

doi: 10.12097/gbc.2023.12.042

吴成平, 于长春, 张迪硕, 熊盛青, 朱裕振, 侯征, 高秀鹤. 2025. 厚覆盖区磁铁矿空-地-井协同勘查技术体系[J]. 地质通报, 44(6): 1164–1173.

Wu Chengping, Yu Changchun, Zhang Dishuo, Xiong Shengqing, Zhu Yuzhen, Hou Zheng, Gao Xiuhe. 2025. Airborne-surface-borehole cooperative exploration technical system for magnetite exploration in areas with thick overburden[J]. Geological Bulletin of China, 44(6): 1164–1173(in Chinese with English abstract).

厚覆盖区磁铁矿空-地-井协同勘查技术体系

吴成平^{1,2}, 于长春^{1,2*}, 张迪硕^{1,2}, 熊盛青^{1,2}, 朱裕振³, 侯征⁴, 高秀鹤^{1,2}

(1. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 2. 自然资源部航空地球物理与遥感地质重点实验室, 北京 100083; 3. 山东省煤田地质规划勘察研究院, 山东 济南 250104; 4. 河北地质大学, 河北 石家庄 050031)

摘要:【研究目的】厚覆盖区磁铁矿勘查作为深部找矿的重要内容, 工作程度低、矿体引起的异常信号弱、找矿难度大, 亟待探索形成一套行之有效的勘查技术体系。【研究方法】运用空-地-井多维度、多方法勘查手段, 采用远景区-航空物探-地面物探及验证孔-空地井联合反演-钻探逐级逼近的多元信息工作方法, 使用空-地-井地球物理勘查技术、综合地质找矿信息提取方法、岩性构造填图及靶区圈定、基于多元信息的航空重磁联合反演、三维地质-地球物理建模等关键技术。【研究结果】针对厚覆盖区找矿特点, 建立了厚覆盖区磁铁矿空-地-井协同勘查技术体系, 在山东齐河地区应用, 提升了找矿效果, 实现了富铁矿找矿突破。【结论】该技术体系发挥了空-地-井协同勘查优势, 为厚覆盖区磁铁矿勘查提供了理论和技术支撑, 也为厚覆盖区寻找其他类型矿床提供参考。

关键词: 厚覆盖区; 技术体系; 航空重磁; 矿产勘查工程; 磁铁矿

创新点: 建立了针对厚覆盖区磁铁矿勘查的空-地-井协同勘查技术体系。

中图分类号: P318; P618.31; P631 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2025)06-1164-10

Airborne-surface-borehole cooperative exploration technical system for magnetite exploration in areas with thick overburden

WU Chengping^{1,2}, YU Changchun^{1,2*}, ZHANG Dishuo^{1,2}, XIONG Shengqing^{1,2}, ZHU Yuzhen³,
HOU Zheng⁴, GAO Xiuhe^{1,2}

(1. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Airborne Geophysics and Remote Sensing Geology, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China;
3. Shandong Coalfield Geological Planning Investigation Institute, Jinan 250104, Shandong, China;
4. Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China)

Abstract: [Objective] As an important part of deep prospecting, magnetite exploration in areas with thick overburden has some problems such as low exploration level, weak geophysical signals and huge prospecting difficulties. It is urgent to try and form an effective exploration technology system. [Methods] This paper employs multi-dimensional and multi-method airborne-surface-borehole exploration means, uses multi-source information and a step-by-step approach, which is: prospecting

收稿日期: 2023-12-28; 修订日期: 2024-04-06

资助项目: 中国地质调查局项目《ND**工程区航空物探调查》(编号: DD20221640)、山东省地质勘查项目《山东省齐河—禹城富铁矿重点勘查区综合研究及成果集成》(编号: 鲁勘字(2023)2号)、国家重点研发计划项目《综合航空地球物理探测系统集成与方法技术示范研究》(编号: 2017YFC0602201)

作者简介: 吴成平(1982-), 男, 教授级高级工程师, 从事航空地球物理数据处理和资料综合解释。E-mail: chengpingwu@163.com

* 通信作者: 于长春(1964-), 男, 教授级高级工程师, 从事航磁方法技术研究和资料解释工作。E-mail: bjycc@126.com

area—airborne—geophysical methods—surface geophysical methods and verification borehole—airborne—surface—borehole joint inversion—drilling. Key technologies such as airborne—surface—borehole exploration technique, extracting technique for integrated geological prospecting information, lithologic structural mapping and prospecting target delineating technique, airborne—magnetic and gravity joint inversion based on multi—information, 3D geological—geophysical modeling approach are used.

[Results] In response to the characteristics of ore prospecting in areas with thick overburden, an airborne—surface—borehole cooperative exploration technical system for magnetite in such areas has been established. Magnetite has been found in several new boreholes following this technical system. The application of this technology system in Shandong Qihe demonstration area with thick overburden has improved the prospecting effect and achieved a breakthrough in high-grade magnetite ore prospecting. **[Conclusions]** This technical system, taking advantage of airborne—surface—borehole cooperative exploration, provides theoretical and technical support for magnetite prospecting in areas with thick overburden, and also provides reference for prospecting other types of deposits in similar areas.

Key words: areas with thick overburden; technical system; airborne magnetic & gravity method; mineral exploration engineering; magnetite

Highlights: An airborne—surface—borehole cooperative exploration technical system for magnetite prospecting in areas with thick overburden has been established.

About the first author: WU Chengping, male, born in 1982, professor senior engineer, mainly engaged in aerogeophysical data processing and integrated interpretation; E-mail: chengpingwu@163.com

About the corresponding author: YU Changchun, male, born in 1964, professor senior engineer, mainly engaged in the research of aeromagnetic methods and technologies as well as the interpretation of data; E-mail: bjycc@126.com

Fund support: Supported by China Geological Survey Project (No. DD20221640), Shandong Provincial Geological Survey Project (No. SDGZ(2023)2) and National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFC0602201)

技术体系是各种技术之间相互作用、相互联系,按一定目的、一定结构方式组成的技术整体,是科技生产力的一种具体形式(姜振寰等,1990)。各类技术体系广泛应用于各个领域,在提高生产效率、加快基础建设、解决生态环境问题、促进科学技术发展等各方面发挥了重要作用。在地质勘查领域有数十种不同类型的技术体系,如金属矿产勘查方面的立体勘查技术体系、盆地隐伏矿探测技术体系、隐伏岩浆型铜镍矿空地井协同勘查技术体系(中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所,2014;黄旭钊等,2022;史长义和王慧艳,2022);能源勘查方面的煤炭地质综合勘查技术体系、天然气水合物综合探测技术体系、铀矿地质勘查高分辨率遥感应用技术体系、支撑油气勘探开发的智能导钻技术体系等(满旺,2009;李增学等,2011;姚艳领,2016;陈惠玲和吴庐山,2017;占文锋,2018;朱日祥等,2023);还有其他如地下水勘查技术方法体系、地质灾害监测预警防治技术体系等(邱道持等,2006;韩子夜等,2007;左群超,2015;刘程等,2022)。这些技术体系显著提高了相关专业技术水平,在行业技术发展中发挥了重要作用。中国存在大量基岩被第四系松散沉积或其他风化堆积物大面积覆盖的区域,以及地质人员难以

到达的高山峡谷等艰险区和岩溶区等特殊地质地貌区,在这些地区形成有针对性的勘查技术体系,指导勘查工作开展十分必要。

随着中国社会经济发展对矿产资源的需求不断增加,基岩出露区浅表矿产越来越少,厚覆盖区矿产勘查日趋紧迫。重力、磁法等物探方法在深部找矿中应用广泛(刘彦等,2012;严加永等,2014;史蕊等,2018;李凤廷等,2023),但是厚覆盖区铁矿体埋藏深度大,存在弱缓信息获取困难、复合叠加信息分解和识别困难、找矿信息缺失和不完整、找矿难度大等问题。因此,亟需针对厚覆盖区铁矿勘查,建立一套行之有效的方技术组合。齐河地区地表均为厚层的新生代地层覆盖,属典型的厚覆盖区,近年来基于航空物探、地面地质物探、钻探等多方法协同勘查,发现了规模较大的矽卡岩型富磁铁矿。通过在该地区的综合方法找矿预测,形成了厚覆盖区磁铁矿空-地-井协同勘查技术体系,进一步提升了找矿效果,对类似地区寻找矽卡岩型磁铁矿有指导意义。

1 示范区概况

齐河示范区地处黄河北、山东省西北部,属典型的特殊地质地貌——平原覆盖区,其地表广泛覆盖

新生代沉积层,海拔低、地势缓,以往地质工作程度较低。以齐广断裂为界,其北西为华北拗陷区,南东为鲁西隆起区,具体大地构造单元划分见图1。根据区域地质、钻孔等资料,该区地层发育不完整,隐伏地层自上而下包括侏罗系、石炭系、二叠系、寒武系、奥陶系及太古宇泰山岩群等。区内侵入岩属于幔源分异型,燕山晚期岩浆活动强烈,以中基性侵入岩为主,岩性以闪长岩为主,并发育辉石闪长岩等。局部发育花岗岩、花岗岩等酸性岩体。矿体主要为矽卡岩型铁矿,铁矿发育处的闪长岩常发育较强的钠质蚀变,远离铁矿体的闪长岩蚀变较弱。根据相关成矿理论(郝兴中等, 2020, 2023),中基性侵入岩(以闪长岩为主)为示范区铁矿的主要成矿地质体。区内构造因受区域构造活动和岩体上侵影响较发育,断裂以北东向为主、北西向次之,齐广断裂控制着二级构造单元边界。构造交会部位岩体较发育,碳酸盐岩地层与岩体的接触带是铁矿成矿的有利部位(郝兴中等, 2020)。

2 技术体系

2.1 技术体系框架

协同勘查是基于综合勘查基础上的勘查科学的发展,遵循“协调有序、经济合理、优势互补、科学部署、最大收益”的基本原则(李增学等, 2011)。厚覆盖区磁铁矿空-地-井协同勘查技术体系(图2)主要由航空物探、地面物探、钻探测井等勘查方法构成。根据示范区的地质地球物理特征(吴成平等, 2019; 朱裕振等, 2024)、勘查目标等,航空物探优选航空重力和航磁方法,地面物探以重磁联合剖面测量为主,辅以少量大地电磁和地震剖面测量,开展钻探验证和测井,利用“空-地-井”各方法之间优势互补,经过科学部署,取得最佳勘查效果。结合示范区矽卡岩型磁铁矿成矿规律,通过综合地质找矿信息提取、岩性构造填图和靶区圈定、多维多方法地球物理数据联合反演、地球物理-地质建模技术等处理解释关键技术,在圈定磁铁矿找矿靶区的基础上实现找矿突破。

2.2 工作程序

采用“确定远景区—航空物探—地面物探及验证孔—空地井联合反演—钻探”逐级逼近的多元信息环套式工作方法(图2)。以区域地质调查为前提,以航空物探技术为先导,选择相应的物探技术及其

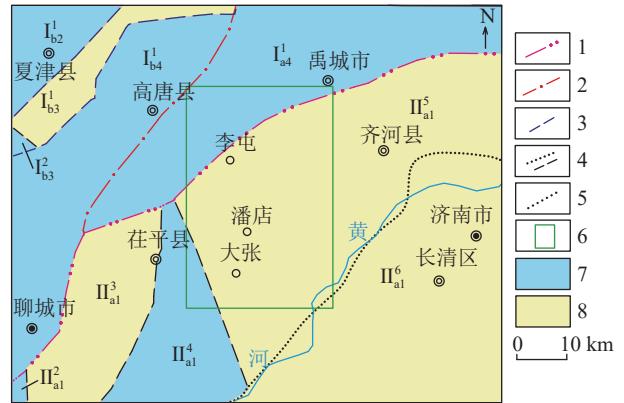


图1 示范区位置及大地构造单元划分

Fig. 1 Location and tectonic units of the demonstration area

1—二级单元界线; 2—三级单元界线; 3—四级单元界线; 4—五级单元界线; 5—不整合界线; 6—示范区; 7—凹陷区; 8—凸起区; I_{a1}^1 —临邑潜凹陷; I_{b1}^1 —德州潜凹陷; I_{b3}^1 —高唐浅凸起; I_{b3}^2 —贾镇浅凹陷; I_{b4}^1 —莘县潜凹陷; II_{a1}^2 —安乐潜凹陷; II_{a1}^3 —茌平潜凸起; II_{a1}^4 —乐平铺潜凹陷; II_{a1}^5 —齐河潜凸起; I_{a1}^6 —泰山凸起

组合方案,提取物探找矿信息,圈定找矿靶区,优选靶区并由多学科专家会商确定孔位。技术体系工作程序具体如下。

(1) 确定找矿远景区

收集研究区已有的地质矿产、物探、钻探等资料,根据区域资料、成矿规律和找矿标志,圈定找矿远景区,并进一步确定航空物探测量区域。

(2) 确定航空物探测量方案

依据找矿目标,确定航空物探测量方案,包括测量方法、测量比例尺、飞行高度、测线方向等,保证航空物探测量效果。

(3) 圈定找矿靶区

开展航空物探测量,通过数据转换处理提取更多信息,利用弱异常提取方法突出与矿有关的异常。在认识区内岩性构造的基础上,综合其他地质、物探资料建立找矿标志,圈定找矿靶区。

(4) 地面物探验证

在找矿靶区内,针对重点异常开展地面物探验证,由于平原覆盖区的覆盖层厚度大,一般选择探测深度较大的地面物探方法。对获取的资料进行处理解释,验证航空物探异常,初步推断矿体赋存状态,也为联合反演、地球物理-地质建模做准备。

(5) 钻探验证及三维地球物理-地质模型

根据航空和地面物探解释结果,布置钻探验证孔及测井,进行2.5维重磁联合反演。反演过程中紧

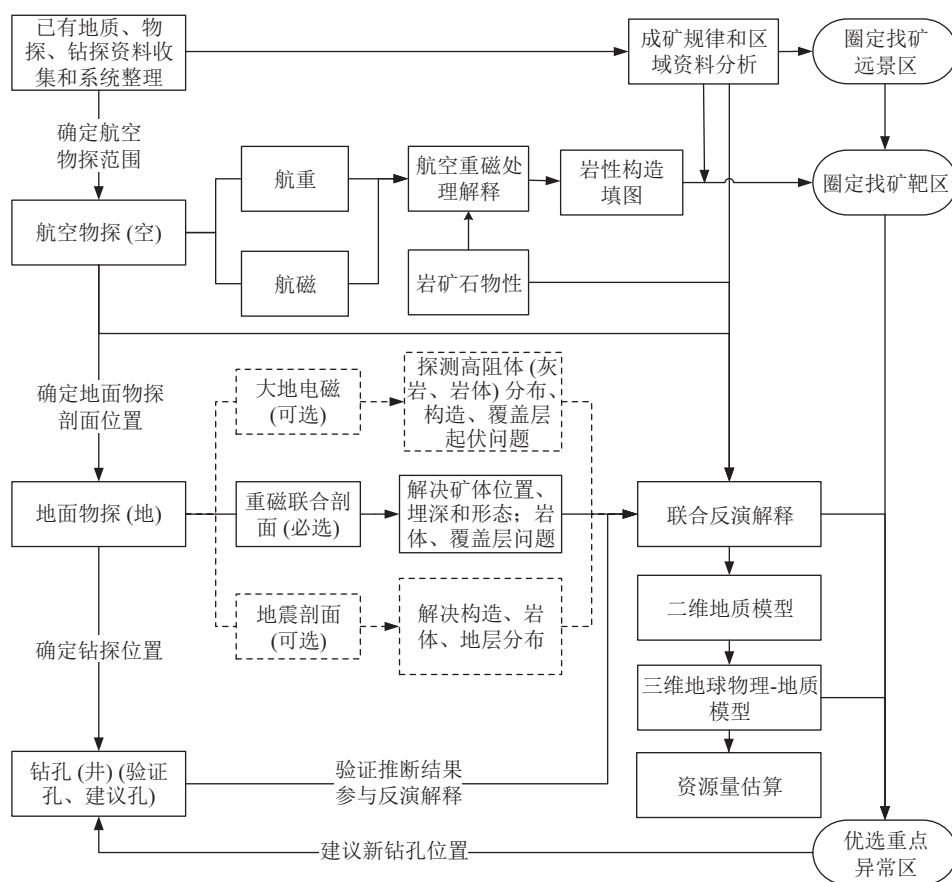


图2 厚覆盖区磁铁矿空-地-井协同勘查技术体系

Fig. 2 Airborne-surface-borehole cooperative exploration technical system for magnetite in areas with thick overburden

密结合已知钻孔和已有的重力、磁法、电法、地震解释成果及岩(矿)石物性特征,推断出二维地质剖面,建立三维地球物理-地质模型,刻画出与矿床有关的岩体及深部矿体,优选重点靶区,建议新布钻孔位置。

(6) 改进地球物理-地质模型并提出下一步钻探方案

依据最新的钻探成果,修改地球物理-地质模型及参数,估算资源量,并提出进一步钻探方案,指导后续找矿工作。

2.3 关键技术

(1) 空-地-井地球物理勘查技术

针对深隐伏目标的地球物理勘查方法种类较多,方法选择基本原则是:以重磁法为主,多方法综合利用;空-地-井协同,优势互补。具体要求:①空中方法选择航空重磁方法,研究深部岩体、构造信息,获取深部矿体的微弱信号;②在地球物理前提(探测目标在物性差异、规模、埋深等方面满足地球物理探

测条件)、经费等条件允许的情况下,以地面重磁方法为主,尽可能多方法综合利用,提高解释的可靠性;③针对深部磁铁矿体,钻探是最直接、有效的验证方法,充分利用钻探资料,提高反演、解释的准确性。基于齐河厚覆盖区岩石地层的地球物理特征、探测目标的深度,并考虑经济效益等因素,选择航空重磁测量、地面重磁测量、地面大地电磁(MT)剖面测量、地震剖面测量、钻探测井等有效勘查方法,经过科学部署、协同运用,减少资料反演解释多解性,提高复杂矿化信息的可解性,取得最佳勘查效果。

(2) 综合地质找矿信息提取方法

厚覆盖区深部磁铁矿体引起的异常信号弱,同时叠加在岩体引起的异常中难以识别。利用空地磁残差法、非线性滤波提取剩余异常、自相关滤波法(梁锦文, 1981; 韩兆红等, 2010; 吴成平等, 2020), 有效地压制了背景场的干扰, 着重突出深隐伏磁铁矿异常, 使矿致异常呈现强度不大的孤立圈闭异常, 或异常范围显著缩小、异常中心更明显, 为铁矿找矿靶

区圈定和钻探验证提供依据;使用归一化总水平导数垂向导数(NVDR-THDR)、梯度模方法增强对地质体边界的识别(管志宁等, 1996; Wang et al., 2009)。多种地质找矿信息提取方法为地质边界和矿致异常识别提供了更丰富的信息,为厚覆盖区找矿提供了重要的方法技术支撑。

(3) 岩性构造填图及靶区圈定

综合分析航空重力场、磁场及其转换处理结果,依据异常线性特征,以及线性异常带的平面延伸长度、不同上延高度的重力场、磁场反映的线性异常带规模,结合地质、地面物探等资料,建立断裂划分标志,推断断裂构造格架。根据各类地质体的航空重力场、磁场等区域地球物理场特征,结合其他地质物探资料,进行岩性填图(吴成平等, 2022),岩性划分主要依据航空重磁局部异常特征(规模、振幅、异常形态等)和地质、钻探资料,地质年代主要参考地质图和钻孔资料。

在成矿地质环境分析、综合资料对比和航磁、航重局部异常解释基础上,根据航磁、航重反映的岩性、地质构造特征,以航空重磁局部异常解释为基础,结合已知矿床(点)的分布和成矿规律,建立以航磁、航重信息为主的找矿模型,进行找矿预测,圈定可供地面进一步工作的找矿靶区。

(4) 基于多元信息的航空重磁联合反演

基于多元信息的 2.5 维航空重磁联合反演是了解地下地层、岩体、断裂构造等分布的重要手段,也是定量计算矿体规模、形态、位置和确定钻探位置的关键技术。地球物理反演通常有多解性,尤其单一方法其多解性更明显。基于多元信息的航空重磁联合反演,以地质、地面物探、已知钻孔等多元信息作为先验信息,采用航空重磁共同约束的 2.5 维人机交互反演方法,有效地减少了反演的多解性,同时综合了解释人员的地质认识,使反演解释结果更可靠。反演结果经钻探验证,可根据实际揭露情况进一步评价反演精度。

(5) 三维地质-地球物理建模

三维地球物理-地质建模(Jessell, 2001; 祁光等, 2012)采用离散体反演建模方法,利用离散模型实现地下复杂地质结构的精确刻画,在建立 2.5 维地质-地球物理模型的基础上构建三维地质结构。根据地质、钻孔资料及大地电磁、地震等物探成果,建立初始模型;根据实测重磁异常,修改初始模型,使模型

的正演重磁异常逼近实测异常。模型应符合已知地质条件或满足最终地质期望,能较真实地刻画地下地质结构,其最大优势是方便加入先验地质信息,还可最大限度地发挥解释人员的经验和对区域地质理解(Jessell, 2001)。

3 应用效果

20 世纪五六十年代,中国自然资源航空物探遥感中心(简称航遥中心)在齐河示范区开展过 1:20 万航空磁测,限于当时航空磁力仪精度、定位精度和飞行高度影响,齐河地区主体航磁异常仅显示为近椭圆形孤立完整异常;90 年代后航遥中心在该地区开展了 1:5 万航磁测量,随着测量精度的提高,孤立航磁异常分为由北至南 3 个异常。2013—2015 年,山东省多家地勘单位对李屯和大张异常开展钻探验证,揭露了厚大富磁铁矿体,拉开了该地区富铁矿找矿序幕,但是后续实施的多个钻孔零星见矿,未达预期效果,亟需理论和方法技术创新,以期发现新的深部隐伏矿体。

近年来,根据以往航磁特征、示范区优越的地质找矿条件和找矿需求,并结合磁铁矿比围岩明显高磁、高密度等物性特征(吴成平等, 2019),在区内开展了 1:5 万航空重磁测量。航磁结果显示,齐河示范区磁异常为负背景场中的孤立升高正磁场,最大强度约为 400 nT,可进一步分解为李屯、潘店、大张 3 个次级磁异常,示范区重力异常也较明显,大部分区域呈现出“重磁同源”特征。

根据区域地质成矿条件、航空物探反映的地球物理场特征,确定了磁铁矿的地质、地球物理等综合找矿标志:磁铁矿床重要的控矿围岩是奥陶纪马家沟群灰岩;成矿母岩为燕山期中基性侵入岩;矽卡岩化是最重要的蚀变现象,与磁铁矿有成因联系的蚀变标志还有钠长石化、大理岩化、角闪石化等;灰岩和岩浆岩接触带及附近张性断裂或多组断层相互切割、次级断裂发育,有利于岩浆和含矿气液的运移。升高磁性异常区、低缓磁异常的局部高值区、正负磁异常梯度陡变区域,以及重力异常梯级带附近是寻找磁铁矿的有利部位。对航空 ΔT 磁场数据进行导数计算、自相关滤波法提取弱异常、梯度模、NVDR-THDR 等处理,对航空布格重力场进行剩余异常计算(图 3),在分析重磁场特征及其数据处理结果基础上提取更多的地质找矿信息,结合地质、钻孔岩心资料

进行岩浆岩-构造填图,结合矽卡岩型磁铁矿成矿规律和找矿标志圈定找矿靶区。为了缩小找矿靶区,提高钻探见矿成功率,根据提取的磁异常中心部位、重磁剖面反演结果,参考航重异常特征及其他地质勘

探资料,在圈定找矿靶区的基础上,依照矿致异常位置及钻探见矿现状,进一步确定了重点异常区(图 4)。

针对重点异常,布置了地面重磁、地震和大地电磁(MT)剖面,进行空-地-井数据协同处理解释。基

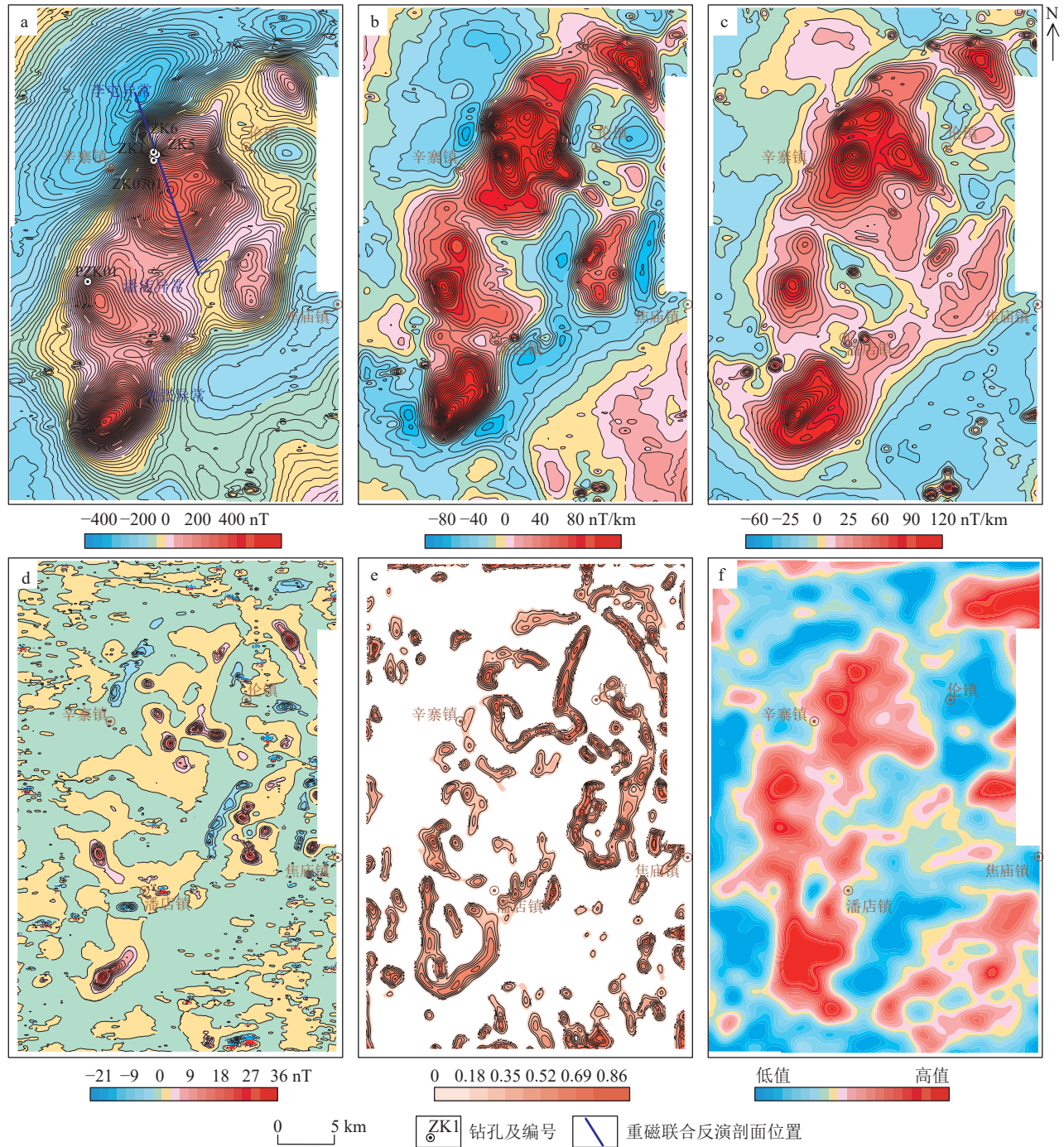


图 3 示范区航空重磁场及其处理结果

Fig. 3 Airborne gravity and magnetic data and the processed results in the demonstraion area

a—航磁 ΔT 图; b—航磁 ΔT 一阶垂导图; c—航磁总梯度模; d—自相关滤波提取矿致异常;
e—航磁 ΔT NVDR-THDR 处理结果; f—航空重力剩余异常图

于地面物探反演解释结果和地质、钻探信息,开展基于多元信息的航空重磁联合反演,综合反演结果、钻孔录井数据及切线法计算出的岩体埋深进行有约束的三维地球物理-地质建模,描绘覆盖层下的地质结

构(图5)。在示范区大张、潘店、李庄岩体分布区各圈定了重点异常区,并进一步推断出6个矿致异常及钻孔位置。其中,ZK01 钻孔航磁化极场及导数场幅值与区内已知见矿钻孔(ZK1)特征相似,是本区

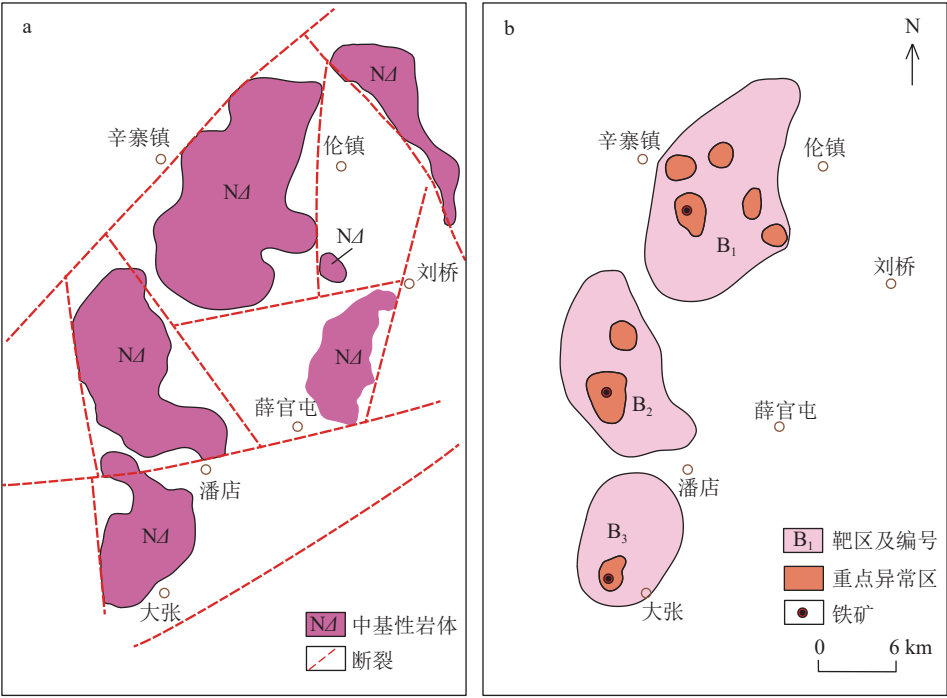


图4 推断岩性构造及找矿预测
Fig. 4 Inferred lithology and structure and ore prediction

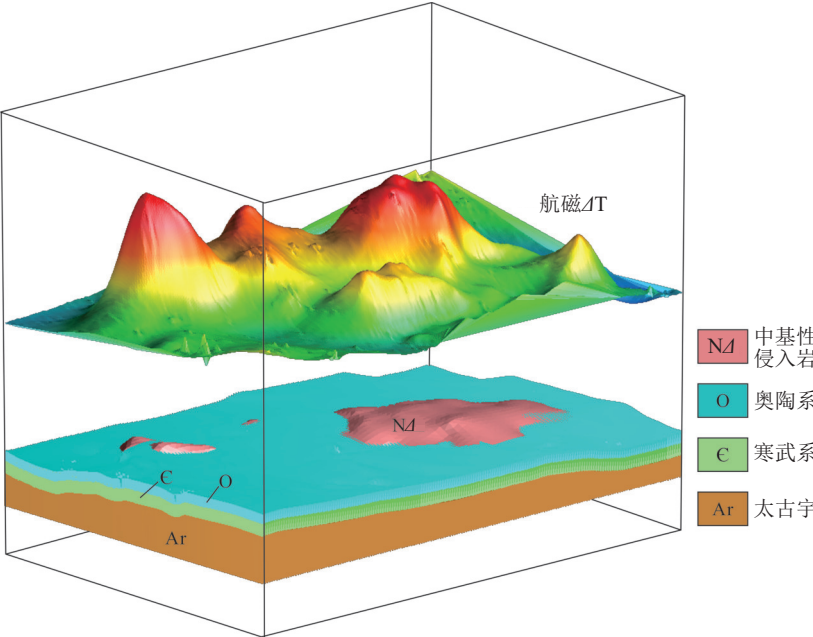


图5 三维地球物理-地质模型
Fig. 5 Three dimention geophysical-geological model

最有利的异常及见矿孔位,经钻探证实,在 ZK01 近处施工的钻孔 (PZK01)1444.4 m 见富磁铁矿,厚度 40.26 m, TFe 品位 51.82%。为扩大找矿效果,在 ZK1 钻孔东北侧布设钻孔 ZK5。根据航空重磁联合反演剖面 (图 6, 位置见图 3 中 L1 剖面) 及空地磁残差,在距离 12 km、15 km 处有明显残差异常,表明存在富磁铁矿体的可能性大,推断出①、②两处矿体,其中①号矿体深部富磁铁矿的埋深约 1150 m,厚度约 107 m,预计 ZK5 钻孔见矿深度 1170 m,厚度约为 62 m,与实际见矿深度、厚度基本吻合。②号矿体目前还未进行钻探验证,推断其埋深更大,规模与①号矿体类似。之后又在 ZK5 位置附近的 ZK6 钻孔见厚 95.5 m 的富铁矿。

4 结 论

(1) 厚覆盖层影响或阻碍了地球物理信号的传

递,地球物理信号减弱、异常信息识别与提取难度大,确定靶区和验证孔位困难。厚覆盖区磁铁矿空-地-井协同勘查发挥了航空物探、地面物探、钻探等多方法协同优势,是解决厚覆盖区磁铁矿勘查的快速有效方法。

(2) 在齐河示范区开展航空重磁联合测量,协同开展地面物探,并进行钻探验证,在空-地-井协同勘查技术体系指导下找矿效果显著。该体系可应用于与齐河地区类似的厚覆盖区寻找矽卡岩型磁铁矿,同时对厚覆盖区寻找其他类型矿床也有重要参考价值。

致谢: 山东省地质调查院郝兴中教授级高工,中国自然资源航空物探遥感中心王卫平教授级高工,马勋表高级工程师、徐东礼高级工程师在航空物探数据获取、资料处理解释、技术体系构建等工作中提供了帮助,审稿专家针对本文提出了很宝贵的意见和建议,在此一并表示诚挚感谢。

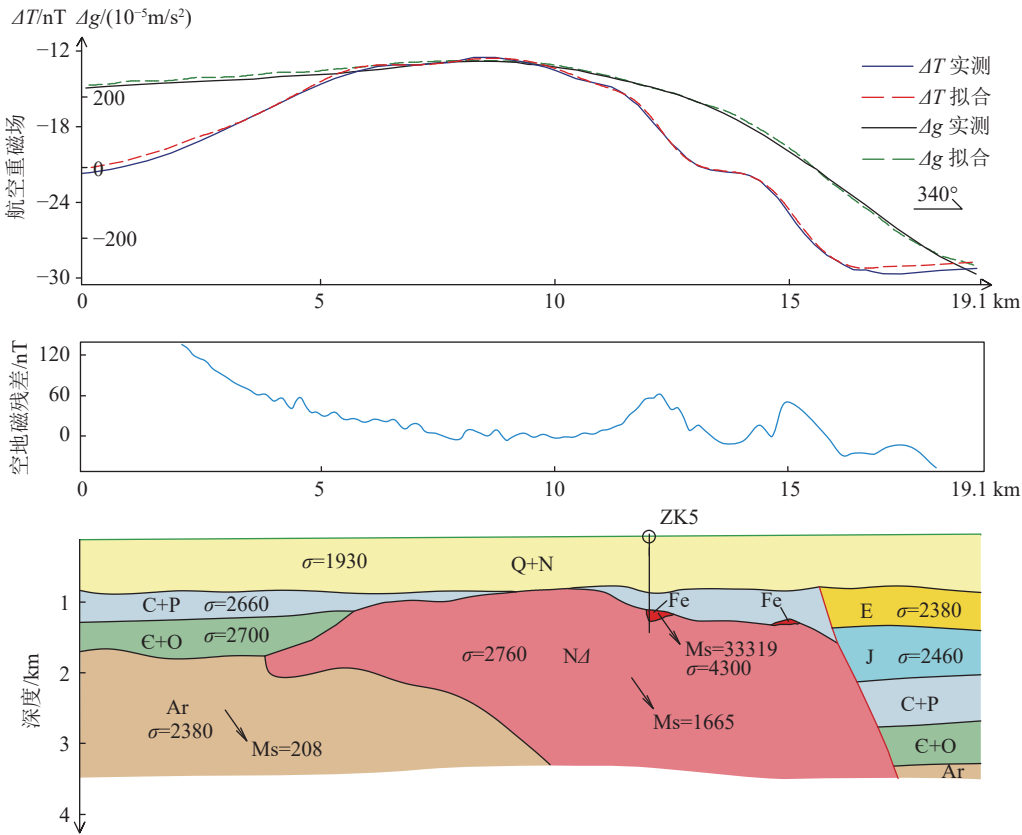


图 6 L1 剖面航空重磁联合反演

Fig. 6 Airborne gravity and magnetic joint inversion of profile L1

Q+N—第四系和新近系; E—古近系; J—侏罗系; C+P—石炭系—二叠系; E+O—寒武系—奥陶系; Ar—太古宇
NΔ—中基性侵入岩; Fe—铁矿; Ms—有效磁化强度(单位 10^{-3} A/m); σ —密度(单位为 10^{-3} km³)

References

- Jessell M. 2001. Three-dimensional geological modelling of potential-field data[J]. *Computers & Geosciences*, 27(4): 455–465.
- Wang W, Pan Y, Qiu Z. 2009. A new edge recognition technology based on the normalized vertical derivative of the total horizontal derivative for potential field data[J]. *Applied Geophysics*, 6(3): 226–233, 299.
- Chen H L, Wu L S. 2017. China has established an exploration technology system for gas hydrates[J]. *Geological Equipment*, 18(4): 7–8(in Chinese with English abstract).
- Guan Z N, Hou J S, Yao C L. 1996. Application of aeromagnetic gradient data in geological mapping and metallogenetic prognosis of gold deposits[J]. *Geoscience*, 10(2): 239–249 (in Chinese with English abstract).
- Hao X Z, Zheng J M, Liu W, et al. 2020. Metallogenic prediction of skarn-type iron deposits in the Qihe–Yucheng area, Shandong Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 41(2): 293–302(in Chinese with English abstract).
- Hao X Z, Xiao K Y, Wang Q Y, et al. 2023. Metallogenic regularity and potential analysis of iron ore in Shandong Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 44(5): 834–848(in Chinese with English abstract).
- Han Z H, Wu Y G, Zhang C H, et al. 2010. Extracting weak anomaly in gravity and magnetic field with self-correlation filtering method[J]. *Global Geology*, 29(1): 124–129(in Chinese with English abstract).
- Han, Z Y, WU Y, Yang J S, et al. 2007. Research on the technical method system for groundwater exploration in seriously water-deficient areas in the western region[J]. *Journal of Hydrogeology and Engineering Geology*, (2): 81 – 86(in Chinese with English abstract).
- Huang X Z, Fan Z G, He J Z, et al. 2022. A collaborative airborne, ground, and borehole exploration technology system for concealed magmatic copper–nickel deposits[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 46(3): 597–607(in Chinese with English abstract).
- Institute of Geophysical and Geochemical Exploration. 2014. Establishment of the detection technology system for concealed ore deposits in basins in China[J]. *Geological Equipment*, 15(4): 4–5(in Chinese).
- Li F T, Miao H L, Fu J, et al. 2023. Gravity and magnetic anomalies and prospecting prediction of iron–polymetallic deposits in the lower reaches of the Nalinguole River[J]. *Northwestern Geology*, 56(6): 155 – 165(in Chinese with English abstract).
- Li Z X, Wang T, Wang H H, et al. 2011. Theory and technical system study on multiple energy mineral resources exploration in coordination[J]. *Coal Geology of China*, 23(4): 68–72(in Chinese with English abstract).
- Liang J W. 1981. Experimental results of a nonlinear filtering method[J]. *Electronic Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, (2): 22 – 28(in Chinese).
- Liu C, Sun D L, Wu W B, et al. 2022. Analysis and prospect of precise prevention and control technical system ahead of large areas and time for gas disasters in China[J]. *Coal Geology & Exploration*, 50(8): 82–92(in Chinese with English abstract).
- Liu Y, Lü Q T, Yan J Y, et al. 2012. The structure of Luzong ore district and its metallogenic indication from gravity and magnetic information[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(10): 3125–3138(in Chinese with English abstract).
- Man W. 2009. Study on Uranium prospecting and exploration technical system based on high resolution remote sensing[J]. *Journal of Xiamen University of Technology*, 17(3): 33–36(in Chinese with English abstract).
- Qi G, Lü Q T, Yan J Y, et al. 2012. Geologic constrained 3D gravity and magnetic modeling of Nihe deposit—A case study[J]. *Chinese J. Geophys*, 55(12): 4194–4206(in Chinese with English abstract).
- Shi C Y, Wang H Y. 2022. A system of techniques and methods for three-dimensional geochemical exploration for finding deep concealed mineral resources[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(11): 3705–3721(in Chinese with English abstract).
- Shi R, Zhang Y H, Lu M J, et al. 2018. 3D metallogenic prediction based on geological and gravity–magnetic data integration in the Qian'an iron ore concentration area, Hebei Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 39(6): 762–770(in Chinese with English abstract).
- Wu C P, Yu C C, Wang W P, et al. 2019. Physical characteristics of rocks and ores and their application in Qihe area, Western Shandong[J]. *Advances in Earth Science*, 34(10): 1099–1107 (in Chinese with English abstract).
- Wu C P, Yu C C, Zhou M L, et al. 2020. Residual calculation of airborne and ground magnetic field and its prospecting application in heavily covered plain area[J]. *Progress in Geophysics*, 35(2): 663–668 (in Chinese with English abstract).
- Wu C P, Yu C C, Zhou M L, et al. 2022. Method and effect of delineating concealed plutons with airborne gravity and magnetic data in the Qihe thick coverage area of Shandong Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 41(2/3): 398–406 (in Chinese with English abstract).
- Yan J Y, Lü Q T, Chen X B, et al. 2014. 3D lithologic mapping test based on 3D inversion of gravity and magnetic data: A case study in Lu–Zong ore concentration district, Anhui Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(4): 1041–1053 (in Chinese with English abstract).
- Yao Y L. 2016. Analysis on comprehensive exploration technology system of coal resources in China at present stage[J]. *Coal Mine Machinery*, 37(10): 1–2 (in Chinese with English abstract).
- Zhan W F. 2018. Coalmine geological anomalous body multi-field integrated geophysical prospecting technological system and practices[J]. *Coal Geology of China*, 30(9): 62–66 (in Chinese with English abstract).
- Zhu R X, Jin Z J, Di Q Y, et al. 2023. Research and progress of intelligent drilling technology system and related theories[J]. *Chinese J. Geophys*, 66(1): 1–15(in Chinese with English abstract).
- Zhu Y Z, Zhang W Y, Shao G H, et al. 2024. Application of distributed 3D wide field electromagnetic method in the exploration of high-grade iron ore in the thick covered area of Litun in Qihe–Yucheng, Shandong Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 43(9): 1555–1564 (in Chinese with English abstract).

Zuo Q C. 2015. The technological system for design, development and application of data model and data integration of mineral resources potential evaluation in China[J]. Geological Bulletin of China, 34(12): 2334–2351 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈惠玲, 吴庐山. 2017. 我国建成天然气水合物勘探技术体系[J]. 地质装备, 18(4): 7–8.

管志宁, 侯俊胜, 姚长利. 1996. 航磁梯度资料在金矿地质填图和成矿预测中的应用[J]. 现代地质, 10(2): 239–249.

郝兴中, 郑金明, 刘伟, 等. 2020. 山东省齐河—禹城地区矽卡岩型铁矿产预测[J]. 地球学报, 41(2): 293–302.

郝兴中, 肖克炎, 王巧云, 等. 2023. 山东铁矿产成矿规律及潜力分析[J]. 地球学报, 44(5): 834–848.

韩兆红, 吴燕凤, 张成海, 等. 2010. 自相关滤波法提取重磁场中弱异常[J]. 世界地质, 29(1): 124–129.

韩子夜, 武毅, 杨进生, 等. 2007. 西部严重缺水地区地下水勘查技术方法体系研究[J]. 水文地质工程地质, (2): 81–86.

黄旭钊, 范正国, 何敬梓, 等. 2022. 隐伏岩浆型铜镍矿空-地-井协同勘查技术体系[J]. 物探与化探, 46(3): 597–607.

姜振寰, 吴明泰, 王海山, 等. 1990. 技术学辞典[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版.

李凤廷, 苗虎林, 付佳, 等. 2023. 那陵郭勒河下游重磁异常与铁多金属矿找矿预测[J]. 西北地质, 56(6): 155–165.

李增学, 王佟, 王怀洪, 等. 2011. 多能源矿产协同勘查理论与技术体系研究[J]. 中国煤炭地质, 23(4): 68–72.

梁锦文. 1981. 一种非线性滤波方法的试验效果[J]. 物探化探电子计算技术, (2): 22–28.

刘程, 孙东玲, 武文宾, 等. 2022. 我国煤矿瓦斯灾害超前大区域精准防控技术体系及展望[J]. 煤田地质与勘探, 50(8): 82–92.

刘彦, 吕庆田, 严加永, 等. 2012. 庐枞矿集区结构特征重磁研究及其成矿指示[J]. 岩石学报, 28(10): 3125–3138.

满旺. 2009. 高分辨率遥感铀矿地质勘查技术体系研究[J]. 厦门理工学院学报, 17(3): 33–36.

祁光, 吕庆田, 严加永, 等. 2012. 先验地质信息约束下的三维重磁反演建模研究——以安徽泥河铁矿为例[J]. 地球物理学报, (12): 4194–4206.

邱道持, 柳源, 许江, 等. 2006. 重庆市地质灾害监测预警与防治技术体系研究及示范[R].

史长义, 王惠艳. 2022. 深部矿产资源立体地球化学勘查方法技术体系[J]. 地质学报, 96(11): 3705–3721.

史蕊, 张颖慧, 卢民杰, 等. 2018. 基于地质与重磁数据集成的河北迁安铁矿集区三维成矿预测[J]. 地球学报, 39(6): 762–770.

吴成平, 于长春, 王卫平, 等. 2019. 鲁西齐河地区岩(矿)石物性特征及应用[J]. 地球科学进展, 34(10): 1099–1107.

吴成平, 于长春, 周明磊, 等. 2020. 空地磁残差计算在平原厚覆盖区找矿应用[J]. 地球物理学进展, 35(2): 663–668.

吴成平, 于长春, 周明磊, 等. 2022. 航空重磁在山东齐河厚覆盖区圈定隐伏岩体的方法及效果[J]. 地质通报, 41(2–13): 398–406.

严加永, 吕庆田, 陈向斌, 等. 2014. 基于重磁反演的三维岩性填图试验——以安徽庐枞矿集区为例[J]. 岩石学报, 30(4): 1041–1053.

姚艳领. 2016. 现阶段我国煤炭资源综合勘查技术体系分析[J]. 煤矿机械, 37(10): 1–2.

占文锋. 2018. 矿井地质异常体多场联合探测技术体系及实践分析[J]. 中国煤炭地质, 30(9): 62–66.

中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所. 2014. 我国建立盆地隐伏矿探测技术体系[J]. 地质装备, 15(4): 4–5.

朱日祥, 金之钧, 底青云, 等. 2023. 智能导钻技术体系与相关理论研发进展[J]. 地球物理学报, 66(1): 1–15.

朱裕振, 张文艳, 邵贵航, 等. 2024. 分布式三维广域电磁法在山东齐河—禹城李屯厚覆盖区富铁矿勘查中的应用[J]. 地质通报, 43(9): 1555–1564.

左群超. 2015. 矿产资源潜力评价数据模型研发、应用与数据集成方法技术体系[J]. 地质通报, 34(12): 2334–2351.