



引文格式:陈涛,饶莹,梁景利,等.河北丰宁东南部古房-杨营三维磁性结构分析[J].西北地质,2026,59(2): 280-289. DOI: 10.12401/j.nwg.2025161

Citation: CHEN Tao, RAO Ying, LIANG Jingli, et al. Three-Dimensional Susceptibility Structure Analysis of the Gufang-Yangying Area in the Southeast of Fengning, Hebei[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(2): 280-289. DOI: 10.12401/j.nwg.2025161

河北丰宁东南部古房-杨营三维磁性结构分析

陈涛^{1,2,*}, 饶莹^{1,2,*}, 梁景利^{3,4}, 周红芳³, 王鹏^{3,4}, 何展翔⁵

(1. 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)地球物理学院, 北京 102249; 3. 河北华勘资环勘测有限公司, 河北 承德 067000; 4. 河北省地质资源勘探开发与生态保护重点实验室, 河北 承德 067000; 5. 南方科技大学地球与空间科学系, 广东 深圳 518055)

摘要: 河北省承德市丰宁满族自治县东南部古房-杨营一带位于华北陆块北缘, 大地构造位置处于华北陆块北缘隆起带与燕山-辽西裂陷带承德北盆地的衔接部位, 紧邻尚义-隆化区域断裂, 区内以新太古界崇礼上岩群杨营岩组和艾家沟岩组变质岩系为主, 构造复杂、褶皱发育, 铁矿主要为沉积变质型铁矿和超贫磁铁矿, 矿体总体沿 NE 向紧闭向斜构造定位。前人虽开展过多轮地球物理勘探, 但大比例尺高精度地面磁测工作相对不足, 导致深部矿体三维结构刻画不够精细, 制约了深部找矿进展。笔者基于 1:5000 高精度地面磁法测量数据, 通过化极、不同高度向上延拓、场分离以及解析信号、垂向导数和斜导数等处理, 结合岩石物性统计, 利用 SimPEG 开源框架开展三维磁化率反演, 揭示地下 1 km 深度范围内磁性体的空间分布特征。岩石物性显示, 磁铁矿化岩石与围岩存在显著磁性对比, 为磁法勘探提供了可靠基础。反演结果表明, 磁性体整体呈 NE-SW 向条带状分布, 主要集中于中东部和西南部, 与地表已知矿体及崇礼上岩群变质岩系位置高度一致, 垂向分布特征为浅部零散、中部集中连片、深部迅速减弱; 不同磁化率阈值三维显示, 进一步证实高磁化率区主要集中于中东部, 呈大型透镜状, 部分延伸接近地表, 反映矿体沿倾斜方向逐步增厚变大的特征。研究证实, 该区沉积变质型铁矿受新太古代区域变质作用控制, 成矿模式符合华北陆块北缘典型 BIF 型铁矿特征, 高精度三维磁化率反演有效弥补了复杂地质环境下深部结构的认知不足, 为隐伏矿体精准定位提供了高分辨率地球物理证据, 中东部高磁化率区是深部找矿最有利靶区, 可优先指导钻探验证; 该成果深化了对研究区深部成矿要素的理解, 也为华北陆块北缘类似沉积变质型铁矿区的深部预测提供了可靠的技术方法与地质-地球物理集成思路。

关键词: 沉积变质型铁矿; 三维磁性结构; 反演; 杨营铁矿; 古房-杨营; 华北陆块北缘

中图分类号: P631

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)02-0280-10

收稿日期: 2025-11-11; 修回日期: 2026-01-04; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 国家自然科学基金(42430803、U25D9025、42504114), 中国石油大学(北京)科研基金(2462023BJRC019), 中国地质调查局项目(DD20240012), 国家重点研发计划(2021YFB3401400), 天津华北地质勘查局项目(HK2024-B13)天津华北地质勘查局五一四地质大队项目(HKWYS2023-C1)联合资助。

作者简介: 陈涛(1990-), 男, 副教授, 长期从事应用地球物理教学与研究。E-mail: chentaosx@hotmail.com。

* 通讯作者: 饶莹(1979-), 女, 教授, 长期从事油气地球物理教学与研究。E-mail: ying_rao@hotmail.com。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

Three-Dimensional Susceptibility Structure Analysis of the Gufang-Yangying Area in the Southeast of Fengning, Hebei

CHEN Tao^{1,2}, RAO Ying^{1,2,*}, LIANG Jingli^{3,4}, ZHOU Hongfang³, WANG Peng^{3,4}, HE Zhanxiang⁵

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. College of Geophysics, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. Hebei Huakan Resource Environmental Survey Co., Ltd., Chengde 067000, Hebei, China; 4. Hebei Key Laboratory of Geological Resources Exploration and Ecological Protection, Chengde 067000, Hebei, China; 5. Department of Earth and Space Sciences, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, Guangdong, China)

Abstract: The Gufang-Yangying area in the southeast of Fengning Manchu Autonomous County, Hebei Province, is located at the northern margin of the North China Craton, tectonically situated at the junction between the northern margin uplift belt of the North China Craton and the Chengde North Basin of the Yanshan-Liaoxi rift zone, adjacent to the Shangyi-Longhua regional fault. The area is dominated by metamorphic rock series of the Neoarchean Upper Chongli Group (Yangying and Aijiagou formations), with complex structures, well-developed folds, and iron deposits primarily consisting of sedimentary-metamorphic iron ore and ultra-poor magnetite, generally positioned along northeast-trending tight synclinal structures. Although previous geophysical surveys have been conducted, large-scale high-precision ground magnetic measurements remain insufficient, resulting in inadequate delineation of three-dimensional deep ore body structures and constraining deep prospecting efforts. This study, based on 1 : 5000 high-precision ground magnetic survey data, employs reduction to pole, variable-height upward continuation, field separation, analytical signal, vertical derivative, and tilt derivative processing, combined with rock physical property statistics, and utilizes the open-source SimPEG framework for three-dimensional magnetic susceptibility inversion to reveal the spatial distribution characteristics of magnetic bodies within a 1 km depth range; rock physical properties indicate significant magnetic contrast between mineralized iron-bearing rocks and host rocks, providing a robust foundation for magnetic exploration. Inversion results show that magnetic bodies are distributed in a northeast-southwest trending strip-like pattern, mainly concentrated in the central-eastern and southwestern parts, highly consistent with known surface ore bodies and the Upper Chongli Group metamorphic series; vertically, they exhibit scattered distribution in shallow depths, concentrated and continuous in middle depths, and rapid weakening in deeper levels, with three-dimensional displays at different susceptibility thresholds further confirming that high-susceptibility zones are predominantly in the central-eastern part, forming large lens-shaped bodies that partially extend close to the surface, reflecting progressive thickening and enlargement of ore bodies along dip directions. The study confirms that sedimentary-metamorphic iron deposits in the area are controlled by Neoarchean regional metamorphism, conforming to the typical BIF-type metallogenic model at the northern margin of the North China Craton; high-precision three-dimensional susceptibility inversion effectively addresses the knowledge gap in deep structures under complex geological conditions, providing high-resolution geophysical evidence for precise localization of concealed ore bodies, with the central-eastern high-susceptibility zone representing the most favorable target for deep prospecting and warranting priority for drilling verification. These findings deepen understanding of deep metallogenic elements in the study area and offer reliable technical approaches and integrated geological-geophysical methodologies for deep prediction in similar sedimentary-metamorphic iron ore districts along the northern margin of the North China Craton.

Keywords: sedimentary-metamorphic iron ore; three-dimensional susceptibility structure; inversion; Yangying iron ore; Gufang-Yangying; north margin of the North China Craton

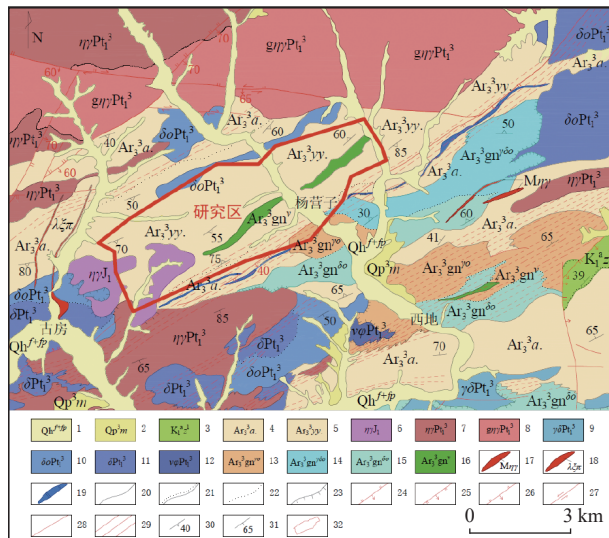
古房-杨营一带位于河北省承德市丰宁满族自治县东南部,隶属于华北陆块北缘。区内地质环境复杂多变,构造形态以褶皱为主,断裂发育相对较弱。其中,晚期断裂构造较为显著和明显,早期的断裂则因后续多次构造运动的影响而被遮掩或改造,甚至部分被脉岩充填,从而增加了地质解译的难度(赵红瑞, 2019)。该区域矿产资源丰富,以铁矿、磷铁矿、金矿和钼矿为主导,形成了一个多金属矿化带。具体而言,铁矿类型可分为沉积变质铁矿和超贫磁铁矿两大类,前者往往与古老的地层演化密切相关,后者则以低品位磁铁矿体为特征,具备大规模开发的潜力。金矿资源包括王营金矿、窄岭金矿和石灰窑金矿等,这些矿床多与区域构造活动和热液成矿过程相联系,蕴藏着可观的贵金属储量。此外,还有招兵沟磷铁矿和骆驼鞍六道沟钼矿等代表性矿床。这些矿产的分布不仅反映了区域地质演化的历史,也为当地经济发展提供了坚实的资源基础。尽管前人围绕矿区开展了多轮次的地球物理勘探工作,但大比例尺(如 1:5000 或更高精度)的测量工作相对匮乏,导致对矿区精细化结构的刻画不足(王鹏, 2020)。这在一定程度上制约了矿区产量的进一步拓展和深部资源的有效利用。

磁异常与磁铁矿体之间存在强烈的正相关,这种磁异常响应可作为揭示成矿要素深部展布特征的有效手段(陈学明等, 2012; 李东生等, 2013; 庞振甲等, 2022)。笔者在矿区 1:5000 高精度地面磁法测量工作基础上,通过精细处理技术(化极、向上延拓、场分离、边界增强)和三维反演技术(Li et al., 1996; Portniaguine et al., 1999; Chen et al., 2022, 2024, 2025; 贾正元等, 2023; 赵柏儒等, 2024; 于慧敏等, 2024; 蒙嘉琪等, 2024; 闫迪等, 2024),对数据进行深入分析和建模。笔者采用 SimPEG 开源框架进行三维磁数据反演(Cockett et al., 2015)。该框架具有以下优势:①模块化设计、基于 Python 语言,便于灵活设计反演算法;②内置物理正演模拟,能够准确描述复杂地下结构;③支持并行计算,可高效处理大规模数据集。选择 SimPEG 框架的主要原因是其开源特性,便于根据研究需求灵活修改和扩展算法,并且基于 Python 语言,与文中已采用的数据处理流程能够无缝衔接,从而高效完成高精度三维反演工作。反演结果显示,研究区地下 1 km 深度范围内磁性体主要呈条带状或块状异常,对应于磁铁矿脉或与矿化相关的岩体构造,为矿体深部拓展预测提供了可靠依据。

1 研究区概况

1.1 研究区地质概况

研究区大地构造位置位于中元古代—中三叠世华北陆块北缘隆起带(ⅢA22)与中元古代—中三叠世燕山—辽西裂陷带承德北盆地(ⅢA23-2)的衔接部位(图 1)。紧邻尚义—隆化区域断裂(丰宁—隆化断裂段)。区域内硅铁质建造的中级区域变质岩系是鞍山式变质铁矿、变质磷铁矿及金矿的主要产出区(李厚民等, 2012; 张招崇等, 2021)。



1. 全新世冲积、冲洪积物; 2. 更新世马兰组黄土状砂土层; 3. 白垩纪张家口组凝灰岩; 4. 新太古界崇礼上岩群艾家沟岩组; 5. 新太古界崇礼上岩群杨营岩组; 6. 早侏罗世二长花岗岩; 7. 古元古代晚期变质二长花岗岩; 8. 古元古代晚期变质石榴二长花岗岩; 9. 古元古代晚期变质花岗闪长岩; 10. 古元古代晚期变质石英闪长岩; 11. 古元古代晚期变质闪长岩; 12. 古元古代晚期变质角闪辉长岩; 13. 新太古代晚期奥长花岗岩质片麻岩; 14. 新太古代晚期英云闪长质片麻岩; 15. 新太古代晚期石英闪长质片麻岩; 16. 新太古代晚期辉长质片麻岩; 17. 变质二长花岗岩脉; 18. 石英正长斑岩; 19. 大理岩透镜体; 20. 实测地质界线; 21. 实测角度不整合地质界线; 22. 渐变地质界线; 23. 超动侵入界线; 24. 实测深断层; 25. 实测正断层; 26. 实测逆断层; 27. 实测平移断层; 28. 性质不明断层; 29. 韧性剪切带; 30. 面理产状; 31. 地层产状; 32. 研究区范围

图1 研究区地质简图

Fig. 1 Geological structure map of the study area

区域出露地层主要为新太古界崇礼上岩群变质岩系、二叠纪火山岩、白垩纪火山岩及第四纪松散堆积层。新太古界变质岩分布在图幅的中南部,古生界火山岩集中分布在研究区西南角,中生界地层小范围

分布在研究区东侧, 新生界第四系主要沿红石砬沟-石灰窑、后营子-孟家窝铺等(沟)河谷分布。崇礼上岩群为一套经历了中级区域变质作用、混合岩化作用和强烈变形改造, 变质程度达角闪岩相的表壳岩组合, 按岩石组合特征划分为杨营岩组和艾家沟岩组, 区域内均有出露(梁景利等, 2025)。区域范围内构造发育, 尚义-隆化区域断裂(丰宁-隆化断裂段)横穿本区, 出露于三道窝铺-石家窝铺-朝梁沟-姜家窝铺一线, 性质为平移逆断层; 西段倾向为 $195^{\circ}\pm 5^{\circ}$, 中段倾向为 $185^{\circ}\pm 5^{\circ}$, 东端倾向为 $150^{\circ}\pm 5^{\circ}$; 受其影响, NE、NW、EW 向次级断裂发育, 构建了整体区域构造格架, 控制了本区地层和岩浆岩的分布。此外, 太古界变质岩区褶皱构造发育。受 NW-SE 向压应力的作用, 产生褶皱轴呈 NE 向的向背斜构造。规模较大的一条(复)向斜构造在本次核实区所在的杨营岩组和艾家沟组中; (复)向斜主轴呈弧形, 长为 11 km, 倾没端分别位于古房和左家窝铺, 两翼基本对称, 北翼位于桥东-石灰窑

-杨树沟门一线, 南翼位于二道窝铺-杨营子-左家窝铺一线; (复)向斜构造使层内铁矿体整体相向倾斜。除大规模的复向斜构造外, 太古界变质岩地层内部亦有小规模的扭褶和揉皱, 显示出片麻岩产状的复杂多变。区内岩浆活动较为强烈, 具有多旋回性, 岩石类型复杂, 种类齐全, 就岩浆活动划分, 区内以侵入岩为主, 喷发岩次之。侵入岩见有太古代—元古代旋回的超基性-中酸性岩类和燕山旋回的酸性岩类。

1.2 岩石磁性特征

岩石物性差异构成了地球物理勘探的核心基础, 而物性参数的准确测定则是开展定性解释和定量反演的首要前提。明确不同岩矿石磁化率特征的差异性, 能够有效圈定磁性地层和岩体, 为探寻与之相关的矿产资源提供宝贵的线索。笔者整合前人成果, 并基于研究区内采集的 330 块岩矿石样本的磁化率测试数据, 系统总结了周边区域岩矿石的磁性特征以及区内主要地层和岩石的磁性分布(表 1)。

表 1 研究区周边区域主要岩矿石磁性参数

Tab. 1 Susceptibility of major rocks and ores in the surrounding areas of the study area

地层	岩性	磁化率平均值(10^{-3} SI)
第四纪全新世	冲积、冲洪积物: 砂砾石、砂土、砂层夹黏质砂土、砂质黏土及淤泥	0.10
第四纪更新世	马兰组: 黄土状亚砂土、亚黏土及砂砾石层	0.11
中生界白垩纪	张家口组流纹质凝灰岩、流纹质熔结凝灰岩、流纹岩等	1.03
新太古界崇礼上岩群	艾家沟岩组片麻岩、斜长角闪岩夹大理岩	5.49
新太古界崇礼上岩群	杨营岩组片麻岩	6.61
早侏罗世	二长花岗岩	0.40
晚三叠世	二长花岗岩	0.45
晚二叠世	二长花岗岩	0.45
古元古代晚期	变质二长花岗岩	0.58
	变质石榴二长花岗岩	0.77
	变质花岗闪长岩	1.40
	变质石英闪长岩	1.20
	变质闪长岩	1.04
	变质角闪辉长岩	3.44
	奥长花岗质片麻岩	1.74
新太古代晚期	英云闪长质片麻岩	1.67
	石英闪长质片麻岩	2.10
	辉长质片麻岩(基性岩墙)	3.30
脉岩	正长斑岩	0.91
矿体	磁铁矿石岩	29.67
	含磁铁矿石角闪岩	18.20
围岩	杨营岩组片麻岩	6.61

研究区周边区域的主要岩矿石磁性特征显示,沉积岩类(如冲积物、黄土等)多为弱磁性,火山岩和侵入岩则呈现中等磁性,而含磁铁矿的矿石则表现出显著的强磁性;研究区内类似,沉积岩磁性较弱,变质岩和含磁铁矿相关岩石的整体磁性强度略高于周边,展现出中等至强磁性特征。综上所述,这种磁性差异为磁法勘探奠定了坚实基础,能够高效区分不同岩层和矿体结构,从而揭示矿区地下磁性分布与地质构造的内在规律(罗蛟等, 2025)。

2 数据采集与处理

2.1 数据采集

数据测量使用 GSM-19T 型质子磁力仪(分辨率为 0.01 nT, 精度为 0.1 nT), 测线布设沿 NW-SE 向。研究区地形起伏约为 400 m(图 2a), 测量中采用 RTK 记录位置, 以便后续数据改正。获取磁数据后, 经过坏点剔除、日变改正、正常场改正(采用 IGRF 14 国际地磁参考场模型)和高度改正得到研究区的原始磁异常, 测量总精度为 3.6 nT。进行化极处理后, 获得了研究区化极磁异常(图 2b)。化极磁异常显示, 研究区中东部有一个显著的正异常区(约为 3 000 nT), 对应磁

性强的地质体(磁铁矿), 西北部则有明显的负异常区(约为-600~-1 000 nT), 可能指示磁性弱的区域, 中南部散布着一些较小的正异常点(1 800~2 600 nT), 反映了地下磁性结构的复杂性和不均匀分布。研究区内磁铁矿石岩及超贫磁铁矿等强磁性体与砂砾石、大理岩等极弱磁性围岩之间存在超过两个数量级的物性对比(表 2)。由于强磁性体在全区场源中占据主导权重, 使得区域背景场在统计上被显著拉高, 导致相对磁性极弱的围岩区在数值上呈现为负值, 这符合高对比度磁异常区的分布规律。此外, 正异常中心与已知磁性地层的空间分布高度吻合, 表明区内磁性体以感应磁化为主, 负异常区并非由强剩磁引起。总体而言, 磁异常形态与分布特征和出露的地质体边界基本吻合。

表 2 研究区主要岩矿石磁性参数

Tab. 2 Susceptibility of major rocks and ores of the study area

岩性	磁化率平均值(10 ⁻³ SI)
砂砾石、砂土、砂层夹黏质砂土、砂质黏土及淤泥	0.10
黄土状亚砂土、亚黏土及砂砾石层	0.11
黑云斜长角闪片麻岩	6.32
大理岩透镜体	0.14
黑云角闪斜长片麻岩	7.89
花岗质片麻岩	3.21
角闪斜长片麻岩	5.73
变质二长花岗岩	0.34
变质石英闪长岩	2.02
变质角闪辉长岩	3.97
奥长花岗质片麻岩	2.13
英云闪长质片麻岩	2.57
辉长质片麻岩(基性岩墙)	5.24
磁铁矿石岩	22.54
含磁铁矿石角闪岩	18.52
含磁铁矿条带的片麻岩	16.67~25.74
超贫磁铁矿	13.85

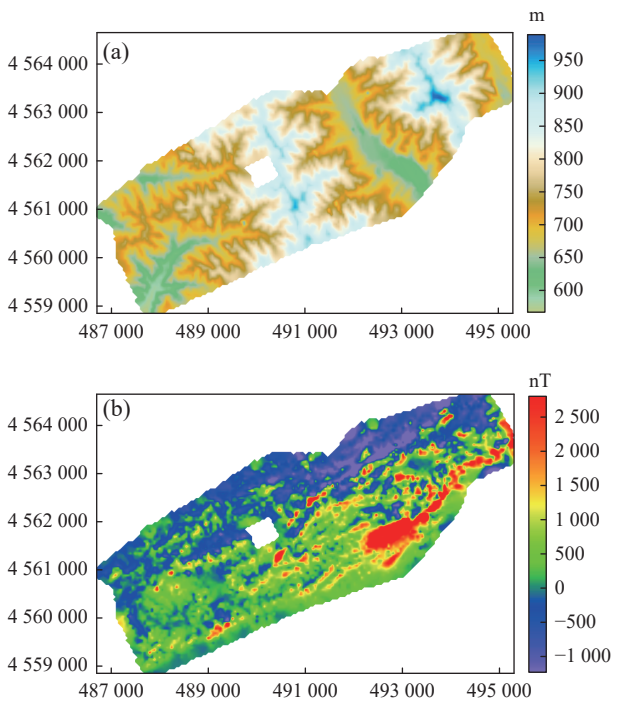
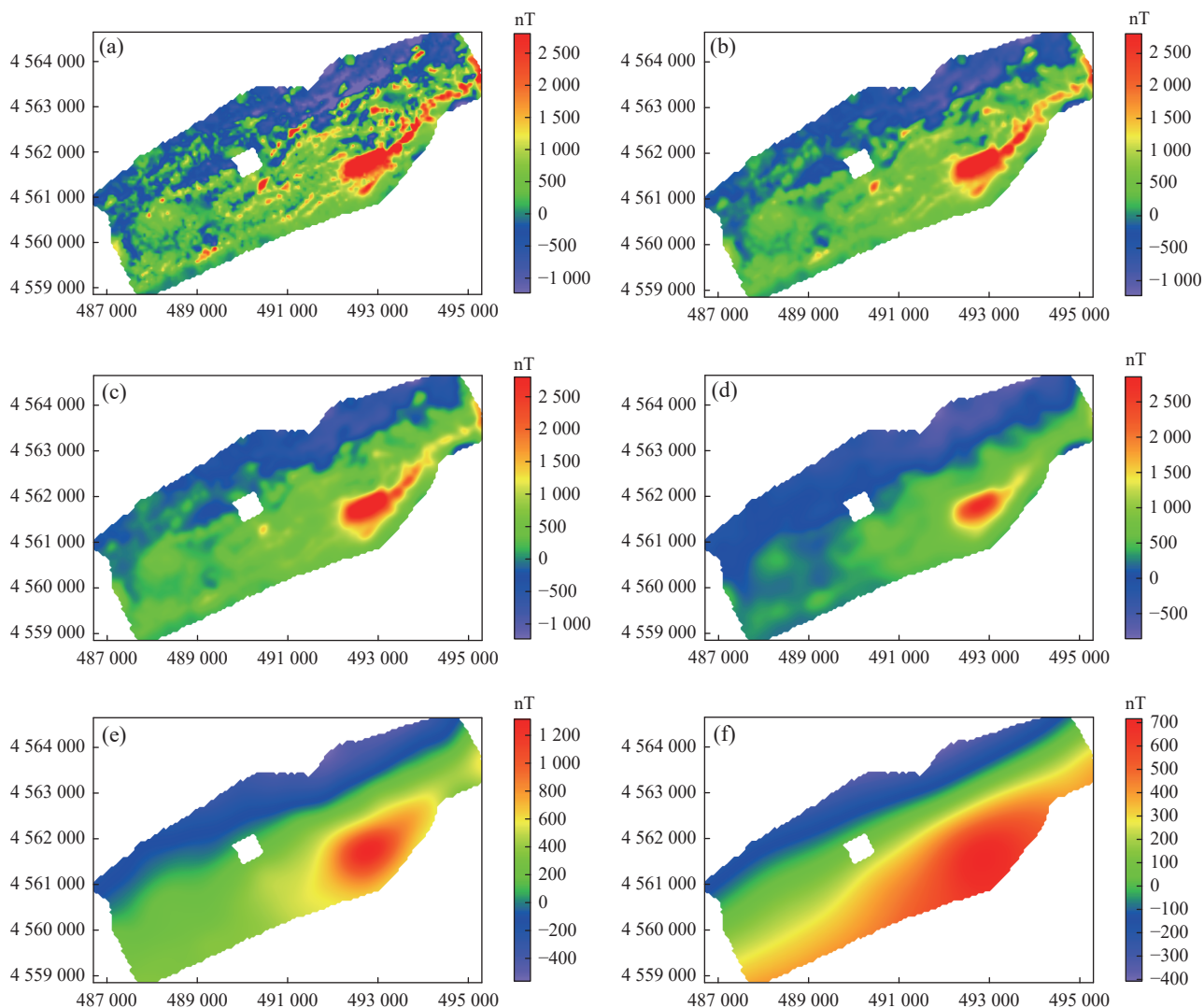


图2 研究区高程图(a)和化极磁异常图(b)

Fig. 2 (a) Terrain and (b) RTP (reduction to pole) anomalies of the research area

2.2 磁异常处理与分析

为了解研究区磁性源的分布情况, 对化磁极后的磁异常进行向上延拓来突出不同深度区域的磁性源, 延拓高度分别为 10 m、50 m、100 m、200 m、500 m、1 000 m(图 3)。延拓高度为 10 m 时, 整个延拓异常与 RTP(化磁极)异常特征保持一致, 但是数据中的噪



a. 向上延拓 10 m; b. 向上延拓 50 m; c. 向上延拓 100 m; d. 向上延拓 200 m; e. 向上延拓 500 m; f. 向上延拓 1 000 m

图3 研究区化磁异常上延结果

Fig. 3 Upward continuations of the RTP magnetic anomalies of the research area

声得到了压制。随着上延高度的增加,研究区的正负异常区逐渐变得光滑,研究区西南部的小范围正异常点都消失不见,只保留了中东部明显的正异常,表明该区域的磁性体异常规模较大(与杨营铁矿区 Fe5 号主要矿体对应)。当延拓高度 500 m、1 000 m 时,整个区域的异常分为明显的正负异常区,整个分界线呈 NE-SW 向。

磁异常的导数信息常用来刻画异常体边界,确定断层线,区分岩性等。文中采用垂向导数、Qin(1994)提出的解析信号及 Miller et al. (1994)提出的斜导数,对研究区化磁极异常进行处理(图 4)。解析信号受剩磁影响较小,其局部极值经常用来定位磁性体水平位置。对比发现(图 3a、图 4a),解析信号的极值分布与 RTP 异常有较好的对应,这与地质调查和岩石标本的

物性分析结果吻合。垂向导数的作用主要是突出浅部磁性体。对比发现(图 3a、图 4b),垂向导数与 RTP 异常的局部异常特征基本一致,但是 RTP 异常叠加了区域异常,形态更加复杂。斜导数常用来刻画地质体或者断层的水平位置,其零值线对应地质构造边界。考虑到研究区精细地质图件较为缺乏,文中导数处理的结果在空间上不仅与已知大尺度地质走向(图 1)保持一致,且通过解析信号极值点与斜导数零值线的相互约束,在更高分辨率上勾勒出了地下磁性体的分布轮廓和潜在断裂边界,弥补了地面地质调查的不足。

已有资料显示研究区内西侧古房一带沉积变质型铁矿体、超贫磁铁矿体规模较小、埋藏较浅;东侧杨营铁矿区主要矿体 Fe5 相对厚大,自地表延伸近 1 000 m,且矿体沿倾斜方向逐步增厚变大,呈大透镜

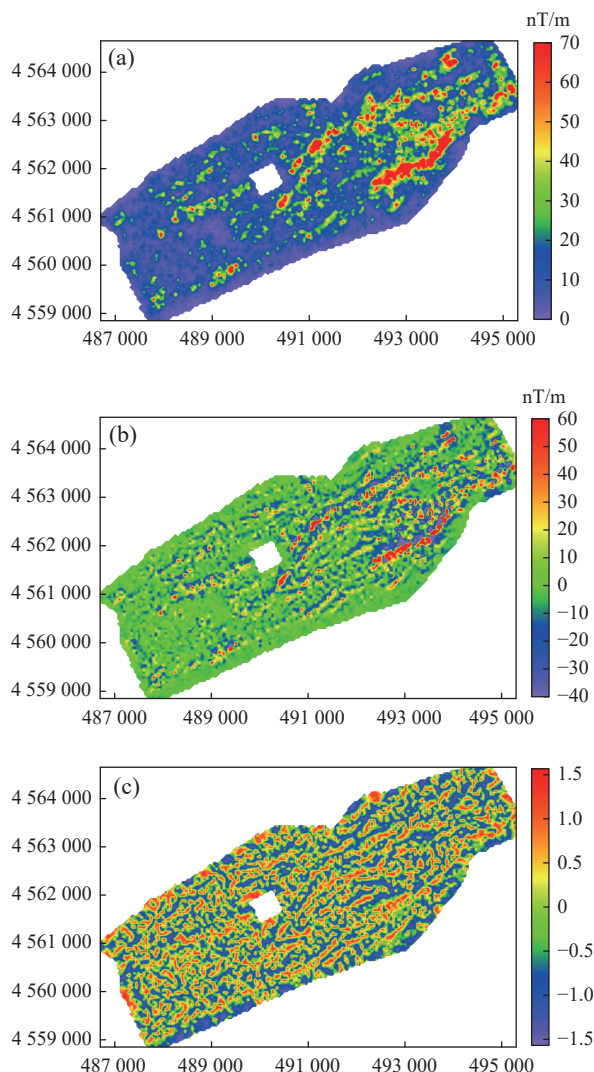


图4 研究区化磁极异常的解析信号图(a)、垂向导数图(b)、斜导数图(c)

Fig. 4 (a) Analytical signal amplitude, (b) vertical derivative, and (c) tilt-angle of the RTP anomaly

体状;其余矿体相对较薄,大多分布于浅层,少量延伸约 800 m。因此,在实施三维反演前进行场分离处理,消除深部磁性体的干扰。经过对比试验,选取延拓高度为 500 m 的上延磁异常作为背景场,然后将其从 RTP 异常中减掉,得到剩余局部异常。结果显示(图 5),局部异常和垂向导数内含的异常特征有着较好的对应。

3 反演结果

研究区水平范围为 $8\text{ km} \times 6\text{ km}$,测点间距为 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$,研究目标从地表到地下 1 km。三维反演采用棱柱体等间距剖分,剖分网格在水平方向的大小设置为 50 m,垂向的剖分网格大小设置为 25 m。研究区地

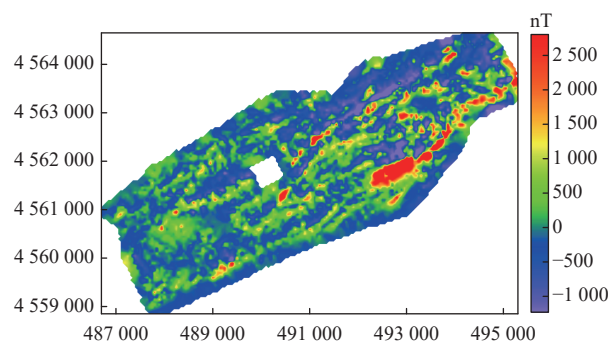


图5 研究区局部磁异常

Fig. 5 Residual RTP anomalies of the research area

表起伏较大,反演中将地表以上的网格设置为不激活状态,不参与反演迭代。文中反演采用 SimPEG 开源程序进行(Cockett et al., 2015),反演中对模型施加了光滑约束(3 个方向尺度因子相同),正则化参数的选取采用冷却法(每两次迭代减小正则化因子);迭代收敛基于卡方差异原则,即数据噪声符合正太高斯分布时,数据拟合差的期望值是数据个数;反演中设置参考模型和初始模型都为零,并对磁化率施加正约束。反演取相对坐标,反演区域最终设置为 $8.6\text{ km} \times 5.8\text{ km} \times 1\text{ km}$,经过 15 次迭代,反演收敛,此时数据拟合差收敛于观测数据个数(图 6)。

总体而言,反演结果刻画的高磁性体位置与研究区局部磁异常位置对应较好。磁性体主要分布在中东部,与杨营铁矿区主要矿体 Fe5 相对应,整体呈 NE-SW 向条带状分布。

反演结果(图 7)显示,浅部磁性体总体分散,表现为多处弱至中等强度的磁化率异常,表明浅部磁性体规模较小且分布零乱。随着海拔降至约 540 m(图 7c)和 440 m(图 7d),磁化率异常逐渐集中,形成一个主要的高磁化率区,表明在此深度范围内可能发育主要的磁性岩体或富磁性矿化带。继续向下至 340 m(图 7e)和 240 m(图 7f),磁化率明显减弱,仅在局部区域保留高值,说明磁性体在更深部趋于变小消失或磁性显著降低。磁性体在垂向上呈现出“浅部零散中部集中—深部减弱”的分布特征,表明主要磁性源体位于中等深度(约 440~540 m),并向上下两侧逐渐过渡为弱磁化区,这与高精度磁测有效探测范围相吻合。

设定不同阈值显示磁性体三维分布(图 8),可以进一步明确磁铁矿的空间展布。设定磁化率大于 0.005 SI 时,研究区磁性体大范围连片,其形态与研究区局部磁异常一致;当磁化率大于 0.01 SI 时,西南部磁性体开始聚焦变小,显示出西南部铁矿体品位低、

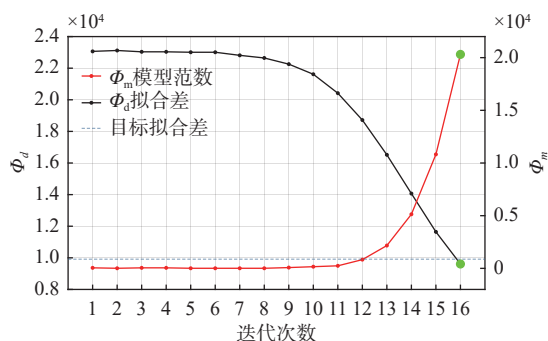


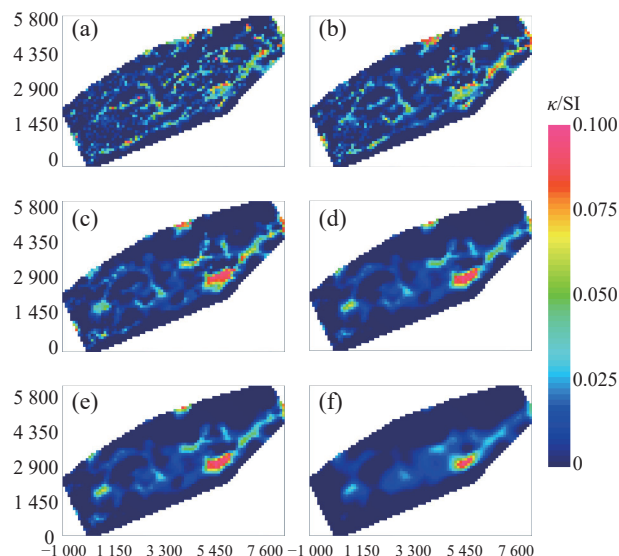
图6 反演迭代中收敛曲线

Fig. 6 Convergence curve in inversion iteration

规模小特点,中东部的高磁性体及其周边仍然成片连接;当设定磁化率大于 0.03 SI 时,高磁性体范围进一步缩小,其分布主要集中于中东部,显示该处磁性体埋深大,范围从南西方向开始延伸至北东,有部分向上延伸接近地表,其他磁性体零散分布;当磁化率阈值设定为 0.06 SI 时,中东部的高磁性体不再连为一体,分割为几个范围较小的高磁性体,但仍有聚焦中心,显示出磁性体应呈大透镜状特性(图 8)。

4 讨论

华北陆块初始克拉通化发生于新太古代,至晚期陆块初步形成,随之产出沉积变质型铁矿床(BIF)

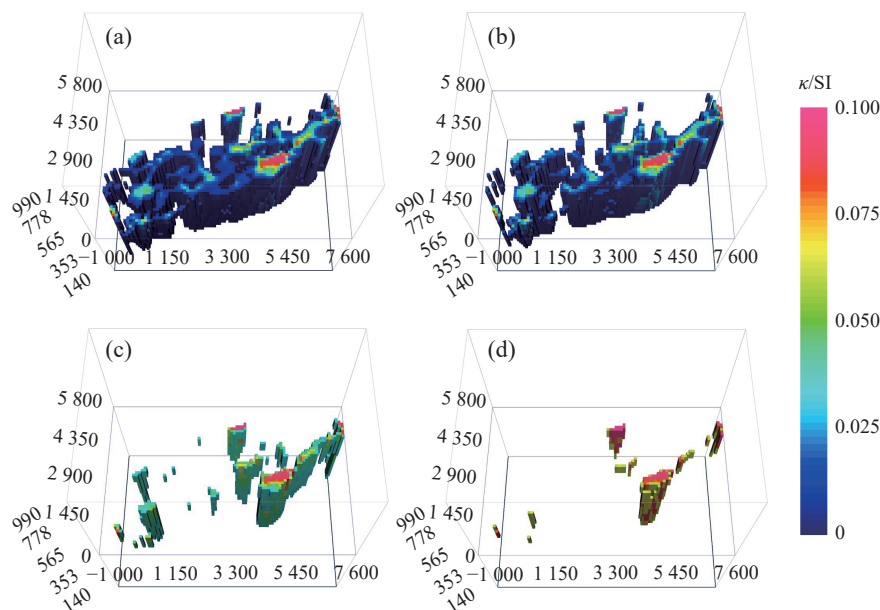


a. 海拔 740 m; b. 海拔 640 m; c. 海拔 540 m; d. 海拔 440 m;
e. 海拔 340 m; f. 海拔 240 m

图7 不同深度磁化率平面分布图

Fig. 7 Plan view of magnetic susceptibility at different depths

(Bekker et al., 2010; Konhauser et al., 2017)。经后期区域变质作用、岩浆-构造作用改造和破坏,形成了如今华北陆块新太古代 BIF 型铁矿分布规律:北东陆块以鞍山-本溪和冀东陆核为中心,包括吉南、北京密云和胶东地区,占据华北鞍山式铁矿资源储量 80% 以上,总体构造格局呈卵形构造特征,构造线呈 NW、NE、EW、SN 等多组构造方向,且具明显同斜紧闭褶皱构



a. 磁化率 > 0.005 SI; b. 磁化率 > 0.01 SI; c. 磁化率 > 0.03 SI; d. 磁化率 > 0.06 SI

图8 不同磁化率异常体分布图

Fig. 8 3D distribution of susceptibility volume with different cutoff values

造样式:西南陆块为内蒙古大青山、山西吕梁山、鲁西等西南部分,包括河南舞阳和安徽霍邱等矿集区,以类似弧后盆地或裂谷为主的沉积变质系和壳源花岗岩为特征,构造相对简单,以NW向为主,局部叠加褶皱。古房-杨营一带处于华北陆块北缘,介于北东陆块鞍山-本溪矿集区与北京密云矿集区中间地带,已查明的沉积变质型铁矿体均赋存于新太古代崇礼上岩群杨营岩组中、超贫磁铁矿赋存于古元古代晚期变质辉长角闪岩中,整体产出形态与区域构造线方向一致,呈NE向。研究区内的磁性体分布与已知铁矿体展布高度一致,主要集中于中东部区域;这些高磁化率体(磁化率阈值0.03 SI以上)对应杨营铁矿区Fe5、Fe5-1等沉积变质型铁矿体,呈现条带状或块状特征,矿致异常明显,且明显有一定规模的延深。这种岩性-磁性-矿体的一致性,不仅验证了磁法勘探的有效性,还为深部矿体预测提供了地质依据,表明磁性体可作为矿化指标,进一步指导钻探布设。

5 结论

(1)基于高精度地面磁法数据,采用三维反演,成功揭示了古房-杨营地区沉积变质型铁矿的深部三维展布特征,证实该区铁矿成矿主要受新太古代区域变质作用控制,矿体整体沿NE向紧闭向斜构造定位,并具有浅部规模较小、中深部集中膨胀、深部逐渐减弱的垂向分布规律,这一现象与华北陆块北缘BIF型铁矿的典型成矿模式高度一致。

(2)该研究有效解决了区内复杂地质环境及早期断裂遮掩导致的深部矿体刻画不足等关键地质问题,通过为隐伏磁性体提供高分辨率地球物理证据,不仅深化了对研究区多金属矿化带深部成矿要素的理解,更为后续深部找矿靶区优选、矿体拓展预测及钻孔工程布设提供了支撑。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

- 陈学明,李春奎,窦全成,等.扎日根铁矿区地质特征及找矿潜力分析[J].西北地质,2012,45(1):249-256.
- CHEN Xueming, LI Chunkui, DOU Quancheng, et al. Geological Feature and Prospecting Potential Analysis of Zarigen Iron Deposit[J]. Northwestern Geology, 2012, 45(1): 249-256.
- 贾正元,王凤刚,索奎,等.内蒙古东南部双尖子山矿区三维磁性结构及地质构造特征[J].现代地质,2023,37(01):48-57.
- JIA Zhengyuan, WANG Fenggang, SUO Kui, et al. Three-dimensional Magnetic Structure and Geological Structural Characteristics of Shuangjianzishan in Southeastern Inner Mongolia[J]. Geoscience, 2023, 37(1): 48-57.
- 李东生,张文权,田承盛,等.青海祁漫塔格地区主要矿床类型找矿方法探讨[J].西北地质,2013,46(4):131-141.
- LI Dongsheng, ZHANG Wenquan, TIAN Chengsheng, et al. Discussion on the Metallogenic Characteristics and Ore-prospecting Methods of Qimantage Region, Qinghai Province[J]. Northwestern Geology, 2013, 46(4): 131-141.
- 李厚民,陈毓川,李立兴,等.全国重要矿产和区域成矿规律研究-中国铁矿成矿规律[M].北京:地质出版社,2012.
- 梁景利,周红芳,杨高杰,等.地质钻探工程中提高测斜工作质量的措施研究——以杨营铁矿深部勘查项目为例[J].地质找矿论丛,2025,40(3):408-419.
- LIANG Jingli, Zhou Hongfang, YANG Gaojie, et al. Research on Measures to Improve the Quality of Inclination Survey Work in Geological Drilling Engineering: A Case Study of the Deep Exploration Project at Yangying Iron Mine[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources, 2025, 40(3): 408-419.
- 罗姣,陈炳锦,郭文波,等.基于小波多尺度分析的磁法三维可视化建模研究[J].西北地质,2025,58(3):41-49.
- LUO Jiao, CHEN Bingjin, GUO Wenbo, et al. Research on Magnetic 3D Visualization Modeling Based on Wavelet Multiscale Analysis[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(3): 41-49.
- 蒙嘉琪,王志猛,贾三石,等.基于地球物理技术圈定沉积变质型富铁矿体:辽宁鞍山齐大山铁矿例析[J].现代地质,2024,38(1):87-97.
- MENG Jiaqi, WANG Zhimeng, JIA Sanshi, et al. Delineation of Sedimentary Metamorphic Rich Iron Ore Bodies Based on Geophysical Techniques: Case Analysis of Qidashan Iron Ore in Anshan, Liaoning[J]. Geoscience, 2024, 38(1): 87-97.
- 庞振甲,成欢,冀月飞.陕西省略阳县陶家沟地区地质地球物理特征及找矿预测[J].西北地质,2022,55(1):93-100.
- PANG Zhenjia, CHENG Huan, JI Yuefei. Geophysical Characteristics and Prospecting Prediction of Taojiagou Area in Lueyang County, Shaanxi Province[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(1): 93-100.
- 王鹏,梁景利,杨瑞.河北省隆化县张三营钨铁矿区地质特征及矿体成因分析[J].有色金属(矿山部分),2020,72(04):99-104.
- 陈学明,李春奎,窦全成,等.扎日根铁矿区地质特征及找矿潜

- WANG Peng, LIANG Jingli, YANG Rui. Geological characteristics and ore genesis of zhangsanying niobium-iron mine in Longhua County, Hebei Province[J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 2020, 72(4): 99–104.
- 闫迪, 付建飞, 贾三石, 等. 鞍山—本溪地区眼前山铁矿床深(边)部错断隐伏矿体磁法和瞬变电磁法联合定位及预测[J]. *现代地质*, 2024, 38(01): 35–45.
- YAN Di, FU Jianfei, JIA Sanshi, et al. Combined Magnetic and Transient Electromagnetic Methods to Locate and Predict the Dislocated Concealed Orebody at the Deep Edge of Yanqianshan Iron Deposit in Anshan-Benxi Area[J]. *Geoscience*, 2024, 38(1): 35–45.
- 于慧敏, 沈晓丽, 苏虎虎, 等. 滇西南哀牢山构造带李子冲矿区综合物探的应用研究[J]. *现代地质*, 2024, 38(4): 1054–1066.
- YU Huimin, SHEN Xiaoli, SU Huhu, et al. Application of Comprehensive Geophysical Exploration in the Lizichong Mining Area, Ailaoshan Tectonic Belt, Southwest Yunnan Province[J]. *Geoscience*, 2024, 38(4): 1054–1066.
- 张招崇, 李厚民, 李建威, 等. 我国铁矿成矿背景与富铁矿成矿机制[J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(6): 827–852.
- ZHANG Zhaocong, LI Houmin, LI Jianwei, et al. Geological settings and metallogenesis of high-grade iron deposits in China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2021, 64(5): 691–715.
- 赵柏儒, 李厚朴, 张恒磊. 磁异常三维反演在磁铁矿勘查中的应用[J]. *物探与化探*, 2024, 48(6): 1626–1632.
- ZHAO Bairu, LI Houpu, ZHANG Henglei. Application of three-dimensional magnetic anomaly inversion in magnetite exploration[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2024, 48(6): 1626–1632.
- 赵红瑞. 河北杨营铁矿地质特征及深部找矿远景[J]. *有色金属(矿山部分)*, 2019, 71(04): 58–63.
- ZHAO Hongrui. Geological characteristics and deep prospecting prospect of Yangying iron mine in Hebei province[J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 2019, 71(4): 58–63.
- Bekker A, Slack J F, Planavsky N, et al. Iron formation: the sedimentary product of a complex interplay among mantle, tectonic, oceanic, and biospheric processes[J]. *Economic Geology*, 2010, 105(3): 467–508.
- Chen T, Rao Y. Evaluating the Impact of Inexact Petrophysical Information on Mineral Exploration Potential Estimation Using Gravity Data[C]. 85th EAGE Annual Conference & Exhibition. European Association of Geoscientists & Engineers, 2024, 2024(1): 1–5.
- Chen T, Rao Y. Memory-efficient implementation of gravity inversion[J]. *Geophysics*, 2025, 90(3): G85–G92.
- Chen T, Zhang G. Mineral exploration potential estimation using 3D inversion: A comparison of three different norms[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(11): 2537.
- Cockett R, Kang S, Heagy L J, et al. SimPEG: An open source framework for simulation and gradient based parameter estimation in geophysical applications[J]. *Computers & Geosciences*, 2015, 85: 142–154.
- Konhauser K O, Planavsky N J, Hardisty D S, et al. Iron formations: A global record of Neoarchaeon to Palaeoproterozoic environmental history[J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 172: 140–177.
- Li Y, Oldenburg D W. 3-D inversion of magnetic data[J]. *Geophysics*, 1996, 61(2): 394–408.
- Miller H G, Singh V. Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 1994, 32(2-3): 213–217.
- Portniaguine O, Zhdanov M S. Focusing geophysical inversion images[J]. *Geophysics*, 1999, 64(3): 874–887.
- Qin S. An analytic signal approach to the interpretation of total field magnetic anomalies[J]. *Geophysical Prospecting*, 1994, 42(6): 665–675.