doi: 10.11720/wtyht.2026.1161
张焕侠, 刘建利, 李百顺, 等. 大比例尺重力精细化改正方法[J]. 物探与化探, 2026, 50(2): 277-291. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1161
Zhang H X, Liu J L, Li B S, et al. Fine-scale correction methods for large-scale gravity survey data[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(2): 277-291. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1161

大比例尺重力精细化改正方法

张焕侠[1], 刘建利[1], 李百顺[1], 冯治汉[2], 王庆国[1], 屈挺[1], 任乖雅[1]
(1. 陕西地矿物化探队有限公司, 陕西 西安 710043; 2. 中国地质调查局 西安地质调查中心, 陕西 西安 710000)

摘 要: 对实测重力值相对于某一基准面进行各项改正是获取其布格重力异常值的必经步骤。当前工作中, 大比例尺重力各项改正多沿用区域重力调查的相关要求及方法, 所获得的布格重力异常中包含虚假异常, 难以准确解释目标体的相关属性及细节。目前, 鲜有针对大比例尺重力进行变密度地形改正等方法的系统研究, 以及缺少公开使用的变密度改正计算软件。为此, 本文提出了建立一套大比例尺重力数据精细化的改正方法。该方法对各项改正的传统基准面予以抬升; 在密度物性资料评级基础上, 采用"变密度广义地形改正"的方法, 一体计算传统的地形改正和中间层改正; 选用 Li-Gotze96 公式一体计算传统的纬度改正和高度改正、计算基于自定义基准面的高度改正值; 推导了布格重力异常计算的新公式; 配套编制了《普适型重力勘查各项改正计算软件》。模拟及实测数据验证表明, 本方法能够明显削弱布格重力异常的虚假异常及其与地形的相关性, 凸显目标体的异常特征, 使异常的细节信息更加丰富。

关键词: 变密度广义地改; 各项改正; 精细化; 大比例尺重力
中图分类号: P631;P31 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-8918(2026)02-0277-15

0 引言

在重力数据处理中, 将重力仪记数器读格值换算成各点的相对重力值后, 再消除非地质因素引起的重力变化, 即经过地形改正、中间层改正、高度改正及正常重力场改正(纬度改正), 方能得到重力勘探要研究的布格重力异常。

在地质勘探中, 地形的变化对重力测量数据的准确性有重要影响。传统的重力地形改正(简称"地改")方法通常假设地形密度均匀, 但在实际应用中这种假设会导致误差, 尤其是在地形密度变化剧烈的区域。在过去 40 余年中, 重力数据变密度地形改正的方法研究主要涉及分区变密度校正、横向变密度地形改正及中间层改正等方面[1-9], 鲜有纵向变密度地形改正方法或系统性的研究以及公开使用的变密度地改计算软件。现有大比例尺重力勘查规范[10]对"变密度地形改正"有所提及, 但无相关具体方法, 在实际工作中重力各项改正等仍沿用区域重力调查的相关要求及方法, 选用固定(常)密度值进行地形及中间层改正, 所得的重力异常多包含虚假异常, 难以实现准确解释目标体的相关属性及细节。

通常, 高度改正把测点重力值改算到大地水准面上, 会导致在高海拔地区出现目标体位于"测点"之上的情形[11-12], 给重力异常处理和解释带来困难[13], 需要将基准面由大地水准面向上抬升到某一水平面上。

现行规范[10,14] 明确规定使用第十七届国际大地测量和地球物理联合会(IUGG)通过的、国际大地测量协会(IAG)推荐的 1980 年大地测量参考系统的正常重力公式(纬度改正/正常场改正)计算大地水准面上的重力值, 高度改正采用 1985 国家高程系统下的高程二阶近似公式计算高度改正值。正常重力值公式所采用的地球参考椭球体表面与大地水准面不一致, 基于参考椭球体表面的大地高与基于大地水准面的海拔高程有较大差别, 会引起一定的正常重力改正误差[13]。研究表明, 采用固定不变的 0.308 6 进行高度改正, 会导致结果中出现大量的山形异常, 且

收稿日期: 2025-05-12; **修回日期**: 2025-10-21
基金项目: 陕西地矿集团 2023 年度科研专项资金项目重点项目(KY202315)
第一作者: 张焕侠(1972-), 女, 高级工程师, 1996 年毕业于长春地质学院, 研究方向为地质综合找矿预测。Email: 396565761@qq.com

高度改正系数的值在不同地点和不同高程上是变化的[15]。

我国“新一轮找矿突破战略行动”对地球物理异常的可靠性和精准度提出了更高要求，间接对重力数据各项改正的方法技术也提出了更高的要求。

基于上述原因，本文提出抬升重力数据各项改正基准面的高度、采用变密度广义地形改正及使用更为精准的公式进行正常重力改正的方法，并编制与之配套的普适型计算软件，从而建立一套大比例尺重力数据精细化改正方法。

1　方法

1.1　自定义基准面

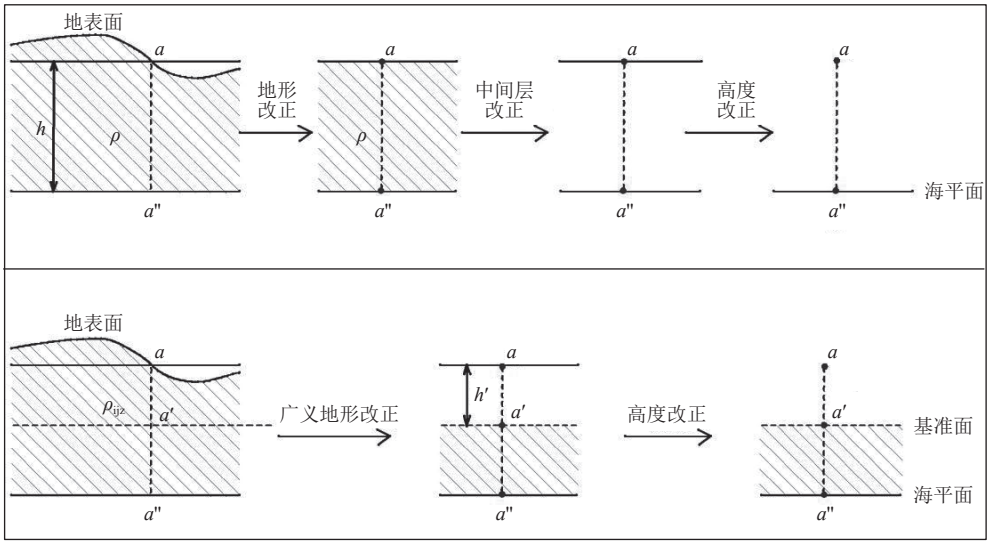
在传统重力数据各项改正中(图 1 上)，基准面(海平面)主要与中间层改正和高度改正计算相关，中间层厚度 h 及改正高度都是重力测点的高程，测点低于高程基准面时为负值[10]。广义地形改正[16]是基于消除基准面以上物质质量对测点重力值的影响，将传统的地形改正和中间层改正一并计算的改正方法。变密度广义地形改正(图 1 下)是在广义地形改正的基础上，参与计算的质量单元(直立棱柱体)采用变密度值，基准面由传统的海平面抬升至地改区最低高程。

中间层改正值主要与其密度及厚度的积成正比，高度改正值主要与测点到基准面的高程差成正比。变密度广义地形改正及高度改正的基准面由传统的海平面向上抬升至地改区最低高程，可使所有测点到基准面的高程差均为正值，方便了改正值的计算，同时在采用的变密度值与实际密度值存在差异的情况下，尽量减小参与计算的物质层厚度，最大限度地降低了基准面以上物质层改正误差及其对测点重力值的影响。

1.2　变密度广义地形改正

1.2.1　方法流程

在各类岩石密度变化较大、地质工作程度较高的工作区进行大比例尺重力勘查时，使用传统的重力各项改正方法(地形改正及中间层改正使用固定密度值 2.67 g/cm^3)所得的布格重力异常会出现“山形/镜象异常”(虚假异常)，给后期目标体相关属性及细节解释带来困难。为尽可能减弱使用固定密度值进行地形改正及中间层改正所带来的虚假异常，在将基准面抬升至地改区最低高程的基础上，先对地改区相关的密度物性资料进行评价，在符合条件的前提下，采用变密度将传统的地形改正和中间层改正融为一体进行变密度广义地形改正(下称“变密度广义地改”)计算。变密度的广义地改根据密度物性资料具体情况分为横向变密度广义地改和纵向变密



a—重力测点；h—测点高程；ρ—固定密度值(2.67 g/cm^3)；h'—测点与自定义基准面的高程差；ρ_{ijz}—变密度值；a'—测点在自定义基准面的投影点；a''—测点在海平面上的投影点

a—gravity measuring point; h—elevation of the measuring point; ρ—fixed density value (2.67 g/cm^3); h'—elevation difference between the measuring point and the custom reference plane; ρ_{ijz}—variable density value; a'—projection point of the measuring point on the custom reference plane;a''—projection point of the measuring point on the sea level

图 1　传统地改、中间层改正、高度改正(上)与变密度广义地改、高度改正(下)对比

Fig. 1　Comparison between traditional topographic correction, intermediate layer correction, and height correction (upper part) and variable-density generalized topographic correction and height correction (lower part)

度广义地改 2 种, 具体流程详见图 2。

1.2.2　密度物性资料评级

密度物性资料整理及评级是进行变密度广义地改的前置工作, 经评级认为密度物性资料符合条件, 方可进行变密度广义地改; 对密度物性资料整理统计并按一定格式生成的变密度网格数据, 是进行变密度广义地改计算的基础。

密度物性资料整理是评级的基础, 依次通过密度相关资料的汇集、密度资料质量评述、密度资料整合与统计、变密度地改正物性资料评级及资料提供 5 个步骤完成。

密度相关资料汇集包括地改区范围内的地面密度资料、山地工程相关资料、物探测深相关资料, 以及地质、构造相关成果资料, 纵向以地改区最低高程为限。密度资料质量评述参照相关规范[10,17], 按照采样方式、标本采集质量、标本分布质量、标本密度测定及标本密度统计 5 项相关内容及指标, 对所汇集的资料逐条进行质量评价, 给出相关资料能否利用及可利用多少的结论。对可以利用的密度资料从密度数据整理、密度数据统计、密度数据图示、密度数据成果 4 方面进行数据整合和重新统计。

之后, 分别以地改区纵向构造中地质认识的精细性、深部控制资料的丰富性, 岩矿石物性数据应具有地质描述的准确性、参数测定的精确性、数理统计的合理性, 再从地质单元、统计样本及空间分布的代表性共 3 类 8 项指标为依据进行资料估分并评级, 评级分为 A、B、C 3 档, A 级可用于纵向(三维)变密度广义地改, B 级可用于横向变密度广义地改, C 级无法用于变密度广义地改 (表 1)。

物性资料评级为 B 级以上的, 按一定的格式要求生成和提供变密度网格数据, 供变密度改正计算使用(图 3、图 4)。

1.2.3　横向变密度广义地改

横向变密度广义地改主要解决重力勘查中地表下各地层呈直立状/近直立状、地层/岩性密度纵向保持不变、只在横向上存在密度变化的情况下, 用以削

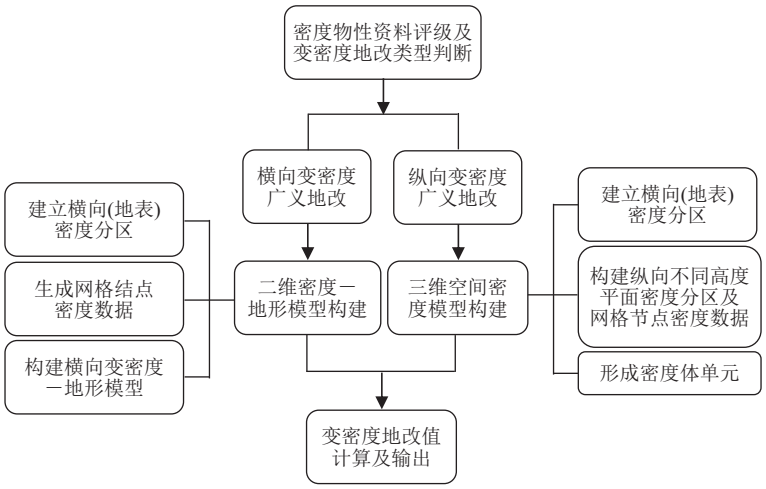


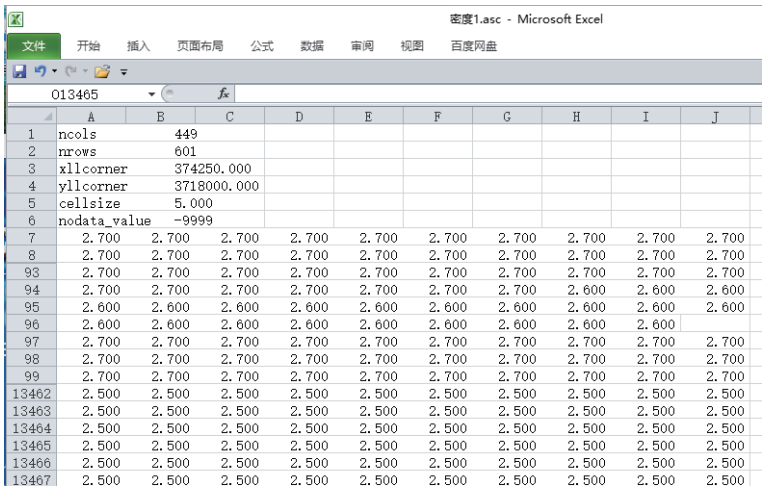
图 2　变密度广义地形改正流程

Fig. 2　Flow of variable density generalized topographic correction

表 1　变密度改正物性资料评级估分

Table 1　Rating and scoring for physical property data of variable density correction

评级指标		满分(分)	估分标准
纵向构造	地质认识的精细性	8	清楚和精细8分, 清楚性5分, 无0分
	深部控制的丰富性	2	①种类齐全1分, 种类缺项0.5分, 无0分; ②分布面全0.3分, 分布面弱0.2分, 无0分; ③控制达到改正面深度0.3分, 控制未达到改正面深度0.2分, 无0分
岩矿石物性数据	地质描述的准确性	4	定名及其描述准确4分, 定名准确3分, 定名欠准确1分, 定名不准确0分
	参数测定的精确性	3	方法、仪器及测量精度合格3分, 方法及测量精度合格2分, 测量精度合格1分, 均不合格0分
	数理统计的合理性	3	统计单元及其样品数量合格3分, 统计单元合格2.5分, 样品数量合格1分, 均不合格0分
代表性	地质单元的代表性	4	纵、横向单元齐全4分, 横向单元齐全3分, 均不齐全0分
	统计样本的代表性	4	分布均匀4分, 分布较均匀2分, 分布不均匀0分
	空间展布的代表性	2	可拆分3分, 部分可拆分2分, 不可拆分0分
	合 计	30	A级: 21.5～30.0分; B级: 12.5～21.0分; C级: 0～12.5分



密度1.asc - Microsoft Excel

文件　开始　插入　页面布局　公式　数据　审阅　视图　百度网盘

013465

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	ncols	449								
2	nrows	601								
3	xllcorner	374250.000								
4	yllcorner	3718000.000								
5	cellsize	5.000								
6	nodata_value	-9999								
7	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700
8	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700
93	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700
94	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.600	2.600	2.600
95	2.600	2.600	2.600	2.600	2.600	2.600	2.600	2.600	2.600	2.600
96	2.600	2.600	2.600	2.600	2.600	2.600	2.600	2.600	2.600	
97	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700
98	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700
99	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700
13462	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500
13463	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500
13464	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500
13465	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500
13466	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500
13467	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500

图 3　平面密度网格数据(*.asc)格式

Fig. 3　Format of planar density grid data (*.asc)

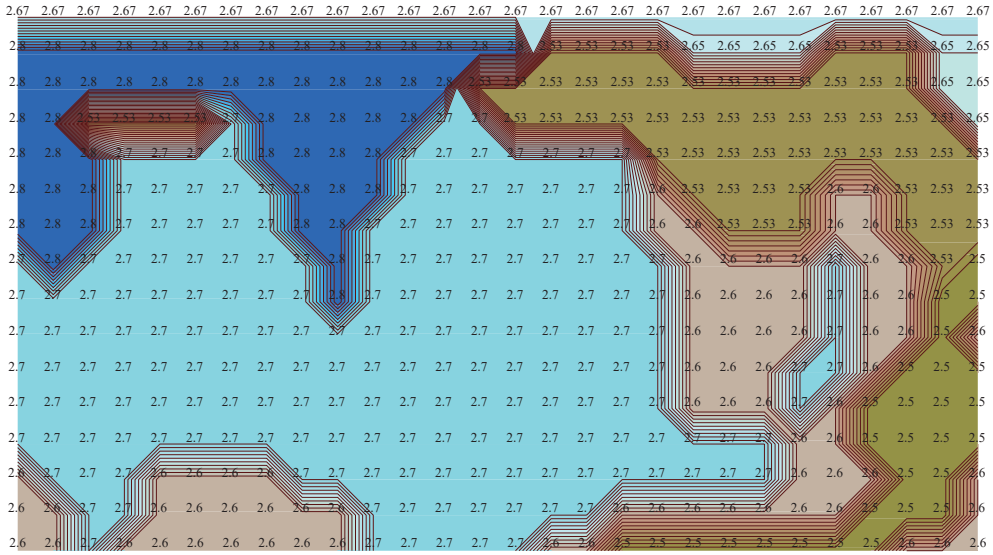


图 4　平面密度分区物性地质示意及局部密度数据

Fig. 4　Schematic of physical property geology for planar density zoning and local density data

弱使用固定密度值进行改正带来的虚假异常问题，前提是密度物性资料评级为 B 级。该方法的重点是二维密度—地形模型的构建，主要包括建立横向(地表)密度分区、生成网格结点密度数据、构建横向变密度—地形模型 3 个步骤(图 2)。

建立横向(地表)密度分区：依据地改区大比例尺地质图划分地层/岩性分区，分区边界主要为地质单元界线，在各分区标注相应密度值；对密度值相同的相邻区块进行合并，对密度值不同的同一区块进行拆分，同时对相关分区边界进行修正，一个分区只对应一个密度值，形成地改区横向(地表)密度分区(图 5)。

生成网格节点密度数据：在横向(地表)密度分区的基础上，使用 GIS 软件编辑密度分区文件，为各个分区赋密度值，编制密度单元数据文件；利用软件对横向(地表)密度分区进行网格化，各网格结点对应唯一的 x、y 坐标及密度值 ρ(图 6)，导出数据，最终编辑成横向(地表)网格结点数据库。网格距使用区内大比例尺地形图分辨率。对于落在密度分区边界上的网格节点，其密度值取前一节点的密度值。

构建横向变密度—地形模型：根据网格结点密度数据及高程 DEM 数据，利用配套软件，通过插值算法将不同位置的密度数据融合到地形模型中，构建横向变密度—地形模型，最后形成多个向下延伸至基准面(地改区的最低高程面)、纵向密度值为其顶面地表密度的方柱(图 7)，为进一步地改值计算备用。

1.2.4　纵向变密度广义地改

纵向变密度广义地改主要解决纵向岩石密度变

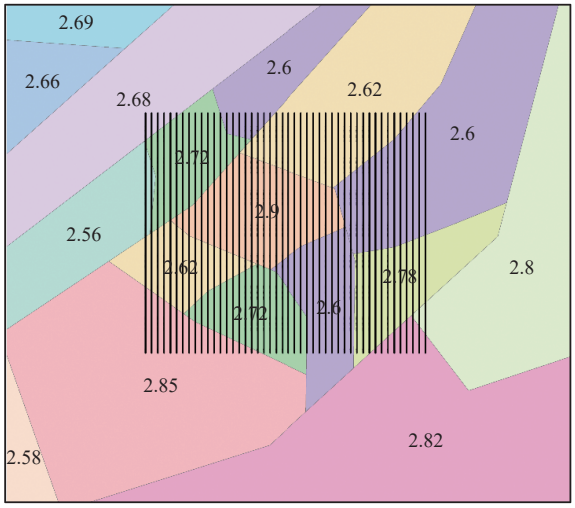


图 5　地改区横向密度分区示意(图中黑色数字为地质体密度，黑色直线为模拟重力测线)

Fig. 5　Schematic of horizontal density zoning for geological body to regional scale (the black numbers in the figure represent the density of geological bodies, and the black straight lines represent the simulated gravity survey lines**)**

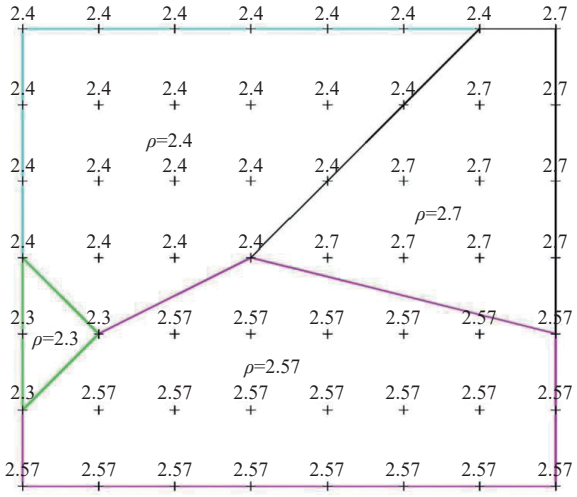


图 6　地改区网格节点密度数据示意

Fig. 6　Schematic of grid node density data for prefecture-level city transformation from prefecture to district

化剧烈的勘查区使用固定密度值进行地改后存在虚假异常的问题，其前提是需要密度物性资料为 A 级。通常一个地改区内横向不同位置对应的纵向地层的岩性及厚度不尽相同，纵向地改同时伴随着横向地层、岩性及厚度的变化，因此纵向变密度广义地改实质为“三维变密度广义地改”，横向变密度广义地改是纵向变密度广义地改的特殊情况，纵向变密度广义地改的条件要求高于横向变密度广义地改的条件要求。

该方法的关键是通过建立多个不同高度的平面密度分区来刻画出纵向上不同的密度层体，从而构建三维空间密度模型，具体包括建立地表密度分区、构建纵向不同高度平面密度分区、形成密度体单元 3 个步骤(图 2)。建立地表密度分区、生成网格节点密度数据的方法如前文所述。

构建纵向不同高度平面密度分区：结合区域地质构造认识、地改区内地质露头及已有的钻孔、地震等控制性资料，由上到下大致确定地改区内基准面以上不同高度平面密度分区的间隔及各平面密度分区对应的高程，最低的平面密度分区对应基准面高程；由地表(地质图)的地质体界线及地质构造的产状、露头中地质体及地质构造(褶皱、断裂、破碎带等)的垂直及水平方向的变化情况，推断构造线在深部的展布情况，借助多条垂交的网格线密度剖面(图 8)确定地表下不同高度平面密度分区的区块分界位置(图 9)；依据所取得的区内地层或岩性的密度值，使用 GIS 软件为不同高度的各密度分区对应赋值；各平面密度分区中低于该高程的区域密度值留白，最终形成纵向不同高度的平面密度分区(图 10)。

图 9 为 x 方向某条网格线密度剖面，假设在高程 930 m 处有 1 个纵向密度层体分界面，图中蓝色

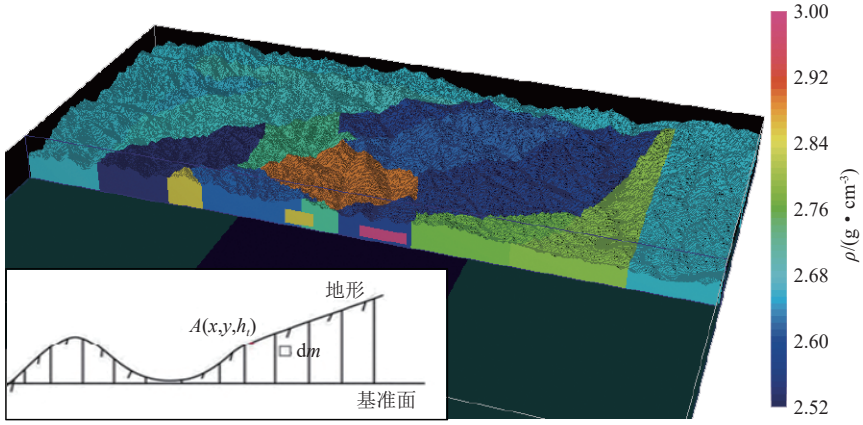


图 7　横向变密度—地形模型切面及方柱示意

Fig. 7　Schematic of the cross-section of the horizontal variable density-terrain model and the square column

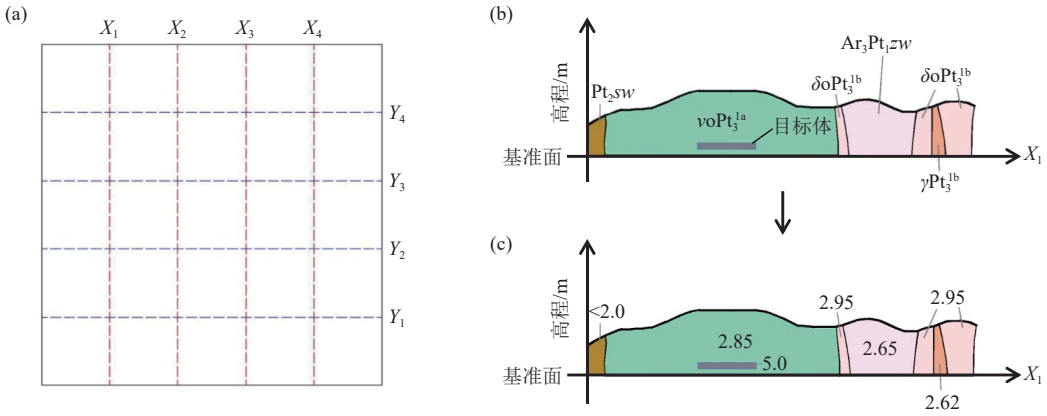


图 8　地改区网格剖面线(a)和网格线地质剖面转为密度剖面(b、c)示意(图中数字为岩性对应的密度值，单位：g/cm^3)

Fig. 8　Schematic diagrams of the grid section lines for land reform areas (a) and the conversion of grid line geological sections into density sections (b、c)(the numbers in the figures are the density values corresponding to lithologies, unit: g/cm^3)

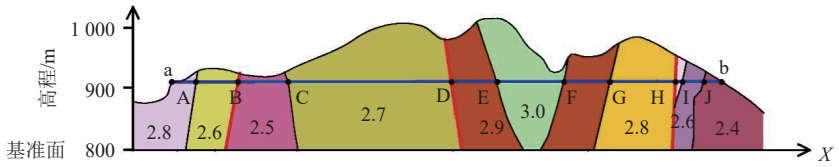


图 9　某一高程平面密度分区部分边界节点示意(图中数字为岩性对应的密度值，单位：g/cm^3)

Fig. 9　Schematic of partial boundary nodes in the density zoning of a certain elevation plane
(the numbers in the figures are the density values corresponding to lithologies, unit: g/cm^3**)**

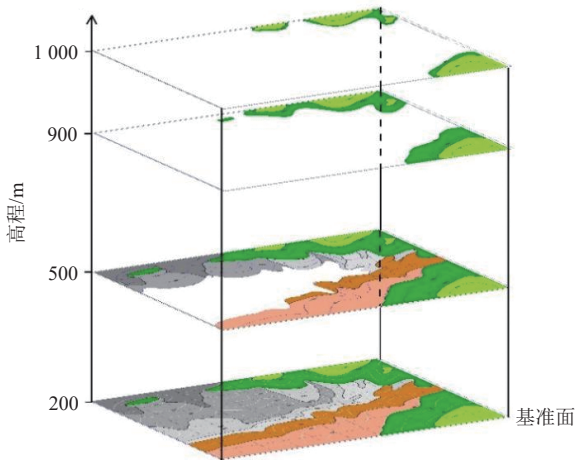


图 10　地改区垂向不等间距平面密度分区示意
(不同颜色代表不同密度值)

Fig. 10　Schematic of vertical unequal-spacing plane density zoning for land reform area (different colors represent different density values**)**

线条为二者交线，A、C、G、I、J 这 5 个节点分别为交线上的密度分界点，B、D、H 这 3 个节点为交线上的密度分界点兼断裂构造节点，E、F 两点兼具密度分界点及褶皱构造节点特征，a、b 两点为交线与地形线的交点。图中 A、B、C、D、E、F、G、H、I、J、a、b 共计 12 个点所处的位置均为该网格线密度剖面上的关键地质点及地形点，且分别对应唯一的坐标及高程值(x, y, h)，为该高程的平面密度分区区块边界线的部分节点。按照同样的方法，可以确定 x、y 方向所有网格线剖面同一高程的所有关键地质点、地形点，作为该高程平面密度分区边界线连接的全部节点。以此类推，确定地改区内其他不同高程的平面密度分区的边界节点及边界线。

地表密度分区及纵向不同高度的平面密度分区范围均以地改区范围为准；各高度平面密度分区的间距及 x、y 方向网格线剖面间距均跟据实际情况确定，不要求一定等间距 (图 10)。

形成密度体单元：以配套的地形图分辨率为网格间距，使用编制的软件对赋予密度值的地表密度分区数据及各不同高度的平面密度分区数据逐一进行网格化，形成多个密度体单元(图 11)。以各密度体单元的网格节点数据(坐标 x、y，高程 z，密度 ρ)建立统一的计算单元密度数据库，作为各测点地改值的计算基础。网格文件与带有密度属性的平面密度分区文件左下角坐标一致，保证生成的物性网格和地质网格大小、位置及范围相同；平面密度分区图中低于该高度的图面密度值由软件程序自动填充。

1.2.5　变密度广义地改算法

变密度广义地改采取“圆域—方柱”的算法(图 12)，并尽可能缩小计算方柱的规格，使计算范围更趋近于圆域范围(图 13)，以减小拾取方柱进行地改值计

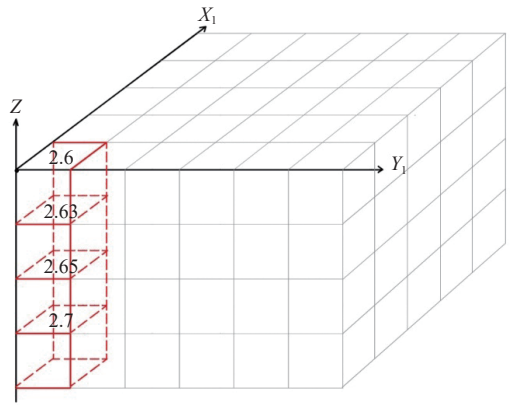
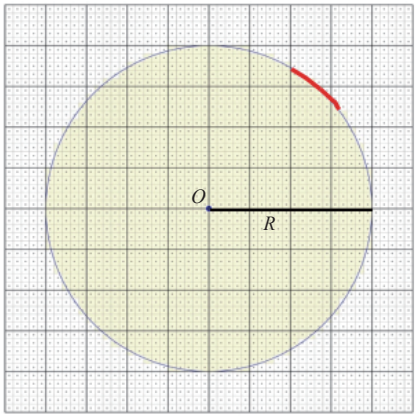


图 11　三维空间密度模型及体单元示意

（图中数字为体单元密度值，单位：g/cm^3）

Fig. 11　Three-dimensional spatial density model and schematic diagram of volume elements (the numbers are the density values of volume elements, unit: g/cm^3**)**



O—重力测点位置; *R*—地改半径; 灰点—物性网格中的密度值

O—gravity measurement point location; *R*—geopotential radius; gray dot—density value in the physical property grid

图 12　圆域—方柱算法示意

Fig. 12　Schematic of the circular domain-square column algorithm

算时圆域周边存在的盈缺。

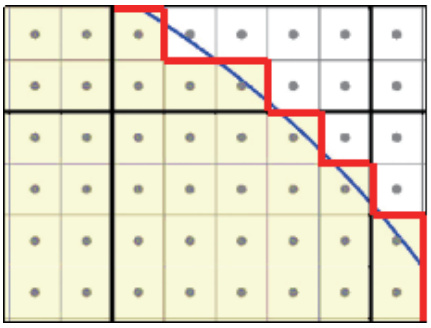
方柱对重力测点的重力影响值计算公式[18-19] 为:

$$\Delta g = -G\sigma\left[x\ln(y+R)+y\ln(x+R)+ 2z\tan^{-1}\frac{x+y+R}{z}\right]\Bigg|_{x_1}^{x_2}\Bigg|_{y_1}^{y_2}\Bigg|_{z_1}^{z_2} \quad (1)$$

其中: $R=\sqrt{x^2+y^2+z^2}$, (x, y, z)为长方体内的场源点坐标; 方柱范围为(x_1, x_2)、(y_1, y_2)、(z_1, z_2); σ 为方柱的密度; G 为万有引力常数。

1.3　正常重力改正

我国现行重力规范[10, 14] 把正常重力改正分成纬度改正(正常场改正)和高度改正两步进行, 纬度改正和高度改正都采用相应的二阶近似公式, 所使用



蓝线—圆域部分边界; 红线—方柱边界; 灰点—物性网格的密度值

blue line—partial boundary of circular domain; red line—square column boundary; gray point—density values in the physical property grid

图 13　方柱大小与圆域盈缺示意

Fig. 13　Schematic diagram of the size of the square column and the profit and loss of the circular domain

的高程基准面与正常椭球体表面不一致, 由此带来的改正误差, 会对改算后的重力异常及其解释产生影响。

Li 等在 1996 年推导出一个计算正常椭球体在其表面之上或之下任一点产生的理论正常重力值的精确解析公式——Li-Gotze96 公式, 该公式统一了现有的纬度改正和高度改正, 能够直接计算测点的正常重力值[20]。地表纬度为φ、相对于 GRS80 椭球体表面的大地高为 h 处的正常重力值 Li-Gotze96 公式为:

$$g = \sqrt{\frac{2}{\frac{r+272\,335\,601\,265}{\sqrt{7.416\,667\,97\times10^{22}+r^2+\frac{d}{544\,671\,202\,530}}}+1}}\times \left[\frac{3.986\,605\times10^{-8}}{b'^2+272\,335\,601\,265}+ \frac{q'\times\left(5.643\,026\,87\times10^{10}\sin^2\beta'-1.881\,008\,96\times10^{10}\right)}{2\,692.780\,227\,46b'^2+7.333\,399\,22\times10^{14}}- 5.317\,494\,12\times10^{-9}b'\cos^2\beta'\right]\left(10^{-5}\ \mathrm{m/s^2}\right), \quad (2)$$

其中:

$$\sin^2\beta' = 0.5-\frac{r}{544\,671\,202\,530}+\sqrt{0.25+\frac{r}{1\,089\,342\,405\,060}-\frac{d}{544\,671\,202\,530}},$$

$$\cos^2\beta' = 0.5+\frac{4}{544\,671\,202\,530}-\sqrt{0.25+\frac{r}{1\,089\,342\,405\,060}-\frac{d}{544\,671\,202\,530}},$$

$$q' = 3\times\left(1+\frac{b'^2}{272\,335\,601\,265}\right)\times\left(1-\frac{b'}{2\,723\,355\tan\left(\frac{272\,335\,601\,265}{b'}\right)}\right)-1,$$

$$b'^2 = \frac{r}{2}-1\,361\,678\,006\,325+\sqrt{1.854\,166\,99\times10^{22}+\frac{r^2}{4}-d\times1\,361\,678\,006\,325},$$

$$r = h^2+\frac{1.654\,913\,8\times10^{27}+1.632\,830\,4\times10^{27}\times\tan^2\varphi}{4.068\,063\times10^{13}+4.040\,829\,6\times10^{13}\tan^2\varphi}+\frac{h\times(0.054\,466\,8\times10^{13}\cos^2\varphi+8.081\,659\,2\times10^{13})}{\sqrt{4.068\,063\times10^{13}\cos^2\varphi+4.040\,829\,6\times10^{13}\sin^2\varphi}},$$

$$d = h^2(2\cos^2\varphi-1)+\frac{1.654\,913\,8\times10^{27}-1.632\,830\,4\times10^{27}\times\tan^2\varphi}{4.068\,063\times10^{13}+4.040\,829\,6\times10^{13}\tan^2\varphi}+\frac{h\times(1.621\,778\,52\times10^{14}\cos^2\varphi-8.081\,659\,2\times10^{13})}{\sqrt{4.068\,063\times10^{13}\cos^2\varphi+4.040\,829\,6\times10^{13}\sin\varphi}}。$$

用重力规范的方法与 Li-Gotze96 公式分别计算同一区域的正常重力值，二者差值基本上大于 0.04×10^{-5}/ms^2，最大可达 0.24×10^{-5}/ms^2，且计算点高程越大，误差也越大。此误差并非系统差，受地形起伏影响很大[13]。

基于上述原因，本文采用 Li-Gotze96 公式进行测点的正常重力改正。高度改正系数随高程的增加逐渐变小。由 Li-Gotze96 重力正常值计算公式及正常重力值的物理意义可知，若 b 点为重力测点 a 在基准面上的投影点，则 a 点改算至自定义基准面上的正常重力值就等于用 Li-Gotze96 公式计算的 b 点的正常重力值g_{b0}（图 14）。Li-Gotze96 公式计算的 g_{b0}与g_{a0}的差值则等于 a 点相对于自定义基准面的高度改正值。

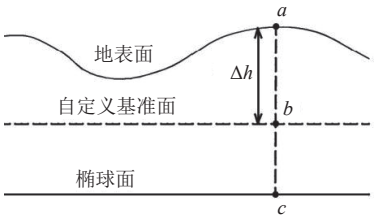


图 14　高度改正示意

Fig. 14　Height correction indication

1.4　布格重力异常计算

基于各项改正基准面的抬升、变密度广义地形改正、正常重力值的物理意义，以及利用 Li-Gotze96 公式计算正常重力值和相对于自定义基准面的高度改正值的情况（图 1、图 14），测点 a 的布格重力异常计算公式经推导后发生了变化[21]：

$$\Delta g_b = g-\delta'_{gt}-g_{a0}\ ,\qquad(3)$$

式中：Δg_b为布格重力异常值；g为测点重力值；δ'_{gt}为变密度广义地改值；g_{a0}是 a 点的正常重力值。

1.5　计算软件编制

为重力数据精细化改正方法配套编制了《普适型重力勘查各项改正计算软件》。编程语言为 Delphi，分 30136KB/32 位和 35230KB/64 位两个版本，运行环境为 Windows 7～Windows 11，具有高度集成、“数”“图”互动、可视化且操作性强的特征，除满足重力各项改正主要功能外（图 15、图 16、图 17），

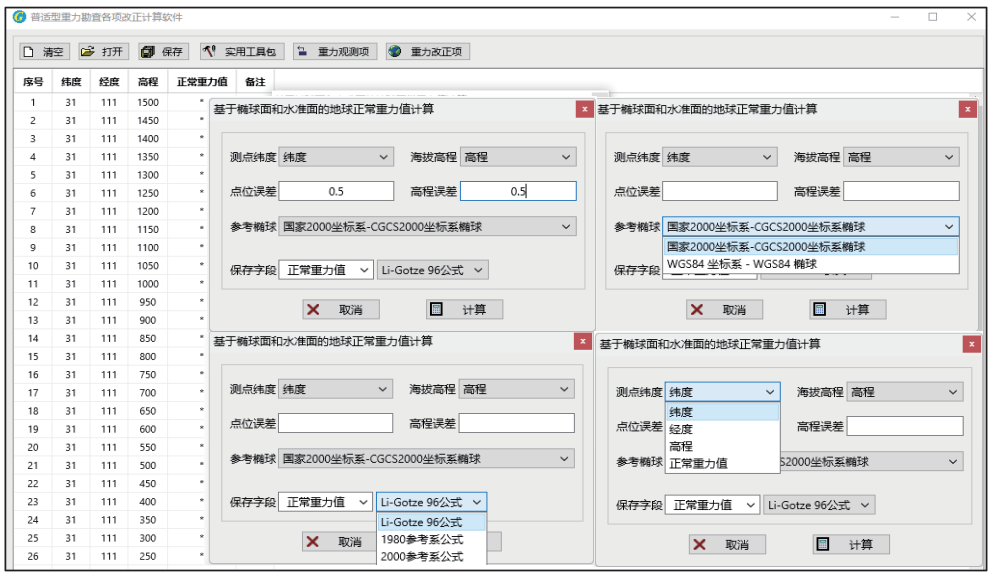


图 15　重力正常场改正值（正常重力值）计算及结果

Fig. 15　Calculation and results of gravity normal field correction value (normal gravity value)

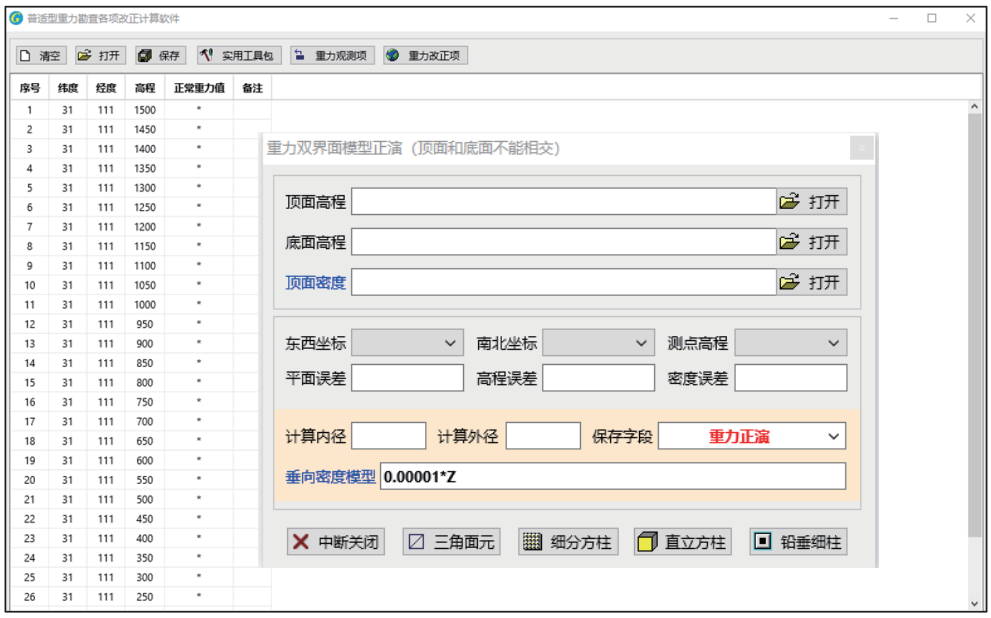


图 16　重力横向变密度地形改正计算界面

Fig. 16　Calculation interface for lateral variable-density terrain correction of gravity



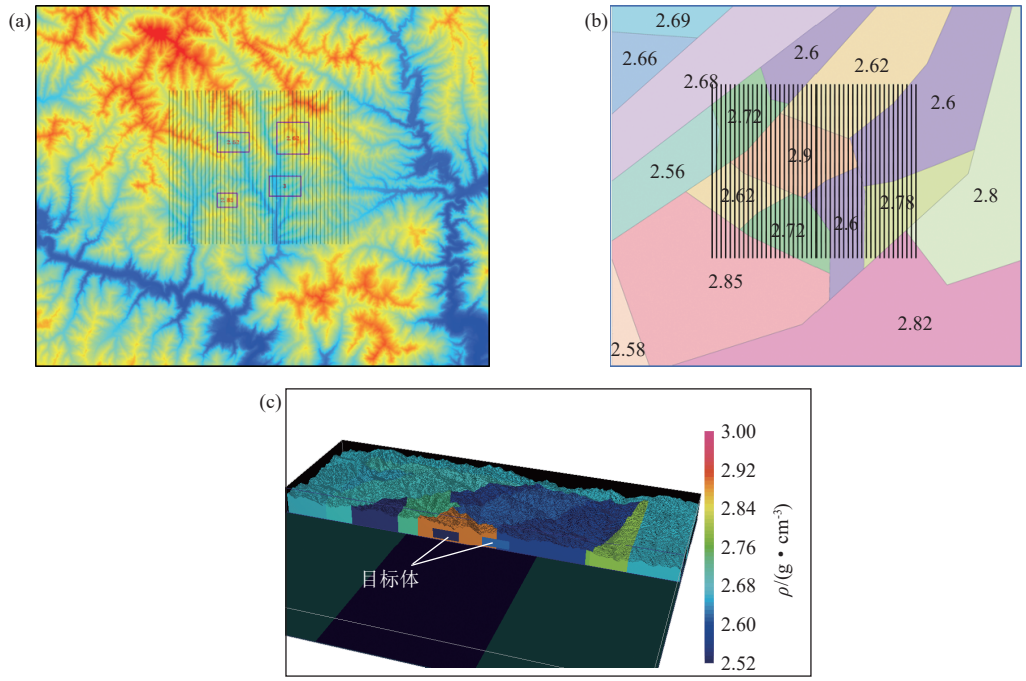
图 17　重力纵向/三维变密度地形改正计算界面

Fig. 17　Longitudinal gravity/3D variable-density topographic correction calculation interface

还增加了“实用工具包”及“重力观测项”功能模块，作为辅助计算的工具。“实用工具包”整合了投影坐标与经纬度相互转换、坐标系绕原点旋转、据点线号匹配坐标、数据列间任意计算、数据列间统计分析、重复数据查询标识、读测点数据高程值、地图高程数度估算、估算地图地改范围、多边形区修剪 DEM、压缩数字高程模型、文件格式转换制作等工具。“重力观测项”主要为重力观测数据导出时的一些必备计算工具，具体包括单点读数平均、固体潮改正、重力格值改正、重力单程闭合、匹配测点坐标及单程闭合集合。

2　数值模拟试验

为验证本文方法的可行性及配套编制程序的正确性，基于横向变密度广义地改是纵向变密度广义地改的特殊情况，采用如图 18 所示的模型进行实验。该模型包括重力测点 2 096 个，采用 1∶1 万地形 DEM 数据（图 18a），并构建了相应的地层及其密度值（图 18b）、理论模型立体图（图 18c）。



a—地形及重力测线、理论模型分布示意; b—模拟地层及密度、理论模型分布平面 (黑色数字为地质体密度, 黑色直线为模拟重力测线); c—模拟数据理论模型三维示意(部分)

a—schematic of topographic and gravity survey line, and theoretical model distribution; b—planar diagram of simulated strata, density, and theoretical model distribution (the black numbers are the densities of geological bodies, and the black lines are simulated gravity survey lines); c—three-dimensional schematic diagram (partial) of the theoretical model for simulated data

图 18　横向变密度地改模拟数据及理论模型

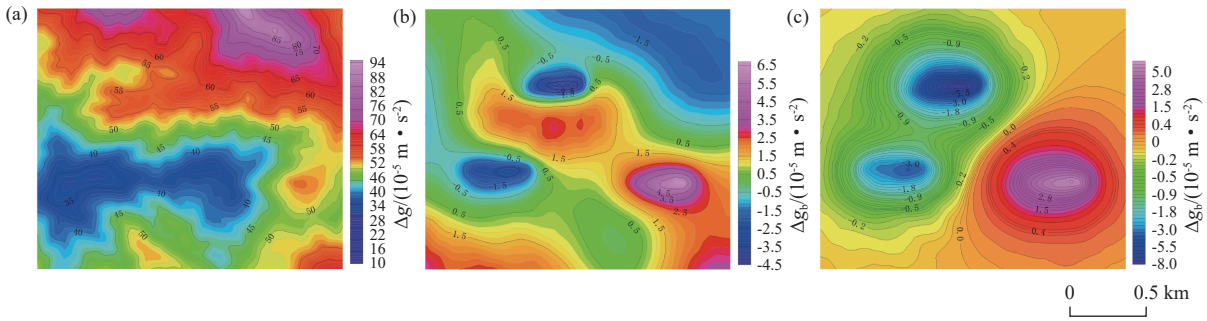
Fig. 18　Horizontal variable-density ground roll simulation data and theoretical model

假设图 18 中的各地层倾角为 90°, 埋藏在地表以下, 同时计算海拔 0 m 到地表的背景重力值和理论模型重力值, 作为模拟实测重力值(图 19a)。分别采用常数密度值及横向变密度值进行广义地形改正, 所得的剩余重力异常分别见图 19b、图 19c。

比较横向变密度广义地改后的布格异常(理论模型重力异常, 图 19c)和常数密度地改后的布格异常(图 19b), 异常幅值和形态有明显的差异。常数密度改正后的布格异常受地形影响产生虚假异常, 形态受地形和背景地质综合影响。采用横向变密度地形改正后的剩余重力异常与理论模型引起的重力异常完全一致。

3　实际数据应用

为了进一步验证本文方法的有效性, 选用东秦



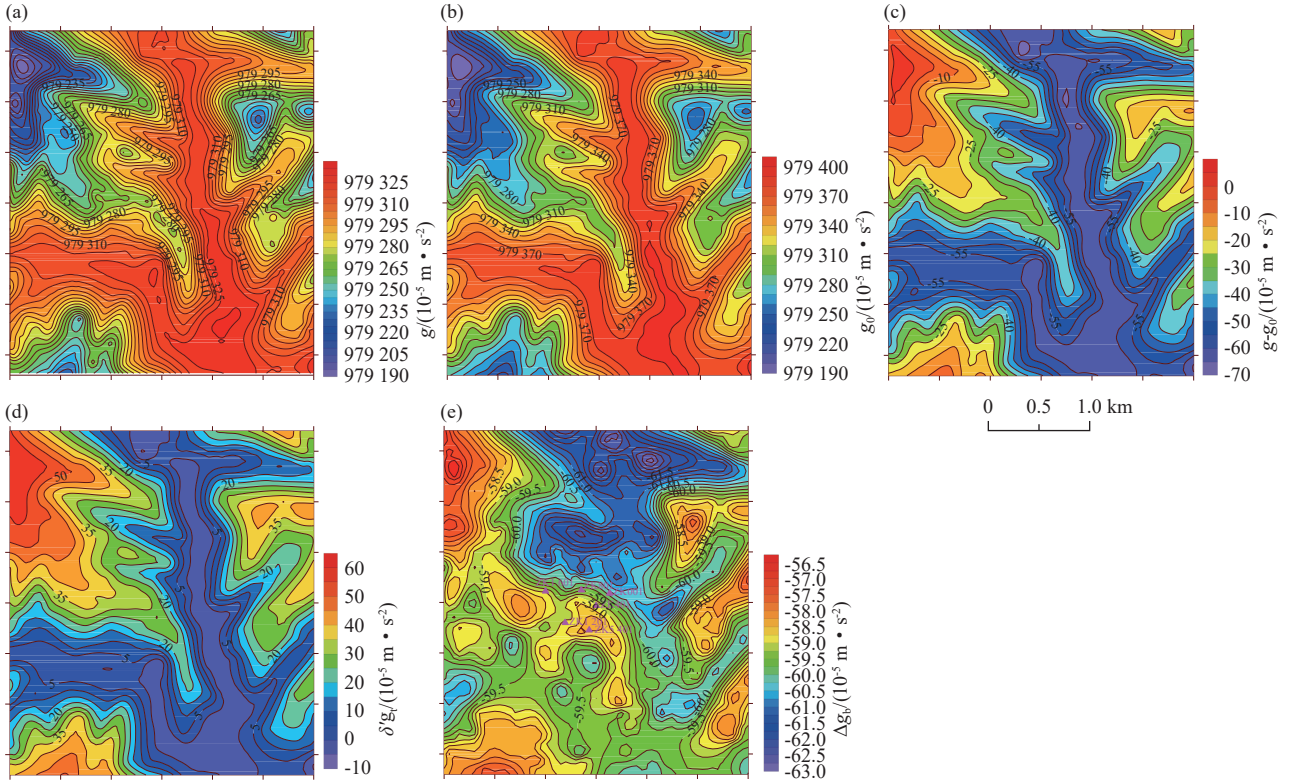
a—不同地层单元和模型综合重力异常(模拟实测重力异常); b—常数密度地改后的布格异常示意; c—横向变密度广义地改后布格异常

a—comprehensive gravity anomaly map of different stratigraphic units and models (simulating measured gravity anomalies); b—schematic of Bouguer anomaly after constant density terrain correction; c—Bouguer anomaly after lateral variable density generalized terrain correction

图 19　模拟实测重力异常及不同方法地改后的布格异常对比示意

Fig. 19　Comparison of simulated measured gravity anomalies and Bouguer anomalies after different methods of ground modification

岭某铜多金属矿勘查区比例尺 1∶25 000、面积 10.2 km^2 的重力数据进行实验验证(变密度广义地改选用横向变密度广义地改方法)。验证区重力测点为自由网, 测点平均密度 57 点/km^2。地改范围由验证区外扩 5 km。涉及的其他主要资料包括 3 个钻孔及地表的 1 648 件岩矿石物性密度成果资料、1∶1 万地质图及 1∶1 万地形数据等。结合区内地表地层、岩性的分布及物性密度资料的整理结果, 形成地改区横向(地表)密度分区, 对无密度数据的区域统一填充密度值 2.67 g/km^3; 依据收集的 DEM 数据分辨率对地改范围内的地表密度分区进行网格化处理, 形成物性密度地质图, 网格间距为 10 m×10 m, 网格范围长 13.4 km, 宽 13.0 km, 形成与地形数据同范围的网格化变密度数据; 使用配套编制的普适型重力勘查各项改正计算软件和 Li-Gotze96 公式计算正常重力值、重力测点的横向变密度广义地改值, 顶界面地形数据使用 DEM 高程数据, 底界面数据使用区内最低高程(588 m), 变密度网格数据使用的是地表物性密度网格数据成果, 计算内径为 0 m、外径为 5 000 m, 获得地形改正值为 (−8.357～59.835)×10^{-5} m/s^2; 对重力测点分别计算正常重力值和横向变密度广义地改值后, 依据式(3)求取其布格异常值。分别求取验证区内所有重力测点的布格异常值, 形成布格异常平面等值线异常 (图 20)。



a—实测重力值平面等值线; b—正常重力值平面等值线; c—正常重力改正后的平面等值线; d—变密度广义地改值平面等值线; e—布格重力异常平面等值线

a—plane contour map of measured gravity values; b—contour map of normal gravity value plane; c—plane contour map after normal gravity correction; d—generalized contour map of variable density modified value lane; e—Bouguer gravity anomaly plane contour line

图 20　布格重力异常平面图求取过程

Fig. 20　Process for obtaining planar of Bouguer gravity anomaly

验证区铜矿为岩体控矿, 物探方法主要目的是推断隐伏—半隐伏中酸性岩体的范围。通过分别对比传统的重力各项改正方法及本文方法所得的布格异常与地形的相关性及目标体(岩体)的对应性, 进行方法技术有效性的验证。

3.1　布格异常与地形的相关性对比

在验证区北部提取 1 条剖面数据进行两种方法改正结果与地形相关性的对比。剖面位置如图 21 中粉色线段所示, 改正结果与地形相关性对比情况详见图 22、图 23。

结合图 22、图 23 可以看出, 传统改正方法所得的布格异常值与地形正相关, 相关系数 R 为 0.820 1, 相关性很强, 而本次方法所得的布格异常与地形的正相关系数 R 为 0.192 7, 相关性明显减弱, 同时异常

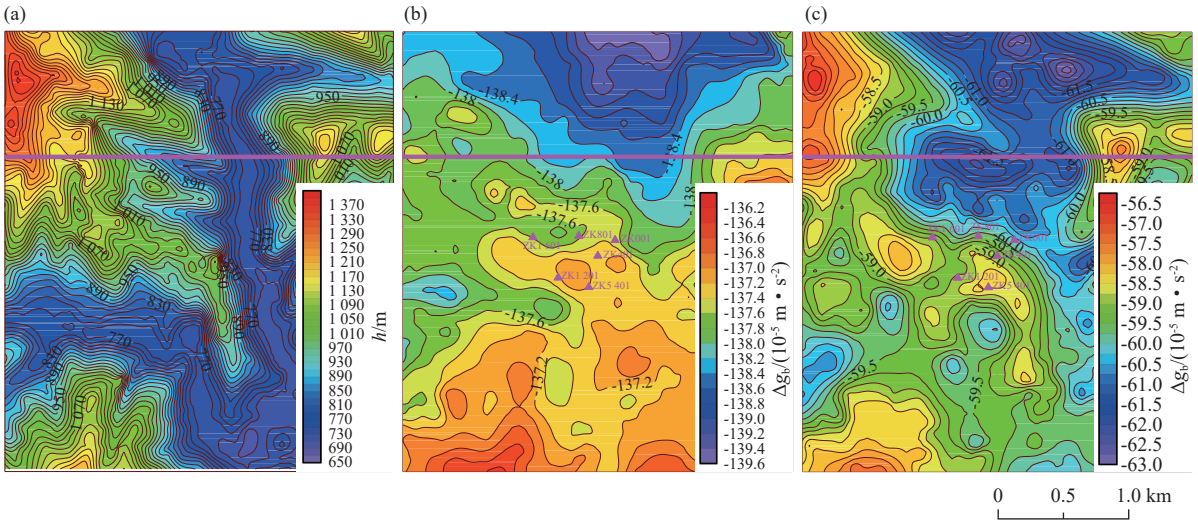


图 21　剖面及其在地形(a)、传统改正方法所得布格重力异常(b)和本文方法所得部分重力异常(c)的对应位置

Fig. 21　The profile and its corresponding positions in the topographic(a), bouguer anomaly obtained by the traditional correction method(b) and by the new correction method(c)

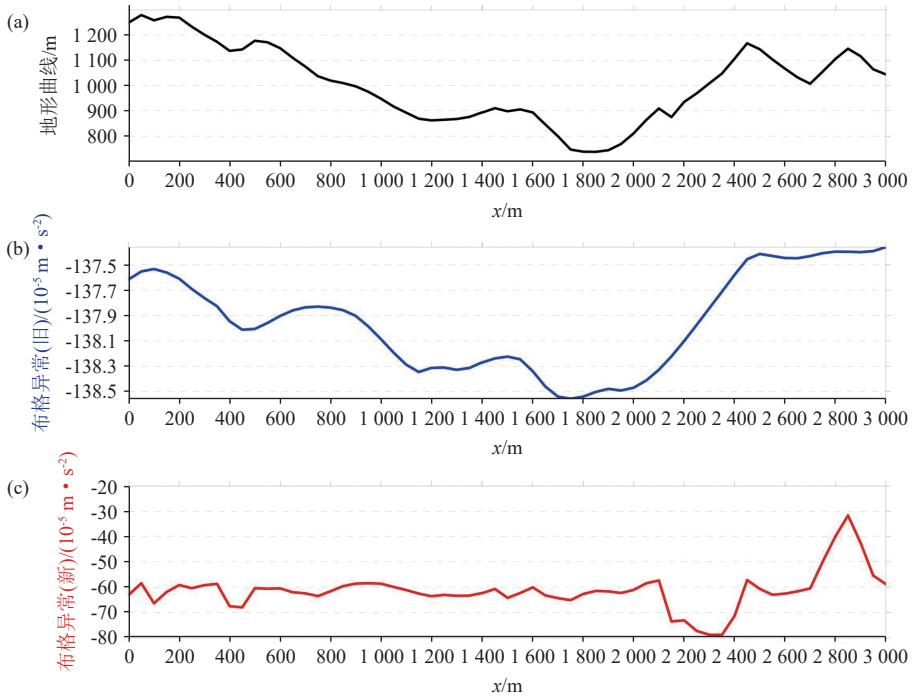


图 22　传统改正方法(b)与新改正方法(c)的布格异常与地形(a)相关性对比

Fig. 22　Comparison of the correlation between Bouguer anomaly and terrain (a) between traditional ccorrection method (b) and new correction method (c)

幅值明显变大。

3.2　异常与目标体（岩体）的对应情况

本次地形改正采用 10 m×10 m 间距的 DEM 数据，近区(0～20 m)、中区(20～2 000 m)地改均采用相应公式计算。据张菲菲等有关 DEM 网格间距及校正半径对重力地形改正的影响研究成果，在广义地形改正中，地形改正值占较大的范围，即 100～1 000 m 环带，整体地形改正值主要集中在 0～5 000 m 范围内[16]。因此，新改正方法远区改正的范围为 2 000～5 000 m 环带，而传统改正方法远区改正的范围依据常规的 2 000～20 000 m 环带。

图 24 为两种改正方法所得布格重力异常与地质图的对比情况。图中显示，本次新改正方法所得结果图中，布格重力异常与测区中北部及中南部的成/赋矿岩体有明显的对应关系(图 24b、c)，而传统改正方法所得的结果中未见对应关系(图 24b、a)。同时，本文方法改正后的异常细节信息明显丰富，更利于对复杂地质情况的分析研究。

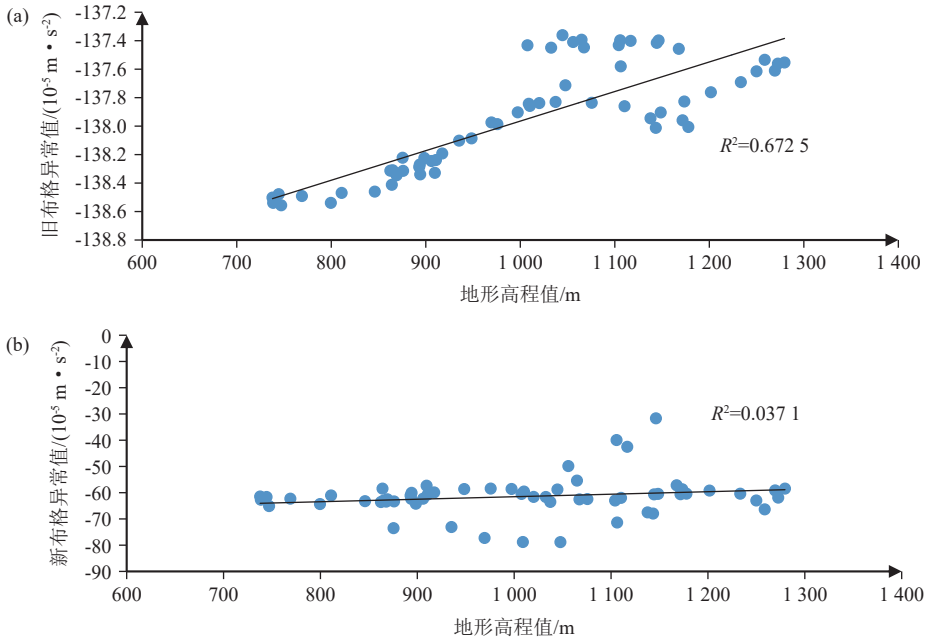
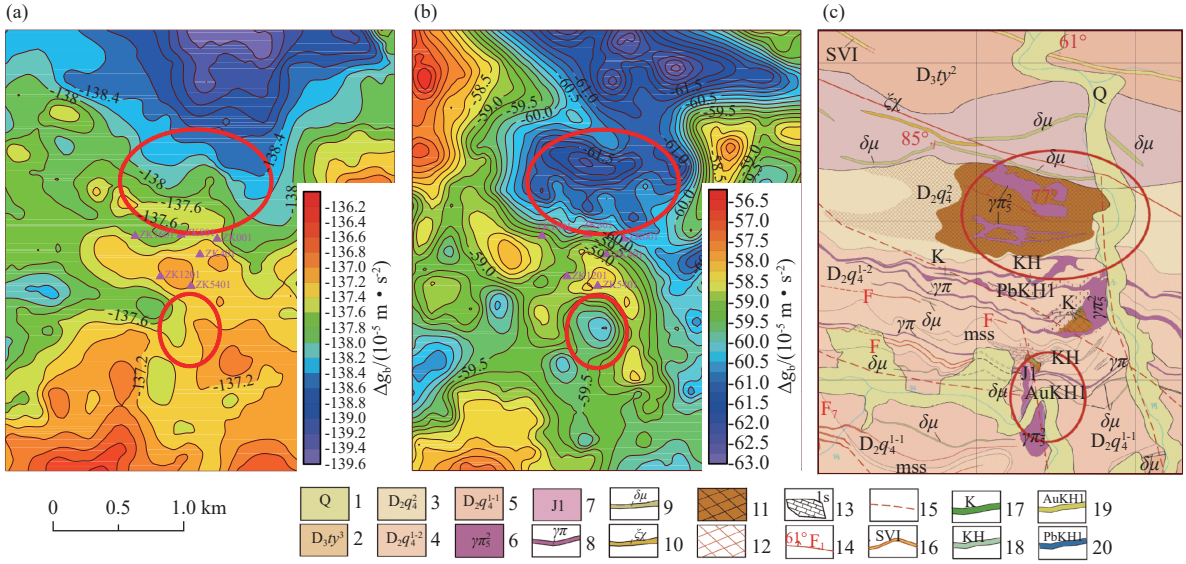


图 23　传统方法(a)及新方法(b)改正后的布格异常与地形的相关性曲线对比 (*R* 为相关系数)

Fig. 23　Comparison of correlation curves between Bouguer anomalies corrected by traditional(a) and new methods(b) and topography(*R* is correlation coefficient)



1—第四系; 2—上泥盆统峒峪寺组第三岩性段; 3—中泥盆统青石垭组第四岩性段上段; 4—中泥盆统青石垭组第四岩性段下段第二岩性层; 5—中泥盆统青石垭组第四岩性段下段第一岩性层; 6—花岗斑岩; 7—隐爆角砾岩; 8—花岗斑岩脉; 9—闪长玢岩脉; 10—云斜煌岩脉; 11—矽卡岩; 12—矽卡岩化; 13—灰岩条带; 14—实测断层、产状及编号; 15—推测断层; 16—构造蚀变带及编号; 17—铜矿体位置及编号; 18—铜矿化体位置及编号; 19—金矿化体位置及编号; 20—铅矿化体位置及编号

1—Quaternary; 2—third lithofacies member of Dongyu Temple Formation (Upper Devonian); 3—upper part of the fourth lithofacies member of Qingshiya Formation (Middle Devonian); 4—second lithofacies layer of the lower part of the fourth lithofacies member of Qingshiya Formation (Middle Devonian); 5—first lithofacies layer of the lower part of the fourth lithofacies member of Qingshiya Formation (Middle Devonian); 6—granodiorite porphyry; 7—phreatic tuff; 8—granodiorite porphyry vein; 9—diorite porphyry vein; 10—cloud quartz diorite vein; 11—skarn; 12—skarnization; 13—limestone band; 14—measured faults, attitudes, and numbering; 15—inferred faults; 16—structural alteration zones and numbering; 17—copper orebody locations and numbering; 18—copper mineralized body locations and numbering; 19—gold mineralized body locations and numbering; 20—lead mineralized body locations and numbering

图 24　旧布格重力异常(a)、新布格重力异常(b)与成矿岩体(c)对应性示意

Fig. 24　Schematic showing the correspondence between the old Bouguer gravity anomaly(a), the new Bouguer gravity anomaly(b), and the ore-forming rock mass(c)

4 结论

传统的重力数据各项改正方法因其使用常/固定密度值、基准面为大地水准面、纬度改正和高度改正都用相应的二阶近似公式,且使用的高程基准面一致等原因,导致所得的布格异常存在虚假异常,对改算后的重力异常及其解释产生影响。将各项改正的基准面抬升至地改区最低高程,采用 Li-Gotze96 公式进行正常重力改正、变密度广义地形改正及布格重力异常计算的新公式,以及配套编制的普适型各项改正计算软件,由此建立了大比例尺重力数据精细化改正方法,可大幅削弱布格重力异常中虚假异常,明显减小其与地形的相关性,凸显目标体的异常特征,增强异常信息的细节,提高物探成果解释的准确性和可靠性。

参考文献(References):

[1] 王公念. 重力数据的变密度校正 [J]. 物探与化探, 1980(3): 23−26.
Wang G N. Variable density correction of gravity data[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1980(3): 23−26.

[2] 邵济卫, 唐大林. 重力测量变密度校正方法的应用效果 [J]. 物探与化探, 1983(2): 112−119.
Shao J W, Tang D L. Application effect of variable density correction method for gravity survey[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1983(2): 112−119.

[3] Сорокин A B, 柯汉生. 重力勘查校正方法的改进 [J]. 国外地质勘查技术, 1987(1).
Sorokin A B, Ke H S. Improvement of correction methods for gravity exploration [J]. Foreign Geophysical Exploration Technology, 1987(1).

[4] 王惠民, 郭春喜. 重力异常归算中的变密度改正及其对平均异常的影响 [J]. 测绘学报, 1996(4): 53−58.
Wang H M, Guo C X. Variable density correction in gravity anomaly reduction and its influence on mean anomaly[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1996(4): 53−58.

[5] 高庆余, 李虎占, 邱宁. 重力勘查中一种新的地改方法 [C]//中国地球物理学会第十四届年会论文集, 1998.
Gao Q Y, Li H Z, Qiu N. A new terrain correction method for gravity exploration [C]// Proceedings of the 14th Annual Meeting of the Chinese Geophysical Society, 1998.

[6] 刘云祥. 复杂地表地区重力变密度校正技术 [C]//CPS/SEG2004 国际地球物理会议论文集, 2004: 486−488.
Liu Y X. Variable density correction technology for gravity survey in complex surface areas [C]// Proceedings of CPS/SEG 2004 International Geophysical Conference, 2004: 486−488.

[7] 严良俊, 万鹏, 姚长利. 布格重力异常求取中的变密度校正方法与应用 [J]. 工程地球物理学报, 2005, 2(3): 177−180.
Yan L J, Wan P, Yao C L. Method and application of variable density correction in calculating Bouguer gravity anomaly[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2005, 2(3): 177−180.

[8] 胡明科. 重力勘查中地形改正方法的研究及应用 [D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
Hu M K. Research and application of terrain correction methods in Gravity Exploration [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.

[9] 于传海, 赵俊峰, 施小斌, 等. 南海重力异常的沉积层密度改正及其对区域构造特征分析的意义 [J]. 地球物理学报, 2017, 60(8): 3151−3166.
Yu C H, Zhao J F, Shi X B, et al. Sedimentary density correction of gravity anomalies in the South China Sea and its significance for regional tectonic feature analysis[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(8): 3151−3166.

[10] DZ/T 0171—2017 大比例尺重力勘查规范 [S]. 北京: 中华人民共和国国土资源部, 2017.
DZ/T 0171—2017 .Specification for large-scale gravity exploration [S]. Beijing: Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China, 2017.

[11] 骆迪, 刘展, 李曼, 等. 重力校正中存在的若干问题 [J]. 地球物理学进展, 2013, 28(1): 111−120.
Luo D, Liu Z, Li M, et al. Several problems existing in gravity correction[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(1): 111−120.

[12] 骆迪, 刘展, 王心众, 等. 基于 WGS84 正常重力公式的重力外部校正方法 [J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2012, 36(6): 40−46.
Luo D, Liu Z, Wang X Z, et al. External gravity correction method based on WGS84 normal gravity formula[J]. Journal of China University of Petroleum:Edition of Natural Science, 2012, 36(6): 40−46.

[13] 陈晓慧, 张建中. 关于地球正常重力改正方法的探讨 [J]. 大地测量与地球动力学, 2014, 34(6): 32−36.
Chen X H, Zhang J Z. Discussion on normal gravity correction methods of the Earth[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2014, 34(6): 32−36.

[14] DZ/T 0082—2021 区域重力调查规范 [S]. 北京: 中华人民共和国自然资源部, 2021.
DZ/T 0082—2021 Specification for regional gravity survey [S]. Beijing: Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, 2021.

[15] 长春地质学院物探系重力组, 西藏地质局物探大队. 山区重力测量高度改正系数的问题 [J]. 长春地质学院学报, 1975(1): 85−93.
Gravity Group of Geophysical Exploration Department, Changchun College of Geology; Geophysical Exploration Brigade of Tibet Geological Bureau. Problem of height correction coefficient for gravity survey in mountainous areas[J]. Journal of Changchun College of Geology, 1975(1): 85−93.

[16] 张菲菲, 王万银, 李倩, 等. DEM 网格间距及校正半径对重力地形校正的影响 [J]. 物探与化探, 2023, 47(3): 597−607.
Zhang F F, Wang W Y, Li Q, et al. Influence of DEM grid spacing and correction radius on gravity terrain correction[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(3): 597−607.

［17］ DZ/T 0368—2021 岩矿石标本物性测量技术规程 [S]. 北京: 中华人民共和国国土资源部, 2021.
DZ/T 0368—2021 Technical specification for physical property measurement of rock and ore samples [S]. Beijing: Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China, 2021.

［18］ Okabe M. Analytical expressions for gravity anomalies due to homogeneous polyhedral bodies and translations into magnetic anomalies[J]. Geophysics, 1979, 44(4): 730−741.

［19］ 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 Y, Yao C L. Theoretical study on non-singular analytical expressions of magnetic field and its gradient of rectangular prisms[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007,42(6): 714−719.

［20］ Li X, Gotze H. Ellipsoid, geoid, gravity, geodesy, and geophysics [J]. Geophysics, 2001, 66(6): 1660−1668.

［21］ 张焕侠, 王庆国, 任乖雅, 等. 大比例尺精细化重力勘查方法技术研究成果报告 [R]. 西安: 陕西地矿物化探队有限公司, 2025.
Zhang H X, Wang Q G, Ren G Y, et al. Research report on large-scale refined gravity exploration methods and technologies [R]. Xi'an: Shaanxi Institute of Geophysical and Geochemical Exploration Co. , Ltd. , 2025.

Fine-scale correction methods for large-scale gravity survey data

ZHANG Huan-Xia [1], LIU Jian-Li [1], LI Bai-Shun [1], FENG Zhi-Han [2], WANG Qing-Guo [1], QU Ting [1], REN Guai-Ya [1]
(1. *Shaanxi Geology and Mining Geophysical and Geochemical Prospecting Team Co., Ltd., Xi'an* 710043, *China*; 2. *Xi'an Center, China Geological Survey, Xi'an* 710000, *China*)

Abstract: Performing various corrections to the measured gravity values relative to a datum plane serves as a necessary step in obtaining the values of Bouguer gravity anomalies. Currently, the various corrections of large-scale gravity survey data primarily follow the requirements and methods of regional gravity surveys. The obtained Bouguer gravity anomalies often contain false anomalies, failing to accurately interpret the relevant properties and details of targets. Moreover, there exists neither systematic research on the variable-density terrain correction for large-scale gravity survey data nor publicly available variable-density correction calculation software. Therefore, this study proposed a set of fine-scale correction methods for large-scale gravity survey data. Specifically, the traditional datum plane for various corrections was elevated. Based on the rating of density property data, the variable-density generalized terrain correction method was employed to integrally calculate the values of traditional terrain and intermediate layer corrections. The Li-Gotze96 equation was applied to integrally calculate the values of traditional latitude and height corrections, as well as the height correction value based on the custom datum plane. A new equation for calculating the value of Bouguer gravity anomalies was derived. Moreover, the universal gravity survey correction calculation software was developed accordingly. The verification based on simulated and measured data shows that these methods can significantly reduce false anomalies within the Bouguer gravity anomalies and their association with terrains, thereby highlighting the anomaly characteristics of the targets and revealing richer anomaly details.

Key words: variable-density generalized terrain correction; various corrections; refinement; large-scale gravity survey

（本文编辑: 王萌）