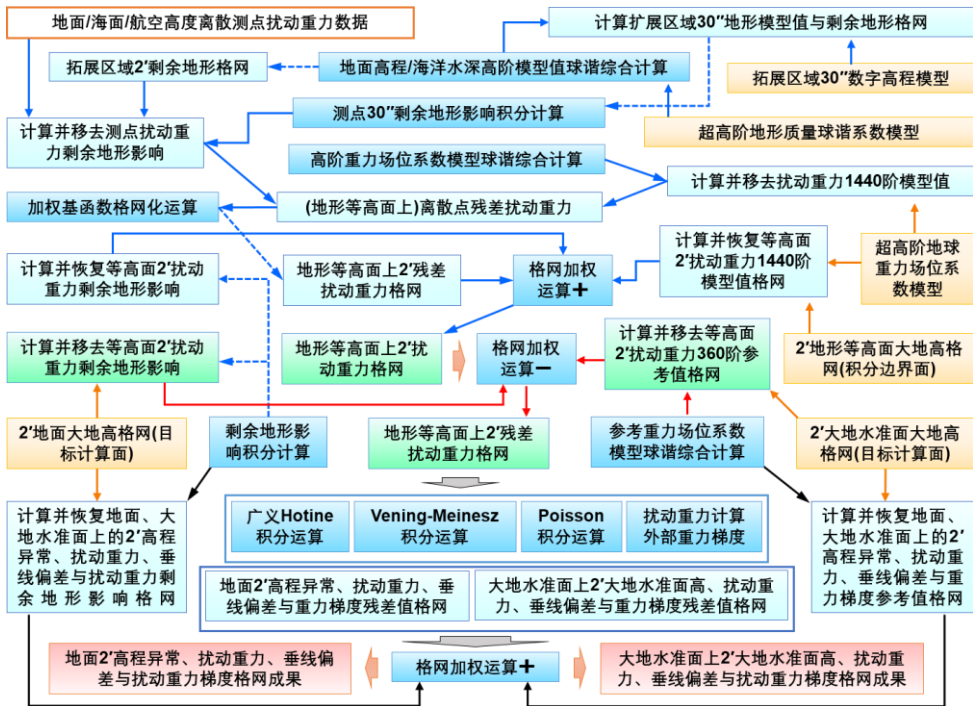


# 空域积分法重力场全要素建模练习流程

PAGrav4.5, 章传银

由模拟的地面观测扰动重力数据和数字地面高程模型，按剩余地形影响与参考重力场模型组合移去恢复技术，以空域重力场边值理论积分算法为主，同步计算地面上的高程异常、扰动重力、垂线偏差与扰动重力梯度格网，以及大地水准面上的大地水准面高、扰动重力、垂线偏差与扰动重力梯度格网，建立区域重力场全要素格网模型，演练适合近地空间、陆海统一的全要素重力场全空间建模技术要点与计算流程。

本练习旨在引导用户优化配置 PAGrav4.5 功能模块，提高积分法重力场逼近及大地水准面计算的实用技能。



空域边值理论积分法重力场全要素建模练习流程

## 4.8.1.1 输入输出数据与相关地形模型

为抑制积分边缘效应，本例采用三种数据范围：地形模型范围（扩展区域，E104.0~111.0°，N24.0~29.0°）→计算范围（重力点分布范围/等高边界面范围，E104.5~110.5°，N24.5~28.5°）→成果范围（重力场格网模型成果范围，E105.0~110.0°，N25.0~28.0°）。

本例的数据格网文件中，文件名最后一个字符为“1”时，表示该格网范围为计算范围，文件名最后一个字符为“2”时，表示该格网范围为成果范围。

(1) 观测扰动重力数据 Obsgrav.txt。

地面测点扰动重力由 2~1800 阶 EGM2008 重力位系数模型计算模拟。PAGrav4.5 对位于地面、航空和海面的各种重力数据采用完全相同的算法统一处理。

观测数据文件记录格式：点号，经度 (°)，纬度 (°)，椭球高 (m)，扰动重力 (mGal)。点位分布如图。

(2) 30"×30"和 2'×2'地面数字高程模型。

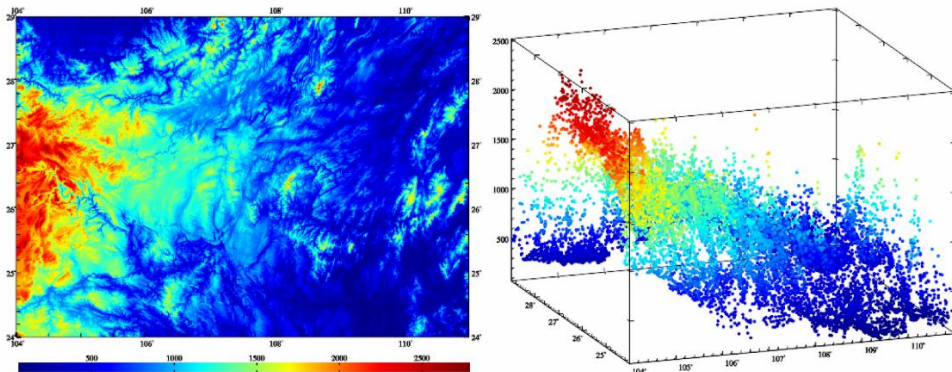
这里使用两种空间分辨率的地面数字高程模型。高分辨率地面数字高程模型用于观测数据归算，计算测点的剩余地形影响，如图；另一种分辨率与区域重力场格网模型成果分辨率一致。本例分别为 30"×30"和 2'×2'，对应文件为 extdtm30s.dat 和 extdtm2m.dat。

(2) 30"和 2'地面数字高程模型。

两种分辨率数字高程模型。高分辨率地面数字高程模型模型用于观测数据归算，计算测点的剩余地形影响，如图；另一种分辨率与成果分辨率一致。本例分别为 30"和 2'，对应文件为 extdtm30s.dat 和 extdtm2m.dat。

(3) 3600 阶全球陆海地形质量球谐系数模型 ETOPOcs3600.dat 与 2190 阶 EGM2008 重力位系数模型 EGM2008.gfc。

这两个模型存放在 C:\PAGrav4.5\_win64cn\data 目录中。其中，3600 阶全球陆海地形质量球谐系数模型，由全球 2'×2'陆海地形模型 ETOPO2v2g，采用 PAGrav4.5 程序[超高阶陆海地形球谐分析与球谐系数模型构建]生成。



地面数字高程模型（左）与地面重力测点空间分布（大地坐标BLH，右）

(4) 2'×2'地形等高面椭球高格网模型 equihgt2m.dat。

等高面椭球高格网由 360 阶模型高程异常与地面正（常）高平均值（数字高程模型统计平均值）之和生成。地形等高面是测点扰动重力的归算面，也是解 Stokes 边值问题的等位边界面。

当以模型大地水准面高即零高程面的椭球高，作为等高面的椭球高时，归算面和边界面即为传统的大地水准面。这里采用地形等高面（近似等位面）作为重力场边值问题的边界面，而不是大地水准面，其目的是让地面计算点与重力场积分边界面尽量接近，

以抑制重力归算过程中超短波重力场信号的衰减。

(5) 2'×2'模型大地水准面高格网 geoidhgt2m.dat 和地面椭球高格网 surfhgt2m.dat。

这里的大地水准面高格网，用于给定大地水准面上重力场格网所在的空间位置，而不是大地水准面模型逼近成果，因而用 360 阶位系数模型计算的 2'×2'模型大地水准面高格网表示。

类似地，地面椭球高格网由 360 阶模型高程异常格网与地面数字高程模型格网相加生成，用于给定地面重力场格网所在的空间位置。

(6) 输出区域重力场系列格网模型成果数据。

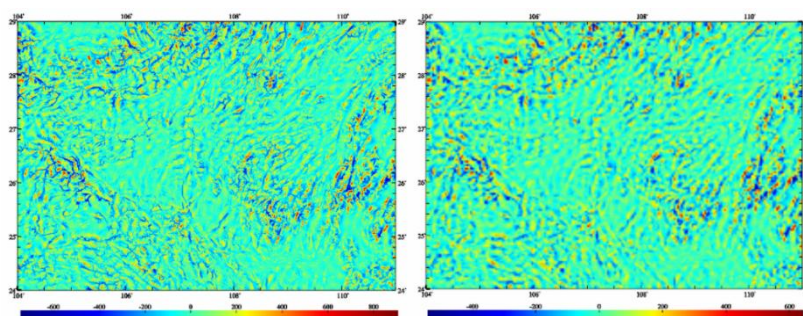
①大地水准面上各种扰动重力场元格网模型。2'×2'大地水准面高、扰动重力、垂线偏差与扰动重力梯度格网模型。这里的大地水准面高格网模型既是重力场格网模型成果，也表示扰动重力、垂线偏差与扰动重力梯度所在的空间位置。

②地面各种扰动重力场元格网模型。2'×2'地面高程异常、地面扰动重力、地面垂线偏差与地面扰动重力梯度格网模型，以及代表扰动重力场元格网空间位置的地面数字高程模型（或地面椭球高格网模型，二选一）。

#### 4.8.1.2 程序调用、效果与完整数据流

(1) 计算并移去模型地形高度值，构造 30"×30"和 2'×2'剩余地形格网。

调用[场元完全布格(剩余地形)影响陆海地形球谐综合]程序，设置最小、最大计算阶数分别为 1 和 1800，选择计算类型“陆地地形高程/海洋水深 (m)”，分别输入 extdtm30s.dat 和 extdtm2m.dat，生成 30"×30"和 2'×2'模型地面数字高程格网 mdl dtm30s.dat 和 mdl dtm2m.dat。



30" (左) 与 2' (右) 剩余地形格网 (m)

将 extdtm30s.dat 和 extdtm2m.dat，分别与 mdl dtm30s.dat 和 mdl dtm2m.dat 相减后，得到扩展区域的剩余地形模型 resdtm30s.dat 和 resdtm2m.dat，如图。两种剩余地形格网的剩余高程统计结果如表 1。

地形球谐综合 m	平均值	标准差	最小值	最大值
30"剩余地形格网	-0.4626	137.2485	-746.0400	908.8900
2'剩余地形格网	-0.8250	97.5569	-541.2900	645.0400

当程序输出文件名与这里给出的文件名不一致，需更改程序输出文件名，下同。

(2) 计算并移去测点处超高阶模型扰动重力。

调用[地球重力场各种场元模型值计算]程序，输入地球重力位系数模型 EGM2008.gfc 和观测扰动重力文件 Obsgrav.txt，选择计算类型扰动重力，设置最小计算阶数 1，最大计算阶数 1440，生成测点处模型扰动重力文件 Obsgravmdl.txt（第 6 列）。

将 Obsgravmdl.txt 中观测扰动重力（第 5 列）与模型扰动重力（第 6 列）相减，生成测点处残差扰动重力 Obsgravmdlresd.txt（第 7 列）。

1440 阶模型值移去前后的扰动重力统计结果如表 2。

地面测点 mGal	平均值	标准差	最小值	最大值
观测扰动重力	-27.7853	28.7143	-147.4878	74.7074
残差扰动重力	-0.3743	6.4755	-35.8263	27.4789

(3) 计算并移去测点处扰动重力剩余地形影响。

调用[场元陆海剩余地形影响数值积分]程序，输入观测数据文件 Obsgravmdlresd.txt，高分数字高程模型 extdtm30s.dat、低通数字高程模型 mdlDtm30s.dat 和地面椭球高格网 surfhgt30s.dat，设置积分半径 60km，生成测点处扰动重力剩余地形影响文件 Obsgravresdtm.txt（第 8 列）。

有限半径积分法剩余地形影响计算时，无法处理地形零阶项，因而技术上要求剩余地形模型的平均值应为零。积分计算前，程序自动移去剩余地形模型的统计平均值。

将 Obsgravresdtm.txt 中残差扰动重力（第 7 列）与扰动重力剩余地形影响（第 8 列）相减，生成测点处剩余残差扰动重力 Obsgravresidual.txt（第 9 列）。

移去剩余地形影响后，剩余残差扰动重力的统计结果如表 3。

地面测点	平均值	标准差	最小值	最大值
剩余残差扰动重力 mGal	6.4474	9.7051	-28.6215	79.6853

本例省略剩余残差扰动重力梯度法解析延拓（1000m 高度内量级很小）过程。此时，测点高度处的剩余残差扰动重力，等于地形等高面上的剩余残差扰动重力。

表 1~表 3 统计的基本目的是，按地形影响优化准则，改善剩余地形影响算法及参数（优化目标为表 3 中剩余残差扰动重力标准差最小）。模拟数据缺乏足够的真实重力场超短波信息，本例因此省略优化准则分析过程。

(4) 地形等高面上 2'×2'残差扰动重力格网化。

调用[异质数据基函数插值格网化]程序，选择观测量等权（可自行以剩余地形影响为参考属性配权），对 Obsgravresidual.txt 中的第 10 列进行格网化，生成地形等高面上 2'×2'剩余残差扰动重力格网 distgravresidual.dat。

(5) 计算地形等高面上 2'×2'扰动重力超高阶重力场模型值格网。

调用[地球重力场各种场元模型值计算]程序，输入 EGM2008.gfc 和  $2' \times 2'$ 等高面椭球高格网模型 equihgt2m1.dat，选择计算类型扰动重力，设置最小计算阶数 1，最大计算阶数 1440，生成等高面上  $2' \times 2'$ 超高阶模型扰动重力格网 distgravmdl.dat。

技术上要求重力场位系数模型、最小最大阶数与步骤（2）完全相同。步骤（2）移去测点处模型扰动重力，步骤（5）恢复归算面上的模型扰动重力，该移去-恢复过程的目的是借助超高阶重力场模型进行解析延拓。

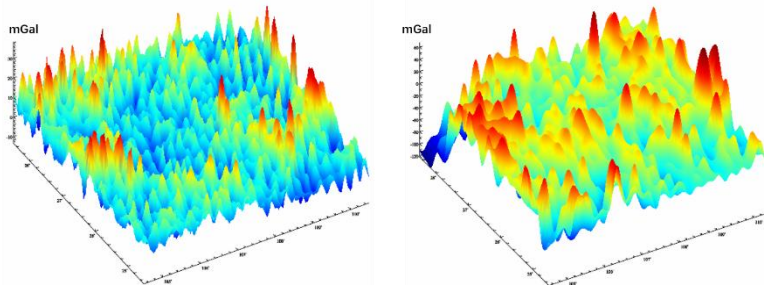
(6) 计算地形等高面上  $2' \times 2'$ 扰动重力剩余地形影响格网。

调用[场元陆海剩余地形影响数值积分]程序，输入高分数字高程模型 extdtm2m.dat、低通数字高程模型 mdl2m.dat 和地面椭球高格网 surfhgt2m.dat，计算面为  $2' \times 2'$ 等高面椭球高格网模型 equihgt2m1.dat，选择计算类型扰动重力，设置积分半径 60km，生成等高面上  $2' \times 2'$ 扰动重力剩余地形影响格网 distgravresidtm.dat。

技术上要求地形模型和积分半径大小与步骤（3）完全相同。

(7) 生成地形等高面上  $2' \times 2'$ 扰动重力格网模型。

将地形等高面上同格网规格扰动重力的剩余残差量格网 distgravresidual.dat、超高阶重力场模型值格网 distgravmdl.dat 与剩余地形影响格网 distgravresidtm.dat 共 3 个文件相加，生成地形等高面上  $2' \times 2'$ 扰动重力格网模型 equidistgrav.dat。



等高面上 $2' \times 2'$ 残差扰动重力（左）和1440阶模型扰动重力格网（右）

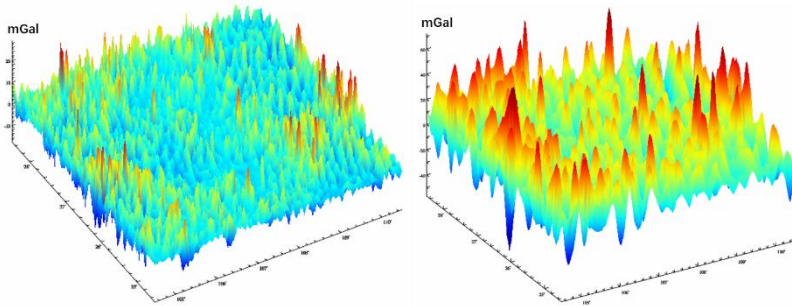
完成区域重力场数据归算与处理。后续步骤按重力边值理论的空域重力场积分法进行区域重力场逼近及建模。

(8) 依据重力场逼近对地形影响的技术要求，选择剩余地形带宽（本例采用 1~1440 阶地形质量球谐系数模型构造低通数字高程模型），重新计算  $2' \times 2'$ 剩余地形模型 resdtm2m1.dat，进而调用[近地空间场元陆海剩余地形影响数值积分]程序，输入 60km 积分半径，计算地形等高面上  $2' \times 2'$ 扰动重力剩余地形影响 equidistgravrtm.dat。

用于重力场逼近与用于扰动重力格网化的地形影响优选准则一般不同，剩余地形构造方式一般也不相同。模拟数据难以分析问题，这里直接采用 1~1440 阶陆海地形质量球谐系数模型构造低通数字高程模型。

(9) 计算地形等高面上 720 阶模型扰动重力格网。

调用[地球重力场各种场元模型值计算]程序，选择计算类型扰动重力，设置最小计算阶数 1，最大计算阶数 720，输入地形等高面椭球高格网模型 equihgt2m1.dat，计算地形等高面上 720 阶模型扰动重力格网（计算范围）equdisgravmdl.dat。



等高面上2'x2'扰动重力剩余地形影响（反号显示）与剩余残差扰动重力

前面步骤（2）（5）的超高阶重力位系数模型（1440 阶）用于解析延拓，而这里的 720 阶重力位系数模型用于局部重力场积分时的参考重力场。

（10）移去扰动重力的剩余地形影响与参考重力场模型值，计算地形等高面上 2'x2' 剩余残差扰动重力格网。

将地形等高面上 2'x2'扰动重力格网模型 equdistgrav.dat，减去 2'x2'扰动重力剩余地形影响 equdisgravrtm.dat，再减去 720 阶模型扰动重力格网 equdisgravmdl.dat，生成地形等高面上 2'x2'剩余残差扰动重力格网 equgravresidual.dat。

将地形等高面上 2'扰动重力格网模型 equdistgrav.dat，减去 2'扰动重力剩余地形影响 equdisgravrtm.dat，再减去 720 阶模型扰动重力格网 equdisgravmdl.dat，生成地形等高面上 2'剩余残差扰动重力格网 equgravresidual.dat。

地形等高面 mGal	平均值	标准差	最小值	最大值
2'扰动重力格网	-17.7675	23.3340	-119.4421	86.6984
扰动重力剩余地形影响	-1.6478	4.5234	-31.5185	22.3032
720 阶参考模型值	-23.5523	19.5560	-112.3400	31.4088
剩余残差扰动重力格网	7.4326	13.1966	-56.9378	71.9857

统计的基本目的是，按重力场逼近优化准则，改善剩余地形影响算法及参数。模拟数据缺乏足够的真实重力场超短波信息，本例因此省略优化准则分析过程。

（11）调用有关重力场积分功能，由地形等高面上剩余残差扰动重力格网，分别计算地面和大地水准面上各种类型剩余残差扰动重力场元。

计算地面剩余残差场元时，输入地面椭球高格网 surfhgt2m2.dat 作为计算点位置；计算大地水准面上残差场元时，输入模型大地水准面高格网 geoidhgt2m2.dat 作为计算点位置。等位边界面采用地形等高面椭球高格网 equihgt2m1.dat，积分半径选择 90km。

①调用[广义 Hotine 积分运算]程序，分别计算地面剩余残差高程异常与剩余残差大

地水准面高格网 surfksiresidual.dat、geoidhgtresidual.dat。

②调用[Vening-Meinesz 积分运算]程序，分别计算地面剩余残差垂线偏差与大地水准面上剩余残差垂线偏差格网 surfdftresidual.dat、geoiddftresidual.dat。

③调用[Poisson 积分运算]功能，分别计算地面剩余残差扰动重力与大地水准面上剩余残差扰动重力格网 surfrgaresidual.dat、geoidrgaresidual.dat。

④调用[扰动重力计算外部重力梯度]程序，分别计算地面剩余残差扰动重力梯度与大地水准面上剩余残差扰动重力梯度格网 surfgrresidual.dat、geoidgrresidual.dat。

(12) 分别计算地面和大地水准面上各种扰动重力场元的  $2' \times 2'$  剩余地形影响。

调用[场元陆海剩余地形影响数值积分]程序，计算地面扰动场元剩余地形影响时，输入地面椭球高格网 surfhgt2m2.dat 作为计算点位置；计算大地水准面上扰动场元剩余地形影响时，输入模型大地水准面高格网 geoidhgt2m2.dat 作为计算点位置。

扰动场元类型同步选择高程异常、扰动重力、垂线偏差与扰动重力梯度。技术上要求， $2' \times 2'$  剩余地形模型 resdtm2m.dat 和积分半径 60km 应与步骤 (8) 完全一致。

输出地面扰动场元剩余地形影响格网文件，包括地面高程异常剩余地形影响 surfhgt2mrtm.ksi，地面扰动重力剩余地形影响 surfhgt2mrtm.rga，地面垂线偏差剩余地形影响 surfhgt2mrtm.dft 和地面扰动重力梯度剩余地形影响 surfhgt2mrtm.grr。

输出大地水准面上扰动场元剩余地形影响格网文件，包括大地水准面高的剩余地形影响 geoidhgtrtm.ksi，扰动重力剩余地形影响 geoidhgtrtm.rga，垂线偏差剩余地形影响 geoidhgtrtm.dft 和扰动重力梯度剩余地形影响 geoidhgtrtm.grr。

(13) 分别计算地面和大地水准面上各种扰动场元的 720 阶参考模型值。

调用[地球重力场各种场元模型值计算]程序，计算地面扰动场元模型值时，输入地面椭球高格网 surfhgt2m2.dat 作为计算点位置；计算大地水准面上扰动场元模型值时，输入模型大地水准面高格网 geoidhgt2m2.dat 作为计算点位置。

扰动场元类型同步选择高程异常、扰动重力、垂线偏差与扰动重力梯度。技术上要求，输入的最小最大计算阶数 (1、720)，应与步骤 (9) 完全一致。

输出地面扰动场元模型值格网文件，包括模型地面高程异常 surfhgt2mgm720.ksi，模型地面扰动重力 surfhgt2mgm720.rga，模型地面垂线偏差 surfhgt2mgm720.dft 和模型地面扰动重力梯度 surfhgt2mgm720.grr。

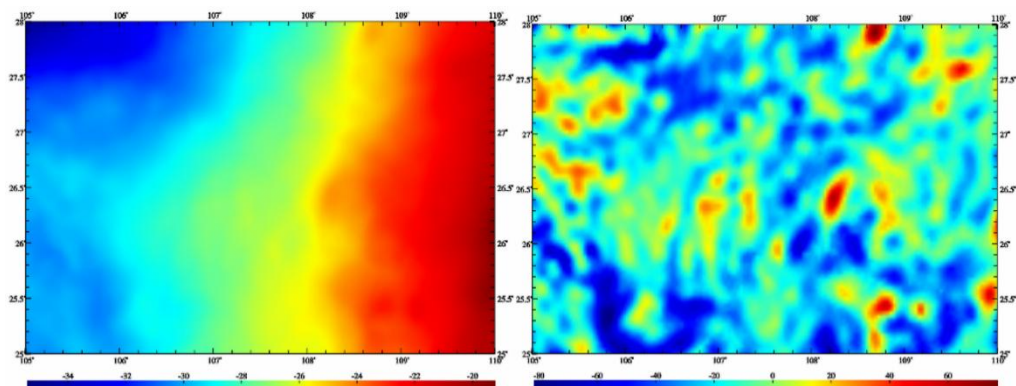
输出大地水准面上扰动场元模型格网文件，包括模型大地水准面高格网 geoidh2mgm720.ksi，模型扰动重力格网 geoidh2mgm720.rga，模型垂线偏差格网 geoidh2mgm720.dft 和模型扰动重力梯度格网 geoidh2mgm720.grr。

(14) 生成地面上的各种扰动重力场元格网模型成果。

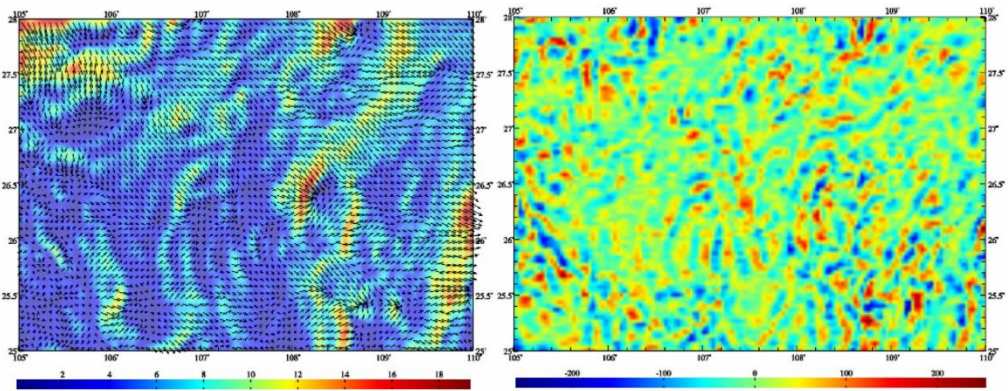
将地面上各种扰动场元的剩余残差量格网、剩余地形影响与参考模型值格网分别相加，生成  $2' \times 2'$  地面高程异常 surfhgtksi2m.dat、地面扰动重力 surfhgtgrga2m.dat、地面垂

线偏差向量 surfhgt2m.dat 与地面扰动重力梯度 surfhgtgrr2m.dat 格网模型成果，并加入地面椭球高格网模型（不可缺少），用于指定地面扰动场元格网的空间位置。

场元类型	谱域分解	平均值	标准差	最小值	最大值
地面高程异常 m	参考模型值	-27.4261	3.2927	-36.0901	-20.1879
	剩余地形影响	-0.0008	0.0314	-0.1219	0.1363
	积分剩余残差量	0.6136	0.1608	0.2218	1.2427
	地面高程异常	-26.8133	3.3149	-35.4331	-19.1927
地面扰动重力 mGal	参考模型值	-22.4136	15.7881	-76.2475	18.5218
	剩余地形影响	-0.7256	0.6856	-7.8832	1.8187
	积分剩余残差量	6.8912	11.4588	-35.1321	65.7856
	地面扰动重力	-16.2480	18.7702	-81.8505	77.2212
地面垂线偏差南向"	参考模型值	1.5543	3.0688	-5.7396	14.0662
	剩余地形影响	0.1340	0.7770	-3.5615	3.6938
	积分剩余残差量	-0.0232	1.4285	-7.3171	6.1334
	垂线偏差南向	1.6649	3.2346	-9.5143	16.4299
地面垂线偏差西向"	参考模型值	-4.3753	2.7632	-12.4916	5.1844
	剩余地形影响	-0.0525	0.9824	-4.3215	5.2168
	积分剩余残差量	0.0222	1.6118	-7.6123	6.2307
	垂线偏差西向	-4.4050	3.2895	-18.4035	6.0986
地面扰动重力梯度 E	参考模型值	-0.2116	9.6634	-34.2497	32.3422
	剩余地形影响	-0.0986	49.3177	-269.7075	232.3091
	积分剩余残差量	-0.0622	15.1553	-62.7129	112.4539
	扰动重力梯度	-0.3736	52.1555	-262.5373	253.7105



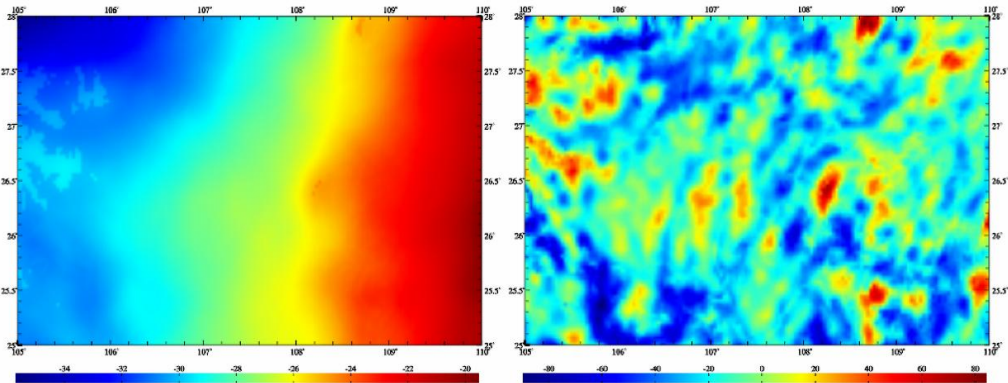
2'地面高程异常格网 (m) 与2'地面扰动重力格网 (mGal) 成果



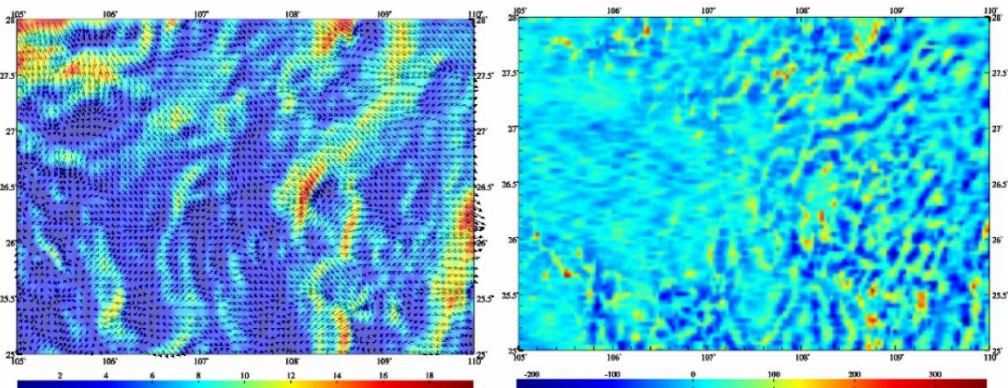
2'地面垂线偏差向量格网 (")与2'地面扰动重力梯度格网 (E) 成果

(15) 生成大地水准面上的各种扰动重力场元格网模型成果。

将大地水准面上各种扰动场元的剩余残差量格网、剩余地形影响与参考模型值格网分别相加，生成 2'×2' 大地水准面高格网 geoidhksi2m.dat、扰动重力格网 geoidhrga2m.dat、垂线偏差向量格网 geoidhft2m.dat 与扰动重力梯度格网 geoidhgrr2m.dat 模型成果。



2'大地水准面高格网 (m)与2'扰动重力格网 (mGal) 成果



2'垂线偏差向量格网 (")与2'扰动重力梯度格网 (E) 成果