

doi: 10.12097/gbc.2022.09.023

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

朱裕振^{1,2,3}, 张文艳^{1,2*}, 邵贵航^{1,2}, 高志军^{1,2}, 汝亮^{1,2}, 闫冰^{1,2}, 杨洋³

ZHU Yuzhen^{1,2,3}, ZHANG Wenyan^{1,2*}, SHAO Guihang^{1,2}, GAO Zhijun^{1,2}, RU Liang^{1,2}, YAN Bing^{1,2}, YANG Yang³

1. 山东省煤田地质规划勘察研究院, 山东 济南 250104;

2. 中国地球物理学会煤田地球物理重点实验室, 山东 济南 250104;

3. 山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061

1. Shandong Provincial Research Institute of Coal Geology Planning and Exploration, Jinan 250104, Shandong, China;

2. Chinese Geophysical Society Key Laboratory of Coalfield Geophysics, Jinan 250104, Shandong, China;

3. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China

摘要: 近年来, 山东齐河—禹城李屯厚覆盖区富铁矿勘查取得了重大进展, 但该区新生界厚度大 (900~1100 m)、磁铁矿体埋藏深, 矿体引起的地球物理异常弱, 找矿难度大。为了揭示李屯富铁矿深部地质构造, 开展了分布式三维广域电磁探测, 应用高阶 2ⁿ 序列伪随机信号, 一次发射 49 个频率并同时接收, 实现分布式滚动测量, 获得了地下 2000 m 以浅地电特征, 并对地下地质结构进行解释, 构建了重点研究区的三维地质模型, 解释结果与已有的二维地震和钻探信息吻合度较高, 为重磁联合反演提供有效的地质结构约束, 结合重磁场特征和成矿规律圈定新的找矿靶区。结果表明, 分布式三维广域电磁法是获取厚覆盖地区深部地质结构的有效探测方法, 具有良好的应用前景。

关键词: 分布式三维广域电磁法; 富铁矿; 厚覆盖区; 山东

中图分类号: P618.31; P631.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)09-1555-10

Zhu Y Z, Zhang W Y, Shao G H, Gao Z J, Ru L, Yan B, Yang Y. 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. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(9): 1555–1564

Abstract: In recent years, significant progress has been made in the exploration of high-grade iron ores in the Litun heavy-cover area of Qihe—Yucheng, Shandong Province. But the Cenozoic thickness (900~1100 m) in this area is so large that the magnetic iron ore is deeply buried. The geophysical condition caused by the iron ore is thus abnormally weak, and the prospecting is difficult. To reveal the deep geological structure of high-grade iron ore in the Litun, distributed three-dimensional wide field electromagnetic detection was carried out. The high-order 2ⁿ sequence pseudo-random signal was used, which can transmit 49 frequencies at a time and receive at the same time, realize distributed rolling measurement, and obtain the geoelectric characteristics of 2000 m underground. Based on this, a detailed interpretation of the underground geological structure was carried out, and a three-dimensional geological model of the key research area was constructed. The interpretation results were in good agreement with the existing seismic and drilling information. It

收稿日期: 2022-09-23; 修订日期: 2023-06-08

资助项目: 国家重点研发计划项目《齐河—禹城覆盖区富铁矿体定位预测与增储示范》(编号: 2022YFC2903702-03)、山东省省级地质勘查项目《山东省禹城市李屯地区小刘庄铁矿普查》(编号: 鲁勘字(2022)25 号)、山东省煤田地质局科研专项基金《广域电磁法人机交互快速三维反演成像研究》(编号: 鲁煤地科字(2022)19 号)

作者简介: 朱裕振(1985-), 男, 高级工程师, 从事综合地质与地球物理勘探。E-mail: 277628696@qq.com

* 通信作者: 张文艳(1995-), 女, 工程师, 从事地球物理勘探与研究。E-mail: zwy15160@163.com

provides effective geological structure constraints for gravity-magnetic joint inversion. Delineates new prospecting targets in combination with gravity and magnetic characteristics and metallogenic laws. The results show that the distributed three-dimensional wide field electromagnetic method is an effective detection method to obtain the deep geological structure in the heavy-cover area and has a good application prospect.

Key words: distributed 3D wide field electromagnetic method; high-grade iron ore; thick coverage area; Shandong

2013 年以来,山东省煤田地质规划勘察研究院在山东省齐河—禹城的李屯地区率先发现富铁矿床,并持续取得找矿进展,见矿厚度 25~120 m,全铁平均品位达 55.47%,是国内罕见的厚层高品位富铁矿,找矿潜力巨大(张增奇等, 2016;朱裕振等, 2018;沈立军等, 2020)。前期工作主要通过航空重磁和地面磁测圈定找矿靶区,采用地面高精度重磁剖面剖析局部磁异常(朱裕振等, 2019;周明磊等, 2021;王润生等, 2023),并实施了少量的二维地震剖面对深部地质结构进行精细刻画。但本区是典型的厚覆盖地区(新生界厚度大于 900 m),矿体埋藏较深(1150~1430 m),铁矿体引起的平面磁异常信息较弱,重磁剖面测量纵向分辨率不足,反演结果存在多解性;地震勘探探测精度高,能较好地反映地层和岩体形态,可为重磁反演提供有效的约束,但受村庄限制较大、勘探成本较高。因此,目前亟需一种精度高、效率快、成本低的深部探测方法。

广域电磁法(WFEM)是一种新的人工源频率域电磁测深法(何继善, 2019),可以在广大的、不局限远区的区域进行观测,只需要测量一个场分量(电场分量或磁场分量)和同时测量多个频率,从而提高探测精度和工作效率,尤其是增大勘探深度,能够将传统人工源电磁场 1 km 左右的探测深度提高到 5 km 以上,为深部找矿提供了有效手段。广域电磁法凭借其数据信噪比高、采集效率高等优势,在油气藏识别、金属矿探测、深部构造研究等领域得到广泛应用(何继善, 2020)。本次在李屯矿区开展了基于高阶 2ⁿ 序列伪随机信号的分布式三维广域电磁法探测,通过改进野外观测方式,大幅提高了观测效率,推断地下 2000 m 以浅的地质结构特征,与以往物探及钻探等地质资料吻合较好,充分证明这一探测方法的有效性。

1 地质地球物理背景

1.1 地质背景

李屯矿区位于齐河—禹城国家级富铁矿整装勘

查区北部,地处鲁西隆起区的西北边缘,处于华北坳陷区与鲁西隆起区的连接部位。第四系广泛覆盖,区内地层由老到新主要为奥陶系、石炭系—二叠系、新近系、第四系,其中奥陶系马家沟群碳酸盐岩是接触交代型铁矿的重要控矿围岩。区内构造以断裂构造为主,李屯矿区位于齐广断裂以南,东西两侧各发育次级断层城子坡断层和李屯断层,控制程度低,均为推断断层。

区内岩浆岩隐伏产出,分布较广泛,以燕山晚期侵入岩为主,主要为李屯、潘店和薛官屯岩体,其范围主要依据物探资料圈定(图 1),并由少量钻孔控制。李屯矿区位于李屯岩体的西部,李屯岩体呈北北东向展布,分布于齐广断裂、务头断层及莒镇断层之间,面积约 90 km²。钻孔揭露,岩体西部(小刘村地区)顶界深度 1400~1530 m;东部(城子坡地区)凸起部位赋存深度较浅,实施的 2 个钻孔均在新近系之下直接揭露岩体,顶界深度 762~850 m。岩体主要侵位于奥陶系和石炭系—二叠系,最上侵入层位为二叠系石盒子群上部,石炭系—二叠系月门沟群太原组和山西组普遍被侵入。初步分析认为,该岩体深部总体表现为岩床,并有一定规模的岩浆岩呈脉状侵入于石炭系—二叠系中。岩体以中基性岩为主,岩性主要为辉石闪长岩、角闪闪长岩、闪长岩、石英闪长岩等,穿插有辉长岩、辉绿岩、煌斑岩等岩脉(王怀洪等, 2021a, b)。

1.2 矿体特征

区内现圈定磁铁矿体 6 个,由 7 个钻孔控制,其中 5 个钻孔见厚层富铁矿,2 个钻孔见矿化。矿体形态为似层状,大致倾向 210°~240°,矿体东缓西陡,东侧倾向约 21°,往西侧逐渐增大至 42°,矿体赋存标高-1123~-1435 m;各矿体见矿厚度 1.55~99.56 m,矿体平均品位全铁为 55.47%,磁性铁为 49.68%,顶底板均为矽卡岩或角岩(沈立军等, 2021a)。

区内矿体均赋存于闪长岩体与石炭系—二叠系接触带附近的砂岩、泥岩地层中,围岩地层角岩化较发育,矽卡岩化强度低、范围窄,局部矽卡岩带宽度

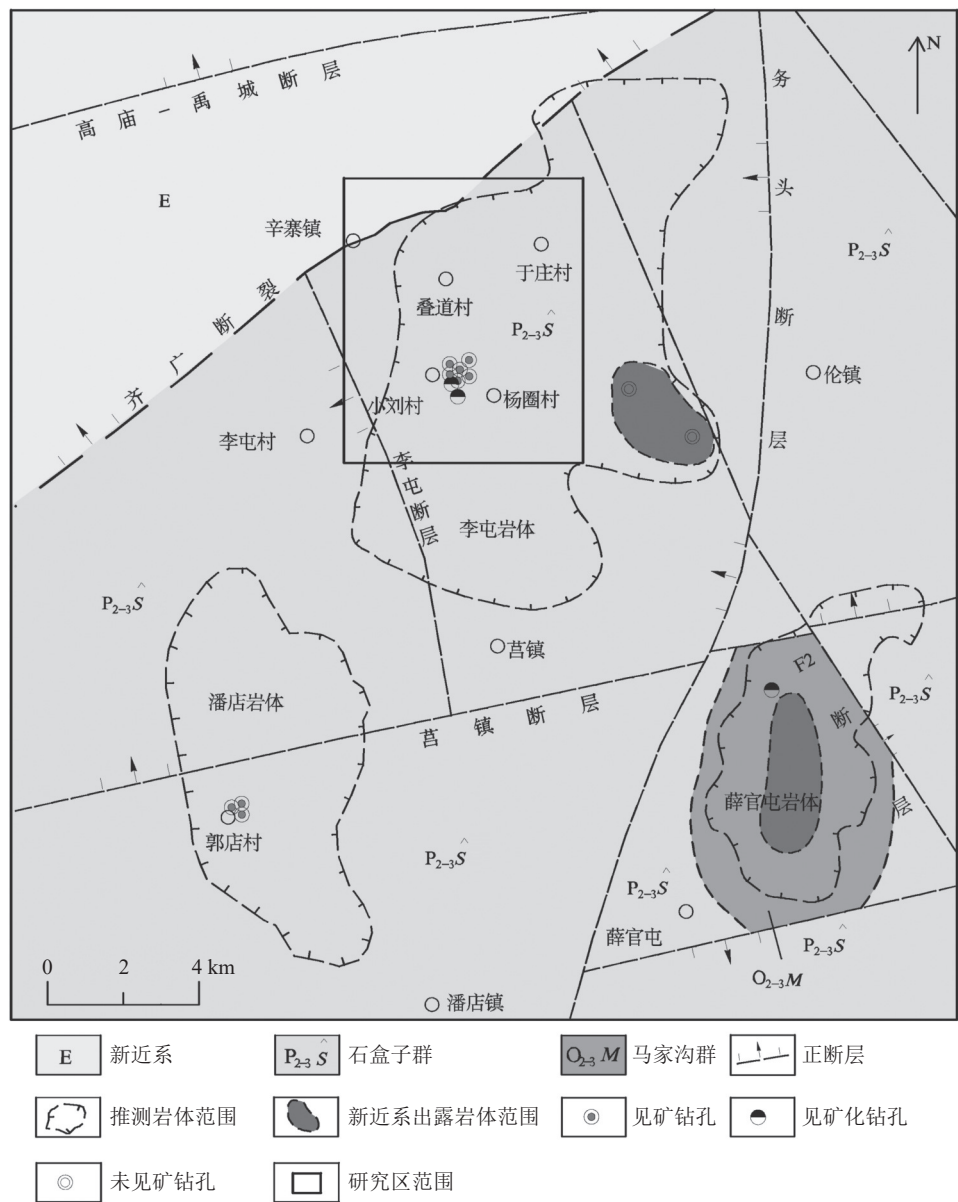


图 1 李屯矿区前新近纪基岩地质简图

Fig. 1 Geological map of Pre-Neogene bedrock in Litun mining area

仅 1~2 cm。矿体围岩主要为角岩或矽卡岩,局部为构造角砾岩,矿体与角岩以突变接触为主,与矽卡岩多为过渡接触。近矿闪长岩钠长石化、钾长石化等蚀变发育,矿体内矽卡岩化随深部加深有变强趋势,各种蚀变组合或蚀变强度的变化,对矿体具有显著的指向意义。

1.3 地球物理特征

在 1:1 万地面磁测 ΔT 化极异常图(图 2)上,李屯矿区表现为北北东向的低缓正异常,主要由中高磁性的隐伏闪长岩体所致。另外,在小刘庄、叠道存在 2 处次级异常,其中小刘庄异常经钻探验证为富

铁矿叠加在岩体之上引起的矿致异常;叠道异常特征与其相似,推断为矿致异常,是本区寻找矽卡岩型富铁矿的另一重点地段。

统计分析区内 7 个钻孔的电阻率测井数据,得出该地区各地层的电阻率(表 1)。第四系和新近系以粘土和泥岩为主,胶结程度较低,表现为低阻特征;矿体主要为致密块状磁铁矿,含少量黄铁矿,表现为低阻特征;蚀变闪长岩受强烈蚀变作用,表现为中阻特征;石炭系一二叠系以泥岩和砂岩为主,裂隙较发育,表现为中阻特征;角岩受岩浆入侵影响,整

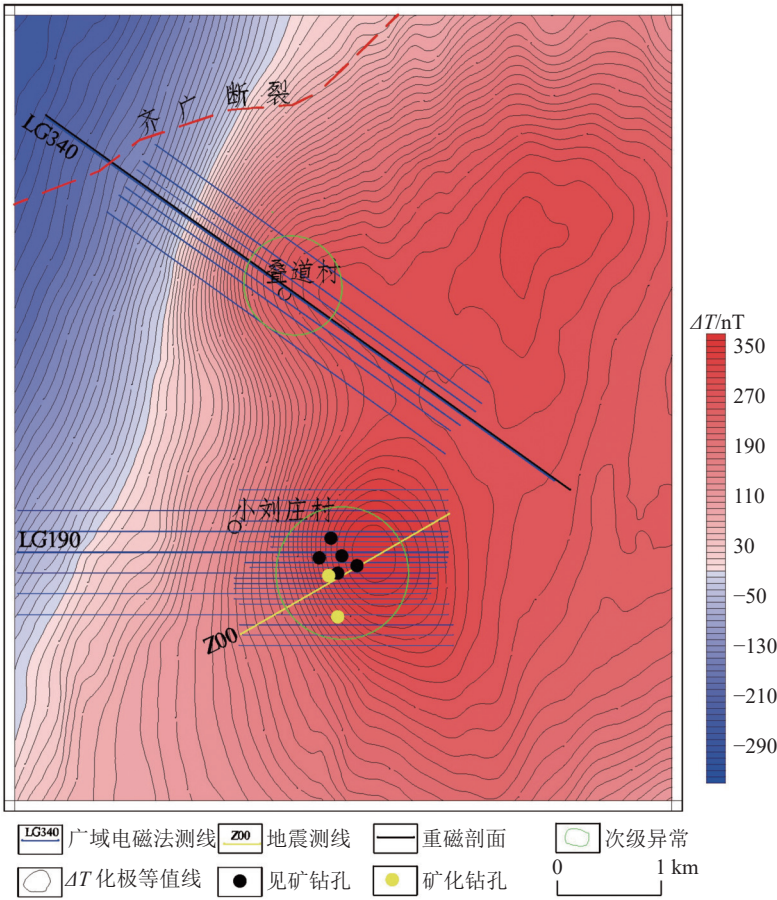


图 2 高精度地面磁测 ΔT 化极异常特征

Fig. 2 Anomaly characteristics of high-precision geomagnetization pole plane

表 1 地层电阻率测井参数
Table 1 Statistics of formation resistivity logging parameters

地层	归一化电阻率/($\Omega\cdot\text{m}$)		统计厚度/m
	极值	平均值	
Q	13~15	13	2980
N	6~14	8	4015
C+P	40~178	78	2146
矿体	2~18	9	256
角岩	59~194	160	325
蚀变闪长岩	34~138	67	475
闪长岩	1351~1656	1619	573

注: Q—第四系; N—新近系; C+P—石炭系—二叠系

体破碎, 表现为中阻特征; 闪长岩电阻率最高。不同岩性和地层之间具有明显的电阻率差异, 为开展广域电磁法探测提供了条件(侯征等, 2021; 沈立军等, 2021b)。

2 方法原理

2.1 广域电磁法

广域电磁法可在包括“过渡区”和“远区”的广大区域进行测量。在广域电磁法中, 以电偶极为场源, 均匀大地表面上电场 E_x 分量的表达式为:

$$E_x = \frac{IdL}{2\pi\sigma r^3} [1 - 3\sin^2\varphi + e^{-ikr}(1 + ikr)] \quad (1)$$

式中, I 表示电流, dL 表示发射源长度, σ 表示电导率, i 为纯虚数, r 表示收发距, φ 表示 r 与发射源的夹角, k 表示波数。

根据公式(1)可以定义广域意义上的视电阻率

$$\rho_a = K_{E-E_x} \frac{\Delta V_{MN}}{I} \frac{1}{F_{E-E_x}(ikr)} \quad (2)$$

公式(2)中,

$$K_{E-E_x} = \frac{2\pi r^3}{dL \cdot MN} \quad (3)$$

$$\Delta V_{MN} = E_x \cdot MN \quad (4)$$

$$F_{E-E_x}(ikr) = 1 - 3\sin^2\varphi + e^{-ikr}(1 + ikr) \quad (5)$$

公式(3)为 $E-E_x$ 装置的广域电磁法提取视电阻率装置系数, 公式(4)为测点 MN 之间的电位差, 公式(5)是一个与地下电阻率、工作频率及发送-接收距离有关的函数, E_x 为电场水平分量, MN 为测量电极距。

为计算广域视电阻率, 广域电磁法提出的办法是采用计算机迭代的公式, 首先任取一个可能的电阻率 ρ 值, 将其与发送电流 I 、源尺寸 dL 、收发距 r 、方位角 φ 、工作频率 ω 等已知参数一起代入视电阻率定义式中, 利用计算机迭代计算, 直到达到满意的精度为止, 并把此 ρ 值选取为该工作频率的最佳值, 方便下一步的计算。

2.2 分布式广域电磁法

比起可控源音频大地电磁法等变频观测方式, 广域电磁法采用伪随机信号, 通过多频波(一般为 7 频波)同时发射、同时接收的观测方式, 提高了工作效率, 但是探测时仍然需要更换频组, 多台接收机均需采集完之后才能更换频组, 探测效率受到一定限制。

在传统伪随机信号的基础上, 何继善院士团队设计了高阶 2^n 序列伪随机信号(Yang et al., 2021, 2022; 何继善等, 2021), 一组信号即包含所有探测频率(图 3), 在探测时无需更换发射波形, 能够实现所

有频率同时发射、同时接收, 在此基础上提出了一种更加快速高效的观测方法——分布式三维广域电磁法, 即在发射端持续发射一组高阶伪随机信号, 同时在接收端使用多台多通道接收机采用滚动测量方法进行数据采集(图 4), 各接收机均可独立采集, 并根据不同位置信噪比动态调整采集参数, 从而实现野外数据快速高效采集。

2.3 数据采集

为获取李屯矿区深部电性结构特征, 在分析对比地质地球物理特征的基础上, 分别在小刘庄矿段和叠道磁异常布设了分布式三维广域电磁法探测工作, 场源平行于测线方向布设, 发射电极距 AB 为 1.8 km, 持续发射 L3-F39 波形(3 阶 39 频波, 包含 39 个主频、10 个次主频共计 49 个频率), 频率范围 0.0625~768 Hz, 使用多台 5 通道及 2 通道接收机进行滚动式观测, 测点全部分布在场源 AB 中垂线两侧 30° 范围内, 采集 E_x 分量计算广域视电阻率。

在小刘庄矿段穿过已知矿体布设测线 23 条(图 2), 测线方位角 90° , 测量电极距为 50 m, 测线间距 100 m(矿体附近加密至 50 m), 收发距 11.6~13.2 km, 发射电流 120 A, 仅用时 4 天就完成 1350 个测点的数据采集, 覆盖面积 6.3 km^2 。

在叠道局部磁异常布设测线 7 条(图 2), 测线方位角 125° , 测量电极距 50 m, 线距 100 m(两侧放稀至 200 m), 收发距 14~14.8 km, 发射电流 165 A, 采集测点数 600 个, 覆盖面积 4.7 km^2 。

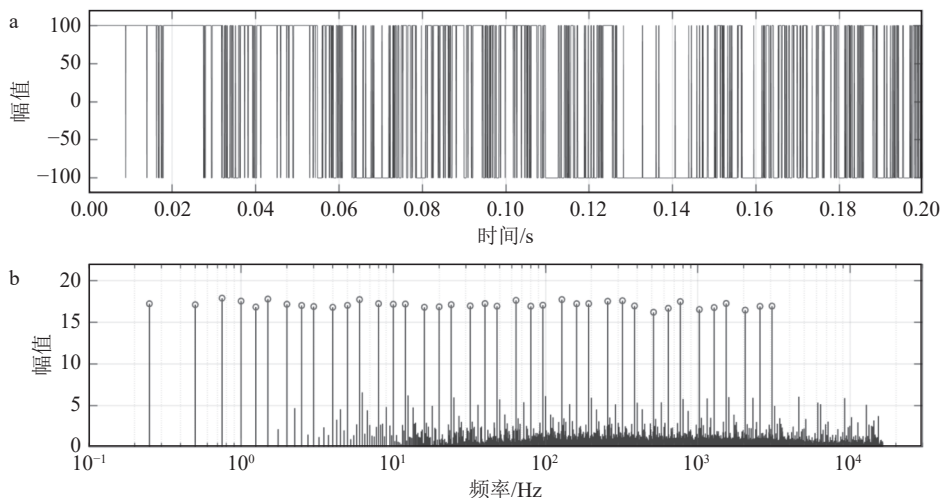


图 3 高阶 2^n 序列伪随机信号(Yang et al., 2022)

Fig. 3 The high-order 2^n sequence pseudo-random signal

a—L3-F39 型波形; b—L3-F39 型频谱

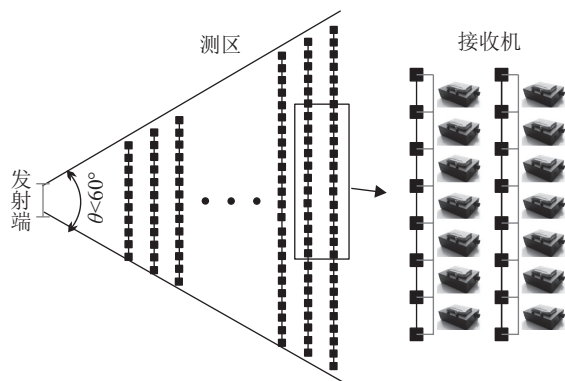


图4 分布式广域电磁法观测示意图

Fig. 4 Field working method for and distributed WFEM

2.4 数据解释方法

研究区位于平原区,多数测点位于基本农田中,仅存在微弱的天然电磁场干扰;少量测点位于村庄中,存在部分环境干扰。以 LG340 线 595 测点为例,通过原始数据(图 5)可以看出,广域电磁信号可以很好地压制天然场信号的干扰,采集得到高质量电场数据。

2.4.1 去噪处理

在广域电磁法数据采集过程中,由于各种电磁噪声的存在,特别是村庄中的环境干扰,不可避免地给实测数据带来一定的误差,所以在资料解释前必须进行去噪处理。本次处理采用的是 Yang et al. (2023)自主开发的噪声处理方法体系,通过仪器相位噪声校正、频谱形态矫正、特殊类型噪声压制、最小二乘反演去噪、Robust 统计类去噪、去噪结果融合等成套方法技术,可以有效矫正频谱形态、抑制有

效频率位置处频谱能量逸散,剔除常见异常波形和奇异点。根据去噪结果(图 6)可以看出,去噪后单点数据曲线圆滑连续、无畸变频点,数据质量较好;最终获取的测线曲线形态明确、特征明显,能清晰揭示地下电性特征。

2.4.2 广域视电阻率计算

利用傅里叶变换将时间域数据转换为频谱数据,获取频率域电场的振幅和相位信息,再利用逆差值法求取广域电磁视电阻率。逆插值法主要受插值算法、插值区间和插值目标函数单调性的影响,插值算法通常选用 3 次样条,插值区间根据岩矿石电阻率的变化范围进行设定。最后是静态校正,通过分析视电阻率曲线,对受静态效应影响的曲线进行校正;对于振幅畸变、相位不受影响的曲线,利用相位空间滤波法进行校正;对于高频变化剧烈的曲线,利用低通滤波器沿测线做空间滤波,压制高频静态效应;对于中低频曲线,选取合适的频点、频段视电阻率曲线进行低通滤波,从而获得静态校正系数,对视电阻率曲线进行平移处理。

2.4.3 反演解释

广域电磁法反演是利用反演程序对沿地表实测的视电阻率随频率变化曲线进行数值计算,在保证收敛的前提下,获得各测点在地下不同深度处的电阻率值。通过 OCCAM 反演方法进行一维反演,初始模型的电阻率设置为 $350 \Omega \cdot \text{m}$ (根据测区平均视电阻率得到),层数为 10,当迭代次数达到 20 次或拟合误差小于 5% 即可终止,最终获得研究区 2000 m 以浅的广域电磁法电性结构模型。

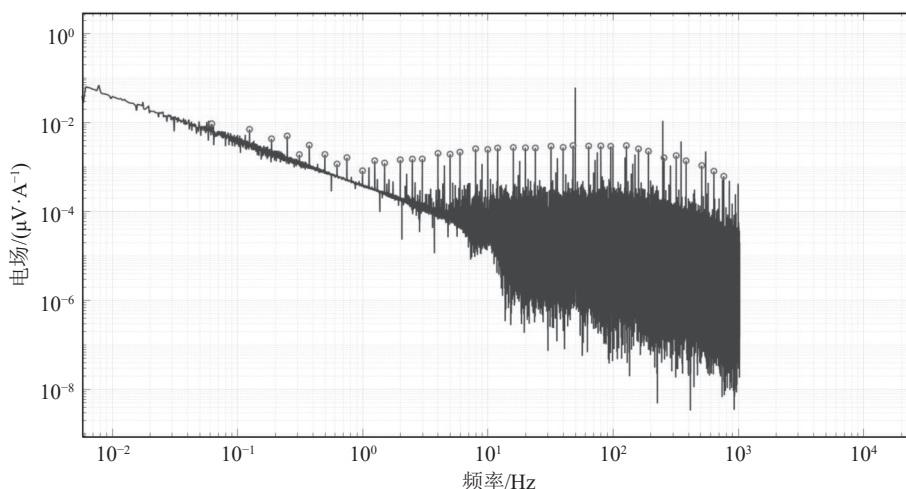


图5 LG340 线 595 点原始数据

Fig. 5 LG340 line 595 point raw data

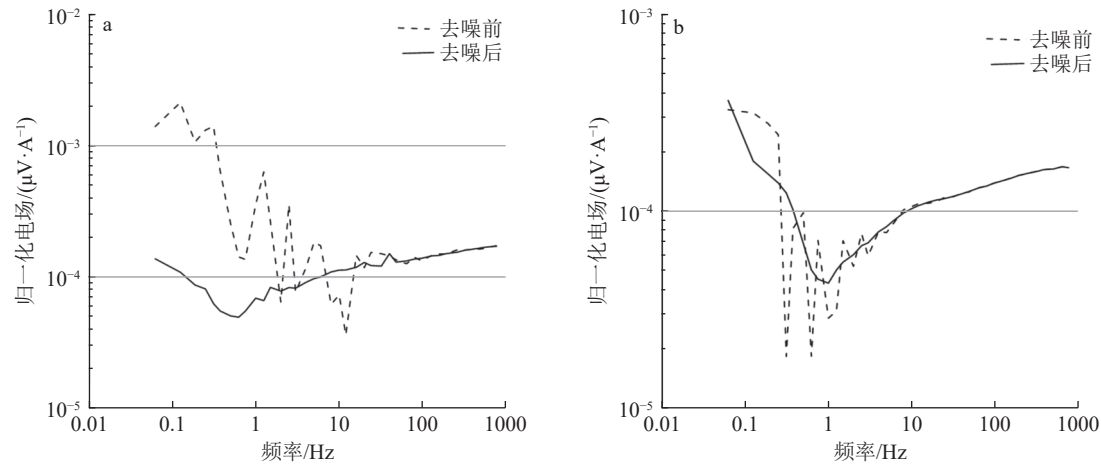


图 6 去噪前后电场值对比图

Fig. 6 Comparison of electric field values before and after denoising

a—S340 线 2100 号点; b—S340 线 5250 号点

3 结果与讨论

3.1 小刘庄矿段探测效果

以 S190 线(图 7)为例,介绍小刘庄矿段广域电磁探测效果。反演电阻率呈现较明显的层状结构,地层整体西深东浅,电阻率与钻孔测井电阻率形态基本一致。标高-900 m 以浅为明显的低阻层,钻孔揭露多为粘土和砂质泥岩,为第四系和新近系的反映,地层底界西部略深,向东缓慢抬升。在距离 2000 m 附近出现明显的横向电阻率突变,结合地质资料推断该处为李屯断层;石炭系一二叠系标高-900~-1100 m

之间,东部下段被岩体侵蚀;距离 3700 m 以东为明显的高阻体,推断为闪长岩体,自西向东逐渐抬升,在距离 4500 m 以东趋于平稳,顶界标高约-1400 m。

该测线穿过见矿钻孔 ZK7、ZK6,钻孔揭露新近系底界标高-885~-903 m,石炭系一二叠系底界标高-1367~-1499 m,其下为闪长岩,其中 ZK6 钻孔揭露矿体标高-1178~-1303 m,ZK7 钻孔揭露矿体标高-1338~-1460 m。该区揭露富铁矿体均赋存于岩体与石炭系一二叠系接触带部位,矿体赋存位置与形态受岩体控制明显,推断为岩浆上侵的过程中与奥陶系灰岩发生接触交代作用形成磁铁矿矿浆,并在

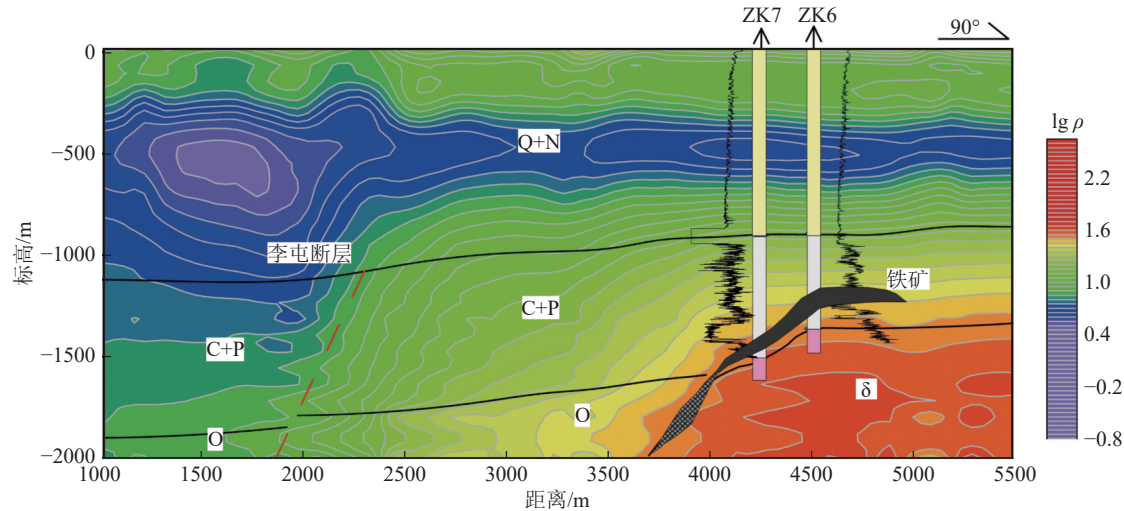


图 7 S190 线广域电磁电阻率剖面图

Fig. 7 S190 line wide-area electromagnetic resistivity profile

Q+N—新近系和第四系; C+P—石炭系一二叠系; O—奥陶系; δ—闪长岩

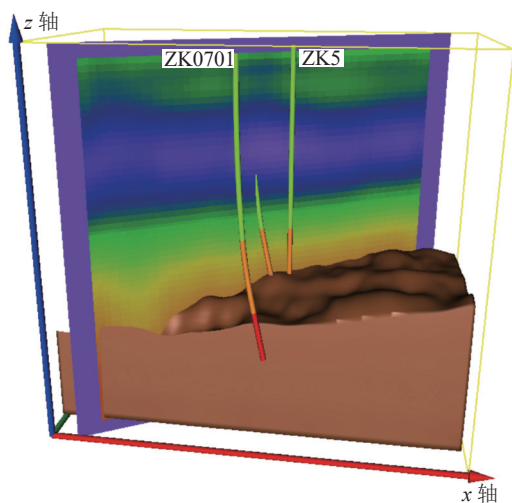


图8 小刘庄矿段广域电磁三维模型

Fig. 8 Wide-area electromagnetic 3D model of Xiaoliuzhuang mining section

气液推动下沿地层薄弱带运移至石炭系—二叠系底部赋存,由此预测在 ZK7 钻孔以西和 ZK6 钻孔以东

均具有良好的找矿潜力。

通过探测获得了小刘庄矿段地下 2000 m 以浅的三维电性结构信息,并构建了三维地电模型(图 8),可以明显看出岩体顶界凹凸不平的起伏形态。从三维模型中沿以往 Z00 线二维地震剖面获得电阻率纵向切片(图 9),该剖面穿过 ZK1、ZK5、ZK8 钻孔,电阻率剖面特征与钻孔揭露情况及地震时间剖面吻合较好,证明了分布式三维广域电磁法探测结果的准确性。

3.2 叠道局部磁异常探测效果

以 S340 线为例,介绍叠道局部磁异常广域电磁探测效果,该测线与重磁剖面重合(图 10),从反演结果可看出,该剖面电阻率异常特征与小刘庄矿段 S190 线相似,电阻率呈现较明显的层状结构,反映了新生界、石炭系—二叠系、奥陶系和侵入岩体的分布特征。标高-1000 m 以浅为明显的低阻层,为第四系和新近系的反映,地层底界西北深、东南浅,无明显起伏;在距离 510 m 附近出现明显的低阻异常,结合以

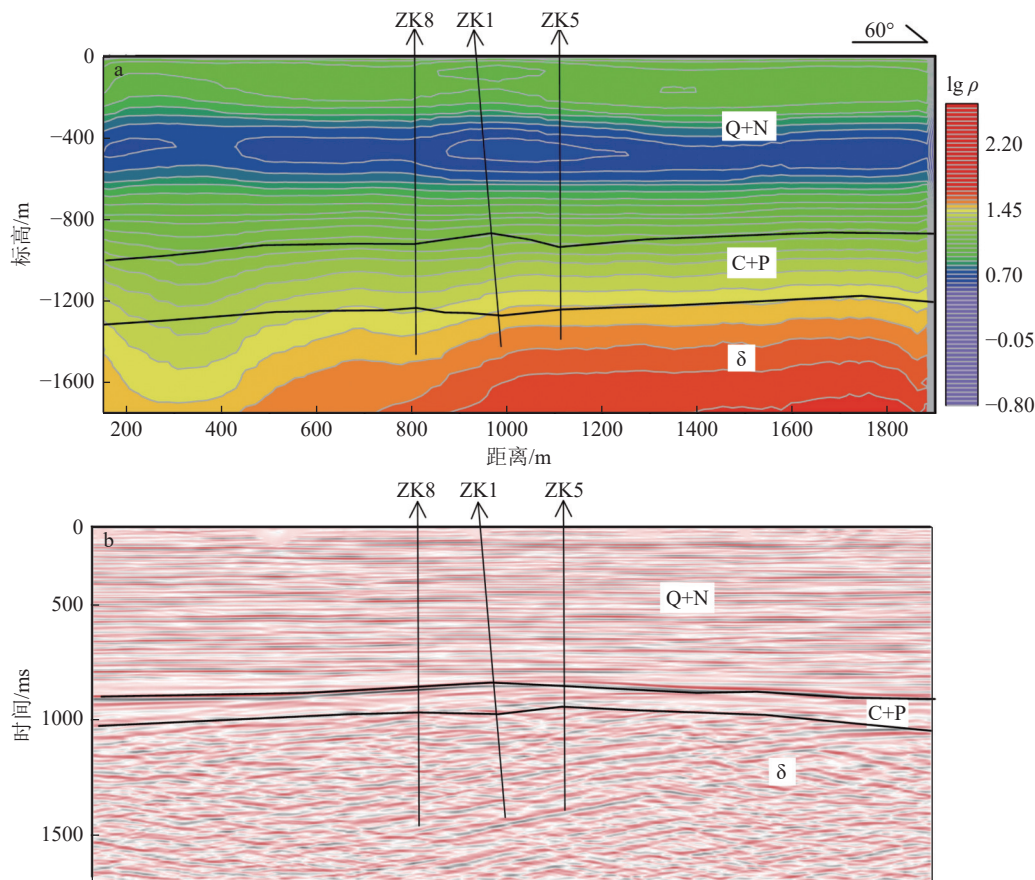


图9 广域电磁法图切剖面与地震剖面 00 线对比图

Fig. 9 Comparison of the 00-line cross section of the wide-area electromagnetic method and the seismic section

a—广域电磁法图切剖面;b—地震 00 线剖面;Q+N—新近系和第四系;C+P—石炭系—二叠系;δ—闪长岩

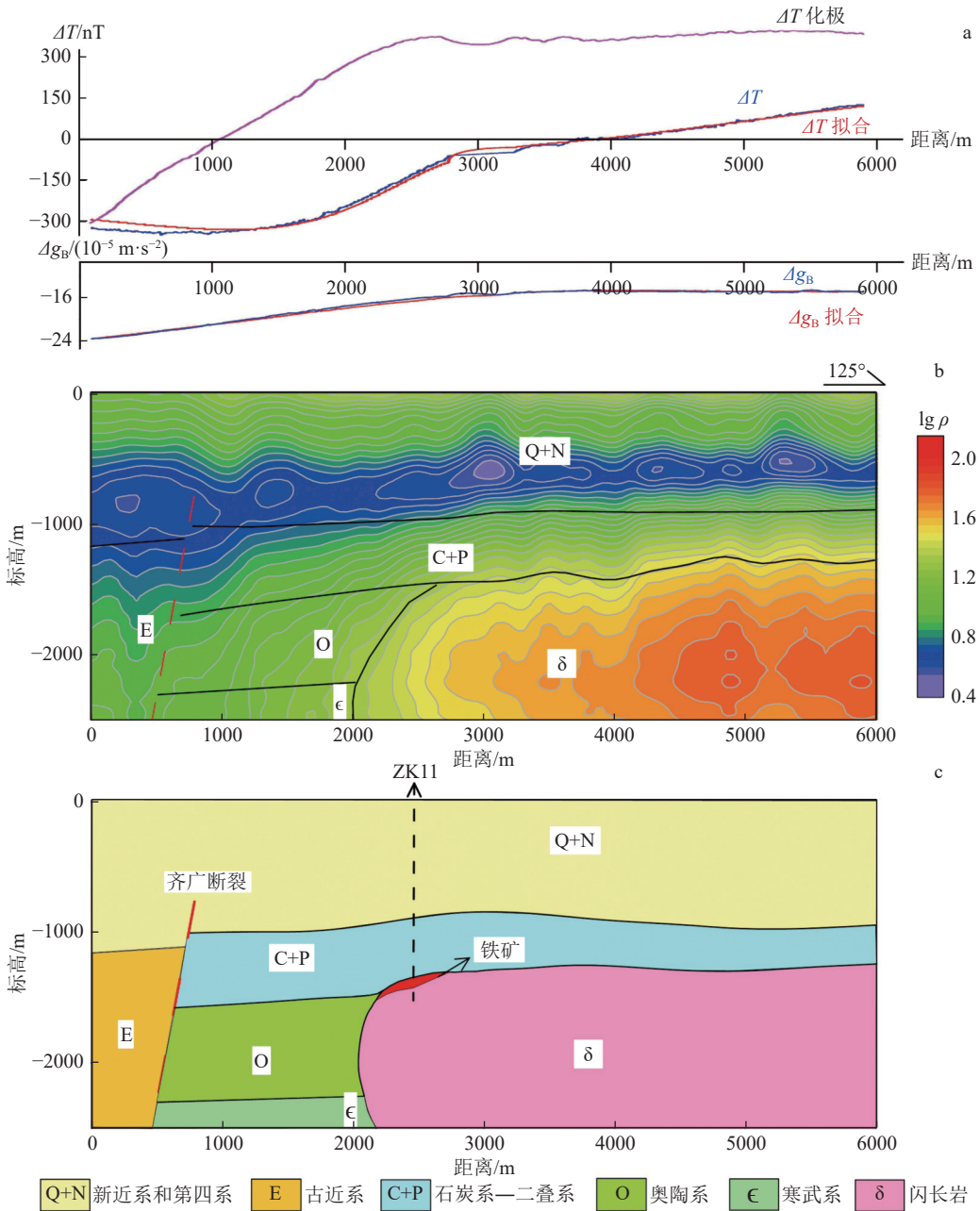


图 10 重磁电综合地球物理剖面

Fig. 10 Gravity magnetoelectric comprehensive geophysical profile

a—重磁拟合剖面; b—广域电磁法剖面; c—综合地质剖面

往物探、钻探等地质资料推断为齐广断层,该断裂为错断第四系和新近系的区域大断裂,两侧地层存在明显差异,在断裂上盘赋存较厚的古近系,下盘电阻率相对较高,为石炭系—二叠系和奥陶系的反映;距离 2000 m 以东为明显的高阻体,推断为侵入岩体。

通过广域电磁法获得了深部地质结构,为重磁联合反演提供了有效约束,在距离 2500 m 附近存在局部磁异常, ΔT 化极值最大,该处电阻率等值线形

态较规则,无明显凸起,表现为中电阻特征。推断该处异常位于李屯岩体的西北边缘,处于石炭系—二叠系与岩体的接触带附近,岩体较破碎,蚀变强烈,其地质地球物理特征与小刘矿段相似,成矿条件有利,据此在距离 2500 m 处布设了验证钻孔 ZK11。

4 结 论

(1)通过分布式三维广域电磁法探测,查明了山

东齐河—禹城李屯矿区地层西北深东南浅的单斜特征,圈定了岩体空间形态,探测结果与二维地震和钻孔揭露情况吻合较好。

(2)由于矿体埋藏深,引起的电阻率异常弱,难以利用广域电磁法直接探测矿体赋存位置,但是可以为重磁反演提供准确的地质结构约束,并结合重磁场特征进一步剖析了叠道局部磁异常,圈定了新的找矿靶区,为钻孔布设提供了依据。

(3)基于高阶 2^n 序列伪随机信号的分布式广域电磁法改变了传统的野外观测方式,实现了滚动式采集,显著提高了工作效率,降低了勘探成本,适于开展高密度的三维观测,可以大幅提高探测精度,是获取深部地质结构的有效探测方法,具有良好的应用前景。

References

- He J S. 2019. Theory and technology of wide field electromagnetic method[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 29(9): 1809–1816(in Chinese with English abstract).
- He J S. 2020. New research progress in theory and application of wide field electromagnetic method[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 44(5): 985–990(in Chinese with English abstract).
- He J S, Yang Y, Li D Q, et al. 2020. Method and system for generating high-order pseudo-random electromagnetic prospecting signal[P]. CN Patent, 202010344733.2 (in Chinese with English abstract).
- Hou Z, Chen X, Yu C C, et al. 2021. Characteristics of the geological deep structure in QiHe–Yucheng area of Shandong: Characteristics of the geological deep structure in QiHe–Yucheng area of Shandong[J]. Progress in Geophysics, 36(3): 1070–1081(in Chinese with English abstract).
- Shen L J, Zhu Y Z, Gao Z J. 2020. Paimary Study on Geological Characteristics of Litun Rock Mass in Paimary Study on Geological Characteristics of Litun Rock Mass in[J]. Shandong Land and Resources, 36(2): 23–29(in Chinese with English abstract).
- Shen L J, Zhu Y Z, Wang H H, et al. 2021a. Geochemical characteristics and geological significance of Litun iron ore deposit in Qihe–Yucheng area, Shandong Province[J]. Geological Review, 67(1): 84–98(in Chinese with English abstract).
- Shen L J, Zhu Y Z, Li S, et al. 2021b. Application of Geophysical Logging in Deep Metallic Ore Prospecting[J]. Well Logging Technology, 45(4): 431–438(in Chinese with English abstract).
- Wang H H, Li X Z, Shen L J, et al. 2021a. Geological Characteristics and Metallogenic Model of "Yucheng Type" Rich Iron Deposit in Qihe Yucheng Area in Shandong Province[J]. Shandong Land and Resources, 37(9): 26–35(in Chinese with English abstract).
- Wang H H, Shen L J, Wang D D, et al. 2021b. Study on Mesozoic magmatic intrusion and Paleozoic multi-mineral genesis mechanism in Huanghebei Coalfield, Shandong Province[J]. Coal Geology & Exploration, 49(2): 83–92(in Chinese with English abstract).
- Wang R S, Hao X Z, Hu L, et al. 2023. Discovery of skarn iron-rich deposit based on gravity and magnetic data in the Qihe–Yucheng, Shandong Province: Enlightenment to prospecting of the superdeep coverage area[J]. Geology in China, 50(2): 331–346(in Chinese with English abstract).
- Yang Y, He J S, Li D Q. 2021. Energy distribution and effective components analysis of 2^n sequence pseudo-random signal[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 31(7): 2102–2115.
- Yang Y, He J S, Ling F, et al. 2022. Distributed wide field electromagnetic method based on high-order 2^n sequence pseudo random signal[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 32(5): 1609–1622.
- Yang Y, Zhou C, Zhang H, et al. 2023. Denoising CSEM data using least-squares method based on mixed basis of Fourier series and Legendre polynomials[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 61: 1–12.
- Zhang Z Q, Li Y P, Wang H H, et al. 2016. Large high-grade iron ore deposit is found in Qihe–Yucheng area of Shandong Province[J]. Shandong Land and Resources, 32(5): 94(in Chinese with English abstract).
- Zhou M L, Ru L, Zhu Y Z, et al. 2021. Magnetic field characteristics and ore prediction in Qihe–Yucheng area of Shandong Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 45(2): 301–307(in Chinese with English abstract).
- Zhu Y Z, Zhou M L, Gao Z J, et al. 2018. The discovery of the Qihe–Yucheng skarn type rich iron deposit in Shandong and its exploration significance[J]. Geological Bulletin of China, 37(5): 938–944(in Chinese with English abstract).
- Zhu Y Z, Qiang J K, Wang L F, et al. 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).

附中文参考文献

- 何继善. 2019. 大深度高精度广域电磁勘探理论与技术[J]. 中国有色金属学报, 29(9): 1809–1816.
- 何继善. 2020. 广域电磁法理论及应用研究的新进展[J]. 物探与化探, 44(5): 985–990.
- 何继善, 杨洋, 李帝铨, 等. 2021. 一种高阶伪随机电磁勘探信号生成方法及系统[P]. 山东省: CN202010344733.2.
- 侯征, 陈雄, 于长春, 等. 2021. 山东齐河—禹城地区深部地质构造特征——来自大地电磁的证据[J]. 地球物理学进展, 36(3): 1070–1081.
- 沈立军, 朱裕振, 高志军. 2020. 山东齐河—禹城富铁矿区李屯岩体地质特征初探[J]. 山东国土资源, 36(2): 23–29.
- 沈立军, 朱裕振, 王怀洪, 等. 2021a. 山东齐河—禹城地区李屯富铁矿床地球化学特征及地质意义[J]. 地质论评, 67(1): 84–98.
- 沈立军, 朱裕振, 李双, 等. 2021b. 地球物理测井在金属矿深部找矿中的应用[J]. 测井技术, 45(4): 431–438.
- 王怀洪, 李秀章, 沈立军, 等. 2021a. 山东齐河—禹城地区“禹城式”富铁矿地质特征与成矿模式[J]. 山东国土资源, 37(9): 26–35.
- 王怀洪, 沈立军, 王东东, 等. 2021b. 山东黄河北煤田中生代岩浆侵入与古生代多矿产成因机制[J]. 煤田地质与勘探, 49(2): 83–92.
- 王润生, 郝兴中, 胡蕾, 等. 2023. 基于重磁资料在山东齐河—禹城探获矽卡岩型富铁矿及其对超深覆盖区找矿的启示[J]. 中国地质, 50(2): 331–346.
- 张增奇, 李英平, 王怀洪, 等. 2016. 山东省齐河禹城地区发现大型富铁矿[J]. 山东国土资源, 32(5): 94.
- 周明磊, 汝亮, 朱裕振, 等. 2021. 山东齐河—禹城地区重磁场特征及找矿预测[J]. 物探与化探, 45(2): 301–307.
- 朱裕振, 周明磊, 高志军, 等. 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.
- 朱裕振, 强建科, 王林飞, 等. 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.