

DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-43046

## 重力与磁法在有色金属矿产勘探中的研究进展

柳建新<sup>1,2\*</sup>, 任政勇<sup>1,2\*</sup>, 岳国璇<sup>1,2</sup>, 张远磊<sup>1,2</sup>

(1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083 ;

2. 有色资源与地质灾害探查湖南省重点实验室(中南大学), 长沙 410083)

**摘要:** 重力与磁法勘探具有致矿异常敏感、勘探成本低、效率高、效果好等优点, 在有色金属矿产圈定中发挥了重要作用。随着仪器设备的日益更新、数据处理与解释手段的快速发展, 重磁勘探变得越来越成熟, 相应的数据处理与反演解释也进入了高维、高精度、高分辨率的阶段。本文从基本原理、仪器设备、数据处理与反演解释方法技术及勘探案例四个方面出发, 分析了重磁勘探方法在有色金属矿勘探中的现状与进展, 总结归纳了发展趋势与应用前景, 相关结论可服务于有色金属矿勘探同行, 并为战略性有色金属矿产储量和分布的探明提供一定的支撑。

**关键词:** 重力勘探; 磁法勘探; 有色金属矿产; 仪器设备; 战略性矿产

**中图分类号:** P631.1; P631.2      **文献标志码:** A

为保障国家经济安全、国防安全和新兴产业发展需求, 我国公布了《全国矿产资源规划(2016-2020年)》, 首次将铜、镍、钨、锡、钼、锑、钴、铀、稀土等多种有色金属矿产列入战略性矿产目录, 以便于实施有效的宏观调控和监督管理。利用地球物理勘探方法探明潜在储量是保护和调控战略性有色金属矿产资源的前提。在众多的方法中, 重磁法探测金属矿的历史最早, 1640年瑞典已出现使用罗盘测量磁场变化寻找金属矿产的案例。19世纪末期, 出现了万能磁力仪(瑞典人THALEN & TIBERG发明)和扭矩仪(匈牙利地球物理学家EÖTVÖS研制), 重磁法逐渐发展起来。1915年, 德国人SCHMIDT研制出的刃口式磁称被用于寻找有色金属矿产。20世纪30年代, 在南非Klerksdorp地区, 重力勘探被用于寻找金矿<sup>[1]</sup>。我国重磁测量在1949年前几近空白, 20世纪50年代开始重力勘探逐渐应用于圈定远油气景区和油气盆地。20世纪60-70年代, 我国进行了大面积重力测量, 发现了安徽庐枞和江苏江宁地区的铁矿, 为全国铬铁矿、富铁矿的普查提供了许多地质信息。同期, 我国地面磁测工作也大面积开展, 在辽宁、河北、湖北等多个地区利用剩余磁异常方法找到了丰富的铁矿。随着尖端领域对特殊金属不断需要, 重磁法勘探的目标也逐渐转向于有色、稀有及贵金属矿床, 国内就有许多成功案例, 如滇西北銜金矿、辽东地区的华北克拉通破坏型金矿、西藏扎西康铅锌金属矿等<sup>[2]</sup>。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(42130810, 41830107)

**通信作者:** 柳建新, 教授, 博士; 电话: 13807486248; E-mail: ljx6666@126.com

任政勇, 教授, 博士; 电话: 18874028327; E-mail: renzhengyong@csu.edu.cn

重磁法涉及仪器设备、数据处理、正反演成像及解释等多个工作。受制于仪器精度低、数据采集呈一维方式、多定性解释，早期重磁勘探在效果上存在不足。随着方法技术的快速发展、电子元器件技术的革新、多维数据反演方法的更新，其勘探效果得到了显著提高。野外采集方式从单点和剖面逐渐向三维过渡，并出现了三维航空测量技术，实现了在短时间内海量数据的采集。勘探区域也从平原向蕴含更多有色金属矿产资源的山区过渡。

为了服务好在我国广阔的戈壁、山区等勘探区域进行深入的金属与有色金属矿产重磁勘探，本文从方法原理、仪器设备、方法技术及案例等四个方面出发，分析了重磁勘探方法在金属与有色金属矿勘探中的现状、发展趋势与应用前景，本文结论预期可服务于金属与有色金属矿勘探同行，并为国家战略性矿产储量和分布的探明提供一定的支撑。

## 1 基本原理

### 1.1 重力勘探原理

重力勘探依赖于有色金属矿产与围岩存在明显的密度差异（也称为剩余密度），测量的信号包含了矿产的相关信息。在如图 1 所示的直角坐标系中，坐标 $z$ 轴向下， $P(x, y, z)$ 为观测点， $\sigma(x', y', z')$ 假设为矿产的剩余密度， $dv = dx'dy'dz'$ 为体积元， $r$ 为观测点到源点的距离， $\hat{\mathbf{r}}$ 为源点指向观测点的单位向量。观测点 $P$ 处的重力位和重力场可表示为<sup>[3]</sup>：

$$U(P) = G \iiint_{\Omega} \frac{\sigma(x', y', z')}{r} dv \quad (1)$$

$$\mathbf{g}(P) = \nabla U = G \iiint_{\Omega} \sigma(x', y', z') \nabla \frac{1}{r} dv = -G \iiint_{\Omega} \sigma(x', y', z') \frac{\hat{\mathbf{r}}}{r^2} dv \quad (2)$$

其中， $r = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}$ ， $G$ 为万有引力常量， $\nabla$ 为观测点的梯度算子， $\Omega$ 为矿产区域。一般观测重力场垂直分量，即：

$$g_z(x, y, z) = \frac{\partial U}{\partial z} = -G \iiint_{\Omega} \sigma(x', y', z') \frac{(z-z')}{r^3} dv \quad (3)$$

矿产密度一般大于围岩密度，故重力异常为正值。重力梯度张量为重力位的二次导数，可表示为：

$$\mathbf{T}(P) = G \iiint_{\Omega} \sigma(x', y', z') \nabla \nabla \frac{1}{r} dv \quad (4)$$

写成矩阵形式：

$$\mathbf{T}(P) = \begin{bmatrix} U_{xx} & U_{xy} & U_{xz} \\ U_{yx} & U_{yy} & U_{yz} \\ U_{zx} & U_{zy} & U_{zz} \end{bmatrix} \quad (5)$$

由于重力位在密度体外满足拉普拉斯方程，梯度分量之间有如下关系：

$$\begin{aligned} U_{xy} &= U_{yx}, U_{xz} = U_{zx}, U_{yz} = U_{zy} \\ U_{xx} + U_{yy} + U_{zz} &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

故梯度张量仅有五个独立分量。重力位单位是 $m^2/s^2$ ，重力场单位为 $mGal$ (毫伽)， $1 mGal=10^{-3} Gal=10^{-5} m/s^2$ 。重力梯度单位为 $E$ (厄尔)， $1 E=10^{-9} 1/m^2$ 。

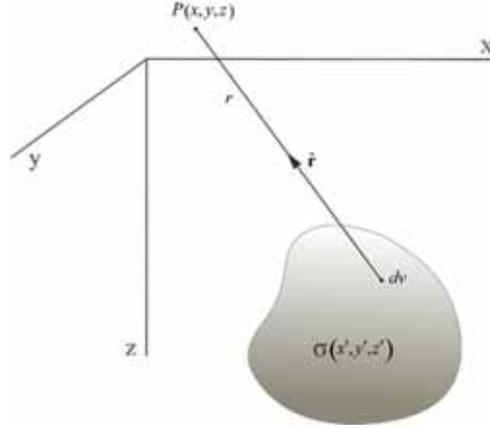


图1 重力勘探原理示意图

Fig. 1 Demonstration of gravity exploration

由式(1)-(6)可知，重力梯度张量对距离变化最敏感，重力场次之。因此，重力场梯度能有效指示浅部信息，重力场则反映相对较深的矿产信息。此外，重力梯度仪可以测量多个独立梯度分量，重力梯度数据能够提高金属矿探测的效果。

## 1.2 磁法勘探原理

磁法勘探是利用岩矿石磁性异常的一种勘探方法。在地球主磁场作用下，矿石内部无序磁极子呈有序排列，对外表现出一致的磁性特征。测量的磁信号包含了矿石的磁性特征，利用反演成像手段，可以获得地下矿石的埋深与形态等关键信息。磁位的表达式为<sup>[3]</sup>：

$$U(P) = -C \iiint_{\Omega} \mathbf{M} \cdot \nabla \frac{1}{r} dv \quad (7)$$

其中  $C = \mu_0 / 4\pi$  为常量， $\mu_0$  表示真空环境中的磁导率， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$ ， $\Omega$  为磁性矿石， $\mathbf{M}$  为磁化强度矢量， $\nabla$  为观测点的梯度算子， $r = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}$  表示观测点  $P(x, y, z)$  距源点的距离。磁场的表达式：

$$\mathbf{B} = -\nabla U \quad (8)$$

对磁场矢量求导，得到一个对称的 $3 \times 3$ 磁梯度张量：

$$\mathbf{T} = -\nabla \nabla U = C \nabla \nabla \iiint_{\Omega} \left( \mathbf{M} \cdot \nabla \frac{1}{r} \right) dv \quad (9)$$

磁位的单位为 $mpu$ ，磁场的单位一般为 $nT$ ，磁梯度的单位为 $nT/m$ 。

磁位、磁场、磁梯度比对应的重力位、场和梯度高一阶导数，因此磁异常随距离衰减速度更快，对仪器的测量精度要求更加灵敏。根据泊松定理<sup>[3]</sup>，均质同源的目标体磁信号可以通过重力位求得。

## 2 仪器设备

### 2.1 重力仪

地面重力仪的研发经历了比萨斜塔抛球、摆式测量、弹簧测量、自由落体式重力测量到原子干涉测量、超导重力测量等过程<sup>[4]</sup>。目前常用的重力仪见表 1，绝对重力仪重量高达  $10^5\text{kg}$ ，难用于金属资源勘探，故这里不做展开介绍。相对重力仪主要基于倾斜零长弹簧、石英弹簧或超导磁悬浮三种原理，具有体积小、广泛用于金属矿产勘探。20 世纪 30 年代，德国研制出基于垂直弹簧秤的 Askania GS 型重力仪；同期，LOCASTE & ROMBERG 公司研制出了 LCR 倾斜零长弹簧重力仪。在 LCR 弹簧重力仪基础上发展起来的 gPhone 相对重力仪，减少了受外部气压环境的影响。美国 ZLS 公司研发出的 Burris 重力仪能在高强度的野外工作环境工作，实现数字化全自动测量，连续读数精度达  $0.1\mu\text{Gal}$ 。倾斜零长弹簧系统的缺点是在调零过程中灵敏度与弹簧倾斜程度有关，难以进一步提升精度。上世纪 80 年代，加拿大 Scintrex 公司基于垂直弹簧平衡原理开发出了代表型号为 CG-5 型的石英弹簧重力仪，分辨率达到  $1\mu\text{Gal}$ ，具有更短的测量时间，已经成为全世界使用最多的相对重力仪，在金属与有色金属矿产资源勘探中应用十分广泛<sup>[5]</sup>。近期，更新的 CG-6 重力仪，具有更轻便、抗风能力更强的特征，在固体潮、地震重力变化等高精度测量工作中取得了一定的成果<sup>[6]</sup>。

表 1 常用的重力仪信息<sup>[4]</sup>

Table 1 List of gravimeters<sup>[4]</sup>

Type	Name	Principle	Typical Type	Accuracy / $\mu\text{Gal}$	Origin
Absolute Gravimeter	Laser Interference	Free Falling	FG-5, FG-5X	2	USA
	Gravimeter		NIM-3A	5.3	China
	Atomic interference Gravimeter	Atom Interferometry	NIM-AGRB-1	0.2	China
Relative Gravimeter	Spring Gravimeter	Vertical Mass-Spring	Askania GS	1	Germany
		Zero-Length Spring	LCR gPhone, Burris	10 0.1	USA
	Quartz Spring	CG-5, CG-6	1	Canada	
		ZSM6	1	China	
	Superconducting Gravimeter	Superconducting Magnetic Levitation	iGav	0.001	USA
Airborne Gravimetry	Marine And Airborne Gravimetry	Two Axis (2DOF) Motion Base Platform	TAGS, BGM-3 KSS5	1000 700-2000	USA Germany
		Triple-Axis (3DOF) Motion Base Platform	AIRGrav GT-2A, GT-2M GIPS-1AM	600 1000	Canada Russia China

	Strapdown Inertial Navigation System	SGA-WZ01	1000	China
Airborne Gradiometer	Equivalence Principle	Falcon TM Air-FTGTM	5-10(E)	USA

国内研制相对重力仪开始于 20 世纪 60 年代。西安石油仪器厂、北京地质仪器厂自主研发并生产了首批金属弹簧、石英弹簧重力仪。从 1975 年到 80 年代末，北京地质仪器厂累计生产了千余台 ZSM3、ZSM4 和 ZSM5 三种型号的石英弹簧重力仪。虽然这些重力仪只达到了中等精度，但是却满足了我国区域重力测量需要<sup>[7]</sup>。新研制的 ZSM-6 数字重力仪，各项技术指标基本达到国际先进水平，填补了我国高精度数字重力仪的空白<sup>[8]</sup>。超导重力仪越来越受到关注。1990 年，GWR 仪器公司制出了商用超导重力仪，最新型号 iGav 超导重力仪的便携性能大幅提升，分辨率高达 1nGal，是目前最灵敏最稳定的便携式商用相对超导重力仪<sup>[9]</sup>。超导重力仪作为一项新技术有很广阔的应用前景，是未来地面相对重力仪器的重要发展方向。我国在超导重力仪研制方面在同步跟进<sup>[10]</sup>。

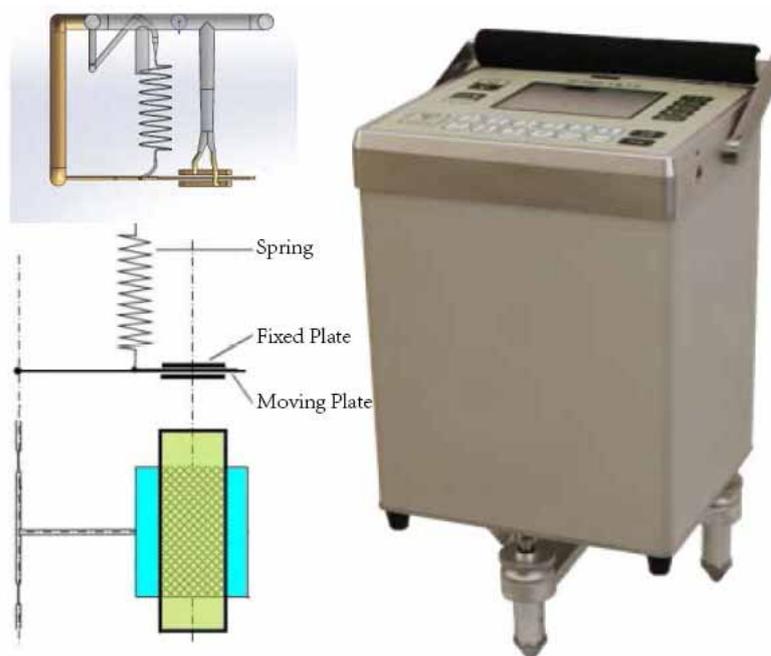


图 2 国产 ZSM-6 石英弹簧高精度重力仪基本原理与外观<sup>[7]</sup>

Fig. 2. Principle of quartz gravity sensor and high precision digital gravimeter ZSM-6<sup>[7]</sup>

地面重力梯度仪也取得了迅速的发展。重力梯度仪的工作原理经历了扭矩、旋转加速度、原子干涉到超导测量。美国 Maryland 大学研制的单轴超导重力梯度仪样机的精度为 0.01E，灵敏度达到了  $10^{-3} E/\sqrt{Hz}$ ，所研制的全张量超导重力梯度仪在室温条件下的灵敏度可达  $0.02 E/\sqrt{Hz}$ 。原子干涉重力梯度仪使用了最新的量子光学和原子光学技术，能最大限度的降低重力梯度仪的噪声水平<sup>[11]</sup>。

20 世纪 90 年代开始，随着传感器与数字滤波技术的发展，航空重力及梯度测量技术得到了巨大发展，逐步实现了商业化。在地面测量难覆盖的地区，航空测量成了大面积快速测量的重要手段。航空重力仪主要分为海/空重力仪和重力梯度仪。适用于航空应用的海/空重力仪主要有三类。第一类是出现较早的双轴陀

螺稳定平台式,代表产品是美国MICRO-G/LACOSTE公司研制的TAGS系统、贝尔公司的BGM系列以及德国BODENSEEWERK公司的KSS系列<sup>[12]</sup>;第二类是三轴惯性稳定平台式,代表产品有加拿大SANDER物探公司的AIRGRAV航空重力仪,采用舒勒调谐平台惯导系统,具有良好的分辨率与精度<sup>[13]</sup>。俄罗斯莫斯科重力测量技术公司于2001年研制的GPS/INS组合型标量重力仪—GT系列航空重力仪,也采用舒勒调谐平台惯导系统<sup>[14]</sup>。北京自动化控制设备研究所也研制出了GIPS-1AM重力仪原理样机,原理是三轴惯性平台加石英挠性加速度计;第三类是捷联数学稳定平台式,最早由加拿大Calgary大学在20世纪90年代开展了捷联惯导系统的航空标量重力测量系统的研究,其测量精度为1.5mGal/2km。2008年底,我国成功研制出捷联式航空重力仪原理样机SGA-WZ01,并于2009年进行首次飞行试验,在金属矿隐伏矿体探测成像等方面获得了成功应用<sup>[15]</sup>。在国家863计划重大项目的支持下,2017年中国地质调查局和国防科技大学研制出具有完全自主知识产权的“捷联+平台”式航空重力仪,并在南通、海南等地开展了四万余测线公里的航空重力测量试验,取得了良好效果。



图3 中国地质调查局、国防科技大学生产的“捷联+平台”式航空重力仪

Fig. 3. Strapdown Airborne Gravimeter made by AGRS and NUDT

另一类航空测量设备是航空重力梯度仪。1999年, Bell Aerospace公司研发出首套旋转加速度计航空重力梯度系统,并开始商业应用。目前商业航空勘探重力梯度系统主要有BHP Billition公司Falcon TM系统、Bell Geospace公司Air-FTGT系统。搭载平台一般为固定翼飞机,为了减小噪声和提高空间分辨率,搭载平台也可为飞艇和直升机<sup>[16]</sup>。ANSTIE等<sup>[17]</sup>指出当前的航空重力测量精度很难满足矿产勘探需求,航空重力梯度测量精度足够达到矿产勘探的要求。仅1999至2008年间,航空重力梯度测量累计完成超过200万千米任务<sup>[18]</sup>,在油气和矿产资源勘查领域工作量逐年递增,应用前景备受瞩目。“十三五”期间,科技部国家重点研发计划项目推动了我国在航空重力梯度测量技术方面的研究。华中科技大学、浙江大学、东南大学、中船重工集团七零七研究所等单位研制了旋转加速度计航空重力梯度仪、超导重力梯度仪、高精度原子干涉重力梯度仪。吉林大学国家重点研发计划“航空重力梯度仪的研制”项目也取得了可喜的进展<sup>[19]</sup>。但国内重力梯度仪的研制起步晚,国外对我国实行技术封锁,因此国内重力梯度仪的性能与国外重力梯度仪的性能相比还有一定的差距。

航空重力梯度测量可以对目标区域进行快速、高精度大范围测量,有望获得更多成功的有色金属矿的

勘探案例。另外，我国仍需要解决一些关键技术，开展核心设备攻关，摆脱对国外设备的依赖。

## 2.2 磁力仪

磁力仪的发展经历了四个阶段，具体分类见表 2。磁力仪的发展始于机械式磁力仪，即第一代磁力仪。20 世纪早期，国外出现了刃口式磁秤和悬丝式磁秤。20 世纪 60 年代，我国引进了机械式磁力仪，先后研制设计了 CSC-3、CR<sub>2</sub>-69、CSX<sub>1</sub>-70、CSS-1、CRT<sub>1</sub>-69、CS<sub>2</sub>-61 等多种型号的机械式磁力仪。目前，机械式磁力仪已逐渐被新型电子磁力仪所取代。

表 2 磁力仪发展阶段

Table 2 The development stage of magnetometers

Development Stage	Time	Measurement	Magnetometer
The first generation	Early-20th Century	Total Magnetic Field Intensity (TMI)	Mechanical Magnetometer
			Proton-Precession
The second generation	Mid-20th Century	Total Magnetic Field Intensity (TMI)	Optical-Pumping Fluxgate Magnetometer
			New Optical-Pumping Magnetometer
The third generation	1950s~1990s	Total Magnetic Field Intensity Vertical & Horizontal Gradient	New Fluxgate Magnetometer & SQUID
The fourth generation	1990s~Now	Magnetic Vector & Magnetic Gradient Tensor	

20 世纪中期，国外研究人员利用磁共振特性研制出第二代磁力仪，包括质子磁力仪、光泵磁力仪、磁通门磁力仪、以及在我国广泛应用的质子旋进式磁力仪。国内质子磁力仪主要有北京奥地探测仪器有限公司的 CZM 系列质子磁力仪、重庆奔腾数控技术研究所研发的 WCZ-2 质子磁力仪、核工业京核鑫隆公司推出的 G856F 型质子磁力仪、吉林大学电子科学与工程学院研制的 JPM 系列<sup>[20]</sup>。国内质子磁力仪的分辨率为 0.1nT，与国际先进水平还有一定的差距。例如，加拿大 GEM 公司生产的 GSM-19T 磁力仪分辨率为 0.01 nT。

自 20 世纪 50 年代以来，国内外开始研制第三代光泵磁力仪。光泵磁力仪依赖的原理为氦、汞以及碱金属铷等元素在特定条件下发生磁共振吸收现象，且光泵吸收时磁场频率与所在地外磁场强度成比例关系。长春地质学院研制出国内第一台光泵磁力仪，灵敏度小于 3nT；1976 年，北京地质仪器厂联合长春地质学院和北京大学共同研制出 CBG-1 型跟踪式氦光泵磁力仪和铯自激式光泵磁力仪；中国国土资源航空物探遥感中心研制出用于航空测量的 CG-30 型氦光泵磁力仪，灵敏度达到 1nT<sup>[21]</sup>，十年后，将其改进为灵敏度为 0.01nT 的 HC-85 型航空氦光泵磁力仪。目前 HC 系列（HC-95 型手持式氦光泵磁力、HC-2000 型航空氦光泵磁力仪）的氦光泵磁力仪灵敏度高达 0.25pT；中船重工集团第七一五研究所也研制出 GB 系列、RS 系列等氦光泵磁力仪。20 世纪 90 年代，法国 LETI 公司利用可调谐激光器制作了激光光泵磁力仪，仪器灵敏度为  $1pT/\sqrt{Hz}$ <sup>[22]</sup>；美国 POLATOMIC 公司研发的 P-2000 激光光泵磁力仪仪器灵敏度达到  $50fT/\sqrt{Hz}$ ，代表着国际

上氦光泵磁力仪的先进水平。吕庆田等<sup>[7]</sup>在“十二五”国家高技术研究发展计划中研制出氦光泵磁力仪原理样机，实现了我国氦光泵磁力仪零的突破。

磁通门又称为饱和磁力仪，其原理利用感应电场强度与外磁场成非线性的关系，测量产生的电场来确定磁信号。国内磁通门的发展迅速，北京地质仪器厂先后推出了CCM-4、CTMBS-1、CTM-DT06、CTSD-1、CGM-02D、CSM-05等型号磁通门磁力仪；中国科学院地球物理研究所研制出CTM-302型磁通门磁力仪；廊坊物化探所的CBT-1型便携式探矿磁力仪和廊坊瑞星仪器有限公司的MCL-2微机磁力仪也先后问世；中国地震局地球物理研究所研制了磁通门磁力仪野外台阵观测系统<sup>[23]</sup>。国内磁通门磁力仪的分辨率基本多在1nT左右，而基于磁通门技术的磁梯度测量仪器灵敏度可达0.1nT/0.5m。

第四代磁力仪为基于低温量子效应的超导磁力仪。十年来，美国、德国、澳大利亚等国家先后研制出了磁梯度测量系统，形成了多种不同的技术方案，主要分为基于磁通门磁力仪的磁梯度测量方案和基于超导量子干涉器（SQUID）的磁梯度测量方案。为了提高灵敏度，从上世纪80年代开始，超导量子干涉仪被研制出来。德国耶拿物理高技术研究所（IPHT）利用低温SQUID梯度计原理研制出JESSY STAR地面全张量磁梯度测量系统（图4），灵敏度为 $7 \text{ fT} / \text{cm}$ 。我国超导磁力仪的研制还在进行中。主要设备有中国科学院物理研究所的高温DC-SQUID平面梯度计、中国科学院上海微系统与信息技术研究所的低温SQUID磁强计与梯度计、吉林大学利用高温SQUID研制了地面全张量磁梯度测量系统、北京大学研究的干涉仪磁强计<sup>[24]</sup>。由于超导磁力仪需要低温环境，在金属矿勘探中的应用较少。但是，研制基于常温超导材料的全张量磁力仪是未来的方向。

磁法勘探主要包括地面磁测和航空磁测等两种作业方式<sup>[25]</sup>。航空磁测因在探测效率、运行成本方面具有明显的优势，已被广泛应用于矿产资源勘查。航空磁测根据搭载磁测系统的不同飞行平台，主要分为有人机和无人机两类，其中有人机主要有固定翼飞机和直升机。有人机在负载和续航能力上较为突出，可搭载大型磁力仪，但使用维护费用较高。无人机可以通过地面远程操控，可以根据预设的飞行路线进行超低空飞行，具有智能化、成本低、安全性能高以及使用便捷等优点<sup>[26]</sup>。



图4 德国IPHT研制的低温超导航空全张量磁梯度测量系统。第一代系统(左) 第二代系统(右)<sup>[25]</sup>

Fig. 4. Low-temperature superconducting full-tensor magnetic gradient measurement system developed by IPHT. The first generation system(left); the second generation system(right)<sup>[25]</sup>

### 3 方法技术

#### 3.1 数据处理

从重磁野外数据中获得与金属与有色金属矿产相关信息，首先需要进行重磁数据的处理工作，其一般包括预处理、去噪、区域和局部异常分离等几个步骤。

### 3.1.1 数据预处理

数据预处理的目的是为了去除测量误差和噪音信号。重力数据为包含地下所有介质在测量点产生的重力信号，需要进行零点漂移校正、正常场校正、固体潮校正、中间层校正、高度校正和地形校正，来获得与矿体异常密度相关的异常数据。磁测数据的预处理涉及地磁日变的消除、正常场的剔除、方向误差的校正<sup>[27]</sup>。由于磁化强度为矢量，还需要进行化极处理。

### 3.1.2 信号去噪与异常分离

重磁数据常常包含各种噪声干扰，大多表现为随机变化的高频信号，需要压制这些干扰来提高信噪比。去噪方法可分为空间域去噪和变换域去噪两大类。空间域去噪方法包含圆滑平均法、阈值去噪法、最小二乘法、加权平均法等。圆滑平均法在平稳区去噪效果好，但由于异常区主要是窄异常信号，经圆滑平均法处理后常有幅值变小、宽度变大的失真现象出现<sup>[28]</sup>。变换域去噪方法在应用中目前处于主流位置，核心在于使用图像变换方法得到信号的稀疏图像表示，常用的有傅里叶变换、希尔伯特变换及小波变换、曲波变换等多尺度变换。

经预处理和去噪后得到的数据包含地下所有介质响应的叠加，需要经过区域和局部异常分离得到矿产的异常响应。异常分离既包括区域场和局部场的分离，也包括尺度相近的垂向与水平地质体叠加场的分离<sup>[29]</sup>。异常分离方法包含空间域和频率域两大类。图解法（徒手圆滑法）是最早出现的空间域分离方法，该方法严重依赖于解释者的经验积累。之后，出现了异常平滑法、平均场法、高次导数法、基于正交多项式的趋势分析法、延拓法等多种空间域分离方法。延拓方法应用最为广泛，延拓方法涉及观测面与延拓面之间卷积形式的积分计算。ZHANG等<sup>[30]</sup>提出了基于中值定理的位场延拓技术，通过先向上、后向下延拓来获取小尺度信息。相对而言，频率域异常分离方法已经发展到较为成熟的阶段。1960 以来，以Fourier变换为工具的频率域异常分离方法获得了广泛的应用。例如，SYBERG<sup>[31]</sup>提出了位场延拓和匹配滤波法进行异常分离。PAWLOWSKI<sup>[32]</sup>根据格林等效层原理和维纳滤波提出了匹配滤波的优选延拓法。此外还有补偿圆滑滤波、正则化滤波等方法<sup>[33]</sup>。小波多尺度分析法逐渐得到了应用<sup>[34]</sup>。小波分析法用母小波伸缩平移产生的函数簇代替了Fourier变换的基函数，因此小波分析法继承了Fourier变换的许多优秀性质。另一方面，小波基函数选择多样，小波变换把有限能量信号分解到小波空间和尺度空间中，在频域和时域都有较好的局部化效果。选择具有最佳空间分辨率的母小波便可以对重磁区域异常和局部异常进行识别与分层次分离<sup>[35]</sup>。

20 世纪 90 年代，重力梯度数据开始应用到金属勘探中。重力梯度数据等效于高通滤波的求导计算，蕴含更丰富的浅息和局域异常特征的细节信息，但易受到高斯白噪声的影响，故常用的处理手段是高斯滤波和维纳滤波<sup>[36]</sup>。ZHANG等<sup>[37]</sup>使用一种新的基于平移不变量小波的梯度数据的滤波方法，利用小波的多尺度分析能力对梯度数据进行了多尺度处理。

## 3.2 边界识别与源参数估计

重磁数据的定性成像分析手段包含边界识别、源参数估计等技术。边界增强与识别是重磁数据处理解释中的重要环节，它能实现矿产的空间赋存位置的快速判断工作。根据计算模式的不同，主要分为导数分

析和数理统计两类。基于导数类的方法包含水平梯度模、总梯度方法、解析信号模法以及张量曲率特征值法<sup>[38]</sup>。后续又出现了相位滤波类法，比如倾斜角法、倾斜角总水平梯度法、Theta map法，双曲倾斜角法以及单演信号局部相位法<sup>[39]</sup>。倾斜角法因为理论成熟而被广泛使用。基于数理统计的方法主要有小子域滤波、导数归一化标准差、均方差比归一化垂向梯度<sup>[40]</sup>。随着梯度数据测量越来越重要，利用梯度计算或全张量梯度相关量进行边界识别的方法，也逐渐占据重要的位置<sup>[41]</sup>。胡双贵等<sup>[42]</sup>提出一种带通空间滤波和边缘检测相结合的边界识别方法，相对于Tilt方法和Theta图法，该方法识别的主要异常体的边界更加细腻、收敛和封闭。

除了上述传统方法，基于人工智能、深度学习的数据处理与解释手段也出现了相关实例<sup>[43]</sup>。可以预见，在数据训练样本充足的情况下，智能化处理手段也有很广阔的发展前景。

### 3.3 重磁反演技术

重磁异常需要经过反演得到地下有色金属的密度或磁化率等参数信息，因此反演是重磁勘探的重要环节之一。重磁反演存在多解性与深度判断不准确的问题。反演可以看成是最小二乘意义下的最优化问题，反演迭代过程中会不断修改模型参数进行数据拟合，每迭代一次会调用正演算子对当前模型进行计算。因此正演的效率与精度也制约着反演的效果，开发面向任意复杂模型的快速高精度重磁正演算法是保证反演效果的前提。

#### 3.2.1 正演技术

重磁正演可在空间域和频率域进行，空间域中解析求解重力场及其梯度积分的方法发展的较早。虽然，空间域解析表达式较为复杂，推导过程繁琐，但是目前已经出现了任意复杂三维异常体的解析解。TALWANI等提出了2D任意形状物体的重力场公式，并在1960年将公式拓展到任意3D形状物体<sup>[44]</sup>。TSOULIS等<sup>[45]</sup>使用线积分得到了任意形状多面体的重力梯度张量解析解表达式。REN等推导出了常量阶<sup>[46]</sup>、三阶<sup>[47]</sup>、任意阶密度函数<sup>[48-49]</sup>下任意多面体全张量梯度重力场的解析解表达式。磁法空间域正演方法基于泊松公式、磁偶极体积分和磁荷面面积分这两种方式，可以解析地计算复杂形态均匀磁化磁性异常体的磁场以及磁梯度响应。常用的小模型例如六面体模型、圆柱体模型、球壳模型等多面体模型<sup>[50]</sup>，其中六面体模型和多面体模型的应用较为广泛，与重力高阶密度函数的解析解对比而言，目前磁法的解析解正演研究多侧重于均质模型<sup>[51]</sup>。解析解正演方法计算结果准确，但当源单元个数和观测点较多时计算很耗时，因此多种加速重磁正演的技术手段得以应用，例如快速多级展开技术<sup>[52]</sup>、小波压缩技术、多核多线程并行加速技术、基于GPU硬件加速技术<sup>[53]</sup>等。数值方法也是一种有效的正演方法。由于重磁位场满足泊松方程，可以转化为偏微分方程的边值问题进行求解。有限差分法、有限体积法、有限元方法<sup>[54-55]</sup>等数值方法均可求解重磁满足的边值问题。数值方法的优点是不需要将每一个点进行叠加计算求解，而是求解一个大型线性稀疏矩阵，计算效率高，缺点是后处理求导过程中有精度损失。

频率域正演具有表达式简洁紧凑的优点，它基于傅里叶变换得到重磁异常响应的频谱，然后利用数值方法计算异常频谱，再经过反傅里叶变换得到最后的重磁异常。自COOLEY提出快速傅里叶变换(FFT)以来<sup>[56]</sup>，基于快速傅里叶变换的频率域方法逐渐得到应用。HANSEN<sup>[57]</sup>将重磁异常频域表达式推广到以多边形为表面的一般多面体。吴乐园<sup>[58]</sup>提出了基于Guass-FFT的高精度重磁位场频率域正演方法，并分析了误差

分布特性与原因。相较于空间域方法，频率域计算效率更高，但容易出现正演异常场的强制周期化和边界震荡效应。改进频率域正演精度的方法有FFT扩编法、偏移理论抽样法等。ZHAO等<sup>[59]</sup>改进了Guass-FFT方法，使频率域正演计算效率相较于空间域方法提高两个数量级，证明了该方法能有效的应用于反演中。目前频率域正演已经从开始的单一均匀六面体网格发展到非均匀六面体网格，再到非结构化四面体网格，有了更为灵活的应用场景<sup>[60]</sup>。

从正演的效率上说，基于FFT的频率域正演方法相对于空间域正演具有更快的计算速度。但空间域正演适用的场景更为多样，目前也可在大规模复杂重磁正演问题中被更多采用。

### 3.2.2 反演技术

近几年正演的快速发展为重磁反演提供了坚实基础。重磁数据的反演主要分为界面反演和物性反演两大类。早期受制于计算机计算能力，界面反演广泛应用于沉积层、密度界面反演研究<sup>[61]</sup>。目前物性反演逐渐被广泛地重视，物性反演具有条件宽松、模拟复杂地质体等优点。基本思路为首先将地下复杂环境离散成一系列小单元网格，然后通过观测数据和空间几何位置关系建立线性方程组，最终求解方程组得到各个单元的物性参数。选取不同的模型正则化条件，可得到多种反演方法。常用的模型正则化包括深度加权约束、参考模型约束、物性范围约束、光滑模型约束、聚焦约束、聚类约束等。LI等<sup>[62]</sup>为了克服重磁数据缺乏深度分辨能力的问题，引入深度加权函数约束条件，使反演获得深部异常成为了可能。参考模型约束包含稀疏物性分布和均匀物性分布，前者根据研究区已有的钻孔地质等信息构建稀疏的物性分布，后者根据对研究区的区域性物性认识构建参考模型。为了使反演剩余密度异常在空间边界光滑过渡，可以对反演模型进行光滑度约束，该约束适合离散块状模型反演。反演过程也可以引入物性范围不等式进行强制约束，进而大幅度缩小解空间，以提高反演的可靠性和准确性，但是该强制约束可能会带来反演不收敛的问题。在特定情况下，地下有色金属矿产的分布较为集中，可能与围岩存在明显的分界面，因此有必要引入目标聚焦的反演思路和方法，近些年聚焦约束反演也受到了广泛的关注。PORTNIAGUINE等<sup>[63]</sup>提出了重磁的“聚焦反演”方法。ZHDANOV<sup>[64]</sup>对聚焦反演的改进进行了详细的论述。同时，基于LP范数或柯西范数如稀疏约束也能够带来反演结果聚焦的效果<sup>[65]</sup>。ABEDI<sup>[66]</sup>进行了重磁数据共轭梯度法聚焦反演，并将它应用到复杂地形的伊朗SHAVAZ矿床区，成功的圈定含少量磁铁矿化合物的浅层赤铁矿靶区，与钻探结果吻合较好。MELO等<sup>[67]</sup>将K均值聚类约束应用于巴西北部CRISTALINO的复杂地质氧化铁铜金（IOCG）矿床单独的重力、磁场反演数据中，取得了良好的反演效果并成功推测出地下岩体的分布情况（见图5）。上述反演均采用线性化方法来寻求目标函数极值，例如高斯牛顿法、共轭梯度法、有限内存BFGS拟牛顿法<sup>[68]</sup>。ZUO等<sup>[69]</sup>基于有限元法和非结构四面体网格重新构造了基于麦克斯韦方程组的三维磁法正演和反演方法。该方法可以通过非结构化四面体网格恢复任意复杂的几何模型，显著提高了反演解释的能力和精度。

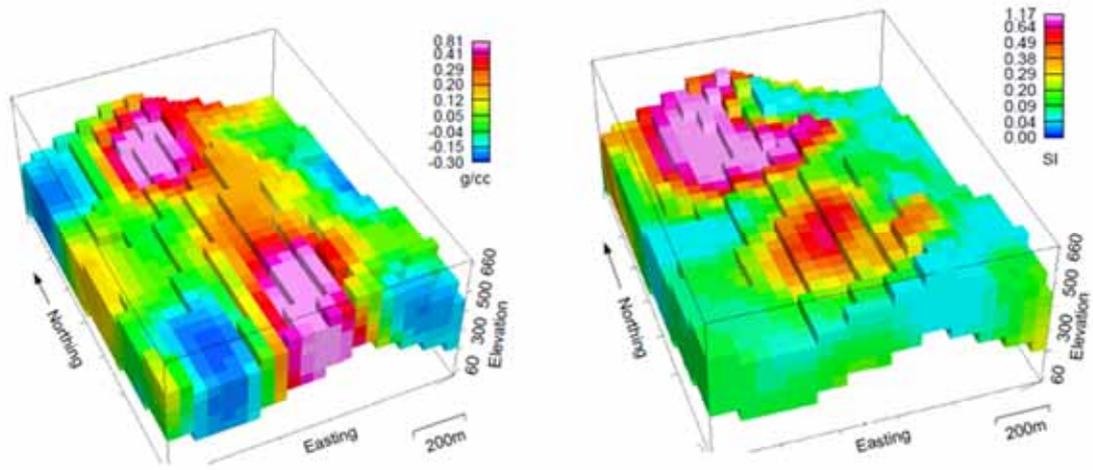


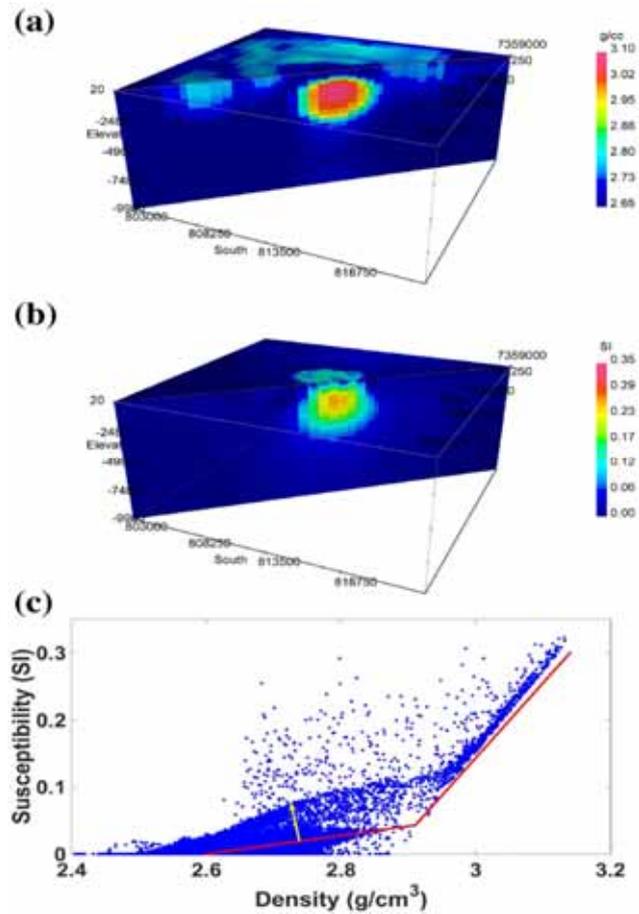
图 5 IOCG矿区反演得到的地下密度模型(左)和磁化率模型(右)<sup>[67]</sup>

Fig. 5 Inverted 3D density(left) and susceptibility model(right) in IOCG<sup>[67]</sup>

全局优化和人工智能方法等非线性方法在重磁反演中也得到逐渐的应用<sup>[70]</sup>。BOSCHETTI等<sup>[71]</sup>在位场反演中使用了遗传算法，对实测磁场数据反演时显示出了良好的效果。郭文斌等<sup>[72]</sup>使用重力异常的BP神经网络三维物性反演方法，反演速度快、精度高、能够很好地反映场源信息。HE等<sup>[61]</sup>将机器学习方法中的卷积神经网络(CNN)引入反演，成功反演复杂地质模型沉积-基底界面的详细特征。

井中、地面、航空重磁及梯度张量的同类型数据联合反演能降低反演多解性。VASCO<sup>[73]</sup>对重力和重力梯度数据进行反演计算表明，重力梯度数据的反演分辨率更高，方差更小。FEDI等<sup>[74]</sup>提出具有深度分辨率的三维重磁反演方法，该方法结合地面观测数据和多个不同高度平面上的延拓数据，或直接对地面和航空梯度数据进行联合反演。ZHDANOV等<sup>[75]</sup>引入了重力曲率并将重力梯度数据和重力数据联合进行反演计算取得了较好效果。CAPRIOTT等<sup>[76]</sup>基于一种自适应的加权函数给出了重力和重力梯度数据联合反演的一般公式。LU等<sup>[77]</sup>提出了一种新的预处理矩阵，并基于迭代分裂Bregman方法的超参数正则化联合反演重力场和重力梯度数据。张志厚等<sup>[78]</sup>提出了一种深度学习的方法对重力异常与梯度数据进行联合反演。同时为了减少反演的计算时长和内存消耗，一些特殊改进技术如子空间算法，矩阵压缩类方法，数据空间算法被用来提高效率并减少内存消耗。利用这些处理手段能够在一定程度上改善大规模位场数据反演所面临的问题。

多类型地球物理数据联合反演也能降低反演多解性。一方面，重磁场数据与其他地球物理方法如地震、电磁在金属矿勘查进行联合反演时能显著改善反演效果<sup>[79]</sup>。LINES等<sup>[80]</sup>最先采用最小二乘法对声波测井数据、地震数据和地面重力及井中重力数据进行了联合反演。LELIÈVRE等<sup>[81]</sup>基于非结构化网格对加拿大拉布拉多某矿区进行了重震数据的联合反演，显著提高了地下介质的分辨率。多类型数据联合反演可以通过几何联合和物性联合两种方式来实现。



**图 6** 瑞典博登镇铜-镍-铂矿化带基于FCRM的联合聚类反演 (a) 密度模型的截面; (b) 磁化率模型的横截面; (c) 密度和磁化率值的交会图。红线总结了先验岩石物理数据的线性趋势, 黄色箭头指向垂直于较低线性趋势的方向<sup>[82]</sup>

**Fig. 6** (a) A cross-section of recovered density model from joint clustering inversion based on FCRM. (b) A cross-section of the susceptibility model obtained from joint clustering inversion based on FCRM clustering. (c) Cross plot of jointly inverted density and susceptibility values based on FCRM clustering. The red lines summarize the linear trends in a priori petrophysical data. The yellow arrow points to the direction perpendicular to the lower linear trend<sup>[82]</sup>.

近几年, 重磁三维反演更加注重于结合岩石物理的先验地质信息。SUN等<sup>[83]</sup>提出了基于物性导向的模糊C均值聚类算法(FCM), 使模型参数围绕已知的岩石物理信息聚类。SUN等<sup>[82]</sup>针对多种岩石物理参数提出基于FCRM的广义多域联合聚类反演方法, 并将瑞典博登镇铜镍铂矿化带的重力数据和航空磁测数据进行联合聚类反演(图6)。从图6可以看出, 联合反演模型在空间域表现出增强的结构相似性, 又增强了岩石物理相关性, 在参数域表现出更好的聚类特征, 这使得后续的地质分异更容易和更可靠, 在空间域和物性参数域更好地反映了铜-镍-铂矿化带特征。MAAG等<sup>[84]</sup>提出了逼近离散值反演改进的FCM聚类算法, 避免了严格施加离散值导致的反演结果不精确, 该方法使恢复的模型紧紧围绕着已知的岩石物性值聚类。殷长春等<sup>[85]</sup>基于局部相关性约束对大地电磁和重力数据进行了联合反演, 有效改善了单一反演的多解性问题。闫政文等<sup>[86]</sup>将重磁和大地电磁三者进行交叉梯度约束反演, 得到了更接近于真实的物性参数, 不仅消除了假异常还增加了异常边界结构的恢复。

综上，多地球物理数据的联合反演取得了显著的效果，已经成为了重磁三维反演的趋势，国内外学者及商业公司正在致力于开发先进的重磁反演解释技术和软件系统，以便实现复杂地质条件下的重磁、电、震三维约束与联合解释技术，以便更精确地圈定有色金属矿体。

#### 4 重磁方法在有色金属矿勘探中的典型案例

对于有色金属矿产勘探，重磁方法无论在早期单一方法找矿还是后来综合有色金属矿勘探中都被广泛应用。重磁方法勘探有色金属矿主要有两种方式，一是根据密度或磁异常在一定条件下直接寻找矿体，二是根据靶区产生的位场响应圈定赋存岩体或相邻围岩构造的形态、位置及边界，据此推断有关地层、蚀变岩石或矿化带等控矿因素信息，即为间接找矿。磁探测效果很大程度上取决于有色金属与围岩的磁性强弱，定位效果较好，而重力勘探的分辨率相对有限，特别是垂向分辨率较低，但水平分辨率较好，因此重磁勘探目前常需要与其它地球物理方法、地质信息协同结合解释，以提高勘探效果。

国外使用重磁方法勘探有色金属矿的案例较早，早期都是单一直接找矿方法，1986年，在南非约翰内斯堡东南Evander盆地，利用重力勘探和航空磁测方法对兰德矿石群的金矿进行了圈定<sup>[87]</sup>。重磁勘探发现了加拿大基德里克硫化物矿床、魁北克西部闪锌矿床<sup>[88]</sup>等。FARQUHARSON等<sup>[89]</sup>利用重力数据约束反演来预测和描绘加拿大拉布拉多的大型镍、铜、钴矿床的地下特征和展布。2000年美国地质调查局基于当时的航空重磁数据库，对美国西部浅层低温热液型斑岩型金属矿床以及沉积型金矿床进行了间接勘探。KHEYROLLAHI等<sup>[90]</sup>基于高分辨率航空磁测数据和大范围布格重力异常数据的对伊朗中部地区的铅锌、斑岩铜矿床进行了大范围成矿远景区预测。HUANG等<sup>[91]</sup>基于监督的深度完全卷积神经网络对墨西哥中部San Nicolas金属矿床重力数据进行稀疏反演，揭示了该地区成矿靶区的密度构造。2021年，JORGENSEN & ZHDANOV<sup>[92]</sup>使用联合聚焦反演方法对加拿大安大略省钒钛矿床的航空重力梯度数据和总磁场强度数据进行反演，反演结果表明聚焦联合反演高效且易实施。图7给出了联合聚焦反演地下地层模型，与单独反演重力梯度或者总磁场强度的模型相比，该模型具有更清晰的地理空间边界和更强的结构相关性。

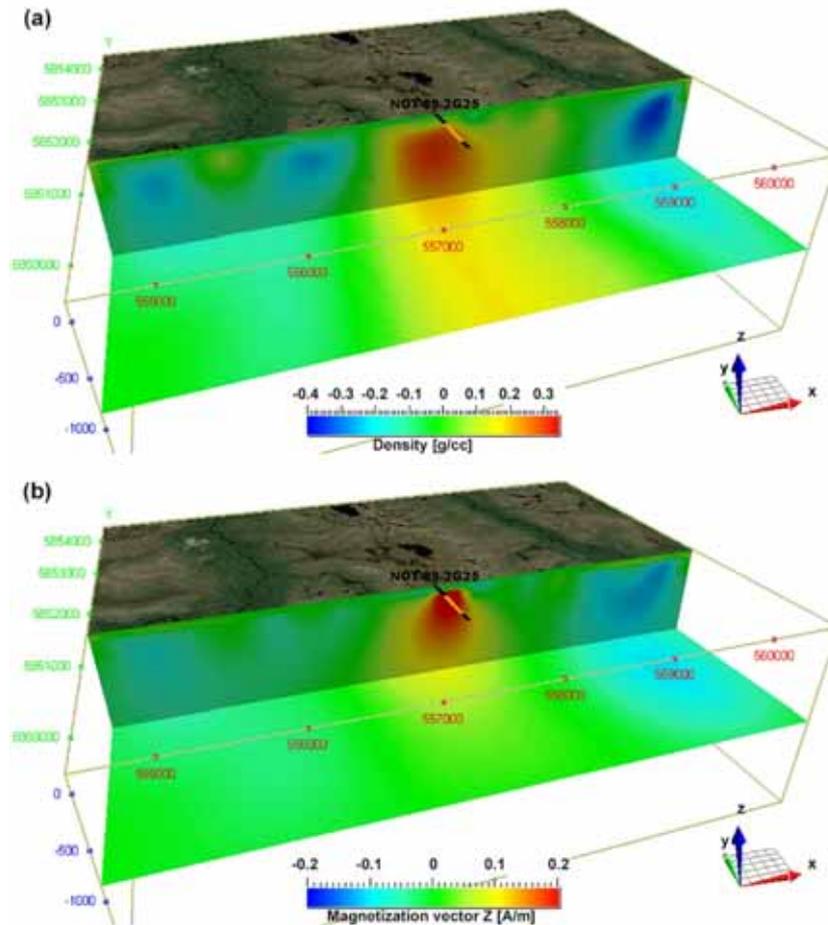


图7 加拿大安大略省钒钛矿床 (a) 反演密度模型的截面三维图像 (b) 磁化矢量垂直分量的截面图像。黑色-黄色-黑色实线显示了测量区域内钻孔的位置。黄色表示钻孔确认的矿化带<sup>[92]</sup>

Fig. 7 Thunderbird Vanadium-Titanium target in Ontario, Canada. (a) shows the cut-off 3D image of the inverse density model. (b) presents the volume image of the vertical component of the magnetization vector. The black–yellow–black solid line shows the location of the borehole drilled in the survey area. The yellow color indicates the mineralization zone confirmed by drilling<sup>[92]</sup>.

“十八大”以来，重磁法勘探的目标更广泛用于有色金属矿床勘探。王万银等<sup>[93]</sup>利用高精度重力与磁测数据对甘肃西成铅锌矿、北方沉积型铝土矿、吐尔库班套铜镍矿、南岭于都-赣县金银铜矿集区进行了应用研究，为深部控矿岩体和构造的划定提供了地球物理依据。孟小红等<sup>[94]</sup>在闽西南大排多金属矿区进行了航磁测量，通过对航磁异常三维反演推定了三个较大隐伏磁性岩体分布，间接划定剖面断层与控矿构造形态，给出了与铅锌多金属成矿关系密切的岩浆岩岩体的空间赋存状态。LI等<sup>[95]</sup>对湖南通道县地面磁测数据进行反演，预测了铜镍矿床的空间分布范围，表明该铜镍矿床位于辉石橄榄岩和橄榄-辉石岩中。MENG等<sup>[96]</sup>基于加速的聚焦反演方法反演了陕西华阳川地区的重力数据，推断了多个高密度有色金属矿体位置与周边控矿构造。陈思静等<sup>[97]</sup>通过航磁异常视磁化率成像反演结果提取出内蒙古维拉斯托北侧地下的隐伏矿体信息，并拟定三处有色金属成矿远景区，为后续在该区域的找矿工作提供间接参考。DI等<sup>[98]</sup>在辽东地区开展了 1:1 万的扫面性航空磁法，对华北克拉通破坏型金矿的深大断裂进行预测，并圈定了三个成矿远景区。ZHANG等<sup>[99]</sup>利用重力、航磁数据约束CSAMT结果对金川铜镍矿床进行了成矿远景区预测，与钻探结果吻

合较好，见图 8。

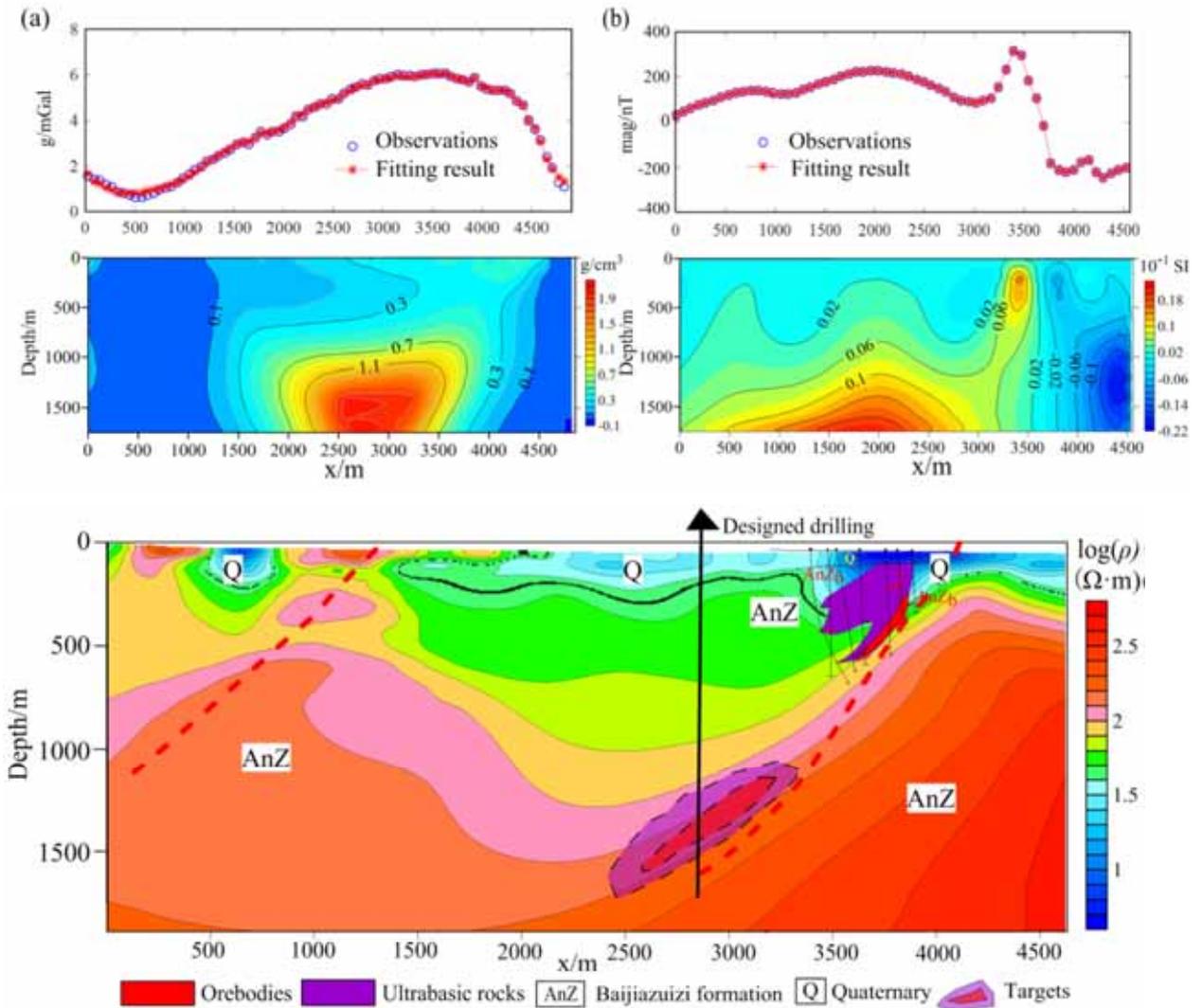


图 8 金川铜镍矿区重力、航磁约束下的CSAMT深部矿体推断图<sup>[99]</sup>

Fig. 8 Jinchuan Cu–Ni sulfide deposit. Inversion results of the gravity (a) and aeromagnetic (b) data of Lmg-4. CSAMT data inversion result and interpretation of Lmg-4<sup>[100]</sup>

YAN等<sup>[101]</sup>利用江西朱溪 1:50000 的重力和航磁数据完成了 18 个剖面的人机交互航空重磁反演，得到了该区域 5km 以下侵入体和地层的空间形状和地质模型，并圈定预测了五个多金属矿床（钨、铜、银、锌）成矿靶区。采用基于重磁反演约束的三维地质建模，可以大大减少反演的多重性，从而提高模型的可靠性，因此该方法被证明是一种在矿集尺度上进行找矿预测的有效方法。CHEN等<sup>[102]</sup>利用重力场分解、边缘检测和反演建模等综合重力数据分析方法，对中国南岭地区的钨锡多金属矿床的空间分布进行了预测。HAN等<sup>[103]</sup>提出了一种三维隧道高精度重力勘探方法（TGEM），并将其用于川滇黔交界区域的高密度铅锌矿床，取得了有效的应用，结合先查过勘查和钻孔等地质资料，定位了该高密度倾斜铅锌矿床靶区，如图 9 所示。

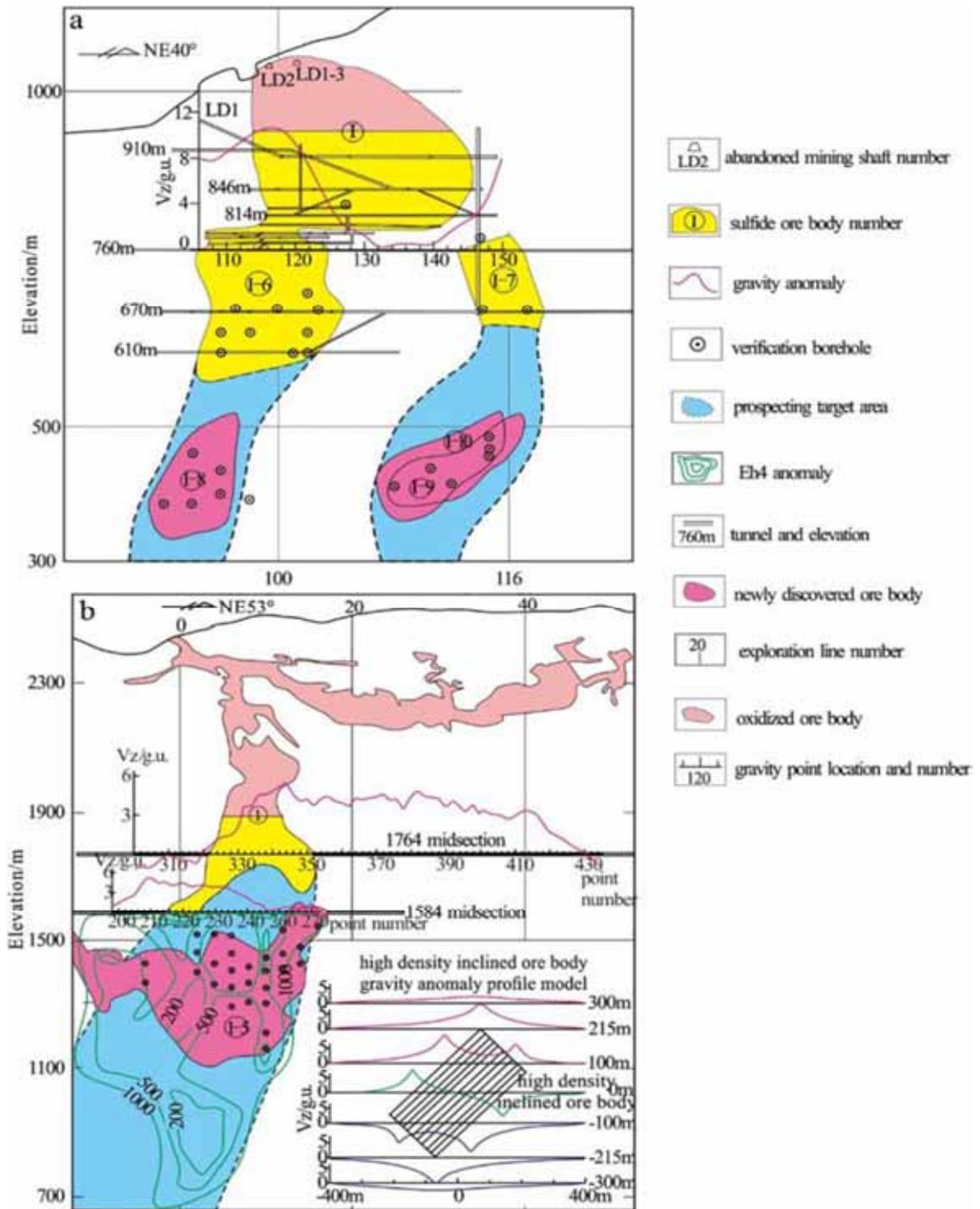


图9 TGEM方法圈定的成矿靶区；(a)Maoping铅锌矿；(b)Huize铅锌矿<sup>[103]</sup>

Fig. 9 Map of TGEM prospecting targets and site exploration results at the Maoping Pb-Zn ore deposit (a) and (b) Huize Pb-Zn ore deposit<sup>[103-104]</sup>

由上可见，重磁方法在有色金属矿勘探中的应用逐渐从地面测量转向航空高精度测量。大范围的航空磁法和重力勘探扮演着越来越重要的角色，多种航空数据的处理和解释方式也取得了较好效果，这对深部金属矿勘探无疑具有巨大推动作用<sup>[100-105]</sup>。同时重力和磁法勘探在有色金属矿产综合物探中常作为电磁、地震的约束手段，这对圈定有色金属矿产起了极大的推动作用。除了在找矿中运用，重磁方法还可以预测矿产资源开采中潜在的安全和环境问题，这对于优化采矿设计和提高矿山的生产安全至关重要，例如对于重

工业发展的地区磁法是一种性价比较高的监测重金属污染的措施<sup>[104]</sup>。

## 5 结论与展望

随着仪器设备的更新、数据处理方法的改善、反演与解释技术的发展，重磁勘探技术在有色金属勘探中的应用越来越广泛。相关的进展归纳如下：

1) 设备研制方面。目前广泛应用于有色金属勘探的重力仪主要为加拿大Scintrex公司CG-5重力仪。我国研制的ZSM-6地面重力仪，各项技术指标也基本达到国际先进水平。重力梯度仪研制也取得了迅速的发展，美国Maryland大学研制的重力梯度仪样机精度可达0.01E。在国家重点研发计划的支持下，我国多家单位进行重力梯度仪的研制，取得了可喜的进展。随着传感器与数字滤波技术的发展，航空重力及其梯度测量技术逐步实现了商业化矿产勘探。磁力仪器设备的研制已经发展到了以基于低温量子效应的超导磁力仪、超导梯度仪。

2) 数据处理方面。实测数据常包含各种因素产生的噪声干扰成分，大多表现为随机变化的高频信号，需要压制数据中的干扰以提高信噪比。去噪方法可分为空间域去噪和变换域去噪两大类。空间域去噪方法常有失真现象出现，因此变换域去噪方法目前处于主流位置。去噪后的数据还需要经过区域和局部异常分离，异常分离方法同样包含空间域和频率域两大类，空间域中最流行的异常分离方法为延拓方法。频率域的异常分离方法常采用傅里叶变换和小波变换。边界识别、源参数估计等定性判断手段能帮助快速了解地质构造与实现对矿产的空间赋存位置等方面的快速判断。基于总梯度的边界识别方法是最受欢迎的方法之一，后续又出现了倾斜角等相位滤波法。随着张量梯度数据测量越来越多，利用梯度计算或全张量梯度相关量进行边界识别的方法，也逐渐占据重要的位置。

3) 反演技术方面。重磁正演可在空间域和频率域进行。空间域正演可采用解析求解方法与数值计算方法。目前已经出现了任意多面体单元的重磁解析解。空间域解析求解方法的缺点为计算速度慢，当处理大规模问题的时候，需要借助于快速多级展开、小波压缩、并行加速等技术来提高效率。空间域数值计算方法一般包括有限差分法、有限体积法、有限元方法等，其优点为计算速度快缺点是后处理求导过程中有精度损失。重磁反演主要分为界面反演和物性反演两大类，目前物性反演被广泛应用，物性反演中常用的正则化条件有深度加约束、参考模型约束、物性范围约束、光滑模型约束、聚焦约束等。反演算法方面常采用高斯牛顿法、共轭梯度法、有限内存BFGS拟牛顿法等线性化算法，也可以采用全局优化和人工智能方法等非线性方法。

4) 勘探应用方面。有色金属重磁勘探主要有两种方式，一是根据密度或磁异常在一定条件下直接寻找矿体，即直接找矿，二是间接找矿。磁探测效果很大程度上取决于目标体与围岩的磁性强弱，定位效果较好，而重力勘探的分辨率相对有限，特别是垂向分辨率较低，但水平分辨率较好，因此重磁勘探目前常常需要与其它地球物理方法、地质信息协同结合解释，以提高勘探效果。当前，重磁方法在有色金属矿勘探中的应用逐渐从地面测量转向航空高精度测量。大范围的航空磁法和重力勘探扮演着越来越重要的角色，多种航空数据的处理和解释方式也取得了较好效果，这对有色金属勘探无疑具有巨大推动作用。

重磁方法在未来有色金属矿中的勘探主要有以下几个方面的发展趋势：

1) 超导重力仪和重力梯度仪受到重视。科技部国家重点研发计划项目推动了航空重力梯度测量技术研究。研发实用型航空重磁仪、重力梯度仪是掌握未来国内外有色金属矿勘探行业主动权的保证。磁力仪器设备的发展趋势研制基于低温量子效应的超导磁力仪和航空磁梯度仪。基于常温超导材料的全张量磁力仪的研究是未来的一个重要发展方向。另外,继续研发分辨率高、携带轻便、抗干扰能力强的重磁仪器设备仍然是重点方向。

2) 基于人工智能、深度学习的数据处理与解释手段的发展势头迅速。融合多源地质地球物理数据来提高反演的可靠性是重磁数据反演解释的发展趋势。结合井中、地面、航空重磁及梯度张量的同类型数据来降低反演多解性,融合其他地球物理数据如地震数据和电磁数据,进行联合反演来改善反演效果,同时综合运用化探、钻探、遥感等多种资料进行解释,实现深部有色矿产资源的精细刻画。结合最新的计算几何知识,实现反演过程的可视化也是一种趋势。

3) 借助于航空测量技术的发展,重磁勘探方法预期会在我国广阔的戈壁、沙漠、沼泽、植被等区域发挥出更重要的作用,为探测出更多的有色金属矿产提供技术支撑。

## REFERENCES

- [1] 王志辉,吕庆田,严加永. 金矿地球物理勘查方法综述[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(2):0805-0813.  
WANG Zhi-hui, LÜ Qing-tian, YAN Jia-yong. Review of geophysics for gold deposit[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(2):0805-0813.
- [2] 杨剑. 滇西北衙金多金属矿床综合地球物理勘探模式研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2016.  
YANG Jian. Research on Geophysical Prospecting Model of Beiya polymetallic deposit in west of Yunnan [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- [3] BLAKELY R J. Potential Theory in Gravity & Magnetic Applications [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- [4] 房丰洲,顾春阳. 高精度重力仪的测量原理与发展现状[J]. 仪器仪表学报, 2017, 038(008):1830-1840.  
FANG Feng-zhou, GU Chun-yang. Measurement principle and development status of high precision gravimeters[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 038(008):1830-1840.
- [5] 邢乐林,李辉,夏正超,等. CG-5 重力仪零漂特性研究[J]. 地震学报, 2010, 32(3):369-373.  
XING Le-lin, LI Hui, XIA Zheng-chao, et al. Study on zero drift characteristics of CG-5 gravimeter[J]. Acta seismologica sinica, 2010, 32(3):369-373.
- [6] 邓友茂,王振亮,孙诚业. CG 型重力仪性能对比分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2021, 41(4):432-435.  
DENG You-mao, WANG Zhen-liang, SUN Cheng-ye. Comparative Analysis of the CG Gravimeters Performance[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2021, 41(4):432-435.
- [7] 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.

Lü Qing-tian, ZHANG Xiao-pei, TANG Jing-tian, 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.

- [8] 陶照明, 梁连仲, 秦佩, 等. ZSM-6 高精度数字重力仪原理与应用试验[J]. 地质装备, 2021, 22(02):23-28.  
TAO Zhao-ming, LIANG Lian-zhong, QING Pei, et al. The principle and application test of ZSM-6 high precision digital gravimeter[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2021, 22(02):23-28.
- [9] 贾剑钢, 栾威, 申文斌. iGrav-007 超导重力仪格值的精密测定[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(10):1366-1370, 1376.  
JIA Jian-gang, LUAN Wei, SHEN Wen-bin. Accurate Determination of the Calibration Factor of iGrav-007 Superconducting Gravimeter[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(10):1366-1370, 1376.
- [10] 刘向东, 刘习凯, 马东, 等. 超导重力仪器: 机遇与挑战[J]. 导航与控制, 2019, 18(3):7-13.  
LIU Xiang-dong, LIU Xi-kai, MA Dong, et al. Superconducting Gravity Instrument: Opportunities and Challenges[J]. Navigation and Control, 2019, 18(3):7-13.
- [11] 宋宏伟. 基于冷原子干涉仪的重力梯度精密测量研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.  
SONG Hong-wei. Precise measurement of gravity gradient based on the cold atom interferometer [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2017.
- [12] OLESEN A V. Improved airborne scalar gravimetry for regional gravity field mapping and geoid determination [D]. Copenhagen: University of Copenhagen, 2002.
- [13] SANDER S, ARGYLE M, ELIEFF S, et al. The AIRGrav airborne gravity system[J]. Airborne Gravity, 2004:49-53.
- [14] 孙中苗, 翟振和, 李迎春. 航空重力仪发展现状和趋势[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(1):1-8.  
SUN Zhong-miao, ZHAI Zhen-he, LI Ying-chun. Status and development of airborne gravimeter[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(1):1-8.
- [15] 孙中苗, 翟振和, 吴富梅, 等. 捷联式航空重力测量算法比较[J]. 地球物理学报, 2015, 58(5):1547-1554.  
SUN Zhong-miao, ZHAI Zhen-he, WU Fu-mei, et al. Algorithm comparison for strapdown airborne gravimetry[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(5):1547-1554.
- [16] DRANSFIELD M, CHRISTENSEN A, ROSE M, et al. FALCON test results from the Bathurst Mining camp[J]. Exploration Geophysics, 2001, 32(4):243-246.
- [17] 朱自强, 曾思红, 鲁光银, 等. 二度体的重力张量有限元正演模拟 [J]. 物探与化探, 2010, 34(5): 668-671.
- [18] DIFRANCESCO D, GRIERSON A, KAPUTA D, et al. Gravity gradiometer systems—advances and challenges[J]. Geophysical prospecting, 2009, 57(4):615-623.

- [19] 舒 晴. 航空重力梯度测量技术研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2018.  
SHU Qing. The study of airborne gravity gradiometry [D]. Chuangchun: Jilin University, 2018.
- [20] 商 昊. JPM-4 质子旋进磁力仪研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2020.  
SHANG Hao. Research on JPM-4 Proton Precession Magnetometer [D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [21] 郑兴国. 野外 $\gamma$ 能谱、X荧光和地面高精度磁测在航磁异常查证中的应用研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2011.  
ZHENG Xing-guo. Application study of x fluorescence analysis technology, gamma-ray spectrometry and precision ground magnetic survey technology in aeromagnetic anomaly inspection [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.
- [22] LEGER J M, BERTRAND F, JAGER T, et al. Swarm absolute scalar and vector magnetometer based on helium 4 optical pumping[J]. Procedia Chemistry, 2009, 1(1):634-637.
- [23] 王晓美, 滕云田, 王晨, 等. 磁通门磁力仪野外台阵观测技术系统研制[J]. 地震学报, 2012, 34(03):389-396+426.  
WANG Xiao-mei, TENG Yun-tian, WANG Chen, et al. Development of field array observation technique system with fluxgate magnetometers[J]. Acta Seismologica Sinica, 2012, 34(03):389-396+426.
- [24] 赵 静, 刘光达, 安战锋, 等. 提高高温超导磁力仪动态范围的补偿方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2011, 41(05):1342-1347.  
ZHAO Jing, LIU Guang-da, AN Zhan-feng, et al. Compensation method for improving dynamic range of HTS SQUID magnetometer[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2011, 41(05):1342-1347.
- [25] 林 君, 刁 庶, 张 洋, 等. 地球物理矢量场磁测技术的研究进展[J]. 科学通报, 2017, 62(23):13.  
LIN Jun, DIAO Shu, ZHANG Yang, et al. Research progress of geophysical vector magnetic field survey technology[J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(23):13.
- [26] 高全明. 固定翼无人机航磁三分量系统误差校正与干扰补偿技术研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2020.  
GAO Quan-ming. Research on system error calibration and interference compensation technology of aeromagnetic three-component survey based on fixed-wing UAV [D]. Chuangchun: Jilin University, 2020.
- [27] 张连伟, 郑彦鹏, 梁瑞才, 等. 基于小波变换的海洋地磁日变改正研究[J]. 海洋科学进展, 2020, 38(04):635-648.  
ZHANG Lian-wei, ZHENG Yan-peng, LIANG Rui-cai, et al. Study of marine geomagnetic diurnal variation correction based on wavelet transform[J]. Advances in Marine Science, 2020, 38(04):635-648.

- [28] 姚长利, 何慧优, 李淑玲, 等. 滑动窗口混合加权法磁异常保真去噪研究[J]. 地球物理学报, 2009, 52(011):2893-2902.  
YAO Chang-li, HE Hui-you, LI Shu-ling, et al. Denoising of magnetic data and anti-aliasing of the anomalies in a weighting procedure[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(011):2893-2902.
- [29] 杨磊. 基于 BP 神经网络的重力异常分离[J]. 工程地球物理学报, 2021, 18(01):90-97.  
YANG Lei. Gravity anomaly separation based on BP neural network[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2021, 18(01):90-97.
- [30] ZHANG C, Lü Q T, YAN J Y, et al. Numerical solutions of the mean-value theorem: New methods for downward continuation of potential fields[J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45:3461-3470.
- [31] SYBERG F J R. A fourier method for the regional-residual problem of potential fields [J]. Geophysical Prospecting, 1972, 20(1): 47-75.
- [32] PAWLOWSKI R S. Preferential continuation for potential-field anomaly enhancement [J]. Geophysics, 1995, 60(2): 390-398.
- [33] 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 Meng-long. The research and application on several processing methods to the potential-field data [D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [34] 杨学立, 周树亮, 高宝龙, 等. 小波多尺度分析在重磁勘探位场解释中的应用[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(06):2707-2716.  
YANG Xue-li, ZHOU Shu-Liang, GAO Bao-long, et al. Application of multi-scale wavelet analysis in gravity data interpretation[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(06):2707-2716.
- [35] 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, 04(3):6-15.  
TANG Jing-tian, SONG Shou-gen, HE Ji-shan. Multi-resolution analysis and identification and hierarchical extraction of gravity and magnetic anomalies[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1994, 04(3):6-15.
- [36] 张代磊. 全张量重力梯度数据信号增强及解释方法研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2018.  
ZHANG Dai-lei. The study on signal enhancement and interpretation methods of full tensor gravity gradient data [D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [37] ZHANG D L, HUANG D N, PING Y, et al. Translation-invariant wavelet denoising of full-tensor gravity-gradiometer data[J]. Applied Geophysics, 2017, 14(4):606-619.
- [38] BEIKI M. Analytic signals of gravity gradient tensor and their application to estimate source location [J]. Geophysics, 2010, 75(6): I59-I74.
- [39] HIDALGO-GATO M C, BARBOSA V C F. Edge detection of potential-field sources using scale-space monogenic signal: Fundamental principles [J]. Geophysics, 2015, 80(5): J27-J36.
- [40] 王彦国, 张凤旭, 刘财, 等. 位场垂向梯度最佳自比值的边界检测技术[J]. 地球物理学报, 2013, 56(7):2463-2472.

- WANG Yan-guo, ZHANG Feng-xu, LIU Cai, et al. Edge detection in potential fields using optimal auto-ratio of vertical gradient[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(7):2463-2472.
- [41] LI Y G. Understanding curvatures of the equipotential surface in gravity gradiometry [J]. Geophysics, 2018, 83(4): G35-G45.
- [42] 胡双贵, 汤井田, 任政勇, 等. 基于尺度空间技术的归一化 Facet 模型位场边界识别[J]. 地球物理学报, 2019, 62(1):331-342.
- HU Shuang-gui, TANG Jing-tian, REN Zheng-yong, et al. Normalized facet edge detection and enhancement in potential field sources with the scale-space technique[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(1):331-342.
- [43] 陈 贝. 基于深度卷积神经网络的位场数据去噪研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- CHEN Bei. Research on denoising of potential field data based on deep convolutional neural network [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020.
- [44] TALWANI M, EWING M. Rapid computation of gravitational attraction of three-dimensional bodies of arbitrary shape [J]. Geophysics, 1960, 25(1): 203-225.
- [45] TSOULIS D. Analytical computation of the full gravity tensor of a homogeneous arbitrarily shaped polyhedral source using line integrals [J]. Geophysics, 2012, 77(2): F1-F11.
- [46] REN Z Y, CHEN C J, PAN K J, et al. Gravity anomalies of arbitrary 3D polyhedral bodies with horizontal and vertical mass contrasts[J]. Surveys in geophysics, 2017, 38(2):479-502.
- [47] REN Z Y, ZHONG Y Y, CHEN C J, et al. Gravity gradient tensor of arbitrary 3D polyhedral bodies with up to third-order polynomial horizontal and vertical mass contrasts[J]. Surveys in Geophysics, 2018, 39(5):901-935.
- [48] CHEN C J, REN Z Y, PAN K J, et al. Exact solutions of the vertical gravitational anomaly for a polyhedral prism with vertical polynomial density contrast of arbitrary orders[J]. Geophysical Journal International, 2018, 214(3):2115-2132.
- [49] REN Z Y, CHEN C J, ZHONG Y Y, et al. Recursive analytical formulae of gravitational fields and gradient tensors for polyhedral bodies with polynomial density contrasts of arbitrary non-negative integer orders[J]. Surveys in Geophysics, 2020, 41(4):695-722.
- [50] 陈超健. 任意多面体重力和磁法解析计算 [D]. 长沙: 中南大学, 2018.
- CHEN Chao-jian. Analytic solution of gravity and magnetic method of arbitrary polyhedron [D]. Changsha: Central South University, 2018.
- [51] REN Z Y, CHEN C J, TANG J T, et al. Closed-form formula of magnetic gradient tensor for a homogeneous polyhedral magnetic target: A tetrahedral grid example[J]. Geophysics, 2017, 82(6):WB21-WB28.
- [52] REN Z Y, TANG J T, KALSCHUEER T, et al. Fast 3-D large-scale gravity and magnetic modeling using unstructured grids and an adaptive multilevel fast multipole method[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2017, 122(1):79-109.

- [53] MOORKAMP M, JEGEN M, ROBERTS A, et al. Massively parallel forward modeling of scalar and tensor gravimetry data[J]. *Computers & Geosciences*, 2010, 36(5):680-686.
- [54] JAHANDARI H, FARQUHARSON C G. Forward modeling of gravity data using finite-volume and finite-element methods on unstructured grids [J]. *Geophysics*, 2013, 78(3): G69-G80.
- [55] KH IVANOV DULUS. Numerical solution of a boundary value problem with effective boundary conditions for calculation of gravity [J]. *Математические заметки СВФУ*, 2021, 28(1): 93-113.
- [56] COOLEY J W, TUKEY J W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series [J]. *Mathematics of Computation*, 1965, 19(90): 297-301.
- [57] HANSEN R O. Simplified frequency-domain expressions for potential fields of arbitrary three-dimensional bodies [J]. *Geophysics*, 1988, 53(3): 365-374.
- [58] 吴乐园. 重磁位场频率域高精度正演方法:Gauss-FFT法 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.  
WU Le-yuan. High-precision Fourier-domain modeling of potential fields: Gauss-FFT method [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [59] ZHAO G D, CHEN B, CHEN L W, et al. High-accuracy 3D Fourier forward modeling of gravity field based on the Gauss-FFT technique[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2018, 150:294-303.
- [60] WU L Y, CHEN L W, WU B, et al. Improved Fourier modeling of gravity fields caused by polyhedral bodies: With applications to asteroid Bennu and comet 67P/Churyumov–Gerasimenko[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(10):1963-1984.
- [61] HE S Y, CAI H Z, LIU S, et al. Recovering 3D Basement Relief Using Gravity Data Through Convolutional Neural Networks[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(10):e2021JB022611.
- [62] LI Y G, OLDENBURG D W. 3-D inversion of gravity data [J]. *Geophysics*, 1998, 63(1): 109-119.
- [63] PORTNIAGUINE O, ZHDANOV M S. Focusing geophysical inversion images [J]. *Geophysics*, 1999, 64(3): 874-887.
- [64] ZHDANOV M S. *Geophysical electromagnetic theory and methods* [M]. Elsevier, 2009.
- [65] SUN J J, LI Y G. Adaptive L<sub>p</sub> inversion for simultaneous recovery of both blocky and smooth features in a geophysical model [J]. *Geophysical Journal International*, 2014, 197(2): 882-899.
- [66] ABEDI M. A focused and constrained 2D inversion of potential field geophysical data through Delaunay triangulation, a case study for iron-bearing targeting at the Shavaz deposit in Iran [J]. *Physics of the Earth Planetary Interiors*, 2020, 309: 106604.
- [67] MELO A, LI Y G. Geological characterization applying k-means clustering to 3D magnetic, gravity gradient, and DC resistivity inversions: A case study at an iron oxide copper gold (IOCG) deposit; proceedings of the 2016 SEG International Exposition and Annual Meeting, F, 2016 [C]. OnePetro.
- [68] 张镭哲, 李桐林, 刘 财, 等. 基于数据空间和稀疏约束的三维重力和重力梯度数据联合反演[J]. *地球物理学报*, 2021, 64(3):1074-1089.  
ZHANG Rong-zhe, LI Tong-lin, LIU Cai, et al. Three-dimensional joint inversion of gravity and

- gravity gradient data based on data space and sparse constraints[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(3):1074-1089.
- [69] ZUO B X, HU X Y, WANG L Z, et al. 3-D Magnetic Unstructured Inversion[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2021, 126(11):e2021JB022668.
- [70] LI Y G, SUN J J. 3D magnetization inversion using fuzzy c-means clustering with application to geology differentiation [J]. Geophysics, 2016, 81(5): J61-J78.
- [71] BOSCHETTI F, DENTITH M, LIST R. Inversion of potential field data by genetic algorithms [J]. Geophysical Prospecting, 1997, 45(3): 461-478.
- [72] 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 Wen-bin, ZHU Zi-qiang, LU Guang-yin. 3-D gravity inversion for physical properties using BP network[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(2):409-416.
- [73] VASCO D W. Resolution and variance operators of gravity and gravity gradiometry [J]. Geophysics, 1989, 54(7): 889-899.
- [74] FEDI M, FLORIO G, RAPOLLA A. 2.5 D modelling of Somma–Vesuvius structure by aeromagnetic data [J]. Journal of Volcanology Geothermal Research, 1998, 82(1-4): 239-247.
- [75] ZHDANOV M S, ELLIS R, MUKHERJEE S. Three-dimensional regularized focusing inversion of gravity gradient tensor component data [J]. Geophysics, 2004, 69(4): 925-937.
- [76] CAPRIOTTI J, LI Y G. Gravity and gravity gradient data: Understanding their information content through joint inversions [M]. SEG Technical Program Expanded Abstracts 2014. Society of Exploration Geophysicists. 2014: 1329-1333.
- [77] LU G Y, CAO S J, ZHU Z Q. Joint inversion of gravity and multiple components of tensor gravity data [J]. Journal of Central South University, 2016, 23(7): 1767-1777.
- [78] 张志厚, 廖晓龙, 曹云勇, 等. 基于深度学习的重力异常与重力梯度异常联合反演[J]. 地球物理学报, 2021, 64(4):1435-1452.
- ZHANG Zhi-hou, LIAO Xiao-long, CAO Yun-yong, et al. Joint gravity and gravity gradient inversion based on deep learning[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(4):1435-1452.
- [79] 张镡哲, 李桐林, 邓海, 等. 大地电磁, 重力, 磁法和地震初至波走时的交叉梯度二维联合反演研究[J]. 地球物理学报, 2019, 62(6):2139-2149.
- ZHANG Rong-zhe, LI Tong-lin, DENG Hai, et al. 2D joint inversion of MT, gravity, magnetic and seismic first-arrival wave traveltimes with cross-gradient constraints[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(6):2139-2149.
- [80] LINES L R, SCHULTZ A K, TREITEL S. Cooperative inversion of geophysical data [J]. Geophysics, 1988, 53(1): 8-20.
- [81] LELIÈVRE P G, FARQUHARSON C G, HURICH C A. Joint inversion of seismic traveltimes and gravity data on unstructured grids with application to mineral exploration [J]. Geophysics, 2012, 77(1):

K1-K15.

- [82] SUN J J, LI Y G. Joint inversion of multiple geophysical and petrophysical data using generalized fuzzy clustering algorithms [J]. *Geophysical Journal International*, 2017, 208(2): 1201-1216.
- [83] SUN J J, LI Y G. Joint inversion of multiple geophysical data using guided fuzzy c-means clustering [J]. *Geophysics*, 2016, 81(3): ID37-ID57.
- [84] MAAG ELIZABETH, LI Y G. Discrete-valued gravity inversion using the guided fuzzy c-means clustering technique [J]. *Geophysics*, 2018, 83(4): G59-G77.
- [85] 殷长春, 孙思源, 高秀鹤, 等. 基于局部相关性约束的三维大地电磁数据和重力数据的联合反演[J]. *地球物理学报*, 2018, 61(1):358-367.
- YIN Chang-chun, SUN Si-yuan, GAO Xiu-he, et al. 3D joint inversion of magnetotelluric and gravity data based on local correlation constraints[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(1):358-367.
- [86] 闫政文, 谭捍东, 彭 森, 等. 基于交叉梯度约束的重力, 磁法和大地电磁三维联合反演[J]. *地球物理学报*, 2020, 63(2):736-752.
- YAN Zheng-wen, TAN Han-dong, PENG Miao, et al. Three-dimensional joint inversion of gravity, magnetic and magnetotelluric data based on cross-gradient theory[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(2):736-752.
- [87] TWEEDIE E B. The Evander Goldfield; proceedings of the Mineral Deposits of Southern Africa, F, 1986 [C].
- [88] MARQUES F, MATOS J X, SOUSA P, et al. The role of land gravity data in the Neves-Corvo mine discovery and its use in present-day exploration and new target generation[J]. *First Break*, 2019, 37(8):97-102.
- [89] FARQUHARSON C G, ASH M R, MILLER H G. Geologically constrained gravity inversion for the Voisey's Bay ovoid deposit [J]. *The Leading Edge*, 2008, 27(1): 64-69.
- [90] KHEYROLLAHI H, ALINIA F, GHODS A. Regional magnetic and gravity structures and distribution of mineral deposits in Central Iran: Implications for mineral exploration [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2021, 217: 104828.
- [91] HUANG R, LIU S, QI R, et al. Deep Learning 3D Sparse Inversion of Gravity Data[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(11):e2021JB022476.
- [92] JORGENSEN M, ZHDANOV M S. Recovering Magnetization of Rock Formations by Jointly Inverting Airborne Gravity Gradiometry and Total Magnetic Intensity Data [J]. *Minerals*, 2021, 11(4): 366.
- [93] 王万银, 冯旭亮, 高玲举, 等. 重磁方法在吐尔库班套铜镍矿区勘查中的应用[J]. *物探与化探*, 2014, 38(03):423-429.
- WANG Wan-yin, FENG Xu-liang, GAO Ling-ju, et al. The application of gravity and magnetic techniques to the prospecting for the Tuerkubantao copper-nickel ore district[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2014, 38(03):423-429.

- [94] 孟小红, 王俊, 刘国峰, 等. 闽西南大排多金属矿区地球物理响应特征与找矿启示[J]. 地球物理学报, 2021, 64(03):949-964.  
MENG Xiao-hong, WANG Jun, LIU Guo-feng, et al. Geophysical response characteristics of the Dapai polymetallic mining area in Southwestern Fujian Province and its prospecting implications[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(03):949-964.
- [95] LI Z L, YAO C L, ZHENG Y M, et al. 3D magnetic sparse inversion using an interior-point method[J]. Geophysics, 2018, 83(3):J15-J32.
- [96] MENG Q F, MA G Q, WANG T H, et al. The Efficient 3D Gravity Focusing Density Inversion Based on Preconditioned JFNK Method under Undulating Terrain: A Case Study from Huayangchuan, Shaanxi Province, China[J]. Minerals, 2020, 10(9):741.
- [97] 陈思静, 胡祥云, 刘双. 内蒙古维拉斯托地区高精度航磁调查与应用研究[J]. 地球科学, 2021:1-28.  
CHEN Si-jing, HU Xiang-yun, LIU Shuang. Application study on high precision aeromagnetic survey in Weilasituo, Inner Mongolia, China[J]. Earth Science, 2021:1-28.
- [98] DI Q Y, XUE G Q, LEI D, et al. Summary of technology for a comprehensive geophysical exploration of gold mine in North China Craton[J]. Science China Earth Sciences, 2021, 64(9):1524-1536.
- [99] ZHANG Jian-min, ZHENG Zhao-fa, ZHAO Xue-yu, et al. Deep mineral exploration of the Jinchuan Cu-Ni sulfide deposit based on aeromagnetic, gravity, and CSAMT methods[J]. Minerals, 2020, 10(2):168.
- [100] YAN J Y, LÜ Q T, LUO F, et al. Gravity and magnetic evidence for the geological setting of major mineral systems of the main metallogenic belts in South China: A qualitative analysis[J]. Acta Geologica Sinica(English Edition), 2021, 95(S1):91-93.
- [101] YAN J Y, LÜ Q T, QI G, et al. A 3d geological model constrained by gravity and magnetic inversion and its exploration implications at the world-class zhuxi tungsten deposit, south china[J]. Acta Geologica Sinica(English Edition), 2020, 94(6):1940-1959.
- [102] CHEN Guo-xiong, LIU Tian-you, SUN Jin-song, et al. Gravity method for investigating the geological structures associated with W-Sn polymetallic deposits in the Nanling Range, China[J]. Journal of Applied Geophysics, 2015, 120:14-25.
- [103] HAN Run-sheng, LI Wen-yao, CHENG Rui-hong, et al. 3D high-precision tunnel gravity exploration theory and its application for concealed inclined high-density ore deposits[J]. Journal of Applied Geophysics, 2020, 180:104119.
- [104] 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 Jian-xin, SUN Huan-le, CHEN Bo, et al. Review of the gravity and magnetic methods in the exploration of metal deposits[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(2):713-722.
- [105] GUO Z W, LAI J Q, ZHANG K N, et al. Geosciences in central south university: a state-of-the-art

## Progress of gravity and magnetic method in nonferrous metal mineral exploration

LIU Jian-xin<sup>1,2\*</sup>, REN Zheng-yong<sup>1,2\*</sup>, YUE Guo-xuan<sup>1,2</sup>, ZHANG Yuan-lei<sup>1,2</sup>

(1. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China

2. Key Laboratory of Non-ferrous and Geological Hazard Detection, Central South University, Changsha 410083, China;)

**Abstract:** Gravity and magnetic exploration have the advantages of sensitive to metal minerals, low cost, high efficiency, which have played an important role in the delineation of non-ferrous metal minerals. With the updating of instruments and the rapid development of data processing and interpretation methods, gravity and magnetic exploration have become more and more mature, and the corresponding data processing and inversion have also entered the stage of high-dimensional, high-precision, and high-resolution. We analyze the status and progress of gravity and magnetic exploration methods in non-ferrous metal minerals exploration from four aspects: basic principles, instruments and equipment, data processing and inversion methods, and representative exploration cases. Then we summarize the development trend and application prospects. The relevant conclusions can serve non-ferrous metal minerals exploration peers and provide certain support for the exploration of strategic non-ferrous metal minerals reserves and distribution.

**Key words:** Gravity exploration; magnetic exploration; non-ferrous metal mineral resources; gravity and magnetic equipment; strategic minerals

---

**Foundation item:** This work is jointly supported by the National Natural Science Foundation of China (42130810 and 41830107)

**Corresponding author:** LIU Jian-xin; Tel: +86-13807486248; E-mail: ljx6666@126.com

Ren Zheng-yong; Tel: +86-18874028327; E-mail: renzhengyong@csu.edu.cn