2026 年第 41 卷 第 5 期
2026,41(5):2457-2467
地球物理学进展 Progress in Geophysics
http://www.progeophys.cn
ISSN 1004-2903
CN 11-2982/P

刘玉翠,王德启,袁雪超,等.2026.基于重磁数据的邯邢地区铁矿远景区圈定.地球物理学进展,41(5):2457-2467,doi:10.6038/pg2026JJ0504.
LIU YuCui, WANG DeQi, YUAN XueChao, *et al*. 2026. Delineation of iron ore prospective areas in the Han-Xing region based on gravity and magnetic data. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41(5):2457-2467,doi:10.6038/pg2026JJ0504.

基于重磁数据的邯邢地区铁矿远景区圈定

Delineation of iron ore prospective areas in the Han-Xing region based on gravity and magnetic data

刘玉翠[1,2],王德启[1],袁雪超[1],覃霖[1],李辉[3],吴杰[3],孙厚武[1],孔蒙[1],孙石达[2,3]*,李英杰[2,3]
LIU YuCui[1,2], WANG DeQi[1], YUAN XueChao[1], QIN Lin[1], LI Hui[3], WU Jie[3], SUN HouWu[1], KONG Meng[1], SUN ShiDa[2,3]*, LI YingJie[2,3]

1. 河北省地球物理勘查院(河北省浅层地热能研究中心),廊坊 065000
2. 河北地质大学河北省战略性关键矿产研究协同创新中心,石家庄 052161
3. 河北地质大学地球科学学院河北省战略性关键矿产资源重点实验室,石家庄 052161
1. *Hebei Institute of Geophysical Exploration* (*Hebei Shallow Geothermal Energy Research Center*), *Langfang* 065000, *China*
2. *Hebei Province Collaborative Innovation Center for Strategic Critical Mineral Research*, *Hebei GEO University*, *Shijiazhuang* 052161, *China*
3. *Hebei Key Laboratory of Strategic Critical Mineral Resources*, *College of Earth Sciences*, *Hebei GEO University*, *Shijiazhuang* 052161, *China*

摘 要 河北省邯邢地区作为我国矽卡岩型铁矿的核心产区,随着浅表矿产的大规模开采,深部找矿与就矿找矿已成为当前主要勘探方向.铁矿目标体相对于围岩的高密度、高磁性特征为利用重力和磁测数据对成矿远景区进行圈定提供了重要的物性支撑,但是应用过程中仍然面临无关信号干扰、强剩磁以及解释多解性等方面的问题.本文基于研究区高分辨率地面重力和航磁资料,首先采用基于等效源的场源分离技术去除深源和临近地质体的干扰,获取了不同深度的重力剩余场,并计算了多种磁异常转换参量来减弱强剩磁的影响.然后在此基础上,综合地质信息、已知矿点位置和密度、磁化率分布开展综合分析评价,结果表明岩体和铁矿相关的重力异常高、磁力异常高具有非常好的对应性,且铁矿点主要分布于剩余重力异常和磁异常转换参量的高值区边界或高低值过渡区域.最终根据上述认识,本文对铁矿成矿远景区进行了圈定,可为研究区后续铁矿勘查提供基于重磁资料的有效约束和参考.

Abstract The Handan-Xingtai region is a major ore concentration area for large-scale skarn iron deposits in China, and ore prospecting in the deep and peripheral areas of existing mines constitutes the primary task at the current stage. The high-density and high-magnetic characteristics of iron ore targets relative to surrounding rocks provide crucial physical property support for delineating iron ore prospective areas using gravity and magnetic data. However, practical applications are still confronted with issues such as irrelevant signal interference, strong remanent magnetization, and non-uniqueness in interpretations. Based on high-resolution ground gravity and aeromagnetic data in the study area, we first employ equivalent source-based field separation technology to eliminate interference from deep-seated sources and adjacent geological bodies, thereby obtaining residual gravity fields at different depths. Meanwhile, various magnitude magnetic transforms (e.g., total magnitude of three magnetic anomalous vector, horizontal total gradient, normalized source strength) are calculated to mitigate the impact of strong remanent magnetization. Subsequently, a comprehensive analysis and evaluation are conducted by integrating geological information, locations of known iron ores, and distributions of density and magnetic susceptibility. The results indicate a strong correspondence between high gravity anomalies and high magnetic anomalies associated with igneous bodies and iron ores, with iron ore occurrences predominantly distributed

收稿日期 2026-01-06; **修回日期** 2026-05-27. **投稿网址** http://www.progeophys.cn
基金项目 河北省"矿产资源与地质环境保护专项资金"(13000025P00F2D410695H)和河北省战略性关键矿产研究协同创新中心开放基金(HGUXT-2025-2)联合资助.
第一作者简介 刘玉翠,女,1986 年生,矿产地质高级工程师,主要从事区域地质、矿产地质、物化探、水工环等相关研究.E-mail:672899790@qq.com
***通讯作者** 孙石达,男,1990 年生,副教授,主要从事重磁资料处理、反演与解释方面的研究.E-mail:sdsun@hgu.edu.cn

关键词 邯邢地区;矽卡岩型铁矿;铁矿远景区;重力数据;磁测数据

中图分类号 P631

文献标识码 A

doi:10.6038/pg2026JJ0504

CSTR:32085.14.pg2026JJ0504

along the boundaries of high-value zones or transition zones between high and low values of residual gravity anomalies and magnitude magnetic transforms. Finally, prospective areas for iron ores are delineated based on the aforementioned findings, which can provide effective constraints and references based on gravity-magnetic data for subsequent iron ore exploration in the study area.

Keywords The Handan-Xingtai region; Skarn-type iron deposit; Prospective areas for iron ores; Gravity data; Magnetic data

0 引 言

河北省邯郸—邢台地区是我国邯邢式铁矿的重要产区,随着近 40 年的大规模开采,深部找矿和就矿找矿是现阶段主要工作.深入研究邯邢地区铁矿的成矿物探资料及找矿方向,对于我国的经济建设和可持续发展具有重要意义.

邯邢式铁矿是典型的接触交代矽卡岩型铁矿床,其成矿带受断陷盆地控制,而构造岩浆上隆则控制着矿床或矿段,与邯邢式铁矿床有成因关系的燕山期岩浆岩,则主要受东西向基底断裂和华北大陆裂谷带西界的大兴安岭-太行山深断裂带及其派生的北北东向断裂带控制.赵百民等(2014)在对邯邢地区铁矿地质、地球物理特征及找矿方向的研究中,归纳总结了与铁矿相关的现象或特征,其中与地球物理工作有直接或相关联系的找矿标志可简述如下.第一是接触带标志,区内的铁矿主要为接触交代型矿床,即燕山期中酸性岩类与奥陶系碳酸盐岩接触并发生作用;第二是构造-岩浆岩标志,由于岩浆岩沿中奥陶统层间的薄弱带侵入,在侵入岩浆的前部将围岩拱起形成短轴背斜构造、小背斜、小褶皱群是岩浆侵入的标志,同时也是找矿的标志(段文超和赵兴考,2010);第三是磁异常特征,本区铁矿类型主要为磁铁矿,岩(矿)石物性特征表明,磁铁矿是本区唯一的强磁性体,其磁性比火成岩的磁性至少要高出一个级次,能引起明显的磁异常;第四是岩石磁化率、密度降低标志,由于岩石经钠化后表明岩体有铁质析出,但该过程同样会使得磁化率明显降低、密度减小(赵书梅等,2011).

以往邯邢式铁矿找矿方法主要是单一磁法找矿.但是单一的磁法手段已经不能满足目前找矿的现实和要求,技术组合代替单一技术是必然趋势.该地区综合找矿探测实例表明,高精度重、磁方法相结合是寻找该类铁矿最有效的方法.根据岩石样品试验研究,磁铁矿矿石具有强磁性、高密度,同时与各类围岩及岩体均有明显的磁性、密度差,并且研究区目前已开展了相对丰富的区域性重力和航磁测量,为利用重、磁资料进行综合找矿提供了物性基础和数据支撑.此外,加强赋矿地层、构造、岩浆岩、围岩蚀变和重、磁综合异常"五位一体"的深部综合找矿模式是寻找邯邢式铁矿深部矿体的有效途径(孟贵祥等,2009;田文法等,2010).

但是,在重、磁异常特征分析和应用过程中,仍然存在如下方面的问题亟需解决.一是铁矿体相关的重、磁信号如何有效分离和提取.中酸性岩类与碳酸盐岩的接触带,以及岩浆侵入的相关构造是寻找铁矿的重要间接标志,同时也意味着岩体物探信号对矿体物探异常的干扰.在重、磁资料处理过程中,将铁矿相关因素所引起的信号尽量分离和提取,是提高后续处理和解释成果准确度和有效性的关键.二是铁矿矿石复杂的强剩磁对处理结果的影响.研究区岩矿石磁性统计显示研究区铁矿石具有较强的剩磁(郝俊杰等,2010;赵卫东,2025),剩磁与感磁最高比值可达 8.1(孟贵祥等,2009),导致常规磁异常数据处理方法如化极等处理结果解释难度增大.三是单一地球物理方法的多解性问题.铁矿床勘探过程中干扰因素较多,甚至在物性基础上就存在差异,例如磁铁矿本身高磁高密度但与铁矿相关的纳化现象会导致岩石磁化率、密度降低两种不同的物性组合特征(赵书梅等,2011),因而综合物探方法与地质相结合是铁矿找矿工作的发展方向(田文法等,2010;韩冬梅等,2014).

因此,针对研究区上述问题,本文将首先在介绍研究区地质概况和地球物理资料的基础上,阐述对应的重力和磁数据处理方法和技术流程,然后结合研究区地质和矿床位置等先验信息,从数据处理结果中提取与成矿相关的重磁异常特征,最终给出基于重力和磁异常数据的邯邢地区铁矿成矿远景区圈定结果.

1 地质概况

研究区位于华北克拉通中部,东邻太行山断裂

带,发育北北东/北西向断裂及褶皱构造(郑建民等,2006). 该区域及周边主要岩性单元由早前寒武纪变质基底岩石及不整合覆盖其上的显生宙沉积序列构成(图 1). 前寒武纪基底主要包括新太古代至古元古代早期的赞皇群,岩性主要为片麻岩及部分片岩、角闪岩、大理岩等. 古生代海相沉积岩不整合覆盖于前寒武纪结晶基底之上. 中奥陶统地层在邯郸—邢台地区西部广泛分布,主要由石灰岩和白云质灰岩构成,是该区域的主要控矿地层(赋存铁矿石储量超过总储量 95%)(Dong *et al.*, 2024). 石炭系—二叠系页岩、泥岩、粉砂岩、砂岩和煤层不整合覆盖于奥陶系地层之上,主要出露于区域中部,最东侧被第四系沉积物覆盖.

邯邢地区岩体空间上由西向东包含 3 个北北东向岩浆岩带,依次为角闪闪长岩系、闪长岩系、正长岩系(许文良和林景仟,1989),其中研究区范围内的中性闪长岩—二长岩类(如符山、武安岩体)与邯邢式富铁矿成矿最为密切,正长岩类(洪山岩体)尚未发现有工业价值的矿产(郑建民等,2006;Dong *et al.*, 2024). 前人对于上述两类岩体是否成矿的成因进行了多方面的研究工作,得到了如下认识. 其一,成因时代有所区别,含矿杂岩体形成时代约为 136 至 125 Ma,无矿杂岩体侵位时代约为 135 至 132 Ma (Zhou and Chen, 2006; Chen *et al.*, 2008; Sun *et al.*, 2014). 其二,两者分别有独立的岩浆事件演化形成,含矿杂岩来源于富集岩石圈地幔与古老下地壳的混合源区,而不含矿杂岩则仅由富集岩石圈地幔部分熔融形成,形成两个相对独立的成矿系统,岩浆的高氧逸度、高水含量及下地壳物质的加入,可能在邯邢地区铁矿成矿过程中起着关键作用(Sun *et al.*, 2015, 2019a, b; 张聚全等,2018; Zhang *et al.*, 2019; Shen *et al.*, 2013). 此外,武安盆地深部岩体(营里岩体)与已知成矿岩体具有相似的物理化学条件和成岩时代,结合区域内碳酸盐地层的分布特征,武安盆地深部具备矽卡岩型铁矿的找矿潜力(秦超等,2022).

铁矿体空间上主要赋存于燕山期中性侵入岩和中奥陶统各组碳酸盐岩的接触带,少量产于碳酸盐岩内及侵入岩体内部(郑建民等,2006). 其次赋存于在离接触带不远的中奥陶统碳酸盐岩地层内的构造薄弱带及近接触带岩体内部的碳酸盐岩捕虏体中(李康和刁柳晨,2025). 矿床规模以中、小型为主,个别为大型. 传统矿床成因模式为接触热液交代成因模型,但近年来研究更倾向于其为多期次流体交代和叠加成矿(Chang *et al.*, 2020; 崔晓亮等,2020; 张招崇等,2021). 研究区的主要控矿构造是断裂和褶皱,同时岩体侵入的最高层位和后续剥露速度对于成矿和保存也极为关键(郑建民等,2006;马健飞等,2016;张招崇等,2021;Wang *et al.*, 2024;李康和刁柳晨,2025).

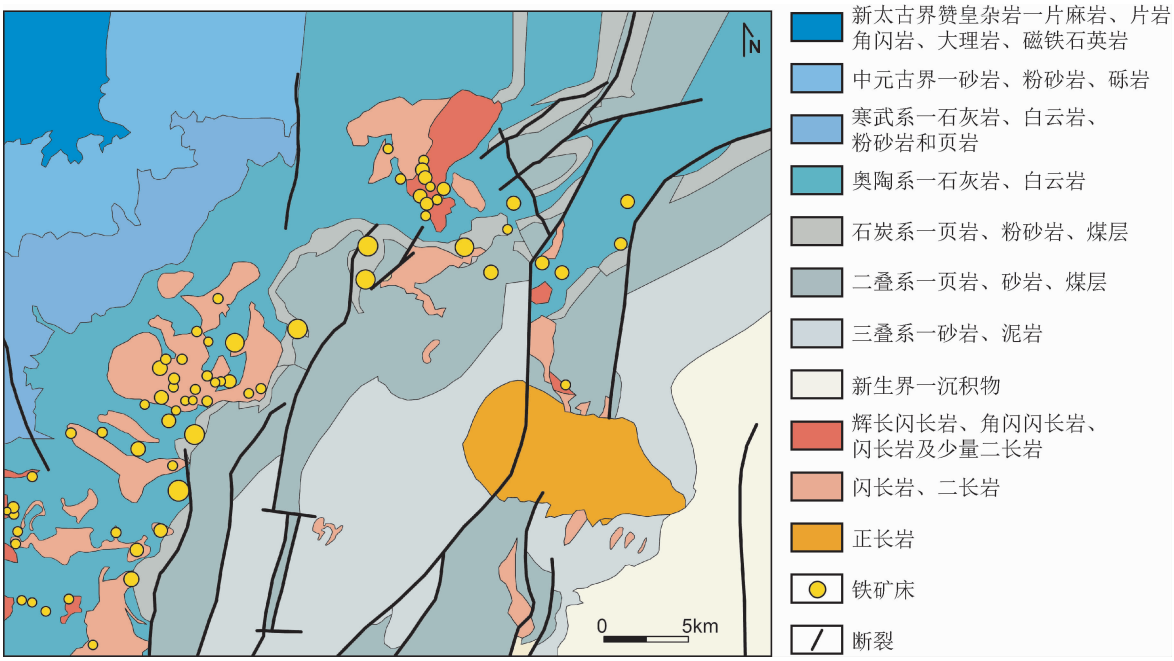


图 1　研究区地表地质图(修改自 Zhang *et al.*, 2015; Liang *et al.*, 2023)

Fig. 1　Geological map of the study region (modified from Zhang *et al.*, 2015; Liang *et al.*, 2023)

2 地球物理特征

2.1 密度、磁化率特征

前人总结和发表的密度和磁性统计结果显示,研究区磁铁矿具有高密度、强磁性的特点,具备利用高精度重、磁结合进行铁矿勘探的物性基础(孟贵祥等, 2009;田文法等,2010;李康和刁柳晨,2025).研究区岩石可分为沉积围岩、岩浆岩、矽卡岩和铁矿石四类.在密度方面,岩浆岩(2.66 g/cm^3)和沉积岩(2.64 g/cm^3)相当,铁矿石则(4.53 g/cm^3)明显较高.磁性参数方面,沉积岩可视为无磁性,岩浆岩磁化率均值为 29 ~ 65(×10^{-3} SI),剩磁与感磁比值(Q 值)为 0.14 ~ 0.45,铁矿石磁化率均值大多超过 1 SI,Q 值最大可达 8.1.此外,研究区矽卡岩样品数偏少,其密度值(3.03 g/cm^3)和磁化率(0.161 SI)相较于沉积岩和岩浆岩较高,但是仍然大幅度弱于铁矿石.因而,目标铁矿体具备相较于围岩高密度、高磁性的特征,同时具备较强的剩磁需要考虑.

2.2 重力异常特征

研究区 1∶5 万区域布格重力异常如图 2 所示.区域重力异常均呈北东向展布,与研究区断裂分布具有较好的对应性.总体表现为东高西低的趋势,该趋势特征与地壳厚度由西向东逐渐变薄有关.西侧异常低值区对应了莫霍面较深的太行山地区,该区深部被酸性的太古代变质花岗岩体侵入所致.东侧异常高值区则对应了莫霍面较浅的平原地区,与区内的隆起或侵入该区的燕山期中性岩体有关.重力场的分布特征基本上反映了该区的深部构造格局.

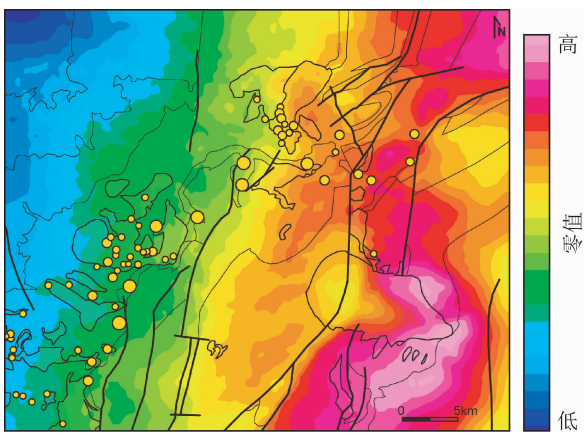


图 2 研究区布格重力异常图

Fig. 2 Bouguer gravity anomaly map of the study region

2.3 磁异常特征

研究区 1∶25000 航磁异常平面等值线图如图 3 所示.整体背景场为中南部低值区和北部高值区,局部航磁异常呈北北东向、北东向和近东西向的近椭圆状或不规则状.这些航磁高异常与区内中酸性岩浆岩体关系密切,局部磁场强度高、梯度大,是正负异常密集排列的复杂磁场区,与区内的铁矿关系密切.由于斜磁化和可能存在强剩磁的影响,磁异常与场源的详细对应关系将在相应处理结果中展开叙述.

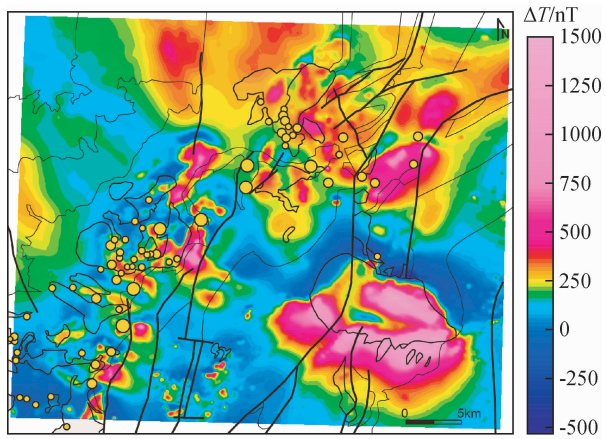


图 3 研究区总强度磁异常图

Fig. 3 Total-field magnetic anomaly map of the study region

3 数据处理方法和结果

3.1 基于等效源的场源分离

常规的重力场和磁场分场方法主要通过深部场源对应信号长波长、浅部场源信号波长短的特征,通过空间域(如平滑滤波、趋势分析)或频率域(如匹配滤波)等方法进行区域场和剩余场的分离,但是上述方法没有特定的物性基础作为支撑,以及依据波长长短进行滤波无法去除临近地质体的影响.利用等效源方法进行分场则可尝试解决上述问题,该方法首先根据需求对等效场源进行设置,然后基于场源和物理场之间的数学物理关系求取等效场源,然后将等效场源进行划分并分别正演计算,便可获取非目标地质体对应的干扰场或目标地质体直接对应的物探异常(如 Dampney, 1969; Li and Oldenburg, 1998a).以重磁数据区域场和剩余场分场处理为例,等效场源可设置为两层或多层场源,深层场源对应的即为区域场,浅层场源对应的即为剩余场;也可将等效场源设置为三维网格剖分结构,可

将目标区域的浅层部分设置为零值,进而通过再次正演得到目标区域的区域场,并最终获取剩余场. 该方式同样适用于多尺度数据和多观测高度数据的融合、分场和转换(如 Li *et al*., 2020; Luo and Wu, 2023; 张义蜜等,2025),其所存在主要问题是求取等效源的时间消耗和内存空间需求,只是对于本身就需要三维物性成像的数据处理流程而言,这些因素将不是方法取舍的主要因素.

针对重力异常而言,首先利用图 2 所示布格重力异常求取三维等效源,该等效源水平范围比研究区更大,最大深度为 20 km;然后将等效源中研究区范围内一定深度的密度赋为零值,并将该处理后的三维场源进行正演模拟得到研究区趋势场;最终将图 2 数据与趋势场作差可得研究区剩余场. 本文对于赋零值的深度范围采取了两个选项来体现不同深度地质体的剩余重力效应. 两个深度选项分别是 10 km 和 2 km,对应的剩余重力异常分别如图 4a、b 所示. 10 km 剩余重力异常已经基本去除了莫霍面起伏对于重力异常的影响,对于断裂和构造边界的刻画更加清晰,2 km 剩余重力异常则主要反映了最浅层剩余密度分布,是分析铁矿成矿位置重力数据方面的最直接依据.

3.2　强剩磁条件下磁异常转换参量计算

当地质体具有强剩磁时,由于剩磁方向通常是未知的,会进一步导致磁性体的总磁化强度方向未知. 但是常规磁异常处理方法均需要明确已知的场源磁化强度方向,例如化到地磁极、磁源重力转换以及三维磁化率反演成像等;如果将该方向视为地磁正常场方向可能得到错误的处理和成像结果,进而影响到后续的进一步解释和应用. 目前对于强剩磁情况下平面数据的处理方案主要有两种思路,一种是先获取场源的总磁化强度方向在进行处理,另一种则是利用受总磁化强度方向影响较小的磁异常转换参量进行后续处理和成像. 对于第一种思路,可以选择的方法有 Helbig 分析法(如 Helbig, 1963; Phillips, 2005; 谢汝宽等, 2021)、互相关法(如 Roest and Pilkington, 1993; Gerovska *et al*., 2009)、Max-Min 方法(Fedi *et al*., 1994; Wang *et al*., 2022)、深度学习方法(Nurindrawati and Sun, 2020)等. 该类方法通常限于单个磁性体或整个研究区总磁化强度方向较为一致的情况,对于场源较为复杂的情况则需要将异常分割成多个小区域,或者采用针对性的计算流程实现整个区域多个地质体的磁化强度方向同时估算(Sun *et al*., 2025). 第二种思路则是利用特殊的磁异常转换参量,如磁异常三分量的总模量 T_a(Gerovska and Stavrev, 2006)、磁异常解析信号振幅或总梯度(Nabighian, 1972; Roest *et al*., 1992)、归一化磁源强度等等(normalized source strength, NSS)(Wilson, 1985; Beiki *et al*., 2012; Clark, 2012)进行解释和成像(Shearer, 2005; Li *et al*., 2010; 刘圣博等,2011; Pilkington and Beiki, 2013; Li and Li, 2014). 这类特殊转换参量对于场源的总磁化强度方向不敏感,因而即使剩磁幅值和方向未知,仍然可以对场源体的位置和形态进行比较可靠的反映. 作为对照本文同样对磁异常进行了化极处理(图 5a),并且分别计算了磁异常总模量、磁异常水平总梯度和归一化磁源强度,分别如图 5b—d 所示.

3.3　三维物性反演

首先将地下空间剖分为紧密相邻的网格单元,然后通过地下空间物性模型与观测数据之间的数学物理关系,根据物性模型预测数据与观测数据之间的拟合情况,最终求取地下空间的三维物性分布(如 Li and Oldenburg, 1996, 1998b). 本文选取剩余重力异常(图 4b)和磁异常总模量(图 5b)进行三维反演. 重力数据网格间距为 500 m,对应地下空间剖分为边长 500 m 的正方体,反演最大深度为 5 km;反演用磁数据网格间距为 250 m,对应地下空间剖分为边长 250 m 的正方体,反演最大深度为 5 km,当地正常场幅值、倾角、偏角分别为 53500 nT、55.68°和 -5.82°. 由于磁异常总模量对场源磁化强度方向弱敏感,其反演过程中假定场源磁化强度方向为当地正常场方向,所得结果磁性参量为与场源磁化强度幅值呈线性比例关系、但并非真实存在的磁化率,称为等效磁化率(Li *et al*., 2010). 反演所得剩余密度分布和等效磁化率分布分别如图 6a、b 所示,此处仅选取了深度 750 m 处的切面进行展示.

本文三维反演过程中没有加入额外的先验地质约束信息,由于缺乏针对性的约束信息提供引导,反演结果与对应异常空间分布具有一定的相似性. 此外,三维反演结果中不同深度物性分布仍然能够为地质体的空间位置、大致埋深、边界倾向、相邻地质体的接触关系等提供有价值的参考信息. 此处以洪山岩体为例,仅从剩余重力异常和磁异常总模量来看,会将岩体异常分为内部低重高磁和外围高重高磁两个区块. 但是在密度和磁化率的空间分布可知,其内部为低密度低磁性、外围是高密度高磁性,且两种物性高低区域的边界高度一致,体现了三维反演

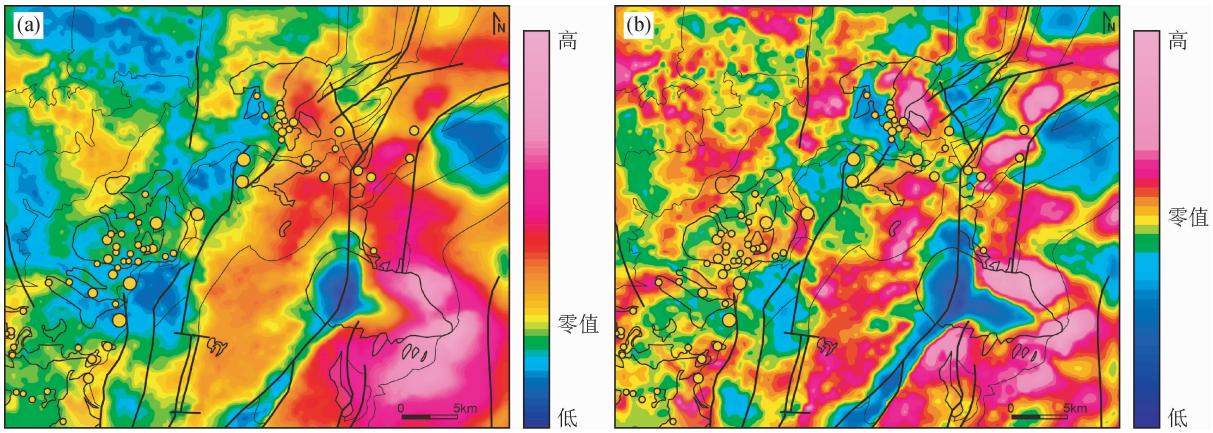


图 4 采用等效源法求取的剩余重力异常图

(a) 深度 10 km 以内场源对应的剩余异常;(b) 深度 2 km 以内场源对应的剩余异常.

Fig. 4 Residual gravity anomalies using equivalent source-based technique

(a) Residual anomaly of sources shallower than 10 km; (b) Residual anomaly of sources shallower than 2 km.

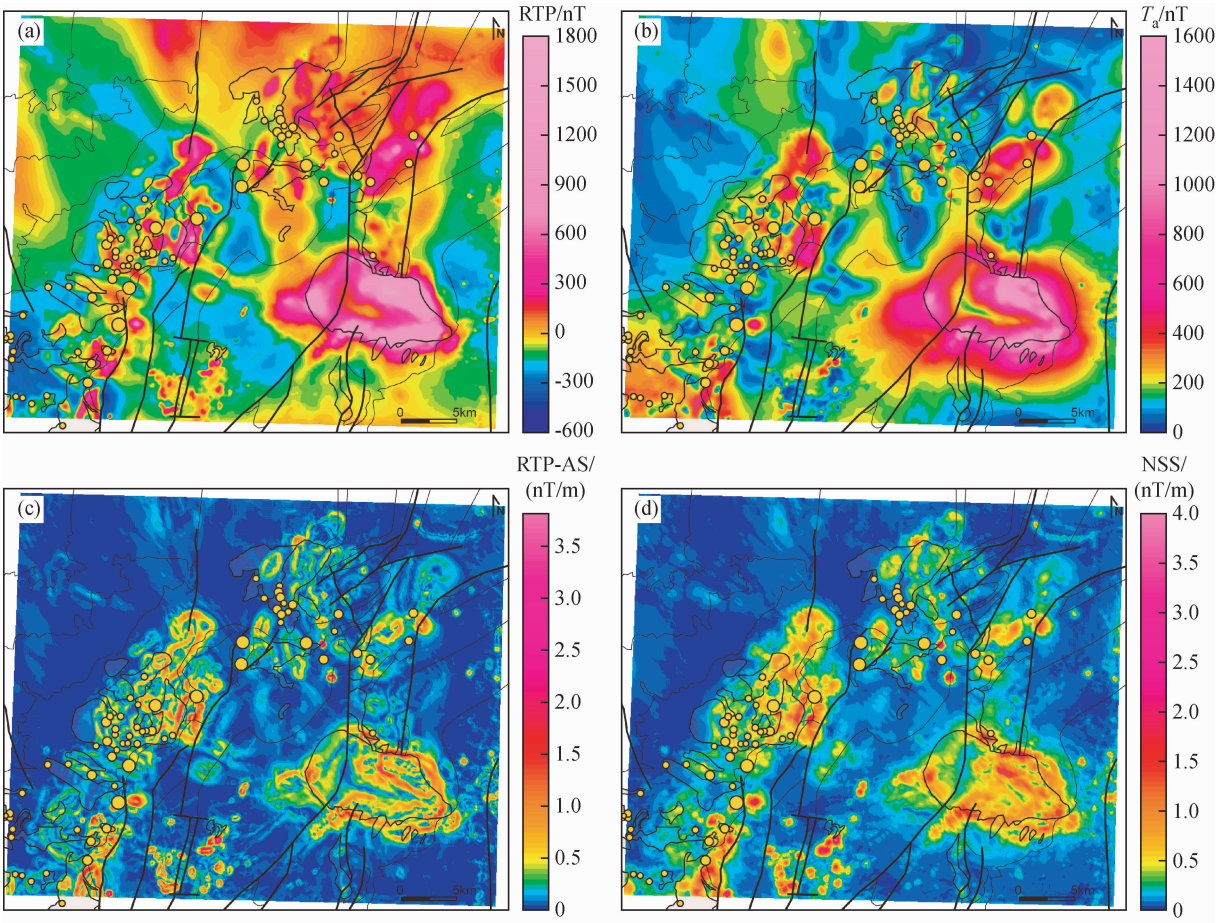


图 5 总强度磁异常化极结果和转换参量计算结果图

(a) 化极磁异常;(b) 磁异常总模量;(c)化极磁异常水平总梯度;(d) 归一化磁源强度.

Fig. 5 Reduction to the pole anomaly and magnitude magnetic transforms of the total field magnetic anomaly in Fig. 3

(a) Reduction to the pole (RTP) anomaly; (b) Magnitude of the magnetic anomalous vector (T_a);

(c) Horizontal total gradient of the RTP anomaly; (d) Normalized source strength (NSS).

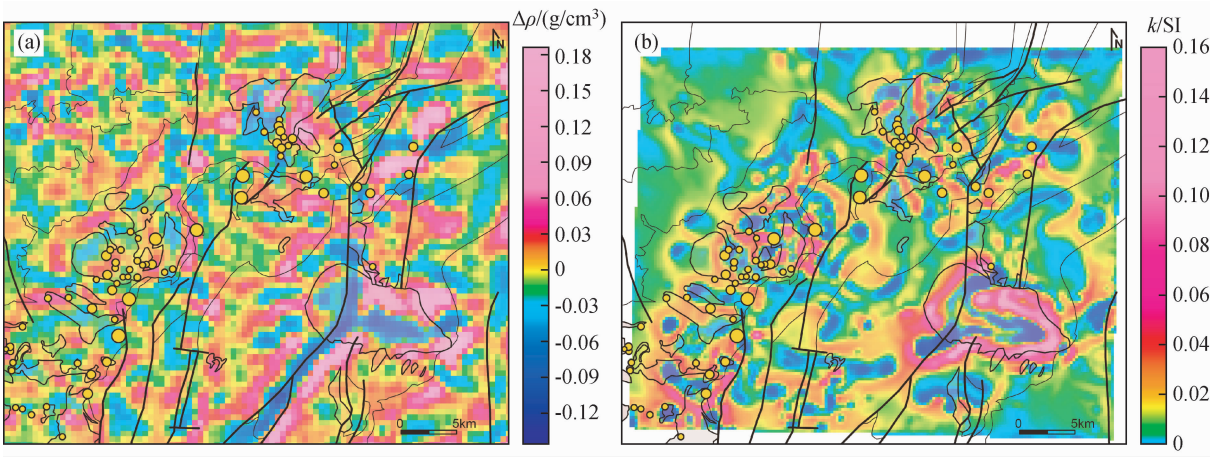


图 6　重磁数据三维反演所得剩余密度和磁化率分布图

(a) 750 m 深度剩余密度分布图;(b) 750 m 深度磁化率分布图.

Fig. 6　Density and susceptibility distributions respectively recovered from 3D inversion of residual gravity anomaly and T_a

(a) Density distribution at 750 m depth; (b) Susceptibility distribution at 750 m depth.

结果相较于单纯异常图件在分析场源特征方面更加直观的优势.

4　综合解释与远景区圈定

4.1　综合解释

化极磁异常和磁异常转换参量(如磁异常总模量、总梯度、归一化磁源强度等)的对比(图 5)可知,大多数局部磁异常具有较好的对应性,说明该地区强磁性体可能存在的强剩磁并未明显影响到磁性体的总磁化强度方向. 两个特殊区域中其一是研究区西部和北部的宽缓异常区,在化极磁异常表现为低缓正值,在磁异常模量中则为低值区. 其二是研究区西南角岩体部分在化极磁异常(图 5a)是负值区,赵卫东(2025)提到梯度带甚至负异常也是铁矿的有利产出部位. 但在磁异常模量图(图 5b)中上述化极负值区则为与其他岩体幅值相当的正值区,尤其该区域存在多个铁矿点. 因此相对与化极磁异常而言,磁异常转换参量和归一化磁源强度是更准确可靠的后续处理和解释用磁数据.

10 km 剩余重力异常(图 4a)已经基本去除了莫霍面起伏对于重力异常的影响,对于断裂和构造边界的刻画更加清晰,通过将重力异常剩余场与地质图所对比,可知该剩余重力异常低值区主要对应了断凹或花岗岩体,高值区则主要对应的是隐伏中性或闪长岩体,根据成矿条件,中基性岩与覆盖层接触带是较好的成矿位置,因而重力高值区和高低值转换带需要重点关注.

2 km 剩余重力异常(图 4b)则更适合与磁异常(图 5)进行对照,同时密度和等效磁化率分布(图 6)在上述异常对照过程中也具有非常直观的参考价值. 除了与成矿无关的低重低磁区外,根据 2 km 剩余重力异常和磁异常总模量等可将区域分成四个区域(图 7),分别是西部边缘和北部边缘的高重低磁区、奥陶系地层和相应岩体对应的高重高磁区、武安盆地高重高磁区,以及洪山岩体为主的异常复杂区. 其中洪山岩体内部为低重低磁区,外围部分是高重高磁区;武安盆地内部重力高值明显,磁异常模量整体高值但比较平缓,需结合化极磁异常和归一化磁源强度进行综合判别.

4.2　远景区圈定

岩体和铁矿相关的重力异常高、磁力异常高具有非常好的对应性. 值得注意的是,已知铁矿点位置大多并未处于重力异常和磁异常的最高值或其邻近区域,可知虽然磁铁矿的密度和磁化率远高于岩体,但受限于铁矿和岩体的规模差异,相关高值重力异常和高值磁异常更主要来自于岩体的贡献. 同时铁矿点主要在剩余重力异常和磁异常转换参量的高值区边界或高低值过渡区域的空间分布特征,与铁矿床多位于岩体和奥陶系地层的接触部位的地质认识,以及前人研究关于矿体位于一阶导数或梯度带上的结论(如田文法等,2010;李康和刁柳晨,2025)相吻合. 不过需要指出,有大量铁矿点虽然位于高值区边界或高低值过渡区域,但并未处于梯度信号的高值区(图 5c),可能说明此类铁矿点具有相对较大

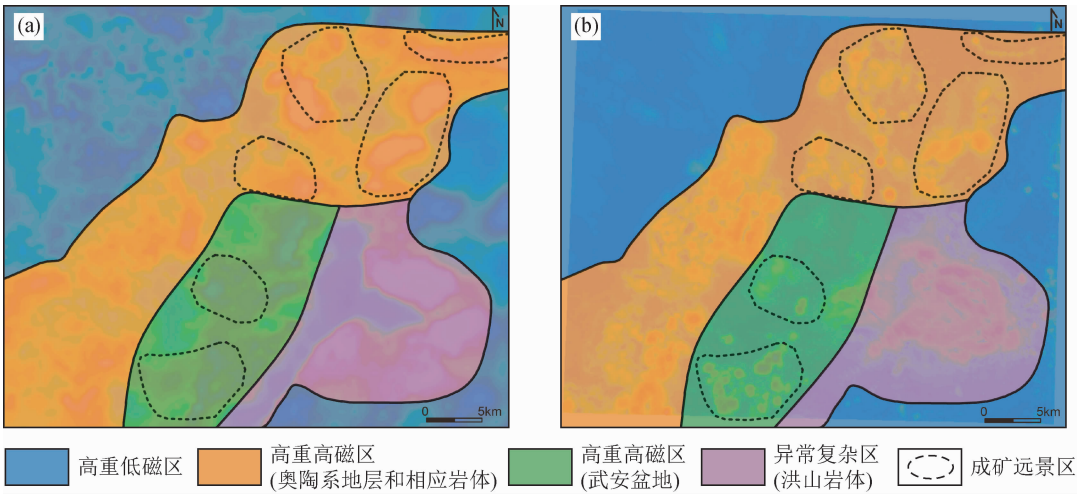


图 7 重磁异常分区图及成矿远景区圈定结果

(a) 剩余重力异常及分区图;(b) 归一化磁源强度及分区图.

Fig. 7 Map of gravity-magnetic anomaly zonation and results of iron ore prospective area delineation

(a) Maps and results based on the residual gravity anomaly; (b) Maps and results based on NSS anomaly.

的成矿深度.

综合而言,研究区内与岩体相关重力高且磁力高值区的边界或高低值转换区域是重点找矿远景区.综合剩余重力异常、化极磁异常、磁异常总模量和归一化磁源强度四种数据类型,以及密度和磁化率空间分布结果,本文依据此原则对成矿远景区进行了圈定.如图 7 所示,圈定区域均位于奥陶系地层和相应岩体对应的高重高磁区和武安盆地高重高磁区.对于前者,本次圈定没有包括其中已有较多已知矿点的区域,并不意味着此类区域不具备成矿远景,只是本次圈定主要聚焦于当前工作程度较低或已知矿点较少的区域.

对于武安盆地外围两个远景区,其西侧高重高磁区是主要的已知矿点分布区,东侧洪山岩体异常复杂区则几乎无矿点发现.目前地质资料显示研究区岩体由西向东存在岩性差异,同时也存在物质来源的不同,可能导致了不同区域成矿的差异性.那么武安盆地位处西侧有矿岩体和东侧目前无矿岩体中间,面临岩石性质和物质来源更倾向于哪一侧的问题.由于其大多处于隐伏状态,在重磁异常信号识别的基础上,需要获得更多资料来进行确定.

对于东侧洪山岩体及周缘区域,目前并未将其纳入远景区.但是重磁异常分析结果显示该地区是较为复杂的异常区,内部是低重高磁区,外围是高重高磁区,表明洪山岩体并不是单一成分或性质的岩体,而可能由多种岩性或形成机制的不同期次岩体组合而成.因而该区域仍然需要更多资料来支撑将其划入远景区以开展后续工作.

5 结 论

本文基于邯邢地区高分辨区域重力和航磁资料,采用针对性的处理方法和技术加以处理,并结合已知铁矿点位置信息获得了有利成矿位置的重磁数据分布特征,进而据此分布规律对研究区成矿远景区进行了圈定.在数据处理过程中,采用基于等效源的场源分离技术获取了针对不同场源深度范围的重力剩余场,10 km 以浅剩余重力异常对于断裂和构造边界的刻画更加清晰,2 km 以浅剩余重力异常反映的最浅层剩余密度分布则与成矿有关的岩体形态有更直接的联系.同时对比化极磁异常和多种磁异常转换参量可知,研究区内强剩磁在大多数区域并未明显影响磁异常的形态,然而在特定地区化极负异常区也存在多个铁矿点,结合相应区域磁异常总模量高值后更有助于增强对于场源磁性强弱的认识.综合重磁异常空间分布特征以及密度和磁化率成像结果,指出岩体和铁矿相关的重力异常高、磁力异常高具有非常好的对应性,且与岩体相关重力高且磁力高值区的边界或高低值转换区域是铁矿的有利成矿位置,并据此圈定了 6 个成矿远景区.其中 4 个位于奥陶系地层和相应岩体对应的高重高磁区,2 个位于武安盆地高重高磁区.此外,目前圈定结果主要依托于重力和磁法资料,后续仍需结合研究区地

质和其他地球物理、地球化学等资料进行后续综合推断和进一步优选.

致　谢　论文图件采用 GMT 绘制(Wessel *et al*., 2019),感谢所有为本文研究提供帮助的单位与个人,感谢论文审稿专家提出的修改意见.

References

Beiki M, Clark D A, Austin J R, *et al*. 2012. Estimating source location using normalized magnetic source strength calculated from magnetic gradient tensor data. Geophysics, 77(6): J23-J37, doi: 10.1190/geo2011-0437.1.

Chang Z G, Dong G C, Somarin A K. 2020. U-Pb dating and trace element composition of zircons from the Gujiao ore-bearing intrusion, Shanxi, China: implications for timing and mineralization of the Guojialiang iron skarn deposit. Minerals, 10(4): 316, doi: 10.3390/min10040316.

Chen B, Tian W, Jahn B M, *et al*. 2008. Zircon SHRIMP U-Pb ages and in-situ Hf isotopic analysis for the Mesozoic intrusions in South Taihang, North China craton: evidence for hybridization between mantle-derived magmas and crustal components. Lithos, 102(1-2): 118-137, doi: 10.1016/j.lithos.2007.06.012.

Clark D A. 2012. New methods for interpretation of magnetic vector and gradient tensor data I: eigenvector analysis and the normalised source strength. Exploration Geophysics, 43(4): 267-282, doi: 10.1071/EG12020.

Cui X L, Su S G, Meng W Y, *et al*. 2020. The mineralogical characteristics of amphiboles in monzonite porphyry from the Wuan area, Hebei Province and their indications for the genesis of the skarn iron deposit. Acta Petrologica Sinica (in Chinese), 36(7): 2215-2231, doi: 10.18654/1000-0569/2020.07.19.

Dampney C N G. 1969. The equivalent source technique. Geophysics, 34(1): 39-53, doi: 10.1190/1.1439996.

Dong R, Hu J, Wang S G, *et al*. 2024. Mineralogy and geochemistry of the pyrite from the Henghui skarn iron deposit in central North China craton: insights into cobalt mineralization. Ore Geology Reviews, 168: 106053, doi: 10.1016/j.oregeorev.2024.106053.

Fedi M, Florio G, Rapolla A. 1994. A method to estimate the total magnetization direction from a distortion analysis of magnetic anomalies. Geophysical Prospecting, 42(3): 261-274, doi: 10.1111/j.1365-2478.1994.tb00209.x.

Gerovska D, Stavrev P. 2006. Magnetic data analysis at low latitudes using magnitude transforms. Geophysical Prospecting, 54(1): 89-98, doi: 10.1111/j.1365-2478.2006.00518.x.

Gerovska D, Araúzo-Bravo M J, Stavrev P. 2009. Estimating the magnetization direction of sources from southeast Bulgaria through correlation between reduced-to-the-pole and total magnitude anomalies. Geophysical Prospecting, 57(4): 491-505, doi: 10.1111/j.1365-2478.2008.00761.x.

Han D M, Qiu Y Z, Xu Y, *et al*. 2014. Discussion on iron prospecting at depth of the Han-Xing type iron deposit in Han-Xing area, Hebei. Mineral Exploration (in Chinese), 5(3): 450-459.

Helbig K. 1963. Some integrals of magnetic anomalies and their relation to the parameters of the disturbing body. Zeitschrift für Geophysik, 29: 83-96.

Li D, Liang Q, Du J S, *et al*. 2020. Transforming total-field magnetic anomalies into three components using dual-layer equivalent sources. Geophysical Research Letters, 47(3): e2019GL084607, doi: 10.1029/2019GL084607.

Li K, Diao L C. 2025. Prospecting direction and key exploration technology of Hanxing-Type rich iron ore in southern Hebei province. Journal of Xingtai University (in Chinese), 40(4): 44-56.

Li S L, Li Y G. 2014. Inversion of magnetic anomaly on rugged observation surface in the presence of strong remanent magnetization. Geophysics, 79(2): J11-J19, doi: 10.1190/geo2013-0126.1.

Li Y G, Oldenburg D W. 1996. 3-D inversion of magnetic data. Geophysics, 61(2): 394-408, doi: 10.1190/1.1443968.

Li Y G, Oldenburg D W. 1998a. Separation of regional and residual magnetic field data. Geophysics, 63(2): 431-439, doi: 10.1190/1.1444343.

Li Y G, Oldenburg D W. 1998b. 3-D inversion of gravity data. Geophysics, 63(1): 109-119, doi: 10.1190/1.1444302.

Li Y G, Shearer S E, Haney M M, *et al*. 2010. Comprehensive approaches to 3D inversion of magnetic data affected by remanent magnetization. Geophysics, 75(1): L1-L11, doi: 10.1190/1.3294766.

Liang X, Wang F Y, Zhang J Q, *et al*. 2023. Contraints on petrogenesis and Fe fertility of intrusive complexes in the Han-Xing region, North China craton from apatite geochemistry. Minerals, 13(4): 469, doi: 10.3390/min13040469.

Liu S B, Chen C, Hu Z W. 2011. The application and characteristic of vertical first-order derivative of the total magnitude magnetic anomaly. Progress in Geophysics (in Chinese), 26(2): 647-653, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2011.02.033.

Luo Y, Wu M P. 2023. Reduction to the pole near the equator with a Fourier-domain equivalent dipole layer. Geophysics, 88(6): G115-G124, doi: 10.1190/geo2022-0672.1.

Ma J F, Hu Y L, Li R J. 2016. Skarn type iron ore ore-forming geological characteristics and genesis of review. Western Resources (in Chinese), (4): 21-23, doi: 10.16631/j.cnki.cn15-1331/p.2016.04.009.

Meng G X, Yan J Y, Lü Q T, *et al*. 2009. Application of deep detecting technology in Hanxing subtype iron deposits and an integrated prospecting model: a case study of Baijian iron deposit. Mineral Deposits (in Chinese), 28(4): 493-502, doi: 10.16111/j.0258-7106.2009.04.011.

Nabighian M N. 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section; its properties and use for automated anomaly interpretation. Geophysics, 37(3): 507-517, doi: 10.1190/1.1440276.

Nurindrawati F, Sun J J. 2020. Predicting magnetization directions using convolutional neural networks. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 125(10): e2020JB019675, doi: 10.1029/2020JB019675.

Phillips J D. 2005. Can we estimate total magnetization directions from aeromagnetic data using Helbig's integrals?. Earth, Planets and Space, 57(8): 681-689, doi: 10.1186/BF03351848.

Pilkington M, Beiki M. 2013. Mitigating remanent magnetization effects in magnetic data using the normalized source strength. Geophysics, 78(3): J25-J32, doi: 10.1190/geo2012-0225.1.

Qin C, Zhang J Q, Tang Y Y, *et al*. 2022. The evaluation of potential of iron mineralization in the Wu'An basin of the southern Hebei: evidences from mineralogical and chronological studies. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry (in Chinese), 41(6): 1193-1206, doi: 10.19658/j.issn.1007-2802.2022.41.043.

Roest W R, Verhoef J, Pilkington M. 1992. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. Geophysics, 57(1): 116-125, doi: 10.1190/1.1443174.

Roest W R, Pilkington M. 1993. Identifying remanent magnetization effects in magnetic data. Geophysics, 58(5): 653-659, doi: 10.1190/1.1443449.

Shearer S E. 2005. Three-dimensional inversion of magnetic data in the presence of remanent magnetization [Master's thesis]. Golden: Colorado School of Mines.

Shen J F, Santosh M, Li S R, *et al*. 2013. The Beiminghe skarn iron

deposit, eastern China: geochronology, isotope geochemistry and implications for the destruction of the North China Craton. Lithos, 156-159: 218-229, doi: 10.1016/j.lithos.2012.11.003.

Sun S D, Xu H R, Zhang Q S, *et al*. 2025. Estimation of magnetization directions using a sequential approach with inversion of normalized source strength and Bayesian Monte Carlo method. Geophysics, 90(4): G109-G127, doi: 10.1190/geo2024-0128.1.

Sun Y, Xiao L, Zhu D, *et al*. 2014. Geochemical, geochronological, and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on the petrogenesis of the Qicun intrusive complex from the Handan-Xingtai district: implications for the mechanism of lithospheric thinning of the North China Craton. Ore Geology Reviews, 57: 363-374, doi: 10.1016/j.oregeorev.2013.09.007.

Sun Y, Xiao L, Zhan Q Y, *et al*. 2015. Petrogenesis of the Kuangshancun and Hongshan intrusive complexes from the Handan-Xingtai district: implications for iron mineralization associated with Mesozoic magmatism in the North China Craton. Journal of Asian Earth Sciences, 113: 1162-1178, doi: 10.1016/j.jseaes.2015.08.003.

Sun Y, Wu T, Xiao L, *et al*. 2019a. Contrasting mineralogical-geochemical compositions of ore-bearing and ore-barren intrusive complexes in the Handan-Xingtai district, North China Craton: implications for the iron mineralization. Lithos, 350-351: 105244, doi: 10.1016/j.lithos.2019.105244.

Sun Y, Wu T, Xiao L, *et al*. 2019b. U-Pb ages, Hf-O isotopes and trace elements of zircons from the ore-bearing and ore-barren Adakitic rocks in the Handan-Xingtai district: implications for petrogenesis and iron mineralization. Ore Geology Reviews, 104: 14-25, doi: 10.1016/j.oregeorev.2018.10.010.

Tian W F, Hao J J, Yan J Y, *et al*. 2010. Application of synthetic geophysical methods to deep exploration of Hanxing-type iron deposit. Progress in Geophysics (in Chinese), 25(4): 1442-1452, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2010.04.036.

Wang T C, Liu S, Zuo B X, *et al*. 2022. Improved MAX-MIN method to estimate total magnetization direction using Wiener filtering. Geophysics, 87(6): G137-G156, doi: 10.1190/geo2022-0101.1.

Wang Y N, He Z Y, Bian K, *et al*. 2024. Tectonic controls on ore deposit exhumation and preservation: a case study of the Handan-Xingtai iron-skarn district. Geoscience Frontiers, 15(6): 101924, doi: 10.1016/j.gsf.2024.101924.

Wessel P, Luis J F, Uieda L, *et al*. 2019. The generic mapping tools version 6. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 20(11): 5556-5564, doi: 10.1029/2019GC008515.

Wilson H. 1985. Analysis of the magnetic gradient tensor. Victoria: Defence Research Establishment Pacific, 5-13.

Xie R K, Xiong S Q, Duan S L, *et al*. 2021. Estimating total magnetization direction of magnetic sources by using airborne vector magnetic data. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 64(9): 3368-3378, doi: 10.6038/cjg2021O0359.

Xu W L, Lin J Q. 1989. Petrogenesis of multiple igneous rock series, Han-Xing district, Hebei province, China. Journal of Changchun University of Earth Science (in Chinese), 19(2): 149-156, 186.

Zhang H D, Wang D Q, Liu J C, *et al*. 2019. Geology, geochronology, and fluid evolution of the Pingshun skarn iron deposit, southern Taihang Mountains. Arabian Journal of Geosciences, 12(16): 497, doi: 10.1007/s12517-019-4598-3.

Zhang J Q, Li S R, Santosh M, *et al*. 2015. Mineral chemistry of high-Mg diorites and skarn in the Han-Xing Iron deposits of South Taihang Mountains, China: constraints on mineralization process. Ore Geology Reviews, 64: 200-214, doi: 10.1016/j.oregeorev.2014.07.007.

Zhang J Q, Wang J Z, Li S R, *et al*. 2018. Genetic mineralogy analysis on the mineralization process of skarn iron deposit in Han-Xing area, southern Taihang mountains. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry (in Chinese), 37(2): 205-213, doi: 10.19658/j.issn.1007-2802.2018.37.023.

Zhang Y M, Xiong S Q, He T, *et al*. 2025. Reduction-to-the-pole, component and tensor conversion of surface magnetic anomalies at low latitudes based on the equivalent source method. Acta Geologica Sinica (in Chinese), 99(5): 1819-1831, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2024006.

Zhang Z C, Li H M, Li J W, *et al*. 2021. Geological settings and metallogenesis of high-grade iron deposits in China. Science China Earth Sciences, 64(5): 691-715, doi: 10.1007/s11430-020-9735-5.

Zhao B M, Liu Y B, Lin X X, *et al*. 2014. Geological and geophysical characteristics and prospecting direction of iron ore in Xingtai-Handan. Progress in Geophysics (in Chinese), 29(6): 2838-2842, doi: 10.6038/pg20140653.

Zhao S M, Wang J H, Kong L H. 2011. Albitization and mineralization mechanism of contact metasomatic iron ore (Skarns)-taking Han-Xing type iron ore as an example. Mineral Resources and Geology (in Chinese), 25(6): 491-494.

Zheng J M, Chen M H, Xu L G, *et al*. 2006. Characteristics of structurally controlled skarn iron deposits and prospecting targets in Handan-Xingtai area. Mineral Deposits (in Chinese), 25(S1): 115-118, doi: 10.16111/j.0258-7106.2006.s1.031.

Zhou L, Chen B. 2006. Petrogenesis and significance of the Hongshan syenitic pluton, South Taihang: zircon SHRIMP U-Pb age, chemical compositions and Sr-Nd isotopes. Progress in Natural Science, 16(2): 192-200, doi: 10.1080/10020070612331343213.

附中文参考文献

崔晓亮, 苏尚国, 孟维一, 等. 2020. 河北武安地区斑状角闪二长岩中角闪石矿物学特征及其对矽卡岩铁矿成因的指示. 岩石学报, 36(7): 2215-2231, doi: 10.18654/1000-0569/2020.07.19.

段文超, 赵兴考. 2010. 邯邢式铁矿特征及进一步找矿方向浅析. 硅谷, (3): 102.

韩冬梅, 邱迎芝, 徐颖, 等. 2014. 河北邯邢地区邯邢式铁矿深部找矿初探. 矿产勘查, 5(3): 450-459.

郝俊杰, 田文法, 莘建宏. 2010. 重磁综合方法在邯邢式铁矿找矿应用可行性分析. 矿床地质, 29(S1): 655-656.

李康, 刁柳晨. 2025. 冀南邯邢式富铁矿找矿方向及关键勘查技术. 邢台学院学报, 40(4): 44-56.

刘圣博, 陈超, 胡正旺. 2011. 磁异常模量垂向一阶导数的特征及应用. 地球物理学进展, 26(2): 647-653, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2011.02.033.

马健飞, 胡永亮, 李仁杰. 2016. 矽卡岩型铁矿的成矿地质特征及成因综述. 西部资源, (4): 21-23, doi: 10.16631/j.cnki.cn15-1331/p.2016.04.009.

孟贵祥, 严加永, 吕庆田, 等. 2009. 邯邢式铁矿深部探测技术及综合找矿模式研究——以河北省沙河市白涧铁矿床为例. 矿床地质, 28(4): 493-502, doi: 10.16111/j.0258-7106.2009.04.011.

秦超, 张聚全, 唐玉莹, 等. 2022. 冀南武安盆地铁成矿潜力评价——来自矿物学与年代学的证据. 矿物岩石地球化学通报, 41(6): 1193-1206, doi: 10.19658/j.issn.1007-2802.2022.41.043.

田文法, 郝俊杰, 严加永, 等. 2010. 综合地球物理方法在邯邢式铁矿深部找矿中的应用. 地球物理学进展, 25(4): 1442-1452, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2010.04.036.

谢汝宽, 熊盛青, 段树岭, 等. 2021. 基于航磁矢量数据的磁源总磁化方向估算. 地球物理学报, 64(9): 3368-3378, doi: 10.6038/cjg2021O0359.

许文良, 林景仟. 1989. 邯邢地区燕山期多重火成岩系的成因. 长春地质学院学报, 19(2): 149-156, 186.

张聚全, 王吉中, 李胜荣, 等. 2018. 南太行邯邢地区夕卡岩型铁矿成矿过程的成因矿物学解析. 矿物岩石地球化学通报, 37(2): 205-213, doi: 10.19658/j.issn.1007-2802.2018.37.023.

张义蜜, 熊盛青, 何涛, 等. 2025. 基于等效源法的低纬度地区曲面磁异常化极、分量及张量转换研究. 地质学报, 99(5): 1819-1831, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2024006.

张招崇, 李厚民, 李建威, 等. 2021. 我国铁矿成矿背景与富铁矿成矿机制. 中国科学: 地球科学, 51(6): 827-852, doi: 10.1007/s11430-020-9735-5.

赵百民, 刘永斌, 林晓星, 等. 2014. 邢台-邯郸地区铁矿地质、地球物理特征及找矿方向. 地球物理学进展, 29(6): 2838-2842, doi: 10.6038/pg20140653.

赵书梅, 王金河, 孔令海. 2011. 钠长石化与接触交代(矽卡岩)型铁矿成矿关系的探讨——邯邢式铁矿为例. 矿产与地质, 25(6): 491-494.

赵卫东. 2025. 综合物探方法在邯邢式铁矿勘探中的应用研究. 有机硅材料, 39(1): 93-94.

郑建民, 陈懋弘, 徐林刚, 等. 2006. 邯邢地区矽卡岩型铁矿构造控矿特征及找矿勘探方向. 矿床地质, 25(S1): 115-118, doi: 10.16111/j.0258-7106.2006.s1.031.