

# 地下水与地表环境负荷形变场协同监测流程

ETideLoad4.5, 章传银

联合 CORS 站网、固体潮站网与地下水监测站网等多种监测记录时间序列, 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:  $98^{\circ}\sim 101^{\circ}\text{E}$ ,  $24^{\circ}\sim 26.5^{\circ}\text{N}$ ; 监测数据分布:  $97.5^{\circ}\sim 101.5^{\circ}\text{E}$ ,  $23.5^{\circ}\sim 27.0^{\circ}\text{N}$ ; 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:  $1'\times 1'$ 。

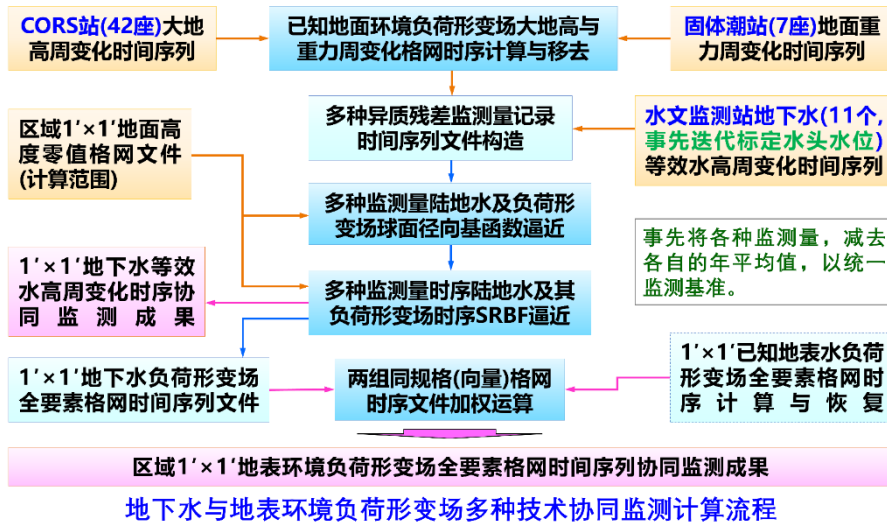
## 第一步: 多种大地测量及地表环境负荷观测数据准备与预处理计算

(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量周变化记录时间序列文件。

多种异质残差监测量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  $\mu\text{Gal}$ ，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

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:/EtldeLoad4.5\_win64cn/examples/landwdfmonitordemo/surfwaterreff\_grav/grav019010212.dat

>> 打开源记录时间序列文件 C:/EtldeLoad4.5\_win64cn/examples/landwdfmonitordemo/gravobs.txt

>> 观察下方窗口文件信息,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:/EtldeLoad4.5\_win64cn/examples/landwdfmonitordemo/gravsurfw.txt

>> 程序在当前目录下输出剩余量记录时序文件 C:/EtldeLoad4.5\_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:/EtldeLoad4.5\_win64cn/examples/landwdfmonitordemo/surfwaterreff\_grav/grav019010212.dat  
 C:/EtldeLoad4.5\_win64cn/examples/landwdfmonitordemo/surfwaterreff\_grav/grav019010912.dat  
 C:/EtldeLoad4.5\_win64cn/examples/landwdfmonitordemo/surfwaterreff\_grav/grav019011612.dat  
 C:/EtldeLoad4.5\_win64cn/examples/landwdfmonitordemo/surfwaterreff\_grav/grav019012312.dat  
 C:/EtldeLoad4.5\_win64cn/examples/landwdfmonitordemo/surfwaterreff\_grav/grav019013012.dat  
 C:/EtldeLoad4.5\_win64cn/examples/landwdfmonitordemo/surfwaterreff\_grav/grav019020612.dat  
 C:/EtldeLoad4.5\_win64cn/examples/landwdfmonitordemo/surfwaterreff\_grav/grav019031312.dat  
 C:/EtldeLoad4.5\_win64cn/examples/landwdfmonitordemo/surfwaterreff\_grav/grav019032012.dat

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	-7.8014	-9.1806	
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	-17.4566	-10.0307	-6.5621
9	Groundw	97.9611	25.4165	0	1.0	6	6.9853	0.5677	0.9668	-2.4974
10	Groundw	98.5755	24.8678	0	1.0	6	-17.9751	-17.4566	-10.0307	-6.5621
11	Groundw	98.5755	24.8678	0	1.0	6	-2.4838			
12	Groundw	98.5755	24.8678	0	1.0	6	-3.9630			
13	Groundw	98.5755	24.8678	0	1.0	6	-9.1540			
14	Groundw	98.5755	24.8678	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	JTGU	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			
26	MYON	99.7582	23.9442	0	1.0	4	2.4876			
27	QINA	100.6244	26.3091	0	1.0	4				
28	SAN1	101.0779	26.0125	0	1.0	4				
29	TDIA	99.5277	26.5430	0	1.0	4				
30	WANM	101.0125	26.4526	0	1.0	4				
31	WYIN	100.1285	25.1540	0	1.0	4				
32	XIFU	101.2905	23.6286	0	1.0	4				
33	XYUN	100.5590	25.4876	0	1.0	4				
34	YNCX	101.0928	25.0495	0	1.0	4				
35	YNJD	100.8808	24.4371	0	1.0	4				

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周各站点测量量

多种异质监测记录时序heterobstm.txt =

固体潮站残差重力周变化记录时序,第6列=3 +

水文站地下水等效水高变化记录时序,第6列=6 +

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[多种监测量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。

- ① 高程异常(大地水准面)变化(mm) SRBFgeoid\*\*\*.dat,
- ② 地面重力变化( $\mu\text{Gal}$ ) SRBFterrgrav\*\*\*.dat,
- ③ 扰动重力变化( $\mu\text{Gal}$ ) 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。

### 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。

监测量类似可包括: 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  $\mu\text{Gal}$ , 3 (流动重力或固体潮站点) 地面重力变化  $\mu\text{Gal}$ , 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 (水文站点) 等效水高变化mm。

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靠, ② 监测量的残差标准差明显减小, 残差统计平均值趋于零。

### 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

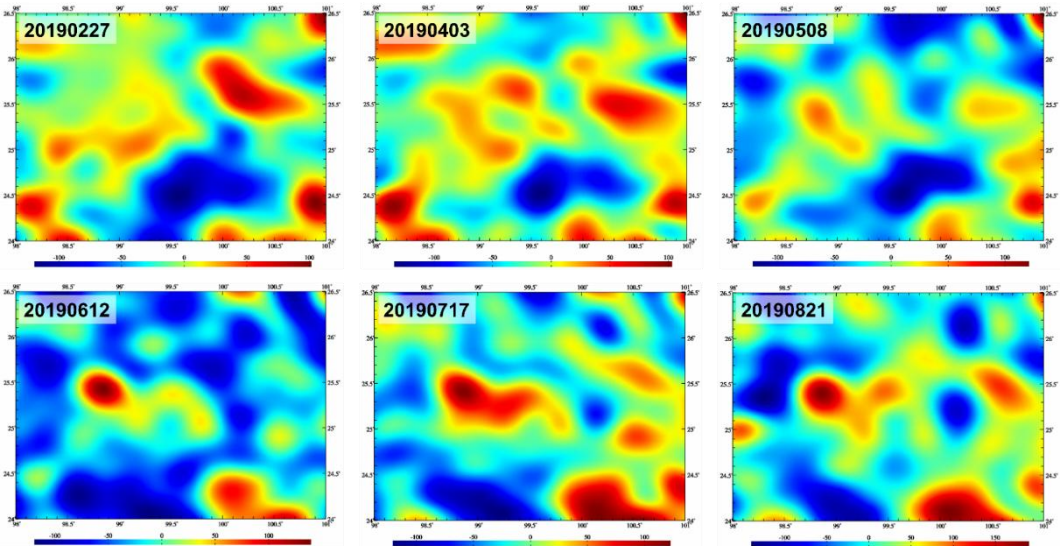
The screenshot shows the SRBF software interface with various settings and monitoring results. Key elements include:

- Parameter Settings (Left Panel):**
  - 监测站平均间距: 6.0 km
  - 选择SRBF类型: 径向多核子核
  - 最大阶数: 9
  - 最小阶数: 900
  - Bjerhammar-球面插值类型: 1.0 km
  - SRBF中心作用距离: 200 km
  - 选择方程解算方法: LU三角解法
  - 设置累积逼近次数: 1
  - 选择SRBF逼近参数设置: Poisson小波核
  - 多核阶数: 0
  - 最大阶数: 720
  - 最小阶数: 1800
  - Bjerhammar-球面插值类型: 5.0 km
  - SRBF中心作用距离: 60 km
- Code Comments (Middle Panel):**
  - 打开多种监测记录时序文件
  - 打开计算面高度格网文件
  - 选择政创结果目录
  - 计算信息保存
  - 功能: 由各种地面监测时序序列, 按照流域网格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( $\mu$ Gal), 扰动重力( $\mu$ Gal), 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(m)与水平重力梯度(m)负荷形变等效格网时间序列。
  - 打开状态监测记录时序文件: ET1deLoad4\_5\_winf64cn/examples/landwidmonitordemo/landwidmonitordemo/heterobdmn.txt
  - 输入文件名称带采样历元时刻, 记录格式: 站名, 经度, 纬度, ..., 监测量权, 监测量类型, ..., 与头文件采样历元——对应的时序采样值(缺省值9999.0000)。
  - 打开计算面高度格网文件: ET1deLoad4\_5\_winf64cn/examples/landwidmonitordemo/terc60s.dat
  - 选择或创建结果保存目录: ET1deLoad4\_5\_winf64cn/examples/landwidmonitordemo/GroundSRBFFeatIn/GroundSRBFFeatIn
  - 保存当前目录下输出结果等效水高格网文件: wps\*\*\*.dat, 监测量权文件: cr+\*\*\*.txt(如下10种负荷形变场格网文件, \*\*\*为原监测记录时序文件中的采样历元时刻, 用于标识负荷形变场格网文件最后1列属性为采样历元时刻。
  - ① 高程异常(大地水准面)变化(mm) SRBFgeoide\*\*\*.dat
  - ② 地面重力变化( $\mu$ Gal) SRBFtergrav\*\*\*.dat
  - ③ 地面重力变化( $\mu$ Gal) SRBFgravdiat\*\*\*.dat
  - ④ 地倾斜向量变化(mas) SRBFgrnditl\*\*\*.dat
  - ⑤ 垂线偏差变化(SW, mas) SRBFvortder\*\*\*.dat
  - ⑥ 水位移动量(IN, mm) SRBFhorzdisp\*\*\*.dat
  - ⑦ 大地高变化(mm) SRBFelliphtg\*\*\*.dat
  - ⑧ 正(常)高变化(mm) SRBForthhgt\*\*\*.dat
  - ⑨ 扰动重力梯度变化(m) SRBFgradint\*\*\*.dat
  - ⑩ 水平重力梯度变化(m) SRBFgradisp\*\*\*.dat
- Monitoring Results (Bottom Panel):**
  - 输入输出数据展示: 提取负荷形变场
  - 图形绘制: 监测历元201908212
  - 监测站空间分布: 显示监测站分布图。
  - 地表负荷变化cm: 显示地表负荷变化分布图。
  - 地面重力变化 $\mu$ Gal: 显示地面重力变化分布图。
  - 正(常)高变化mm: 显示正(常)高变化分布图。

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。

\*\*\*为原监测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。

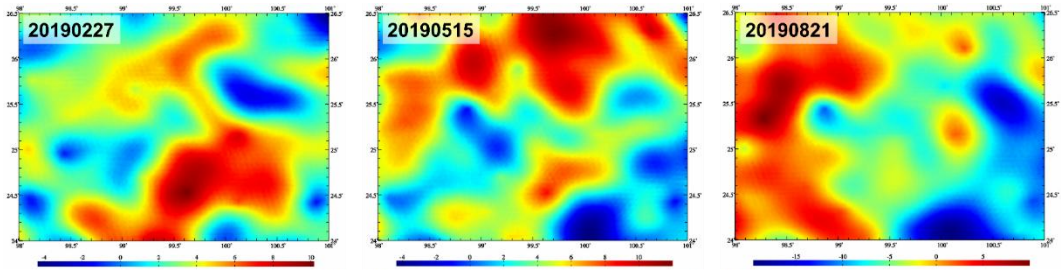
### CORS站(42座)、固体潮站(7座)与地下水监测站(11个)协同监测



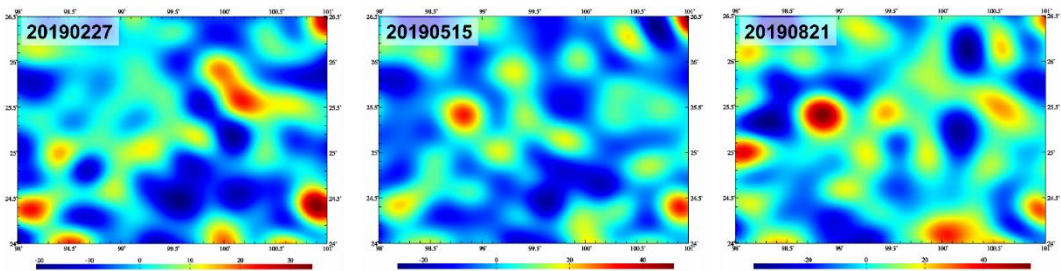
1'x1'区域地下水等效水高周变化(cm)格网时间序列多种技术协同监测成果

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'×1'地下水负荷形变场地面正常高变化(mm)格网时间序列



1'×1'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。**

按照 4.10.1 流程，计算 1'×1'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。

**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    >> 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

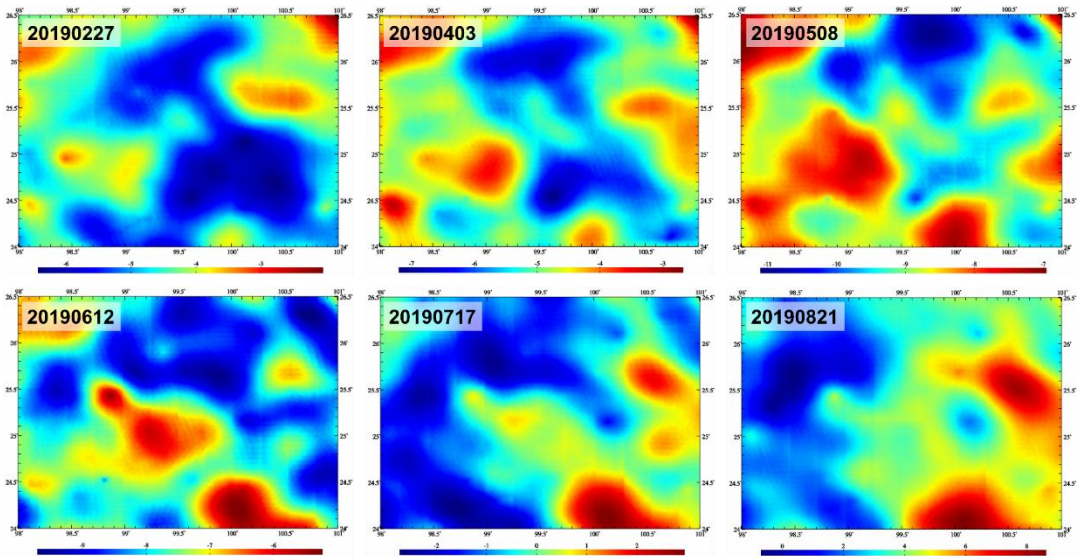
选择运算方式  
 相加 +  
 权重设置  
 权重一 1.00    权重二 1.00

>> 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序文件加权运算！有26对格网时序文件参与计算。**  
 >> 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

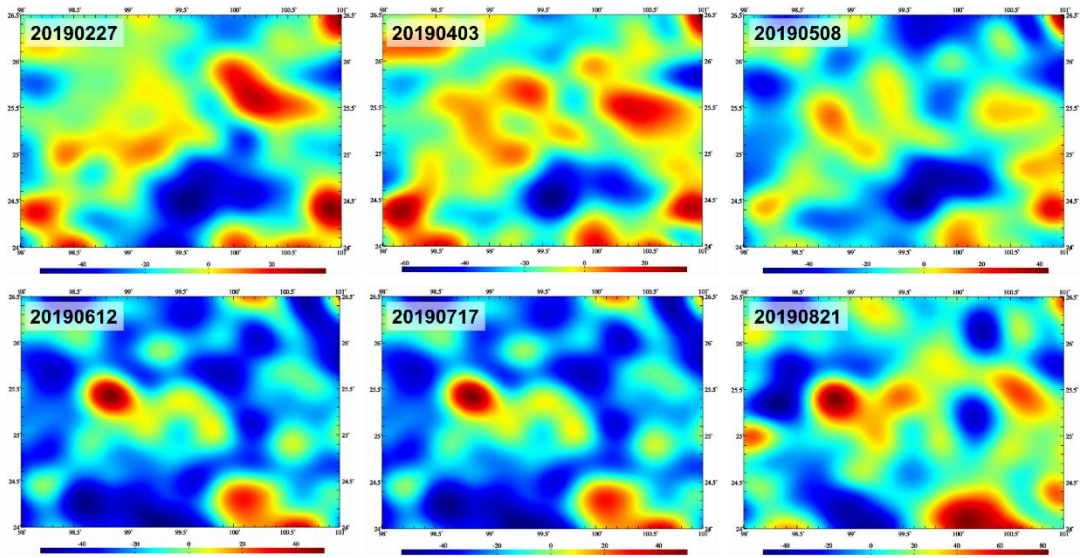
输入输出数据显示！

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	4.8907	4.8956	4.9018	4.9131	4.9329	4.9677	
4.9019	4.9484	4.8056	4.7709	4.7437	4.7226	4.7076	4.6991	4.6966	
4.7734	4.7932	4.8056	4.8130	4.8524	4.8704	4.8879	4.9077	4.9307	
4.9121	4.9023	4.8812	4.8730	4.8735	4.8635	4.8544	4.8467	4.8388	
4.8065	4.8122	4.8122	4.8122	4.8194	4.8294	4.8329	4.8399	4.8594	
5.1103	5.1444	5.1444	5.1444	5.1444	5.1444	5.1444	5.1444	5.1444	
5.2112	5.2112	5.2112	5.2112	5.2112	5.2112	5.2112	5.2112	5.2112	
6.1165	6.1165	6.1165	6.1165	6.1165	6.1165	6.1165	6.1165	6.1165	
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	5.0174	4.9812	4.9512	4.9268	4.9014	4.8890	
4.8612	4.8577	4.8577	4.8577	4.8509	4.8501	4.8502	4.8528	4.8598	
4.8328	4.8740	4.8740	4.8740	4.8740	4.8740	4.8740	4.8740	4.8740	

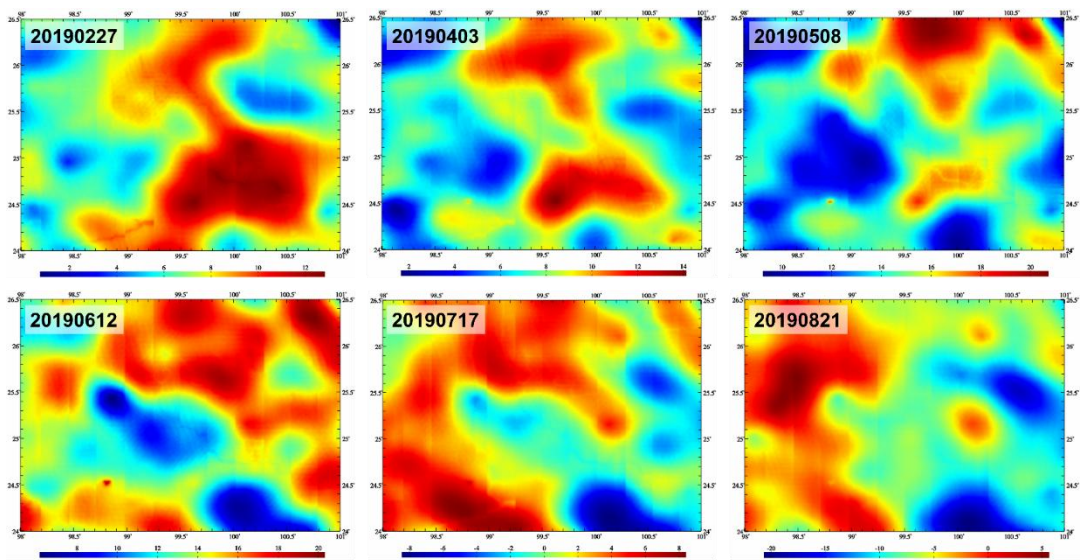


**1'×1'地表环境负荷形变场大地水准面周变化(mm)格网时间序列多种技术协同监测成果**

调用[同规格时间序列文件编辑运算]，分别将 10 种类型的 1'×1'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地面重力周变化( $\mu\text{Gal}$ )格网时间序列多种技术协同监测成果



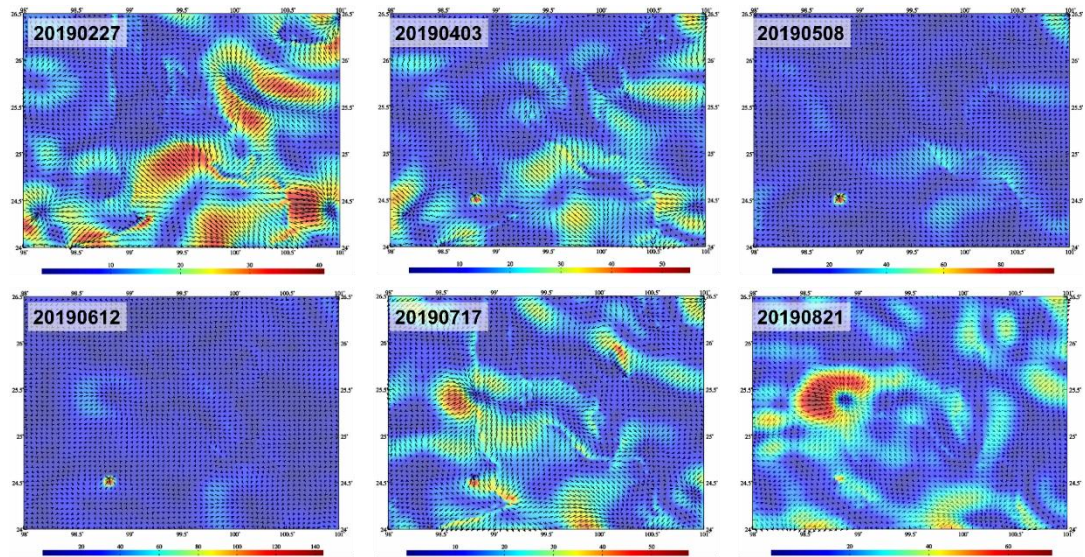
1'×1'地表环境负荷形变场地面大地高周变化(mm)格网时间序列多种技术协同监测成果

**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倾斜周变化(ms)向量格网时间序列多种技术协同监测成果