

文章编号: 1001-1749(2022)06-0722-20

陆域重力勘探进展

杨亚斌^{1,2,3}, 荆磊^{1,2}, 徐梦龙^{1,2}, 韩革命^{1,2}, 邱隆君^{1,2}, 吴新刚^{1,2},
郜晓亮^{1,2}, 郝国江^{1,2}, 孙诚业^{1,2}, 张光之^{1,2}, 苏振宁^{1,2}

(1. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 廊坊 065000

2. 国家现代地质勘查工程技术研究中心, 廊坊 065000

3. 海洋油气勘探国家工程研究中心, 北京 100028)

摘要: 重力勘探是地球物理勘探中发展最早、最成熟的手段之一, 对于地球基本属性、基础地质问题, 矿产勘查、能源勘查、工程勘探及水资源勘查、灾害评价等方面的研究均具有重要意义。近年来, 随着技术手段的不断革新、目标任务需求的不断发展, 重力勘探方法技术也得到不断提升, 获得更广泛地应用及丰硕的成果, 在地球系统科学研究中发挥不可替代的作用。因此这里围绕区域重力勘探中仪器设备、方法技术及应用现状及成果, 简要地进行了系统的回顾与总结; 并对今后重力勘探的发展趋势进行了分析与展望, 旨于为重力勘探学科发展建设提供依据, 更好地服务于新时代地质勘探需求与目标。

关键词: 勘探; 进展; 重力勘探; 重力数据库; 标准

中图分类号: P 631.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2022.06.04

0 引言

地球重力场是地球系统物质属性产生的一个最基本的物理场, 其静态和动态(时变)特征反映了地球内部和表层物质的分布变化和运动状态, 重力场观测数据为地球内部结构和地球动力学等研究提供基础观测信息^[1-4], 它是重力勘探的理论基础^[5]。重力勘探是测量与围岩有密度差异的地质体在其周围引起的重力异常, 以确定这些地质体存在的空间位置大小和形状从而对工作地区的地质构造做出判断的一种地球物理勘探方法。

自从十九世纪三十年代重力被用于地质勘探以

来, 重力勘探经过几十年的发展, 已经取得巨大成就。我国1936年首次利用重力扭秤探测铅锌矿, 之后的很长一段时间, 重力勘探的主要应用领域是油气和固体矿产勘查^[6-10]。1967年物化探所完成我国第一个物探应用程序“矿区规则网重力测量地形改正”的手编程序^[11]。1979年区域重力调查列入中国地质工作计划, 开始系统开展区域重力调查工作, 不断完善调查方法与提高我国陆域重力调查工作程度^[12-13]。近些年, 随着重力勘探仪器、观测方法、测量方式、数据处理技术及解释方法的发展, 重力勘探更是迈向了一个新的阶段。笔者以重力勘探仪器设备、观测方法、数据处理与解释技术为出发点, 对重力勘探技术在国内地学的应用研究现状进行总结和

收稿日期: 2022-11-01

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(42104092)、基础地质调查项目(DD20221638)、中央财政科研项目结余资金项目(JY202101)

第一作者: 杨亚斌(1965—), 男, 本科, 教授级高级工程师, 长期从事重磁勘探方法研究与应用工作, E-mail: yyabin@mail.cgs.gov.cn。

通信作者: 徐梦龙(1989—), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向: 重磁数据处理与解释, E-mail: xmenglong@mail.cgs.gov.cn。

展望。

1 重力仪现状

陆域重力仪包括有相对重力仪和绝对重力仪。

1.1 相对重力仪

最早的重力测量仪器以摆仪和扭秤为主,1890年出现了最早的测量重力变化率的扭秤,哈特利(Hartley)^[13]、格拉夫(A. Graf)^[13]以垂直弹簧秤为基础研制出了杠杆弹簧扭秤系统,由此诞生了德国阿斯卡利亚(Askania)GS型重力仪。在1939年制造出第一台可以工作的拉科斯特(LaCoste)金属弹簧重力仪,1947年美国的沃登(Sam. P. Worden)^[13]研制成功了自动石英弹簧重力仪,此后其他制造商以同样的原理生产了类似的石英弹簧重力仪,如加拿大 Scintrex 公司的 CG 型和苏联的 GAK 型重力仪。目前,Scintrex 公司的 CG-6 型全自动石英弹簧重力仪测量精度优于 $0.005 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,成为世界主流的相对重力仪^[5,13-14]。

在国内,地面相对重力仪主要是由中国地质装备集团公司北京奥地探测仪器公司研发和生产的 ZSM 系列重力仪,采用机械调零式石英弹簧传感器。1975年,北京地质仪器厂生产的 ZSM-3 型重力仪投入批量生产。目前最新的重力仪已经实现 $0.001 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 读数分辨率,重复性达到 $0.005 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,残余长期漂移 $< 0.1 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,部分指标已经接近 CG-5 型重力仪水平。1994年物化探所研制了浅海重力测量系统,填补了我国在此方面的空白^[11]。

1.2 绝对重力仪

1946年伏莱(C. Colet)^[23]提出应用自由落体原理测定绝对重力值,并在1952年实现了 $\pm 10.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 精度绝对重力仪。1980年代后,法拉(J. E. Faller)^[24]在之前基础上制成了 JILA 型轻便绝对重力仪,此后不断改进,于1993年研制出新一代商业化可移动式 FG5 型绝对重力仪,精度可达 $\pm 0.001 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2 \sim 0.002 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,目前该产品已升级到 FG5-X。

中国计量科学研究院从1960年代开始,先后研制了 NIM 型系列绝对重力测量仪器^[15-17];清华大学研制了 T-2 等号型绝对重力仪^[18]等。此外,中国地震局研制了新型激光干涉绝对重力仪,上述仪器精度可达 $0.005 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2 \sim 0.010 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 左右^[19-20]。2002年开始,浙江工业大学、浙江大

学、华中科技大学等单位研发基于激光干涉法的自由落体原理,原子绝对重力仪。近年来,绝对重力仪在小型化、仪器的测量精度和测量灵敏度等性能得以较快提升^[21-22]。

2 方法技术现状

2.1 测地工作

重力勘探的前身是研究地球形状的重力测量学,它与测量学紧密相连,测绘技术的发展也促进着重力勘探技术进步。

2.1.1 坐标系统与高程系统

重力勘探工作必须用到坐标和高程资料,而大地坐标系统和高程系统是一个国家最基本、最重要的两个大地测量基准。我国重力勘探初期,采用了1954年北京坐标系^[25]和1956年黄海高程系统^[29],1990年又启用了1980西安坐标系^[25]和1985国家高程基准^[29]。从2008年7月起,中国启用了新一代国家大地坐标系—2000国家大地坐标系^[25](China Geodetic Coordinate System 2000, CGCS 2000)。

重力勘探工作所采用的坐标系统与高程系统也在不断更新,最新的行业标准《区域重力调查规范》(DZ/T 0082-2021)^[27]也提出了新的区域重力调查技术要求:统一采用2000国家重力基本网系统;统一采用2000国家大地坐标系和大地高程基准;统一采用CGCS2000椭球面正常重力公式计算正常重力值。

2.1.2 点位测量技术

重力勘探工作中测地工作的主要任务是布设测网,确定测点和各级重力基点的平面位置和高程。其工作方法,已由地形图定点,水准、气压测高和航片定点测高等传统方法技术发展为全球导航卫星系统(GNSS)进行三维坐标测量。

通常区域重力调查测点平面位置和高程使用GNSS接收机测定,采用包括快速静态测量、实时动态测量(RTK)以及其他满足精度要求的测量方法^[27-28]。控制点的联测方法为载波相对定位测量(静态定位),测量控制点应由已知GNSS控制点引出,布网方式根据需要可采用三角网、单三角形、附和导线网等,测网至少应该包含2个已知GNSS控制点。

2.2 重力测量工作

2.2.1 重力基准网现状

全球重力基准是将全球相对重力测量纳入统一

系统的基础。其发展经历了三个主要的系统:维也纳重力系统、波茨坦重力系统和国际重力标准网 1971^[3]。

1956 年在前苏联国家重力测量队的协助下,我国建立了第一个国家重力基准网,由 21 个基本重力点和 82 个一等重力点组成,基本点精度优于 $\pm 0.32 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,一等点精度优于 $\pm 0.40 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,称为 1957 国家重力基准^[26]。1985 年我国完全自主地重新建立了国家重力基准,由 6 个基准重力点、46 个基本重力点和 5 个引点组成,精度为 $\pm 0.015 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,称为 1985 国家重力基本网^[26]。2000 年左右我国又完成了全国分布的 295 个重力基本点的高精度测量和数据处理,建立精度为 $\pm 0.0074 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 的 2000 国家重力基本网^[26]。2017 年~2019 年建立了新一代重力基准网(尚未正式发布)。

2.2.2 重力测量

野外重力数据测量为基点—测点—基点的单程闭合方法。基点网采用双程往返(精度较高仪器)或三程小循环法(精度较低仪器)^[27]。

2.2.3 地形改正

在重力勘探数据精度评价中,地形起伏的影响是个不可忽略的问题^[30]。

1) 近区地形改正(0 m~50 m)。近区地形改正值的获取,已从目估法发展到仪器测量法。用于近区地形改正的仪器主要有森林罗盘仪^[31]、激光测距仪^[32-35]和高精度 GNSS^[31,34]。目前,已有学者进行无人机激光扫描获取地形数据,利用棱柱公式进行近区地形改正试验,另外,还有一些学者利用大比例尺高精度 DEM 数据进行近区地形改正试验。

2) 中区地形改正(50 m~2 000 m)。中区地形改正技术发展很快,以 DEM 高程数据为基础,利用共用点法、表面积分法和三棱锥体元剖分法计算地形改正值^[36]。此外,对湖泊水体的改正也有研究试验^[33]。

3) 远区地形改正(2 000 m~166 700 m)。远一区(2 000 m~20 000 m)地形改正采用平面公式计算地形改正值,使用 1 km×1 km 高程节点网按狭义地形改正(相对测点)和有限中间层(指 20 km 以内)模式计算;远二区(20 km~166.7 km)地形改正因包含中间层改正又称为广义地形改正,采用 5'×5' 平均高程用计算机完成^[38-39]。

远区地形改正计算涉及大量的高程数据,方法技术进展缓慢,影响重力勘探数据总精度进一步提高,急需高程数据的更新和方法研究。

2.3 数据预处理

2.3.1 正常场改正公式

在重力勘探的工作中以往用过的正常场改正公式有 1901~1909 赫尔墨特公式、1930 卡西尼公式、(IAG)推荐的 1980 公式。随着 2000 国家大地坐标系(CGCS2000)的启用,重力正常场改正公式也须更新^[40-41]。最新的行业标准《区域重力调查规范》(DZ/T 0082-2021)也提出了新的采用 2000 椭球面正常重力公式计算正常重力值^[27]。

2.3.2 布格改正

高度改正、中间层改正计算公式所用的高程由 1985 高程基准改进为 CGCS2000 椭球大地高,减去了正高和大地高之间物质产生的重力值,使重力勘探工作使用的布格异常更加清晰、准确地反映了地质目标意义^[42-44]。

2.4 数据处理

野外获取的重力数据经过零点漂移校正、固体潮校正、纬度校正(正常场改正)、布格校正(高度改正和中间层改正)和地形校正等预处理,得到反映地下密度异常体分布的布格重力异常^[5,27,45]。

由于布格重力异常是地下所有的密度不均匀体引起的叠加异常,重力数据处理的目的是从叠加异常中分离或突出目标体引起的重力异常,使其产生的信息更易于识别和辨认。重力数据处理和反演是后期地质解释的关键^[46-48]。

2.4.1 异常分离

为了获得勘探目标地质体引起的异常,通常需要对重力异常进行异常分离。能否正确提取出目标异常,决定着反演结果是否可靠。正是由于异常分离的重要性,多年来很多地球物理学者都致力于寻找更优的异常分离方法^[5,48,49]。

国内、外的地球物理工作者^[50-83]提出了多种区域和剩余异常分离方法,主要包括图形法、趋势分析法、滤波法(向上延拓法、匹配滤波、小波变换)、统计法、剥皮法等方法。

图形法是最早使用的方法,缺点是主观性比较大,常用于剖面数据处理,对于大量的平面数据难以实现。

Agocs^[50]提出了基于最小二乘拟合的趋势分析方法,之后大量关于多项式拟合的方法及其改进方法被提出,这些方法包括采用正交多项式拟合,有变阶滑动趋势分析法、筛选—趋势分析法^[53-55]。趋势分析法的结果好坏直接取决于所选取数学模型与实际区域异常的逼近程度。

滤波是一种很宽泛的概念,Dean^[51]提出了重磁处理中的线性滤波理论,认为二阶导数、解析延拓、圆滑等可以被认为是滤波。随着计算机的广泛应用,快速傅立叶变换被引入到地球物理数据处理中,学者们设计了各种理想滤波器,推导了基于傅里叶变换和采样理论的新的卷积滤波系数,波数域滤波方法逐渐成为主流^[56-60]。常用的滤波主要有:

1)垂向二阶导数法常被用来提取埋藏浅的局部异常。Evjen^[52]利用垂向一阶导数与垂向二阶导数处理并解释了重力资料。之后,众多学者提出了关于垂向二阶导数在空间域的近似计算公式^[61-63]。目前,导数的计算在波数域中被广泛的研究与应用。

2)解析延拓法是将获得的测区重力异常,利用相关的数学算法变换到更高或更低的观测面,以实现区域异常与局部异常的分离。最初由 Peters^[59-64]提出,他认为延拓可以对不同波长的信号进行增强或衰减。之后,众多学者对方法进行完善与发展^[65-70]。

3)匹配滤波,位场信号的各频段成分不相关时,拟合对数功率谱并计算直线斜率和截距,确定匹配滤波因子,实现深源场和浅源场的分离。1970年 Spector^[71]等首先根据磁异常的功率谱设计了匹配滤波器来分离不同深度场源产生的异常。之后,学者们不断完善、推进该方法^[72-78]。

4)利用小波多尺度分析方法,将重力异常分解到不同尺度空间中,尺度大小表示了异常所反映的地质体规模和埋深的大小。汤井田^[79]将小波变换引入重磁数据处理。Fedi^[80]利用小波变换的多尺度分析,用不同分量的组合来代表区域场和局部场。随着技术推进,利用小波变换把重力异常进行多重分解,在一定程度上将频谱互相重叠的异常提取出来,获得地壳三维密度结构的更多细节^[82-83]。

剥皮法是由 Hammer^[83]提出的,即在浅层的构造已经很清楚的前提下,通过正演获得其异常,再从观测异常中减去这一部分异常,从而获得深层的信息。有大量的地质资料或钻孔、地震资料的控制,效果很好^[84-86]。

2.4.2 边界识别

边界识别技术主要是对异常体的水平位置进行定位。在研究地质目标体的横向不均匀性特别是地质目标体边缘位置时,重、磁位场有其独特的优势。位场源边界识别方法包括:梯度运算类、数理统计类、其它类等,以前两者发展及应用最为广泛^[79]。

梯度运算类是通过对比场进行梯度计算(或组

合),放大高频成份增强边界信息的识别,该类方法发展快速、应用广泛^[88]。Evjen^[89]提出利用垂向导数识别地质体边界信息;Cordell^[90]认为梯度模的极大值对目标体的边界有较好的指示效应;王万银等^[91]利用 n 阶垂向导数峰值及其比值对边界信息的有效提取;之后,其他学者进一步提高了该类方法的边界识别效果^[92-94]。Nabighina^[95-96]认为针对二维位场数据的解析信号与磁化方向无关;Nabighina 与 Roest^[96-97]提出三维解析信号能提供有效的场源边界信息,Miller 和 Singh 等^[98]将解析信号相位的概念引入了边缘识别,提出倾斜角(Tilt Angle)法;随后,学者们对倾斜角法展开研究^[99-104];Wijns 等^[105]首次利用解析信号振幅对总水平导数进行归一化,提出了 θ 图法;周文纳等^[106]于几何意义上对倾斜角法与 Theta map 法实现了统一;陈安国等^[107]基于 Theta 图法进行了改进,实现了深部和浅部边界的均衡。

数理统计运算方法,压制噪声干扰并且结果相对稳定。杨高印等^[108]提出小子域滤波方法进行异常的分离。之后,其他学者进行了该方法的改进^[109-111];Cooper 等^[112]首次提出了归一化标准差;张恒磊等^[113]提出各向异性标准化方差法;王彦国等^[114]提出归一化差分法,在边界定位及识别能力方面体现出优势性;徐梦龙等^[115]提出各方向均方差相关系数法;Du 等^[116]提出基于滑动窗口的垂向导数平均值与其标准差的相关系数法。

其他类方法包括多尺度信号分析、结果图像的检测、加强等,也在不断发展。朱保健^[117]利用小波模板极大值进行位场的边界信息加强;杨文采、孙艳云、付丽华等^[118-120]利用谱矩的位场几何特征对弧形特征的有效刻画;夏玲燕等^[121]将非线性滤波技术与斜导数及其水平导数进行有效结合,实现弱信息加强及线性构造的提取;赵希刚等^[122]利用图像细化技术对断裂带信息的窄化处理;肖锋等^[123]利用 Canny 边界检测算子对斜导数法结果图中的边界信息提取;陈涛^[124]提出 Harris 滤波器技术,在提取边界的同时抑制噪声;张双喜等^[125]结合二维经验模态分解与小波模板极大值,对位场数据多尺度分解及各尺度异常边界检测;张志厚等^[126]提出了基于深度学习的位场边界识别方法。

2.4.3 重力三维反演技术

重力反演计算就是将异常数据转化为描述地球内部场源密度变化及分布的数据。针对不同的地质信息,重磁反演主要分为形态反演和物性反演。形

态反演是在已知场源物性参数的基础上,利用多面体来拟合地下地质体的几何形态分布,从而刻画地下地质体的界面。吴文鹏^[127]在研究三角形多面体模型重、磁异常三维正演和反演技术的基础上,吸取人机交互正演模拟的优点,实现了三角形多面体模型重、磁异常数据三维人机联作反演。物性反演解释技术是对地下空间地质体的物性参数进行定量计算。物性反演由于具有反演条件宽松、容易操作且能够模拟复杂地质体的优点,成为近年来位场反演的主要发展方向^[48,128-130]。

三维反演方法可以分为非线性化反演和线性化反演两类,其中线性反演的迭代优化方法有最小二乘法、牛顿法、正则化方法、最速下降法和共轭梯度法等。牛顿法收敛速度快但有 Hessian 矩阵及其逆矩阵的大规模计算问题。最速下降法计算量少但收敛速度慢,而共轭梯度法既解决了收敛速度慢的问题又避免了大型矩阵向量的计算和储存问题,是一种求解大型最小化问题的反演算法^[131-136]。这些线性迭代优化算法收敛速度快,但容易陷入局部极小值、计算耗时等困境。随着数学优化方法的发展,多种全局随机优化的非线性反演算法被引入到地球物理反演中,并得到成功应用^[48,128,137-138]。非线性化反演方法包括遗传算法、神经网络算法、模拟退火算法、最小二乘方法等。1983年 Silva 等^[139]将遗传算法应用于磁法反演中;Montesinos 等^[140]采用遗传算法进行重力三维反演;姚长利等^[128-129,159]改进方法,提高了非线性反演计算速度;Eslam 等^[141]采用神经网络算法进行重力实测数据反演,且准确获得了异常的分布位置,该算法计算具有并行性,但收敛效率低,易存在局部极小化问题;马国庆^[142]利用模拟退火法完成重磁异常物性反演,该方法有效地避免了大型矩阵的计算,可以克服局部极小化问题,但搜索效率变低;Tarantola 等^[143]利用阻尼最小二乘法求解非线性反演问题,从而得到稳定的解,但其计算速度慢。最小二乘方法既可以应用于非线性反演问题的计算,还可以应用于线性反演问题计算中。

同其他地球物理反演方法一样,由于复杂的地质情况,三维重力场数据信息不足和场源的等效性问题会致使重力反演研究存在两个重要难题,即解的不稳定性和多解性,解决此问题成为重磁反演研究的重点和难点。为解决此问题,很多学者开展了约束反演研究^[83,144-146]。当约束条件采用不同的加权因子以及不同的计算策略时会得到不同意义上的解,主要的约束方式有:①深度约束,用于抵消核函

数随深度自然衰减,消除其近地表权重过大而使反演密度分布不符合真实异常源的情况,进而提高深度分辨率^[131-132,147-148];②聚焦约束,可以清晰地刻画异常体的边界特征^[149-152],方便后期的处理解释;③物性边界约束,为了获得更合理的反演物性分布,在物性反演过程中需要加入地质体物性上下限约束条件,强制将反演密度值限制在一定的范围内^[145,150];④结构约束,可用于不同地球物理属性之间的联合约束,有交叉梯度约束^[153-155]和总梯度约束(summative gradients)^[156-158]等;⑤地质统计约束,可以将区域地质特征规律信息和地质学家对地质情况的认识加入到模型中。

面对大范围、大数据量的重力数据,反演效率低的问题非常突出。为此国内外学者从不同角度进行了研究,主要包括:①降维度处理方法,通过减少维度从而减少存储空间和计算量,有随机子域反演、小波压缩、基于多项式的反演^[159-161];②利用对称性的处理方法,几何格架法利用重力场正演核矩阵的平移不变的性质减少计算量^[128]。在此基础上荆磊利用快速傅里叶变换(FFT)进一步实现了具有空间域计算精度和频率域计算速度的快速算法^[162]。

3 重力数据库与图件编制

3.1 重力数据库

1981年物化探所研发了“区域重力资料整理处理成图自动化”软件系统^[11]。原地矿部物化探局组织研发我国第一代制基于 M-160 型计算机的重力数据库,数据库由高程子库、重力数据子库和程序子库组成。高程子库存放全国及全球的高程数据。可以对高程数据检索、拼接、更新和进行从一公里到全球的地改及均衡改正的计算。重力子库存放重力测点的平面坐标、高程、测点原始重力值和近中区地改值等五个基本数据,存放基点的座标和重力值、观测时间及施测单位的编号。可以通过程序控制对重力数据进行检索、更新及增补。程序子库包括库管理程序、资料整理程序和数据处理程序三类^[163]。1997年由原地矿部区域重力调查方法技术中心升级迁移到 PC 计算机上,形成 windows 系统下可视化管理数据库^[38]。2006年中国地质调查局发展研究中心再次升级为 RGIS2006 版。具备对全国范围从野外到室内的重力数据整理的数据库预处理、时间域及频率域数据处理、数据库可视化管理、GIS 制图、通用 GIS 数据转换等的功能,适合于重力调查

及重磁综合解释工作^[39,164]。

3.2 重力图件的编制

地球物理图件对于区域地质构造研究和资源调查战略部署等都发挥了重要作用,具有重要价值^[165-167]。随着重力工作的持续推进,重力工作者在不同阶段编制出不同比例尺的全国和区域性重力图件。

1978年物化探所对所编 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 布格重力异常图解释认为,大兴安岭—太行山—武陵山的北北东向梯级带及青藏高原周缘梯级带反映了地壳厚度变化,有可能是深部断裂存在的一种标志。一些学者对1:4 000 000布格重力异常图进行系统解释,将全国重力场划分为22个异常区和18个异常带,为现代中国大地构造划分提供了地球物理依据^[168-170]。左愚等编制1:12000 000重力系列图^[171]。1999年孙文珂等利用最新实测重力数据编制1:5 000 000中国及毗邻海区重力系列图,并进行了说明。将布格重力异常图分为5个区,分布对应滨西太平洋构造域的内带及其外带、特提斯—喜马拉雅构造域、古亚洲构造域和三大构造复合地带,每个区的异常幅值反映了地壳厚度及密度的变化^[167]。李志等利用最新完成的重力资料编制了青藏高原及邻区重力系列图,并进行了大地构造分区、推断断裂、圈定岩体、盆地形态等研究^[172]。张明华等利用不同来源且基准未知的重力数据资料,采用背景一致性原则并进行局部调平、拼接,编制了1:5 000 000比例尺的中国海陆及邻域布格重力异常图,并依据重力场特征、断裂带及造山带的相互关系,将重力场划分为38个一级异常区和部分二级异常区^[173]。

4 重力勘探标准与规范

重力规范一般提出重力调查任务、基本技术要求、技术设计、重力仪调节及性能测试、野外工作、资料整理、精度评价、基础图件编绘、数据处理与解释、成果报告编写与资料提交等方面的技术要求。所有规范都是经过一段时间的工作实践后,制订出技术规范,最后升级为规范,并随着相关技术进步而不断修订完善。如1978年代有计划地开展了区域重力调查工作后,首先制订了《区域重力调查技术规范》^[174]。1993年升级为行标《区域重力调查规范》(DZ/T 0082-93)^[175],2021升级为新版《区域重力调查规范》(DZ/T 0082-2021)^[23]。

在加拿大拉布拉多,利用重力数据约束反演来预测和

重力勘探规范由两大行业规范构成,包括地质矿产行业规范和石油天然气行业规范。

地质矿产行业重力规范由自然资源部发布,按工作比例尺分为三种,现阶段执行的分别标准是《大比例尺重力勘查规范》(DZ/T 0171-2017)^[176]、《重力调查技术规范(1:50 000)》(DZ/T 0004-2015)^[177]、《区域重力调查规范》(DZ/T 0082-2021)^[23]。

石油天然气行业规范由国家能源局发布,现阶段执行的是《陆上重力勘查技术规程》(SY/T 5819-2010)版^[178]。

5 重力勘探技术在地质工作中应用

重力勘探方法具有轻便、快捷和经济的特点,能快速获取大面积高精度重力数据,在地质工作领域有着广泛的应用。

5.1 在能源勘探方面应用

重力资料在确定沉积盆地边界、划分构造单元、确定基底起伏和盖层构造、进行油气远景评价等方面发挥了重要作用。在大庆、胜利、大港、任丘、长庆、二连等油气田的发现中,重力勘探都做出了贡献^[9]。随着联合反演、三维建模技术的不断发展,重力勘探在能源资源勘探领域继续发挥重要作用。1999年在华北地区综合应用重力与地震勘探发现了信安镇北潜山,获得了高产油气流。2000年应用重力、地震联合反演解释,在武清凹陷斜坡码头潜山发现了工业气流。之后相继发现了信安镇潜山、码头潜山等一系列潜山,勘探取得了重大进展^[179-183]。

5.2 在矿产勘查方面应用

重力勘探在探测矿产资源时,利用来自矿化作用、蚀变带和特定主岩或构造的位场响应,可以查找与成矿有关的地层、构造、岩浆岩、蚀变岩和矿化带等控矿因素,研究金属矿床赋存的岩体或构造以推断矿体的位置^[184-189]。在直接找矿方面,重力勘探发现了加拿大魁北克西部以黄铁矿和闪锌矿为主的大型矿床^[190]。国内,在冀东铁矿利用重力资料对隐伏铁矿或含铁建造进行了系统的解释和推断,推断9条与隐伏铁矿床或含铁建造有关的重力异常带,部分已被钻探工程所证实^[191]。在间接找矿方面,重力勘探方法运用更为广泛。在美国加利福尼亚州矿区,利用地面重力和航磁数据,构建了2.5维重力模型,圈定潜在的拆离断层和矿化岩体分布^[192]。描绘的大型镍、铜、钴矿床的地下特征和展布,为矿体

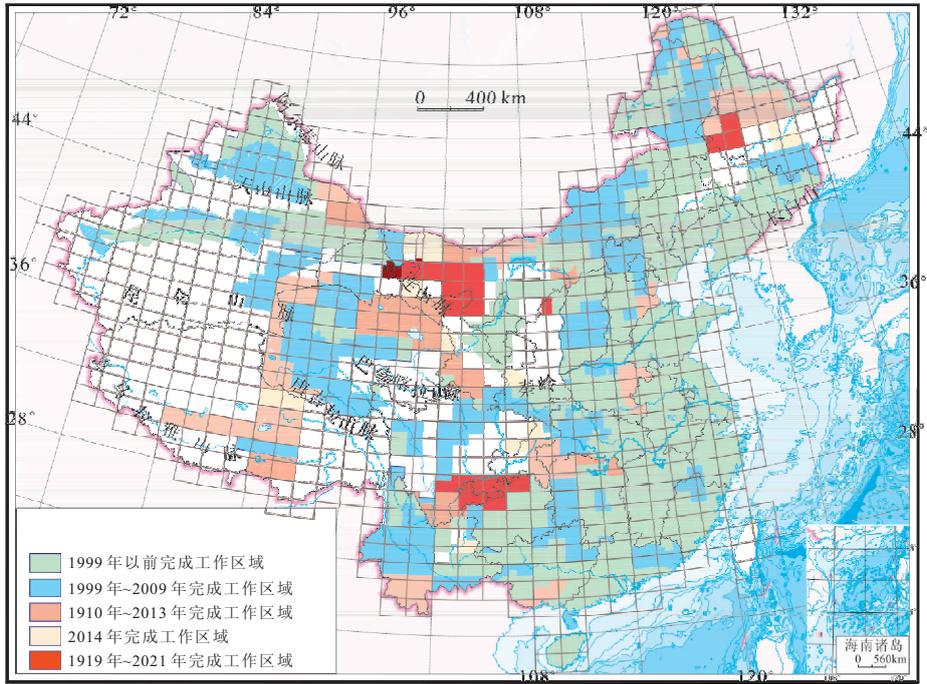


图1 全国1:250 000区域重力调查工作程度图

Fig.1 1:250 000 regional gravity survey progress map of China

的开采提供了非常有用的地下信息^[193]。重力勘探是我国20世纪60年代~70年代的铬铁矿和富铁矿的普查中的主要方法。1990年代,高精度重力测量发现了新疆小热泉子铜矿I号矿床重力异常,并确定了孔位,钻孔的验证取得了当年找矿的重要突破^[194]。在德兴铜矿勘探中,利用重力资料研究与侵入岩体成矿相关矿种中提取与导矿相关的导矿岩体与构造^[195]。在黑龙江省下嘎来奥伊河矿勘查中,分析与矽卡岩型金属矿有关的重、磁异常,总结找矿模型并圈定靶区,钻探验证情况良好^[196]。刘天佑等^[197]在西藏朗县秀沟工区完成了高精度重磁勘探,推断出铬铁矿与矿化体的重磁远景异常,并且已经得到证。潘彤等^[198]根据柴达木盆地南缘和北缘不同物性分布及成矿地质条件,优选重磁、电法、地震等有效的方法进行探测,总结分析其找矿模型,取得了一定的找矿效果。

5.3 在地质调查方面应用

5.3.1 工作程度

1950年代,由于石油勘探的需要我国大规模开展重力工作。经过70多年的工作,截至2021年底,全国完成1:1 000 000区域重力调查 $833 \times 10^4 \text{ km}^2$,基本实现我国陆域1:1 000 000区域重力调查的覆盖;1:250 000区域重力调查完成 $587.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,1:250 000区域重力调查完成全国陆域国土可调查面积的69.5%,另有 $115 \times 10^4 \text{ km}^2$ 属高山、荒漠属

1:250 000地面重力调查不可工作区,见图1。

5.3.2 地质调查成果

1)区域地质成果。孙文珂^[199]在区域重力调查列入中国地质工作计划的40年后,编写了《中国区域重力调查40年回顾》。他提出①西拉木伦河深大断裂是板块结合带的祖先线,板块的多次聚散、开合,导致极为复杂的地质构造现象出现;②认为秦岭—桐柏—大别山同属一个构造带;③长江中下游构造岩浆岩带是由5个构造岩浆带构成的以铜铁为主的成矿带;④扬子陆块与华夏褶皱带之间的钦州—钱塘结合带;⑤对西南三江褶皱带及相邻深部构造与成矿关系新认识。《全国矿产资源潜力评价》项目利用全国重力资料,结合地质构造与航磁异常特征分析,综合推断了我我国地质构造的纵横格局,研究对一些基础地质问题取得新认识。例如:大兴安岭—太行—武陵巨型重力梯度带是太平洋板块俯冲的前缘响应;二连浩特—贺根山断裂混杂岩带是晚古生代大陆边缘增生的构造边界^[200]。杨亚斌等^[201]对2010年~2014年度全国区域重力调查成果进行了梳理,编写了《重点成矿带1:250 000区域重力调查成果文集》。对大兴安岭梯级带、郯庐断裂、古特提斯缝合带位置提出新认识;探讨均衡重力异常与地震关系;分析岩浆岩与矿产关系等。

2)地球动力学成果。随着地球科学研究的不断

深入,重力资料研究深部构造及地球动力学的水平也在不断提高。王谦^[202]身利用重力资料研究汶川地震。根据均衡重力异常图看出,龙门山、邛崃山及其邻近地区存在十分明显的大面积很均衡的区域,认为这可能是该处地壳不稳定运动的重要根源之一。杨文采^[203]利用重力资料分析和反演,刻划青藏高原地壳分层的三维密度结构,取得的6个等效层密度扰动图件,为研究地壳构造和物质运动提供了重要佐证。

5.4 在其他方面的应用

重力在城市地质调查、地热调查、工程勘查等方面也发挥了很重要的作用,取得了不少成果,如秦始皇陵的探测^[204]。

6 展望

由于重力仪性能的提高,测量技术的发展、数据精度和处理方法、技术及解释水平的提高,重力勘探在地质工作中发挥着越来越重要作用,不仅在传统的成矿预测、圈定岩体和构造等方面提供强有力的支撑,也将不断拓宽服务领域。目前和未来的发展趋势包括以下几个方面:

1)随着便携式原子绝对重力仪进入实用阶段,实测重力数据精度将进一步提高;地形高程进一步加密、数据精度进一步提高,地形改正精度也将提高一个量级,从而提高布格异常总精度。

2)测量参数由单一的加速度标量测量,向多方向矢量测量发展,矢量数据获取、处理、解释将得到发展、完善。

3)随着场分离、弱信号提取、联合反演技术发展,将不断提高三维反演的准确度与精确度,进一步提升地质解释水平。

4)重力勘探测量方式将由传统的静态测量,向静态测量与动态监测并重发展。

5)服务领域不断拓展,将由传统的地质勘查领域扩展到地质灾害监测、深部地下水监测等领域。

参考文献:

[1] 胡明城. 现代大地测量学的理论及其应用[M]. 北京:测绘出版社,2003.
HU M C. Theories of modern geodesy and their applications[M]. Beijing: Survey and Mapping Press,2003. (In Chinese)

[2] 许厚泽,陆洋,钟敏,等. 卫星重力测量及其在地球物理环境变化监测中的应用[J]. 中国科学:地球科学,2012,

42(6):843—853.

XU Z H, LU Y, ZHONG M, et al. Satellite gravity measurements and their application to the monitoring of geophysical environmental change[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2012, 42(6): 843—853. (In Chinese)

- [3] 宁津生,王正涛. 地球重力场研究现状与进展[J]. 测绘地理信息, 2013, 38(1): 1—7.
NING J S, WANG Z T. Progress and present status of research on earth's gravitational field[J]. Journal of Geomatics, 2013, 38(1): 1—7. (In Chinese)
- [4] 孙和平,孙文科,申文斌,等. 地球重力场及其地学应用研究进展——2020中国地球科学联合学术年会专题综述[J]. 地球科学进展, 2021, 36(5): 445—460.
SUN H P, SUN W K, SHEN W B, et al. Research progress of earth's gravity field and its application in geosciences—A summary of Annual Meeting of Chinese Geoscience Union in 2020[J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(5):445—460. (In Chinese)
- [5] 曾华霖. 重力场与重力勘探[M]. 北京:地质出版社, 2005.
ZENG H L. Gravity fields and gravity exploration[M]. Beijing: Geological Press, 2005. (In Chinese)
- [6] 许庆刚,高明远. 用重力勘探直接寻找油气藏的可能性[J]. 地球物理学报, 1961, (1):75—78.
XU Q G, GAO M Y. Possibility of direct search for hydrocarbon reservoirs using gravity exploration[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1961, (1):75—78. (In Chinese)
- [7] 周国藩. 油气勘查中重力方法技术的新进展[J]. 物探与化探, 1992, 16(1):14—21.
ZHOU G F. Some new advances in methods and techniques of gravity exploration for oil—gas survey [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1992, 16(1): 14—21. (In Chinese)
- [8] 许厚泽,王谦身,陈益惠. 中国重力测量与研究的进展[J]. 地球物理学报, 1994, 37(S1): 339—352.
XU H Z, WANG Q S, CHEN Y H. The progress of the gravity survey and research in China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1994, 37(S1): 339—352. (In Chinese)
- [9] 王懋基,蔡鑫,涂承林. 中国重力勘探的发展与展望[J]. 地球物理学报, 1997, 40(S1): 292—298.
WAN M J, CAI X, TU C L. Development and prospect of gravity prospecting in China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1997, 40(S1): 292—298. (In Chinese)
- [10] 张赤军,边少锋. 关于油气勘探开发中的高程及其确定方法[J]. 物探与化探, 2005, 29(4): 342—346.
ZHANG C J, BIAN S F. The altitude in oil and gas exploration and development and the method for its determi-

- nation [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2005, 29(4): 342—346. (In Chinese)
- [11] 王春书. 与时俱进, 再铸辉煌[M]. 北京: 地质出版社, 2008.
WANG C S. Keeping up with the times, forging brilliance again[M]. Beijing: Geological Press, 2008. (In Chinese)
- [12] 孙文珂. 区域重力调查的进展[J]. *物探与化探*, 2007, 31(5): 381—385.
SUN W K. Advances and prospects of regional gravity survey [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2007, 31(5): 381—385. (In Chinese)
- [13] Chapin D. Gravity instruments: Past present, future[J]. *The Leading Edg*, 1998, 17 (1): 100—112.
- [14] 周鹏, 李辉. 陆地重力测量仪器技术发展史[J]. *中国科技信息*, 2015(10): 114—115.
ZHOU P, LI H. History of the technical development of terrestrial gravimetric instruments[J]. *China Science and Technology Information*, 2015(10): 114—115. (In Chinese)
- [15] 高景龙. NIM-3 型新的轻小高精度可移动式绝对重力仪[J]. *测绘学报*, 1993(3): 223—229.
GAO J L. New NIM-3 light, small, high-precision removable absolute gravimeter[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1993(3): 223—229. (In Chinese)
- [16] 刘达伦, 吴书清, 徐进义, 等. 绝对重力仪研究的最新进展[J]. *地球物理学进展*, 2004, 19(4): 739—742.
LIU D L, WU S Q, XU J Y, et al. The new evolution of absolute gravimeter[J]. *Progress in Geophysics*, 2004, 19 (4): 739—742. (In Chinese)
- [17] 吴书清, 李春剑, 徐进义, 等. CCM. G-K2 国际比对和 NIM-3A 型绝对重力仪[J]. *计量学报*, 2017, 38(1): 127—128.
WU S Q, LI C J, XU J Y, et al. The comparison of absolute gravimeters CCM. G-K2 and NIM-3A absolute gravimeter[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2017, 38(1): 127—128. (In Chinese)
- [18] 胡华, 李哲, 李刚, 等. T-1A 型高精度绝对重力仪[J]. *导航与控制*, 2015, 14(2): 17—22+9.
HU H, LI Z, LI G, et al. The T-1A high precision absolute gravimeter[J]. *Navigation and Control*, 2015, 14 (2): 17—22+9. (In Chinese)
- [19] 滕云田, 吴琼, 郭有光, 等. 基于激光干涉的新型高精度绝对重力仪[J]. *地球物理学进展*, 2013, 28(4): 2141—2147.
TENG Y T, WU Q, GUO Y, et al. New type of high-precision absolute gravimeter base on laser interference[J]. *Progress in Geophysics*, 2013, 28(4): 2141—2147. (In Chinese)
- [20] 吕庆田, 张晓培, 汤井田, 等. 金属矿地球物理勘探技术与设备: 回顾与进展[J]. *地球物理学报*, 2019, 62 (10): 3629—3664.
LV Q T, ZHANG X P, TANG J T, et al. Review on advancement in technology and equipment of geophysical exploration for metallic deposits in China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, 62(10): 3629—3664. (In Chinese)
- [21] 谭立龙, 张彦涛, 王鹏, 等. 原子干涉重力仪测量原理与发展现状[J]. *地球物理学进展*, 2020, 35(4): 1310—1316.
TAN L L, ZHANG Y T, WANG P, et al. Measurement principle and development status of atomic interference gravimeter[J]. *Progress in Geophysics*, 2020, 35(4): 1310—1316. (In Chinese)
- [22] 朱栋, 高世腾, 朱欣欣, 等. 量子重力仪在地球科学中的应用进展[J]. *地球科学进展*, 2021, 36(5): 480—489.
ZHU D, GAO S T, ZHU X X, et al. Progress of quantum gravimeter applied in the fields of Earth science[J]. *Advances in Earth Science*, 2021, 36(5): 480—489. (In Chinese)
- [23] J. E. FALLER. Ballistic methods of measuring g — the direct free-fall and symmetrical rise-and-fall methods compared[J]. *Metrologia*, 1988(25): 49—55.
- [24] MARSON, J. E. FALLER, G—the acceleration of gravity: its measurement and its importance[J]. *Phys. E: Sci. Instrum*, 1986(19): 22—32.
- [25] 程鹏飞, 成英燕, 文汉江, 等. 2000 国家大地坐标系实用宝典[S]. 北京: 测绘出版社, 2008: 19—38.
CHENG P F, CHENG Y Y, WEN H J, et al. Practical Manual on CGCS 2000[S]. Beijing: Surveying Mapping Publishing House, 2008: 19—38. (In Chinese)
- [26] 陈俊勇, 等. 2000 国家大地控制网的构建和它的技术进步[J]. *测绘学报*, 2007, 36(1): 1—8.
CHEN J Y, et al. Establishment of 2000 national geodetic control network of China and its technological progress [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2007, 36 (1): 1—8. (In Chinese)
- [27] 杨亚斌, 韩革命, 徐梦龙, 等. DZ/T 0082—2021. 区域重力调查规范[S]. 北京: 地质出版社, 2021: 22—24.
YANG Y B, HAN G M, XU M L, et al. DZ/T 0082—2021. Regional gravity survey specifications[S]. Beijing: Geological Press, 2021: 22—24. (In Chinese)
- [28] 杨亚斌, 韩革命, 梁萌. 2000 国家大地坐标系在区域重力调查中应用探讨[J]. *物探化探计算技术*, 2011, 33 (3): 346—349+230.

- YANG Y B, HAN G M, LIANG M. The discussion on CGCS2000 applying to the region gravity survey[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 33(3): 346-349+230. (In Chinese)
- [29] 冯伟. 我国高程基准的发展历史[J]. 地理空间信息, 2016, 14(1):3.
- FENG W. History of the development of our elevation datum[J]. Geospatial Information, 2016, 14(1): 3. (In Chinese)
- [30] 刘根友. 微重力测量地形改正的精度及其实现[J]. 物探化探计算技术, 1993(1): 60-63+59.
- LIU G Y. Accuracy of topographic correction in micro-gravity survey and its realization [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 1993(1): 60-63+59. (In Chinese)
- [31] 赵更新, 张国利, 苏永军, 等. 重力勘探中近区地形改正数据测量方法的试验[J]. 物探与化探, 2012, 36(6): 952-955.
- ZHAO G X, ZHANG G L, SU Y J, et al. An experimental study of the data measurement method for near-region terrain correction in gravity exploration[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 36(6): 952-955. (In Chinese)
- [32] 黄元有, 吕许朋, 付彦平. 重力测量中地形改正新法[J]. 云南地质, 2012, 31(1): 77-79.
- HUANG Y Y, LV X P, FU Y P. A new method of landform correction in gravity survey [J]. Yunnan Geology, 2012, 31(1): 77-79. (In Chinese)
- [33] 吕根息. 激光测距仪在广西苍梧社垌地区 1:5 万重力调查中的应用[J]. 中华民居(下旬刊), 2013(5): 264-265.
- LV G X. Application of laser rangefinders in the 1:50,000 gravity survey in the Cangwu Shexiang area, Guangxi[J]. China Homes, 2013(5): 264-265. (In Chinese)
- [34] 张国利, 赵更新, 匡海阳, 等. 近几年地面重力调查工作方法技术的一些进展[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(1): 386-390.
- ZHANG G L, ZHAO G X, KUANG H Y, et al. Some progress in the working methods of the ground gravity survey techniques in recent years[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(1): 386-390. (In Chinese)
- [35] 刘宽厚, 耿涛, 杨怀英, 等. 基于便携激光测距仪的重力测量近区地形改正系统[J]. 物探与化探, 2012, 36(3): 403-408.
- LIU K H, GENG T, YANG H Y, et al. The gravimetry near-station terrain correction instrument system based on laser distance-measurement technology[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 36(3): 403-408. (In Chinese)
- [36] 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 Z H. 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. (In Chinese)
- [37] 韩革命, 杨亚斌, 梁萌. 水域地形改正方法研究[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(4): 1693-1700.
- HAN G M, YANG Y B, LIANG M. Study on topographic correction of water area[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(4): 1693-1700. (In Chinese)
- [38] 刘定和, 于国明. 省级区域重力数据库结构与数据检索[C]. 1997 年中国地球物理学会第十三届学术年会论文集, 1997: 412.
- LIU D H, YU G M. Provincial regional gravity database structure and data retrieval [C]. Proceedings of the Thirteenth Annual Academic Conference of the Chinese Geophysical Society 1997, 1997: 412. (In Chinese)
- [39] 张明华. 重磁电数据处理解释软件 RGIS[M]. 北京: 地质出版社, 2011.
- ZHANG M H. Heavy magnetoelectric data processing and interpretation software RGIS [M]. Beijing: Geological Press, 2011. (In Chinese)
- [40] 魏子卿. 正常重力公式[J]. 测绘学报, 2003(2): 95-101.
- WEI Z Q. Normal gravity equation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2003(2): 95-101. (In Chinese)
- [41] 杨亚斌, 韩革命. 区域重力调查中正常重力公式对比[J]. 物探与化探, 2012, 36(1): 45-47+53.
- YANG Y B, HANG G M. A Comparison study of normal gravity formulae in regional gravitational survey [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 36(1): 45-47, 53. (In Chinese)
- [42] 励宝恒. 关于重力勘查的高度改正应采用何种高程系统的讨论[J]. 物探与化探, 1996, 20(1): 35-39.
- Li B H. A discussion on the selection of elevation system in altitude correction of gravity survey [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1996, 20(1): 35-39. (In Chinese)
- [43] 阎汉杰. 重力勘探的瓶颈在于重力校正发展滞后—地球正常场场源分离的理论研究及其初步应用[C]. 2008 年重磁数据处理解释应用研讨会论文集, 2008: 130-133.
- YAN H J. The bottleneck of gravity exploration lies in the lagging development of gravity correction — Theoretical

- study of field source separation of earth normal fields and its preliminary application[C]. Proceedings of the 2008 Workshop on Applications of Heavy Magnetic Data Processing and Interpretation, 2008: 130—133. (In Chinese)
- [44] 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 issues in gravity correction[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(1): 111—120. (In Chinese)
- [45] 侯遵泽, 杨文采. 中国重力异常的小波变换与多尺度分析[J]. 地球物理学报, 1997, (1): 85—95.
HOU Z Z, YANG W C. Wavelet transform and multi-scale analysis on gravity anomalies of China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1997, 40(1): 85—95. (In Chinese)
- [46] 焦新华, 吴燕冈. 重力与磁法勘探[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
JIAO X H, WU Y G. Gravity and magnetic Exploration [M]. Beijing: Geology Press, 2009. (In Chinese)
- [47] 侯遵泽, 杨文采, 王允, 等. 重力场实数尺度小波分解及其应用[J]. 地球物理学报, 2015, 58(3): 1035—1041.
HOU Z Z, YANG W C, WANG Y, et al. The production and application of irrational scale wavelet details for gravity field[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(3): 1035—1041. (In Chinese)
- [48] 柳建新, 孙欢乐, 陈波, 等. 重磁方法在国内外金属矿中的研究进展[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(2): 713—722.
LIU J X, SUN H L, CHEN B, et al. Review of the gravity and magnetic methods in the exploration of metal deposits[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(2): 713—722. (In Chinese)
- [49] 肖锋. 重力数据处理方法的研究及其在钾盐矿勘探中的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
XIAO F. Study on gravity data processing method and apply it to sylvite mine exploration[D]. Changchun: Jilin University, 2009. (In Chinese)
- [50] AGOCS W B. Least-squares residue anomaly determination[J]. Geophysics, 1951, 16(4): 686—696.
- [51] Dean, W. C., Frequency analysis for gravity and magnetic interpretation[J]. Geophysics, 1958, (25): 569—585.
- [52] H. M. EVJEN. The place of the vertical gradient in gravitational interpretations[J]. Geophysics, 1936, 1(1): P127—136.
- [53] OLDHAM C H G, SUTHERLAND D B. Syber Orthogonal polynomials: their use in estimating the regional effect [J]. Geophysics, 1955, 20(2): 295—306.
- [54] 李九亮. 划分重力区域异常与局部异常的变阶滑动趋势分析法[J]. 物探化探计算技术, 1998(1): 54—62.
LI J L. Variable order sliding trend analysis method used in the division of regional and local gravity anomalies[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 1998(1): 54—62. (In Chinese)
- [55] 羊春华. 筛选—趋势分析法分离区域异常与局部异常[J]. 物探与化探, 2005, 29(2): 167—170.
YANG C H. The application of the sieving—trend analysis method to separating region anomaly from local anomaly [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2005, 29(2): 167—170. (In Chinese)
- [56] BYERLY P E. Convolution filtering of gravity and magnetic maps [J]. Geophysics, 2012, 30(2): 281.
- [57] KU C C, TELFORD W M, LTM S H. The use of linear filtering in gravity problems[J]. Geophysics, 1971, 36(6): 1174—1203.
- [58] 侯重初. 补偿圆滑滤波方法[J]. 石油物探, 1981, 20(2): 22—29.
HOU Z C. Filtering of smooth compensation[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 1981, 20(2): 22—29. (In Chinese)
- [59] 程方道. 波数域重磁数据处理中的随机误差分析[J]. 石油物探, 1985, 24(1): 70—76.
CHENG F D. Stochastic error analysis for the gravitational and the magnetic data processing in wave-number domain[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 1985, 24(1): 70—76. (In Chinese)
- [60] 刘祥重. 区域重力波数域解释及找油效果[J]. 石油地球物理勘探, 1988, 23(1): 110—118+130.
LIU X Z. Wavenumber—domain interpretation of areal gravimetric data and its effect in oil exploration[J]. OGP, 1988, 23(1): 110—118. (In Chinese)
- [61] DARBY E K, DAVIES E B. The analysis and design of two-dimensional filters for two-dimensional data[J]. Geophysical Prospecting, 1967, 15(3): 383—406.
- [62] COWAN D R, COWAN S. Separation filtering applied to aeromagnetic data[J]. Exploration Geophysics, 1993, 24(4): 429—436.
- [63] 雷林源. 二维 Wiener 滤波器及在物探中应用的一些问题[J]. 地球物理学报, 1982, 25(2): 153—162.
LEI L Y. Two-dimensional wiener filter and some problems of application in geophysical prospecting[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1982, 25(2): 153—162. (In Chinese)
- [64] PETERS L J. The direct approach to magnetic interpreta-

- tion and its practical application[J]. *Geophysics*, 1949, 14(3): 290—320.
- [65] KONTIS A. Aeromagnetic field test of total intensity upward continuation[J]. *Geophysics*, 1971, 36(2): 418—425.
- [66] HANSEN R O, MIYAZKI Y. Continuation of potential fields between arbitrary surface[J]. *Geophysics*, 1984, 49(6): 787—795.
- [67] 曾华霖. 重磁资料数据处理某些方法效果的讨论[J]. *物探与化探*, 1982(5): 257—264.
ZENG H L. A discussion of the effects of certain methods of data processing for remagnetised data[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 1982(5): 257—264. (In Chinese)
- [68] 徐世浙. 迭代法与 FFT 法位场向下延拓效果的比较[J]. *地球物理学报*, 2007, 50(1): 285—289.
XU S Z. A comparison of effects between the iteration method and FFT for downward continuation of potential fields[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, 50(1): 285—289. (In Chinese)
- [69] 黄谟涛, 刘敏, 邓凯亮, 等. 基于向上延拓的航空重力向下解析延拓解[J]. *地球物理学报*, 2018, 61(12): 4746—4757.
HUANG M T, LIU M, DENG K L, et al. Analytical solution of downward continuation for airborne gravimetry based on upward continuation method. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(12): 4746—4757. (In Chinese)
- [70] 骆遥, 吴美平. 位场向下延拓的最小曲率方法[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(1): 240—251.
LUO Y, WU M P. Minimum curvature method for downward continuation of potential field data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(1): 240—251. (In Chinese)
- [71] A. Spector, F. S. Grant: Statistical models for interpreting aeromagnetic data [J]. *Geophysics*, 1970, 35(2): 293—302.
- [72] SYBERG F J R. A Fourier method for the regional—residual problem of potential fields[J]. *Geophysical Prospecting*, 1972, 20(1): 47—75. (In Chinese)
- [73] 梁锦文. 分离重磁区域场与局部场的维纳滤波器[J]. *地球物理学报*, 1983, 26(1): 80—88.
LIANG J W. Wiener filter separating regional—residual component of gravity of magnetic fields[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1983, 26(1): 80—88. (In Chinese)
- [74] PAWLOWSKI R S, HANSEN R O. Gravity anomaly separation by Wiener filtering[J]. *Geophysics*, 1990, 55(5): 539—548.
- [75] 董焕成, 李宗杰. 重力异常匹配滤波法的原理和应用[J]. *物探与化探*, 1993, 17(5): 331—340.
DONG H C, LI Z J. The principle and application of the match filtering method for gravitational anomalies[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 1993, 17(5): 331—340. (In Chinese)
- [76] 刘青松, 王宝仁. 应用多次匹配滤波技术进行垂向位场分离[J]. *物探化探计算技术*, 1996(4): 2—9.
LIU Q S, WANG B R. Vertical separation of potential field by using multiple matched—filter[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 1996(4): 2—9. (In Chinese)
- [77] 贺日政, 高锐, 郑洪伟, 等. 青藏高原中西部航磁异常的匹配滤波分析与构造意义[J]. *地球物理学报*, 2007, 50(4): 1131—1140.
HE R Z, GAO R, ZHENG H W, et al. Matched—filter analysis of aeromagnetic anomaly in mid—western Tibetan Plateau and its tectonic implications[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, 50(4): 1131—1131. (In Chinese)
- [78] 曾小牛, 刘代志, 李夕海, 等. 位场向下延拓的改进迭代维纳滤波法[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(6): 1958—1967.
ZENG X N, LIU D Z, LI X H, et al. An improved iterative Wiener filter for downward continuation of potential fields[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(6): 1958—1967. (In Chinese)
- [79] 汤井田, 宋守根, 何继善. 多分辨分析和重磁异常的识别与分层次提取[J]. *中国有色金属学报*, 1994(3): 6—15.
TANG J T, SONG S G, HE J S. Multi—resolution analysis and identification and hierarchical extraction of heavy magnetic anomalies [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 1994(3): 6—15. (In Chinese)
- [80] FEDI M, QUARA T. Wavelet analysis for the regional—residual and local separation of potential field anomalies [J]. *Geophysical Prospecting*, 1998, 46(5): 507—525.
- [81] 杨文采, 施志群, 侯遵泽, 等. 离散小波变换与重力异常多重分解[J]. *地球物理学报*, 2001, 44(4): 534—541+582.
YANG W C, SHI Z Q, HOU Z Z, et al. Discrete wavelet transform for multiple decomposition of gravity anomalies [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2001, 44(4): 534—541. (In Chinese)
- [82] 陈社教. 基于小波变换的重力异常分离及应用[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
CHEN S J. The Differentiation and Application of Gravity Anomalies Based on Wavelet transform[D]. Changchun: Jilin University, 2007. (In Chinese)
- [83] Sigmund Hammer. Deep gravity interpretation by strip-

- ping[J]. *Geophysics*, 1963, 28(3): 369—374.
- [84] 尹延鸿, 张训华, 温珍河, 等. 中国东部海区及邻域区域构造图的编制方法及地质构造单元划分[J]. *海洋学报(中文版)*, 2008, 30(6): 99—105.
YIN Y H, ZHANG X H, WEN Z H, et al. The mapping methods and division of tectonic units of the regional tectonic map in the Huanghai Sea and the East China Sea and adjacent regions[J]. *Haiyang Xuebao*, 2008, 30(6): 99—105. (In Chinese)
- [85] 李成立, 崔瑞华, 刘益中. 盆地基底岩性的综合地球物理预测方法——以松辽盆地滨北地区基底岩性预测为例[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(2): 491—498.
LI C L, CUI R H, LIU Y Z. Comprehensive geophysical prediction method of basement lithology — Example of Binbei area, Songliao basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(2): 491—498. (In Chinese)
- [86] 郭涛, 胡加山, 尹克敏, 等. 基于三维地震剥层的重力界面反演方法及应用[J]. *物探与化探*, 2019, 43(5): 1090—1096.
GUO T, HU J S, YIN K M, et al. Gravity interface inversion method based on three-dimensional seismic peeling and its application[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2019, 43(5): 1090—1096. (In Chinese)
- [87] 王万银, 邱之云, 杨永, 等. 位场边缘识别方法研究进展[J]. *地球物理学进展*, 2010, 25(1): 196—210.
WANG W Y, QIU Z Y, YANG Yong, et al. Some advances in the edge recognition of the potential field[J]. *Progress in Geophysics*, 2010, 25(1): 196—210. (In Chinese)
- [88] 徐梦龙. 几种位场数据处理方法的研究及应用[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
XU M L. The research and application on several processing methods to the potential-field data[D]. Changchun: Jilin University, 2016. (In Chinese)
- [89] EVJEN H M. The place of the vertical gradient in gravitational interpretations [J]. *Geophysics*, 2002, 1(1): 127—136.
- [90] CORDELL L, GRAUCH V J S. Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan Basin, New Mexico [C]. 1982 SEG Annual Meeting. Society of Exploration Geophysicists, 1982.
- [91] WANG W Y, PAN Y, QIU Z Y. A new edge recognition technology based on the normalized vertical derivative of the total horizontal derivative for potential field data[J]. *Applied Geophysics*, 2009, 6(3): 226—233+299.
- [92] MA G Q, LI L L. Edge detection in potential fields with the normalized total horizontal derivative[J]. *Computers and Geosciences*, 2012, 41: 83—87.
- [93] 侯振隆, 王恩德, 唐水亮, 等. 方向总水平导数法的改进和边界识别中的应用[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(1): 104—108.
HOU Z L, WANG E D, TANG Y L, et al. Improvements of the Directional Total Horizontal Derivatives and Their Application in Edge Detection[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2019, 40(1): 104—108. (In Chinese)
- [94] MELUAH O, THANH P L. An improved ILTHG method for edge enhancement of geological structures: application to gravity data from the Oued Righ valley[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2021(177): 104—162.
- [95] NABIGHIAN M N. Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section [J]. *Geophysics*, 1974, 39(1): 85—92.
- [96] NABIGHIAN M N. Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms: Fundamental relations [J]. *Geophysics*, 1984, 49(6): 780—786.
- [97] ROEST W R, VERHOEF J, Pilkington M. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal [J]. *Geophysics*, 1992, 57(1): 116—125.
- [98] MILLER H G, SINGH V. Potential field tilt — a new concept for location of potential field sources [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 1994(32): 213—217.
- [99] VERDUZCO B, FAIRHEAD J D, GREEN C M, et al. New insights into magnetic derivatives for structural mapping [J]. *The Leading Edge*, 2004, 23(2): 116—119.
- [100] FITZGERALD D J, HOLSTEIN H. Innovative data processing methods for gradient airborne geophysical data sets [J]. *The Leading Edge*, 2006, 25(1): 87—94.
- [101] 骆遥, 王明, 罗锋, 等. 重磁场二维希尔伯特变换——直接解析信号解释方法[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(7): 1912—1920.
LUO Y, WANG M, LUO F, et al. Direct analytic signal interpretation of potential field data using 2-D Hilbert transform[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(7): 1912—1920. (In Chinese)
- [102] 颜廷杰, 吴燕冈, 袁园, 等. 应用加强解析信号倾斜角进行位场数据的边界检测[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(7): 2694—2702.
YAN T J, WU Y G, YUAN Y, et al. Edge detection of potential field data using an enhanced analytic signal tilt angle[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(7): 2694—2702. (In Chinese)
- [103] 刘鹏飞, 刘天佑, 杨宇山, 等. Tilt 梯度算法的改进与应用

- 用:以江苏韦岗铁矿为例[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2015, 40(12): 2091—2102.
- LIU P F, LIU T Y, YANG Y S, et al. An improved Tilt angle method and its application: A case of Weigang iron-ore deposit, Jiangsu[J]. Earth Science, 2015, 40 (12): 2091—2102. (In Chinese)
- [104] 戴伟铭,黄大年,李桐林,等. 基于重力梯度结构张量特征值斜导数边界识别方法及其在南海的应用[J]. 地球物理学报, 2018, 61(6): 2494—2507.
- DAI W M, HUANG D N, LI T L, et al. The edge detection method and its application in the south China sea based on the gravity gradient structure tensor eigenvalue. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(6): 2494—2507. (In Chinese)
- [105] WIJNS C, PEREZ C, KOWALCZYK P. Theta map: edge detection in magnetic data[J]. Geophysics, 2005, 70 (4): 39—43.
- [106] 周文纳,杜晓娟,李吉焱. 改进的角度边界识别方法及其在延吉盆地的应用[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2013, 38(6): 1339—1346.
- ZHOU W N, DU X J, LI J Y. Improved angle edge detection method and its application in Yanji basin[J]. Earth Science, 2013, 38(6): 1339—1346. (In Chinese)
- [107] 陈安国,周涛发,刘东甲,等. 基于 Theta 法改进的均衡滤波器在位场边界识别中的应用——以庐枞矿集区为例[J]. 地球物理学报, 2017, 60(2): 778—792.
- CHEN A G, ZHOU T F, LIU D J, et al. Application of the improved filter based on the Theta method to edge detection of potential field data: an example from the Luzong ore district[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(2): 778—792. (In Chinese)
- [108] 杨高印. 位场数据处理的一项新技术——小子域滤波法[J]. 石油地球物理勘探, 1995(2): 30(2): 240—244+291.
- YANG G Y. A new technique for potential-field data processing: small subdomain filtering[J]. OGP, 1995, 30(2): 240—244. (In Chinese)
- [109] 张凤旭,张凤琴,刘财,等. 断裂构造精细解释技术——三方向小子域滤波[J]. 地球物理学报, 2007, 50(5): 1543—1550.
- ZHANG F X, ZHANG F Q, LIU C, et al. A technique for elaborate explanation of faulted structures: three-directional small subdomain filtering[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50(5): 1543—1550. (In Chinese)
- [110] 肖锋,吴燕冈,孟令顺. 位场数据处理中小子域滤波的改进[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(1): 136—139+164+175.
- XIAO F, WU Y G, Meng L S. An improvement on small subdomain filtering in potential field data processing [J]. OGP, 2010, 45(1): 136—139+164+175. (In Chinese)
- [111] JIANG F, GAO L. Edge enhancement of gravity anomalies and gravity gradient tensors using an improved small sub-domain filtering method[J]. Applied geophysics, 2012, 9(2): 119—130.
- [112] COOPER G R J, COWAN D R. Edge enhancement of potential-field data using normalized statistics[J]. Geophysics, 2008, 73(3): H1—H4.
- [113] 张恒磊,刘天佑,杨宇山. 各向异性标准化方差计算重磁源边界[J]. 地球物理学报, 2011, 54(7): 1921—1927.
- ZHANG H L, LIU T Y, YANG Y S. Calculation of gravity and magnetic source boundary based on anisotropy normalized variance[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(7): 1921—1927. (In Chinese)
- [114] 王彦国,张凤旭,王祝文,等. 位场归一化差分法的边界检测技术[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2013, 43(2): 592—602.
- WANG Y G, ZHANG F X, WANG Z W, et al. Edge detection of potential field using normalized differential [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2013, 43(2): 592—602. (In Chinese)
- [115] XU M L, YANG C B, WU Y G, et al. Edge detection in the potential field using the correlation coefficients of multidirectional standard deviations [J]. Applied Geophysics, 2015, 12(1): 23—34.
- [116] DU W, WU Y G, GUAN Y W, et al. Edge detection in potential field using the correlation coefficients between the average and standard deviation of vertical derivatives [J]. Journal of Applied Geophysics, 2017(143): 231—238.
- [117] 朱保健. 多尺度小波模极大值法在位场边界检测中的应用研究[D]. 长春:吉林大学, 2013.
- ZHU B J. The Study on the application of multi-scale wavelet transforms modulus maxima in boundary detection of potential fields[D]. Changchun: Jilin University, 2013. (In Chinese)
- [118] 杨文采,孙艳云,侯遵泽,等. 用于区域重力场定量解释的多尺度刻痕分析方法[J]. 地球物理学报, 2015, 58(2): 520—531.
- YANG W C, SUN Y Y, HOU Z Z, et al. An multi-scale scratch analysis method for quantitative interpretation of regional gravity fields[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(2): 520—531. (In Chinese)

- [119] 杨文采,孙艳云,侯遵泽,等.用于塔里木地壳构造成像的重力场谱矩方法研究[J].地球物理学报,2017,60(8):3140—3150.
YANG W C, SUN Y Y, HOU Z Z, et al. A study on spectral moments of gravity field with application to crustal structure imaging of Tarim basin[J]. Chinese Journal of Geophysics,2017,60(8):3140—3150. (In Chinese)
- [120] 付丽华,曾诚,杨文采,李燕梅.用于地壳弧形构造信息提取的四阶谱矩分析[J].石油地球物理勘探,2020,55(4):923—930+706.
FU L H, ZENG C, YANG W, et al. Fourth—order spectral moment analysis for extracting the information of crustal arc structures[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2020, 55(4): 923—930. (In Chinese)
- [121] 夏玲燕,吴汉宁,柏冠军,等.柴达木盆地航磁资料微弱信息增强技术研究及在线性构造识别中的应用[J].地球物理学进展,2008,23(4):1058—1062.
XIA L Y, WU H N, BAI G J, et al. Research on enhancing weak signal technology and recognition of linear structures using aerial—magnetic data in the Qaidam Basin[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(4): 1058—1062. (In Chinese)
- [122] 赵希刚,吴汉宁,柏冠军,等.重磁异常解释断裂构造的处理方法及图示技术[J].地球物理学进展,2008,23(2):414—421.
ZHAO X G, WU H N, BAI G J, et al. Magnetic and gravity data processing method and imaging techniques for faulted structure interpretation[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(2): 414—421. (In Chinese)
- [123] 肖锋,吴燕冈,孟令顺.重力异常图中的边界增强和提取技术[J].吉林大学学报(地球科学版),2011,41(4):1197—1203.
XIAO F, WU Y G, MENG L S. Edge enhancement and detection technology in gravity anomaly Map[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(4):1197—1203. (In Chinese)
- [124] 陈涛.重力异常边界识别及正反演精细解释方法研究[D].北京:中国地质大学,2018.
CHEN T. Research on edge detection of gravity anomaly and accurate interpretation method[D]. Beijing:China University of Geosciences,2018. (In Chinese)
- [125] 张双喜,刘金钊,张品,等.联合 BEMD 和 WMM 方法实现位场多尺度边界检测[J].武汉大学学报(信息科学版),2022,47(4):533—542.
ZHANG S X, LIU J Z, ZHANG P, et al. Multi—scale Edge Detection of Potential Field Using the BEMD and WMM Methods[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(4): 533—542. (In Chinese)
- [126] 张志厚,姚禹,石泽玉,等.基于深度学习的位场边界识别方法[J].地球物理学报,2022,65(5):1785—1801.
ZHANG Z H, YAO Y, SHI Z Y, et al. Deep learning for potential field edge detection[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022, 65(5): 1785—1801. (In Chinese)
- [127] 吴文鹏,管志宁,高艳芳,顾观文.重磁异常数据三维人机联作模拟[J].物探化探计算技术,2005(3):227—232+182.
WU W P, GUAN Z N, GAO Y F, et al. Interactive man/computer modeling 3D body of gravity and magnetic anomaly data[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2005(3):227—232+182. (In Chinese)
- [128] 姚长利,郝天珧,管志宁.重磁反演约束条件及三维物性反演技术策略[J].物探与化探,2002,26(4):253—257.
YAO C L, HAO T Y, GUAN Z N. Restrictions in gravity and magnetic inversions and technical strategy of 3D properties inversion[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2002, 26(4): 253—257. (In Chinese)
- [129] 姚长利,郝天珧,管志宁,等.重磁遗传算法三维反演中高速计算及有效存储方法技术[J].地球物理学报,2003,46(2):252—258.
YAO C L, HAO T Y, GUAN Z N. High—speed computation and efficient storage in 3D gravity and magnetic inversion based on genetic algorithms[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46(2): 252—258. (In Chinese)
- [130] 孟小红,刘国峰,陈召曦,等.基于剩余异常相关成像的重磁性反演方法[J].地球物理学报,2012,55(1):304—309.
MENG X H, LIU G F, CHEN Z X, et al. 3—D gravity and magnetic inversion for physical properties based on residual anomaly correlation[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(1): 304—309. (In Chinese)
- [131] LI Y G, OLDENBURG D W. 3—D inversion of magnetic data[J]. Geophysics, 1996, 61(2): 394—408.
- [132] Li Y, OLDENBURG D W. 3—D inversion of gravity data [J]. Geophysics, 1998, 63(1):109—119.
- [133] TIKHONOV A N, ARSENIN V Y. Solutions of ill—posed problems[J]. SIAM Review, 1977, 21(2): 266—267.
- [134] PILKINGTON M. 3—D magnetic imaging using conjugate gradients[J]. Geophysics, 2012, 62(4): 1132—1142.
- [135] 陈召曦,孟小红,郭良辉.重磁数据三维物性反演方法

- 进展[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(2): 503—511.
- CHEN Z X, MENG X H, GUO L H. Review of 3D property inversion of gravity and magnetic data[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(2): 503—511. (In Chinese)
- [136] 吴昊天, 李军, 王堃鹏, 等. 重磁数据的重加权正则化共轭梯度法约束反演[J]. 物探化探计算技术, 2021, 43(2): 232—241.
- WU H T, LI J, WANG K P. Re-weighted regularized conjugate gradient constrained inversion of gravity—magnetic data[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 43(2): 232—241. (In Chinese)
- [137] 郭文斌, 朱自强, 鲁光银. 重力异常的 BP 神经网络三维物性反演[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(2): 409—416.
- GUO W B, ZHU Z Q, LU G Y. 3-D gravity inversion for physical properties using BP network[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(2): 409—416. (In Chinese)
- [138] 秦静欣, 郝天珧, 郭子祺, 等. 改进的自适应模拟退火密度界面反演方法[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(5): 2060—2065.
- QIN J X, HAO T Y, GUO Z Q, et al. The density interface inversion method of improved adaptive simulated annealing[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(5): 2060—2065. (In Chinese)
- [139] SILVA J B C, HOHMANN G W. Nonlinear magnetic inversion using a random search method[J]. Geophysics, 1983, 48(12): 1645—1658.
- [140] MONTESIONS F G, ARMOSO J, VIEIRA R. Using a genetic algorithm for 3—D inversion of gravity data in Fuerteventura (Canary Islands) [J]. International journal of earth sciences: Geologische Rundschau, 2005, 94(2): 301—316.
- [141] ESLAM E, AHMED A, USHIJIMA K. Detection of cavities and tunnels from gravity data using a neural network[J]. Exploration Geophysics, 2001, 32(3/4): 204—208.
- [142] 马国庆. 利用快速模拟退火法实现重磁性反演[C]. 中国石油学会 2012 年物探技术研讨会论文集, 2012: 469—472.
- MA G Q. Heavy magnetic property inversion using a rapid simulated annealing method[C]. Proceedings of the 2012 Physical Exploration Technology Symposium of the Chinese Petroleum Society, 2012: 469—472. (In Chinese)
- [143] TARANTOLA A, VALETTE B. Generalized nonlinear inverse problems solved using the least squares criterion [J]. Reviews of Geophysics, 1982, 20(2): 219—232.
- [144] 徐世浙, 余海龙, 李海侠, 等. 基于位场分离与延拓的视密度反演[J]. 地球物理学报, 2009, 52(6): 1592—1598.
- XU S Z, YU H L, LI H X, et al. The inversion of apparent density based on the separation and continuation of potential field[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(6): 1592—1598. (In Chinese)
- [145] 高秀鹤, 黄大年. 基于共轭梯度算法的重力梯度数据三维聚焦反演研究[J]. 地球物理学报, 2017, 60(4): 1571—1583.
- GAO X H, HUANG D N. Research on 3D focusing inversion of gravity gradient tensor data based on a conjugate gradient algorithm[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(4): 1571—1583. (In Chinese)
- [146] 彭国民, 刘展. 基于 q -高斯分布和零阶最小熵正则化的三维重力聚焦反演[J]. 地球物理学报, 2022, 65(5): 1866—1882.
- PENG G M, LIU Z. 3D focusing inversion of gravity data based on q -Gaussian distribution and zeroth-order minimum entropy regularization[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022, 65(5): 1866—1882. (In Chinese)
- [147] COMMER M. Three-dimensional gravity modelling and focusing inversion using rectangular meshes [J]. Geophysical Prospecting, 2011, 59(5): 966—979.
- [148] 刘银萍, 王祝文, 杜晓娟, 等. 基于 Extrapolation Tikhonov 正则化算法的重力数据三维约束反演[J]. 地球物理学报, 2013, 56(5): 1650—1659.
- LIU Y P, WANG Z W, DU X J, et al. 3D constrained inversion of gravity data based on the Extrapolation Tikhonov regularization algorithm [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(5): 1650—1659. (In Chinese)
- [149] LAST B J, KUBIK K. Compact gravity inversion [J]. Geophysics, 1983, 48(48): 713.
- [150] PORTNIAGUINE O, ZHDANOV M S. Focusing geophysical inversion images [J]. Geophysics, 1999, 64: 874—887.
- [151] ZHDANOV M S. New advances in regularized inversion of gravity and electromagnetic data [J]. Geophysical Prospecting, 2009, 57(4): 463—478.
- [152] 王逸宸, 柳林涛, 许厚泽. 多尺度源网重力与重力梯度联合聚焦反演[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(2): 181—188.
- WANG Y C, LIU L T, XU H Z. Integrated focusing inversion of gravity and gravity gradients with multi-scale source grids [J]. Geomatics and Information Science

- of Wuhan University, 2022, 47(2): 181—188. (In Chinese)
- [153] GALLARDO L A, MEJU M A. Characterization of heterogeneous near—surface materials by joint 2D inversion of dc resistivity and seismic data — art. no. 1658[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(13): 1658.
- [154] FREGOSO E, GALLARDO L A. Cross—gradients joint 3D inversion with applications to gravity and magnetic data[J]. Geophysics, 2009, 74(4): L31—L42.
- [155] GROSS L. Weighted cross—gradient function for joint inversion with the application to regional 3—D gravity and magnetic anomalies[J]. Geophysical Journal International, 2019, 217(3): 2035—2046.
- [156] MOLODTSOV D, COLOMBO D, ROSLOV Y V, et al. Comparison of structural constraints for seismic—MT joint inversion in a subsalt imaging problem[J]. Saint Petersburg State University Bulletin, 2015, 2(60): 230—236.
- [157] COLOMBO D, ROVETTA D. Coupling strategies in multiparameter geophysical joint inversion[J]. Geophysical Journal International, 2018, 215(2): 1171—1184.
- [158] JIE L, ZHANG J Z. Structure—guided gravity inversion for layered density modeling with an application in the Chezhen Depression, Bohai Bay Basin[J]. Geophysics, 2021, 87(1): B45—B56.
- [159] 姚长利, 郑元满, 张聿文. 重磁异常三维物性反演随机子域法方法技术[J]. 地球物理学报, 2007, 50(5): 1576—1583.
- YAO C L, ZHENG Y M, ZHANG Y W. 3—D gravity and magnetic inversion for physical properties using stochastic subspaces[J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 2007, 50(5): 1576—1583. (In Chinese)
- [160] LI Y, OLDENBURG D W. Fast Inversion of large—scale magnetic data using wavelet transforms and logarithmic barrier method[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 2010, 152(2): 251—265.
- [161] LIU J, ZHANG J, JIANG L, et al. Polynomial—based density inversion of gravity anomalies for concealed iron—deposit exploration in North China[J]. Geophysics, 2019, 84(5): B325—B334.
- [162] JING L, YAO C L, YANG Y B, et al. Optimization algorithm for rapid 3D gravity inversion[J]. Applied Geophysics, 2019, 16(5): 507—518+561.
- [163] 刘立言. 重力数据库简介[J]. 物探与化探, 1986, 10(1): 79—80.
- LIU L Y. A brief account of the gravity data bank in China[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1986, 10(1): 79—80. (In Chinese)
- [164] 贺灏. 中国国土资源年鉴[M]. 北京. 中国国土资源年鉴编辑部, 2008.
- HE H. China Land and Resources Yearbook[M]. Beijing: China Land and Resources Yearbook Editorial Board, 2008. (In Chinese)
- [165] 刘光鼎. 中国海区及邻域地质地球物理图集[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- LIU G D. Geological Geophysical Atlas of the China Sea Area and Neighbouring Regions[M]. Beijing: Science Press, 1993. (In Chinese)
- [166] 张洪涛, 张训华, 温珍河, 等. 中国东部海区及邻域 1: 100 万地质地球物理系列图[M]. 北京: 海洋出版社, 2011.
- ZHANG H T, ZHANG X H, WEN Z H, et al. A 1:1 million geological geophysical series of maps of the eastern China sea area and adjacent areas[M]. Beijing: Ocean Press, 2011. (In Chinese)
- [167] 孙文珂. 中国及毗邻海区区域重力系列图件编制与说明[A]. 重点成矿区带的区域构造和成矿构造文集[C]. 北京: 地质出版社, 2001.
- SUN W K. Preparation and description of a series of regional gravity maps of China and adjacent maritime zones [A]. An Anthology of Regional Tectonics and Ore Formation in Key Ore Formation Zones[C]. Beijing: Geological Press, 2001. (In Chinese)
- [168] 周姚秀, 刘文锦. 我国区域重力场及其基本特征[J]. 物探与化探, 1979(1): 14—17.
- ZHOU Y X, LIU W J. The regional gravity field and basic characteristics of China[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1979(1): 14—17. (In Chinese)
- [169] 程家印, 熊寿庆, 尹春霞. 全国重力图的地质—地球物理解释[J]. 地质论评, 1983(2): 181—189.
- CHENG J Y, XIONG S Q, YIN C X. Geological—Geophysical Interpretation of the National Gravity Map[J]. Geological Review, 1983(2): 181—189. (In Chinese)
- [170] 马宗晋, 高祥林, 宋正范. 中国布格重力异常水平梯度图的判读和构造解释[J]. 地球物理学报, 2006, 49(1): 106—114.
- MA Z J, GAO X L, SONG Z F. Analysis and tectonic interpretation to the horizontal—gradient map calculated from Bouguer gravity data in the China mainland[J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 2006, 49(1): 106—144. (In Chinese)
- [171] 左愚, 刘立言, 李跃秋. 布格重力异常图[A]. 中国地球物理图集(袁学诚主编)[C]. 北京: 地质出版社.
- ZUO Y, LIU L Y, LI Q Y. Bouguer Gravity Anomaly

- Map[A]. Geophysical Atlas of China (edited by Yuan Xue Cheng) [C]. Beijing: Geological Press. (In Chinese)
- [172] 李志, 赵炳坤, 杨亚斌. 青藏高原及邻区重力系列图 [A]. 北京: 地质出版社.
LI Z, ZHAO B K, YANG. Gravity series of maps of the Qinghai-Tibet Plateau and adjacent areas[A]. Beijing: Geological Press. (In Chinese)
- [173] 张明华, 乔计花, 雷受旻, 等. 中国海陆及邻域布格重力异常编图研究[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(3): 1085—1091.
ZHANG M H, QIAO J H, LEI S M, et al. Bouguer anomaly compilation study of China and the adjacent regions[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(3): 1085—1091. (In Chinese)
- [174] 区域重力调查技术规定[M]. 地质出版社, 1983.
Ministry of Geology and Mineral Resources P. R. C. The technical specification for regional gravity survey [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1983. (In Chinese)
- [175] 金宜声, 廖永卫, 李志等. 区域重力调查规范 (DZ/T 0082—93)[S]. 中国标准出版社, 1994.
JIN Y S, LIAO Y W, LI Z, et al., The Standard for Regional Gravity Survey(DZ/T 0082—93)[S]. Beijing: China Standards Press, 1994. (In Chinese)
- [176] 牛峥, 姜夫爵, 郭润平, 等. DZ/T 0171—2017. 大比例尺重力勘查规范[S]. 北京: 地质出版社, 2017.
NIU Z, JIANG F J, GUO R P, et al. DZ/T 0171—2017. Large scale gravity survey specifications[S]. Beijing: Geological Press, 2017. (In Chinese)
- [177] 张燕, 王正科, 兰学义, 等. DZ/T 0004—2015. 重力调查技术规范(1:50 000)[S]. 北京: 地质出版社, 2015.
ZHANG Y, WANG Z K, LAN X Y, et al. DZ/T 0004—2015. Technical specifications for gravity surveys (1: 50,000) [S]. Beijing: Geological Press, 2015. (In Chinese)
- [178] 杨战军, 王春玉, 齐宝智, 等. SY/T 5819—2010. 陆上重力勘查技术规程[S]. 北京: 石油工业出版社, 2010.
YANG Z J, WANG C Y, QI Z B, et al. SY/T 5819—2010. Technical Regulations for Onshore Gravity Surveys [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010. (In Chinese)
- [179] 杨高印, 王君恒, 闫后振. 布格重力异常建模反演在二连盆地油气勘探中的应用[J]. 地球物理学报, 2019, 62(1): 316—330.
YANG G Y, WANG J H, YAN H Z. Application of modeling inversion of Bouguer gravity anomalies to oil and gas exploration in the Erlian Basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(1): 316—330. (In Chinese)
- [180] 唐新功, 张锐锋, 万伟, 等. 三维高精度重力方法在深部潜山勘探中的应用[J]. 地震地质, 2017, 39(4): 712—720.
TANG X G, ZHANG F R, WAN W, et al. Application of 3d high precision gravity method to the exploration of deep buried hill[J]. Seismology and Geology, 2017, 39(4): 712—720. (In Chinese)
- [181] 杨文采, 于常青, 杨午阳. 从地壳密度结构看中国大陆深层油气盆地的分布[J]. 地质论评, 2018, 64(6): 1315—1323.
YANG W C, YU C Q, YANG W Y. Distribution of Deep Oil/Gas Sedimentary Basins of China[J]. Geological Review, 2018, 64(6): 1315—1323. (In Chinese)
- [182] 单玄龙, 曲跃, 杜添添, 等. 基于地球物理方法预测二连盆地及邻区晚古生代潜在烃源岩分布[J]. 地球物理学报, 2019, 62(03): 1139—1147.
SHAN X L, QU Y, DU T T, et al. Prediction of Late Paleozoic potential hydrocarbon source rocks in Erlian Basin and adjacent areas based on geophysical methods[J]. Chinese Journal Geophysics, 2019, 62(3): 1139—1147. (In Chinese)
- [183] 汪洋, 汪在君, 朱彦平. 重力—地震联合反演解释技术在拉布达林盆地油气资源评价中的应用[J]. 地质与资源, 2020, 29(2): 135—141.
WANG Y, WANG Z J, ZHU Y P. Application of gravity—seismic inversion in petroleum resources evaluation of the Labudalin basin [J]. Geology and Resources, 2020, 29(2): 135—141. (In Chinese)
- [184] 刘光鼎, 郝天珧. 应用地球物理方法寻找隐伏矿床[J]. 地球物理学报, 1995, 38(6): 850—854.
LIU G D, HAO T Y. Searching of hidden mineral deposits by geophysical methods [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1995, 38(6): 850—854. (In Chinese)
- [185] 孙文珂, 王继伦, 齐文秀, 等. 我国金属与非金属矿物探的回顾与展望[J]. 地球物理学报, 1997, 40(S1): 351—361.
SUN W K, WANG J L, QI W X, et al. A Review and prospects for the geophysical exploration on metallic and nonmetallic deposits in China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1997, 40(S1): 351—361. (In Chinese)
- [186] 孙兴国, 刘建明, 刘洪涛, 等. 综合物探方法在好力宝铜矿床的应用[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(6): 1910—1915.
SUN X G, LIU J M, LIU H T, et al. The application of integrated geophysical prospecting method to the eval-

- uation of Haolibao copper deposits[J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(6): 1910—1915. (In Chinese)
- [187] 田文法, 郝俊杰, 严加永, 等. 综合地球物理方法在邯邢式铁矿深部找矿中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2010, 25(4): 1442—1452.
TIAN W F, HAO J J, YAN J Y, et al. Application of synthetic geophysical methods to deep exploration of Hanxing-type iron deposit[J]. *Progress in Geophysics*, 2010, 25(4): 1442—1452. (In Chinese)
- [188] 黄宗理, 严加永. 中国剩余重力异常与金属矿分布关系研究[J]. *地球学报*, 2011, 32(6): 652—658.
HUANG Z L, YAN Y J. The relationship between the residual gravity anomaly and the distribution of metallic deposits in China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2011, 32(6): 652—658. (In Chinese)
- [189] 王桥, 万汉平, 王闻文, 等. 综合物探方法在铝土矿勘查中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2012, 27(2): 709—714.
WANG Q, WAN H P, WANG W W, et al. The application of integrated geophysical exploration in Bauxite [J]. *Progress in Geophysics*, 2012, 27(2): 709—714. (In Chinese)
- [190] HINZE W J, FRESE R R, SAAD A H. *Gravity and Magnetic Exploration: Principles, Practices, and Applications* [M]. Cambridge: Cambridge University press, 2013.
- [191] 张国利, 赵更新, 匡海阳, 等. 冀东地区重力调查工作方法技术进展[J]. *地质论评*, 2015, 61(S1): 885—886.
ZHANG G L, ZHAO G X, KUANG H Y, et al. Methodological and technical progress of gravity survey work in the Jidong region[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 61(S1): 885—886. (In Chinese)
- [192] MICKUS K L. Gravity and magnetic study of the southern Chocolate mountains region, Southeastern California; possible extension of the mesquite gold mine[C]. *Geologic Applications of Gravity and Magnetism: Case Histories*. Soc. Of Expl. Geophys., 1998:105—111.
- [193] FARQUHARSON C G, ASH M R, MILLER H G. Geologically constrained gravity inversion for the Voiseys Bay ovoid deposit[J]. *The Leading Edge*, 2012, 27(1): 64—69.
- [194] 孟贵祥. 小热泉子铜矿区物探找矿效果及综合找矿模式[J]. *物探与化探*, 2002, (1): 32—38.
MENG G X. The effects of geophysical exploration in the Xiaorequanzi copper ore district and an integrated prospecting model[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2002, 26(1): 32—38. (In Chinese)
- [195] 姚绍萍, 徐荣华, 晏俊灵, 等. 重力勘探法在侵入岩体导矿构造上的分析应用[J]. *地球物理学进展*, 2012, 27(4): 1679—1686.
YAO S P, XU R H, YAN J L, et al. The application of gravitational method of exploration in analyzing construction of transmissive mine[J]. *Progress in Geophysics*, 2012, 27(4): 1679—1686. (In Chinese)
- [196] 杨春成, 韩革命, 杨亚斌, 等. 高精度重、磁测量在大兴安岭找矿工作中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2013, 28(3): 1472—1482.
YANG C C, HAN G M, YANG Y B, et al. The application of gravity method and magnetic method in prospecting work in Daxing'an mountain range[J]. *Progress in Geophysics*, 2013, 28(3): 1472—1482. (In Chinese)
- [197] 刘天佑, 杨宇山, 刘建雄, 等. 西藏朗县秀沟铬铁矿高精度重磁勘探效果[J]. *物探与化探*, 2012, 36(3): 325—331.
LIU T Y, YANG Y S, LIU J X, et al. The effects of using high-precision gravity and magnetic methods to explore chromite in the Xiugou iron deposit, Langxian country, Tibet [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2012, 36(3): 325—331. (In Chinese)
- [198] 潘彤, 喻志鸿, 薛国强, 等. 柴达木盆地南缘和北缘金属矿产资源地球物理勘查进展[J]. *地球科学与环境学报*, 2021, 43(3): 568—586.
PAN T, YU Z H, XUE G Q, et al. Geophysical exploration of mineral deposits in the northern and southern margins of Qaidam basin, China [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2021, 43(3): 568—586. (In Chinese)
- [199] 孙文珂, 籍同冰, 雷受旻, 等. 中国区域重力调查 40 年回顾[M]. 北京: 地质出版社, 2019.
SUN W K, JI T B, LEI S W, et al. A 40-year review of regional gravity surveys in China [M]. Beijing: Geological Press, 2019. (In Chinese)
- [200] 张明华, 乔计花, 赵更新, 等. 重力数据在全国矿产资源潜力评价中应用研究[M]. 北京: 地质出版社, 2017.
ZHANG M H, QIAO J H, ZHAO G X, et al. Study on the application of gravity data in the evaluation of national mineral resource potential [M]. Beijing: Geological Press, 2017. (In Chinese)
- [201] 杨亚斌, 吴新刚, 等. 重点成矿带 1:25 万区域重力调查成果文集[M]. 北京: 地质出版社, 2015.
YANG Y B, WU X G, et al. A collection of 1:250,000 regional gravity survey results from key mineralized zones [M]. Beijing: Geological Press, 2015. (In Chinese)

[202] 王谦身,滕吉文,张永谦,等. 龙门山断裂系及邻区地壳重力均衡效应与汶川地震[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(6):1664—1670.

WANG Q S, TENG J W, ZHANG Y Q, et al. The effect of crustal gravity isostasy and Wenchuan earthquake in Longmenshan faults and adjacent area[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(6): 1664—1670. (In Chinese)

[203] 杨文采,侯遵泽,于常青. 青藏高原地壳的三维密度结构和物质运动[J]. 地球物理学报, 2015, 58(11): 4223—4234.

YANG W C, HOU Z Z, YU C Q. Three-dimensional density structure of the Tibetan plateau and crustal mass movement[J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 2015, 58(11): 4223—4234. (In Chinese)

[204] 袁炳强,刘士毅,于国明,等. 秦始皇帝陵遗址考古重磁场特征[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2015, 40(10): 1616—1620.

Yuan B Q, Liu S Y, Yu G M, et al. Gravity and Magnetic Field Feature for Archaeology in Site of the Emperor Qinshihuang Mausoleum, China[J]. Earth Science, 40(10): 1616—1620. (In Chinese)

Research progress in terrestrial gravity prospecting

YANG Yabin^{1,2,3}, JING Lei^{1,2}, XU Menglong^{1,2}, HAN Geming^{1,2}, QIU Longjun^{1,2},
WU Xingang^{1,2}, GAO Xiaoliang^{1,2}, HAO Guojiang^{1,2},
SUN Chengye^{1,2}, ZHANG Guangzhi^{1,2}, SU Zhenning^{1,2}

(1. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration Chinese Academy of Geological Science, Langfang 065000, China;

2. National Research Center of Geo-Exploration Technology, Langfang 065000, China;

3. National Engineering Research Center of Offshore Oil and Gas, Beijing 100028, China)

Abstract: Gravity prospecting is one of the earliest and most mature development geophysics method. It plays an important role in the deepening the research on earth's foundational properties, basic geologic issues, mineral exploration, energy exploration, engineer exploration, water resource and damage detection et al. Recent years, with the method and technique's continuous innovation, target task requirements' rapid development, the method has been developing well and achieving the satisfactory and fruitful outcomes, which plays an irreplaceable role in the research of earth system science. Therefore, this paper aims to review and summary the developing process of gravity equipment, processing method and application briefly. Furthermore, it gives the analyses and prospect about the growing trend of gravity prospecting in the future, which will be helpful to the discipline construction and the demand of geological survey in a new era.

Keywords: geophysical prospecting; research progress; gravity prospecting; gravity database; standards