.2676	11.266
			异相	4.3474	-0.2498	5.9033	10.673
$15' \times 15'$	720	K_1	同相	6.7290	14.1161	5.5337	7.549
			异相	-23.9978	5.5530	9.3081	7.069
		M_2	同相	6.3464	7.5080	-4.5272	7.980
			异相	4.7902	-0.6035	5.1936	7.687
$10' \times 10'$	1080	K_1	同相	6.6860	14.0149	5.4796	6.161
			异相	-23.9629	5.5763	9.3395	5.922
		M_2	同相	6.2795	7.5429	-4.6921	6.867
			异相	4.9361	-0.7832	4.9103	6.435

表 4.2 显示，全球海潮中短波成分明显，兼顾精度要求与计算效率，全球海潮负荷球谐系数模型的适宜最大阶数可选择 720 阶。

类似地，我们采用欧洲中期气候预报中心 ECMWF-DCDA2006 的地面大气压周日 S_1 、半日 S_2 、半年 S_{Sa} 和年周期 S_a 分潮调和常数数据，分别构造 4 个分潮 $1^\circ \times 1^\circ$ 和 $30' \times 30'$ 调和常数球坐标格网模型，按上述相同的流程，经规格化球谐分析，分别生成 180 阶和 360 阶全球地面大气压潮负荷球谐系数模型 ECMWF2006.dat。

表 4.3 大气压潮负荷球谐分析残差随格网分辨率变化情况

输入格网分辨率	最大阶数	分潮	同相/异相幅值	一阶项 $\times 10^{-8}$			残差相对误差%
				$\Delta\bar{C}_{10}$	$\Delta\bar{C}_{11}$	$\Delta\bar{S}_{11}$	
$1^\circ \times 1^\circ$	180	S_1	同相	-0.3276	-0.7396	-5.3411	4.378
			异相	0.1765	-4.3745	-0.1072	4.335
		S_2	同相	-0.0630	0.0080	0.3390	1.238
			异相	0.1374	0.5236	-0.1086	1.365
		S_{Sa}	同相	0.6526	-3.5846	1.2772	3.841
			异相	6.4837	-2.5040	2.4911	1.158
		S_a	同相	8.2106	-3.5243	3.5038	1.488

			异相	-16.1599	-0.8292	-12.1651	2.554
30'×30'	360	S_1	同相	-0.3274	-0.7396	-5.3408	2.927
			异相	0.1765	-4.3747	-0.1074	2.617
		S_2	同相	-0.0630	0.0077	0.3391	0.848
			异相	0.1374	0.5237	-0.1087	0.903
		S_{Sa}	同相	0.6528	-3.5850	1.2760	1.871
			异相	6.4837	-2.5041	2.4916	0.646
		S_a	同相	8.2104	-3.5242	3.5038	0.839
			异相	-16.1596	-0.8291	-12.1654	1.276

表 4.3 显示，全球地面大气压潮中长波占优，兼顾精度与计算效率，地面大气压潮负荷球谐系数模型的适宜最大阶数可选择 180~360 阶。

同理，地面大气压潮负荷球谐系数模型是地面大气压潮调和常数格网在谱域中的线性泛函形式，可直接用于瞬时地面大气压全球预报，大气压潮负荷球谐系数的单位与地面大气压单位一致。本例单位为 hPa。

8.4.2.2 海潮负荷效应球谐综合计算及分析

海潮负荷位于海面，计算点相对海面的高度为正（常）高 h 。本节选择离开海岸线 400km 以上的内陆地区 $P_1(105^\circ E, 32^\circ N, h720m)$ 、位于海岸带区域 $P_2(121.3^\circ E, 28.8^\circ N, h11m)$ 和离开海岸线 200km 的海域海岛上 $P_3(123.47^\circ E, 25.75^\circ N, h3m)$ 三个计算点，由 720 阶全球海潮负荷球谐系数 (cm) 模型 FES2014b720cs.dat，分别计算这 3 个地面点处各种大地测量要素的海潮负荷效应时间序列。时间跨度 2020 年 1 月 1 日至 2020 年 1 月 31 日，时间间隔 30 分钟。通过比较 3 个不同地区地面点海潮负荷效应时间序列的异同，分析海潮负荷效应的空间和时变特点。

图 4.3 为位于内陆地区 P_1 点处地面大地测量全要素海潮负荷效应球谐综合计算的海潮负荷效应时间序列。图中显示，即使在离开海岸线超过 400km 的内陆地区，大地水准面海潮负荷效应最大最小值之差可达 8mm，地面大地高海潮负荷效应最大最小值之差还可达到 15mm，地面正常高海潮负荷效应最大最小值之差可达 22mm，地面水平位移海潮负荷效应最大最小值之差可达 8mm，地倾斜海潮负荷效应最大最小值之差可达 4.5mas，而地面重力海潮负荷效应最大最小值差不到 2 μ Gal，重力梯度径向海潮负荷效应最大最小值之差可达 2.6mE，水平重力梯度海潮负荷效应最大最小值之差可达 1.9mE。可见，即使在内陆地区，厘米级精度大地测量也应顾及海潮负荷效应。

图 4.4 为位于海岸 P_2 点处地面大地测量全要素海潮负荷效应球谐综合计算的海潮负荷效应时间序列。图中显示，海岸带区域的海潮负荷效应一般达到或超过内陆 P_1 点的 10 倍， P_2 点处大地水准面的海潮负荷效应最大最小值之差可达 6.8cm，地面正常高海潮负荷效应最大最小值之差可达 20cm，地面重力海潮负荷效应最大最小值之差可达 250 μ Gal，地倾斜海潮负荷效应最大最小值之差 110mas，地面水平位移最大最小值之差超过 3.1cm，重力梯度径

向海潮负荷效应最大最小值之差可达 42mE，水平重力梯度海潮负荷效应最大最小值之差可达 30.5mE。海岸带地区大地测量，需要采用高精度海潮模型计算海潮负荷效应。

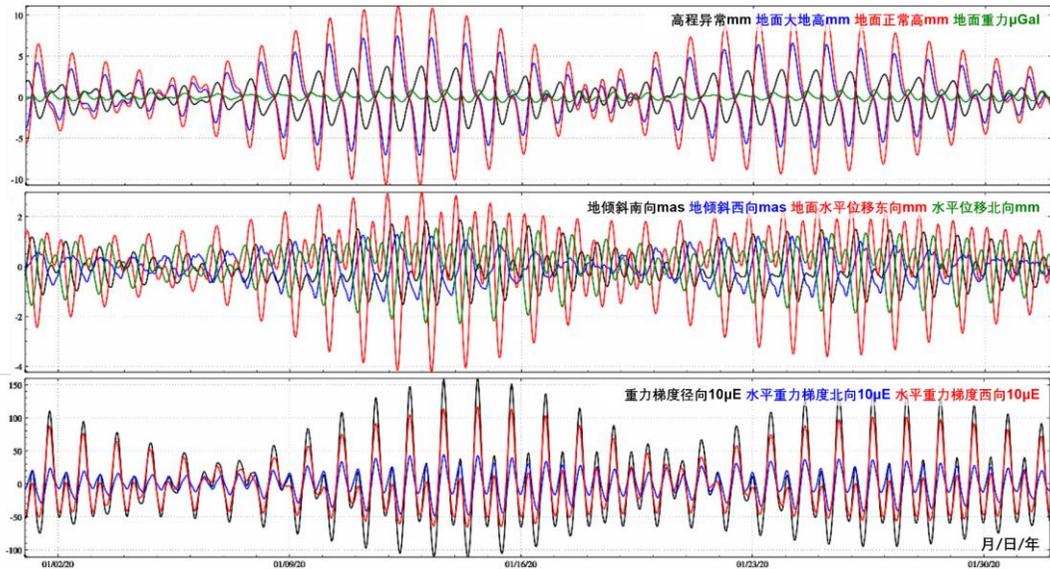


图 4.3 内陆地区地面大地测量全要素海潮负荷效应球谐综合计算

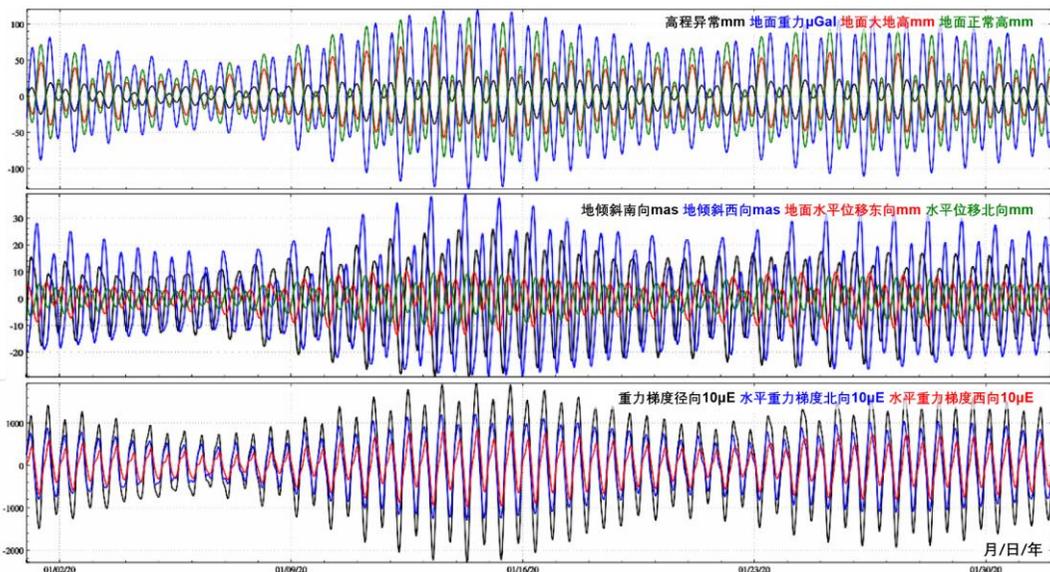


图 4.4 海岸带地面大地测量全要素海潮负荷效应球谐综合计算

图 4.5 为离岸 200km 海岛上 P_3 点处，地面大地测量全要素海潮负荷效应球谐综合法计算的海潮负荷效应时间序列。图中显示，离岸一段距离后，海潮幅值变低，潮汐结构也比近岸简单些，海潮负荷效应的中短波部分有所减弱。 P_3 点处大地水准面的海潮负荷效应最大最小值之差可达 6.6cm，地面正常高海潮负荷效应最大最小值之差可达 16cm，地面重力海潮负荷效应最大最小值之差可达 70 μ Gal，地倾斜海潮负荷效应最大最小值之差可达 76mas，地面水平位移最大最小值之差超过 2.8cm，重力梯度径向海潮负荷效应最大最小值之差可达

2.3mE, 水平重力梯度海潮负荷效应最大最小值之差可达 3.5mE。

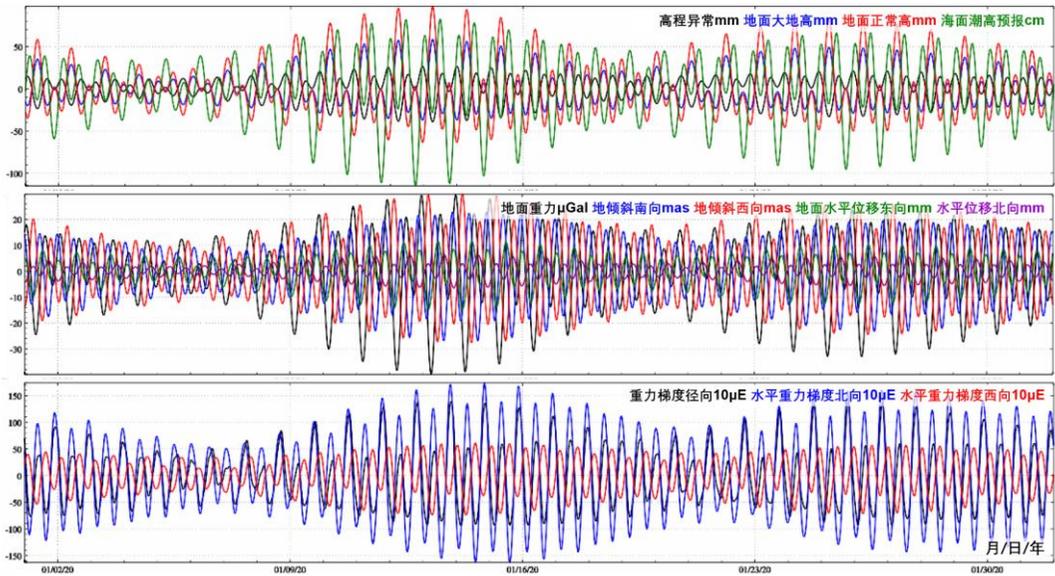


图 4.5 离岸海岛地面大地测量全要素海潮负荷效应球谐综合计算

与固体潮效应不同，地面正常高海潮负荷效应与地面大地高负荷效应同相（符号一致，可考察体潮勒夫数与负荷勒夫数的符号），大部分地区，地面正常高海潮负荷效应的幅值约为大地高海潮负荷幅值的 1.5 倍。在海岸带海域，重力梯度和地倾斜的海潮负荷效应一般远大于其固体潮效应。

8.4.2.3 地面大气压潮负荷效应球谐综合计算

本节采用与海潮负荷效应完全相同的负荷勒夫数与球谐综合方法，由 360 阶全球地面大气压潮负荷球谐系数 (hPa) 模型 ECMWF2006n360cs.dat，计算地面点 $P(N105^\circ, E20^\circ)$ 处各种大地测量要素的地面大气压负荷效应时间序列。时间跨度 2018 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日 (3 年)，时间间隔 30 分钟，如图 4.6。

与海潮负荷效应球谐综合计算略有不同，由大气压潮负荷效应球谐综合计算间接影响时，通常假设大气压潮负荷集中于地面，计算点高度 h 为点位相对于地面的高度。在计算重力、重力梯度等大气压潮负荷效应直接影响时，假设地面高度 h 处大气压 P_h 与地面大气压 P_0 存在比例关系 $(1-h/44330)^{5225}$ 。

图 4.6 显示，地面正常高大气压潮负荷效应的最大最小值之差可达 2cm，地面大气压每增加 1hPa，地面正常高约减少 1mm，即地面正常高的大气压负荷效应应纳接近 -1.0mm/hPa。地倾斜向量与水平重力梯度向量的地面大气压潮负荷效应异相，两者（向量两分量）的比例关系及其与地面大气压潮的比例关系，基本不随时间变化而有明显不同。地面大气压潮的周年周期振幅是其周日振幅的 3~5 倍。在内陆地区，地面大气压冬高夏低，导致地面冬季下降、夏季抬升，产生年、半年的周期性地面垂直形变，在厘米级地面大地测量中应予以顾及。

由于构造的 360 阶地面大气压潮负荷球谐系数模型 ECMWF2006n360cs.dat 已包含了半

年与年周期分潮，用该模型计算大气潮负荷效应，即使不考虑非潮汐大气负荷效应，一般也能将地面大地测量要素的大气负荷效应控制在 1cm 精度水平。

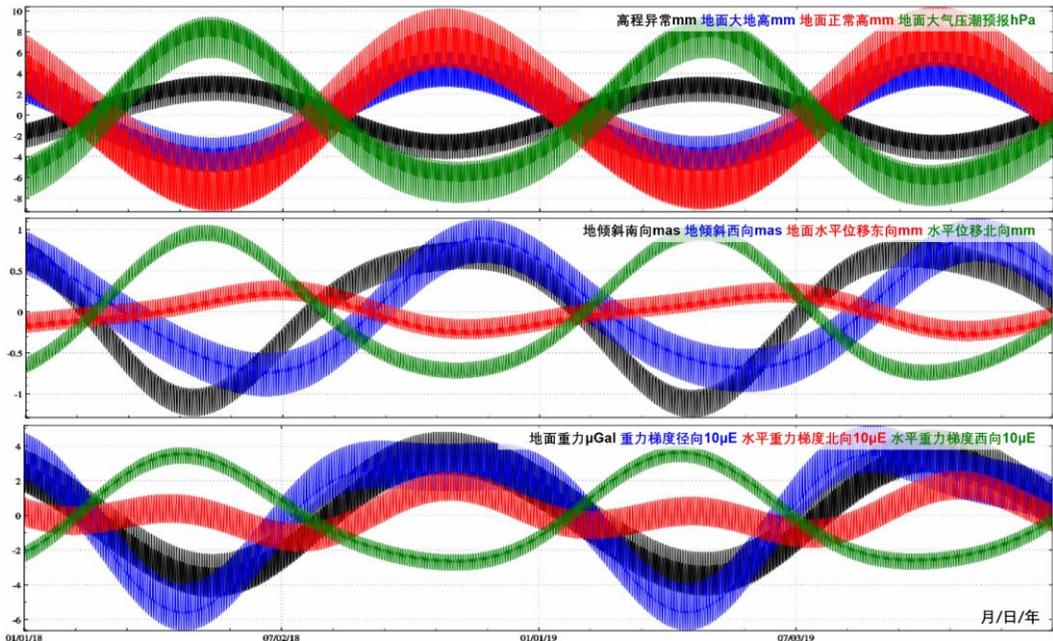


图 4.6 地面大地测量全要素大气压潮负荷效应球谐综合计算

8.4.3 海潮负荷潮效应格林积分法区域精化

类似于全球负荷球谐系数模型为参考场的区域负荷形变场精化方案，以全球海潮负荷球谐系数模型为参考场，采用移去-恢复法，可由区域高精度海潮模型进一步改善海潮负荷效应的精度水平。其一般流程可为：(1) 选择区域高分辨率海潮调和常数格网模型和一个作为参考场的全球海潮负荷球谐系数模型，并由海潮负荷球谐系数模型，计算区域海潮调和常数参考值格网；(2) 从区域高分辨率海潮调和常数格网模型中，移去参考模型值，得到区域海潮调和常数残差值格网，这个步骤称为“移去”；(3) 采用较小的积分半径，按负荷格林函数积分法计算目标点海潮负荷效应残差值；(4) 由全球海潮负荷球谐系数模型，计算目标点海潮负荷效应参考模型值；(5) 将目标点海潮负荷效应的残差值与参考模型值相加，就得到目标点海潮负荷效应的精化值，这个步骤称为“恢复”。整个流程也可称为“移去-负荷格林函数积分-恢复”方案。

下面继续选择位于海岸带区域 $P_2(121.3^{\circ}E, 28.8^{\circ}N, h11m)$ 和离开海岸线 200km 的海域海岛上 $P_3(123.47^{\circ}E, 25.75^{\circ}N, h3m)$ 两个计算点，采用由 10 个分潮调和常数模型构成的中国近海 $1.2^{\circ} \times 1.2^{\circ}$ 高精度海潮模型 TMchinaR1 (许军, 暴景阳, 2008)，以 720 阶全球海潮负荷球谐系数 (cm) 模型 FES2014b720cs.dat 为海潮负荷参考场，按移去-负荷格林函数积分-恢复法，计算这两个地面点处各种大地测量要素的海潮负荷效应残差值和精化值时间序列。时间跨度仍然为 2020 年 1 月 1 日 0 时至 2020 年 1 月 31 日 24 时，时间间隔 30 分钟。分析海潮球谐系数模型误差影响及高分辨率海潮负荷形变效应的空间和时变特点。

首先, 由 720 阶全球海潮负荷球谐系数模型 FES2014b720cs.dat, 计算中国近海 1.2'×1.2' 海潮调和常数模型值格网, 格网规格和分潮类型与中国近海高精度海潮模型 TMchinaR1 相同, 进而将中国近海海潮模型 TMchinaR1 的 10 个分潮调和常数格网分别减去对应分潮调和常数模型值格网, 生成中国近海 10 分潮的调和常数残差值格网。

第二步, 采用负荷格林积分法和较小的积分半径 (本例 300km 积分半径), 由中国近海 10 分潮 1.2'×1.2'调和常数残差值格网, 分别计算 P_2 和 P_3 两个点处各种大地测量要素的海潮负荷效应残差值时间序列。如图 4.7 和图 4.8。

最后, 由全球海潮负荷球谐系数模型, 计算 P_2 和 P_3 处各种大地测量要素的海潮负荷效应模型值时间序列, 并与第二步计算的海潮负荷效应残差值时间序列分别相加, 就是 P_2 和 P_3 两个点处各种大地测量要素的海潮负荷效应精化值时间序列。图 4.9 为海岸 P_2 点各种大地测量海潮负荷效应精化值时间序列。

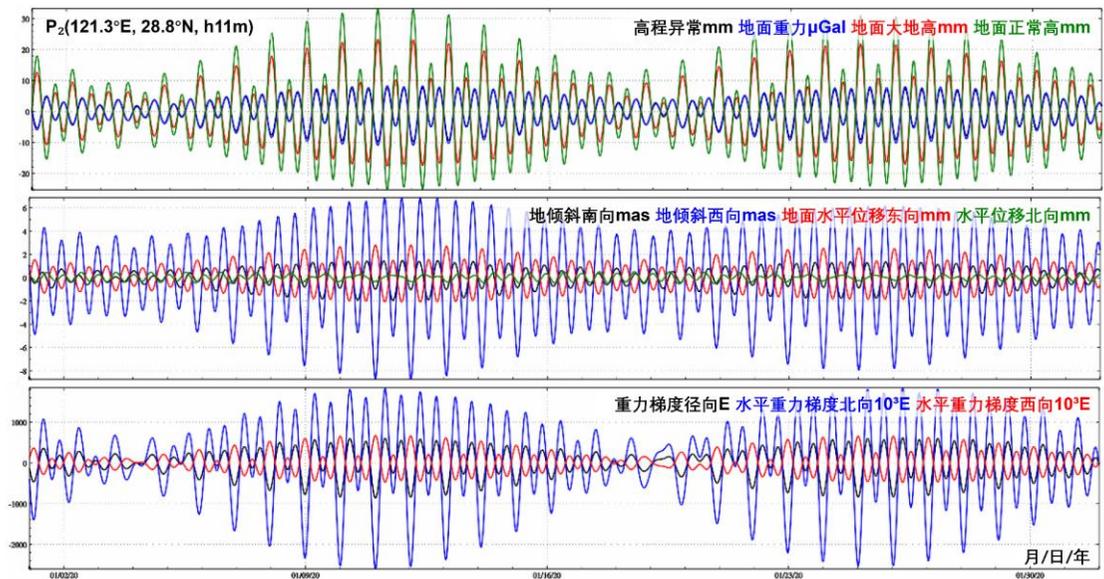


图 4.7 海岸 P_2 点大地测量全要素海潮负荷效应残差值时间序列

不难理解, 各种大地测量要素的海潮负荷效应残差值时间序列, 也代表了 720 阶 FES2014b 海潮球谐系数模型误差对相应大地测量变化量的影响。图 4.7 和图 4.8 显示, 即使是 720 阶 FES2014 这样质量较好的高阶海潮球谐系数模型, 海潮模型误差对沿海地区地面正常高影响还可高达 5.9cm, 对高程异常和大地高的影响分别可达 1.7cm 和 4.1cm, 对地倾斜和水平位移的影响分别可达 23.6mas 和 1.6cm。

海潮球谐系数模型误差对重力梯度影响很大, 远远超出由海潮球谐系数模型本身计算的海潮负荷效应量级。图 4.7 显示, 即使采用当前很好的全球海潮模型 FES2014b, 34 个分潮都展开到 720 阶, 海潮球谐系数模型误差对沿海地区重力梯度影响仍然可达数 E 以上。这说明, 重力梯度的海潮负荷效应主要集中在超短波部分, 高阶海潮球谐系数模型也无法包含这些超短波信号, 不能满足海岸带区域重力梯度海潮负荷效应改正的精度要求。

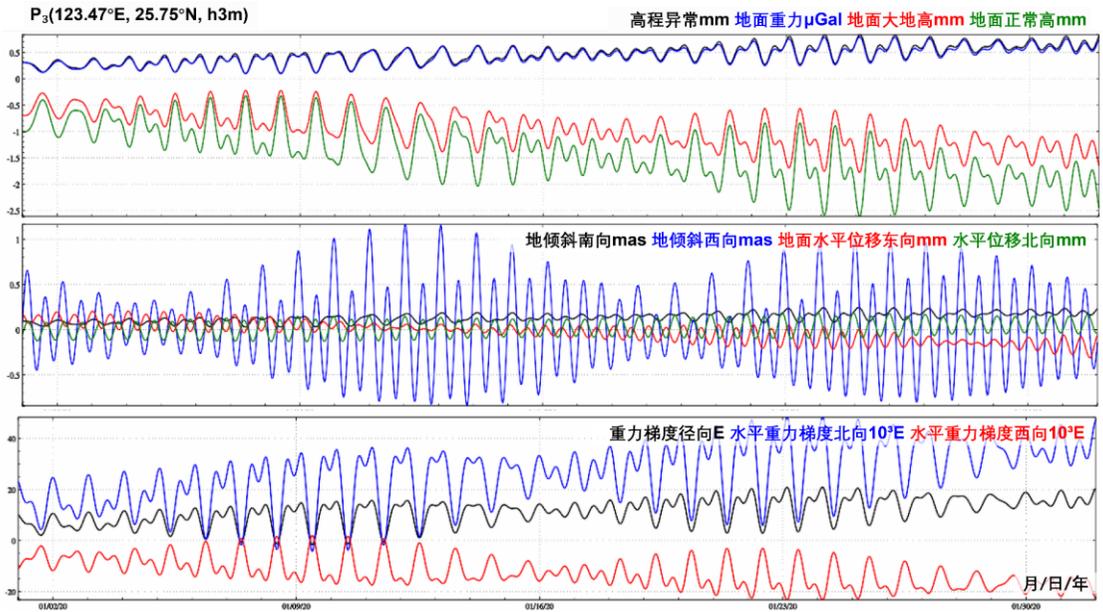


图 4.8 海岛 P_3 点大地测量全要素海潮负荷效应残差值时间序列

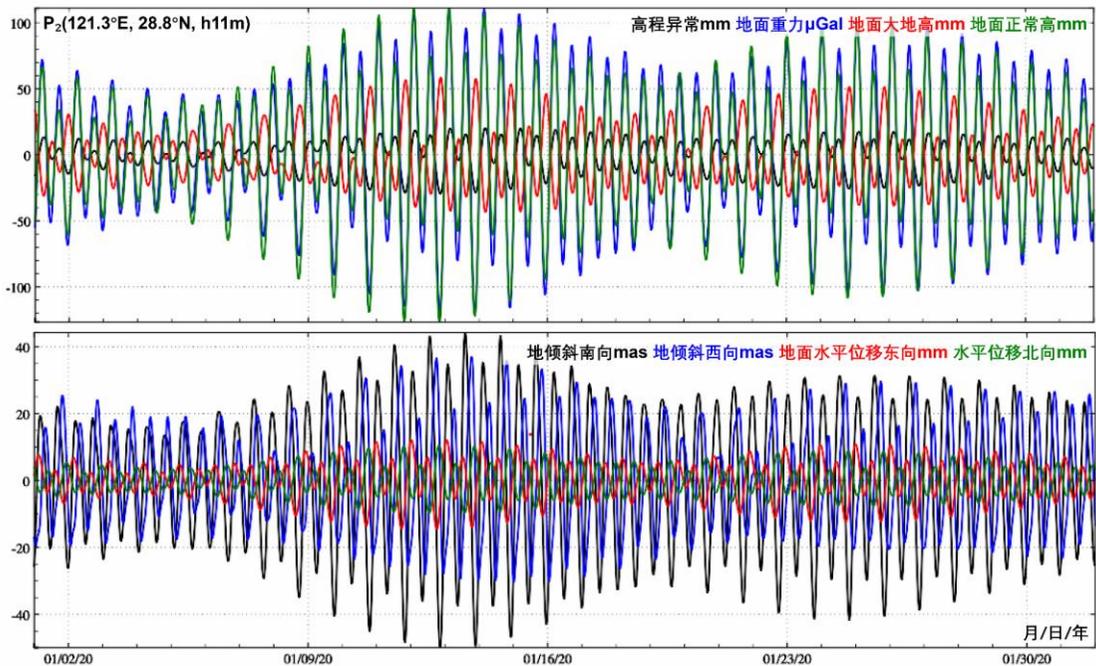


图 4.9 海岸 P_2 点各种大地测量海潮负荷效应精化值时间序列

顺便指出，重力梯度是扰动位的二阶微分量，正如 4.4 节指出，采用负荷格林积分法计算重力梯度海潮负荷效应的可靠性不足，图 4.7 和图 4.8 中重力梯度和水平重力梯度残差海潮负荷效应残差值时间序列只能作为参考。海岸带重力梯度的海潮负荷效应超短波绝对占优，残差负荷潮格林积分法重力梯度海潮负荷的计算结果发散，图 4.9 因此无法显示。精确计算重力梯度和水平重力梯度的海潮负荷效应，可采用类似 4.4 节的球面径向基函数逼近

法，具体实现技术细节比较繁杂。

全球地面大气压潮在空间域上中长波占优，360阶球谐系数模型能以足够精度逼近各种大地测量要素（除重力梯度外）的大气压潮负荷效应，在当前及今后一段时期内，一般无需进一步精化。

8.4.4 大地测量卫星各种潮汐摄动计算分析

类似于地面站点固体潮、负荷潮效应球谐综合计算，这里分别选择距离地球椭球面450km和250km高度（大地高）的两个空间点，前者模拟GRACE卫星轨道，后者模拟GOCE卫星轨道，分别计算两种卫星轨道的重力位（ $0.1\text{m}^2/\text{s}^2$ ）、重力（ μGal ）东北天三分量和重力梯度（ $10\mu\text{E}$ ）对角线东北天三分量的固体潮摄动、海潮负荷摄动和地面大气压潮负荷摄动。

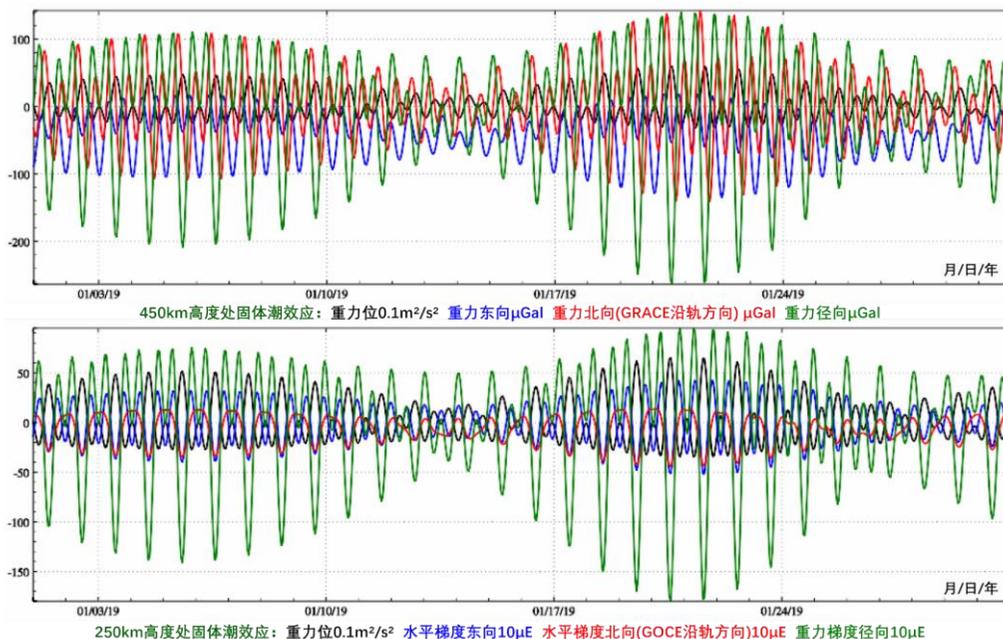


图 4.10 低轨卫星高度处固体潮效应时间序列

固体潮摄动或海潮负荷摄动计算时间跨度为2019年1月1日至2019年1月31日，时间间隔1小时，如图4.10和图4.11。地面大气压负荷摄动计算时间跨度为2018年1月1日至2019年12月31日，时间间隔4小时，如图4.12。其中，全球海潮负荷模型和地面大气压潮负荷模型分别采用360阶全球海潮负荷球谐系数（cm）模型FES2014b360cs.dat和360阶全球地面大气压潮负荷球谐系数（hPa）模型ECMWF2006n360cs.dat。

图4.10显示，GRACE卫星高度处，轨道重力位固体潮摄动最大最小值之差高达 $9.35\text{m}^2/\text{s}^2$ ，重力东北天三方向的最大最小值之差分别为 $156.5\mu\text{Gal}$ 、 $279.6\mu\text{Gal}$ 和 $412.0\mu\text{Gal}$ ；GOCE卫星高度处，轨道重力位固体潮摄动最大最小值之差高达 $10.22\text{m}^2/\text{s}^2$ ，重力梯度主对角线东北天三方向的最大最小值之差分别为 0.95mE 、 0.56mE 和 2.81mE 。

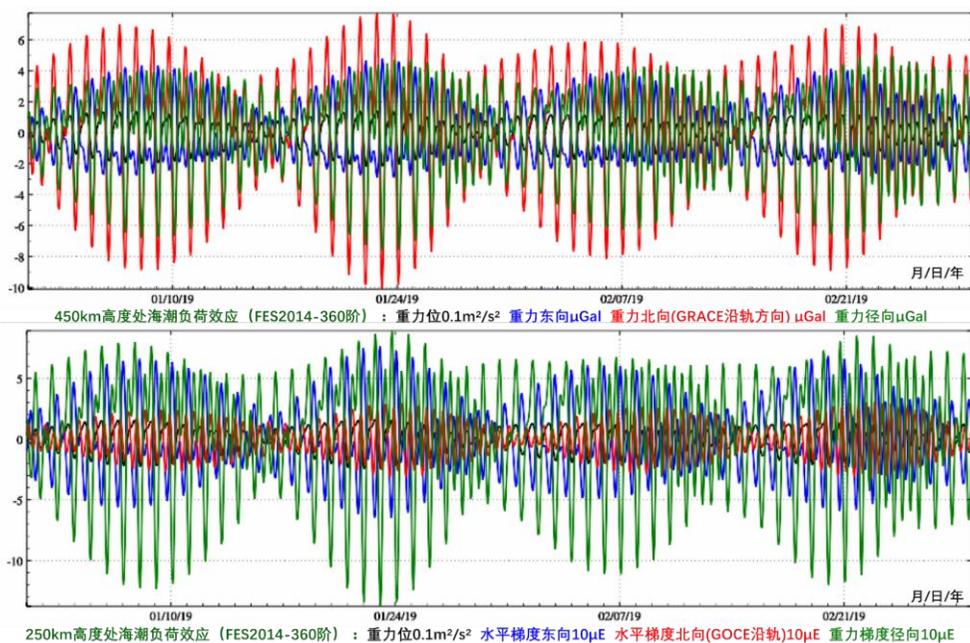


图 4.11 低轨卫星高度处海潮负荷效应时间序列

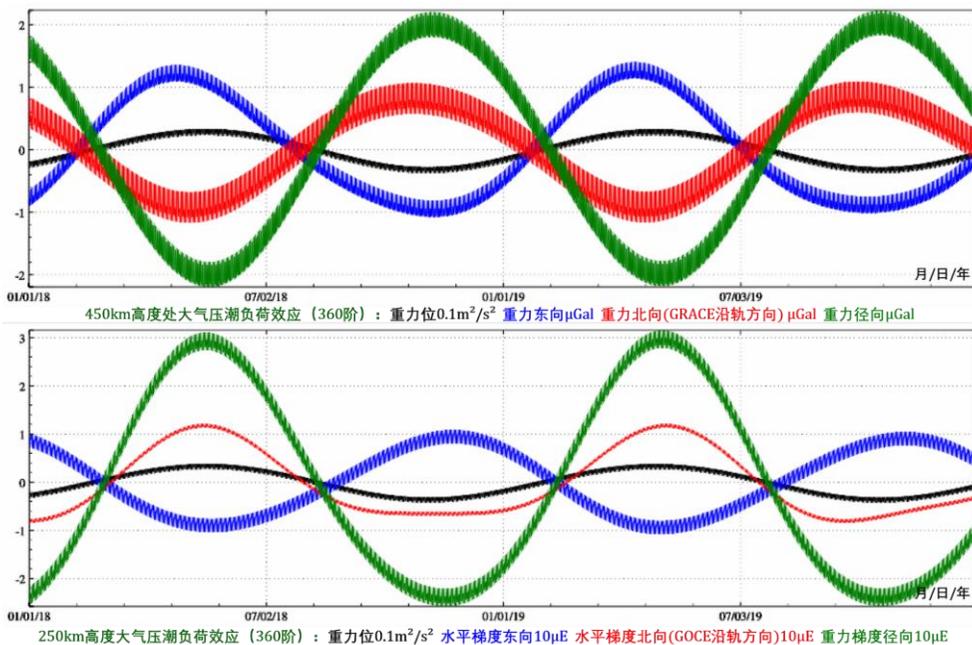


图 4.12 低轨卫星高度处地面大气压潮负荷效应时间序列

图 4.11 显示, GRACE 卫星高度处, 轨道重力位海潮负荷摄动最大最小值之差为 $0.38\text{m}^2/\text{s}^2$, 重力东北天三方向的最大最小值之差分别为 $86.5\mu\text{Gal}$ 、 $221.0\mu\text{Gal}$ 和 $234.7\mu\text{Gal}$; GOCE 卫星高度处, 轨道重力位海潮负荷摄动最大最小值之差为 $0.43\text{m}^2/\text{s}^2$, 重力梯度主对角线东北天三方向的最大最小值之差分别为 $149.7\mu\text{E}$ 、 $73.2\mu\text{E}$ 和 $236.6\mu\text{E}$ 。

图 4.12 显示, GRACE 卫星高度处, 轨道重力位地面大气压潮负荷摄动最大最小值之差

为 $0.071\text{m}^2/\text{s}^2$, 重力东北天三方向的最大最小值之差分别为 $24.8\mu\text{Gal}$ 、 $22.6\mu\text{Gal}$ 和 $44.3\mu\text{Gal}$; GOCE 卫星高度处, 轨道重力位地面大气压潮负荷摄动最大最小值之差为 $0.081\text{m}^2/\text{s}^2$, 重力梯度主对角线东北天三方向的最大最小值之差分别为 $21.7\mu\text{E}$ 、 $20.5\mu\text{E}$ 和 $57.3\mu\text{E}$ 。

8.5 地球质心变化与形状极移效应计算

地球质心与形状极坐标是几何物理性质兼备的重要大地测量要素。任意定位定向的地固坐标系中, 形变地球质心坐标可有该地固坐标系中的一阶地球重力位系数 $(\bar{C}_{10}, \bar{C}_{11}, \bar{S}_{11})$ 唯一确定, 力学形状极坐标可由该坐标系中 2 阶重力位系数 $(\bar{C}_{21}, \bar{S}_{21})$ 唯一确定。因此, 地球质心变化与形状极移的各种潮汐和非潮汐效应, 能通过大地测量实测方法精准获得, 可满足大地测量的计量学要求。

8.5.1 地球质心与形状极潮汐效应及计算

地球质心与形状极的潮汐效应分别由一阶和二阶一次地球重力位系数的潮汐效应决定。地球形状极的潮汐效应, 等于其固体潮效应和负荷潮效应的二阶周日潮波全部分潮效应的总和。

8.5.1.1 地球质心位置潮汐效应预报计算

固体潮理论基于天体引力与离心力平衡理论推导, 地球质心处天体的引潮力恒等于零, 大地测量学因此不具体研究固体潮产生的地球质心变化。海洋潮汐、地面大气压潮分别导致海水质量和大气密度的重新分布, 引起地球质心周期性变化。

8.4 节介绍了全球海潮负荷球谐系数模型、地面大气压潮负荷球谐系数模型的构建与负荷形变效应球谐综合算法公式。由负荷潮球谐系数模型中各分潮 σ_j 球谐系数的一阶项, 包括一阶项同相幅值和一阶项异相幅值, 可计算任意时刻该分潮 σ_j 引起的地球质心变化, 之后, 将负荷潮球谐系数模型中全部分潮对地球质心的贡献叠加, 就是任意时刻负荷潮引起的地球质心变化。

设分潮 σ_j 的一阶负荷球谐系数变化的同相幅值和异相幅值分别为 $(\Delta\bar{C}_{10}^{j+}, \Delta\bar{C}_{11}^{j+}, \Delta\bar{S}_{11}^{j+})$ 和 $(\Delta\bar{C}_{10}^{j-}, \Delta\bar{C}_{11}^{j-}, \Delta\bar{S}_{11}^{j-})$, 顾及一阶位负荷勒夫数恒等于零, $k_1' \equiv 0$, 则任意时刻 t , 全球海潮负荷或地面大气压潮负荷引起的地球质心变化可统一表示为:

$$\begin{cases} \Delta x_{cm}(t) = \sqrt{3}R \frac{\rho_w}{\rho_e} \sum_{j=1}^n [\Delta\bar{C}_{11}^{j+} \cos(\phi_j(t) + \varepsilon_j) + \Delta\bar{C}_{11}^{j-} \sin(\phi_j(t) + \varepsilon_j)] \\ \Delta y_{cm}(t) = \sqrt{3}R \frac{\rho_w}{\rho_e} \sum_{j=1}^n [\Delta\bar{S}_{11}^{j+} \cos(\phi_j(t) + \varepsilon_j) + \Delta\bar{S}_{11}^{j-} \sin(\phi_j(t) + \varepsilon_j)] \\ \Delta z_{cm}(t) = \sqrt{3}R \frac{\rho_w}{\rho_e} \sum_{j=1}^n [\Delta\bar{C}_{10}^{j+} \cos(\phi_j(t) + \varepsilon_j) + \Delta\bar{C}_{10}^{j-} \sin(\phi_j(t) + \varepsilon_j)] \end{cases} \quad (5.1)$$

式中: $\phi_j(t)$ 为 t 时刻分潮 σ_j 的天文幅角; ε_j 为分潮 σ_j 的相位偏差; n 为负荷潮球谐系数模型中分潮数量, 如 8.2.3 节构造的 720 阶海潮负荷球谐系数 (cm) 模型 FES2014b720cs.dat, 包含 36 个海洋分潮, 其中含一阶项的分潮有 34 个 ($n = 34$; 分潮 Ω_1, Ω_2 无一阶项)。如由 8.2.4 节构造的 360 阶全球地面大气压潮负荷球谐系数 (hPa) 模型 ECMWF2006n360cs.dat, 包含了周日、半日、周年和半年 4 个地面大气压分潮 ($n = 4$)。

采用 8.2.3 节 FES2014b720cs.dat 模型中 34 个分潮 1 阶负荷球谐系数变化的同相幅值和

异相幅值，计算 2020 年 1 月 1 日至 2020 年 1 月 31 日地球质心变化的海潮负荷效应，时间间隔 30 分钟，如图 5.1。

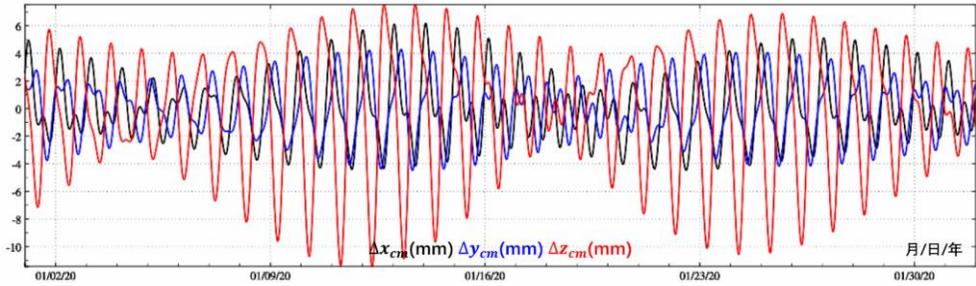


图 5.1 地球质心变化的海潮负荷效应时间序列

采用 8.2.4 节 ECMWF2006n360cs.dat 中 4 个分潮（半日、周日、半年、周年）一阶负荷球谐系数变化的同相幅值和异相幅值，预报 2025 年 1 月 1 日至 2026 年 12 月 31 日（2 年）地球质心变化的地面大气压潮负荷效应，如图 5.2。

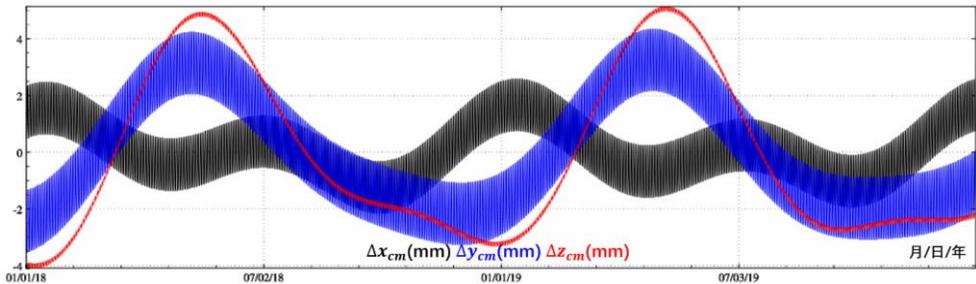


图 5.2 地球质心变化的大气压潮负荷效应时间序列

海潮与大气压潮，由于其潮汐调和常数模型分别基于海平面和地面大气压直接观测数据构造，一般都会包含地球质心变化的负荷潮效应。不同来源观测数据构造的海潮或大气压潮模型，地球质心变化的负荷潮效应不同。

8.5.1.2 形状极移各种潮汐效应预报计算

由二阶一次重力位系数变化 $(\Delta\bar{C}_{21}, \Delta\bar{S}_{21})$ ，结合位系数 $(\bar{C}_{20}, \bar{S}_{22})$ ，测定形状极移 $(\Delta x_{sfp}, -\Delta y_{sfp})$ 的严密算法公式为：

$$\Delta x_{sfp} = -\frac{\sqrt{3}b}{\bar{C}_{20}} \Delta\bar{C}_{21} - \frac{6\bar{S}_{22}b}{(\bar{C}_{20})^2} \Delta\bar{S}_{21}, \quad \Delta y_{sfp} = +\frac{\sqrt{3}b}{\bar{C}_{20}} \Delta\bar{S}_{21} - \frac{6\bar{S}_{22}b}{(\bar{C}_{20})^2} \Delta\bar{C}_{21} \quad (5.2)$$

式中： b 为地球椭球短半轴； $\bar{C}_{20}, \bar{S}_{22}$ 取近似平均值。

8.1 节中二阶一次位系数的固体潮效应，即二阶周日固体潮簇 $(\Delta\bar{C}_{21}, \Delta\bar{S}_{21})$ ，表征形状极的固体潮效应。自转微椭地球的二阶周日位勒夫数存在频率相关性（48 个二阶周日分潮位勒夫数频率校正，如表 1.7），分别由 48 个周日分潮的二阶一次位系数固体潮效应，计算其形状极移效应，再将这分潮的形状极移效应累加，就是任意时刻的形状极固体潮效应。

与地球质心负荷潮效应相同，可以导出由二阶一次负荷潮球谐系数，直接预报形状极移负荷潮效应的算法公式：

$$\Delta x_{sfp} = -\frac{3\rho_w b(1+k'_2)}{5\rho_e \bar{c}_{20}} \left(\begin{aligned} &\sqrt{3} \sum_{j=1}^n [\Delta \bar{C}_{21}^{j+} \cos(\phi_j(t) + \varepsilon_j) + \Delta \bar{C}_{21}^{j-} \sin(\phi_j(t) + \varepsilon_j)] \\ &+ \frac{6\bar{S}_{22}}{\bar{c}_{20}} \sum_{j=1}^n [\Delta \bar{S}_{21}^{j+} \cos(\phi_j(t) + \varepsilon_j) + \Delta \bar{S}_{21}^{j-} \sin(\phi_j(t) + \varepsilon_j)] \end{aligned} \right) \quad (5.3)$$

$$\Delta y_{sfp} = \frac{3\rho_w b(1+k'_2)}{5\rho_e \bar{c}_{20}} \left(\begin{aligned} &\sqrt{3} \sum_{j=1}^n [\Delta \bar{S}_{21}^{j+} \cos(\phi_j(t) + \varepsilon_j) + \Delta \bar{S}_{21}^{j-} \sin(\phi_j(t) + \varepsilon_j)] \\ &- \frac{6\bar{S}_{22}}{\bar{c}_{20}} \sum_{j=1}^n [\Delta \bar{C}_{21}^{j+} \cos(\phi_j(t) + \varepsilon_j) + \Delta \bar{C}_{21}^{j-} \sin(\phi_j(t) + \varepsilon_j)] \end{aligned} \right) \quad (5.4)$$

式中： $\Delta \bar{C}_{21}^{j+}, \Delta \bar{C}_{21}^{j-}, \Delta \bar{S}_{21}^{j+}, \Delta \bar{S}_{21}^{j-}$ 分别为第j个分潮二阶一次球谐系数的同相幅值和异相幅值； n 为负荷潮球谐系数模型中分潮数量，如海潮负荷球谐系数模型 FES2014b720cs.dat，包含 36 个海洋分潮。

按 8.2.3 节完全相同的数值标准与位系数海潮负荷效应算法，由 FES2014b720cs.dat 海潮负荷模型（36 个分潮），计算 2020 年 1 月 1 日至 2020 年 1 月 31 日形状极移海潮负荷效应时间序列（单位 m），时间间隔 30 分钟，如图 5.3。

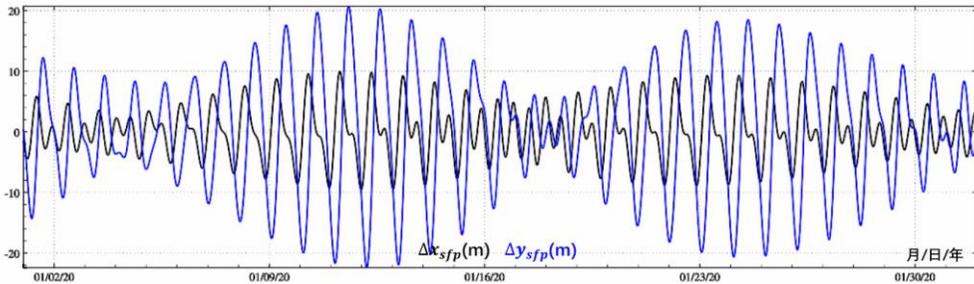


图 5.3 形状极移的海潮负荷效应时间序列

图 5.3 显示，地球形状极移的海潮负荷效应，以周日变化为主，1 个月时间内，最大最小值之差超过 40m。

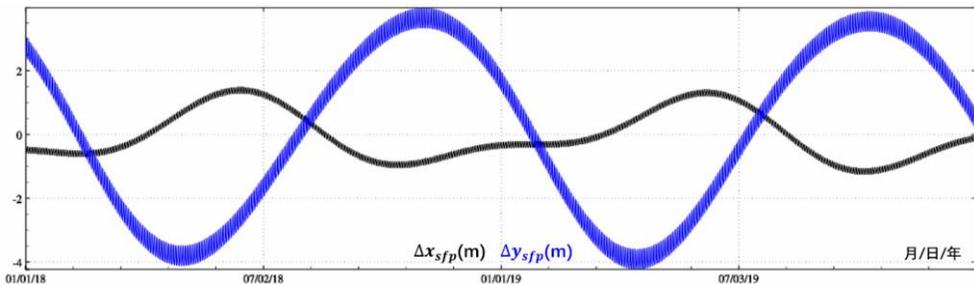


图 5.4 形状极移的地面大气压潮负荷效应时间序列

按 8.2.3 节相同的数值标准与位系数地面大气压潮负荷效应算法，由地面大气压潮负荷球谐系数模型 ECMWF2006n360cs.dat（半日、周日、半年、周年 4 个分潮），计算 2018 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日形状极移地面大气压潮负荷效应时序（单位 m），时间间隔 30 分钟，如图 5.4。

图 5.4 显示，地球形状极移的地面大气压潮负荷效应，短期内以周日变化为主，幅值为分米量级，年周期幅值大，最大最小值之差超过 7m。

8.5.2 地球质心与形状极非潮汐负荷效应

8.2 节介绍了地球重力场变化的非潮汐负荷球谐分析与球谐综合法方法及算法公式，包括海平面变化、地面大气压变化和陆地水变化负荷效应计算，其中，非潮汐负荷球谐模型中的一阶负荷球谐系数变化，可用于计算非潮汐负荷产生的地球质心变化；二阶一次负荷球谐系数变化，可用于计算非潮汐负荷产生的地球形状极移。

8.5.2.1 地球质心非潮汐负荷效应计算

设一阶非潮汐负荷球谐系数变化为 $(\Delta\bar{C}_{10}^w, \Delta\bar{C}_{11}^w, \Delta\bar{S}_{11}^w)$ ，顾及 $k_1' = 0$ ，可得地球质心变化的非潮汐负荷效应为：

$$\Delta x_{cm} = \sqrt{3}R \frac{\rho_w}{\rho_e} \Delta\bar{C}_{11}^w, \quad \Delta y_{cm} = \sqrt{3}R \frac{\rho_w}{\rho_e} \Delta\bar{S}_{11}^w, \quad \Delta z_{cm} = \sqrt{3}R \frac{\rho_w}{\rho_e} \Delta\bar{C}_{10}^w \quad (5.5)$$

直接由 8.2.4 节 2018 年 1 月至 2020 年 12 月海平面周变化负荷球谐系数模型时间序列中的一阶负荷球谐系数周变化 $(\Delta\bar{C}_{10}^{sea}, \Delta\bar{C}_{11}^{sea}, \Delta\bar{S}_{11}^{sea})$ 时间序列，按 (5.5) 式计算地球质心周变化时间序列（单位 mm，相对于 2018 年平均质心），结果如图 5.5。

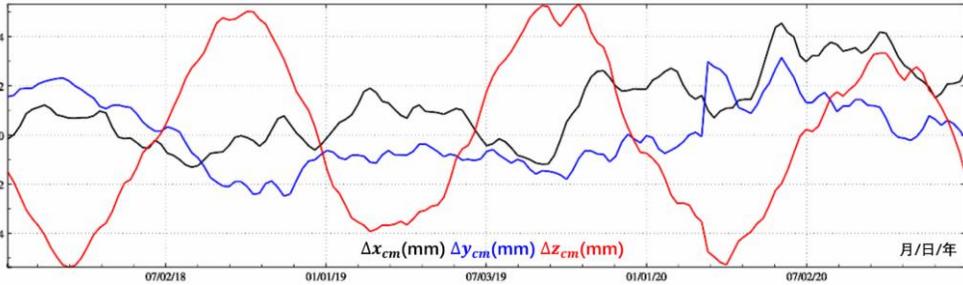


图 5.5 地球质心变化的海平面变化负荷效应-相对于 2018 年平均质心

直接由 8.2.5 节 2018 年 1 月至 2020 年 12 月地面大气压周变化负荷球谐系数模型时间序列中的一阶负荷球谐系数周变化 $(\Delta\bar{C}_{10}^{air}, \Delta\bar{C}_{11}^{air}, \Delta\bar{S}_{11}^{air})$ 时间序列，按 (5.5) 式计算地球质心周变化时间序列（单位 mm，相对于 2018 年平均质心），结果如图 5.6。

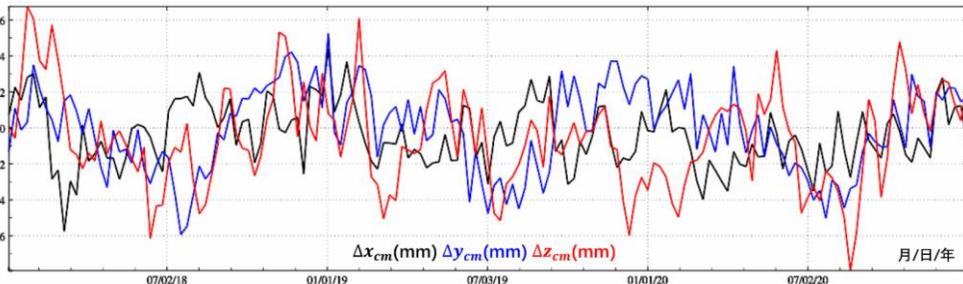


图 5.6 地球质心变化的地面大气压变化负荷效应-相对于 2018 年平均质心

直接由 8.2.6 节 2018 年 1 月至 2020 年 9 月全球陆地水周变化负荷球谐系数模型时间序列中的一阶负荷球谐系数周变化 $(\Delta\bar{C}_{10}^{lnd}, \Delta\bar{C}_{11}^{lnd}, \Delta\bar{S}_{11}^{lnd})$ 时间序列，按 (5.5) 式计算地球质心周变化时间序列（单位 mm，相对于 2018 年平均质心），结果如图 5.7。

图 5.5~图 5.7 显示，在地球质心变化的非潮汐负荷效应中，海平面变化负荷效应的最大最小值之差达到 10mm，陆地水负荷效应的最大最小值之差达到 5mm，地面大气压负荷效

应的最大最小值之差超过 10mm。

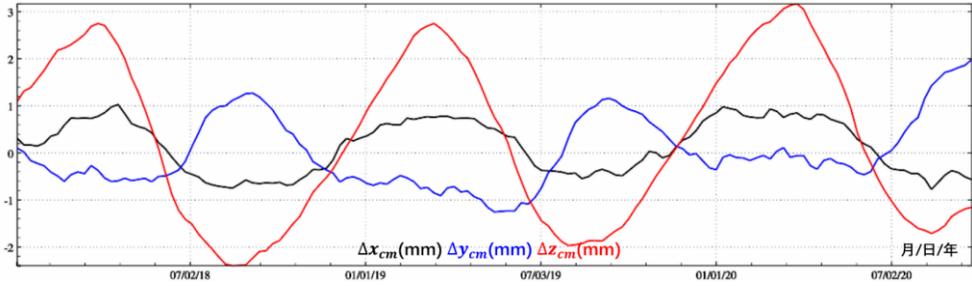


图 5.7 地球质心变化的陆地水变化负荷效应-相对于 2018 年平均质心

显然，若采样历元时刻一一对应，可将非潮汐海平面变化、地面大气压变化和全球陆地水变化球谐系数一阶项直接相加后，再按 (5.5) 式计算非潮汐地表环境负荷变化引起的地球质心变化；也可以将上述三种负荷变化引起的地球质心变化相加，得到非潮汐地表环境负荷变化引起的地球质心变化。两者结果等价。

8.5.2. 形状极移非潮汐负荷效应计算

由二阶一次位系数变化 $(\Delta\bar{C}_{21}, \Delta\bar{S}_{21})$ 表示的二阶一次非潮汐负荷球谐系数变化 $(\Delta\bar{C}_{21}^w, \Delta\bar{S}_{21}^w)$ 算法公式为：

$$\Delta\bar{C}_{21} = \frac{3\rho_w}{5\rho_e} (1 + k_2') \Delta\bar{C}_{21}^w, \quad \Delta\bar{S}_{21} = \frac{3\rho_w}{5\rho_e} (1 + k_2') \Delta\bar{S}_{21}^w \quad (5.6)$$

代入 (5.2) 式，可得由二阶一次非潮汐负荷球谐系数变化 $(\Delta\bar{C}_{21}^w, \Delta\bar{S}_{21}^w)$ 计算形状极移的非潮汐负荷效应算法公式

$$\Delta x_{sfp} = -\frac{3\rho_w}{5\rho_e} \frac{b}{c_{20}} (1 + k_2') \left(\sqrt{3} \Delta\bar{C}_{21}^w + \frac{6\bar{S}_{22}}{c_{20}} \Delta\bar{S}_{21}^w \right) \quad (5.7)$$

$$\Delta y_{sfp} = +\frac{3\rho_w}{5\rho_e} \frac{b}{c_{20}} (1 + k_2') \left(\sqrt{3} \Delta\bar{S}_{21}^w - \frac{6\bar{S}_{22}}{c_{20}} \Delta\bar{C}_{21}^w \right) \quad (5.8)$$

由 8.2.4 节 2018 年 1 月至 2020 年 12 月海平面周变化负荷球谐系数模型中的 2 阶 1 次球谐系数 $(\Delta\bar{C}_{21}^{sea}, \Delta\bar{S}_{21}^{sea})$ 周变化时间序列，按 (5.7) 和 (5.8) 式，计算形状极移海平面变化负荷效应时间序列（单位 m，相对于 2018 年平均形状极），如图 5.8。

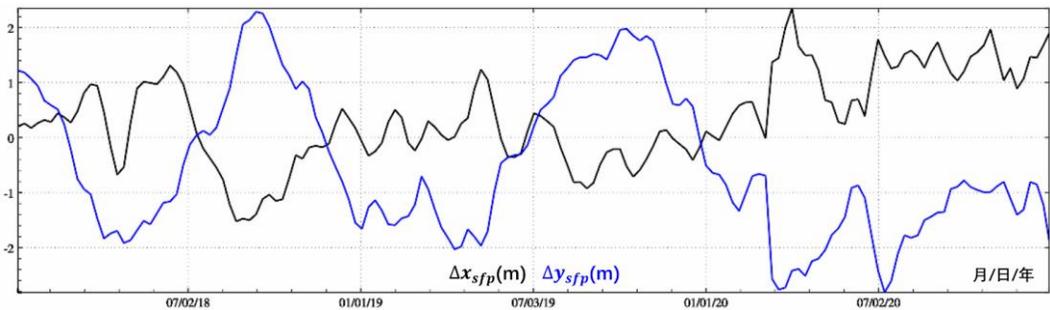


图 5.8 形状极移的海平面变化负荷效应-相对于 2018 年平均形状极

由 8.2.5 节 2018 年 1 月至 2020 年 12 月全球地面大气压周变化负荷球谐系数模型中的 2 阶 1 次负荷球谐系数变化 $(\Delta\bar{C}_{21}^{air}, \Delta\bar{S}_{21}^{air})$ 周变化时间序列，按 (5.7) 和 (5.8) 式，计算形状极移地面大气压负荷效应时间序列（单位 m，相对于 2018 年平均形状极），如图 5.9。

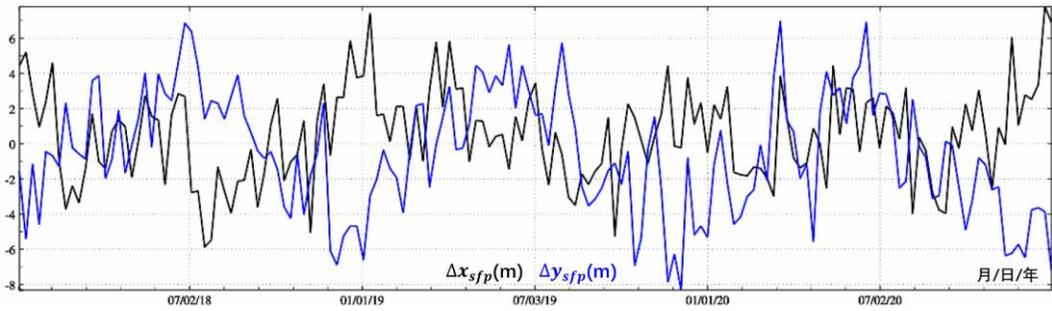


图 5.9 形状极移的大气压变化负荷效应-相对于 2018 年平均形状极

由 8.2.5 节 2018 年 1 月至 2020 年 9 月全球陆地水周变化负荷球谐系数模型中 2 阶 1 次球谐系数($\Delta\bar{C}_{21}^{lnd}, \Delta\bar{S}_{21}^{lnd}$)周变化时间序列, 按 (5.7) 和 (5.8) 式, 计算形状极移陆地水变化负荷效应时间序列 (单位 m, 相对于 2018 年平均形状极), 如图 5.10。

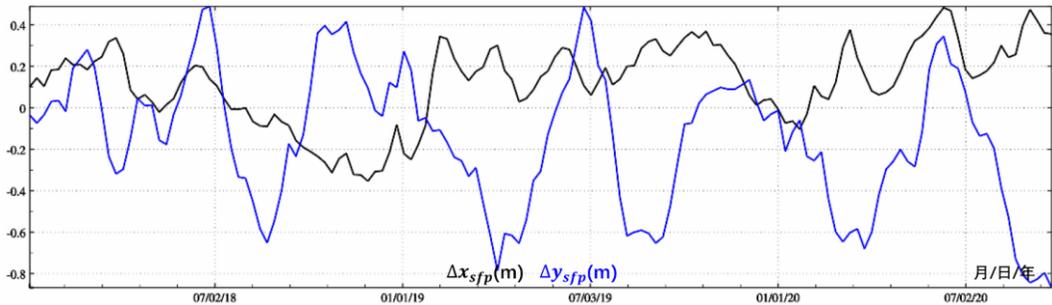


图 5.10 形状极移的陆地水变化负荷效应-相对于 2018 年平均形状极

统计结果显示, 地球形状极移负荷效应中, 海平面变化负荷效应的最大最小值之差超过 4m, 陆地水负荷效应最大最小值之差达到 1.2m, 地面大气压负荷效应最大, 其最大最小值之差超过 14m。

8.5.3 大地测量要素地球质心变化效应计算

地球质心坐标是具有全球空间尺度的大地测量要素 (地球质心是地球力学平衡形状的一阶项), 表征了地球的球形状。由 SLR 测定的地球质心变化, 一般移去了海潮负荷效应与地面大气压负荷效应, 代表了非潮汐负荷变化导致的整个地球系统形变, 因而影响地球空间中各种几何物理大地测量要素, 而不是简单地表现为纯几何量的站点位移。

地球质心变化($\Delta x_{cm}, \Delta y_{cm}, \Delta z_{cm}$)可通过测定一阶位系数变化($\Delta\bar{C}_{10}, \Delta\bar{C}_{11}, \Delta\bar{S}_{11}$)按下式确定:

$$\Delta x_{cm} = \sqrt{3}R\Delta\bar{C}_{11}, \quad \Delta y_{cm} = \sqrt{3}R\Delta\bar{S}_{11}, \quad \Delta z_{cm} = \sqrt{3}R\Delta\bar{C}_{10} \quad (5.9)$$

在式 (2.8) ~ (2.20) 中, 令 $n=1$, 顾及 $\bar{P}_{10}(\cos\theta) = \sqrt{3}\cos\theta$, $\bar{P}_{11}(\cos\theta) = \sqrt{3}\sin\theta$, 就可获得由实测地球质心变化, 计算各种大地测量要素地球质心变化效应的算法公式。其中, 地面或地球外部空间点(r, θ, λ)处高程异常地球质心变化效应算法公式为:

$$\Delta\zeta(r, \theta, \lambda) = \frac{GM}{\gamma R^2} a (\Delta x_{cm} \cos\lambda \sin\theta + \Delta y_{cm} \sin\lambda \sin\theta + \Delta z_{cm} \cos\theta) \quad (5.10)$$

地面重力地球质心变化效应算法公式⊙

$$\Delta g^s(r, \theta, \lambda) = \frac{2GM}{r^3} \frac{a}{R} (1 + 2h'_1)(\Delta x_{cm} \cos \lambda \sin \theta + \Delta y_{cm} \sin \lambda \sin \theta + \Delta z_{cm} \cos \theta) \quad (5.11)$$

式中: h'_1 为 1 阶径向负荷勒夫数。

地面或地球外部空间点 (r, θ, λ) 处扰动重力地球质心变化效应算法公式:

$$\Delta g^\delta(r, \theta, \lambda) = \frac{2GM}{r^3} \frac{a}{R} (\Delta x_{cm} \cos \lambda \sin \theta + \Delta y_{cm} \sin \lambda \sin \theta + \Delta z_{cm} \cos \theta) \quad (5.12)$$

地倾斜地球质心变化效应算法公式 \odot

南向: $\Delta \xi^s(r, \theta, \lambda) =$

$$\frac{GM}{\gamma r^3} \frac{a}{R} \sin \theta (1 - h'_1)(\Delta x_{cm} \cos \theta \cos \lambda + \Delta y_{cm} \sin \theta \sin \lambda - \Delta z_{cm} \sin \theta) \quad (5.13)$$

$$\text{西向: } \Delta \eta^s(r, \theta, \lambda) = \frac{GM}{\gamma r^3} \frac{a}{R} (1 - h'_1)(\Delta x_{cm} \sin \lambda - \Delta y_{cm} \cos \lambda) \quad (5.14)$$

垂线偏差地球质心变化效应算法公式

$$\text{南向: } \Delta \xi^s = \frac{GM}{\gamma r^3} \frac{a}{R} \sin \theta (\Delta x_{cm} \cos \theta \cos \lambda + \Delta y_{cm} \sin \theta \sin \lambda - \Delta z_{cm} \sin \theta) \quad (5.15)$$

$$\text{西向: } \Delta \eta^s(r, \theta, \lambda) = \frac{GM}{\gamma r^3} \frac{a}{R} (\Delta x_{cm} \sin \lambda - \Delta y_{cm} \cos \lambda) \quad (5.16)$$

地面站点 (r, θ, λ) 位移地球质心变化效应算法公式 \odot

$$\text{东向: } \Delta e(r, \theta, \lambda) = -\frac{GM}{r^2 \gamma R} l'_1 (\Delta x_{cm} \sin \lambda - \Delta y_{cm} \cos \lambda) \quad (5.17)$$

$$\text{北向: } \Delta n = -\frac{GM}{r^2 \gamma R} l'_1 \sin \theta (\Delta x_{cm} \cos \theta \cos \lambda + \Delta y_{cm} \cos \theta \sin \lambda - \Delta z_{cm} \sin \theta) \quad (5.18)$$

$$\text{径向: } \Delta r(r, \theta, \lambda) = \frac{GM}{r^2 \gamma R} h'_1 (\Delta x_{cm} \cos \lambda \sin \theta + \Delta y_{cm} \sin \lambda \sin \theta + \Delta z_{cm} \cos \theta) \quad (5.19)$$

地面或固体地球外部重力梯度地球质心变化效应 (径向) 表达式

$$\Delta T_{rr}(r, \theta, \lambda) = \frac{6GM}{r^4} \frac{a}{R} (\Delta x_{cm} \cos \lambda \sin \theta + \Delta y_{cm} \sin \lambda \sin \theta + \Delta z_{cm} \cos \theta) \quad (5.20)$$

地面或固体地球外部水平重力梯度地球质心变化效应表达式

$$\text{北向: } \Delta T_{NN}(r, \theta, \lambda) = \frac{GM}{r^4} \frac{a}{R} (\Delta x_{cm} \cos \lambda \sin \theta + \Delta y_{cm} \sin \lambda \sin \theta + \Delta z_{cm} \cos \theta) \quad (5.21)$$

$$\text{西向: } \Delta T_{WW}(r, \theta, \lambda) = \frac{GM}{r^4} \frac{a}{R} (\Delta x_{cm} \sin \lambda + \Delta y_{cm} \cos \lambda) \quad (5.22)$$

在式 (5.10) ~ (5.22) 中, 凡标注 \odot 的大地测量要素 (观测量或参数), 只有其点位与地球固连情况下有效。

这里, 利用美国德克萨斯大学空间研究中心 UT/CSR 采用 LAGEOS-1/2, Stella, Starlette, AJISAI, BEC 和 LARES 共 7 颗卫星激光测距 (SLR), 实际测定的地球质心月变化时间序列 (采用一维样条插值), 取地球平均半径 $R = 6371000\text{m}$, $h'_1 = -0.2871$, $l'_1 = 0.1045$, 按 (5.10) ~ (5.22) 式计算地面点 $P(105^\circ E, 32^\circ N, H720\text{m})$ 处, 各种大地测量要素地球质心变化效应时间序列, 如图 5.11、图 5.12。时间跨度 2018 年 1 月至 2022 年 12 月 (共 5 年)。

图 5.11 中显示, 地球质心变化对大地水准面和地面正 (常) 高的影响最为显著, 最大最小值之差可达 10mm。表现在数值上, 地球质心变化与其对大地水准面的影响一般有近似相同的数量级, 而对地面站点位移的影响一般不大于地球质心变化的 1/5。

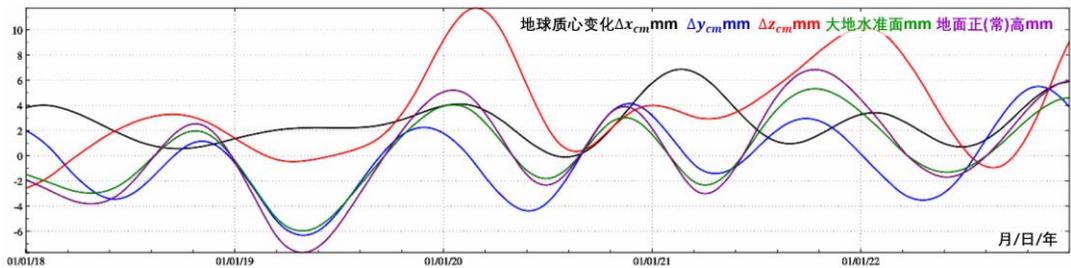


图 5.11 地球质心变化及其对大地水准面与地面正常高的影响

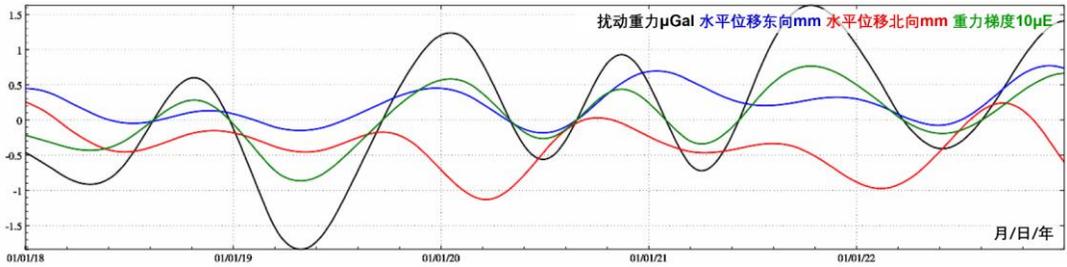


图 5.12 各种大地测量要素地球质心变化效应时间序列

地球质心在现实地球本体中，客观存在且唯一，是典型的大地测量要素，可以直接测定其在地固坐标系中的坐标。一些文献中常见的地壳形状中心（地面参考框架网中心）与固体地球质心概念，存在虚构或约定性质，不具有唯一性与可测性，不符合作为地固坐标参考系基准的技术条件，也不满足大地测量学的计量学要求。

此外，地球质心变化效应，客观存在于各种大地测量要素的监测量中，而地壳形状中心是虚构的，大地测量要素不受这种虚构概念的影响。建议淡化或尽量少用地壳形状中心和固体地球质心概念，只保留（瞬时、平均）地球质心概念。在负荷格林函数积分与负荷球谐综合计算时，也只考虑地球质心负荷效应，一阶位负荷勒夫数因此恒等于零，即 $k'_1 \equiv 0$ 。

一阶位移负荷勒夫数 h'_1 和 l'_1 的准确性有重要价值，目前的推荐值还需要进一步验证，今后应在唯一不变的地固坐标系中（基准的唯一性），由全球地面参考框架多年坐标解时间序列，精化固体地球的 1 阶位移负荷勒夫数 h'_1 和 l'_1 。

8.5.4 大地测量要素地球形状极移效应计算

形状极移($\Delta x_{sfp} = b\Delta\mu_1, \Delta y_{sfp} = -b\Delta\mu_2$)可通过测定二阶一次位系数化($\Delta\bar{C}_{20}, \Delta\bar{C}_{21}$)按下式确定：

$$\Delta\mu_1 = \frac{\Delta x_{sfp}}{b} = -\frac{\sqrt{3}}{c_{20}} \Delta\bar{C}_{21}, \quad \Delta\mu_2 = -\Delta y_{sfp}/b = -\frac{\sqrt{3}}{c_{20}} \Delta\bar{S}_{21} \quad (5.23)$$

式中：位系数 \bar{C}_{20} 、 \bar{S}_{22} 取一段时间平均值。

由 (5.23) 式，可得：

$$\Delta\bar{C}_{21} = -\frac{\bar{C}_{20}}{\sqrt{3}b} \Delta x_{sfp}, \quad \Delta\bar{S}_{21} = \frac{\bar{C}_{20}}{\sqrt{3}b} \Delta y_{sfp} \quad (5.24)$$

将式 (5.24) 代入 (5.6) 式，并整理得：

$$\Delta\bar{C}_{21}^w = -\frac{5\bar{C}_{20}}{3\sqrt{3}b} \frac{\rho_e}{(1+k'_2)\rho_w} \Delta x_{sfp}, \quad \Delta\bar{S}_{21}^w = \frac{5\bar{C}_{20}}{3\sqrt{3}b} \frac{\rho_e}{(1+k'_2)\rho_w} \Delta y_{sfp} \quad (5.25)$$

再将式(5.25)代入(2.8)~(2.20)式,并令 $n = 2, m = 1$,顾及 $\bar{P}_{nm}(\cos\theta) = \sqrt{15}\sin\theta\cos\theta$,就可得到由实测形状极移 $(\Delta x_{sfp}, \Delta y_{sfp})$,计算大地测量要素形状极移效应的公式。其中,地面或固体地球外部高程异常形状极移效应算法公式为:

$$\Delta\zeta(r, \theta, \lambda) = -\frac{\sqrt{5}GMa^2 \bar{c}_{20}}{2\gamma r^3 b} (\Delta x_{sfp} \cos\lambda - \Delta y_{sfp} \sin\lambda) \sin 2\theta \quad (5.26)$$

式中: GM 为地心引力常数; γ 为计算点 (r, θ, λ) 正常重力; b 为椭球短半轴; \bar{c}_{20} 为二阶带谐位系数,取近似平均值。

地面站点重力形状极移效应算法公式 \odot

$$\Delta g^s(r, \theta, \lambda) = -\frac{3\sqrt{5}GMa^2 \bar{c}_{20}}{2r^4 b} \frac{1 - \frac{3k'_2 + h'_2}{2}}{1 + k'_2} (\Delta x_{sfp} \cos\lambda - \Delta y_{sfp} \sin\lambda) \sin 2\theta \quad (5.27)$$

式中: k'_2, h'_2 分别为二阶位负荷勒夫数和二阶径向负荷勒夫数。

地面或固体地球外部扰动重力形状极移效应算法公式

$$\Delta g^\delta(r, \theta, \lambda) = -\frac{3\sqrt{5}GMa^2 \bar{c}_{20}}{2r^4 b} (\Delta x_{sfp} \cos\lambda - \Delta y_{sfp} \sin m\lambda) \sin 2\theta \quad (5.28)$$

地倾斜形状极移效应算法公式 \odot

$$\text{南向: } \Delta\xi^s(r, \theta, \lambda) = -\frac{\sqrt{5}GMa^2 \bar{c}_{20}}{\gamma r^4 b} \frac{1 + k'_2 - h'_2}{1 + k'_2} (\Delta x_{sfp} \sin\lambda + \Delta y_{sfp} \cos\lambda) \cos\theta \quad (5.29)$$

$$\text{西向: } \Delta\eta^s(r, \theta, \lambda) = -\frac{\sqrt{5}GMa^2 \bar{c}_{20}}{\gamma r^4 b} \frac{1 + k'_2 - h'_2}{1 + k'_2} (\Delta x_{sfp} \cos\lambda - \Delta y_{sfp} \sin\lambda) \sin\theta \cos 2\theta \quad (5.30)$$

地面或固体地球外部垂线偏差形状极移效应算法公式

$$\text{南向: } \Delta\xi(r, \theta, \lambda) = -\frac{\sqrt{5}GMa^2 \bar{c}_{20}}{\gamma r^4 b} (\Delta x_{sfp} \sin\lambda + \Delta y_{sfp} \cos\lambda) \cos\theta \quad (5.31)$$

$$\text{西向: } \Delta\eta(r, \theta, \lambda) = -\frac{\sqrt{5}GMa^2 \bar{c}_{20}}{\gamma r^4 b} (\Delta x_{sfp} \cos\lambda - \Delta y_{sfp} \sin\lambda) \sin\theta \cos 2\theta \quad (5.32)$$

地面站点位移形状极移效应算法公式 \odot

$$\text{东向: } \Delta n(r, \theta, \lambda) = \frac{\sqrt{5}GMa^2 \bar{c}_{20}}{\gamma r^3 b} \frac{l'_2}{1 + k'_2} (\Delta x_{sfp} \cos\lambda - \Delta y_{sfp} \sin\lambda) \sin\theta \cos 2\theta \quad (5.33)$$

$$\text{北向: } \Delta e(r, \theta, \lambda) = \frac{\sqrt{5}GMa^2 \bar{c}_{20}}{\gamma r^3 b} \frac{l'_2}{1 + k'_2} (\Delta x_{sfp} \sin\lambda + \Delta y_{sfp} \cos\lambda) \cos\theta \quad (5.34)$$

$$\text{径向: } \Delta r(r, \theta, \lambda) = -\frac{\sqrt{5}GMa^2 \bar{c}_{20}}{2\gamma r^3 b} \frac{h'_2}{1 + k'_2} (\Delta x_{sfp} \cos\lambda - \Delta y_{sfp} \sin\lambda) \sin 2\theta \quad (5.35)$$

式中: l'_2 为二阶水平负荷勒夫数。

地面或固体地球外部重力梯度形状极移效应算法公式

$$\Delta T_{rr}(r, \theta, \lambda) = -\frac{6\sqrt{5}GMa^2 \bar{c}_{20}}{r^5 b} (\Delta x_{sfp} \cos\lambda - \Delta y_{sfp} \sin\lambda) \sin 2\theta \quad (5.36)$$

地面或地球外部水平梯度形状极移效应算法公式

$$\text{北向: } \Delta T_{NN}(r, \theta, \lambda) = \frac{2\sqrt{5}GMa^2 \bar{c}_{20}}{r^5 b} (\Delta x_{sfp} \cos\lambda - \Delta y_{sfp} \sin\lambda) \sin 2\theta \quad (5.37)$$

$$\text{西向: } \Delta T_{WW}(r, \theta, \lambda) = -\frac{\sqrt{5}GMa^2 \bar{c}_{20}}{r^5 b} (\Delta x_{sfp} \cos\lambda - \Delta y_{sfp} \sin\lambda) \text{ctg}\theta \quad (5.38)$$

这里,利用美国德克萨斯大学空间研究中心 UT/CSR 采用 LAGEOS-1/2, Stella, Starlette, AJISAI, BEC 和 LARES 共 7 颗卫星激光测距 (SLR), 实际测定的二阶一次位系数月变化时间

序列（采用一维样条插值，移去 5 年平均值），计算地球形状极坐标变化 $(\Delta x_{sfp}, \Delta y_{sfp})$ 时间序列，如图 5.13。

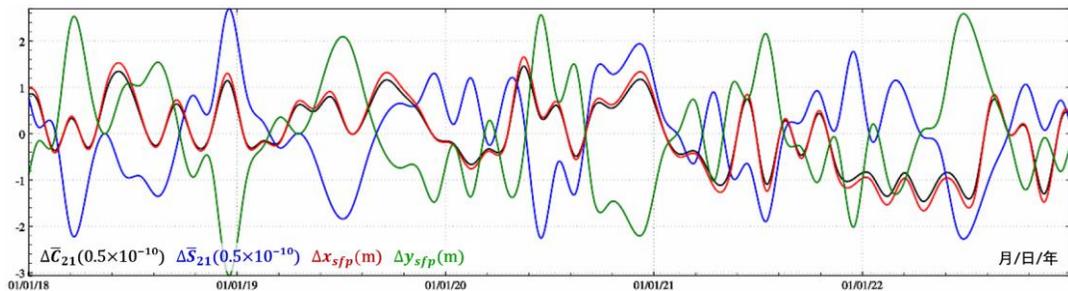


图 5.13 SLR 实测二阶一次位系数变化与形状极坐标变化时间序列

取二阶负荷勒夫数 $k'_2 = -0.3058$ ， $h'_2 = -0.9946$ ， $l'_2 = 0.0241$ ，椭球短半轴 $b = 6356751.655\text{m}$ ，二阶带谐位系数 $\bar{C}_{20} = -4.84165 \times 10^{-4}$ 。由形状极坐标变化 $(\Delta x_{sfp}, \Delta y_{sfp})$ 时间序列，按 (5.26) ~ (5.38) 式，计算地面点 $P(105.0^\circ E, 32.0^\circ N, H720\text{m})$ 处，各种大地测量要素的形状极移效应时间序列，如图 5.14。时间跨度 2018 年 1 月至 2022 年 12 月（共 5 年）。

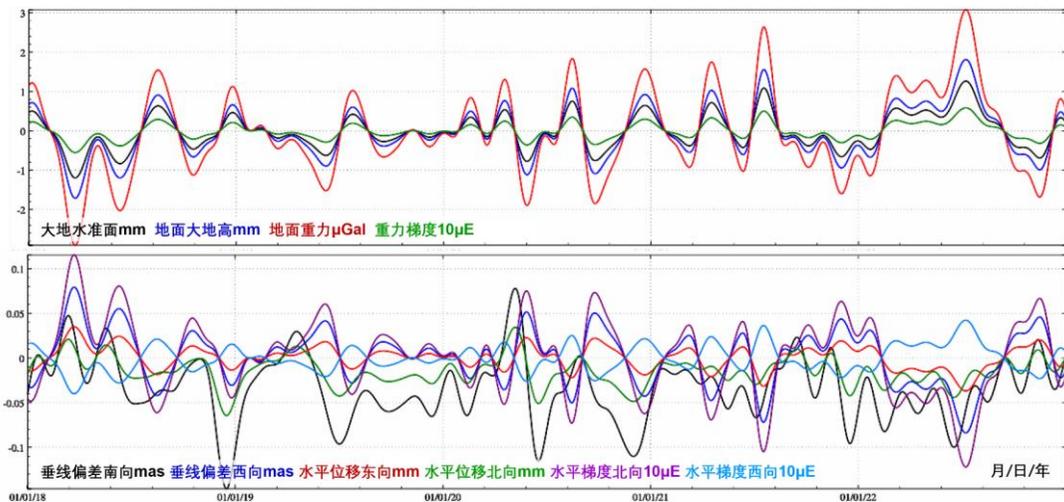


图 5.14 各种大地测量要素形状极移效应时间序列

图 5.14 显示，虽然地球形状极移本身可达米级，但由此导致的大地水准面形状极移效应也不大于 2mm。形状极移对地面站点水平位移、垂线偏差或水平梯度等水平大地测量要素的影响很小，一般可以忽略。

8.6 自转极移效应与自转参数潮汐效应

瞬时自转轴与平均形状轴不一致，导致地球自转产生离心力位，固体地球在离心力位作用下产生形变，引起地球内部质量重新分布，产生附加离心力位。大地测量要素的自转极移效应等于离心力位的直接影响与间接影响之和。

8.6.1 大地测量要素自转极移形变效应

地球自转极移引起地球空间的离心力位变化，就是地球自转对重力位变化的直接影响，可用自转极移对二阶田谐位系数变化的直接影响表示，顾及长期勒夫数 k_0 与二阶带谐位系数 \bar{C}_{20} 关系式，有

$$\Delta\bar{C}_{21}^{dr} + i\Delta\bar{S}_{21}^{dr} = \frac{\sqrt{3}}{k_0}\bar{C}_{20}(m_1 + im_2) = -\frac{1}{\sqrt{15}}\frac{\omega^2 a^3}{GM}m \quad (6.1)$$

式中： $m = m_1 + im_2$ 为自转极移复数形式（弧度单位）； ω 为地球自转角速率。

自转极移引起的离心力位变化，进一步导致固体地球形变，产生附加离心力位，通常用二阶周日体潮勒夫数表征，自转极移离心力位对二阶田谐重力位系数的间接影响为：

$$\Delta\bar{C}_{21}^{in} + i\bar{S}_{21}^{in} = \frac{\sqrt{3}k_{21}}{k_0}\bar{C}_{20}m = -\frac{1}{\sqrt{15}}\frac{\omega^2 a^3}{GM}k_{21}m \quad (6.2)$$

二阶田谐位系数的自转极移形变效应等于离心力位的直接影响（非保守力位）与间接影响（保守力位）之和，也即：

$$\Delta\bar{C}_{21} + i\Delta\bar{S}_{21} = (\Delta\bar{C}_{21}^{dr} + \Delta\bar{C}_{21}^{in}) + i(\bar{S}_{21}^{dr} + \bar{S}_{21}^{in}) = -\frac{1}{\sqrt{15}}\frac{\omega^2 a^3}{GM}(1 + k_{21})m \quad (6.3)$$

类似于固体潮效应算法公式推导过程，可得各种大地测量要素的地球自转形变效应算法公式。顾及 $\bar{P}_{21}(\cos\theta) = \sqrt{15}\sin\theta\cos\theta$ ，地面或固体地球外部高程异常自转形变效应的算法公式为：

$$\begin{aligned} \Delta\zeta(r, \theta, \lambda) &= \frac{GM}{\gamma r} \left(\frac{a}{r}\right)^2 (1 + k_{21})(\Delta\bar{C}_{21}^{dr}\cos\lambda + \Delta\bar{S}_{21}^{dr}\sin\lambda)\bar{P}_{21}(\cos\theta) \\ &= -\frac{\omega^2 a^5}{2\gamma r^3}(1 + k_{21})m^*e^{i\lambda}\sin 2\theta \end{aligned} \quad (6.4)$$

式中： γ 为计算点正常重力； $e^{i\lambda} = \cos\lambda + i\sin\lambda$ ； $m^* = m_1 - im_2$ 为自转极移 m 的复共轭。

同理，地面重力自转形变效应算法公式 \odot

$$\Delta g^s = -\frac{3}{2}\frac{\omega^2 a^5}{r^4}\left(1 - \frac{3}{2}k_{21} + h_{21}\right)m^*e^{i\lambda}\sin 2\theta \quad (6.5)$$

地面或固体地球外部扰动重力自转形变效应的算法公式

$$\Delta g^\delta = -\frac{3}{2}\frac{\omega^2 a^5}{r^4}(1 + k_{21})m^*e^{i\lambda}\sin 2\theta \quad (6.6)$$

地倾斜自转形变效应算法公式 \odot

$$\text{南向：}\delta\xi^s = -\frac{\omega^2 a^5}{\gamma r^4}(1 + k_{21} - h_{21})m^*e^{i\lambda}\sin\theta\cos 2\theta \quad (6.7)$$

$$\text{西向：}\delta\eta^s = -\frac{\omega^2 a^5}{\gamma r^4}(1 + k_{21} - h_{21})m^*e^{i(\lambda-\pi/2)}\cos\theta \quad (6.8)$$

地面或固体地球外部垂线偏差自转形变效应算法公式

$$\text{南向：}\Delta\xi = -\frac{\omega^2 a^5}{\gamma r^4}(1 + k_{21})m^*e^{i\lambda}\sin\theta\cos 2\theta \quad (6.9)$$

$$\text{西向：}\Delta\eta = -\frac{\omega^2 a^5}{\gamma r^4}(1 + k_{21})m^*e^{i(\lambda-\pi/2)}\cos\theta \quad (6.10)$$

地面站点位移自转形变效应算法公式 \odot

$$\text{东向：}\Delta e = \frac{\omega^2 a^5}{\gamma r^3}l_{21}m^*e^{i(\lambda-\pi/2)}\cos\theta \quad (6.11)$$

$$\text{北向: } \Delta n = \frac{\omega^2 a^5}{\gamma r^3} l_{21} m^* e^{i\lambda} \sin\theta \cos 2\theta \quad (6.12)$$

$$\text{径向: } \Delta r = -\frac{\omega^2 a^5}{2\gamma r^3} h_{21} m^* e^{i\lambda} \sin 2\theta \quad (6.13)$$

地面或固体地球外部重力梯度（径向）自转形变效应算法公式

$$\Delta T_{rr} = -\frac{6\omega^2 a^5}{r^5} (1 + k_{21}) m^* e^{i\lambda} \sin 2\theta \quad (6.14)$$

地面或固体地球外部水平重力梯度自转形变效应算法公式

$$\text{北向: } \Delta T_{NN} = \frac{2\omega^2 a^5}{r^5} (1 + k_{21}) m^* e^{i\lambda} \sin 2\theta \quad (6.15)$$

$$\text{西向: } \Delta T_{WW} = -\frac{\omega^2 a^5}{r^5} (1 + k_{21}) m^* e^{i\lambda} \text{ctg}\theta \quad (6.16)$$

与固体潮效应算法一样，上述标注⊙的大地测量要素（观测量或参数），只有其点位与地球固连情况下有效，其余观测量或参数适合地面及固体地球外部空间，实际计算时，取上述算法公式右边复数结果的实部。

我们采用 IERS 地球定向参数产品 EOPC04，按 (6.4) ~ (6.16) 式，计算地面点 (105°E, 32°N, H720m) 处，各种大地测量要素的自转极移效应时序，如图 6.1。时间跨度为 2018 年 1 月 1 日至 2022 年 12 月 31 日 (5 年)，时间间隔 1 天。取体潮勒夫数 $k_{21} = 0.3077 + 0.0036i$ ， $h_{21} = 0.6207$ ， $l_{21} = 0.0836$ 。图中移去了自转极移 5 年平均值，并将自转极移 (m_1, m_2) 转换为地固直角坐标系中 x, y 轴方向的自转极坐标变化 $(\Delta x_p = m_1 b, \Delta y_p = -m_2 b)$ ，单位 m。

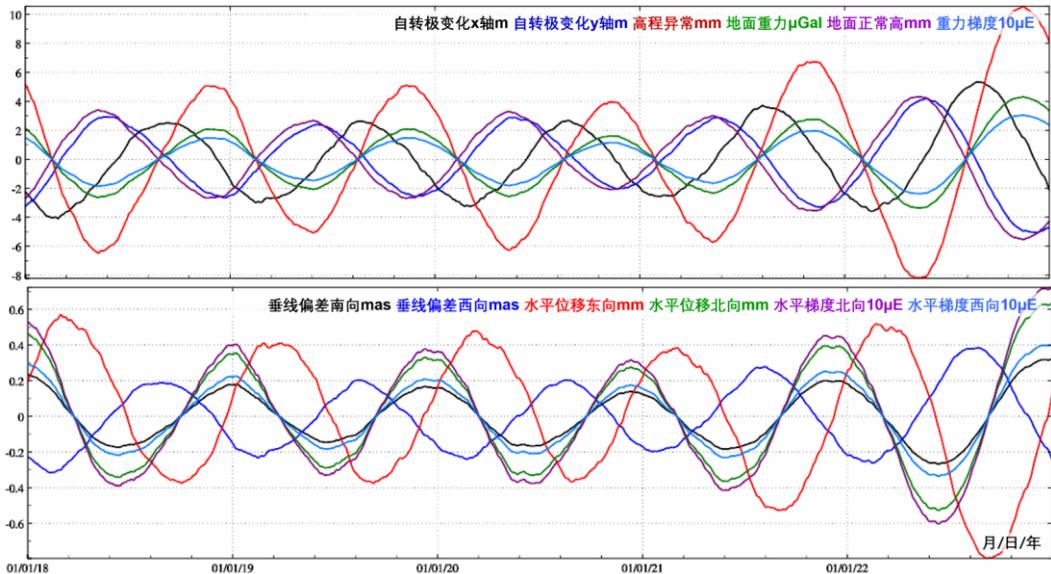


图 6.1 各种大地测量要素自转极移形变效应时间序列

图 6.1 显示，虽然自转极移的量级达到米级，但对高程异常、地面正常高的影响也只有 mm 量级，对重力的影响在 μGal 级，对重力梯度（径向）的影响在 $10\mu\text{E}$ 级。自转极移对大地测量水平向量的影响很小，一般情况下可以忽略。

8.6.2 自洽平衡海洋极潮效应及其算法

一般认为,海洋极潮是极移离心力在海洋上的表现形式,其主要周期成分是约433天钱德勒摆动和年变化。在这些长周期上,海洋极潮负荷被期望有均衡响应,即期望海洋表面的位移与外力的等位面相均衡。类似于自转极移形变效应,海洋极潮可以通过将海潮理论推广到极移离心力位而得到。

8.6.2.1 径向位移、海面高与重力位极移效应

设极移离心力位 $\Delta\Psi_c$,在径向勒夫数 h_2 作用下,产生地面径向位移,则地面径向位移的极移效应可表达为:

$$r_p(\theta, \lambda, t) = \frac{h_2}{g_0} \Delta\Psi_c = H_p \operatorname{Re}(m^*(t) h_2 \bar{P}_{21}(\cos\theta) e^{i\lambda}) \quad (6.17)$$

$$H_p = \sqrt{\frac{A}{\rho_e R} \frac{\omega^2 R^2}{GM}} = \frac{\sqrt{8\pi} \omega^2 R^4}{\sqrt{15} GM} = \frac{\sqrt{8\pi} \omega^2 R^2}{\sqrt{15} g_0}, \frac{8\pi}{5} R^4 = \frac{3}{\rho_e R} A \quad (6.18)$$

式中: H_p 为径向位移自转极移效应的尺度因子; $g_0 = GM/R^2$ 为地面平均重力。当自转极移参数 m 以角秒(as)为单位时, $H_p = 0.1385\text{m}$ 。

类似于海洋潮高的表达方式,采用海洋空间导纳函数 $Z(\theta, \lambda)$,可将海面高的极移效应 $h_o(\theta, \lambda, t)$ 表示为:

$$h_o(\theta, \lambda, t) = H_p \operatorname{Re}[m^*(t) Z(\theta, \lambda)] \quad (6.19)$$

引入径向位移极移效应尺度因子 H_p 后,海洋导纳函数 $Z(\theta, \lambda)$ 就变成了无量纲的空间谐函数,可将其分解为 n 阶球谐级数形式

$$Z(\theta, \lambda) = \sum_{n=0}^{\infty} Z_n(\theta, \lambda) \quad (6.20)$$

海面高的极移效应 $h_o(\theta, \lambda, t)$ 会导致海洋质量重新调整,使得重力位发生变化,这是海面高极移效应对地球重力位的直接影响,可表示为:

$$U(\theta, \lambda, t) = \sum_{n=0}^{\infty} U_n(\theta, \lambda, t) = H_p g_0 \operatorname{Re}[m^*(t) \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n Z_n(\theta, \lambda)] \quad (6.21)$$

式中: $\alpha_n = \frac{3}{2n+1} \frac{\rho_w}{\rho_e}$ 。

海面高极移效应对地球重力位的直接影响 U_n ,通过位负荷勒夫数 k'_n 作用,产生附加位,因此有:

$$U_n^a(\theta, \lambda, t) = \sum_{n=0}^{\infty} k'_n U_n(\theta, \lambda, t) = H_p g_0 \operatorname{Re}[m^*(t) \sum_{n=0}^{\infty} k'_n \alpha_n Z_n(\theta, \lambda)] \quad (6.22)$$

重力位的海洋极潮效应,等于海面高极移效应对重力位的直接影响与附加位之和

$$\begin{aligned} U_o(\theta, \lambda, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} (1 + k'_n) U_n(\theta, \lambda, t) \\ &= H_p g_0 \operatorname{Re}[m^*(t) \sum_{n=0}^{\infty} (1 + k'_n) \alpha_n Z_n(\theta, \lambda)] \end{aligned} \quad (6.23)$$

8.6.2.2 重力位系数自洽平衡的海洋极潮效应

在固体潮两个最大长周期分量上,海洋很可能具有与平衡响应相对应的长波响应。随着周期增大,这种响应偏离平衡态的程度越小。极移离心力位的周期分别为365天和433天,因此海洋极潮应有一个平衡响应。平衡海洋极潮效应假设瞬时海洋表面为重力等位面,即瞬时海洋表面与等位面处于平衡状态,进而通过从海面等位面减去极潮,来确定海洋表面相对于海底的平衡位移。

经典的平衡海洋极潮导纳函数 \bar{Z}^c 与地倾斜潮汐因子(海面高体潮因子) $\gamma_2 = 1 + k_2 - h_2$ 成正比, 可表示为与体潮勒夫数无关的归一化平衡导纳函数 \bar{E}^c 和地倾斜潮汐因子 γ_2 的乘积

$$\bar{Z}^c(\theta, \lambda) = \gamma_2 \bar{E}^c(\theta, \lambda) \quad (6.24)$$

$$\bar{E}^c(\theta, \lambda) = \sum_{n=0}^{\infty} \bar{E}_n^c(\theta, \lambda) = \mathcal{O}(\theta, \lambda) [\bar{P}_{21}(\cos\theta)e^{i\lambda} + K^c] \quad (6.25)$$

式中: $\mathcal{O}(\theta, \lambda)$ 为海洋函数, (θ, λ) 位于海洋区域时 $\mathcal{O}(\theta, \lambda) = 1$, (θ, λ) 位于陆地时 $\mathcal{O}(\theta, \lambda) = 0$ 。

式(6.25)引入复常数 K^c , 以维持经典平衡海洋极潮质量守恒。假设海洋具有常数密度, 则海洋极潮的零阶球谐分量应等于零, $\bar{Z}_0^c = \bar{E}_0^c = 0$ 。

考虑极移离心力位及其附加位后的自洽平衡海洋极潮响应函数 $\bar{Z}^s(\theta, \lambda)$, 也与地倾斜潮汐因子 $\gamma_2 = 1 + k_2 - h_2$ 呈正比, 可用归一化自洽平衡导纳函数 \bar{E}^s 表示为:

$$\bar{Z}^s(\theta, \lambda) = \gamma_2 \bar{E}^s(\theta, \lambda) \quad (6.26)$$

$$\bar{E}^s(\theta, \lambda) = \sum_{n=0}^{\infty} \bar{E}_n^s = \mathcal{O}(\theta, \lambda) [\bar{P}_{21}(\cos\theta)e^{i\lambda} + \sum_{n=0}^{\infty} \gamma'_n \alpha_n \bar{E}_n^s + K^s] \quad (6.27)$$

式中: K^s 为复常数, 用于维持自洽平衡海洋极潮质量守恒。 $\gamma'_n = 1 + k'_n - h'_n$ 为 n 阶地倾斜负荷形变因子。

归一化导纳函数 \bar{E}_n^c 和 \bar{E}_n^s 的球谐分量由系数 $(\bar{A}_{nm} + i\bar{B}_{nm})$ 按如下球谐级数形式定义:

$$\bar{E}(\theta, \lambda) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n \bar{P}_{|n|m}(\cos\theta) (\bar{A}_{nm} + i\bar{B}_{nm}) e^{i\lambda} \quad (6.28)$$

方程(6.27)的第一项和第二项可以认为是自洽平衡极潮的第一项和第二项, 因此这个归一化导纳可以通过在第一次迭代中令 $\bar{E}_n^s = \bar{E}_n^c$ 的迭代方案来计算。

令 $\bar{A}_{nm} = \bar{A}_{nm}^R + i\bar{A}_{nm}^I, \bar{B}_{nm} = \bar{B}_{nm}^R + i\bar{B}_{nm}^I$ 为自洽平衡态的 n 阶 m 次海洋极潮负荷系数, 则海洋极潮负荷对规格化位系数的直接影响可用极移参数 (m_1, m_2) 表示(Desai, 2002)为:

$$\begin{bmatrix} \Delta\bar{C}_{nm} \\ \Delta\bar{S}_{nm} \end{bmatrix} = R_n \left\{ \begin{bmatrix} \bar{A}_{nm}^R \\ \bar{B}_{nm}^R \end{bmatrix} (m_1 \gamma_2^R + m_2 \gamma_2^I) + \begin{bmatrix} \bar{A}_{nm}^I \\ \bar{B}_{nm}^I \end{bmatrix} (m_2 \gamma_2^R - m_1 \gamma_2^I) \right\} \quad (6.29)$$

$$R_n = \frac{\omega^2 R^4}{GM} \frac{4\pi G \rho_w}{g_0(2n+1)} = \frac{\omega^2 R^2}{g_0^2} \frac{4\pi G \rho_w}{2n+1}, \quad \gamma_2 = \gamma_2^R + i\gamma_2^I \quad (6.30)$$

其中, 2阶田谐位系数变化包含了近90%的海洋极潮效应。

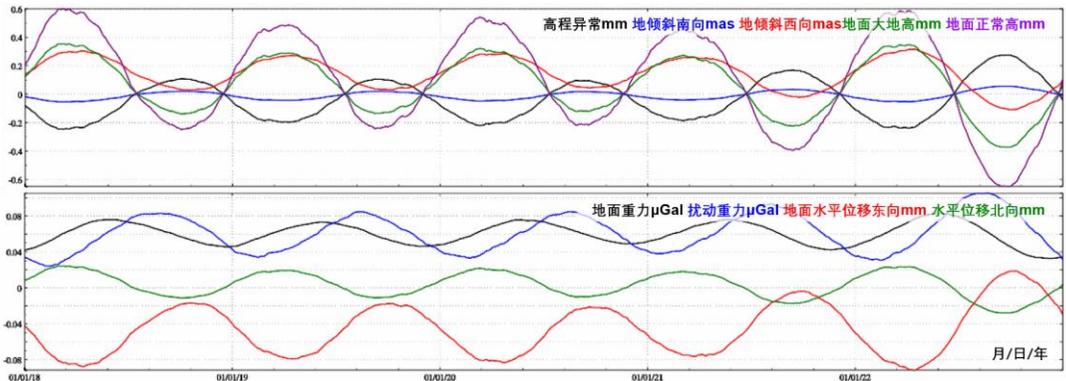


图 6.2 海岸点大地测量要素海洋极潮效应时间序列

这里采用 IERS 产品 EOPC04 和 IERS 协议 2010 中 360 阶自洽平衡态海洋极潮负荷系数(Desai, 2002), 取体潮因子 $\gamma_2 = 0.687 + i0.0036$, 计算(程序可从 IERS 网站获得)位于

海岸带区域的(121.3°E, 28.8°N, H11m)点处, 大地测量要素的海洋极潮效应时间序列 (ITRF2014 参考框架), 如图 6.2。时间跨度 2018 年 1 月 1 日至 2022 年 12 月 31 日(4 年), 时间间隔 6 小时。

海洋极潮效应量级很小, 对于一般性大地测量应用, 可以忽略。

8.6.3 地球自转参数潮汐效应及其计算

8.6.3.1 日长及自转速率的带谐潮汐效应

固体地球对带谐引潮位的响应引起主惯性矩的周期性变化, 按角动守恒原则放大自转极移振幅, 改变自转速率的尺度因子。

利用勒让德多项式, 可以将地面 $P(\theta, \lambda)$ 点的天体引潮位 V_G 展开为球谐函数级数形式

$$V_G(P) = GM \sum_{n=2}^{\infty} \frac{a^n}{r^{n+1}} P_n(\cos\psi) \quad (6.31)$$

式中: ψ 为地固坐标中地面点 $P(\theta, \lambda)$ 与引潮天体 (r, θ, Λ) 的球面角距, (r, θ, Λ) 为引潮天体在地固坐标系中的球坐标, 他们都随时间变化。将其中二阶引潮位 ($n = 2$) 分解为 3 组球谐函数形式

$$V_{G,20}(P) = GM \frac{a^2}{r^3} P_{20}(\cos\theta) P_{20}(\cos\theta) \quad (6.32)$$

$$V_{G,21}(P) = \frac{1}{3} GM \frac{a^2}{r^3} P_{21}(\cos\theta) P_{21}(\cos\theta) \cos(\Lambda - \lambda) \quad (6.33)$$

$$V_{G,22}(P) = \frac{1}{12} GM \frac{a^2}{r^3} P_{22}(\cos\theta) P_{22}(\cos\theta) \cos 2(\Lambda - \lambda) \quad (6.34)$$

式 (6.33) 和 (6.34) 分别包含扇谐函数和田谐函数, 用于描述半日变化和周日变化的短周期潮汐, 而式 (6.32) 包含带谐函数, 仅依赖于引潮天体地心余纬 θ 而缓慢变化, 因此用于描述了中长周期潮波。

月球带谐引潮位的主要周期是 14 天 M_f 和 28 天 M_m , 太阳带谐引潮位的主要周期是半年 S_{sa} 和周年 S_a , 这些带谐潮汐形变是引起日长变化的最大项。

取尺度因子 $k/c_m = 0.94$ ($c_m = 0.293$ 为地幔的极惯性矩系数), 顾及地幔粘滞性长周期勒夫数 $k_{20}(\sigma)$ 的频率相关性 (1.26) 式, 周期为 5 天至 18.6 年的地球自转长周期潮汐变化改正算法公式 (IERS 协议 2010) 为:

$$\Delta UT1 = m_3 \Lambda_0 = - \sum_{i=1}^{62} (A_i \sin\phi_i - B_i \cos\phi_i) \quad (6.35)$$

$$\Delta LOD = \sum_{i=1}^{62} (A'_i \cos\phi_i - B'_i \sin\phi_i) \quad (6.36)$$

$$\Delta \omega = \sum_{i=1}^{62} (A''_i \cos\phi_i - B''_i \sin\phi_i) \quad (6.37)$$

式中: A_i 、 B_i 、 A'_i 、 B'_i 、 A''_i 、 B''_i 分别为频率 σ_i 长周期分潮的同相幅值 (余弦项系数) 和异相幅值 (正弦项系数), 如表 6.1 的第 7~12 列 (省略其中 6 个系数均小于 1.0 的潮波); ϕ_i 为长周期分潮 σ_i 的天文辐角, 由 Delaunay 变量 (表中第 1~5 列) 或 Doodson 数计算。

表 6.1 日长及自转速率的带谐潮汐效应校正

Delaunay 变量					周期(天)	$\Delta UT1$		ΔLOD		$\Delta \omega$	
l	l'	F	D	Ω		A_i	B_i	A'_i	B'_i	A''_i	B''_i
0	0	2	2	2	7.10	-0.1231	0.0000	1.0904	0.0000	-0.9203	0.0000

1	0	2	0	1	9.12	-0.4108	0.0000	2.8298	0.0000	-2.3884	0.0000
1	0	2	0	2	9.13	-0.9926	0.0000	6.8291	0.0000	-5.7637	0.0000
-1	0	2	2	2	9.56	-0.1974	0.0000	1.2978	0.0000	-1.0953	0.0000
0	0	2	0	0	13.61	-0.2989	0.0000	1.3804	0.0000	-1.1650	0.0000
0	0	2	0	1	13.63	-3.1873	0.2010	14.6890	0.9266	-12.3974	-0.7820
0	0	2	0	2	13.66	-7.8468	0.5320	36.0910	2.4469	-30.4606	-2.0652
2	0	0	0	0	13.78	-0.3384	0.0000	1.5433	0.0000	-1.3025	0.0000
0	0	0	2	0	14.77	-0.7341	0.0000	3.1240	0.0000	-2.6367	0.0000
-1	0	2	0	2	27.09	0.4352	0.0000	-1.0093	0.0000	0.8519	0.0000
1	0	0	0	-1	27.44	0.5339	0.0000	-1.2224	0.0000	1.0317	0.0000
1	0	0	0	0	27.56	-8.4046	0.2500	19.1647	0.5701	-16.1749	-0.4811
1	0	0	0	1	27.67	0.5443	0.0000	-1.2360	0.0000	1.0432	0.0000
-1	0	0	2	0	31.81	-1.8236	0.0000	3.6018	0.0000	-3.0399	0.0000
0	1	2	-2	2	121.75	-1.8847	0.0000	0.9726	0.0000	-0.8209	0.0000
0	0	2	-2	1	177.84	1.1703	0.0000	-0.4135	0.0000	0.3490	0.0000
0	0	2	-2	2	182.62	-49.7174	0.4330	17.1056	0.1490	-14.4370	-0.1257
0	1	0	0	0	365.26	-15.8887	0.1530	2.7332	0.0263	-2.3068	-0.0222
0	0	0	0	2	-3399.19	7.8998	0.0000	0.1460	0.0000	-0.1232	0.0000
0	0	0	0	1	-6798.38	-1617.2681	0.0000	-14.9471	0.0000	12.6153	0.0000

8.6.3.2 自转极移及有效激发的长周期海潮效应

自转极移的长周期项，主要包括半钱德勒周期项、半周年项、季节性周期、1 月周期、半月周期等，以及准两年周期及 300 天周期项。以有效角动量函数表示的无受迫自转运动方程为：

$$\chi(t) = m^*(t) + \frac{i}{\sigma_c} \dot{m}^*(t), \quad \psi_3(t) = -m_3(t) = \frac{\Delta LOD(t)}{\Lambda_0} \quad (6.38)$$

$$\chi(t) = \chi_1(t) + i\chi_2(t), \quad m(t) = m_1(t) + im_2(t) \quad (6.39)$$

$$\begin{cases} \chi_1(t) = \frac{1.608}{(C-A)\omega} [h_1(t) + (1 + k'_2)\omega I_{13}(t)] \\ \chi_2(t) = \frac{1.608}{(C-A)\omega} [h_2(t) + (1 + k'_2)\omega I_{23}(t)] \\ \chi_3(t) = \frac{0.997}{C\omega} [h_3(t) + 0.750\omega I_{33}(t)] \end{cases} \quad (6.40)$$

式中： $m^*(t)$ 为自转极移 $m(t)$ 的复共轭， σ_c 为钱德勒摆动的复值频率， Λ_0 为日长的平均值 86400s； $\mathbf{h}(t) = [h_1(t), h_2(t), h_3(t)]$ 为物质运动相对角动量， C 和 A 为地球的主惯量矩， ω 为平均自转角速度。

式 (6.40) 的有效角动量函数 $\chi(t) = [\chi_1(t), \chi_2(t), \chi_3(t)]$ 主要包括两部分的作用：地球内部物质分布变化引起的惯量张量变化 $\Delta \mathbf{I}$ ，以及物质运动速度引起的相对角动量变化 $\Delta \mathbf{h}$ 。式中引入了 4 个系数，1.608 为顾及地幔粘滞性和液核效应的振幅放大因子，0.750 为考虑海洋大气运动和地幔粘滞性拖曳效应的自转速率变化尺度因子，0.997 表示自转形变（离心力位）使自转速率减小 0.3%。

周期为 9 天至 18.6 年的自转极移和有效角动量潮汐改正算法（IERS 协议 2010，计算程

序可从 IERS 网站获得) 如下:

$$m^*(t) = m_1(t) - im_2(t) = A_p e^{i[\phi(t)+\varphi_p]} + A_r e^{i[-\phi(t)+\varphi_r]} \quad (6.41)$$

$$\chi(t) = \chi_1(t) + i\chi_2(t) = A_p e^{i[\phi(t)+\varphi_p]} + A_r e^{i[-\phi(t)+\varphi_r]} \quad (6.42)$$

式中: $\phi(t)$ 为天文辐角; A_p 、 φ_p 分别为自转极移或有效角动量激发长周期海潮效应的正向前行调和振幅和相位; A_r 、 φ_r 分别为自转极移或有效角动量长周期海潮效应的逆向后退调和振幅和相位。

表 6.2 自转极移与有效角动量的长周期海潮效应校正

	Delaunay 变量					周期(天)	自转极移改正项 m				极移有效角动量改正项 χ			
	l	l'	F	D	Ω		$A_p/\mu\text{as}$	φ_p°	$A_r/\mu\text{as}$	φ_r°	$A_p/\mu\text{as}$	φ_p°	$A_r/\mu\text{as}$	φ_r°
m_{tm}	1	0	2	0	1	9.12	4.43	-112.62	5.57	21.33	205.83	67.21	269.95	21.17
M_{tm}	1	0	2	0	2	9.13	10.72	-112.56	13.48	21.3	497.59	67.27	652.59	21.14
m_f	0	0	2	0	1	13.63	27.35	-91.42	30.59	13.31	841.32	88.42	1002.12	13.15
M_f	0	0	2	0	2	13.66	66.09	-91.31	73.86	13.27	2028.73	88.53	2414.94	13.11
M_{sf}	0	0	0	2	0	14.77	5.94	-87.13	6.42	11.75	168.13	92.7	194.74	11.6
M_m	1	0	0	0	0	27.56	43.74	-56.7	31.12	-0.91	643.61	123.13	520.16	-1.06
M_{sm}	-1	0	0	2	0	31.81	8.85	-51.11	5.42	-4.21	111.62	128.72	79.23	-4.36
S_{sa}	0	0	2	-2	2	182.62	86.48	-20.3	99.77	175.57	118.56	159.42	336.32	175.46
S_a	0	1	0	0	0	365.26	17.96	-17.38	152.15	170.6	3.33	161.6	332.53	170.51
M_n	0	0	0	0	1	-6798.38	208.17	166.89	186.98	166.67	221.43	166.88	175.07	166.68

图 6.3 按 (6.35) ~ (6.37)、(6.41) 和 (6.42) 式, 预报 2026 年 1 月 1 日至 2028 年 12 月 31 日 (3 年) 地球自转运动的长周期潮汐效应时间序列, 时序采样间隔 4h。

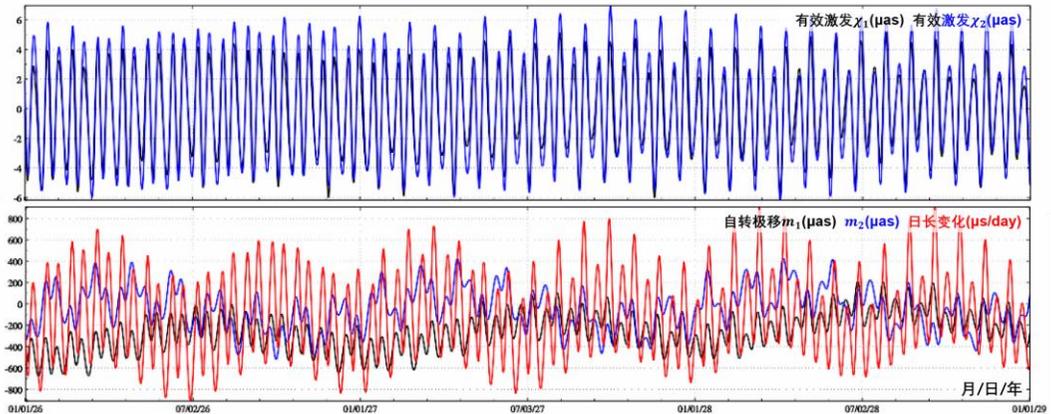


图 6.3 地球自转运动的长周期潮汐效应预报时间序列

8.6.2.3 地球自转参数周日半日海潮影响

目前的主流观点认为, 地球自转周日、半日变化主要是固体地球对海洋潮汐和洋流作用的响应。自转离心力位激发固体地球形变, 导致地球惯性张量变化, 周日和半日的高频力矩主要来自三轴地球 (主惯性轴坐标系) 的主惯性量差 $I_{22} - I_{11}$, 记 $A = I_{11}$, $B = I_{22}$, 则非规格化二阶二次位系数 C_{22} 为:

$$C_{22} = \frac{1}{4}MR^2(B - A) \quad (6.43)$$

一般地固坐标系的主轴与地球主惯性轴不重合，此时，赤道面主惯量差 $B - A$ 变为：

$$B - A = 4MR^2 \sqrt{C_{22}^2 + S_{22}^2} \quad (6.44)$$

由此导致极移和 $UT1$ 变化为：

$$m(t) = -\frac{0.36GM}{\omega^2 R^3} \frac{B-A}{A} \sin 2\theta e^{-i(\Lambda-2\lambda)} \quad (6.45)$$

$$UT1(t) = -\frac{0.36GM}{8\omega^2 R^3} \frac{B-A}{C_m} \sin^2 \theta \sin 2(\Lambda - 2\lambda) \quad (6.46)$$

式中： θ, Λ 分别为引潮天体在地固坐标系中的余纬和经度。

由 (6.44) ~ (6.46) 式可以看出， C_{22} 激发了周期为半日的地球自转变化，Chao 等人的理论计算表明其量级为 0.06mas 左右（1mas 地心角距对应地面距离约 3cm）。液核地球和核幔边界微椭使得旋转地球产生一个自转逆向简正模，呈现近周日自由摆动。

类似于式 (6.40) 海潮对极移和地球自转速率变化的激发，由海洋潮汐引起的地球自转周日、半日变化可以用谐波函数级数表示为：

$$m_1 = \sum_{i=1}^n (-A_i^c \cos \phi_i + A_i^s \sin \phi_i) \quad (6.47)$$

$$m_2 = \sum_{i=1}^n (A_i^c \sin \phi_i + A_i^s \cos \phi_i) \quad (6.48)$$

$$\Delta UT1 = m_3 \Lambda_0 = \sum_{i=1}^n (B_i^c \cos \phi_i + B_i^s \sin \phi_i) \quad (6.49)$$

目前应用比较广泛的是 IERS 协议 2010 中收录的 Eanes2000 模型和 interp.f 实现代码，计算程序可从 IERS 网站获得。该算法基于 Ray1994 模型发展而来，采用的全球海潮模型 Schwidersk (1980)，由 41 个周日潮波和 30 个半日潮波组成，包括 3 个主要周日、半日潮波改正项，以及 41 个边瓣潮波改正。

图 6.4 按 (6.47) ~ (6.49) 式，预报 2026 年 3 月 1 日至 2026 年 4 月 30 日（2 个月）地球自转参数的周日/半日潮汐效应时间序列，时序采样间隔 15 分钟。

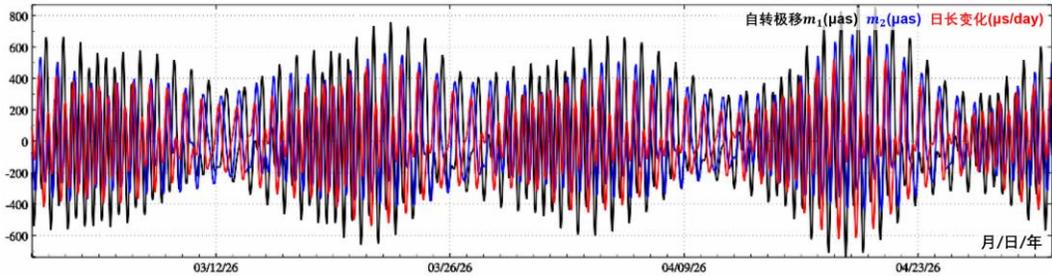


图 6.4 地球自转参数的周日/半日潮汐效应预报时间序列

8.6.4 ITRS 中 CIP 瞬时地极坐标的计算

按照 IERS 协议 2010，天球中间极 CIP 在 ITRS 中的瞬时坐标采用地极坐标系表示，其 y 轴方向与地固空间直角坐标系的 y 轴方向相反，记为 (p_1, p_2) ，其单位和方向与自转极移 (m_1, m_2) 相同。由于周期小于 2 天的 GCRS 中外部天体强迫章动不包括在 IAU2000/IAU2006 章动模型中，需要在 ITRS 中考虑地极的相应运动模型。 (p_1, p_2) 由 IERS 公报 A 与公报 B 提供的 $(m_1, m_2)_{IERS}$ ，加上海洋潮汐和在 GCRS 中周期小于 2 天的外部天体受迫章动改正项（摆动项）构成

$$(p_1, p_2) = (m_1, m_2)_{IERS} + (m_1, m_2)_{OT} + (m_1, m_2)_{LIB} \quad (6.50)$$

式中: $(m_1, m_2)_{OT}$ 为海潮引起的高频自由极移; $(m_1, m_2)_{LIB}$ 描述了引潮天体外部力矩的非带谐项引起的周日与半日受迫极移。

海潮高频极移项 $(m_1, m_2)_{OT}$, 主要包括由海潮引起的周日变化和半日变化, 可按 (6.47) ~ (6.49) 式计算。非带谐摆动项 $(m_1, m_2)_{LIB}$, 包括周日和半日的受迫极移项, 以前被看成章动, 现在归为极移。非带谐摆动项 (Chao 等, 1991), 是由于外部天体引潮位的周日、半日 ($n \geq 2, 0 < m \leq 2$) 项, 导致地球惯性张量变化 ΔI , 进而按式 (6.1) 产生自转极移。 $(m_1, m_2)_{LIB}$ 计算程序可从 IERS 网站获得。

长周期项与引潮天体外力矩引起的长期变化, 一般认为已包含在观测到的极移中, 不需要加入 $(m_1, m_2)_{IERS}$ 中。

8.7 负荷 SRBF 逼近与负荷效应 SRBF 综合

当负荷形变量为扰动位微分或其线性组合, 如扰动重力、垂线偏差、水平位移或重力梯度的负荷形变效应, 其负荷格林函数存在严重的高阶振荡与不收敛问题, 格林积分存在频谱泄漏与奇异性问题。负荷间接影响格林函数曲线如图 7.1 (横坐标为积分半径, 单位为 km)。

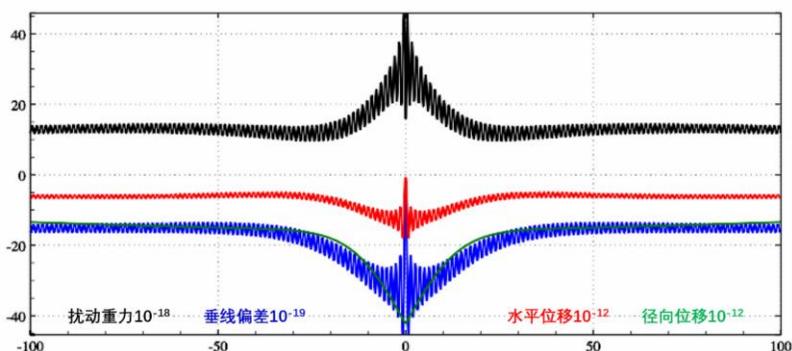


图 7.1 扰动位微分量负荷 Green 函数 (间接影响) 近区性质

不难发现, 采用负荷格林函数积分法计算扰动位微分量不占优的负荷形变量时, 如计算地面大地高、高程异常、正高或有明显垂直形变站点的地面重力、地倾斜负荷效应时, 能获得可接受的效果, 但在计算扰动重力、垂线偏差或水平位移负荷效应时, 积分结果很不稳定, 可靠性差。类似地, 在研究陆地水与地表环境负荷大地测量监测方法时, 当监测量是 GNSS 大地高变化时, 采用格林积分约束法估计, 可反演区域陆地水变化及其负荷形变场; 但若监测量中的扰动位微分量占优时, 如监测量为扰动重力、垂线偏差、水平位移或重力梯度变化时, 若采用负荷格林函数积分法约束, 由于格林函数的高阶振荡与不收敛, 法方程结构极不稳定, 因而难以获得稳定解。可见, 负荷格林函数积分法难以胜任多种大地测量监测数据融合与协同监测的需要。

8.7.1 地面负荷等效水高球面径向基函数表示

地面点 x 处, 负荷等效水高 $h_w(x)$ 可表示为规格化面球基函数 (定义在半径等于地球长半轴 a 的球面上) 的线性组合

$$h_w(\mathbf{x}) = r \sum_{n=2}^N \left(\frac{a}{r}\right)^n \sum_{m=-n}^n \bar{F}_{nm} \bar{Y}_{nm}(\mathbf{e}) \quad (7.1)$$

式中: $\mathbf{x} = r \cdot \mathbf{e} = r(\sin\theta\cos\lambda, \sin\theta\sin\lambda, \cos\theta)$; r, θ, λ 分别是地面点 \mathbf{x} 的地心距、余纬和经度; \bar{F}_{nm} 为完全规格化的球谐系数; a 为地球长半轴, 表示规格化的面球函数 \bar{Y}_{nm} 定义在半径等于地球长半轴 a 的球面上, 且

$$\begin{aligned} \bar{Y}_{nm}(\mathbf{e}) &= \bar{P}_{nm}(\cos\theta)\cos m\lambda, \quad \bar{F}_{nm} = \delta\bar{C}_{nm}, \quad m \geq 0 \\ \bar{Y}_{nm}(\mathbf{e}) &= \bar{P}_{n|m|}(\cos\theta)\sin|m|\lambda, \quad \bar{F}_{nm} = \delta\bar{S}_{n|m|}, \quad m < 0 \end{aligned} \quad (7.2)$$

$\bar{P}_{nm}(\cos\theta)$ 为完全规格化缔合 Legendre 函数; n 为球谐系数的阶, m 为球谐系数的次。

面球函数 \bar{E}_{nm} 也可定义在半径为 \mathcal{R} 的 Bjerhammar 球面上(Bjerhammar 球仅是习惯说法, 与 Bjerhammar 边值理论无关, 这里的 $\mathcal{R} \in (a - \delta, a + \delta)$, $\delta \ll a$), 显然有 $a^n \bar{F}_{nm} = \mathcal{R}^n \bar{E}_{nm}$, 因而地面负荷等效水高 $h_w(\mathbf{x})$, 也可用 Bjerhammar 球面上的面球函数 \bar{E}_{nm} 表示为:

$$h_w(\mathbf{x}) = r \sum_{n=2}^N \left(\frac{\mathcal{R}}{r}\right)^n \sum_{m=-n}^n \bar{E}_{nm} \bar{Y}_{nm}(\mathbf{e}) \quad (7.3)$$

另一方面, 地面负荷等效水高 $h_w(\mathbf{x})$ 还可表示为 K 个 Bjerhammar 球面上球面径向基函数(Spherical Radial Basis Functions, SRBF)的线性组合

$$h_w(\mathbf{x}) = a \sum_{k=1}^K d_k \Phi_k(\mathbf{x}, \mathbf{x}_k) \quad (7.4)$$

式中: $\mathbf{x}_k = \mathcal{R}\mathbf{e}_k$ 是定义在 Bjerhammar 球面上的 SRBF 节点, 也称为 SRBF 中心或极点; d_k 为 SRBF 系数, K 为 SRBF 节点数, 即 SRBF 系数的个数; $\Phi_k(\mathbf{x}, \mathbf{x}_k)$ 为负荷等效水高的球面径向基函数, 可简写为 $\Phi_k(\mathbf{x}) = \Phi_k(\mathbf{x}, \mathbf{x}_k)$ 。

球面径向基函数 $\Phi_k(\mathbf{x}, \mathbf{x}_k)$ 可进一步展开成 Legendre 级数形式

$$\Phi_k(\mathbf{x}, \mathbf{x}_k) = \sum_{n=2}^N \phi_n P_n(\psi_k) = \sum_{n=2}^N \frac{2n+1}{4\pi} B_n \left(\frac{\mathcal{R}}{r}\right)^n P_n(\psi_k) \quad (7.5)$$

式中: ϕ_n 为 SRBF 的 n 阶 Legendre 系数, 它表征了 SRBF 形状, 基本决定 SRBF 的空域和谱域性质, 也称形状因子; 在不强调谱域阶数 n 时, 也称 B_n 为 SRBF 的 Legendre 系数; $\mu = \mathcal{R}/r$ 因与径向基函数 $\Phi_k(\mathbf{x})$ 的谱域带宽有关, 也称为宽度参数。

将 (7.5) 式代入 (7.4) 得:

$$\begin{aligned} h_w(\mathbf{x}) &= \frac{r}{4\pi} \sum_{n=2}^N (2n+1) B_n \left(\frac{\mathcal{R}}{r}\right)^n \sum_{k=1}^K d_k P_n(\psi_k) \\ &= \frac{r}{4\pi} \sum_{k=1}^K d_k \sum_{n=2}^N (2n+1) B_n \left(\frac{\mathcal{R}}{r}\right)^n P_n(\psi_k) \end{aligned} \quad (7.6)$$

顾及球谐函数加法定理:

$$P_n(\psi_k) = P_n(\mathbf{e}, \mathbf{e}_k) = \frac{4\pi}{2n+1} \sum_{m=-n}^n \bar{Y}_{nm}(\mathbf{e}) \bar{Y}_{nm}(\mathbf{e}_k) \quad (7.7)$$

$$\text{则 (7.5) 式可写为: } h_w(\mathbf{x}) = r \sum_{n=2}^N B_n \left(\frac{\mathcal{R}}{r}\right)^n \sum_{m=-n}^n \sum_{k=1}^K d_k \bar{Y}_{nm}(\mathbf{e}) \bar{Y}_{nm}(\mathbf{e}_k) \quad (7.8)$$

比较 (7.1)、(7.3) 与 (7.8) 式得:

$$\bar{F}_{nm} = \left(\frac{\mathcal{R}}{a}\right)^n \bar{E}_{nm} = B_n \left(\frac{\mathcal{R}}{a}\right)^n \sum_{k=1}^K d_k \bar{Y}_{nm}(\mathbf{e}_k) \quad (7.9)$$

利用式 (7.9), 可由球面径向基函数系数 d_k 计算负荷等效水高球谐系数 \bar{F}_{nm} 。SRBF 中心 \mathbf{x}_k 在 Bjerhammar 球面上的位置、分布和数量, 是球面径向基函数逼近的关键性指标, 决定了负荷形变场(时变重力场)的空间自由度(空间分辨率)和空域特征, 等效于全球负荷球

谐系数模型的阶数。

8.7.2 适合负荷形变场监测的球面径向基函数

用于负荷形变场（时变重力场）逼近的径向基函数应满足 Laplace 方程。常见的点质量核函数，Poisson 核函数、径向多极子核函数和 Poisson 小波核函数都是具有调和性质的径向基核函数。令 \mathbf{x} 为地球外部计算点， \mathbf{x}_k 为 Bjerhammar 球面 Ω_R 上的 SRBF 节点。

(1) 点质量核函数。由 Hardy (1971) 提出的一种逆多面函数 (IMQ)，是引力位积分公式 $V = G \iiint \frac{dm}{L}$ 的核函数，其解析表达式为：

$$\Phi_{IMQ}(\mathbf{x}, \mathbf{x}_k) = \frac{1}{L} = \frac{1}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}_k|} \quad (7.10)$$

式中： L 为 \mathbf{x} 与 \mathbf{x}_k 的空间距离。由于 $\Delta(1/L) = 0$ ，因此点质量核函数 $\Phi_{IMQ}(\mathbf{x}, \mathbf{x}_k)$ 满足 Laplace 方程。

(2) Poisson 核函数。源于扰动重力场元 Poisson 积分公式，其解析表达式为：

$$\Phi_P(\mathbf{x}, \mathbf{x}_k) = -2r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{L} \right) - \frac{1}{L} = \frac{r^2 - r_k^2}{L^3} \quad (7.11)$$

(3) 径向多极子核函数的解析表达式为：

$$\Phi_{RM}^m(\mathbf{x}, \mathbf{x}_k) = \frac{1}{m!} \left(\frac{\partial}{\partial r_k} \right)^m \frac{1}{L} \quad (7.12)$$

式中： m 为径向多极子核函数的次 (order)，零次径向多极子核函数就是点质量核函数 $\Phi_{IMQ}(\mathbf{x}, \mathbf{x}_k) = \Phi_{RM}^0(\mathbf{x}, \mathbf{x}_k)$ 。

(4) Poisson 小波核函数的解析表达式为：

$$\Phi_{PW}^m(\mathbf{x}, \mathbf{x}_k) = 2(\chi_{m+1} - \chi_m), \quad \chi_m = \left(r_k \frac{\partial}{\partial r_k} \right)^m \frac{1}{L} \quad (7.13)$$

零次 Poisson 小波核函数就是 Poisson 核函数 $\Phi_P(\mathbf{x}, \mathbf{x}_k) = \Phi_{PW}^0(\mathbf{x}, \mathbf{x}_k)$ 。

(5) 球面径向基函数计算

为突出负荷及其形变场的谱域性质，通常将 SRBF 解析表达式 (7.10) ~ (7.13)，表示成 Legendre 级数形式 (7.5) 后，按 Legendre 级数计算。

ETideLoad4.5 将球面径向基函数 $\Phi_k(\mathbf{x}, \mathbf{x}_k)$ 的 Legendre 级数进行归一化处理，计算归一化系数，用归一化后的 Legendre 级数展开式计算 SRBF。令 \mathbf{x}, \mathbf{x}_k 的球面角距 $\psi_k = 0$ ，则 $\cos\psi_k = 1$ ，顾及 $P_n(\cos\psi_k) = P_n(1) = 1$ ，代入 (7.5) 式，可得 SRBF 归一化系数表达式：

$$\Phi^0 = \sum_{n=2}^N \frac{2n+1}{4\pi} B_n \mu^n \quad (7.14)$$

归一化后的球面径向基函数 Legendre 级数为：

$$\Phi_k(\mathbf{x}, \mathbf{x}_k) = \frac{1}{\phi_0} \sum_{n=2}^N \phi_n P_n(\psi_k) = \frac{1}{\phi_0} \sum_{n=2}^N \frac{2n+1}{4\pi} B_n \mu^n P_n(\psi_k) \quad (7.15)$$

上述四种形式的 SRBF 及其对应的 Legendre 系数如表 7.1。

表 7.1 径向基函数及其 Legendre 系数

径向基函数	解析表达式 $\Phi_k(\mathbf{x}, \mathbf{x}_k)$	第 n 阶形状因子 ϕ_n	Legendre 系数 B_n
点质量核函数	$\frac{1}{L} = \frac{1}{ \mathbf{x} - \mathbf{x}_k }$	μ^n	$\frac{4\pi}{2n+1}$
Poisson 核函数	$\frac{r^2 - r_k^2}{L^3}$	$(2n+1)\mu^n$	4π

径向多极子核函数 Poisson 小波 核函数	$\frac{1}{m!} \left(\frac{\partial}{\partial r_k} \right)^m \frac{1}{L}$ $\chi_m = \left(r_k \frac{\partial}{\partial r_k} \right)^m \frac{1}{L}$	$C_n^m \mu^{n-m} \quad (n \geq m)$ $(-n \ln \mu)^m (2n+1) \mu^n \quad 4\pi (-n \ln \mu)^m$	$\frac{4\pi C_n^m}{2n+1} \mu^{-m}$
-------------------------------	---	--	------------------------------------

(6) 单位球面 Reuter 网格及有关参数算法

已知 Reuter 网格等级 Q (偶数), 则球坐标系中单位球面 Reuter 网格的地心纬度间隔 $d\varphi$, 单元格网 i 中心的地心纬度 φ_i 算法为:

$$d\varphi = \frac{\pi}{Q}, \quad \varphi_i = -\frac{\pi}{2} + \left(i - \frac{1}{2}\right) d\varphi, \quad 1 \leq i < Q \quad (7.16)$$

纬度 φ_i 处的平行圈方向单元格网数 J_i , 经度间隔 $d\lambda_i$ 与边长 dl_i 算法为:

$$J_i = \left\lceil \frac{2\pi \cos \varphi_i}{d\varphi} \right\rceil, \quad d\lambda_i = \frac{2\pi}{J_i}, \quad dl_i = d\lambda_i \cos \varphi_i \quad (7.17)$$

不难发现, $dl_i \approx d\varphi$. 记

$$\varepsilon_i = \frac{ds_i - ds}{ds} = \frac{dl_i - d\varphi}{d\varphi} = \frac{d\lambda_i}{d\varphi} \cos \varphi_i - 1 \quad (7.18)$$

式中: ds 为赤道附近单元格网面积; ds_i 为平行圈 φ_i 处单元格网面积; ε_i 表示平行圈单元格网面积相对赤道附近单元格网面积的相对偏差. ε_i 一般很小, 约为万分之几, 数值与 Reuter 网格等级 Q 有关. 赤道附近单元格网面积 $ds = d\varphi \cdot d\varphi$, 单元格网面积相对偏差 $\varepsilon_{Q/2} = 0$.

对于局部区域, 给定区域经纬度范围, 可直接按 (7.16) 式确定 i 的最小最大值, 再按 (7.17) 式计算每个平行圈处的最大 J_i , 从而确定网格等级为 Q 的区域 Reuter 网格, 无需计算全球网格.

8.7.3 负荷及形变效应径向基函数参数形式

依据负荷形变球谐级数展开式 (2.8) ~ (2.20), 可由 (7.6) 地面负荷球面径向基函数展开式 (最右边表达式), 导出各种地面负荷形变效应径向基函数级数参数化形式如下:

$$\Delta h_w(\mathbf{x}) = r \sum_{k=1}^K d_k \sum_{n=2}^N (2n+1) B_n \left(\frac{\mathcal{R}}{r} \right)^n P_n(\psi_k) \quad (7.19)$$

$$\Delta \zeta = \frac{3\rho_w}{\rho_e} \frac{GM}{\gamma r} \sum_{k=1}^K d_k \sum_{n=2}^N B_n (1+k'_n) \left(\frac{\mathcal{R}}{r} \right)^n P_n(\psi_k) \quad (7.20)$$

$$\Delta g^s = \frac{3\rho_w}{\rho_e} \frac{GM}{r^2} \sum_{k=1}^K d_k \sum_n (n+1) \left(1 + \frac{2}{n} h'_n - \frac{n+1}{n} k'_n \right) B_n \left(\frac{\mathcal{R}}{r} \right)^{n-1} P_n(\psi_k) \quad (7.21)$$

$$\Delta g^\delta = \frac{3\rho_w}{\rho_e} \frac{GM}{r^2} \sum_{k=1}^K d_k \sum_n (n+1) (1+k'_n) B_n \left(\frac{\mathcal{R}}{r} \right)^{n-1} P_n(\psi_k) \quad (7.22)$$

$$\Delta \xi^s = \frac{3\rho_w}{\rho_e} \frac{GM}{\gamma r^2} \sum_{k=1}^K d_k \cos \alpha_k \sum_n (1+k'_n - h'_n) B_n \left(\frac{\mathcal{R}}{r} \right)^n \frac{\partial P_n(\psi_k)}{\partial \psi_k} \quad (7.23)$$

$$\Delta \eta^s = \frac{3\rho_w}{\rho_e} \frac{GM}{\gamma r^2} \sum_{k=1}^K d_k \sin \alpha_k \sum_n (1+k'_n - h'_n) B_n \left(\frac{\mathcal{R}}{r} \right)^n \frac{\partial P_n(\psi_k)}{\partial \psi_k} \quad (7.24)$$

$$\Delta \xi = \frac{3\rho_w}{\rho_e} \frac{GM}{\gamma r^2} \sum_{k=1}^K d_k \cos \alpha_k \sum_n (1+k'_n) B_n \left(\frac{\mathcal{R}}{r} \right)^n \frac{\partial P_n(\psi_k)}{\partial \psi_k} \quad (7.25)$$

$$\Delta \eta = \frac{3\rho_w}{\rho_e} \frac{GM}{\gamma r^2} \sum_{k=1}^K d_k \sin \alpha_k \sum_n (1+k'_n) B_n \left(\frac{\mathcal{R}}{r} \right)^n \frac{\partial P_n(\psi_k)}{\partial \psi_k} \quad (7.26)$$

$$\text{水平东向 } \Delta e = -\frac{3\rho_w}{\rho_e} \frac{GM}{\gamma r} \sum_{k=1}^K d_k \cos \alpha_k \sum_n l'_n B_n \left(\frac{\mathcal{R}}{r} \right)^n \frac{\partial P_n(\psi_k)}{\partial \psi_k} \quad (7.27)$$

$$\text{水平北向}\Delta n = -\frac{3\rho_w GM}{\rho_e \gamma r} \sum_{k=1}^K d_k \sin\alpha_k \sum_n l'_n B_n \left(\frac{R}{r}\right)^n \frac{\partial P_n(\psi_k)}{\partial \psi_k} \quad (7.28)$$

$$\text{径向位移}\Delta r = \frac{3\rho_w GM}{\rho_e \gamma r} \sum_{k=1}^K d_k \sum_{n=2}^N B_n h'_n \left(\frac{R}{r}\right)^n P_n(\psi_k) \quad (7.29)$$

$$\text{正(常)高变化}\Delta h = \frac{3\rho_w GM}{\rho_e \gamma r} \sum_{k=1}^K d_k \sum_{n=2}^N B_n (h'_n - k'_n - 1) \left(\frac{R}{r}\right)^n P_n(\psi_k) \quad (7.30)$$

$$\Delta T_{rr} = \frac{3\rho_w GM}{\rho_e r^3} \sum_{k=1}^K d_k \sum_n (n+1)(n+2)(1+k'_n) B_n \left(\frac{R}{r}\right)^{n-1} P_n(\psi_k) \quad (7.31)$$

$$\Delta T_{NN} = \frac{3\rho_w GM}{\rho_e r^3} \sum_{k=1}^K d_k \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial \varphi_k^2} \sum_n (1+k'_n) B_n \left(\frac{R}{r}\right)^n \frac{\partial^2 P_n(\psi_k)}{\partial \psi_k^2} \quad (7.32)$$

$$\Delta T_{WW} = -\frac{3\rho_w GM}{\rho_e r^3 \cos^2 \varphi} \sum_{k=1}^K d_k \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial \lambda_k^2} \sum_n (1+k'_n) B_n \left(\frac{R}{r}\right)^n \frac{\partial^2 P_n(\psi_k)}{\partial \psi_k^2} \quad (7.33)$$

与空域负荷格林函数积分法一样，若已知区域地表负荷等效水高 h_w ，可按(7.19)式对负荷等效水高 h_w 进行SRBF谱域分析，求解SRBF系数模型（这个过程可称为负荷SRBF逼近或SRBF分析），进而按SRBF系数模型的系数综合算法，由(7.20)~(7.33)式计算区域全要素负荷形变场。这个过程可称为负荷效应SRBF综合。

为考察球面径向基函数的近区性质，选择点质量函数为球面径向基函数，最小阶数和最大阶数分别为90和1800阶，令Bjerhammar球埋藏深度5km，SRBF中心最大作用距离150km，计算与图7.1类型相同的重力、垂线偏差、地面水平位移和径向位移负荷效应的SRBF空域曲线，如图7.2。

比较图7.1和图7.2可以看出，即使是地面大地高负荷效应，近区SRBF函数的收敛性质也明显优于负荷格林函数。扰动重力、垂线偏差、水平位移负荷效应的SRBF函数在20km内的近区都是单调收敛的。采用负荷SRBF逼近及负荷形变场SRBF综合法代替，能有效解决负荷格林函数在近区的高阶振荡与不收敛问题。

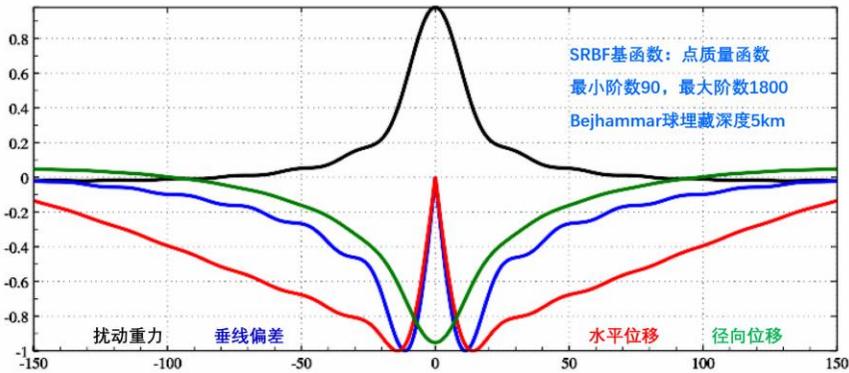


图 7.2 扰动位微分量负荷效应 SRBF 近区性质

8.7.5 球面角距 ψ 的水平一阶、二阶偏导数

地面负荷形变效应径向基函数的算法公式，需要球面角距 ψ 的水平一、二阶偏导数，下面给出球坐标系中的推导过程。

$$\frac{\partial \psi}{\partial \varphi} = -\cos\alpha, \quad \frac{\partial \psi}{\partial \lambda} = -\cos\varphi \sin\alpha \quad (7.34)$$

式中： α 是球面角距 ψ 的大地方位角，由球面三角公式可得：

$$\sin\psi\cos\alpha = \cos\varphi\sin\varphi' - \sin\varphi\cos\varphi'\cos(\lambda' - \lambda) \quad (7.35)$$

$$\sin\psi\sin\alpha = \cos\varphi'\sin(\lambda' - \lambda) \quad (7.36)$$

将 (7.35) 式两边对 φ 求偏导，顾及 (7.34) 式，有

$$-\cos\psi\cos^2\alpha + \sin\psi\frac{\partial^2\psi}{\partial\varphi^2} = -\sin\varphi\sin\varphi' - \cos\varphi\cos\varphi'\cos(\lambda' - \lambda) \quad (7.37)$$

$$\text{从而可得：} \quad \sin\psi\frac{\partial^2\psi}{\partial\varphi^2} = -\sin\varphi\sin\varphi' - \cos\varphi\cos\varphi'\cos(\lambda' - \lambda) + \cos\psi\cos^2\alpha \quad (7.38)$$

同理，将 (7.36) 式两边对 λ 求偏导，有

$$-\cos\psi\cos\varphi\sin^2\alpha + \sin\psi\frac{\partial^2\psi}{\partial\lambda^2} = -\cos\varphi'\sin(\lambda' - \lambda) \quad (7.39)$$

$$\sin\psi\frac{\partial^2\psi}{\partial\lambda^2} = -\cos\varphi'\sin(\lambda' - \lambda) + \cos\psi\cos\varphi\sin^2\alpha \quad (7.40)$$

8.7.6 区域高分负荷形变场 SRBF 逼近与综合

类似于负荷球谐系数模型参考场与残差负荷格林积分组合的局部负荷形变场逼近方法，区域高分负荷形变场 SRBF 逼近也可采用负荷球谐系数模型参考场与残差负荷 SRBF 谱域逼近的组合方案，即用残差负荷 SRBF 谱域逼近代替残差负荷格林积分。

8.7.6.1 负荷 SRBF 逼近与负荷形变场 SRBF 综合

与全球负荷球谐分析与负荷形变场球谐综合计算流程一样，残差负荷 SRBF 谱域逼近方案也由两个大步骤构成。第一步，依据区域地表负荷 SRBF 谱域展开式 (7.19)，由区域残差负荷等效水高变化，按照最小二乘法，估计球面径向基函数系数 $\{d_k\}$ ，我们称此步骤为区域负荷 SRBF 分析及逼近；第二步，依据区域负荷形变场 SRBF 综合算法公式 (7.20) ~ (7.33)，由球面径向基函数系数 $\{d_k\}$ ，计算各种大地测量要素的残差负荷形变效应。我们称此步骤为区域负荷形变场 SRBF 综合。

类似于球谐分析法估计全球负荷球谐系数方案，可以采用迭代累积 SRBF 分析法，提高地面负荷的 SRBF 逼近水平。

8.7.6.2 移去恢复法区域高分负荷形变场 SRBF 逼近计算

区域高分负荷形变场 SRBF 逼近，也可采用移去恢复法，即将“移去-负荷格林函数积分-恢复”方案中的“负荷格林函数积分”替换成“负荷 SRBF 谱域逼近”。其中，“负荷 SRBF 谱域逼近”，采用较小的 SRBF 中心作用距离（作用类似于格林函数积分半径），通过区域负荷 SRBF 分析及逼近，与区域负荷形变场 SRBF 综合，获取高分辨率负荷形变场格网的残差值。该移去恢复方案可称为“移去-负荷 SRBF 谱域逼近-恢复”方案。

下面以中国南部某区域 2018 年 5 月 30 日一个采样历元的 $1' \times 1'$ 陆地水等效水高变化格网 (cm) (以该区域陆地水变化 2018 年平均值为监测基准) 为例，说明移去恢复法区域高分负荷形变场 SRBF 逼近计算步骤和要点。这里的陆地水，仍然只包括了 4m 以浅土壤水、湿地及植被水含量，但不包括河流水和地下水。参考负荷形变场采用 8.2.6 节构造的 2018 年 5 月 30 日 360 阶全球陆地水变化球谐系数模型。

与移去-负荷格林函数积分-移去恢复方案一样，要求负荷等效水高格网数据的区域范围

(数据区域), 应在负荷形变场精化区域 (成果区域) 基础上向四周扩展 SRBF 中心作用距离, 以抑制负荷 SRBF 逼近的边缘效应。本例数据区域 $E97^{\circ}\sim 103^{\circ}$, $N24^{\circ}\sim 29^{\circ}$, 成果区域 $E98.5^{\circ}\sim 101.5^{\circ}$, $N25.5^{\circ}\sim 27.5^{\circ}$ 。

第一步: 输入计算区域 $1' \times 1'$ 零值格网 (零值表示相对地面的高度等于零), 由全球陆地水负荷球谐系数模型, 选择最大计算阶数 360 阶, 计算区域 $1' \times 1'$ 陆地水负荷等效水高变化参考模型值格网, 如图 7.3 中。

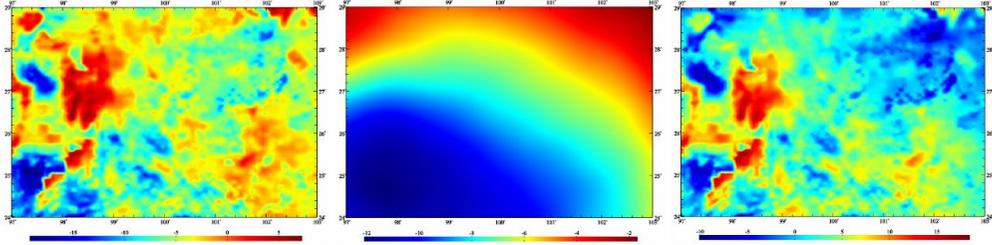


图 7.3 计算区域 $1' \times 1'$ 陆地水等效水高变化观测量、参考值与残差值 (cm) 格网

第二步: 将 $1' \times 1'$ 陆地水等效水高变化观测量格网 (如图 7.3 左), 减去其参考模型值格网 (图 7.3 中), 生成 $1' \times 1'$ 陆地水负荷等效水高变化残差值格网 (图 7.3 右)。

第三步: 依据区域地表负荷 SRBF 谱域展开式 (7.19), 由 $1' \times 1'$ 陆地水负荷等效水高变化残差格网, 按迭代最小二乘法, 估计 SRBF 系数, 以累积逼近陆地水负荷等效水高变化残差格网, 进而由 SRBF 系数, 依据区域负荷形变场 SRBF 综合算法公式 (7.20) ~ (7.33), 计算 $1' \times 1'$ 陆地水变化负荷形变场残差值格网, 如图 7.4。

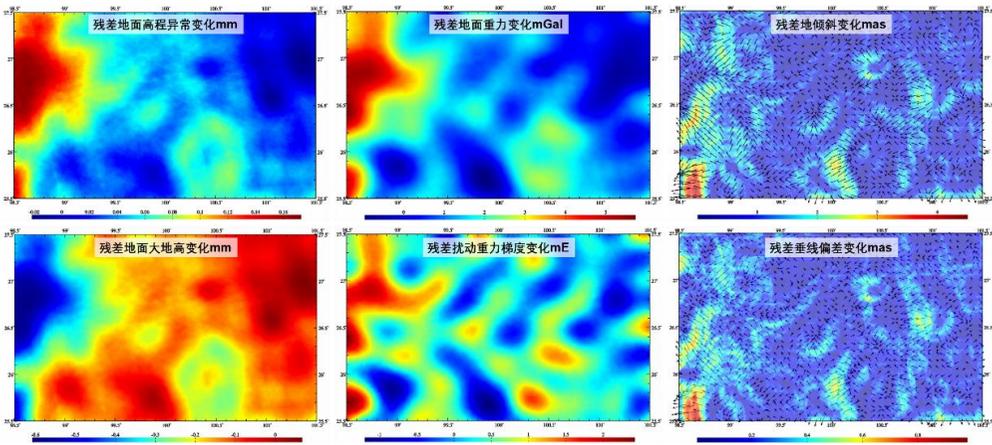


图 7.4 负荷 SRBF 谱域逼近的 $1' \times 1'$ 残差陆地水变化负荷形变场格网

第四步: 输入成果区域 $1' \times 1'$ 零值格网 (零值表示相对地面的高度等于零), 全球陆地水负荷球谐系数模型, 选择最大计算阶数 360 阶, 计算成果区域 $1' \times 1'$ 陆地水变化负荷形变场参考模型值格网。

第五步: 将成果区域 $1' \times 1'$ 负荷形变场残差值格网, 与陆地水变化负荷形变场参考模型值格网相加, 获得成果区域 $1' \times 1'$ 陆地水变化负荷形变场格网成果, 如图 7.5。

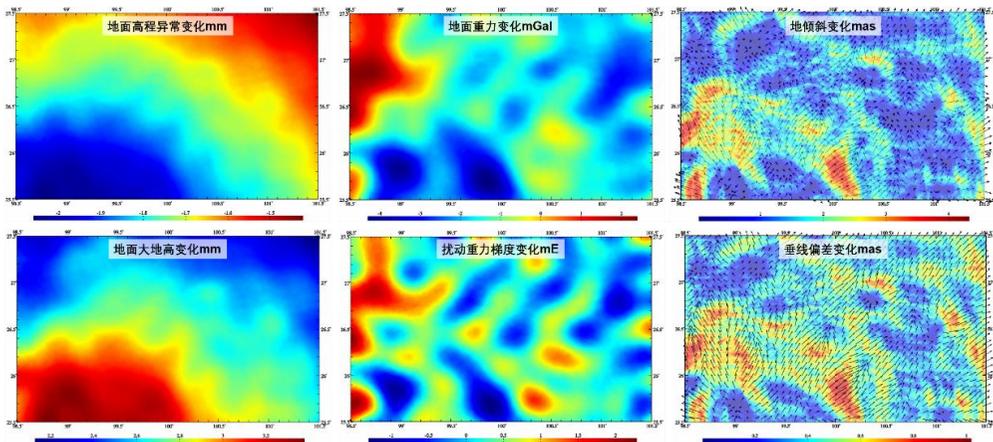


图 7.5 移去-负荷 SRBF 谱域逼近-恢复法计算的 1'×1'陆地水变化负荷形变场格网

与 8.5.5 节“移去-负荷格林函数积分-恢复”流程比较，不难发现，“移去-负荷 SRBF 谱域逼近-恢复”方案与“移去-负荷格林函数积分-恢复”方案，除第三步不同外，其余的第一、二、四、五步完全一样。

8.7.6.3 SRBF 系数参数估计技术

将表 7.1 中负荷等效水高径向基函数对应的球面径向基函数勒让德系数 B_n 代入 (7.19) 式，就是以残差地面等效水高变化 $\Delta\tilde{h}_w(x_i)$ 为观测量，球面径向基函数系数 d_k 为未知数的地面负荷 SRBF 逼近基本观测方程

$$\mathbf{L} = \{\Delta\tilde{h}_w(x_i)\}^T = \mathbf{A}\{d_k\}^T + \boldsymbol{\epsilon} \quad (i = 1, \dots, M; k = 1, \dots, K) \quad (7.41)$$

式中： \mathbf{A} 为 $M \times K$ 设计矩阵， $\boldsymbol{\epsilon}$ 为 $M \times 1$ 观测量误差向量； M 为观测量个数， K 为 SRBF 极点数即未知数 d_k 个数； x_i 为观测量所在地面点的大地坐标。

当 SRBF 节点 $v \in (1, \dots, K)$ 位于计算区域边缘时，令其对应的 SRBF 系数等于零即 $d_v = 0$ ，将其作为观测方程，可抑制边缘效应，从而提升 SRBF 系数 $\{d_k\}$ 参数估计的稳定性和可靠性。采用附加抑制边缘效应约束的法方程变为：

$$[\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{Q} \boldsymbol{\Xi}] \{d_k\}^T = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{L} \quad (7.42)$$

式中： $\boldsymbol{\Xi}$ 为对角线矩阵，当且仅当其下标对应的 SRBF 中心位于区域边缘时等于 1，其余为零； \mathbf{Q} 为法方程系数阵 $\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A}$ 对角线非零元素均方根。

为保持负荷形变场逼近性能的空间一致性，在构建观测方程 (7.41) 过程中，通常要求所有 SRBF 中心的作用距离 dr 相等。 dr 相应于 SRBF 自变量的定义域，即任一观测量仅用半径 dr 范围内 SRBF 节点球面径向基函数的线性组合表示。SRBF 中心作用距离 dr 等效于负荷格林函数的积分半径。

引入边缘效应抑制方法后，法方程不再需要正则化和迭代计算，从而避免负荷形变场(时变重力场)的解析结构受测量误差影响，可有效提高算法的普适性和可靠性。

残差负荷每次逼近等价于以上次累积的负荷为参考场，按移去恢复法计算剩余残差负荷。通常一般累积 1~2 次可达到稳定解。残差负荷累积逼近有效性一般性原则：(1) 负荷形变

场空间连续可微，(2) 负荷等效水高的残差标准差明显减小，残差统计平均值趋于零。

实际计算时，可先让累积逼近次数等于零，优化调整首次逼近的合适参数，再固定首次逼近参数，优化调整累积逼近参数。

8.7.6.4 与“移去-负荷格林函数积分-恢复”法对比分析

将 8.7.6.2 节移去-负荷 SRBF 谱域逼近-恢复法计算流程的第三步，换成负荷格林函数积分，就变成“移去-负荷格林函数积分-恢复”流程。

第三步时，输入成果区域 $1' \times 1'$ 零值格网（零值表示相对地面的高度等于零），选择积分半径 150km（约等于上述 SRBF 中心作用距离），由计算区域 $1' \times 1'$ 陆地水负荷等效水高变化残差格网，按负荷格林函数积分法，直接计算成果区域 $1' \times 1'$ 负荷形变场残差值格网时间序列。结果如图 7.6。

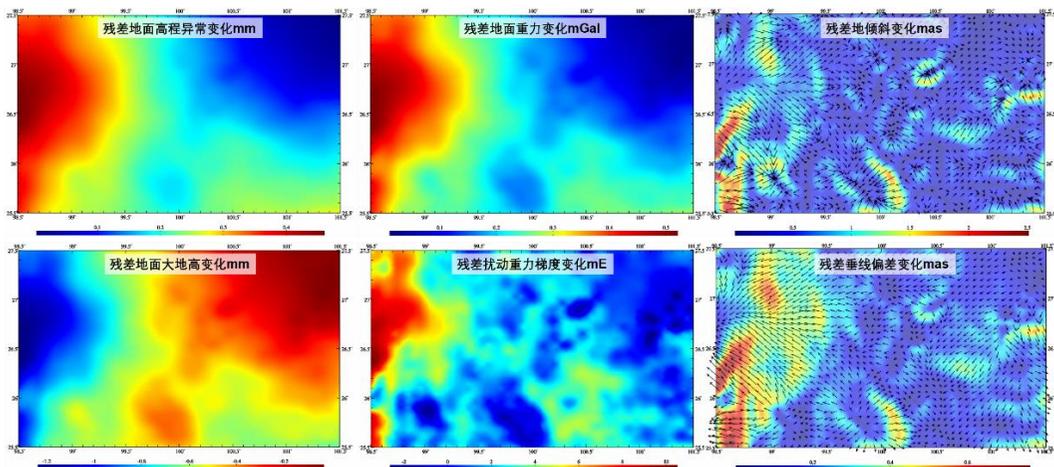


图 7.6 负荷格林函数积分计算的 $1' \times 1'$ 残差陆地水变化负荷形变场格网

比较图 7.4 和图 7.6 可以看出，负荷格林函数积分与负荷 SRBF 谱域逼近计算的负荷形变场残差值格网，各种要素变化的空间分布特征都相似，在数值上负荷格林函数积分结果要大些，而负荷谱域逼近结果的空间短波结构丰富。

同样，将负荷格林函数积分成果区域 $1' \times 1'$ 负荷形变场残差值格网，与陆地水变化负荷形变场参考模型值格网相加，获得“移去-负荷格林函数积分-恢复”法成果区域 $1' \times 1'$ 陆地水变化负荷形变场格网成果。

8.7.7 多种异构大地测量技术协同监测原理

ETideLoad4.5 推荐一种普适性好的多源异质观测系统深度融合方法。不失一般性，假设对于某一监测目标，存在多种异构大地测量监测方案。我们总可以将监测目标抽象为各种大地测量技术公共的一组参数，从而将多种异构大地测量协同监测问题，转化成联合求解公共参数的数学问题。求解这类问题一般技术方案可概括为：(1) 分别由每组大地测量技术的监测，按其各自的大地测量系统结构（基于大地测量原理的协方差结构），组成以公共参数为未知数的观测方程，进而按最小二乘原理组成各自的法方程，分别进行规范化处理；(2) 按每组大地测量监测的质量，分别对其法方程进行配权，经加权求和生成组合后的法方

程，求解未知公共参数的估值。

对于不同大地测量技术，其监测量的类型、空间分布和监测系统的大地测量性质一般不同，通过规范化不同组的法方程，可有效控制各组不同类型监测量在协方差结构上的深度融合。组合后的法方程可表示为：

$$\sum_s \left(\frac{w_s}{Q_s} \mathbf{A}_s^T \mathbf{P}_s \mathbf{A}_s \right) \mathbf{X} = \sum_s \left(\frac{w_s}{Q_s} \mathbf{A}_s^T \mathbf{P}_s \mathbf{L}_s \right) \quad (7.43)$$

式中： $s = 1, \dots, S$ ， S 为观测量分组数； \mathbf{X} 为待估参数向量； $\mathbf{A}_s, \mathbf{L}_s, \mathbf{P}_s$ 分别为第 s 组观测方程的设计矩阵、观测向量与观测量权阵，第 s 组观测量的 \mathbf{P}_s 仅用于区别第 s 组内观测量之间的精度差异，与其他组观测量误差完全无关； Q_s 为第 s 组法方程规范化参数，取第 s 组法方程系数阵 $\mathbf{A}_s^T \mathbf{P}_s \mathbf{A}_s$ 对角线非零元素均方根； w_s 为第 s 组权值，仅用于区别不同组的观测质量，由于分组数一般不大（如个位数），容易进一步按常规统计迭代方案优化。

组合参数 $\delta_s = w_s/Q_s$ ，将观测系统模型（协方差结构） Q_s 与观测质量 w_s 对组合参数 δ_s 的影响完全分离，使得融合过程不受观测量类型和空间分布差异的影响，因而有利于深度融合观测量类型多样、空间分布与观测系统结构迥异的空天地海监测数据。

ETideLoad4.5 科学计算程序功能索引

第一章 ETideLoad4.5 架构、特色与理念	1
1.1 ETideLoad4.5 科学计算系统架构	1
1.1.1 ETideLoad4.5 系统总体结构	1
1.1.2 大地测量全要素潮汐与极移效应解析计算	2
1.1.3 地面大地测量非潮汐时序分析处理	3
1.1.4 多源异质负荷形变场逼近与多种异构协同监测	3
1.1.5 CORS InSAR 融合与地面稳定性计算	4
1.1.6 大地测量数据编辑、计算与可视化	4
1.2 ETideLoad4.5 大地测量监测量约定	5
1.2.1 主要物理量单位及方向	5
1.2.2 监测量类型及单位约定	5
1.2.3 监测量向量方向约定	6
1.2.4 时间（日期）格式约定	6
1.3 ETideLoad4.5 科学目标与技术特色	6
1.3.1 ETideLoad4.5 科学目标	6
1.3.2 ETideLoad4.5 技术特色	6
1.4 ETideLoad4.5 重要概念与特色理念	7
1.4.1 多源异质数据深度融合与多种异构技术协同监测	7
1.4.2 固体地球潮汐形变及其大地测量潮汐效应	7
1.4.3 固体地球非潮汐形变形式及大地测量影响	7
1.4.4 地面垂直形变形式及时空动力学定量特征	8
1.4.5 负荷形变场的表示、逼近与监测基本原理	9
1.4.6 CORS 网时序 InSAR 垂直形变协同监测原理	9
1.4.7 区域地面稳定性变化无缝连续定量监测方案	9
1.4.8 大地测量算法之间的解析相容性问题	10
1.5 ETideLoad4.5 协议、学习与使用	10
1.5.1 主要地球物理模型与数值标准	10
1.5.2 大地测量时间序列数据格式约定	11
1.5.3 课堂教学、自学练习与技术培训	11
1.5.4 ETideLoad4.5 适用范围与使用说明	12
第二章 大地测量全要素潮汐与极移效应解析计算	13
2.1 地面及固体地球外部精密固体潮效应计算	13
2.1.1 地面站点固体潮效应时间序列计算	14
2.1.2 给定时间位置地面固体潮效应计算	15
2.1.3 固体地球外部及卫星固体潮摄动计算	16
2.1.4 全要素固体潮效应全球预报	18
2.2 地面及固体地球外部海潮负荷效应球谐综合	20
2.2.1 地面站点海潮负荷效应时间序列计算	20
2.2.2 给定时间位置地面海潮负荷效应计算	22
2.2.3 固体地球外部及卫星海潮摄动计算	23
2.2.4 全要素海潮负荷效应全球预报	24

2.3 地面及固体地球外部大气潮负荷球谐综合	27
2.3.1 地面站点大气压潮负荷效应时间序列计算	27
2.3.2 给定时间位置地面大气压潮负荷效应计算	29
2.3.3 固体地球外部及卫星大气压潮摄动计算	30
2.3.4 全要素大气压潮负荷效应全球预报	31
2.4 自转极移效应与自转参数潮汐效应计算	34
2.4.1 自转极移/海洋极潮效应时序计算	34
2.4.2 给定时间位置极移/海洋极潮效应计算	36
2.4.3 地球外部及卫星自转极移/海洋极潮计算	37
2.4.4 全要素地面大地测量自转极移效应计算	39
2.4.5 地球自转参数潮汐效应时序预报	41
2.5 永久潮汐影响与地球质心变化效应	43
2.5.1 大地测量永久潮汐影响计算	44
2.5.2 大地测量地球质心变化效应计算	45
2.5.3 地球质心变化海潮负荷效应预报	46
2.5.4 地球质心变化大气潮负荷效应预报	47
2.6 大地测量控制网固体潮负荷潮效应计算	48
2.7 近地空间负荷潮效应格林积分法区域精化	51
2.7.1 区域海潮负荷效应残差量格林积分计算	51
2.7.2 区域大气压潮负荷效应残差量格林积分	53
2.8 全要素地面大地测量潮汐效应数值预报	54
第三章 地面大地测量非潮汐时序分析处理	56
3.1 地面监测量不规则时序粗差分离与处理	56
3.1.1 时间序列粗差探测与剔除	56
3.1.2 系统时间与 MJD 相互转换	58
3.1.3 时间序列监测基准时间统一	58
3.1.4 时序按指定时间长度平均	59
3.2 监测量不规则时序低通滤波与信号重构	59
3.2.1 不规则采样时序低频参数与线性项估计	60
3.2.2 按给定时序采样时刻重构低频时序	61
3.2.3 按给定的采样规则重构低频时序	62
3.3 不规则采样时序加权差分积分插值运算	62
3.3.1 两列时序加权运算	63
3.3.2 不规则采样时序差分运算	63
3.3.3 不规则采样时序积分运算	63
3.3.4 不规则时序内插给定时序	64
3.4 大地测量监测网批量时间序列规格化	65
3.4.1 地面站点时序规格化批量提取	65
3.4.2 CORS 网基线解时序规格化批量提取	66
3.5 大地测量监测站网批量时序分析处理	67
3.5.1 系列时序粗差线性项分离与低频重构	67
3.5.2 系列时序平均与记录格式时序生成	68
3.6 地面大地监测网记录时序构造与分析	69

3.6.1 由系列同规格时序生成记录时序.....	69
3.6.2 记录时序时空统计与均值分离.....	70
3.6.3 记录时序缺失采样短期内插修复.....	70
3.6.4 记录时间序列文件采样属性移去.....	71
3.6.5 记录时间序列线性项移去恢复运算.....	72
3.7 监测量（向量）格网时间序列处理分析.....	72
3.7.1 格网时间序列参考历元变换.....	72
3.7.2 格网时间序列低通滤波.....	72
3.7.3 格网时序统计分析运算.....	73
3.7.4 向量格网时序坐标形式变换.....	73
3.7.5 格网时序线性项的移去恢复.....	75
3.8 格网时序多种形式时空插值推估运算.....	75
3.8.1 格网时序内插不规则时序.....	75
3.8.2 格网时序内插给定记录时序.....	76
3.8.3 指定时间位置格网时序插值.....	77
3.8.4 按采样规格插值生成记录时序.....	77
3.8.5 格网时序给定时空分辨率推估.....	77
第四章 多源异质负荷形变场逼近与异构协同监测.....	79
4.1 全球地表环境负荷格网时间序列球谐分析.....	79
4.1.1 系列全球地表数据球坐标格网化.....	80
4.1.2 全球地面/海面大气压球谐分析.....	80
4.1.3 全球大陆水等效水高球谐分析.....	81
4.1.4 全球海平面变化球谐分析.....	82
4.2 分潮球谐分析与负荷潮球谐系数模型构建.....	83
4.2.1 分潮调和常数球坐标格网化.....	84
4.2.2 系列大气压分潮球谐分析.....	84
4.2.3 系列海洋潮高分潮球谐分析.....	86
4.3 球谐综合法模型等效水高与调和常数计算.....	88
4.3.1 地表环境负荷等效水高模型值计算.....	88
4.3.2 全部分潮调和常数模型值计算.....	89
4.3.3 负荷等效水高模型值时间序列计算.....	89
4.4 球谐综合法负荷形变场及时变重力场计算.....	90
4.4.1 地表环境负荷形变场球谐综合计算.....	91
4.4.2 固体地球外部及卫星非潮汐负荷摄动计算.....	92
4.4.3 地面负荷形变场时间序列批量计算.....	93
4.5 区域地表环境负荷格林积分法负荷形变场计算.....	97
4.5.1 区域残差地表负荷形变场格林积分法计算.....	97
4.5.2 江河湖库水全要素大地测量负荷效应计算.....	99
4.5.3 残差负荷形变场时间序列批量计算.....	99
4.6 区域负荷 SRBF 逼近及负荷形变场 SRBF 综合计算.....	102
4.6.1 地表残差负荷谱域 SRBF 逼近与负荷形变综合.....	102
4.6.2 负荷残差时序 SRBF 逼近与负荷效应时序计算.....	104
4.7 格林积分约束法多种异质数据负荷形变场监测计算.....	105

4.7.1 多源异质监测量空域格林积分法负荷形变场估计	105
4.7.2 多种监测量时序格林积分法负荷形变场时序计算	108
4.8 SRBF 逼近法陆地水及负荷形变场多种异质协同监测	110
4.8.1 多种监测量陆地水及负荷形变场球面径向基函数逼近	110
4.8.2 多种监测量时序陆地水及其负荷形变场时序 SRBF 逼近	113
4.9 地面形变场（向量）格网时序动力学运算	115
4.9.1 （向量）格网时序差分运算	115
4.9.2 批量格网的水平梯度计算	116
4.9.3 两组向量格网时序内积运算	116
4.10 地表动力环境及其负荷形变场监测计算练习	117
4.10.1 高分地表环境负荷形变场时序完整计算流程	117
4.10.2 地下水与地表环境负荷形变场协同监测流程	125
第五章 CORS InSAR 融合与地面稳定性计算	133
5.1 大地监测网记录时序多站拟稳约束平差	134
5.2 InSAR 监测量粗差探测与空间形变分析	135
5.2.1 InSAR 监测量记录时序粗差探测分离	135
5.2.2 InSAR 监测量空间相对形变分析处理	136
5.2.3 监测量记录时序生成高分格网时序	137
5.3 CORS 网控制 InSAR 时空协同监测处理	138
5.3.1 监测量记录时序参考历元统一	138
5.3.2 CORS 网 InSAR 垂直形变监测相容性分析	139
5.3.3 InSAR 监测量记录时序时空基准约束平差	140
5.4 多源异构 InSAR 的深度融合与时序分析	141
5.4.1 同轨时序 InSAR 监测量长时序拼接	141
5.4.2 多源异构 InSAR 监测量空间无缝融合	142
5.4.3 监测量记录时序分析与滤波	143
5.4.4 监测量记录时序规则重构与预报	144
5.5 垂直形变格网时序地面稳定性变化计算	145
5.5.1 单历元规格化地面稳定性变化格网估计	146
5.5.2 地面稳定性变化格网时间序列计算	146
5.6 重力变化格网时序地面稳定性变化计算	147
5.6.1 单历元规格化地面稳定性变化格网估计	148
5.6.2 地面稳定性变化格网时间序列计算	148
5.7 向量变化格网时序地面稳定性变化计算	149
5.7.1 单历元规格化地面稳定性变化格网估计	149
5.7.2 地面稳定性变化格网时间序列计算	150
5.8 稳定性变化时序的优化与时空特征整合	150
5.8.1 两组监测量格网时序规格化整合	150
5.8.2 三组地面稳定性变化时序优化整合	151
5.8.3 地面稳定性变化时空特征分析整合	152
第六章 大地测量数据编辑、计算与可视化	153
6.1 文本记录数据标准化提取	153
6.2 数据插值、提取与区域分离	154

6.2.1 插值法改变格网分辨率.....	154
6.2.2 格网内插离散点属性.....	155
6.2.3 按属性条件提取记录.....	156
6.2.4 (向量) 格网数据区域分离.....	156
6.3 数据文件的简单直接运算.....	157
6.3.1 点值属性加权运算.....	157
6.3.2 格网格值加权运算.....	157
6.3.3 向量格网矢量积运算.....	157
6.3.4 球谐系数加权运算.....	157
6.4 同规格时间序列文件编辑运算.....	159
6.4.1 两个同规格监测量记录时序加权运算.....	159
6.4.2 系列点值文件生成监测量记录时序.....	159
6.4.3 两组同规格格网时序文件加权运算.....	160
6.4.4 两组同规格向量格网时序加权运算.....	161
6.5 区域数据格网生成与构造.....	161
6.5.1 离散点值内插法格网化.....	161
6.5.2 离散点向量内插格网化.....	162
6.5.3 高分点直接平均格网化.....	162
6.5.4 标准化格网格值构造.....	162
6.5.5 按经纬度范围提取数据.....	162
6.6 向量格网文件构造与转换.....	162
6.6.1 两格网合并为向量格网.....	162
6.6.2 向量格网的两分量分解.....	162
6.6.3 向量格网形式相互转换.....	163
6.6.4 向量格网转换为离散点值.....	163
6.7 大地测量数据统计信息提取.....	164
6.8 粗差探测与加权基函数格网化.....	164
6.8.1 参考面支持的观测量粗差探测.....	164
6.8.2 指定参考属性观测量定权.....	165
6.8.3 基函数赋权插值格网化.....	166
6.8.4 批量点值基函数插值格网化.....	167
6.8.5 记录时序基函数插值格网化.....	167
6.9 大地测量数据可视化绘图工具.....	168
6.9.1 地面监测量多属性时序可视化.....	168
6.9.2 监测量记录时间序列可视化.....	169
6.9.3 三维离散点值数据可视化.....	170
6.9.4 格网及其时间序列可视化.....	171
6.9.5 监测量向量场格网可视化.....	172
第七章 文件格式、地球物理模型与数值标准.....	173
7.1 ETideLoad4.5 大地测量数据文件.....	173
7.2 稳态大地测量数据文件约定格式.....	173
7.2.1 离散点大地测量数据记录文件.....	173
7.2.2 大地控制网观测量记录文件.....	173

7.2.3 大地测量数值格网文件.....	174
7.2.4 大地测量向量格网文件.....	175
7.2.5 球谐系数文件约定格式.....	175
7.3 大地测量时间序列文件约定格式.....	175
7.3.1 地面大地监测量时间序列文件.....	175
7.3.2 监测网站点记录时间序列文件.....	176
7.3.3 监测网观测量记录时间序列文件.....	176
7.3.4 数值(向量)格网时间序列文件.....	177
7.3.5 球谐系数模型时间序列文件.....	177
7.4 主要地球物理模型与数值标准.....	178
7.4.1 大气压潮球谐系数模型文件.....	178
7.4.2 海潮负荷球谐系数模型文件.....	178
7.4.3 地球负荷勒夫数文件.....	179
7.4.4 IERS 地球定向参数 EOP 文件.....	179
7.4.5 地球质心变化时间序列文件.....	180
7.4.6 海洋潮高调和常数格网模型.....	181
7.4.7 行星星历 JEPH 文件.....	181
7.4.8 勒夫数频率相关系数文件.....	181
7.4.9 Desai 海洋极潮系数文件.....	182
7.4.10 海潮负荷球谐系数一阶项同相异相幅值文件.....	182
7.4.11 地面大气压潮负荷球谐系数一阶项同相异相幅值文件.....	183
第八章 ETideLoad4.5 主要算法及公式.....	184
8.1 地面及地球外部大地测量固体潮效应.....	184
8.1.1 地面及其外部固体潮效应统一表示.....	184
8.1.2 自转微椭非弹性地球的体潮勒夫数.....	189
8.1.3 二阶勒夫数的频率相关性及其校正.....	192
8.1.4 大地测量全要素体潮效应统一算法.....	200
8.1.5 大地测量固体潮效应的特点及分析.....	203
8.2 全球负荷球谐分析与负荷形变场球谐综合.....	206
8.2.1 地表负荷等效水高球谐级数表示.....	206
8.2.2 负荷形变场规格化球谐级数展开.....	206
8.2.3 规格化缔合勒让德函数及对 θ 导数.....	210
8.2.4 海平面变化球谐分析与负荷形变场球谐综合.....	211
8.2.5 大气压球谐分析与负荷形变场球谐综合计算.....	216
8.2.6 陆地水球谐分析与负荷形变场球谐综合计算.....	221
8.3 负荷格林函数与负荷效应空域积分算法.....	224
8.3.1 地面要素负荷直接影响积分.....	225
8.3.2 负荷间接影响格林函数积分.....	225
8.3.3 勒让德函数及对 ψ 一、二阶导数.....	229
8.3.4 江河湖库水变化负荷形变场计算.....	229
8.3.5 区域负荷形变场移去恢复法逼近.....	230
8.4 地球外部海洋及大气压负荷潮效应.....	236
8.4.1 全球海潮负荷球谐系数模型构建方法.....	236

8.4.2 海潮与大气压潮负荷效应计算及分析	238
8.4.3 海潮负荷潮效应格林积分法区域精化	245
8.4.4 大地测量卫星各种潮汐摄动计算分析	248
8.5 地球质心变化与形状极移效应计算	250
8.5.1 地球质心与形状极潮汐效应及计算	250
8.5.2 地球质心与形状极非潮汐负荷效应	253
8.5.3 大地测量要素地球质心变化效应计算	255
8.5.4 大地测量要素地球形状极移效应计算	257
8.6 自转极移效应与自转参数潮汐效应	259
8.6.1 大地测量要素自转极移形变效应	260
8.6.2 自洽平衡海洋极潮效应及其算法	262
8.6.3 地球自转参数潮汐效应及其计算	264
8.6.4 ITRS 中 CIP 瞬时地极坐标的计算	267
8.7 负荷 SRBF 逼近与负荷效应 SRBF 综合	268
8.7.1 地面负荷等效水高球面径向基函数表示	268
8.7.2 适合负荷形变场监测的球面径向基函数	270
8.7.3 负荷及形变效应径向基函数参数形式	271
8.7.5 球面角距 ψ 的水平一阶、二阶偏导数	272
8.7.6 区域高分负荷形变场 SRBF 逼近与综合	273
8.7.7 多种异构大地测量技术协同监测原理	276
ETideLoad4.5 科学计算程序功能索引	278
样例目录名与可执行程序名对照列表	284
主要参考文献	287

样例目录名与可执行程序名对照列表

序号	程序中文名称	可执行程序名/样例目录名
1	地面及固体地球外部精密固体潮效应计算	Tideeffectsolidearth
2	地面及固体地球外部海潮负荷球谐综合	OTideloadharmsynth
3	地面及固体地球外部大气潮负荷球谐综合	ATideloadharmsynth
4	自转极移效应与自转参数潮汐效应计算	Poleshifteffectscal
5	永久潮汐影响与地球质心变化效应计算	Permanentdgeocecenter
6	大地测量控制网固体潮负荷潮效应计算	Controlnetworktidetf
7	近地空间负荷潮效应格林积分法区域精化	Tdloadgreenintegral
8	全要素地面大地测量潮汐效应数值预报	SolidLoadtidecalctf
9	地面监测量不规则时序粗差分离与处理	TmsrsErrorseppreproc

10	监测量不规则时序低通滤波与信号重构	Tmsrslowpfltrconstr
11	不规则采样时序加权差分积分插值运算	TmsrsAddifferinterp
12	大地测量监测站网批量时间序列规格化	Tmsrsbatchnormalize
13	大地测量监测网批量时间序列分析处理	Tmsrsnetwkanalyspro
14	地面大地监测网记录时序构造与分析	Tmrecordanalysproc
15	监测量（向量）格网时间序列处理分析	Tmgridanalysisproc
16	格网时序多种形式时空插值推估运算	Tmgridinterpolation
17	全球地表环境负荷格网时间序列球谐分析	Loadspharmonanalys
18	分潮球谐分析与负荷潮球谐系数模型构建	Loadtidespharmsynth
19	球谐综合法模型等效水高与调和常数计算	Loadspharmsynthesis
20	球谐综合法负荷形变场及时变重力场计算	Loadeformharmsynth
21	区域地表环境负荷格林积分法负荷形变场计算	Loadfmrntgreenintg
22	区域负荷 SRBF 逼近及负荷形变场 SRBF 综合计算	loadfmtewhSRBFs
23	格林积分约束法多种异质数据负荷形变场监测计算	LoadestimateGreen
24	SRBF 逼近法陆地水及负荷形变场多种异质协同监测量	LoadestimateSRBF
25	地面形变场（向量）格网时序动力学运算	Loadfmgridtmdyncalc
26	高分地表环境负荷形变场时序完整计算流程	Loadfmfdcalcdemo
27	地下水与地表环境负荷形变场协同监测流程	Landwdfmonitordemo
28	大地监测网记录时序多站拟稳约束平差	Tmrecordnetwkadjust
29	InSAR 监测量粗差探测与空间形变分析	DynInSARsptmanalyse
30	CORS 网控制 InSAR 时空协同监测处理	DynCORScntrtmInSAR
31	多源异构 InSAR 的深度融合与时序分析	DynInSARfusiontmsqu
32	垂直形变格网时序地面稳定性变化计算	Dyngrndhgtstability
33	重力变化格网时序地面稳定性变化计算	Dyngnrgravstability
34	向量变化率时序地面稳定性变化计算	Dyndeflectstability

35	地面稳定性变化时序优化与时空特征整合	Dynstabgrdintgrestm
36	文本记录数据标准化提取	EdPntrecordstandard
37	数据插值、提取与陆海分离	Edatafsimpleprocess
38	数据文件的简单直接运算	EdFlgeodatacalculate
39	同规格时间序列文件编辑运算	Edtimeseriesfilescalc
40	区域数据格网生成与构造	Edareageodeticdata
41	向量格网文件构造与转换	EdVectorgridtransf
42	大地测量数据统计信息提取	Tlstatisticalanalysis
43	粗差探测与加权基函数格网化	AppGerrweighgridate
44	地面监测量多属性时序可视化	Veiwtimesqu
45	监测量记录时间序列可视化	Viewtmrecords
46	三维离散点值数据可视化	Viewpntdata
47	格网及其时间序列可视化	Viewgridata
48	监测量向量场格网可视化	Viewvectgrd

主要参考文献

- Capitaine N. and Wallace P. T. 2006. High precision methods for locating the celestial intermediate pole and origin [J]. *Astron., Astrophys.*, 450, pp. 855-872.
- Cartwright D. E. and Taylor R. J. 1971. New Computations of the Tide-Generating Potential [J]. *Geophys. J. Roy. astr. Soc.*, 23(1), pp. 45-74.
- Chao B. F., Ray R. D., Gipson J. M., Egbert G. D. and Ma C. 1996. Diurnal/semidiurnal polar motion excited by oceanic tidal angular momentum [J]. *J. Geophys. Res.*, 101(B9), pp. 20151-20163.
- Cheng, M., J. C. Ries and B. D. Tapley. 2011. Variations of the Earth's figure axis from satellite laser ranging and GRACE [J]. *J. Geophys. Res.*, 116, B01409.
- Dickson S. R. and Gross R. S. 2010. Rotational evaluation of a long-period spherical harmonic ocean tide model [J]. *J. Geod.*, 84(7), pp. 457-464.
- Doodson A. T. 1921. The Harmonic development of the tide-generating potential [J]. *Proc.R.Soc. A.*, 100, pp. 305-329.
- Farrell W. 1972. Deformation of the Earth by surface loads [J]. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 10(3): 761-797.
- Folkner W. M., Williams J. G. and Boggs D. H. 2008. The Planetary and Lunar Ephemeris DE421 [S]. IPN Progress Report 42-178.
- Gross R. S. 2009. Ocean tidal effects on Earth rotation [J]. *J. Geodyn.*, 48(3-5), pp. 219-225.
- Hans-Georg Scherneck, et al. 2002. Ocean Tide and Atmospheric Loading [S]. IVS 2002 General Meeting Proceedings, pp. 205-214.
- Hartmann T. and Wenzel H.-G. 1995. The HW95 tidal potential catalogue [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 22(24), pp. 3553-3556
- J. Y. Guo, Y. B. Li, Y. Huang, etc. 2004. Green's function of the deformation of the Earth as a result of atmospheric loading [J]. *Geophys. J. Int.* 159, pp. 53-68.
- Kantha L. H., Stewart J. S., and Desai S. D. 1998. Long-period lunar fortnightly and monthly ocean tides [J]. *J. Geophys. Res.*, 103(C6), pp. 12639-12647.
- Kusche J., Schrama E. J. O. 2005. Surface mass redistribution inversion from global GPS deformation and GRACE gravity data [J]. *J. Geophys. Res.*, 110.
- Lambert S. and Bizouard C. 2002. Positioning the Terrestrial Ephemeris Origin in the International Terrestrial Reference Frame [J]. *Astron. Astrophys.*, 394(1), pp. 317-321.
- Mathews P. M., Herring T. A., et al. 2002. Modeling of nutation and precession: New nutation series for nonrigid Earth, and insights into the Earth's interior [J]. *J. Geophys. Res.*, 107(B4).
- Mathews P. M., Lambert S. B. 2009. Effect of mantle and ocean tides on the Earth's rotation rate [J]. *Astronomy of Astrophysics*, 493(1), pp. 325-330.
- Matsumoto K., Sato T., et al. 2001. GOTIC2: A Program for Computation of Oceanic Tidal Loading Effect [J]. *Journal of the Geodetic Society of Japan*, 47, 243-248.
- Petit G., Luzum B. 2010. IERS Conventions 2010 [S]. International Earth Rotation and Reference Systems Service. IERS Technical Note No. 36.
- Ray R. D., Steinberg D. J., Chao B. F. and Cartwright D. E. 1994. Diurnal and semidiurnal variations in the Earth's rotation rate induced by oceanic tides [J]. *Science*, 264(5160), pp. 830-832.
- Schwiderski E. W. 1980. On charting global ocean tides [J]. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 18(1), pp. 243-268.
- Tamura Y. 1987. A harmonic development of the tide-generating potential [J]. *Bull. d'Inform. Marees Terr.*, 99, pp. 6813-6855.
- Wahr J. M. 1981. The forced nutations of an elliptical, rotating, elastic and oceanless Earth [J]. *Geophys. J. Roy. astr. Soc.*, 64(3), pp. 705-727.
- Wahr J. M. 1987. The Earth's C21 and S21 gravity coefficients and the rotation of the core [J]. *Geophys. J. Roy. astr. Soc.*, 88, pp. 265-276.
- Yoder C. F., Williams J. G., and Parke M. E. 1981. Tidal variations of Earth rotation [J]. *J. Geophys. Res.*, 86(B2), pp. 881-891.

- 陈俊勇, 2000, 永久性潮汐与大地测量基准[J], 测绘学报, 29 (1): 14-18
- 党亚民, 章传银, 陈俊勇, 张鹏, 薛树强, 2015, 现代大地测量基准[M], 测绘出版社
- 高布锡, 2012, 天文地球动力学原理[M], 科学出版社
- 郭俊义, 2001, 地球物理学基础[M], 测绘出版社
- 马高峰, 乔书波等, 2009, 天球参考极的定义与选择[J], 测绘科学技术学报, 26 (5): 321-325
- 申文斌, 陈巍, 李进, 2008, 基于时变地球主惯性矩的三轴地球的自由 Euler 运动[J], 武汉大学学报 (信息科学版), 33 (8): 859-863.
- 宋贯一, 2011, 地球自转速度季节性变化的主要原因解析[J], 地球物理学进展, 26 (2): 450-455
- 魏二虎, 刘文杰等, 2016, VLBI 和 GPS 观测联合解算地球自转参数和日长变化[J], 武汉大学学报 (信息科学版), 41 (01): 66-71
- 魏子卿, 2005, 地球主惯性矩[J], 测绘学报, 34 (1): 7-13
- 许厚泽, 2010, 固体地球潮汐[M], 湖北科技出版社
- 许军, 暴景阳等, 2008, 基于 POM 模式与 blending 同化法建立中国近海潮汐模型[J], 海洋测绘, 28 (6): 15-17
- 许雪晴, 董大南, 周永宏, 2014, 周日、半日地球自转变化研究进展[J], 天文学进展, 32 (3): 338-346
- 闫昊明, 钟敏, 朱耀仲, 2002, 大气、海洋和地表水对地球自转季节变化的激发-数值模式结果和观测结果的比较[J], 自然科学进展, 12 (9): 959-963
- 于锦海, 曾艳艳, 朱永超, 孟祥超, 2015, 超高阶 Legendre 函数的跨阶数递推算法[J], 地球物理学报, 58 (3): 46-53
- 喻铮铮, 张捍卫, 雷伟伟, 2018, 地球自转非潮汐变化研究进展[J], 地球物理学进展, 33 (6): 2295-2303.
- 章传银, 2020, 地球潮汐负荷效应与形变监测计算系统 ETideLoad4.5[EB/OL], <https://www.zcyphygeodesy.com/Tide.html>, 中国测绘学科研究院
- 章传银, 2020, 高精度重力场逼近与大地水准面计算系统 PAGravf4.5[EB/OL], <https://www.zcyphygeodesy.com/Geoid.html>, 中国测绘学科研究院
- 朱耀仲, 1984, 地球自转速率变化的带谐潮效应[J], 天文学报, 25 (3): 287-292