

doi: 10.11720/wtyht.2022.1403

杨婧,郭良辉.重力异常曲化平的改进插值—迭代法[J].物探与化探,2022,46(1):123-129.http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1403

Yang J, Guo L H. A modified interpolation-iteration method for gravity anomaly continuation from undulating surface to plane[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(1): 123-129. http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1403

重力异常曲化平的改进插值—迭代法

杨婧,郭良辉

(中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院,北京 100083)

摘要:重力异常曲化平即将起伏观测面上的重力异常延拓到平面上,从而为频率域处理和反演提供平坦观测面的重力异常数据。本文在常规插值—迭代法基础上,给出重力异常曲化平的改进插值—迭代法,即在异常迭代修正过程中引入起伏观测面修正因子,加快曲化平迭代收敛,促进曲化平效果提升。理论模型试验表明本文方法适用于观测面起伏较大、延拓跨度大的复杂条件下的稳定、有效曲化平,效果优于常规插值—迭代法。川滇地区实际重力异常数据试验表明本文曲化平方法有效增强了异常信号和细节特征,为后续处理和解释提供可靠数据。

关键词:曲化平;重力异常;插值—迭代法;川滇地区

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2022)01-0123-07

0 引言

高精度重力测量可以为区域地质构造研究、资源与能源勘查等提供重要的基础数据。野外起伏观测面采集的重力数据,经过各项校正得到的重力异常仍然是原起伏观测面上的异常,反映地下密度不均匀体在起伏观测面上的重力效应^[1]。频率域算法是地球物理领域的一种常用快速算法,已广泛应用于重力数据处理与反演解释,比如频率域延拓^[1-2]、频率域优化滤波^[3]、频率域界面反演^[4]、频率域三维成像^[5]等。然而,这些频率域算法通常要求重力异常所对应的观测面为平面。在观测面起伏较大情况下,若对起伏面重力数据直接应用常规频率域算法做处理与反演,则将带来不可忽略的处理偏差。因此,在起伏观测面条件下,重力异常数据从起伏观测面化到平面上,即曲化平,是开展频率域精细处理解释的必要步骤。

当前重力数据的曲化平方法较多, Pilkington 等^[6]将其分为基于源和基于场的两大类。基于源

的方法主要有等效源法^[7-12],它先对起伏观测面异常反演获得地下等效场源,然后再正演计算等效源在任意水平面引起的异常,该类方法通常计算量较大,适用于中、小规模数据的曲化平处理。基于场的方法有有限调和级数法^[13]、泰勒级数法^[14-15]、有限元法^[16-17]、积分法^[18-19]、逐次逼近法^[20]等,该类方法无需反演场源,通常需要向上延拓或向下延拓到某中间层面进而获取最终平面的异常。向上延拓是稳定的,但向下延拓通常是不稳定的,这是由于它具有放大作用,对高频噪声干扰比较敏感,延拓跨度越大,高频干扰越严重。因此,基于向下延拓的曲化平方法一般迭代收敛速度慢、精度有限,仅适用于延拓跨度小的曲化平。

徐世浙等^[21]提出了位场(重、磁场)曲化平的插值—迭代法,属于基于场的方法类,它计算简单快速,可以实现延拓跨度达 10~20 倍点距的大规模数据的稳定曲化平。该方法基本思路是,将起伏观测面(A)的顶部水平面(B_m)与底部水平面(B)之间的空间剖分为若干等间距的中间层水平面(B_i),见图 1 所示;接着,把起伏观测面(A)的位场值放到底部

收稿日期: 2021-07-22; 修回日期: 2021-10-18

基金项目:国家重点研发计划项目“月球内部圈层结构与演化过程的研究”(2021YFA0715101);国家自然科学基金面上项目“全波形与重力联合反演方法及在南岭—武夷—东南沿海成矿带岩石圈三维精细结构成像的应用”(41974101);中央高校基本科研业务费专项资金;地质过程与矿产资源国家重点实验室科技部专项经费

第一作者:杨婧(1999-),女,硕士研究生,主要从事重震数据处理和反演研究工作。Email: 2010200015@cugb.edu.cn

通讯作者:郭良辉(1980-),男,教授,博导,主要从事地球物理数据处理反演新方法及应用研究工作。Email: guo_lianghui@163.com

水平面(B)并作为该水平面的位场初始值;然后,通过频率域向上延拓计算出各中间水平面(B_i)的位场值,进而从各中间水平面(B_i)集合的位场值插值得起伏观测面(A)的位场近似值;之后,计算起伏观测面(A)的位场实测值与近似值的残差,并用于对底部水平面(B)的位场值进行修正;如此反复迭代,直至起伏观测面(A)的位场实测值与近似值的残差达到误差容限。

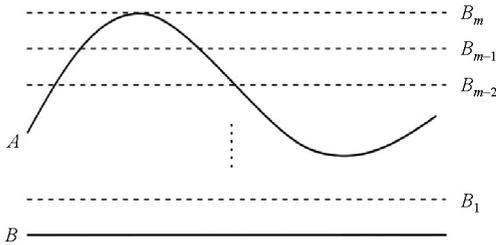


图1 插值—迭代法曲化平示意

Fig.1 The diagram of interpolation-iteration method for gravity anomaly continuation from undulating surface to plane

然而,在实际应用中,本文发现上述插值—迭代方法^[21]在观测面起伏较大、延拓跨度较大的复杂条件下的曲化平效果还是有限的(见后面理论模型数据试验的图4所示)。为此,本文对上述插值—迭代方法做进一步的改进,在异常迭代修正过程中引入起伏观测面修正因子,加快曲化平迭代收敛,促进曲化平效果提升。本文首先介绍改进的插值—迭代法的方法原理和算法流程,然后利用理论模型和川滇地区实际数据试验验证方法的有效性。

1 方法原理

本文曲化平方法是在徐世浙等^[21]的插值—迭代方法基础上改进得到,如图1所示,假定起伏观测面A和底部水平面B,曲化平的目标是由起伏观测面A的位场数据 p_A 通过曲化平处理获得底部水平面B的位场数据 p_B 。根据起伏观测面的高程最大值给定顶部水平面 B_m ,进而将底部水平面和顶部水平面之间的空间按照等间距剖分为 m 层,各中间层水平面为 $B_i(i=1,2,\dots,m)$ 。

本文算法流程如下图2所示。首先,将起伏观测面A的实测位场数据 p_A 直接赋值到底部水平面B上,作为底部水平面B的位场初值 $p_B^{(k)}(k=0)$,有

$$p_B^{(1)} = p_A, \quad (1)$$

接着,利用频率域向上延拓方法^[2]将底部水平面B的位场初值 $p_B^{(k)}(k=0)$ 分别延拓到各中间层水平面

B_i 上,得到 m 个中间层水平面的位场值 $p_B^{(k)}(k=0)$,再利用线性插值方法将起伏观测面A上各测点的场值计算出来,得到起伏观测面A的位场近似值 $p_A^{(k)}$ 。

然后,计算起伏观测面A的位场实测值 p_A 与近似值 $p_A^{(k)}$ 的残差,引入修正因子 S ,用于对底部水平面B的位场值进行修正:

$$p_B^{(k+1)} = p_B^{(k)} + S(p_A - p_A^{(k)})。 \quad (2)$$

在徐世浙等^[21]的插值—迭代方法中,修正因子 S 取常数,且通常取为1,即观测面上各测点的修正因子相同,导致在相同迭代次数下,观测面起伏变化大的地方曲化平迭代收敛速度慢、效果差些。因此,本文对修正因子 S 做了改进,采用与起伏观测面相关的修正因子,从而加快曲化平迭代收敛速度,提升曲化平效果。本文的修正因子公式如下:

$$S = \left(\frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \right)^n, \quad (3)$$

其中, T 为起伏观测面高程, T_{\min} 和 T_{\max} 分别是起伏观测面高程的最小值和最大值。可知,观测面起伏越大,修正因子 S 将越大,曲化平收敛速度将越快,反之,观测面起伏越小,修正因子 S 将越小,曲化平收敛速度将越慢。一般, n 取非负数,若 n 取值过大,则修正因子 S 将越大;反之, n 取值越小,修正因子 S 将越小;当 $n=0$ 时,修正因子 $S=1$,等效于徐世浙等^[21]的算法。

之后,对式(2)得到的底部水平面B的位场修正值,重复上述两个步骤,依次迭代修正,直到起伏观测面A的位场实测值 p_A 与近似值 $p_A^{(k)}$ 的残差达到指定的误差容限,或者迭代次数达到指定的次数

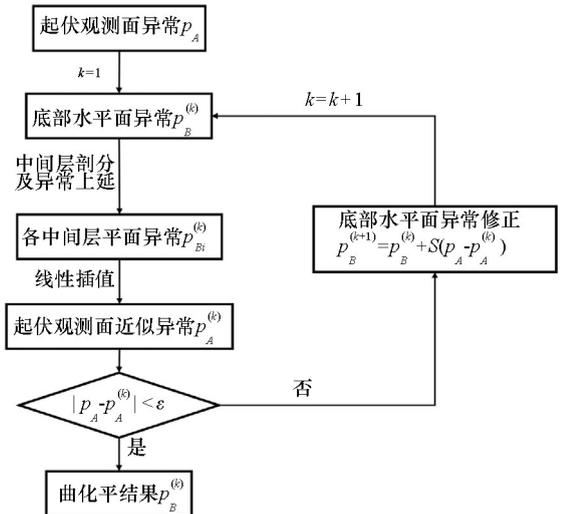


图2 本文改进的插值—迭代法算法流程

Fig.2 The workflow of the modified interpolation-iteration method

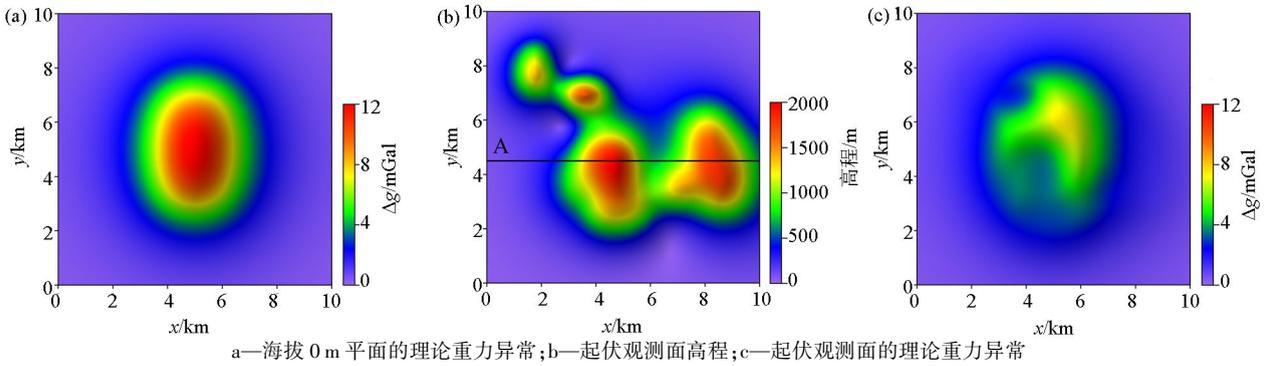
容限,则停止迭代,最后一次迭代得到的底部水平面 B 的位场修正值 $p_B^{(k+1)}$ 就是最终的曲化平结果。

2 理论模型数据试验

理论模型为一个直立长方体,长、宽、高分别为 2 000、4 000、1 000 m,中心埋深 1 500 m,剩余密度为 1.0 g/cm^3 。假定测网 E 向和 N 向范围均为 $0 \sim 10 \text{ km}$ 、点距均为 0.1 km ,则理论模型在海拔 0 km 的水平面上产生的理论重力异常如图 3a 所示,异常等值线为近椭圆状,最小值为 0.23 mGal ,最大值为 12.65

mGal ,平均值为 2.41 mGal 。假定起伏观测面高程如图 3b 所示,高程最小值为 1.46 m ,最大值为 $2 023.55 \text{ m}$,观测面高差是测网点距的 20 多倍。理论模型在起伏观测面上产生的理论重力异常如图 3c 所示,异常等值线为不规则形状,且与起伏观测面形状有一定相关,异常最小值为 0.23 mGal ,最大值为 7.52 mGal ,平均值为 1.88 mGal 。因此,受观测面起伏影响,理论重力异常变为复杂,难以直接处理解释,值得优先进行曲化平处理。

图 4a 和图 4b 显示了常规插值—迭代方法^[21]迭代 20 次的曲化平结果及其与海拔 0 m 平面理论

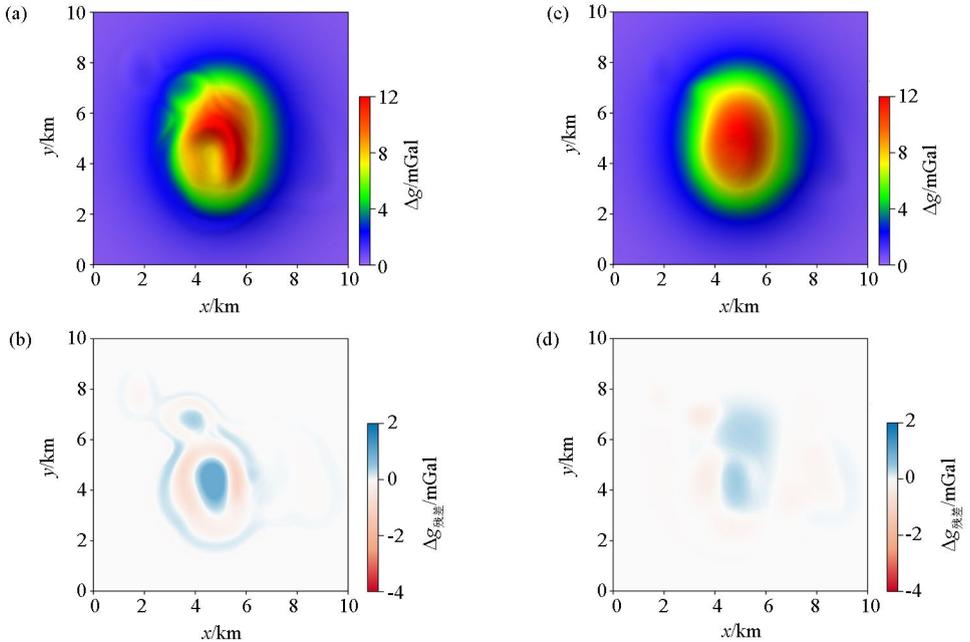


a—海拔 0 m 平面的理论重力异常;b—起伏观测面高程;c—起伏观测面的理论重力异常

a—theoretical gravity anomaly at 0 m altitude;b—elevation of undulating observation surface;c—theoretical gravity anomaly at undulating observation surface

图 3 理论模型起伏观测面与重力异常

Fig.3 Undulating observation surface of theoretical model and its gravity anomaly



a、b—常规插值—迭代法曲化平结果及与海拔 0 m 平面理论重力异常残差;c、d—本文改进的插值—迭代法曲化平结果及与海拔 0 m 平面理论重力异常残差

a、b—the result of the routine interpolation-iteration method for continuation from undulating surface to plane and its deviation from the values of plane surface;c、d—the result of the modified interpolation-iteration method and its deviation from the values of plane surface

图 4 不同曲化平方法的结果及与海拔 0 m 平面理论重力异常对比

Fig.4 Comparison between the results of different interpolation-iteration methods and the gravity forward values of plane surface

重力异常(图 3a)的残差,修正因子中 n 取 0,即 $S=1$ 。常规插值—迭代法曲化平增强了有效信号,最小值为 0.23 mGal,最大值为 13.78 mGal,但结果与海拔 0 m 平面理论重力异常有明显的差别。异常残差特征与起伏观测面比较相似,在观测面平缓区残差较小,起伏区残差较大,残差最小值为 -2.15 mGal,最大值为 3.73 mGal,标准差为 0.39 mGal。因此,在观测面起伏较大、延拓跨度较大的情况下,常规插值—迭代方法的曲化平效果是有限的。

图 4c 和图 4d 显示了本文改进的插值—迭代方法迭代 20 次的曲化平结果及其与海拔 0 m 平面理论重力异常(图 3a)的残差,其中修正因子采用式(3)且经过测试,选择效果较好的 $n=1.5$ 。

图 5 显示了剖面 A 不同曲化平方法结果与起伏观测面、海拔 0 m 平面的理论重力异常、起伏观测面高程的对比。观察发现,水平面的理论重力异常出现一个异常峰值,对应地下密度异常体,起伏观测面下的重力异常出现两个异常峰值,其位置与起伏

观测面对应,这说明起伏观测面扭曲了地下密度体的异常信息,观测面起伏越高,扭曲作用越大。 n 的取值与实际研究区观测面起伏程度相关, $n=0$ 时, S 为常数 1,等效于徐世浙等^[21]的算法,其均方根误差为 0.1551 mGal; $n=1$ 时,其均方根误差 0.044 5 mGal; $n=1.5$ 时,其均方根误差最小,为 0.028 7 mGal; $n=2$ 时,其均方根误差 0.079 4 mGal,故本文选 $n=1.5$ 。

改进的插值—迭代法有效增强了信号,曲化平后其最小值为 0.23 mGal,最大值为 12.33 mGal,结果与海拔 0 m 平面理论重力异常差别较小。异常残差最小值为 -0.86 mGal,最大值为 1.03 mGal,标准差为 0.17 mGal,我们分析这一微小差异是由高程差距引起收敛速度不一致产生的。因此,与常规插值—迭代法相比,本文改进的插值—迭代法曲化平结果更接近海拔 0 m 平面理论重力异常值,效果更优,适用于大规模数据、复杂起伏观测面、大延拓跨度的曲化平。

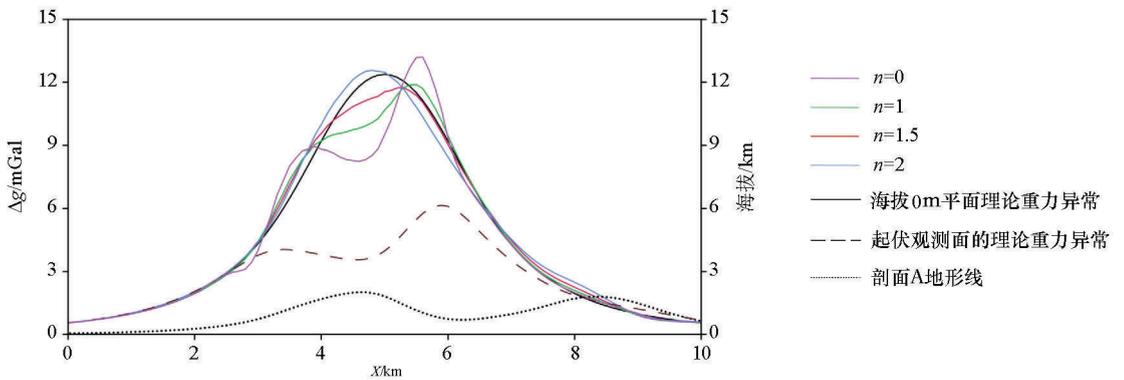


图 5 剖面 A 不同修正因子 S 曲化平的对比
Fig.5 Different S comparison along profile A

3 实际数据试验

川滇地区构造上位于印支块体、青藏高原块体和扬子块体的交汇处,区域构造动力作用复杂,在缅甸弧东向俯冲、印度板块藏东构造结 NE 向楔体挤出和俯冲、青藏高原隆升和 SE 向挤出等共同作用下,该地区整体向 E—SE 方向挤出,形成了大陆内部典型的剪切、拉张和推覆构造,表现出地壳变形速率高、断层运动剧烈、强震原地复发周期短等区域特征。因此,川滇地区是研究青藏高原隆升过程与大陆强震孕育机理的天然实验场,也是我国区域防震减灾的重要地区。高精度重力数据是川滇地区深部结构与构造研究的基础数据。由于该地区地形上呈

现青藏高原、云贵高原、四川盆地等复杂、多样化的起伏形态,因此对该地区起伏地形面的重力异常数据作常规频率域处理和解释应用之前,值得优先作曲化平处理。

本文从 ICGEM 官网 (<http://icgem.gfz-potsdam.de/calcgrid>) 下载了川滇地区地形高程网格数据和布格重力异常网格数据,东经 99°~108°,北纬 24°~32°,网格大小均为 0.1°×0.1°。其中,布格重力异常数据是由地球重力场模型 (earth gravitational model 2008) 的自由空气重力异常数据经过标准的地形校正和中间层校正得到的。本文利用窗口大小为 3 的均值滤波对研究区地形高程数据做了平滑处理,结果见图 6a 所示,研究区地形起伏较大,高程最大值为 4 882 m,最小值为 269.2 m,高差约为 4 612.8 m。

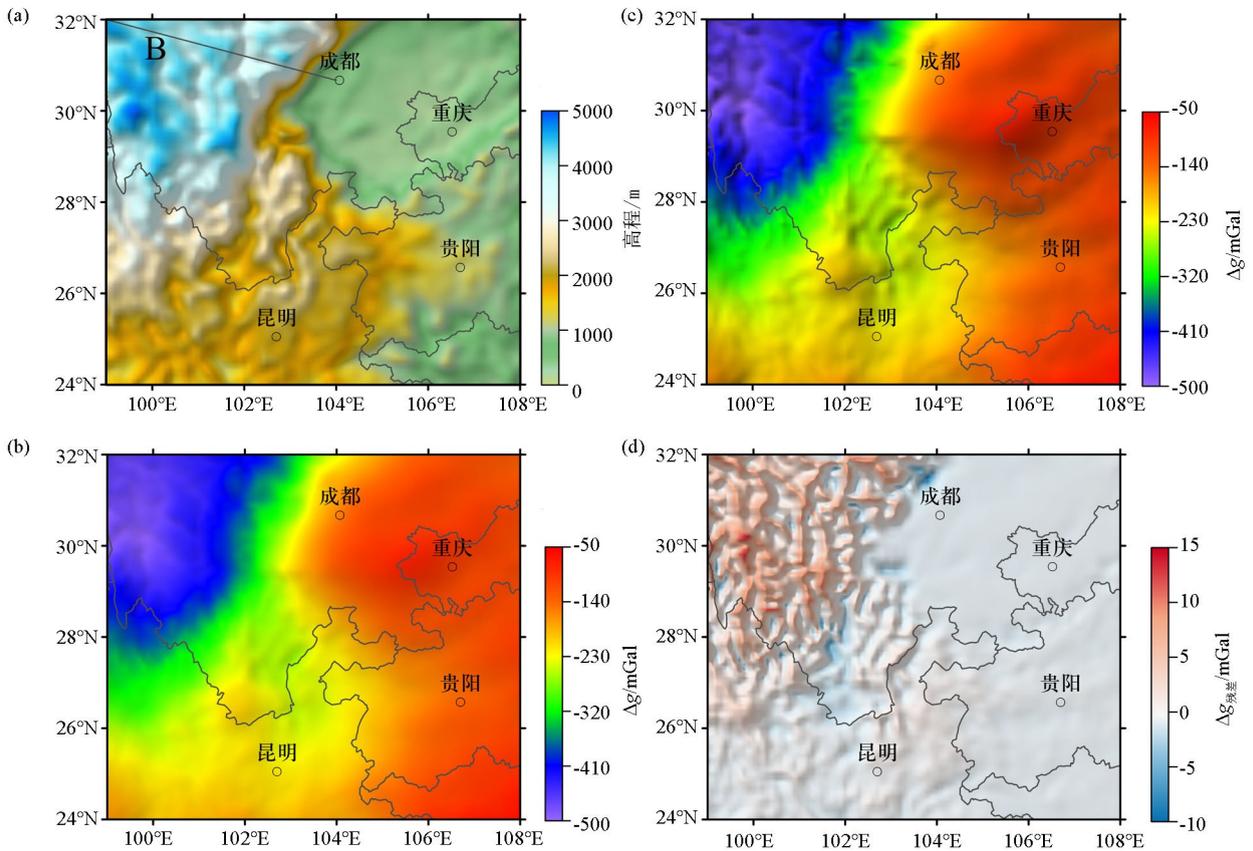
由于原始布格重力异常数据存在明显的高频噪声干扰,这主要是由于自由空气重力异常数据和地形数据的分辨率与精度不一致造成的^[22],因此,本文对原始布格重力异常数据作了截止波长为 100 km 的低通滤波,得到去噪后的川滇地区布格重力异常,如图 6b 所示,异常最大值为 -64.51 mGal,最小值为 -495.5 mGal,青藏高原地区异常较低,四川盆地等海拔低地区异常较高,云贵高原介于两者之间。

本文应用改进的插值—迭代法对去噪后的布格重力异常作曲化平处理,修正因子采用式(3), $n = 1.5$,经过 50 次迭代,将其化到海拔 0 m 的位置,结果如图 6c 所示。曲化平后的布格重力异常最大值为 -64.47 mGal,最小值为 -508.9 mGal,山区异常信号有效增强,尤其是在川西地区增强较为明显、异常细节更为突出。图 6d 显示了曲化平前后的布格重力异常残差,最大值为 13.36 mGal,最小值为 -8.45 mGal,残差变化主要集中在青藏高原和云贵高原等

山区,与地形有较强对应关系。

为进一步探讨地形对重力异常值的影响及曲化平的效果,本文选取一条斜向穿过研究区的剖面 B (位置如图 6a 所示),该剖面地势复杂,地形起伏变化较大。该剖面曲化平前后的重力异常对比(图 7)显示,地形起伏较大地区的曲化平效果显著,地形起伏较为平缓地区的曲化平效果较弱,这一结果与前面的分析相符。

本文以常规频率域垂直导数换算为例作说明曲化平的意义。导数换算是重力异常分析解释的一个常用步骤,用于突出浅部场源、分析构造边界等。图 8a 和图 8b 显示了曲化平前后的布格重力异常的垂直导数,曲化平前的垂直导数数值范围为 -0.002 9 ~ 0.002 3 mGal/m,曲化平后的数值范围转为 -0.004 4 ~ 0.003 7 mGal/m。可见,曲化平后的异常幅值得到明显增强,而且刻画出更多、更清晰的异常变化细节,从而反映出更多的浅部场源细节和构造



a—川滇地区地形高程;b—去噪后的布格重力异常;c—本文改进插值—迭代法曲化平后布格重力异常;d—曲化平前后的异常残差
a—the elevation of Sichuan-Yunnan region;b—the denoised Bouguer gravity anomaly;c—the Bouguer gravity anomaly after continuation from undulating surface to plane by using the modified interpolation-iteration method;d—the anomaly deviations before and after continuation from undulating surface to plane

图 6 川滇地区曲化平前后重力异常对比

Fig.6 The Bouguer gravity comparison before and after continuation from undulating surface to plane of Sichuan-Yunnan region

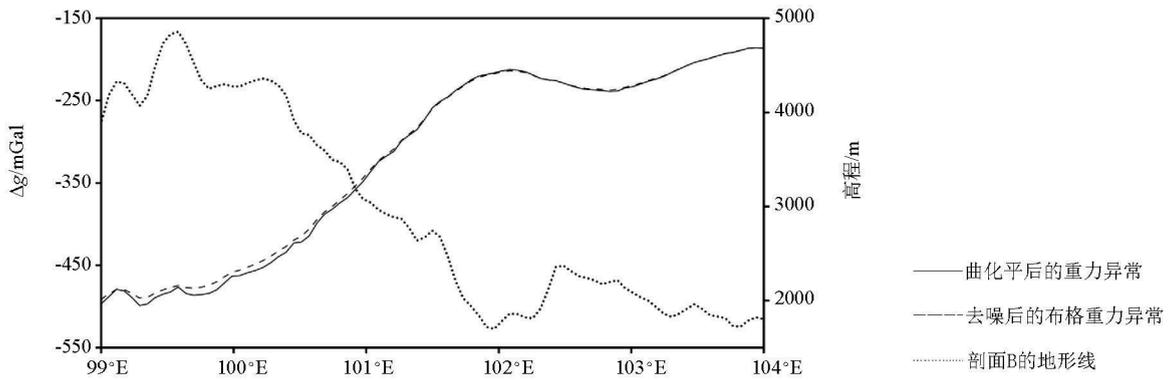
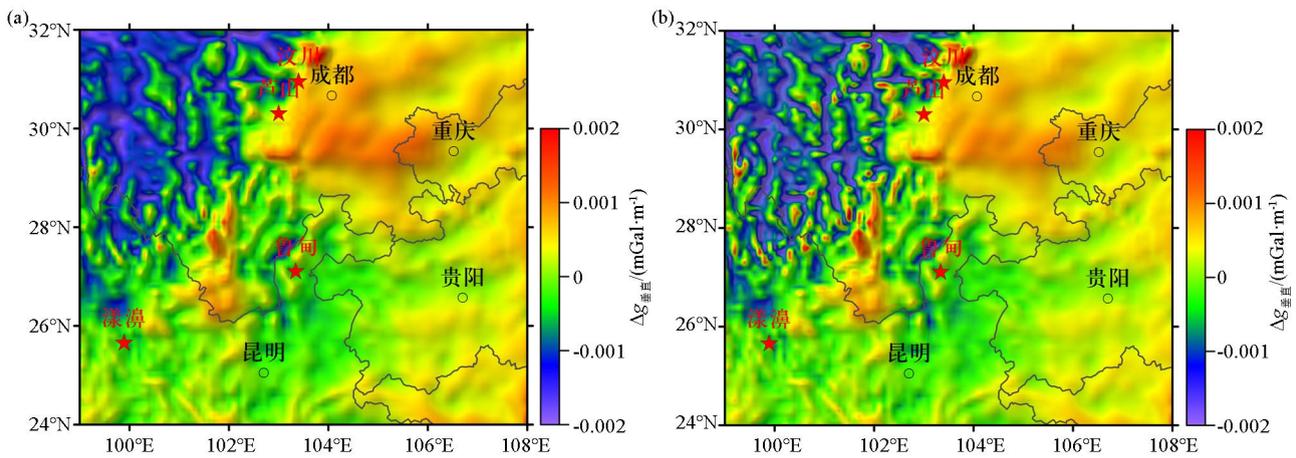


图7 剖面B的对比

Fig.7 The gravity anomaly comparison and the elevation along profile B



a—布格重力异常的垂向导数;b—曲化平后布格重力异常的垂向导数

a—the vertical derivative of Bouguer gravity anomaly;b—the vertical derivative of Bouguer gravity

图8 川滇地区曲化平前后垂向导数对比

Fig.8 The vertical derivative of Bouguer gravity comparison before and after continuation from undulating surface to plane of Sichuan-Yunnan region

边界信息。

图8中标注了2008年汶川8级地震、2013年芦山7级地震、2014年鲁甸6.5级地震、2021年漾濞6.4级地震的震中位置,易见经过曲化平这些地震震中周缘地区的重力异常变化特征更为鲜明,这有助于后续的深部结构与构造解释研究。

4 结论与讨论

本文在重力异常曲化平的常规插值—迭代法基础上给出了一种改进的插值—迭代法,即在异常迭代修正过程中引入起伏观测面修正因子,加快曲化平迭代收敛,促进曲化平效果提升,实现适用于观测面起伏较大、延拓跨度较大的复杂条件下重力异常曲化平。理论模型和川滇地区实际数据试验验证了

本文方法的有效性,效果优于常规插值—迭代法。本文改进的插值—迭代方法不仅适用于重力异常数据,也适用于磁异常数据以及梯度、三分量等数据。本文曲化平的结果可进一步通过常规平滑、平化曲处理实现任意平面或曲面的延拓。

参考文献 (References):

- [1] 曾华霖.重力场与重力勘探[M].北京:地质出版社,2005.
Zeng H L.Gravity field and gravity exploration[M].Beijing: Geological Publishing House, 2005.
- [2] Blakely R J. Potential theory in gravity and magnetic applications [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995:316-320.
- [3] Guo L, Meng X, Chen Z, et al. Preferential filtering for gravity anomaly separation [J]. Computers & Geosciences, 2013, 51: 247-254.
- [4] Oldenburg D W. The inversion and interpretation of gravity anomaly

- lies [J]. *Geophysics*, 1974, 39(4): 526–536.
- [5] Cui Y, Guo L. A wavenumber-domain iterative approach for rapid 3-D imaging of gravity anomalies and gradients [J]. *IEEE Access*, 2019, 7(1): 34179–34188.
- [6] Pilkington M, Boulanger O. Potential field continuation between arbitrary surfaces-Comparing methods [J]. *Geophysics*, 2017, 82(3): J9–J25.
- [7] Dampney C N G. The equivalent source technique [J]. *Geophysics*, 1969, 34(1): 39–53.
- [8] David A E. Equivalent sources used as an analytic base for processing total magnetic field profiles [J]. *Geophysics*, 1973, 38(2): 339–348.
- [9] Bhattacharyya B K, Chan K C. Reduction of magnetic and gravity data on an arbitrary surface acquired in a region of high topographic relief [J]. *Geophysics*, 1977, 42(7): 1411–1430.
- [10] Hansen R O, Miyazaki Y. Continuation of potential fields between arbitrary surfaces [J]. *Geophysics*, 1984, 49(6): 787–795.
- [11] Pilkington M, Urquhart W E S. Reduction of potential field data to a horizontal plane [J]. *Geophysics*, 1990, 55(5): 549–555.
- [12] Xia J, Sprowl D R, Adkins-Heljeson D. Correction of topographic distortions in potential-field data: A fast and accurate approach [J]. *Geophysics*, 1993, 58(4): 515–523.
- [13] Henderson R G, Cordell L. Reduction of unevenly spaced potential field data to a horizontal plane by means of finite harmonic series [J]. *Geophysics*, 1971, 36(5): 1046–1046.
- [14] Guspi F. Frequency-domain reduction of potential field measurements to a horizontal plane [J]. *Geophysical Research Letters*, 1987, 14(2): 87–98.
- [15] Pilkington M, Thurston J B. Draping corrections for aeromagnetic data: Line versus grid-based approaches [J]. *Exploration Geophysics*, 2001, 32(2): 95–101.
- [16] 程振炎. 重磁场的有限元法曲化平 [J]. *物探与化探*, 1981, 5(3): 153–158.
- Cheng Z Y. The finite element method of gravity and magnetic field [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 1981, 5(3): 153–158.
- [17] Xu S Z. The boundary element method in geophysics [M]. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2001: 63–67.
- [18] Xu S Z, Yang C H, Dai S K, et al. A new method for continuation of 3D potential fields to a horizontal plane [J]. *Geophysics*, 2003, 68(6): 1917–1921.
- [19] 徐世浙. 位场延拓的积分—迭代法 [J]. *地球物理学报*, 2006, 49(4): 1176–1182.
- Xu S Z. The interpolation-iteration method for continuation of potential fields [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(4): 1176–1182.
- [20] 刘东甲, 洪天求, 廖旭涛, 等. 位场曲化平积分方程的迭代解 [J]. *地球物理学报*, 2012, 55(10): 3467–3476.
- Liu D J, Hong T Q, Liao X T, et al. Iterative solution of integral equation for potential field continuation from irregular surface to a horizontal plane [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(10): 3467–3476.
- [21] 徐世浙, 余海龙. 位场曲化平的插值—迭代法 [J]. *地球物理学报*, 2007, 50(6): 193–197.
- Xu S Z, Yu H L. The interpolation-iteration method for potential fields continuation from undulating surface to plane [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, 50(6): 193–197.
- [22] 郭良辉, 孟小红, 石磊, 等. 优化滤波方法及其在中国大陆布格重力异常数据处理中的应用 [J]. *地球物理学报*, 2012, 55(12): 4078–4088.
- Guo L H, Meng X H, Shi L, et al. Preferential filtering method and its application to Bouguer gravity anomaly of Chinese continent [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(12): 4078–4088.

A modified interpolation-iteration method for gravity anomaly continuation from undulating surface to plane

YANG Jing, GUO Liang-Hui

(School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Gravity anomaly continuation from undulating surface to plane can provide gravity data on a flat horizontal plane for frequency-domain data processing and inversion. Based on the theory of conventional interpolation-iteration methods, this study proposed a modified interpolation-iteration method by introducing a correction factor of the undulating observation surface in the iteration and correction process. The improved method accelerated the iterative convergence speed and promoted the continuation effects. The theoretical model-based tests show that this method can be used to achieve stable and effective large-span gravity anomaly continuation from greatly undulating surface to plane. The continuation results presented by this method are better than those obtained using conventional interpolation-iteration methods. The application of Bouguer gravity anomaly data of the Sichuan-Yunnan region demonstrates that the modified interpolation-iteration method effectively enhanced anomalous signals and details and can provide reliable data for subsequent processing and interpretation.

Key words: continuation from undulating surface to plane; gravity anomaly; interpolation-iteration method; Sichuan-Yunnan region