



引文格式: 冯凡, 耿涛, 冯治汉, 等. 基于 DEM 的重力中区地形改正精度评价[J]. 西北地质, 2025, 58(3): 173–182.
DOI: 10.12401/j.nwg.2024123

Citation: FENG Fan, GENG Tao, FENG Zhihan, et al. Evaluation of Terrain Correction Accuracy in Gravity Center Area Based on DEM[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(3): 173–182. DOI: 10.12401/j.nwg.2024123

基于 DEM 的重力中区地形改正精度评价

冯凡¹, 耿涛^{2,3,*}, 冯治汉^{2,3}, 王伟¹, 徐毅¹, 向东¹

(1. 西安西北有色物化探总队有限公司, 陕西 西安 710068; 2. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710119;
3. 西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710119)

摘要: 从误差传播定律和全微分理论出发, 在综合考虑重力测点和地形 DEM 水平位置误差和高程误差的基础上, 提出了一种基于 DEM 数据客观、有效的重力中区地形改正精度评价方法。通过理论模型研究, 认为重力地形改正值及其误差与地改半径呈正相关关系, 随着地改半径的增大地改值及其误差增速变小; 在地形改正区域较远时, 高程误差比水平位置误差对地形改正误差的贡献大, 但在地改区域较近时水平位置误差的影响不可忽视, 地形改正的均方误差由高程误差和水平位置误差的影响共同组成; DEM 分辨率对地形改正误差影响较大, 特别是相对近区应选取精度和分辨率更高的 DEM。秦岭地区实际资料计算证明, 利用本方法评价的地形改正精度与现行规范要求相近, 克服了以往地形改正精度虚高的假象; 1:1 万 DEM 数据能完全满足 1:5 万重力调查中区地形改正的要求, 基本能满足 1:1 万~1:2.5 万重力调查的需求; 若使用 1:5 万地形 DEM 进行 1:5 万重力调查中区地形改正时, 起始半径应大于 300 m。

关键词: 地形; DEM; 重力地改; 地改精度; 误差传播; 水平位置误差; 高程误差

中图分类号: P631.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)03-0173-10

Evaluation of Terrain Correction Accuracy in Gravity Center Area Based on DEM

FENG Fan¹, GENG Tao^{2,3,*}, FENG Zhihan^{2,3}, WANG Wei¹, XU Yi¹, XIANG Dong¹

(1. Xi'an Northwest Nonferrous Physical and Geochemical Exploration Corps Co., Ltd, Xi'an 710068, Shannxi, China; 2. Xi'an Geological Survey Center, China Geological Survey/Northwest Geological Science and Technology Innovation Center, Xi'an 710119, Shannxi, China;
3. Northwest Geological Science and Technology Innovation Center, Xi'an 710119, Shannxi, China)

Abstract: Starting from the law of error propagation and total differential theory, on the basis of comprehensively considering the horizontal position error and elevation error of gravity measurement points and terrain DEM, an objective and effective method for evaluating the accuracy of terrain correction in mid-gravity region

收稿日期: 2023-04-13; 修回日期: 2024-12-10; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 国家重点研发计划课题“北秦岭华阳川地区隐伏铀矿空-地-井协同勘查技术示范研究”(2017YFC0602205), 陕西省地勘基金“陕西省山阳县娘娘庙金钴多金属矿普查”(61202110405), 陕西省地勘基金“陕西凤县庞家河-马蹄沟金矿床深部地质结构及隐伏矿体综合物探普查”(61202110375)联合资助。

作者简介: 冯凡(1992-), 男, 工程师, 主要从事重磁野外数据采集及处理方法研究。E-mail: 759646821@qq.com。

* 通讯作者: 耿涛(1969-), 男, 正高级工程师, 主要从事区域地球物理调查和矿产地球物理勘查以及地球物理应用技术研究方面的工作。E-mail: gengtao926@163.com。

based on DEM data has proposed. Through theoretical model research, it is believed that the gravity terrain correction value and its error have a positive correlation with the terrain correction radius, with the increase of the ground modification radius, the ground modification value and its error growth rate become smaller; the elevation error has a greater contribution to the terrain correction error than the horizontal position error, and the mean square error of the terrain correction is mainly composed of the elevation error; the DEM resolution has a great influence on the terrain correction error, especially the DEM with higher precision and resolution should be selected in the relatively near area. The calculation of the actual data in the Qinling Mountains proves that the terrain correction accuracy evaluated by this method is similar to the requirements of the current specification, which overcomes the false high accuracy of terrain correction in the past; the 1 : 10,000 DEM data can fully meet the requirements of terrain correction in the middle area of the 1 : 50,000 gravity survey, and can basically meet the needs of the 1 : 10,000 ~ 1 : 25,000 gravity survey; if a 1 : 50,000 terrain DEM is used to correct the terrain in the middle area of the 1 : 50,000 gravity survey, the starting radius should be greater than 300 meters.

Keywords: terrain; DEM; gravity terrain correction; terrain correction accuracy; error propagation; horizontal position error; elevation error

几十年来,众多专家学者为提高重力地形改正精度做了大量工作。20世纪80年代以前,主要开展以纸质地形图为基础的人工数图方法研究(杨子江, 1965; 吕梓令等, 1981; 刘文锦等, 1983; 林振民等, 1984; 胡维等, 1984),其精度主要通过旋转量板后重新数图的同精度检查和使用更大比例尺地形图数图的高精度检查来评价,这种检查主要评价的是人工判读的平均高程误差,未考虑地形图的误差。20世纪90年代以来,随着计算机的广泛普及和计算技术的不断发展,一部分学者将注意力集中到提高重力地形改正计算速度和计算精度的算法研究上(冯治汉, 2002; 马国庆等, 2008; 李振海等, 2011; 赵军等, 2012; 胡明科等, 2015; 黎哲君等, 2019; 冯凡等, 2022; 唐小平等, 2022),另一部分则主要研究数字高程模型(DEM; Digital Elevation Model, 以下简称 DEM)的获取及其对重力地形改正的适应性上(冯治汉, 2002; 张俊等, 2014; 张品等, 2015; 刘生荣等, 2019)。重力地形改正电算化解脱了专业技术人员繁重的数图工作,大大提高了重力地形改正的工作效率和数据精度,但在完成重力地形改正后,如何客观地评价其精度一直没有一个较好的方法,现有的研究实际上也只是算法的精度评价(冯治汉, 2007; 张国利等, 2013; 耿涛等, 2021),从地形改正数据来看,显示地形改正精度远优于规范要求,造成地形改正精度虚高的假象。

现行重力规范(DZ/T0004-2015)考虑到了地形图或 DEM 数据精度对地形改正的影响,但仍然没有脱离人工数图评价精度的模式,给出的还是旋转量板或

改变 DEM 网格位置重新计算地形改正值的同精度检查和采用更大比例尺地形数据计算地形改正值的高精度检查方法(耿涛等, 2010, 2021)。实际上同精度检查使用的地形数据没有变,同样忽略了地形数据本身的误差,得到的只是重新网格化 DEM 及计算方法引起的算法误差。至于采用更大比例尺地形数据进行高精度检查的方案实际难以实施,除非有特别需求,没有哪个单位只为了评价精度而准备两套不同比例尺的地形数据;同一地区往往是在有更大比例尺地形图或更高精度 DEM 时,一定是采用最高精度数据进行地形改正,不可能有高精度数据而采用低精度数据完成地形改正;即使采用了更高精度的地形数据进行地形改正,也未考虑高精度地形数据本身的误差对地形改正的影响。

札喜旺登(1983)总结了影响重力地形改正精度的7个方面,认为影响地形改正精度的最大因素是作为基础数据的地形图误差与拟合地形起伏变化的模型单元大小,其他因素都是次要的。胡维(1984)基于全微分理论讨论了重力地形改正的主要误差来源及其大小,认为影响重力地形改正的主要因素是密度、高程和点位的精度,高程数据质量取决于读图人员的观测精度和定点位置的准确性,这些在很大程度上取决于图纸的精度。杨亚斌等(2011)也根据全微分理论基于人工数图方法讨论了锥形和扇形模型的近区地改精度及评价方法。耿涛等(2021)在总结前人成果、分析现行规范要求后,提出采用重力测点实测高程评价 DEM 精度,计算重力地形改正精度时应考虑

地形 DEM 的误差, 并给出了 3 种评价地形改正精度的建议方法: ①采用 DEM 高程和测点高程作为计算点的高程分别计算地形改正值, 比较两次计算结果的误差。②将厚度为 m (DEM 高程中误差) 的平板模型引起的重力值作为地形改正精度。③在 DEM 数据上增加标准偏差为 m (DEM 高程中误差) 的噪声干扰后重新计算地形改正值, 用带噪声和不带噪声的计算结果的来评价地形改正误差。

根据耿涛等(2021)的建议, 采用重力测点实测高程检查法和 DEM 中误差模型评价 DEM 高程精度, 从误差传播定律和全微分理论出发, 同时考虑重力测点和 DEM 的高程误差及水平位置误差, 以方柱模型为例研究了重力地形改正中误差的计算方法, 以及方柱模型在中区(20~2 000 m)的重力地形改正值变化规律和重力地形改正中误差的分布情况。选择陕西秦岭地区两个工作区的实测重力测点、1:1 万和 1:5 万 DEM 数据进行了对比试验, 计算的重力中区(20~2 000 m)地形改正精度与现行规范(DZ/T0004-2015, DZ/T0171-2017)要求相近, 客观合理。

1 误差传播定律

实际工作中的某些参量如重力地形改正值, 不可能或不便于直接进行观测, 而需要由另外一些可直接观测的参量根据一定的函数关系计算出来。测量误差无处不在, 独立观测值不可避免地包含有误差, 导致独立观测值的函数也必然存在误差, 独立观测值的误差和函数误差也必定存在某些关系, 阐述这种关系的定律称为误差传播定律(鲁明星, 2005)。

定义一个量的真值 X 减去测量值 L 为误差 Δ (观测误差), 即 $\Delta = L - X$; 误差 Δ 包括粗差 Δ_c 、系统误差 Δ_x 和偶然误差 Δ_o , 且 $\Delta = \Delta_c + \Delta_x + \Delta_o$; 粗差和系统误差都是可以避免或消除的, 不在这里讨论。偶然误差的特点是相互独立且当观测次数无限多时, 其均值为零, 所以通过多次测量求平均值是提高测量精度的常用方法。对测量对象为 X 的简单函数 $Z = f(X)$, 当 X 有微小变化 α_x 时, 根据微积分的相关知识, 可得到 Z 的变化 α_z :

$$\alpha_z = \left| \frac{dZ}{dX} \right| \alpha_x \quad (1)$$

针对复杂函数, 设 Z 是独立变量 $X_1, X_2 \dots X_n$ 的函数:

$$Z = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (2)$$

可通过各变量的观测误差来推导函数 Z 的误差。设变量 X_i 的观测值为 L_i , 误差为 Δ_i , 有 $X_i = L_i - \Delta_i$, 则函数 Z 为:

$$Z = f(L_1 - \Delta_1, L_2 - \Delta_2, \dots, L_n - \Delta_n) \quad (3)$$

对函数 Z 在 L_1, L_2, \dots, L_n 点进行泰勒展开, 只取前两项, 有

$$Z = f(L_1, L_2, \dots, L_n) + \frac{\partial f}{\partial X_1} \Delta_1 + \frac{\partial f}{\partial X_2} \Delta_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial X_n} \Delta_n \quad (4)$$

这样, 与函数 Z 有关的各变量 X_i 只观测一次时, 函数 Z 的误差可表述为:

$$\Delta_z = \left| \frac{\partial f}{\partial X_1} \right| \Delta_1 + \left| \frac{\partial f}{\partial X_2} \right| \Delta_2 + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial X_n} \right| \Delta_n \quad (5)$$

当对变量 X_i 重复多次观测时, 先求出变量 X_i 的中误差 m_i , 再根据误差传播公式, 得函数 Z 的中误差 Δ_z (邓永和, 2011)

$$\Delta_z = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial X_1} \right)^2 m_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial X_2} \right)^2 m_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial X_n} \right)^2 m_n^2} \quad (6)$$

式中 $\frac{\partial f}{\partial X_i}$ 为函数 f 对变量 X_i 的偏导数在 X_i 多次观测平均值处的值。在得到所有测点的中误差 Δ_{zk} ($k = 1, 2, \dots, n$) 后, 全区 Z 的平均中误差(均方误差)用下式计算(CH/T1015.1-2007)。

$$m_z = \pm \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n \Delta_{zk}^2}{n}} \quad (7)$$

2 地形改正精度计算方法

基于上述误差传播定律, 重力地形改正值就是改正范围内地形相对于测点的起伏变化和岩石密度的函数, 实际工作中由于地质条件的复杂性, 密度在全区来说不可能是定值, 地形改正范围越大, 密度变化越大, 密度差的大小也就越难估计。这里不讨论密度误差对地形改正值及其精度的影响, 只研究地形改正工作中水平位置误差和高程误差引起的重力地形改正误差。为研究这种函数关系, 假设计算点(重力测点)位于坐标原点 $O(0, 0, 0)$, 以密度均匀的方柱体模型(图 1)为例讨论重力地形改正精度的计算方法, 其他模型的计算公式和计算方法以此类推。

采用 DEM 作为地形数据进行重力地形改正时, 坐标原点处的地形改正值 g 是计算范围内全部方柱体重力改正值的累加, 可表述为:

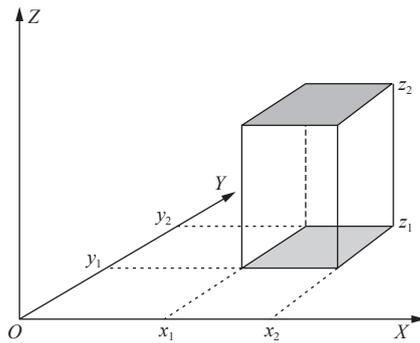


图1 均匀密度方柱体模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the uniform density square cylinder model

$$g = \sum_{i=1}^n f_i(\sigma, x, y, z) \quad (8)$$

式中： i 为方柱体的编号， n 为地形改正范围内的方柱体总数， $f_i(\sigma, x, y, z)$ 为方柱体 i 的地形改正计算函数。可见，基于DEM数据的方柱体模型地形改正值与方柱体的密度 σ 及其空间位置 (x, y, z) 、地形改正范围 n 有关。由于DEM高程中误差和平面位置中误差是通过多点检查得到的，基于误差传播定律和全微分理论，根据变量多次观测的误差表达式(6)可得方柱体 i 的重力中误差为

$$\Delta_i = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial f_i}{\partial x}\right)^2 \Delta_x^2 + \left(\frac{\partial f_i}{\partial y}\right)^2 \Delta_y^2 + \left(\frac{\partial f_i}{\partial z}\right)^2 \Delta_z^2} \quad (9)$$

由于要同时考虑重力测点的水平位置和高程误差，因此式(9)中 $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$ 分别为重力测点和地形DEM的EW向、SN向及垂向的综合中误差。由 n 个方柱体构成的单个测点的地形改正值中误差为：

$$\Delta = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2} \quad (10)$$

全区的重力地形改正中误差由式(7)给出。

根据万有引力定律，直角坐标系中均匀密度长方体 i 在坐标原点的重力场值为：

$$f_i(\sigma, x, y, z) = G\sigma \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_{z_1}^{z_2} \frac{z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} dx dy dz \quad (11)$$

式中： σ 为长方体的密度； G 为万有引力常数； (x, y, z) 为长方体内的场源点坐标，长方体范围为 (x_1, x_2) 、 (y_1, y_2) 、 (z_1, z_2) ；式(11)积分后的去积分限表达式为(骆遥等, 2007)：

$$f_i(\sigma, x, y, z) = -G\sigma \left[x \ln(y+R) + y \ln(x+R) + 2z \tan^{-1} \frac{x+y+R}{z} \right] \quad (12)$$

式(12)中 $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ ，分别对式(12) x, y, z 求

偏导数后的去积分限表达式为(骆遥等, 2007)：

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial f_i}{\partial x} &= G\sigma \ln(y+R) \\ \frac{\partial f_i}{\partial y} &= G\sigma \ln(x+R) \\ \frac{\partial f_i}{\partial z} &= 2G\sigma \tan^{-1} \frac{x+y+R}{z} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

一般情况下，水平位置中误差采用EW向中误差和SN向中误差的总误差描述，即测点的平面位置中误差为 $\Delta_s = \pm \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2}$ ，根据式(12)得到方柱体的重力水平一阶导数模为 $G\sigma \sqrt{\ln^2(y+R) + \ln^2(x+R)}$ ，并将式(13)代入式(9)得到方柱体 i 的去积分限地形改正中误差为：

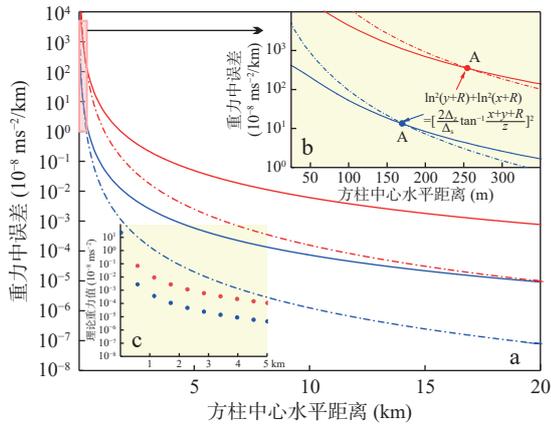
$$\Delta_i = G\sigma \sqrt{\left[\ln^2(y+R) + \ln^2(x+R) \right] \Delta_{cs}^2 + 4 \left(\tan^{-1} \frac{x+y+R}{z} \right)^2 \Delta_{cz}^2} \quad (14)$$

如图1所示，式(12)、式(13)和式(14)的积分限均为 (x_1, x_2) 、 (y_1, y_2) 、 (z_1, z_2) ， $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ ； Δ_{cs} 为重力测点水平位置中误差 Δ_L 和地形DEM水平位置中误差 Δ_s 的均方误差，即 $\Delta_{cs} = \pm \sqrt{\Delta_L^2 + \Delta_s^2}$ ；如果采用实测高程计算重力地形改正时， Δ_{cz} 为重力测点高程中误差 Δ_H 和地形DEM高程中误差 Δ_z 的均方误差，即 $\Delta_{cz} = \pm \sqrt{\Delta_H^2 + \Delta_z^2}$ ；如果测点高程采用地形图高程进行重力地形改正计算时， Δ_{cz} 为地形DEM高程中误差 Δ_z ，不包括测点高程中误差 Δ_H 。将式(14)代入式(10)、式(7)即可求出测点的地形改正中误差 Δ 和全区的地形改正中误差 m_z 。

3 理论模型研究

为了研究重力地形改正值及其误差的关系、地形改正误差与地改范围的变化规律，采用图1所示的方柱体进行理论模拟。假设方柱体密度为 $2.67 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，底边高程为0，顶边高程为50 m，计算范围为20 m~20 km；边长分别为5 m和25 m的方柱体水平位置中误差为 $\pm 7.5 \text{ m}$ 和 $\pm 37.5 \text{ m}$ 、高程中误差为 $\pm 3.3 \text{ m}$ 和 $\pm 11 \text{ m}$ ，用式(12)计算方柱体模型的重力值，参考式(14)分别计算方柱体模型水平位置误差引起的重力中误差、高程误差引起的重力中误差，结果如图2所示。

总体上随着水平距离的增大，方柱体重力值及其中误差都呈指数规律减小，衰减速度随着水平距离的增大而减小。说明随着地形改正半径的不断增加，重



红色表示方柱体边长 25 m, 蓝色边长为 5 m; 实线为高程引起的误差, 虚线为水平位置引起的误差。a. 方柱体重力中误差随距离的变化曲线; b 和 c. 图 a 不同位置的放大

图 2 方柱体水平位置和高程误差引起的重力值误差变化曲线

Fig. 2 Variation curve of gravity value error caused by cylinder horizontal position and elevation error

力地形改正值及其中误差不断累加, 但其变化率明显减小, 当地形改正半径增加到一定程度时再通过增加地形改正范围来改善异常形态或提高布格重力异常精度, 对地形数据的需求量会很大, 成本剧增, 效果也不一定好。

在水平距离相同的条件下模型边长越大, 重力值及其中误差也越大, 反映了实际工作中地形 DEM 分辨率越大地形改正误差也越大的客观事实。当水平距离约大于 5 km 时, 模型边长为 5 m 和 25 m 的中误差曲线基本平行, 说明在 5 km 以远虽然 DEM 分辨率和地形改正值及其误差仍为正相关, 但不同分辨率的 DEM 对地形改正值及其误差的影响之差近于相等, 此时地形改正误差趋于稳定, 使用分辨率为 5 m 或 25 m 的地形 DEM 数据对重力地形改正误差的影响相差不大, 说明当地改正范围远到一定程度后再使用高分辨率的 DEM 必要不大。

以前在评价重力地形改正误差时很少注意水平位置误差的影响。实际上, 当方柱与计算点的距离 R 满足式(15)时:

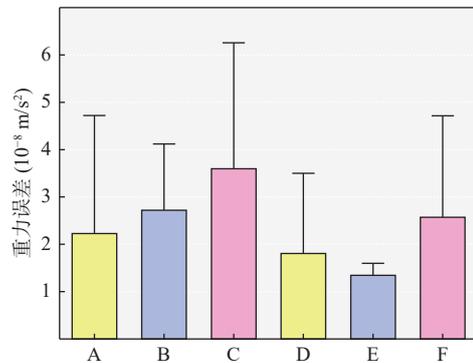
$$\ln^2(y+R) + \ln^2(x+R) = \left[\frac{2\Delta_z}{\Delta_s} \tan^{-1} \frac{x+y+R}{z} \right]^2 \quad (15)$$

以此点为界(图 2 中的点 A, 当方柱边长为 5~25 m 时, R 为 150~300 m), 在近区水平位置引起的误差大于高程引起的误差, 水平位置和高程综合引起的误差主要由水平位置误差组成, 误差值也较大, 相反在远

区高程引起的误差大于水平位置引起的误差, 水平位置和高程综合引起的误差主要由高程误差组成; 边长较小的方柱体引起的重力地改正误差相对较小; 这说明, 特别是近区应尽量使用高分辨率的 DEM 数据。所以在今后的工作中要重视地形 DEM 水平位置误差的评估和使用。

在地形改正半径较大、DEM 分辨率相同时, 高程误差比水平位置误差对地形改正误差的贡献更大, 地形改正的均方误差主要由高程误差组成, 这也是研究人员的共识。

为了验证推导的误差传播公式(5)、(6)的正确性, 假设图 1 的方柱体密度为 $2.67 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 底边高程为 0, 顶边高程为 300 m, 边长为 500 m, 方柱体外有一系列重力测点。根据式(12)、式(13)和式(14), 首先计算该方柱体模型的理论重力值及其水平和垂向一阶导数, 然后分别在测点三维坐标上增加高程均方误差为 $\pm 3.3 \text{ m}$ 和水平位置均方误差为 $\pm 7.0 \text{ m}$ 的噪声, 并计算带噪声方柱体模型的理论重力值及其水平和垂向一阶导数, 利用单次测量时函数的传递误差公式(5)计算方柱体重力值得高程和水平位置引起的误差, 同时比较理论重力值和增加噪声后的重力值误差(图 3)。



A. 式(4)中只考虑高程影响时计算的重力误差; B. 式(4)中只考虑水平位置影响时计算的重力误差; C. 式(4)中同时考虑高程和水平位置影响时计算的重力误差; D. 测点高程噪声引起重力误差; E. 测点坐标噪声引起重力误差; F. 测点高程噪声和坐标噪声综合引起的重力误差

图 3 方柱体水平位置和高程误差引起的重力误差条形图
Fig. 3 Bar chart of gravity error caused by horizontal position and elevation error of square column

由图 3 可见, 单次观测误差计算公式(5)计算的重力值误差略大于增加噪声后的重力值误差, 在实际地形改正计算时, 采用多次观测均方误差计算式(6)计算地形改正误差, 式(6)的计算结果略小于式(5),

可获得比较合理的地形改正误差评价结果。耿涛等(2021)建议在DEM数据上增加噪声后,用重新计算得地形改正值评价地改值的方法是可行的。

4 实际资料试算

重力地形改正一般分近区(0~20 m)、中区(20~2 000 m)和远区(2~166.7 km)采用不同的数据源、不同的计算模型分别完成,这里只讨论中区地形改正精度,近区和远区待后续进行研究。随着高精度GNSS的广泛使用,重力测点的三维坐标精度也在不断提高。用于中区地形改正的DEM数据主要由专业测绘部门提供,是通过航空摄影测量、航天遥感测量、地形图扫描矢量化及数字线划图缩编等方法生成数字线划图再插值生成DEM数据(CH/T1015.1-2007、CH/T1015.2-2007),DEM精度一般采用平面精度和高程精度分开评定、平面精度和高程精度同时评定两种方法。其精度指标在测绘行业标准执行(CH/T9001.1-2013、CH/T9001.2-2010)有明确规定(表1)。

表1 数字高程模型(DEM)精度指标

Tab. 1 Digital elevation model (DEM) accuracy metrics

比例尺	格网尺寸(m)	平面位置中误差(m)	地貌类型	高程中误差(m)				
				一级	二级	三级		
1:5 000	2.5	2.5	平地	0.5	0.7	1.0		
			丘陵地	1.2	1.7	2.5		
			山地	2.5	3.3	5.0		
			高山地	4.0	6.0	8.0		
			1:10 000	5	平地	0.5	0.7	1.0
					丘陵地	1.2	1.7	2.5
1:25 000	10	7.5	山地	2.5	3.3	5.0		
			高山地	5.0	6.7	10.0		
		12.5	平地	1.5	2.0	3.0		
			丘陵地	2.5	3.5	5.0		
			山地	4.0	5.5	8.0		
			高山地	7.0	9.5	14.0		
1:50 000	25	25.0	平地	3	4	6		
			丘陵地	5	7	10		
		37.5	山地	8	11	16		
			高山地	14	19	28		
			50.0	平地	6	8	12	
				丘陵地	10	14	20	
1:100 000	50	山地	16	22	32			
		75.0	高山地	28	38	54		

DEM高程精度主要有理论分析和实验分析两种评定方法。理论分析方法是通过一定的数学方法寻求地表起伏变化的统一规律,结合各种内插数学模型评定DEM精度,使评定精度和评定方法等具有相对普遍的理论意义。实验分析方法是从数据源随机抽样或专家选取典型地貌区域,在考虑采样方式等影响因素的情况下,依据地形复杂情况选用不同的高程内插数学模型评定DEM精度。其中检查点法和DEM中误差模型是最常用的方法,按格网或任意形式分布的检查点与DEM数据点进行对比,将这些点处的内插高程和实际高程逐一比较得到各点的误差,然后计算中误差。中国国家测绘局1:1万和1:5万数字高程模型生产技术规定,每个图幅用不少于28个检测点对图幅内和图幅边缘进行检测。

本次研究为评价中区地形改正精度,从测绘部门收集了陕西省南部秦岭地区两个区域的1:1万DEM数据(分辨率5 m)和1:5万DEM数据(分辨率25 m),利用重力点实测高程检查法和计算DEM中误差模型(耿涛等,2021)对DEM高程精度进行评价(表2)。其中,陕西凤县某地海拔1 140~1 940 m,坡度大部分为20°~40°,个别地段坡度达50°~60°,地形起伏剧烈;有2 347个重力测点均匀分布在500 km²的范围内,远多于测绘规范要求的检查点数,重力中区地形改正涉及范围1 500 km²;重力测点高程与地形DEM的高差呈正态分布(图4)。

表2 用实测高程点对DEM高程精度的评价统计表

Tab. 2 Statistical table for evaluating DEM elevation accuracy with measured elevation points

工作地区	实测点数(个)	DEM比例尺	实测高程和DEM高程之差(m)			
			最小值	最大值	平均值	中误差
陕西凤县某地	2 347	1:1万	-7.299	6.882	-0.221	2.847
		1:5万	-28.916	18.055	-5.404	9.565
陕西山阳县某地	1 986	1:1万	-8.234	4.748	-1.721	2.607
		1:5万	-32.516	46.905	7.459	16.030

在进行野外工作时通过GPS同精度检查,得到重力测点水平位置中误差为±2.10 m,高程中误差±0.30 m。地形DEM的水平位置中误差见表1,综合地形DEM和重力测点,可认为1:1万DEM水平位置中误差为±7.788 m,高程中误差为±2.863 m,1:5万DEM水平位置中误差为±37.559 m,高程中误差为±9.570 m。

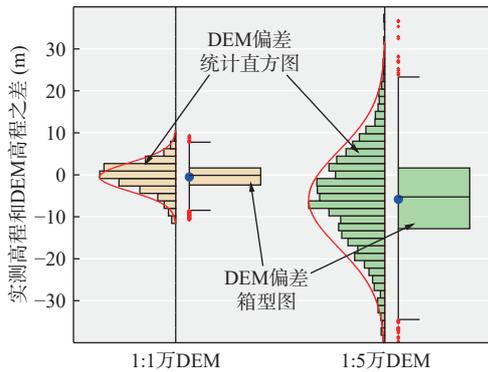


图4 陕西凤县某地1:1万和1:5万DEM高程精度统计图

Fig. 4 Statistical map of 1:10,000 and 1:50,000 DEM elevation accuracy in a place in Fengxian, Shaanxi Province

陕西山阳县某地海拔700~1720 m, 坡度大部分在30°~50°, 个别地段坡度达60°, 地形起伏剧烈; 完成1:2.5万重力30 km²、重力测点1986点, 重力中区地形改正涉及范围240 km², 利用重力测点实测高程检查法和计算DEM中误差模型评价的DEM高程精度见表2。

野外GPS同精度检查得到重力测点水平位置中误差为±0.50 m, 高程中误差为±0.20 m。综合地形DEM水平中误差(表1)和高程中误差(表2)以及重力测点水平和高程误差, 最终认为1:1万DEM水平位置中误差±7.516 m, 高程中误差±2.615 m; 1:5万DEM水平位置中误差±37.503 m, 高程中误差±16.031 m。

基于DEM数据的水平分辨率及其高程值, 采用式(11)计算20~2000 m范围地形改正值、式(13)和式(6)计算地形改正中误差, 高程中误差和水平位置中误差选用上述地形DEM和重力测点的综合误差。

4.1 1:1万DEM计算结果

陕西凤县某地中区地形改正值最小0.8196×10⁻⁵ m/s²、最大14.949×10⁻⁵ m/s²、平均为5.301×10⁻⁵ m/s²; 单点地形改正中误差最小±0.0002×10⁻⁵ m/s²、最大±0.0965×10⁻⁵ m/s²、平均为±0.0115×10⁻⁵ m/s², 全区地形改正均方误差±0.0132×10⁻⁵ m/s², 地形改正中误差呈正态分布(图5c)。

为了研究地形改正误差随地形改正半径的变量, 将20~2000 m范围分为10环(20~50~100~200~300~500~750~1000~1250~1500~2000 m)分别计算地形改正值及其中误差(图5a), 地形改正半径从小到大地形改正中误差值呈指数下降, 最大环带为

20~50 m(±11.2×10⁻⁸ m/s²), 最小环带为1500~2000 m(±0.0328×10⁻⁸ m/s²)。地形改正值在20~50 m最小, 在300~500 m最大(图5b); 20~300 m范围的地形改正值约占20%。

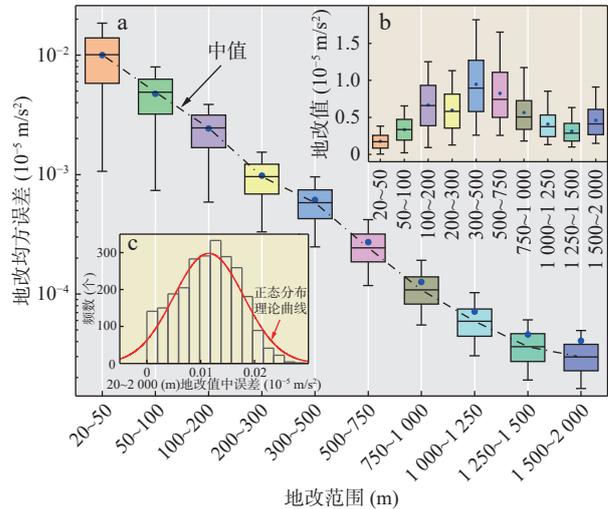


图5 陕西凤县某地1:1万DEM计算中区地形改正及误差分布图

Fig. 5 Terrain correction and error distribution map in the middle area of 1:10,000 DEM calculation in a place in Fengxian, Shaanxi Province

陕西山阳县某地20~2000 m地形改正值最小2.013×10⁻⁵ m/s²、最大13.482×10⁻⁵ m/s²、平均为4.559×10⁻⁵ m/s²; 单点地形改正中误差最小±0.0040×10⁻⁵ m/s²、最大±0.0308×10⁻⁵ m/s²、平均为±0.0179×10⁻⁵ m/s², 全区地形改正均方误差±0.0185×10⁻⁵ m/s², 误差主要集中在20~50 m范围(±0.0170×10⁻⁵ m/s²), 地形改正中误差呈正态分布, 地形改正值及中误差的分布规律与陕西凤县某地的结果一致。

陕西省南部秦岭地区崇山峻岭、地形复杂、坡陡沟深、起伏剧烈, 中区地形改正值多在4×10⁻⁵ m/s²以上, 最大达14×10⁻⁵ m/s²以上。使用1:1万DEM进行重力中区地形改正时, 最弱精度为±0.0185×10⁻⁵ m/s², 满足现行1:5万重力规范(DZ/T0004-2015)最高等级的精度要求(优于±0.035×10⁻⁵ m/s²)和1:1万~1:2.5万重力规范(DZ/T0171-2017)Ⅲ级精度要求。

4.2 1:5万DEM计算结果

采用1:5万DEM计算陕西凤县某地中区地形

改正误差, 单点地形改正中误差最小 $\pm 0.0037 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 、最大 $\pm 1.016 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 、平均 $\pm 0.1959 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$, 全区地形改正均方根 $\pm 0.2175 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$, 显然不能满足规范(DZ/T0004-2015)最低精度等级的要求($\pm 0.15 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$)。将中区地形改正范围分为 10 环(20~50~100~200~300~500~750~1 000~1 250~1 500~2 000 m)分别计算了各环的地形改正值中误差, 地形改正半径从小到大地形改正中误差值呈指数下降(图 6), 最大环带为 20~50 m, 最小环带为 1 500~2 000 m。

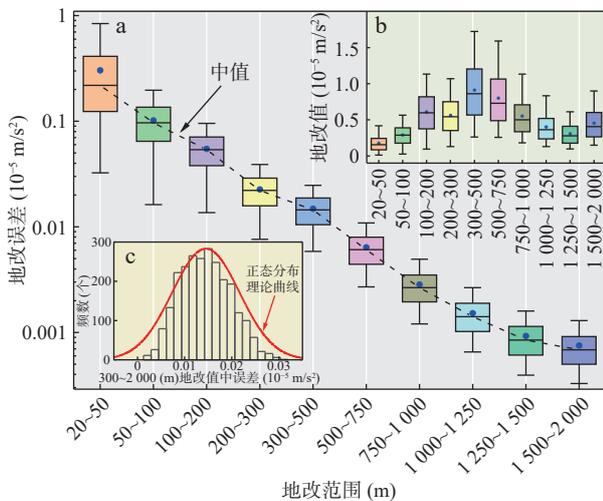


图 6 陕西凤县某地 1:5 万 DEM 计算的中区地改及误差分布图

Fig. 6 Terrain correction value and error distribution map by 1:50,000 DEM calculation in a certain place in Fengxian, Shaanxi Province

为研究 1:5 万 DEM 在高精度重力勘查中地形改正误差的分布情况和 1:5 万 DEM 进行重力地形改正的可行性, 分别计算了地形改正内半径为 20、50、100、200、300 m, 外半径为 2 000 m 的地形改正中误差(表 3, 图 7), 可见, 地形改正范围在 200 m 以远可使用 1:5 万 DEM 进行中区地形改正, 为了给中区的小范围留有误差余地, 使用 1:5 万 DEM 进行中区地形改正时建议从 300 m 开始, 20~300 m 范围应使用其他更高精度和更大比例尺的 DEM 数据。

陕西山阳县某地 1:5 万 DEM 数据, 与上述方法类似计算重力地形改正值及误差, 虽然地形改正精度略低, 但重力地形改正值及其误差的变化规律与凤县

表 3 陕西凤县某地 1:5 万 DEM 计算地改误差统计表 (10^{-5} m/s^2)

Tab. 3 Statistical table of 1:50,000 DEM Terrain correction errors in a place in Fengxian County, Shaanxi Province (10^{-5} m/s^2)

计算范围(m)	最小值	最大值	平均值	均方误差
20~2 000	0.003 7	1.016 0	0.195 9	0.217 5
50~2 000	0.002 8	0.614 3	0.096 6	0.105 1
100~2 000	0.002 5	0.439 9	0.051 7	0.055 9
200~2 000	0.001 8	0.308 2	0.023 8	0.026 0
300~2 000	0.001 6	0.254 0	0.014 5	0.016 2
500~2 000	0.001 5	0.184 0	0.006 3	0.007 6

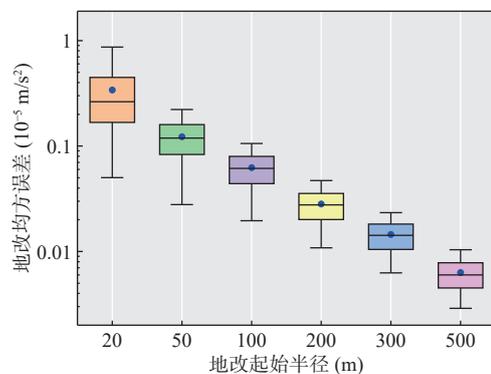


图 7 陕西凤县某地 1:5 万 DEM 计算 2 km 范围地改均方误差分布图

Fig. 7 Terrain correction error distribution map of land modification by 1:50,000 DEM within 2 km of a place in Fengxian County, Shaanxi Province

某地相同。

从上述两个地区 1:5 万 DEM 计算结果可见, 在地形比较复杂的山区开展高精度重力测量时, 如果使用 1:5 万 DEM 进行中区地形改正, 则地形改正范围要在 300 m 以外, 20~300 m 范围应采用 1:1 万 DEM 即可满足规范要求。

5 结论

(1) 基于误差传播定律和全微分理论, 提出在利用 DEM 计算重力地形改正时, 应同时考虑重力测点和 DEM 数据的水平位置误差和高程误差影响, 给出了基于地形 DEM 方柱体模型的单点和全区重力地形改正精度的评价方法, 避免了以往重力地形改正精度虚高的假象。

(2)重力中区地形改正值及其误差整体上随着地改半径的不断增大而增大,但其增速却不断减小。分环地形改正值及其误差随着改正半径的增大呈指数规律下降。

(3)选择秦岭地区两个地形变化较大的重力工区,用远多于测量规范要求的实测重力点对1:1万和1:5万DEM高程精度进行了评价并计算了两个工区重力地形改正值及其精度,为在相同类型地区工作提供了参考。

(4)采用多次观测均方误差公式计算地形改正误差,可获得比较合理的地形改正误差评价结果。在地改半径较小的区域水平,位置误差对重力精度的影响与高程相当,应重视对地形DEM水平位置误差的评估。

致谢:感谢陕西省地勘基金项目“陕西省山阳县娘娘庙金钴多金属矿普查”和“陕西凤县庞家河-马蹄沟金矿床深部地质结构及隐伏矿体综合物探普查”提供的测试数据及所有项目成员的大力支持。

参考文献(References):

- CH/T1015.1-2007. 基础地理信息数字产品1:10000、1:50000生产技术规程—第1部分:数字线划图(DLG)[S]. 国家测绘局,2007.
- CH/T1015.2-2007. 基础地理信息数字产品1:10000、1:50000生产技术规程—第2部分:数字高程模型(DEM)[S]. 国家测绘局,2007.
- CH/T9001.1-2013. 基础地理信息数字成果1:5000、1:10000、1:25000、1:50000、1:100000—第1部分:数字线划图[S]. 国家测绘地理信息局,2013.
- CH/T9001.2-2010. 基础地理信息数字成果1:5000、1:10000、1:25000、1:50000、1:100000数字高程模型[S]. 国家测绘局,2010.
- DZ/T0004-2015. 重力调查技术规范(1:50000)[S]. 中华人民共和国国土资源部,2015.
- DZ/T0171-2017. 大比例尺重力勘查规范[S]. 中华人民共和国国土资源部,2017.
- 邓永和. 测量学误差传播定律的研究综述[J]. 黑龙江科技信息,2011(15):31.
- DENG Yonghe. A Review of Research on the Law of Error Propagation in Surveying[J]. Heilongjiang Science and Technology Information,2011(15):31.
- 冯凡,郭文波,王宏宇,等. 考虑地球曲率的重力地形改正方法研究[J]. 西北地质,2022,55(4):115-123.
- FENG Fan, GUO Wenbo, WANG Hongyu, et al. Research on gravity terrain correction method considering earth's curvature[J]. Northwestern Geology,2022,55(4):115-123.
- 冯治汉. 区域重力调查中的中区地形改正方法及精度[J]. 物探与化探,2007,31(5):455-458.
- FENG Zhihan. A tentative discussion on the median region gravity terrain correction method in regional gravity survey[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2007,31(5):455-458.
- 冯治汉. 重力中区地形改正系统的研制[J]. 物探与化探,2002,26(6):467-469.
- FENG Zhihan. The development of the gravity intermediate area topographic correction system[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2002,26(6):467-469.
- 耿涛,杜辉,冯治汉. 基于测点实测高程修正重力中区地改误差评价方法的探讨[J]. 物探与化探,2021,45(6):1134-1140.
- GENG Tao, DU Hui, FENG Zhihan. Discussion on the improvement of the error evaluation method in gravity intermediate area terrain correction based on the measured elevation[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2021,45(6):1134-1140.
- 耿涛,刘宽厚,邸志众,等. CQG2000模型在青藏高原地区的精度检验及其对区域重力调查工作的意义[J]. 西北地质,2010,43(2):1-7.
- GENG Tao, LIU Kuanhou, DI Zhizhong, et al. Accuracy test of CQG2000 model in Qinghai-Tibet Plateau and its significance for regional gravity survey[J]. Northwestern Geology,2010,43(2):1-7.
- 胡明科,江玉乐,李超,等. 基于面积积分的重力地形改正方法研究及应用[J]. 物探化探计算技术,2015,37(2):182-186.
- HU Mingke, JIANG Yule, LI Chao, et al. Research and application on gravity terrain correction method based on surface integral[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration,2015,37(2):182-186.
- 胡维. 重力地形改正误差的讨论[J]. 地质与勘探,1984(2):36-39.
- HU Wei. Discussion on the error of gravity terrain correction[J]. Geology and Exploration,1984(2):36-39.
- 黎哲君,周冬瑞,张毅,等. 基于DEM重力地形改正方法比较研究[J]. 海洋测绘,2019,39(1):1-6.
- LI Zhejun, ZHOU Dongrui, ZHANG Yi, et al. Comparative study on several dem-based strategies for terrain reduction of gravity[J]. Hydrographic Surveying and Charting,2019,39(1):1-6.
- 李振海,李琼,林旭. 重力地形改正的计算模型研究[J]. 测绘工程,2011,20(2):24-26.
- LI Zhenhai, LI Qiong, LIN Xu. Research on the terrain correction models in gravity survey[J]. Engineering of Surveying and Mapping,2011,20(2):24-26.
- 林振民,史振松. 几种区域重力地形改正方法的讨论[J]. 物探与化探,1984,8(4):193-198.
- LIN Zhenmin, SHI Zhensong. Discussion on several regional gravity topographic correction methods[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,1984,8(4):193-198.
- 刘生荣,高鹏,耿涛,等. 不同源DEM数据在高山区重力中区地

- 形改正中的适用性[J]. 物探与化探, 2019, 43(5): 1111-1118.
- LIU Shengrong, GAO Peng, GENG Tao, et al. The applicability of different sources DEM data in median region terrain correction of gravity in high mountain areas[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(5): 1111-1118.
- 刘文锦, 奚家鉴, 张兴雅. 区域重力测量的地形改正方法[J]. 物探与化探, 1983, 7(2): 77-83.
- LIU Wenjin, XI Jiajian, ZHANG Xingya. Topographic correction method of regional gravity survey[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1983, 7(2): 77-83.
- 鲁明星. 对误差传播定律中一个悖论的探讨[J]. 牡丹江教育学院学报, 2005(3): 13-15.
- LU Mingxing. Discussion on a Paradox in the Law of Error Propagation[J]. Journal of Mudanjiang Institute of Education, 2005(3): 13-15.
- 骆遥, 姚长利. 长方体磁场及其梯度无解析奇点表达式理论研究[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(6): 714-719.
- LUO Yao, YAO Changli. Theoretical study on cuboid magnetic field and its gradient expression without analytic singular point[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42(6): 714-719.
- 吕梓令, 周国藩. 区域重力测量外部改正的几个问题[J]. 物探与化探, 1981, 5(5): 257-262.
- LV Ziling, ZHOU Guofan. Several problems on external correction of regional gravity survey[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1981, 5(5): 257-262.
- 马国庆, 孟令顺, 杜晓娟. 重力地形改正的计算机实现[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2008(S1): 36-38.
- MA Guoqing, MENG Lingshun, DU Xiaojuan. Gravity of the terrain accomplish by computer[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2008(S1): 36-38.
- 唐小平, 冯治汉, 刘生荣, 等. 西北地区区域地球物理调查工作现状与展望[J]. 西北地质, 2022, 55(3): 191-199.
- TANG Xiaoping, FENG Zhihan, LIU Shengrong, et al. Status and prospect of regional geophysical survey in Northwest China[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(3): 191-199.
- 杨亚斌, 韩革命, 梁萌. 重力近区地形改正精度探讨[J]. 物探化探计算技术, 2011, 33(1): 92-96.
- YANG Yabin, HAN Geming, LIANG Meng. Ravity near zone terrain correc-tion precision discussion[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 33(1): 92-96.
- 杨子江. 高精度重力地形改正的简化方法[J]. 地质与勘探, 1965(1): 26-28.
- YANG Zijiang. A simplified method of high precision gravity terrain correction[J]. Geology and Exploration, 1965(1): 26-28.
- 礼喜旺登. 对重力地形改正工作的一些意见[J]. 物探化探计算技术, 1983(1): 22-29.
- ZHAXI Wangdeng. Some opinions on gravity terrain correction[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 1983(1): 22-29.
- 张国利, 赵更新, 王德启, 等. 基于DEM条件下对中区地改精度的计算方法[J]. 物探与化探, 2013, 37(6): 1134-1140.
- ZHANG Guoli, ZHAO Gengxin, WANG Deqi, et al. A tentative discussion on the precision calculation method of median region terrain correction based on digital elevation model[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(6): 1134-1140.
- 张品, 申重阳, 杨光亮, 等. Aster Gdem垂直精度评价及其在重力地形改正中的适用性[J]. 大地测量与地球动力学, 2015, 35(2): 318-321.
- ZHANG Pin, SHENG Chongyang, YANG Guangliang, et al. Vertical accuracy assessment of aster GDEM ant its applicability analysis in gravity terrain correction[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2015, 35(2): 318-321.
- 张俊, 张宝松, 邸兵叶, 等. 高程数据网格间距对重力中区地形改正精度的影响[J]. 物探与化探, 2014, 38(2): 157-161.
- ZHANG Jun, ZHANG Baosong, QIU Bingye, et al. The effect of the grid spacing of elevation on the accuracy of median region terrain correction of gravity[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(2): 157-161.
- 赵军, 关云鹏, 张海龙. 三角平面拟合法在重力地形改正中的应用[J]. 物探与化探, 2012, 36(2): 234-236.
- ZHAO Jun, GUAN Yunpeng, ZHANG Hailong. The application of triangular plane fitting method to gravity terrain correction[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 36(2): 234-236.