

doi: 10.12029/gc20210817001

王润生,郝兴中,胡蕾,陈宏杰,刘辉,陈方博,于露,刘伟,方磊,康一鸣. 2023. 基于重磁资料在山东齐河—禹城探获矽卡岩型富铁矿:对超深覆盖区找矿的启示[J]. 中国地质, 50(2): 331–346.

Wang Runsheng, Hao Xingzhong, Hu Lei, Chen Hongjie, Liu Hui, Chen Fangbo, Yu Lu, Liu Wei, Fang Lei, Kang Yiming. 2023. Discovery of skarn iron-rich deposit based on gravity and magnetic data in the Qihe–Yucheng, Shandong Province: Enlightenment to prospecting of the super-deep coverage area[J]. Geology in China, 50(2): 331–346(in Chinese with English abstract).

基于重磁资料在山东齐河—禹城探获矽卡岩型富铁矿:对超深覆盖区找矿的启示

王润生^{1,2}, 郝兴中³, 胡蕾^{1,2}, 陈宏杰^{1,2}, 刘辉^{1,2}, 陈方博^{4,5},
于露^{1,2}, 刘伟^{1,2}, 方磊^{1,2}, 康一鸣^{1,2}

(1. 山东省物化探勘查院, 山东 济南 250013; 2. 山东省地质勘查工程技术研究中心, 山东 济南 250013; 3. 山东省地质调查院, 山东 济南 250014; 4. 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 北京 100083; 5. 中国地质调查局地球物理调查中心, 河北 廊坊 065000)

摘要:【研究目的】山东齐河—禹城矿集区内分布近南北向且具有一定同源特征的重磁异常带,前期陆续在北部李屯、南部大张重磁异常内揭露到厚大的矽卡岩型富铁矿床,铁矿勘查工作取得较大进展,但矿集区中部潘店异常区被超深的新生界覆盖,异常规模小、强度弱,深部铁矿体的地球物理信息被极大弱化,且矿致磁异常又一定程度被大规模的磁性岩体异常所掩盖,识别和提取难度较大,因此一直未取得找矿突破。【研究方法】本文充分结合相邻矿区重磁勘查的成功找矿经验,由已知到未知,对潘店重磁异常进行平面剖析和剖面定量反演,实现了研究区构造格架划分、成矿地质体圈定、异常剖析研究及2.5D联合反演的全流程解译。【研究结果】基于高精度重磁资料的综合研究,获取了超深覆盖层下的深部找矿信息,最终在齐河—禹城矿集区中部实现了矽卡岩型富铁矿的找矿新突破,使矿集区内3处重磁异常得以紧密关联,并证实了大张、潘店、李屯三处铁矿床处于同一近南北向的中性岩浆岩带内,开辟了齐河—禹城矿集区内又一处重要的找矿新空间。【结论】本次找矿成果为后续进一步开展超深覆盖层下的深部找矿工作提供了重要参考和指示,同时表明齐河—禹城矿集区内具有广阔的矽卡岩型富铁矿找矿前景。

关键词:超深覆盖区;矽卡岩型铁矿;重磁异常;重磁联合反演;矿产勘查工程;齐河—禹城;山东省

创新点:(1)基于高精度重磁数据的多元化位场转换处理,实现了成矿地质体边界的精确识别;(2)首次将1:5万高精度重力数据解译运用到本区富铁矿探测,创建了区内矿致异常重磁联合提取技术。

中图分类号:P618.31 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2023)02-0331-16

Discovery of skarn iron-rich deposit based on gravity and magnetic data in the Qihe–Yucheng, Shandong Province: Enlightenment to prospecting of the super-deep coverage area

WANG Runsheng^{1,2}, HAO Xingzhong³, HU Lei^{1,2}, CHEN Hongjie^{1,2}, LIU Hui^{1,2},

收稿日期:2021-08-17;改回日期:2021-11-08

基金项目:中国地质调查局项目(DD2016005223,DD20190166)与山东省重大科技创新工程项目(2018CXGC1601)联合资助。

作者简介:王润生,男,1987年生,工程师,主要从事深部地球物理勘查技术应用及研究工作;E-mail: wrs674@126.com。

通讯作者:郝兴中,男,1980年生,博士,研究员,主要从事矿产资源评价、地球物理应用研究工作;E-mail: 57820696@qq.com。

CHEN Fangbo^{4,5}, YU Lu^{1,2}, LIU Wei^{1,2}, FANG Lei^{1,2}, KANG Yiming^{1,2}

(1. Shandong Geophysical and Geochemical Exploration Institute, Jinan 250013, Shandong, China; 2. Shandong Geological Exploration Engineering Technology Research Center, Jinan 250013, Shandong, China; 3. Shandong Institute of Geological Survey, Jinan 250014, Shandong, China; 4. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 5. Geophysical Survey Center, China Geological Survey, Langfang 065000, Hebei, China)

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

[Objective] A nearly N-S trending gravity and magnetic anomaly zone with certain homologous characteristics was identified in the Qihe-Yuchen ore concentration area, Shandong Province. In the early stage, thick skarn iron-rich deposits were successively revealed in the northern Litun and southern Dazhang gravity and magnetic anomalies, and great progress has been made in iron ore exploration. However, the Pandian anomaly area, the central part of the ore concentration area is covered by ultra deep Cenozoic, with small scale and weak intensity, while the geophysical information of deep iron ore body is greatly weakened, and the ore-induced magnetic anomaly is covered by the large-scale magnetic anomaly of diorite to a certain extent, which makes it difficult to identify and extract. Therefore, no prospecting breakthrough has been made in the Pandian anomaly. **[Methods]** This article fully combines the successful prospecting experience of gravity and magnetic exploration in adjacent mining areas. From known to unknown, the plane analysis and profile quantitative inversion of Pandian gravity and magnetic anomalies were carried out, and the whole process interpretation of structural framework division, delineation of metallogenic geological body, anomaly analysis and 2.5D joint inversion is realized in the study area. **[Results]** Based on comprehensive study of high-precision gravity and magnetic data, the deep prospecting information under the ultra deep overburden is obtained, and finally achieved a new prospecting breakthrough of skarn type rich iron ore in the central part of Qihe-Yucheng ore concentration area. The three gravity and magnetic anomalies in the ore concentration area are closely related, which proves that the three iron deposits of Dazhang, Pandian and Litun are in the same nearly north-south neutral magmatic rock belt, opening up another important new prospecting space in the Qihe-Yucheng ore concentration area. **[Conclusions]** The prospecting results provide important reference and instructions for further deep prospecting under ultra deep overburden. At the same time, it shows that there is a broad prospecting prospect for skarn iron-rich ore in Qihe-Yucheng ore concentration area.

Key words: deeply covered area; skarn-type iron deposit; gravity and magnetic anomaly; gravity and magnetic joint inversion; mineral exploration; Qihe-Yucheng; Shandong Province

Highlights: (1) Based on the multi-potential field conversion processing of high-precision gravity and magnetic data, the boundary of metallogenic geological body was accurately identified; (2) For the first time, the interpretation of areal gravity data was applied to the detection of iron-rich ore in the area, creating a combined gravity and magnetic extraction technology of ore-induced anomalies.

About the first author: WANG Runsheng, male, born in 1987, engineer, mainly engaged in the application and research of deep geophysical exploration technology; E-mail: wrs674@126.com.

About the corresponding author: HAO Xingzhong, male, born in 1980, doctor, researcher, mainly engaged in the mineral resources evaluation and geophysical application research; E-mail: 57820696@qq.com.

Fund Support: Support by the projects of China Geological Survey (No.2016005223, No.DD20190166), Major Scientific and Technological Innovation Project in Shandong Province (No.2018CXGC1601).

1 引 言

随着国民经济的高速发展,矿产资源的勘探和开发力度与日俱增,地表矿及浅部矿已大量查明,并伴随开采日益减少,导致矿产资源供需矛盾逐渐凸显,深部矿、覆盖隐伏矿产资源的巨大潜力日益得

到业界重视(刘光鼎和郝天珧,1995;曹新志等,2009;宋明春等,2019)。由于覆盖区内通过基础地质工作无法获取地层、构造、岩浆岩的分布及深部成矿相关信息,仅依靠钻探揭露成本及风险均较大,因此地球物理勘查逐渐成为覆盖区找矿工作中不可或缺的手段(陶龙等,2019;张家嘉等,2020;田

红军等,2020)。但与此同时,由于覆盖层的屏蔽作用,深部目标地质体的地球物理异常信息至地表衰减明显,矿致异常提取难度较大(孟贵祥等,2019),且覆盖区内地质及钻探验证程度一般较低,地球物理解译的约束条件不足,以上原因导致单一地球物理方法在覆盖区找矿中往往存在多解性及较大的推断误差,不同方法的有效结合能有效减少多解性,并提高解译精度,从而为覆盖区找矿提供切实有效的地球物理依据(丁文祥等,2018;赵敏等,2019)。

2013年至今,齐河—禹城矿集区内南北两侧大张、李屯重磁异常区内矽卡岩型富铁矿勘查工作均已取得较大进展(陈晓曼等,2017;朱裕振等,2018,2019;郝兴中等,2019,2020),而矿集区中部的潘店重磁异常地处贯联大张、李屯铁矿区的重要地段,但其异常规模更小且幅值更低,铁矿埋深更大,且以往物探工作程度偏低,导致钻探验证缺少足够的物探依据,因此一直未有找矿突破。本次首先利用最新1:5万重力、航磁资料的精细处理及综合研究,对全区构造格架、成矿地质体分布等进行了平面解译,对中部潘店重磁异常进行了详细剖析,提取超深覆盖层下的

地球物理找矿信息;其次利用大比例尺剖面性重磁数据,进行2.5D重磁联合反演,采用面、线相结合的方式对潘店异常进行定性及定量分析研究。以本次重磁解译成果为依据,经钻探验证,在1444.44~1542.19 m深度区间揭露到厚度大、品位高的矽卡岩型富铁矿体,实现了齐河—禹城矿集区中部超深覆盖区内的找矿新突破,对后续在矿集区内全面开展超深覆盖区铁矿勘查工作起到了重要的助推作用。

2 地质概况

齐河—禹城矿集区位于山东省西部,行政区划主要属德州市、聊城市,大地构造位置位于华北板块(I)鲁西隆起区(II)鲁中隆起(III)济南—泰山断隆(IV)齐河潜凸起(V)内(图1)。

矿集区被超深的新生界覆盖,主要为第四系和新近系,区内铁矿勘查钻孔显示,北侧李屯铁矿区覆盖厚度可达810~900 m,南侧大张铁矿区覆盖厚度为560~590 m。区内地层整体北倾,由上而下主要分布第四系、新近系、二叠系、石炭系、奥陶系、寒武系,西南部乐平铺潜凹陷区内发育三叠系和侏罗

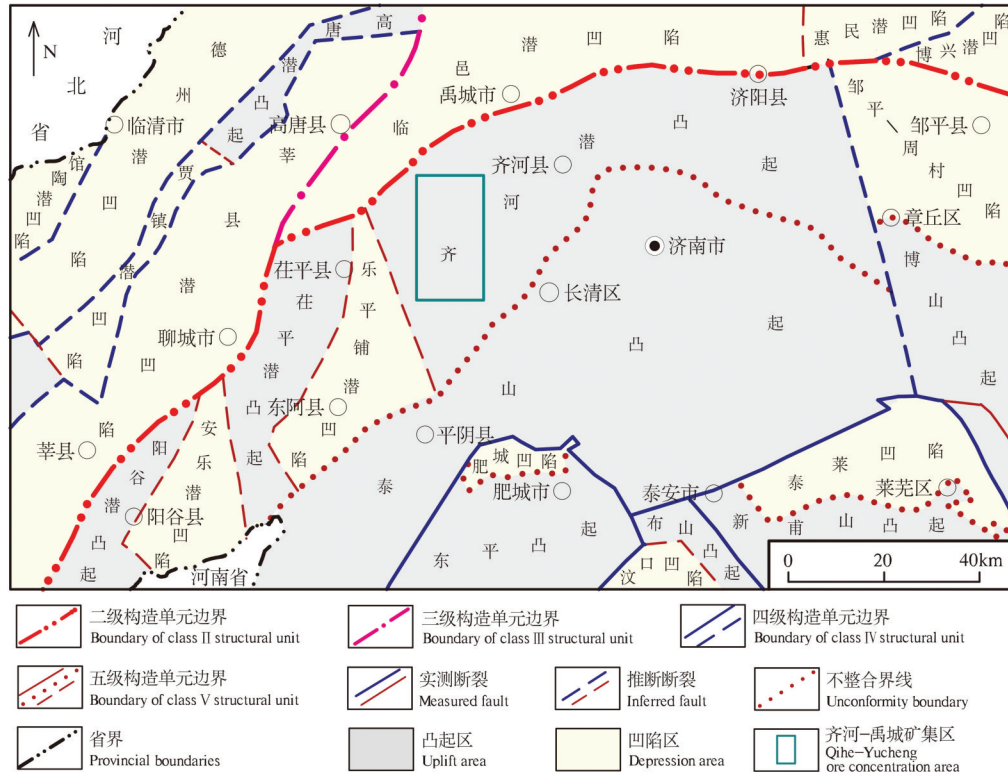


图1 区域大地构造背景图
 Fig.1 Regional geotectonic background map
<http://geochina.cgs.gov.cn> 中国地质, 2023, 50(2)

系,齐广断裂以北临沂潜凹陷内分布古近系。燕山晚期岩浆活动强烈,李屯、大张铁矿区区内钻孔均揭露到了该时期的闪长岩体,是区内矽卡岩型富铁矿的成矿地质体,也是控制全区重磁场特征的主要地质体。区内断裂构造较为发育,主要为NE至NNE向、NW至NNW向,大多为张性正断层,控制着区内潜凹陷及潜凸起的边界,SN向断裂并不发育(图2)。

3 物性特征

矿集区内无基岩出露,根据区内近年来铁矿勘查钻孔的岩心物性测量结果,结合以往物性资料(吴成平等,2019),对岩(矿)石物性特征进行了归纳总结(表1)。

3.1 密度特征

岩(矿)石密度可大致分为低、中、高三类,其中新生界为低密度特征,与下伏古生界(石炭系—二叠系、

寒武系—奥陶系)存在 $0.28 \times 10^3 \sim 0.97 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 的密度差,覆盖层下基岩界面的起伏变化可产生一定的重力异常响应;石炭系—二叠系呈中等密度特征,与下伏奥陶系及闪长岩体间的密度差为 $0.05 \times 10^3 \sim 0.17 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$;寒武系—奥陶系、闪长岩及泰山岩群变质基底密度相近,同属高密度地质体,三者密度差相对较小;矽卡岩型铁矿密度为全区最高($4.53 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$),但其厚度薄、埋深大,重力异常至地表衰减明显,同时泰山岩群埋深较大,所以区内的高值重力异常与寒武—奥陶系和闪长岩体相关性最大。

3.2 磁性特征

岩(矿)石的磁性符合矽卡岩型铁矿 > 闪长岩体 > 变质基底 > 沉积地层的规律,其中中浅部的古生界、新生界呈无(低)磁性特征,可忽略不计;泰山岩群变质基底磁化率及剩磁变化较大,磁化率均值

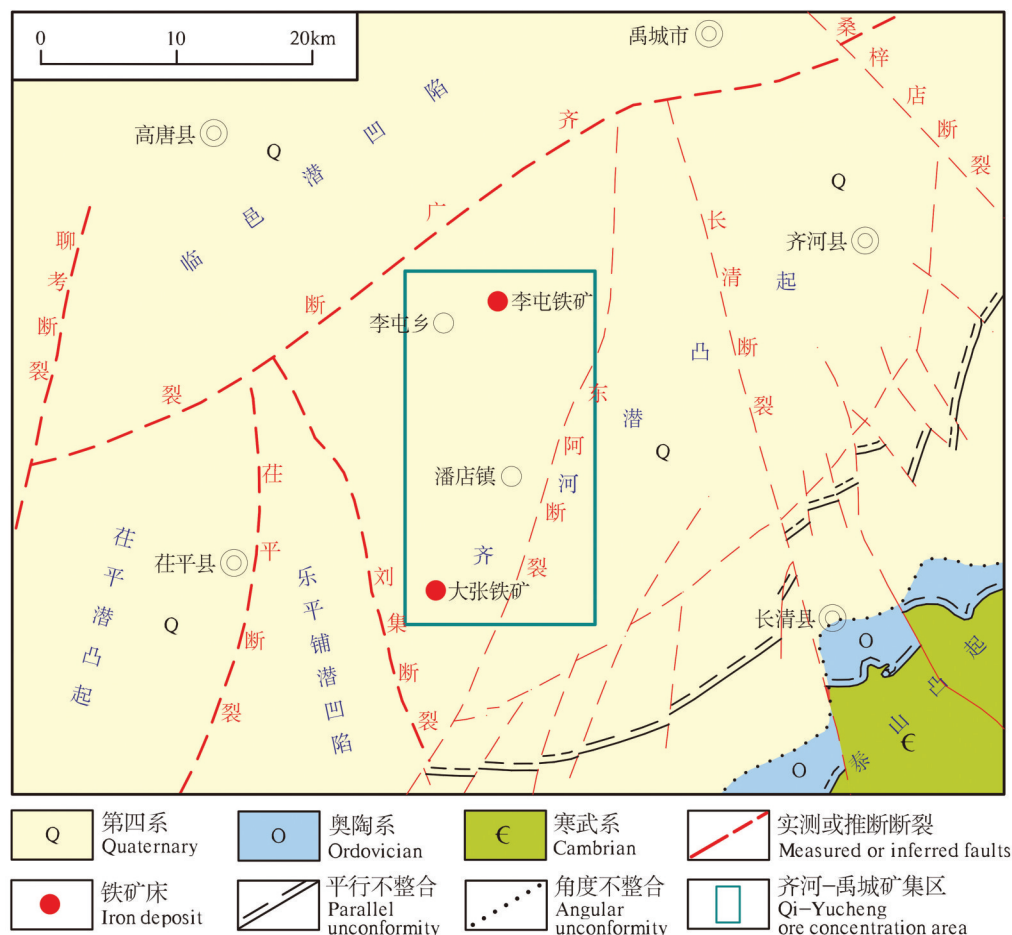


图2 齐河—禹城矿集区地质构造简图

Fig.2 Geological structure diagram of Qihe-Yucheng ore concentration area

表1 岩(矿)石物性参数统计表

Table 1 Statistical table of rock (ore) physical parameters

岩层	块数	密度 $\sigma/(10^3 \text{ kg/m}^3)$		磁化率 $\kappa/(10^{-6} 4\pi\text{SI})$		剩磁 $J_r/(10^{-3} \text{ A/m})$		物性特征
		平均值	变化范围	平均值	变化范围	平均值	变化范围	
第四系(砂质黏土)	63	1.74	1.55~1.99					低密度、无(低)磁性
新近系(黏土)	50	2.11	2.03~2.18					
古近系(泥岩、页岩)	178	2.38	2.16~2.52					
石炭系一二叠系(细砂岩)	35	2.66	2.52~2.73					中等密度、无(低)磁性
寒武系—奥陶系(灰岩)	35	2.71	2.65~2.83					高密度、无(低)磁性
铁矿石(磁铁矿)	30	4.53	4.20~4.81	226835	127299~440319	351099	25529~1774398	高密度、高(强)磁性
中生代侵入岩(闪长岩)	30	2.76	2.69~2.86	3342	15.5~4877	482	55.6~1086	高密度、中高磁性
泰山岩群(角闪岩、变粒岩)	245	2.83	2.52~3.07	1110	42.8~2112	1755	74.2~3340	高密度、中等磁性

为 $1110 \times 10^{-6} 4\pi\text{SI}$; 闪长岩呈中高磁性特征, 磁化率均值为 $3342 \times 10^{-6} 4\pi\text{SI}$, 可与沉积围岩明显区分; 铁矿体磁性极强, 为全区最高, 磁化率均值高达 $226835 \times 10^{-6} 4\pi\text{SI}$, 剩磁可达 $351099 \times 10^{-3} \text{A/m}$, 但由于其埋深较大且厚度相对较薄, 磁场特征表现为岩体异常内的局部叠加异常。

4 重磁综合解译

4.1 重磁场特征及构造格架划分

采用齐河—禹城矿集区最新 1:5 万陆地重力数

据、1:5 万航磁数据, 分别进行滑动平均及化磁极处理, 其中重力数据采用滑动平均法 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 窗口进行剩余异常提取, 航磁数据采用化极参数为(磁倾角: 54.75° ; 磁偏角: -5.85°), 形成剩余重力异常图(图 3a)及航磁化极异常图(图 3b), 全区重磁场特征研究、重磁异常圈定及构造格架划分主要以此图件(图 3)为基础完成。

矿集区重磁场间关联紧密, 剩余重力值与航磁化极磁场值变化区间分别为 $-3.9 \times 10^{-5} \sim 5.8 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 、 $-310 \sim 495 \text{ nT}$, 重磁场最高值分别位于南部大张铁

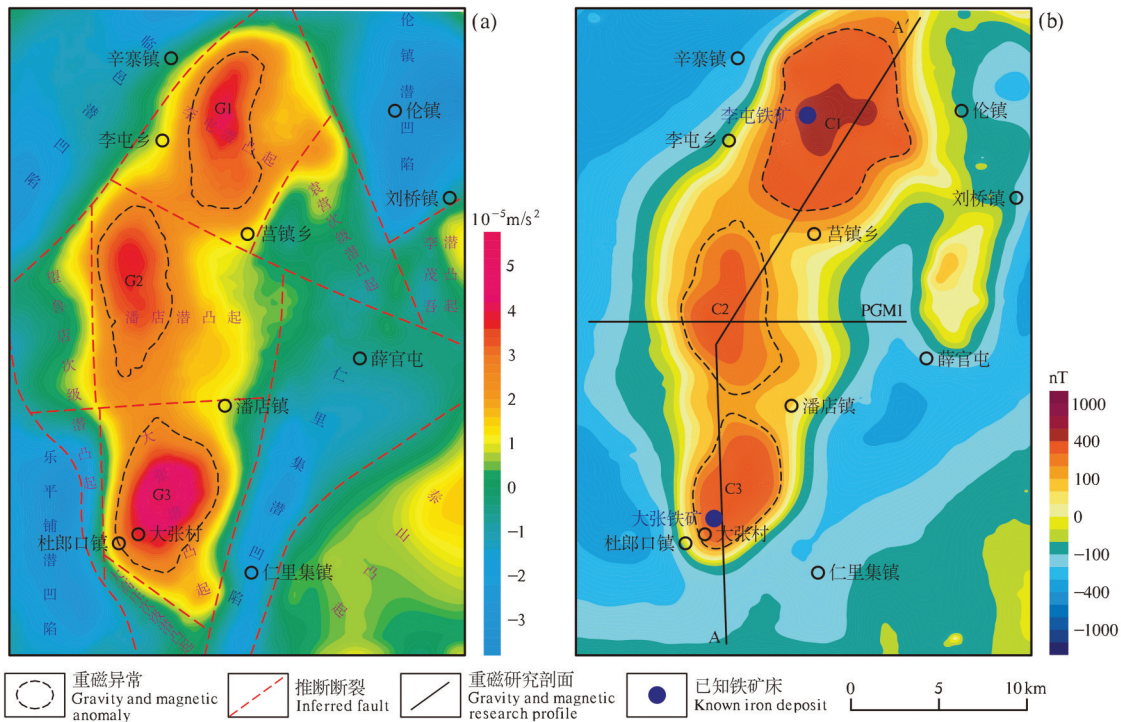


图3 齐河—禹城矿集区剩余重力异常图及航磁化极异常图

a—剩余重力异常图; b—航磁化极异常图

Fig.3 Residual gravity anomaly map and RTP aeromagnetic anomaly map of Qihe–Yucheng ore concentration area

a—Map of residual gravity anomaly; b—Map of RTP aeromagnetic anomaly

矿区和北部李屯铁矿区内。高重磁场主要位于中部近南北向大张—潘店—李屯一带及东南部泰山凸起内,中部南北两侧前期已发现大张、李屯两处矽卡岩型富铁矿床,钻孔均揭露到了高密度、中高磁性的燕山晚期闪长岩体,是中部重磁高值区的主要成因;东南部泰山凸起内已有寒武系—奥陶系出露,地层埋深较西北深覆盖区整体变浅,重磁场抬升,同时下伏新太古代泰山岩群变质基底具有一定磁性,磁场也随之增强。矿集区西北部李屯乡、东南部仁里集镇、西南部杜郎口镇存在3处明显的重力密集梯级带,是NE向齐广断裂、仁里集断裂及NW向刘集断裂的反映,它们控制着区内主要构造格架体系,分别为临邑潜凹陷(V)、泰山凸起(V)、乐平铺潜凹陷(V)与中部齐河潜凸起(V)之间的分界断裂。齐河潜凸起(V)内次级构造发育,形成以李屯—潘店—大张潜凸起、伦镇潜凹陷和仁里集潜凹陷为主的一系列次级构造单元(表2)。

矿集区内分布李屯(G1-C1)、潘店(G2-C2)、大张(G3-C3)三处明显的重磁异常,其中李屯、大张异常已验证主要由燕山晚期闪长岩体引起,从异常的同源性以及与两侧铁矿区内异常特征可初步推断中部潘店异常的主要成因仍为闪长岩体。更进一步分析认为,重力异常反映了岩浆岩带内闪长岩体的局部凸起及上覆高密度奥陶系灰岩的残留,而磁异常主体为闪长岩,同时包含深部矽卡岩型富铁矿体的叠加异常,而奥陶系的叠加重力异常是重磁异常不完全同源的主要原因。矿集区中部超深覆盖区内的潘店重磁异常是本次的重点研究对象,

也是寻求进一步找矿新突破的关键区域。

4.2 成矿地质体圈定及空间形态分析

成矿地质体(燕山晚期闪长岩体)圈定对齐河—禹城覆盖区找矿意义重大。首先通过对近南北向中性岩浆岩带的边界圈定,可以极大地缩减找矿范围;其次通过对岩浆岩带内闪长岩体局部凸起区的识别可以更进一步确定重点找矿区域。区内闪长岩具有高密度、中高磁性的物性特征,其形成的重磁异常也呈现出较高的同源性,因此可利用重磁平面资料的位场转换成果对其进行识别及圈定(范正国等,2010;王赛昕等,2017;孙中宇等,2018;Yadav et al.,2018;Mondal et al.,2021)。具体圈定方法为:利用剩余重力异常垂向一阶导数零值线、水平一阶导数或水平梯度模极值位置进行圈定(图4a、b);利用航磁化极磁异常垂向一阶、二阶导数的零值线进行圈定(图4c、d),基于重磁资料进行综合识别分析可有效减小成矿地质体的圈定误差。

圈定结果显示,重磁异常边界的梯度陡变带经位场转换处理后,其水平导数极值带及垂向导数零值线均较为明显,岩体异常从重磁场中被明显剥离,反映出近南北向岩浆岩带边界清晰,基于重磁资料所圈定岩浆岩带边界位置分布及规模基本吻合,面积分别为228 km²、240 km²。重磁推断的边界差异主要体现在两方面:首先是在潘店异常东西两侧,磁法圈定的边界范围稍大于重力圈定结果;其次是岩浆岩带内的重磁垂向导数高值区并不完全重合。推断分析其原因为:岩体边部厚度逐渐减小,重力识别能力减弱;奥陶系与岩体密度差较小,

表2 重力推断划分构造单元表
Table 2 Table of tectonic units classified by gravity inference

I	II	III	IV	V	次级构造单元
	华北拗陷区	济阳拗陷	惠民潜断陷	临邑潜凹陷	-
				乐平铺潜凹陷	-
					-
华北板块	鲁西隆起区	鲁中隆起	泰山—济南断隆	齐河潜凸起	望鲁店次级潜凸起 大高庄次级潜凸起 大张潜凸起 潘店潜凸起 李屯潜凸起 仁里集潜凹陷 袁营次级潜凸起 伦镇潜凹陷 李茂吾潜凸起
				泰山凸起	-

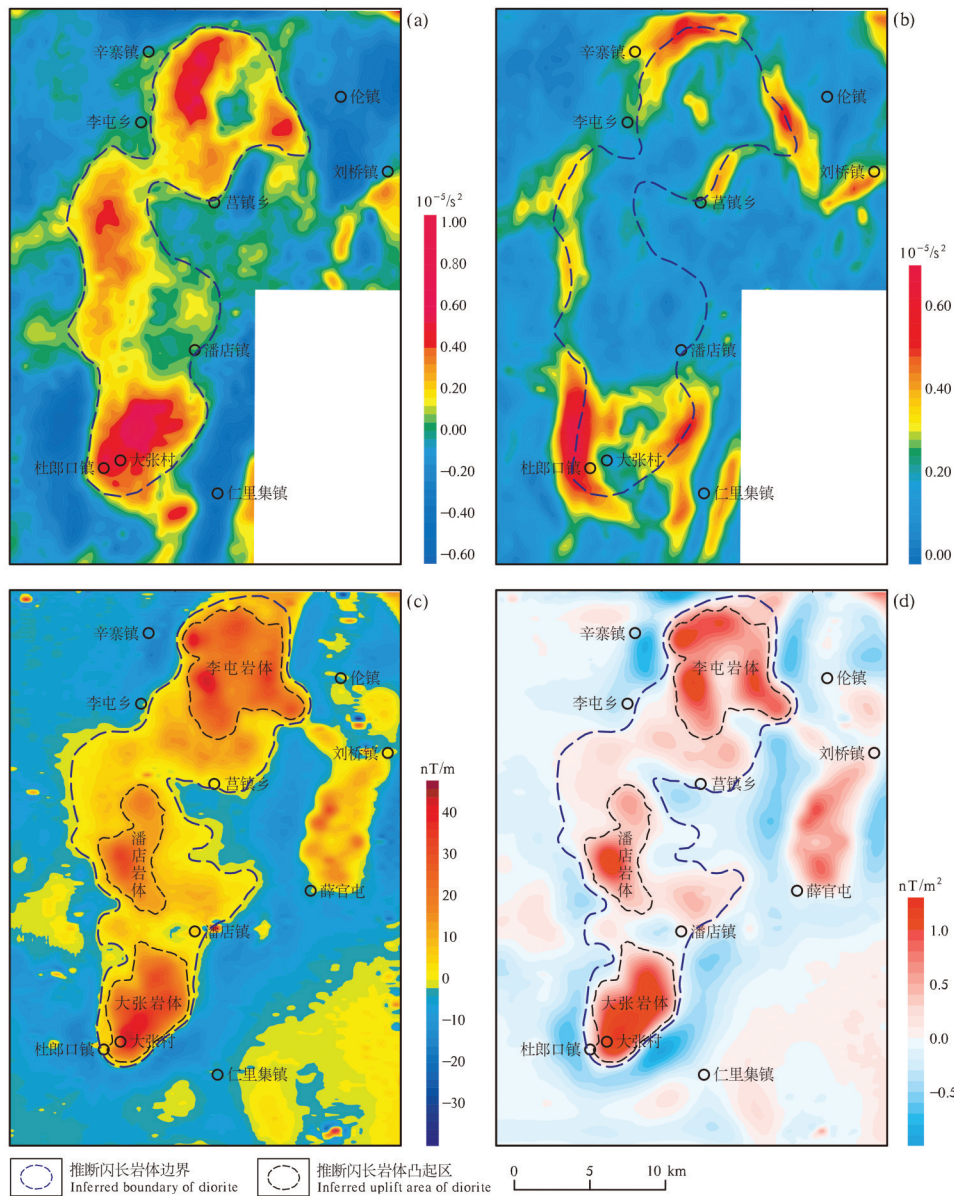


图4 齐河—禹城矿集区成矿地质体边界圈定示意图(a,b右下空白区无实测重力数据)
 a—剩余重力异常垂向一阶导数图;b—剩余重力异常水平梯度模图;c—航磁化极异常垂向一阶导数图;d—航磁化极异常垂向二阶导数图
 Fig.4 Boundary delineation of metallogenic geological body in Qihe—Yucheng ore concentration area(No measured gravity data in the lower right blank area of Fig.a,b)

a—Map of the first-order vertical derivatives of residual gravity anomaly; b—Map of the Horizontal gradient module of residual gravity anomaly;
 c—Map of the first-order vertical derivatives of RTP aeromagnetic anomaly; d—Map of the second-order vertical derivatives of RTP aeromagnetic anomaly

二者同为高密度体,基于重力资料进行边界圈定时,一定程度掺杂了奥陶系的干扰异常。综上可知,矿集区内闪长岩体的围岩地层一般无磁性,磁法圈定的干扰因素较少,对成矿地质体边界圈定的准确度更高,但重力圈定在本区仍具有重要意义,奥陶系灰岩作为的控矿地层,可通过重磁垂向导数高值区之间的分布差异,一定程度辨别岩浆岩带内

薄层奥陶系的残留区域。通过岩浆岩带内航磁化极垂向导数局部高值区对闪长岩体的局部凸起进行识别,进而确定重点找矿地段(图4c、d)。由北向南分别圈定出李屯、潘店、大张三处岩体凸起,可知李屯岩体规模最大、大张岩体次之,潘店岩体规模最小,三者面积分别约45 km²、29 km²、22 km²,其中潘店岩体凸起区是本次的研究重点。成矿地质体

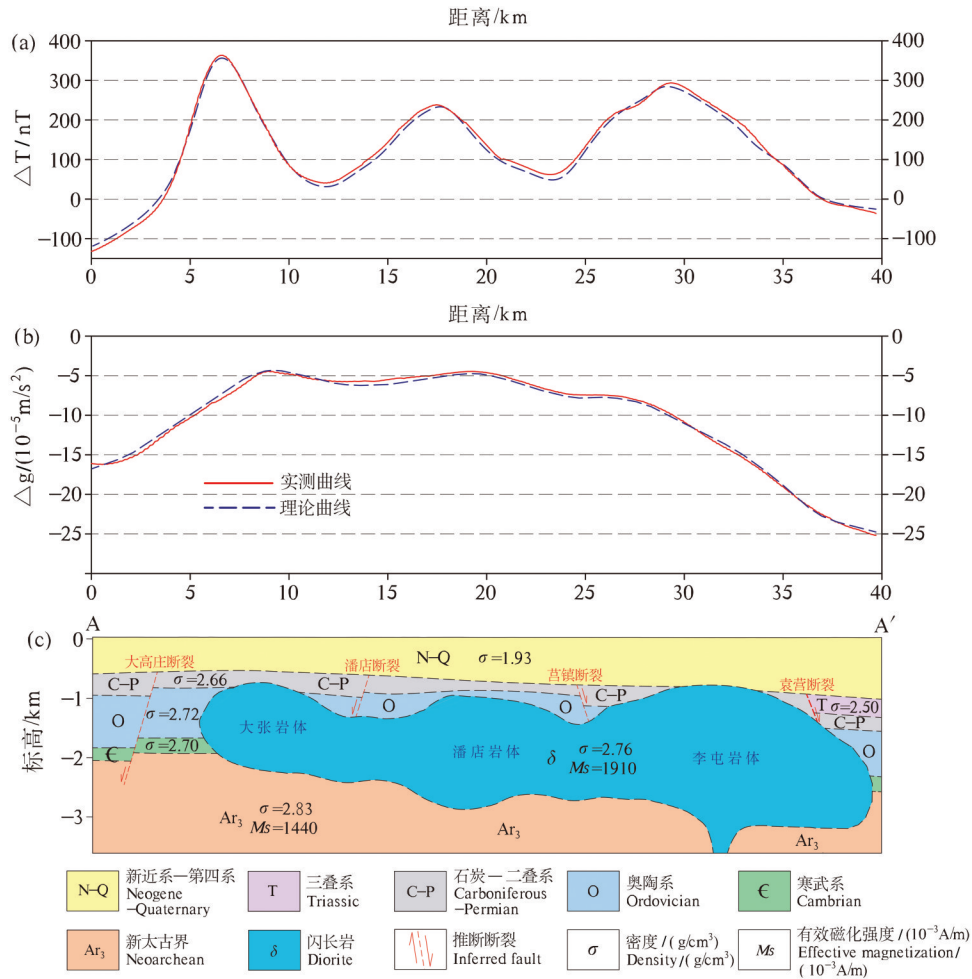


图5 2.5D重磁联合反演推断成矿地质体空间形态

a—磁力反演剖面图;b—重力反演剖面图;c—推断地质图

Fig.5 2.5D gravity and magnetic joint inversion to infer the spatial morphology of metallogenic geological body
a—Magnetic inversion profile; b—Gravity inversion profile; c—Inferred geological map

的相关圈定及解译为后续重磁异常剖析及定量反演奠定了基础。

A-A'折线剖面贯穿李屯、潘店、大张三处重磁异常,基于RGIS平台开展2.5D重磁剖面联合反演,对成矿地质体深部空间形态进行解译(图5)。剖面曲线特征显示出上述三处岩体凸起形成明显的重磁响应,且重磁异常具有高度的同源特性。受北方向的斜磁化影响,各岩体中心位置均位于磁异常 ΔT 峰值偏北,根据岩体规模、形态等差异,岩体中心区距剖面曲线峰值中心的位移略有不同。

对比南北两侧大张、李屯异常内的铁矿勘查钻孔可知,矿集区内低密度新生代超深覆盖层由南向北逐渐增厚,重力场向北整体减弱,钻孔显示大张岩体顶面埋深为697~800 m,李屯岩体顶面埋深为

1127~1365 m,前者侵位明显较高,导致大张岩体所引起的重磁异常在区内反映最为明显。根据反演结果推断:中部潘店重磁异常的主要成因同为燕山晚期闪长岩体,且潘店岩体与大张、李屯岩体可能处于同一近南北向的中性岩浆岩带内;其中推断大张岩体在研究剖面内顶面埋深约700 m,岩体厚度约1.5 km,其新生界覆盖层相对较薄且岩体侵位较高;以往钻孔显示李屯岩体局部上覆盖新生界,未揭露古生界,覆盖厚度可达700 m以上,导致其重力异常并不明显,反演推断李屯岩体顶面埋深约800 m,岩体最厚处超过2 km;推断潘店异常区内岩体埋深约1200 m,厚度接近2 km。综合分析推断认为:矿集区南部的大张岩体厚度最小但侵位最高,其上部新生界覆盖最薄,重磁异常幅值均为剖面内最高值;北部李屯岩体埋藏较

深但厚度最大,新生界覆盖最厚,重力异常幅值较低但磁异常明显;中部潘店岩体厚度介于二者之间,埋深最大,产生的磁异常最弱。

4.3 已知铁矿床重磁找矿标志

利用重磁基础及位场转换成果,分析重磁异常间的组合关系,建立多种识别信息的重磁标志,能有效提取目标异常信息(Li et al., 2015; Sismanto et al., 2018; 樊文鑫等, 2019; Li et al., 2020; Yan et al., 2020)。矿集区内燕山晚期闪长岩及矽卡岩型富铁矿体与古生代沉积围岩之间存在着明显的磁性差异,其中闪长岩体规模相对较大且埋藏较深,呈高密度、中高磁性特征,可形成大范围且形态相对宽缓的封闭重磁异常;铁矿体呈强磁性特征,其磁异常叠加在岩体异常之上;奥陶系灰岩作为控矿地层,呈高密度、无(微)磁性特征,可根据低磁、高重

的特征对其进行辨别。中部潘店找矿空白区南北两侧的大张、李屯重磁异常内均已取得相关找矿成果,其重磁异常主体为燕山晚期闪长岩体,同时叠加了残留奥陶系的重力异常与矽卡岩性富铁矿体的磁异常,两处已知铁矿床具备相似的重磁找矿标志(图6,图7),总结如下:

(1)磁异常内密集等值线向同方向规律性的高值凸起,即同形外凸的磁异常梯度陡变带,一定程度显示出相对宽缓的岩体磁异常内的铁矿体叠加异常,该特征是已知铁矿区内最为直观典型的找矿标志。

(2)对于同源性差异相对较大的重磁异常而言,见矿钻孔大都位于剩余重力异常与航磁化极磁异常的交汇区内,此类异常交汇区可推断为燕山晚期闪长岩体(成矿地质体)与奥陶系(控矿地层)的

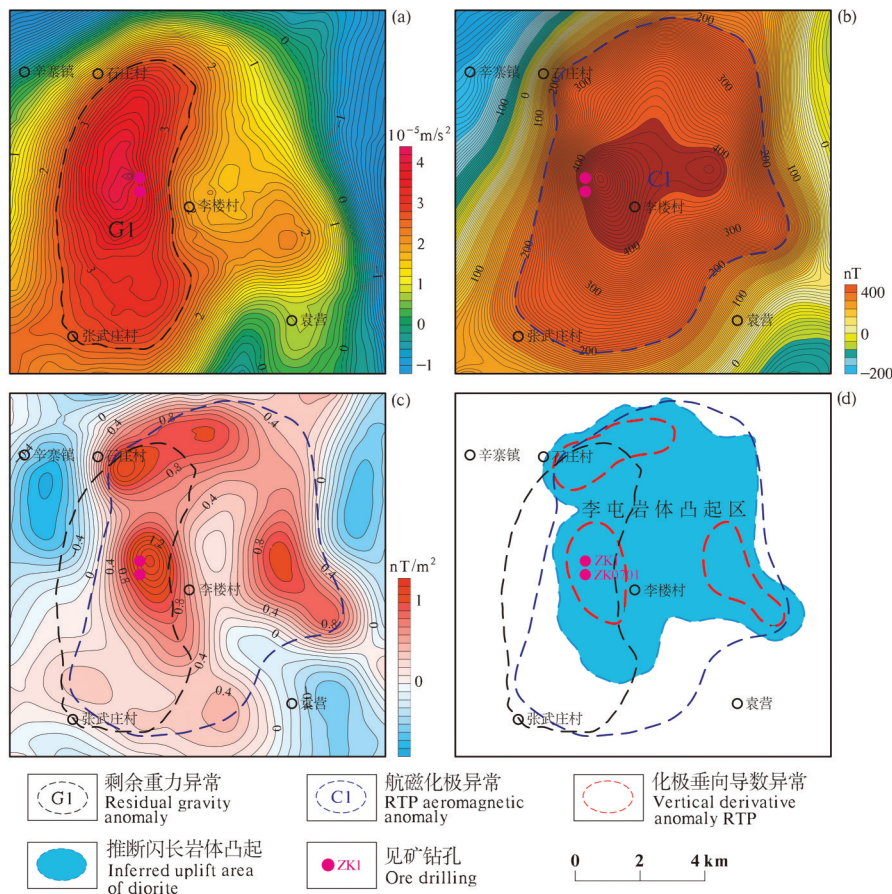


图6 李屯铁矿床重磁异常剖析图

a—剩余重力异常图; b—航磁化极异常图; c—航磁化极异常垂向二阶导数图; d—推断地质图

Fig.6 Analytical map of gravity and magnetic anomalies in Litun iron deposit

a—Map of residual gravity anomaly; b—Map of RTP aeromagnetic anomaly; c—Map of the second-order vertical derivatives of RTP aeromagnetic anomaly; d—Inferred geological map

接触部位,成矿较为有利,这一标志在李屯重磁异常区内找矿效果显著。

(3)经位场转换处理后,梯度陡、幅值高的化极垂向导数异常反映了分离出的超深覆盖区下深部铁矿体的矿致异常,且位场转换后提取的垂向导数异常范围较原有航磁化极磁异常明显缩减,该找矿标志大大缩小了勘查范围,同时提高了找矿的准确度。

通过对李屯、大张两处已知铁矿床的异常信息进行梳理,同时将见矿钻孔的重磁异常及其位场转换特征进行细致分析(图6,图7),总结了已知铁矿床的重磁找矿标志,由已知到未知,进而指导矿集区中部潘店超深覆盖区的深部找矿工作。

4.4 潘店异常剖析及2.5D联合反演

齐河—禹城矿集区中部超深新生界覆盖区内

的潘店重磁异常是本次寻找找矿新突破的重点区域。以上述已知铁矿床重磁找矿标志为导向,首先对潘店异常进行剖析,从潘店重磁异常之间的非同源性特征入手,推断解译异常内成矿地质体、控矿地层及铁矿体的分布范围,确定平面重点找矿区域;其次利用2.5D重磁联合反演,定量解译潘店异常内的覆盖层厚度、岩体埋深及矿体形态等关键因素指标。潘店重磁异常(G2-C2)为近南北向似椭圆状展布(图8),重磁异常幅值均低于南部大张、北部李屯异常,闪长岩体及铁矿体均埋深较大。为了提取残留奥陶系灰岩的局部重力异常及深部铁矿体的叠加异常,对重磁异常进行垂向导数位场转换(图8c、d、e),航磁化极后的垂向导数异常位于推断的潘店岩体凸起的偏西位置。

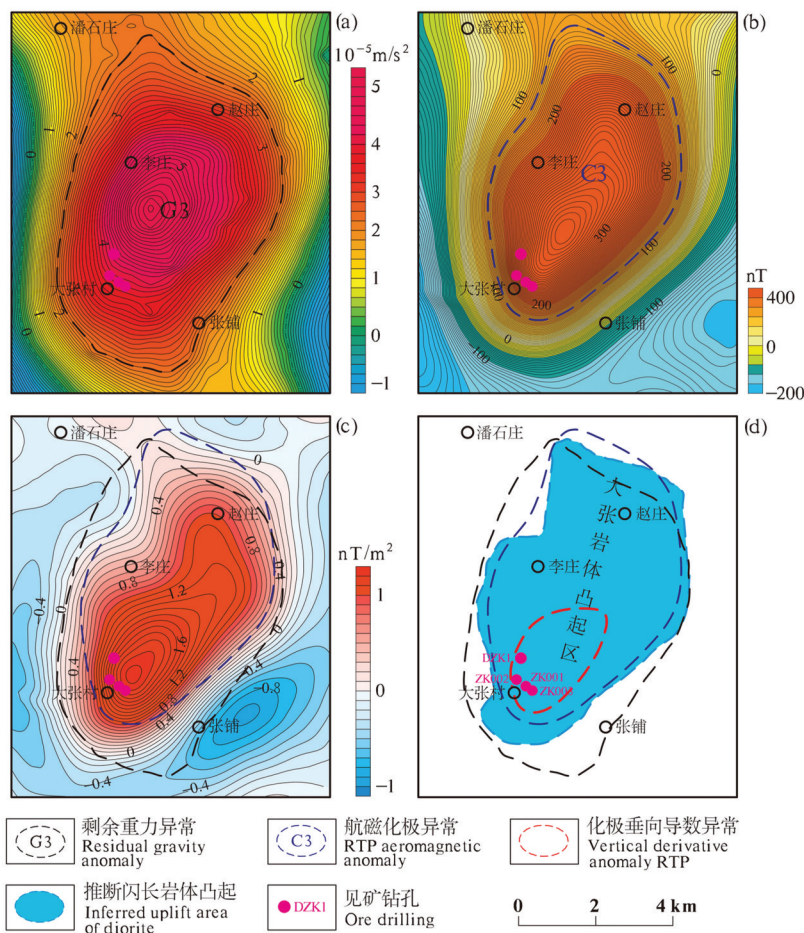


图7 大张铁矿床重磁异常剖析图

a—剩余重力异常图;b—航磁化极异常图;c—航磁化极异常垂向导数二阶导数图;d—推断地质图

Fig.7 Analytical map of gravity and magnetic anomalies in Dazhang iron deposit

a—Map of residual gravity anomaly; b—Map of RTP aeromagnetic anomaly; c—Map of the second-order vertical derivatives of RTP aeromagnetic anomaly; d—Inferred geological map

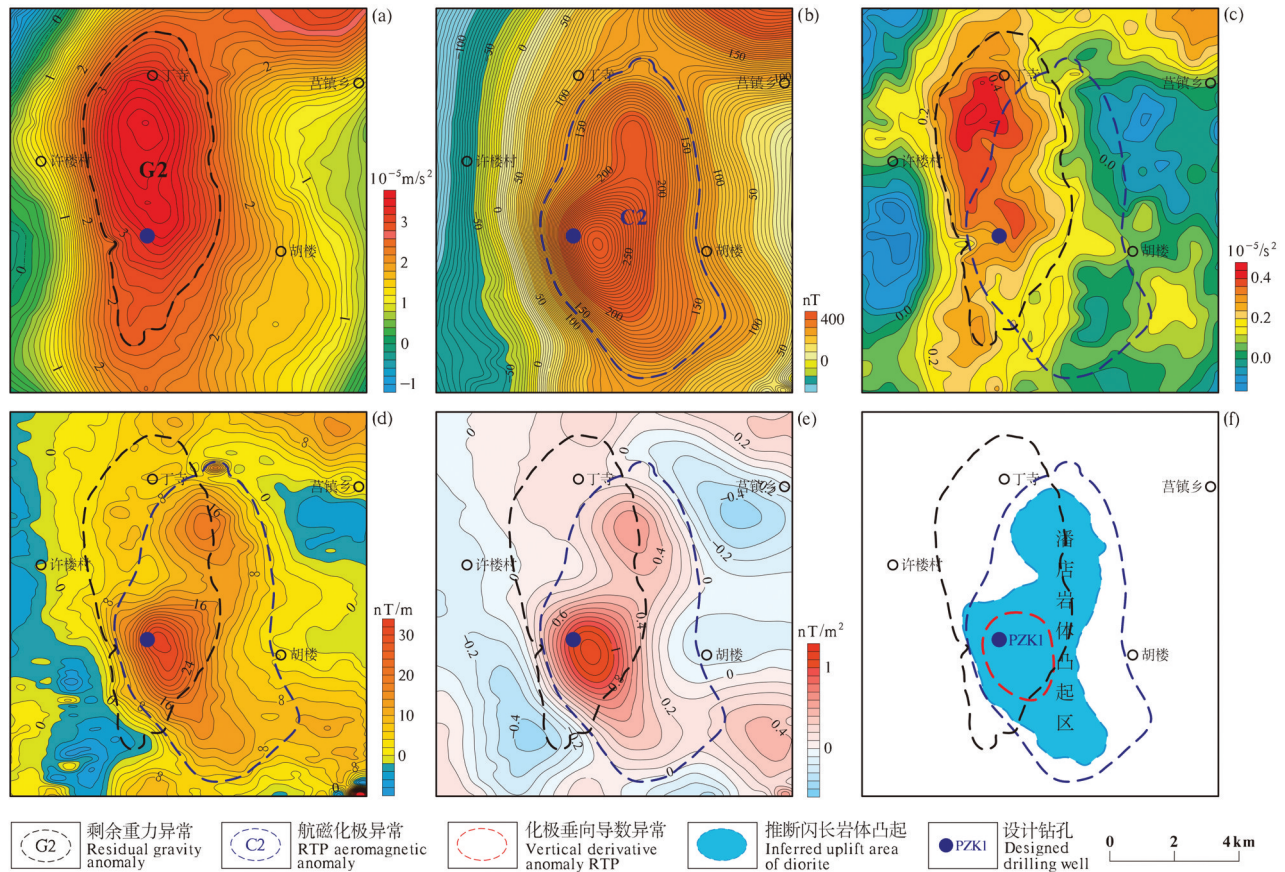


图8 齐河—禹城矿集区中部潘店重磁异常剖析图

a—剩余重力异常图;b—航磁化极异常图;c—剩余重力异常垂向一阶导数图;d—航磁化极异常垂向一阶导数图;
e—航磁化极异常垂向二阶导数图;f—推断地质图

Fig.8 Analytical map of Pandian gravity and magnetic anomalies in the central part of Qihe-Yucheng ore concentration area
a—Map of residual gravity anomaly; b—Map of RTP aeromagnetic anomaly; c—Map of the first-order vertical derivatives of residual gravity anomaly;
d—Map of the first-order vertical derivatives of RTP aeromagnetic anomaly; e—Map of the second-order vertical derivatives of RTP aeromagnetic anomaly; f—Inferred geological map

对于齐河—禹城矿集区内整体岩浆岩带而言,对应的重磁场高度同源,但其内部李屯、潘店重磁异常均一定程度显示出非同源特征。潘店重磁异常的分布地段及异常中心位置均存在差异,重力异常范围相对磁异常偏西,中心位于磁异常中心以北约4 km,重磁异常存在明显的交集,交汇区面积约16 km²。推断重磁非同源的原因为:受西侧近南北向西倾的许楼正断层影响,潘店岩体西侧地块抬升,石炭系—二叠系存在部分剥蚀,高密度奥陶系形成局部重力异常。对潘店重磁异常交汇区进行分析研究,交汇区以西剩余重力及其垂向一阶导数异常明显,但磁场在该地段内明显减弱,推断交汇区以西主要呈现高密度、低磁性奥陶系灰岩的重磁特征;在异常交汇区以东,磁异常相对明显,重力场

表现为向东减弱的近南北向梯级带特征,主要为高密度、中高磁性的闪长岩体分布。综上分析认为,重磁异常的交汇部位可能为闪长岩体与奥陶系的接触区,其内部重磁异常均较为明显,同时化极磁异常等值线向北西存在明显的高值外凸,且化极垂向导数高值异常明显,均指示出深部矽卡岩型铁矿体的叠加异常,因此推断潘店重磁异常交汇区是齐河—禹城矿集区中部的找矿重点地段。

潘店异常规模小、幅值低,被超深的新生界覆盖,目标体埋深大且物探解译的约束条件少,单一物探方法反演的多解性凸显,存在较大的解译误差。其中重力反演可反映地层、构造的垂向展布特征,但由于成矿地质体与控矿地层密度相近,难以识别闪长岩体的侵入界面;磁法反演可定量解译岩

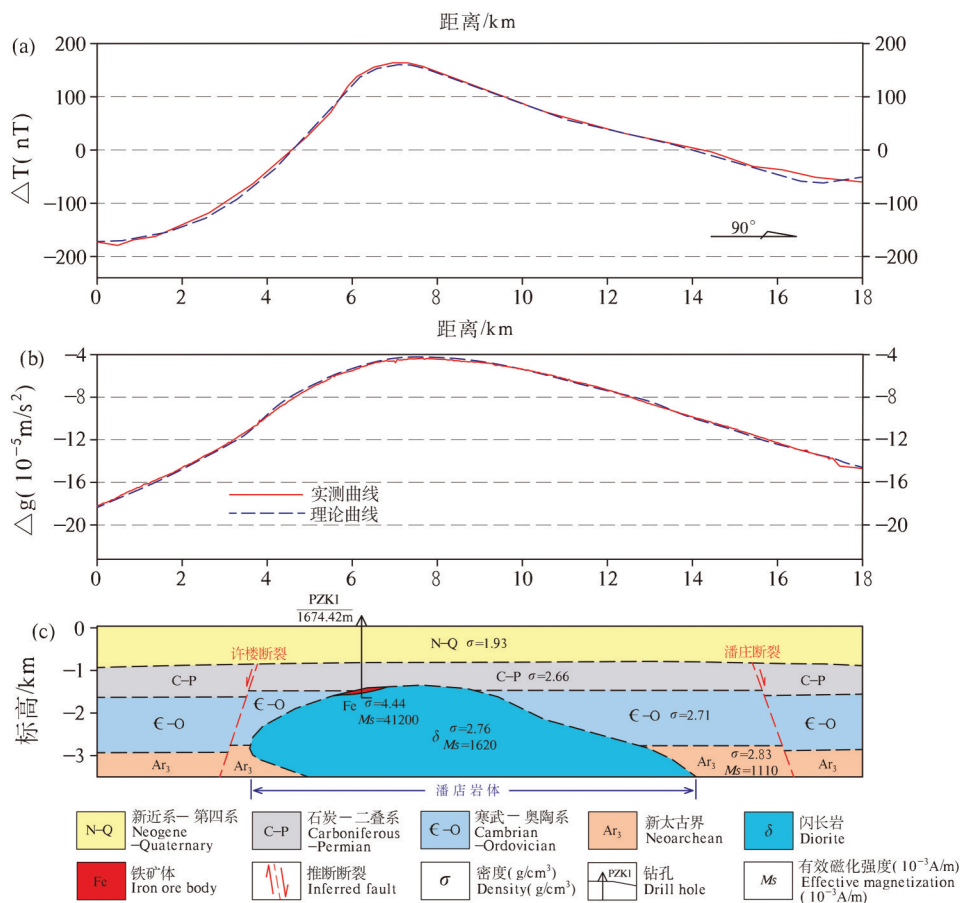


图9 潘店异常 PGM1 剖面 2.5D 重磁联合反演成果图

a—磁力反演剖面图;b—重力反演剖面图;c—推断地质图

Fig.9 2.5D gravity and magnetic joint inversion result map of PGM1 profile in Pandian anomaly

a—Magnetic inversion profile; b—Gravity inversion profile; c—Inferred geological map

体形态、矿体厚度等关键指标,但无法识别无磁性的覆盖层厚度及控矿地层分布等要素,因此重磁联合反演可对单方法定量解译存在的不足进行弥补,有效减小多解性及推断误差。针对潘店异常平面解译所识别的找矿重点地段,布设 PGM1 重磁联合剖面,剖面方位角 90° ,长度 18 km(图 9),以相邻铁矿区钻孔资料及岩心物性作为约束条件,进行 2.5D 重磁联合反演,获取深部目标地质体的垂向信息(Misael León-Sánchez et al., 2018; Gross, 2019; 张文浩等, 2019; Tavakoli et al., 2021; Mikołajczak et al., 2021)。

2.5D 重磁联合反演成果(图 9)显示,重磁剖面曲线均为单峰特征,西侧梯度相比于东侧较陡,对应岩体的顶界面变化东侧较缓。区域地层整体呈 NEE 走向、NW 倾向,地层走向与 PGM1 剖面斜交夹角较小,反演的地层特征整体平缓,略微西倾,与实际地质情

况吻合。剖面西端临近乐平铺凹陷,受刘集断裂及许楼次级断裂错动影响,重磁场向西急剧减弱。由于东西剖面受南北斜磁化影响较小,岩体中心与重磁峰值基本对应,在峰值点西侧重磁曲线均存在局部凸起,推断其分别反映了许楼断裂错动下高密度奥陶系的抬升以及深部砂卡岩型富铁矿体的叠加磁异常。反演结果显示:PGM1 剖面内新生界覆盖厚度 800~950 m,石炭系—二叠系厚度 550~700 m,寒武系—奥陶系平均厚度约 1200 m,岩体顶面埋深约 1400 m;潘店岩体形态西陡东缓,局部侵位至石炭系—二叠系,约 6 km 距离处岩体顶面西侧与薄层奥陶系残留的接触地段对应上述局部重磁异常凸起,同时位于潘店平面重磁异常的交汇区内,为重点找矿地段。根据 2.5D 重磁联合反演结果,在剖面水平距离 6.2 km 处设计钻孔 PZK1,开展钻探验证工作,以期寻求齐河—禹城矿集

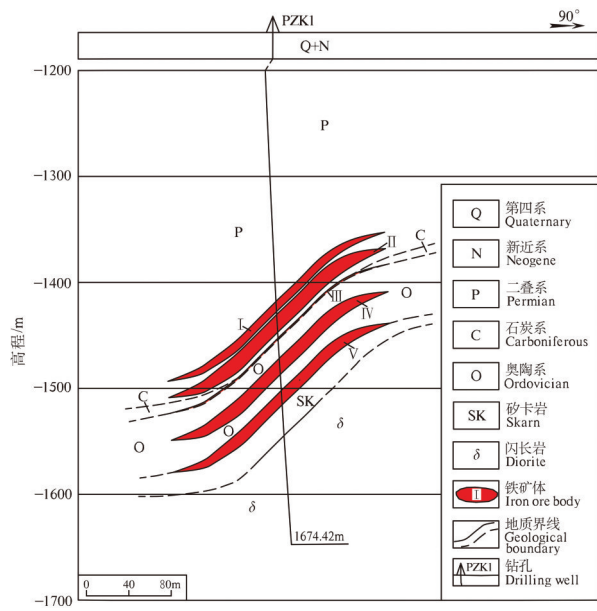


图10 潘店地区铁矿体勘探线地质剖面图
Fig.10 Geological sections along exploratory line of iron ore body in Pandian area

区中部的找矿突破。

5 深部找矿突破及其启示

以重磁资料的平面解译及剖面联合反演为依据,在潘店异常重点找矿部位部署PZK1钻孔开展异常验证,揭露到深部厚大的矽卡岩型富铁矿体,铁矿体共计5层,位于1444.44~1542.19 m深度区间,矿体西倾,总厚度为40.26 m(图10,图11),平均品位为TFe:51.82%,mFe:47.20%,在齐河—禹城矿集区中部取得矽卡岩型富铁矿的找矿新突破,填补

了中部潘店异常的找矿空白。钻孔揭露的新生界覆盖厚度、地层分布、成矿地质体及矿体埋深等特征与2.5D重磁联合反演解译结果高度吻合,其中矿体及闪长岩体埋深分别为1444 m、1571 m,均为矿集区内最大揭露深度,表明基于重磁综合解译在异常规模小、幅值弱及矿体埋深大的超深覆盖区内开展深部找矿工作效果显著。

潘店铁矿床是继北部李屯、南部大张铁矿床之后,在齐河—禹城矿集区中部新发现的又一处矽卡岩型富铁矿床,显示了矿集区内广阔的找矿前景。本次找矿新突破的取得,开辟了齐河—禹城矿集区内又一处重要的找矿新空间,使李屯、潘店、大张重磁异常得以紧密关联,确立以该3处异常作为当前齐河—禹城矿集区内的重点找矿区域(图12),同时在找矿方法、理论依据、勘查经验等方面为后续在薛官屯、万庄等外围次级异常开展同类型铁矿勘查工作指明了方向。

6 结论

(1)齐河—禹城矿集区近似同源重磁异常带的主要成因为近南北向的中性岩浆岩带,其内部李屯、潘店、大张3处找矿重点异常主要由岩浆岩带内闪长岩体的局部凸起所引起,同时包含了岩体上覆奥陶系灰岩的重力异常及矽卡岩型富铁矿体的叠加磁异常。

(2)本次利用重磁位场转换资料的综合解译,对中性岩浆岩带边界及其内部闪长岩体凸起部位进行了较为准确的识别和圈定;对矿集区中部潘店重磁异常进行精细剖析,提取出目标矿体的叠加磁

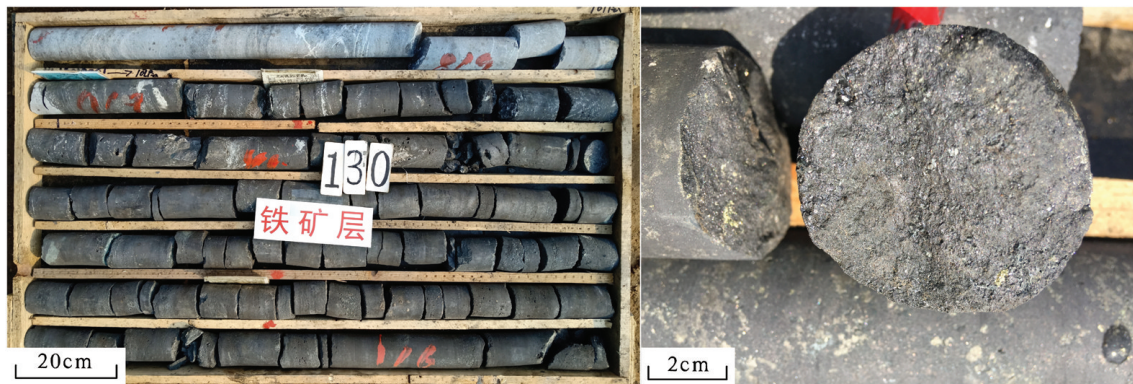


图11 潘店异常PZK1钻孔矽卡岩型富铁矿体岩心图
Fig.11 Core map of skarn iron-rich ore body in PZK1 drill well of Pandian anomaly

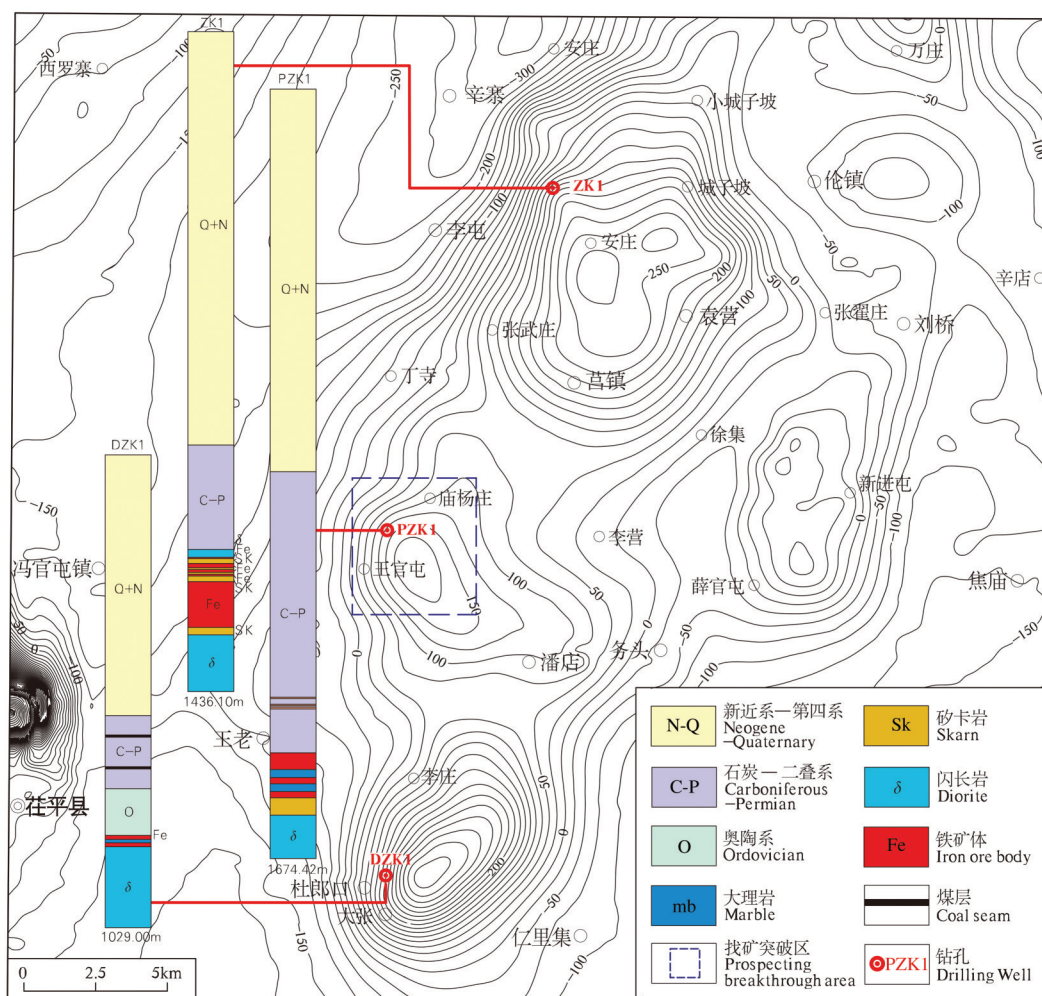


图12 齐河—禹城矿集区典型铁矿勘查钻孔与航磁异常(nT)对比示意图

Fig.12 Comparison of typical iron deposit exploration drilling well and aeromagnetic anomalies(nT) in Qihe-Yucheng ore concentration area

致异常信息;通过2.5D重磁联合反演,解译了闪长岩体(成矿地质体)与奥陶系(控矿地层)的垂向空间展布特征,探究矿体产状形态及埋深。

(3)按照重磁场定性分析、构造格架划分、成矿地质体圈定、异常剖析及定量反演解译的流程逐步推进,克服了总异常成因复杂、矿致异常提取难度大、定量反演约束条件不足等因素,识别出超深覆盖下的深部铁矿体地球物理信息,经钻探验证取得了齐河—禹城矿集区中部的找矿新突破。

(4)区内成矿地质体、控矿围岩及矽卡岩型铁矿体均具有较明显的可区别于围岩的密度或磁性特征,目前看来重磁勘探仍是齐河—禹城超深覆盖区内最直接有效的地球物理找矿方法,但其弊端也是显而易见的,最明显问题在于约束条件有限的情

况下重磁定量反演存在的多解性及推断误差,这些因素导致钻探验证的风险仍然较大。总体分析认为,加大投入更高分辨率的反射地震法、广域电磁法等多元地球物理探测方法,尝试开展多尺度、多参数、多方法约束的综合地球物理解译是齐河—禹城超深覆盖区今后开展深部找矿工作的重点所在。

致谢:衷心感谢山东省物化探勘查院马兆同研究员、山东省自然资源厅矿产勘查技术指导中心李英平研究员在本文撰写过程中提供的帮助以及审稿专家及编辑部对本文提出的宝贵意见。

References

Cao Xinzhi, Zhang Wangsheng, Sun Huashan. 2009. Progress in the study of deep exploration in China[J]. Geological Sciences and

- Technology Information, 28(2): 104–109(in Chinese with English abstract).
- Chen Xiaoman, Wang Juan, Wang Jiguo, Zhai Dongliang, Cai Tu. 2017. Geological characteristics and prospecting potential of Dazhang iron deposit in Qihe County of Shandong Province[J]. Shandong Land and Resources, 33(12): 24–29(in Chinese with English abstract).
- Ding Wenxiang, Yuan Feng, Li Xiaohui, Sun Weian, Liu Guangxian, Yang Di. 2018. Deep geological structure analysis and metallogenic prediction of Zhonggu ore field in the south section of Ningwu Basin based on gravity and magnetic joint inversion[J]. Acta Geologica Sinica, 92(11): 2301–2317 (in Chinese with English abstract).
- Fan Wenxin, Li Guangming, Jiao Yanjie, Liang Shengxian. 2019. Enlightenment of the characteristics of gravity and magnetic field on the tectonic framework and metallogenesis of the Zhaxikang ore-concentrating area, Tibet[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 49(6): 1741–1754(in Chinese with English abstract).
- Fan Zhengguo, Huang Xuzhao, Xiong Shengqing. 2010. Technical Requirements in Magnetic Application[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Gross L. 2019. Weighted cross-gradient function for joint inversion with the application to regional 3-D gravity and magnetic anomalies[J]. Narnia, 217(3): 2035–2046.
- Hao Xingzhong, Yang Yiheng, Li Yingping, Gao Huali, Chen Lei. 2019. Ore-controlling characteristics and prospecting criteria of iron deposits in Qihe area of Western Shandong[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 49(4): 982–991(in Chinese with English abstract).
- Hao Xingzhong, Zheng Jinming, Liu Wei, Wang Runsheng, Zhang Guili. 2020. Metallogenic prognosis of skarn-type iron ore deposits in Qihe–Yucheng area, Shandong Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(2): 293–302(in Chinese with English abstract).
- Li Changbo, Wang Liangshu, Sun Bin, Feng Runhai, Wu Yongjing. 2015. Interpretations of gravity and magnetic anomalies in the Songliao Basin with wavelet multi-scale decomposition[J]. Frontiers of Earth Science, 9(3): 427–436.
- Li Weilin, Li Jun, Wang Xuben. 2020. Deep crustal structure imaging of gravity and magnetic anomalies in the Xisha Trough, China[J]. Arabian Journal of Geosciences, 13(6): 359–383.
- Liu Guangding, Hao Tianyao. 1995. Searching of hidden mineral deposits by geophysical methods[J]. Chinese Journal of Geophysics, 38(6): 850–854(in Chinese with English abstract).
- Meng Guixiang, Lü Qingtian, Yan Jiayong, Deng Zhen, Qi Guang, Xue Ronghui. 2019. The research and application of explorational technology of “Penetrating” to geology and mineral investigation in overburden area[J]. Acta Geoscientica Sinica, 40(5): 637–650(in Chinese with English abstract).
- Mikolajczak M, Barmuta J, Ponikowska M, Mazur S, Starzec K. 2021. Depth-to-basement study for the western Polish Outer Carpathians from three-dimensional joint inversion of gravity and magnetic data[J]. Journal of Geosciences, 66(1): 15–36.
- Misael León-Sánchez A, Gallardo L A, Ley-Cooper A Y. 2018. Two dimensional cross-gradient joint inversion of gravity and magnetic data sets constrained by airborne electromagnetic resistivity in the Capricorn Orogen, western Australia[J]. Exploration Geophysics, 49(6): 940–951.
- Mondal S, Guha A, Pal S K, Porwal A, Snehamoj Chatterjee, Komal Rani, Amin Beiranvand Pour, K.Vinod Kumar. 2021. Conjugate utilization of Landsat-8 OLI, ground gravity and magnetic data for targeting mafic cumulates within anorthositic-layered complex of Sittampundi, India[J]. Geocarto International, 36(16): 1855–1872.
- Sismanto S, Uji Y, Fitri J. 2018. Interpretation of the gravity and magnetic anomalies of the geothermal subsurface structure area in Pamancalan, Lebak, Banten, West Java, Indonesia[J]. Arabian Journal of Geosciences, 11(14): 1–16.
- Song Mingchun, Song Yingxin, Ding Zhengjiang, Wei Xufeng, Sun Shaoli, Song Guozheng, Zhang Junjin, Zhang Pijian, Wang Yongguo. 2019. The discovery of the Jiaojia and the Sanshandao giant gold deposits in Jiaodong Peninsula and discussion on the relevant issues[J]. Geotectonica et Metallogenia, 43(1): 92–110(in Chinese with English abstract).
- Sun Zhongyu, Liu Zhan, Yang Bo, Zhang Wang, Zhang Yong, Meng Xiangjun. 2018. Discussion on the eastern and western boundary of Haiyang depression and eastern boundary of Jiaolai Basin[J]. Progress in Geophysics, 33(5): 2166–2171(in Chinese with English abstract).
- Tao Long, Zhang Shasha, Lan Xueyi, Tang Zhengjiang, An Ming, Yan Jiayong, Wang Yunyun, Guo Dong, Ye Lin, Hong Dajun. 2019. Application of 1: 50000 gravity and magnetic exploration for mineral prospect in heavily covered area in Xuancheng, Anhui Province[J]. Geology in China, 46(4): 894–905(in Chinese with English abstract).
- Tavakoli M, Kalateh A N, Rezaie M, Gross L, Fedi M. 2021. Sequential joint inversion of gravity and magnetic data via the cross-gradient constraint[J]. Geophysical Prospecting, 69(7): 1542–1559.
- Tian Hongjun, Yin Wenbin, Liu Guangdi, Jiang Yongfang, You Wenbing. 2020. The application and evaluation of the wide field electromagnetic method in the low resistance coverage area: Exemplified by Zhongmu area of Henan Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 44(5): 1025–1030(in Chinese with English abstract).
- Wang Saixin, Yan Tingjie, Zuo Huancheng. 2017. Effects of high-precision magnetic survey exploring vanadic titanomagnetite in peripheral Panzhihua area[J]. Geological Science and Technology

- Information, 36(3): 255–261(in Chinese with English abstract).
- Wu Chengping, Yu Changchun, Wang weiping, Ma Xunbiao, Fan Zhengguo, Zhu Hongwei. 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).
- Yadav P K, Adhikari P K, Srivastava S, Maurya V P, Tripathi A, Singh S, Singh R K, Bage A K. 2018. Lithologic boundaries from gravity and magnetic anomalies over Proterozoic Dalma volcanics[J]. Journal of Earth System Science, 127(2): 1–9.
- Yan Jiayong, Lü Qingtian, Qi Guang, Fu Guangming, Zhang Kun, Lan Xueyi, Guo Xin, Wei Jin, Luo Fan, Wang Hao, Wang Xu. 2020. A 3D geological model constrained by gravity and magnetic inversion and its exploration implications for the world-class Zhuxi tungsten deposit, South China[J]. Acta Geologica Sinica-English Edition, 94(6): 1940–1959.
- Zhang Jiajia, Zhang Shunlin, Wang Qingsong, Gu Dalian. 2020. Application of comprehensive geophysical prospecting method in ore prospecting in coverage area: A case study of integrated survey area of Wuhe gold mine in Eastern Anhui[J]. Geological Survey of China, 7(6): 109–115(in Chinese with English abstract).
- Zhang Wenhao, Wang Dandan, Li Shizhen, Zhou Xingui, Zhang jiaodong, Liu Weibin, Zhou Ximing, Wang Peiye. 2019. The application of gravity-magnetic-electric prospecting engineering for Carboniferous-Permian petroleum geological survey in Sanjiang Basin, Heilongjiang Province[J]. Geology in China, 46(1): 191–201(in Chinese with English abstract).
- Zhao Min, Sheng Yong, Qi Lianggong. 2019. The application of high precision gravity and magnetic survey to prospecting in coverage area: A case study of the reconnaissance of Weishan iron and copper deposit in Wuwei County[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 43(6): 1211–1216(in Chinese with English abstract).
- Zhu Yuzhen, Qiang Jianke, Wang Linfei, Zhang Wenyan, Dai Shikun. 2019. Three-dimensional inversion analysis of magnetic data from deep buried iron ore and prediction of prospecting target area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 43(6): 1182–1190(in Chinese with English abstract).
- 曹新志, 张旺生, 孙华山. 2009. 我国深部找矿研究进展综述[J]. 地质科技情报, 28(2): 104–109.
- 陈晓曼, 王娟, 王继国, 翟东亮, 蔡图. 2017. 山东省齐河大张铁矿地质特征及找矿前景[J]. 山东国土资源, 33(12): 24–29.
- 丁文祥, 袁峰, 李晓晖, 孙维安, 刘光贤, 杨迪. 2018. 基于重磁联合反演的宁芜盆地钟姑矿田深部地质结构解析及成矿预测[J]. 地质学报, 92(11): 2301–2317.
- 樊文鑫, 李光明, 焦彦杰, 梁生贤. 2019. 重磁场特征对西藏扎西康矿集区构造格架与成矿的启示[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 49(6): 1741–1754.
- 范正国, 黄旭钊, 熊盛青. 2010. 磁测资料应用技术要求[M]. 北京: 地质出版社.
- 郝兴中, 杨毅恒, 李英平, 高华丽, 陈磊. 2019. 鲁西齐河地区铁矿控矿特征及找矿标志[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 49(4): 982–991.
- 郝兴中, 郑金明, 刘伟, 王润生, 王巧云, 张贵丽. 2020. 山东省齐河—禹城地区矽卡岩型铁矿成矿预测[J]. 地球学报, 41(2): 293–302.
- 刘光鼎, 郝天珧. 1995. 应用地球物理方法寻找隐伏矿床[J]. 地球物理学报, 38(6): 850–854.
- 孟贵祥, 吕庆田, 严加永, 邓震, 祁光, 薛融晖. 2019. “穿透性”探测技术在覆盖区地质矿产调查中的应用研究[J]. 地球学报, 40(5): 637–650.
- 宋明春, 宋英昕, 丁正江, 魏绪峰, 孙绍立, 宋国政, 张军进, 张丕建, 王永国. 2019. 胶东焦家和三山岛巨型金矿床的发现及有关问题讨论[J]. 大地构造与成矿学, 43(1): 92–110.
- 孙中宇, 刘展, 杨博, 张旺, 张勇, 孟祥君. 2018. 海阳凹陷东、西边界以及胶莱盆地东部边界讨论[J]. 地球物理学进展, 33(5): 2166–2171.
- 陶龙, 张莎莎, 兰学毅, 汤正江, 安明, 严加永, 王云云, 郭冬, 叶林, 洪大军. 2019. 1:5万重磁勘查在安徽宣城覆盖区地质找矿中的应用探索[J]. 中国地质, 46(4): 894–905.
- 田红军, 尹文斌, 刘光迪, 蒋永芳, 游文兵. 2020. 广域电磁法在低阻覆盖区的应用与评价—以河南中牟为例[J]. 物探与化探, 44(5): 1025–1030.
- 王赛昕, 颜廷杰, 左焕成. 2017. 高精度磁测在攀枝花外圍寻找钒钛磁铁矿的效果[J]. 地质科技情报, 36(3): 255–261.
- 吴成平, 于长春, 王卫平, 马勋表, 范正国, 朱宏伟. 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.
- 张家嘉, 张顺林, 汪青松, 顾大年. 2020. 综合物探方法在覆盖区找矿中的应用—以皖东五河金矿整装勘查为例[J]. 中国地质调查, 7(6): 109–115.
- 张文浩, 王丹丹, 李世臻, 周新桂, 张交东, 刘卫彬, 周锡明, 王佩业. 2019. 重磁电勘探在黑龙江三江盆地石炭系—二叠系油气地质调查中的应用[J]. 中国地质, 46(1): 191–201.
- 赵敏, 盛勇, 戚良刚. 2019. 高精度重磁测量在覆盖区找矿中的应用—以无为县蔚山铁铜矿预查为例[J]. 物探与化探, 43(6): 1211–1216.
- 朱裕振, 强建科, 王林飞, 张文艳, 戴世坤. 2019. 深埋铁矿磁测数据三维反演分析与找矿靶区预测[J]. 物探与化探, 43(6): 1182–1190.
- 朱裕振, 周明磊, 高志军, 张心彬. 2018. 山东齐河—禹城地区矽卡岩型富铁矿的发现及其意义[J]. 地质通报, 37(5): 938–944.

附中文参考文献