第 58 卷 第 3 期 2025 年 (总 241 期) Vol. 58 No. 3 2025(Sum241)



引文格式:刘隆,杜辉,唐小平,等.东天山红石岗南地区隐伏地质体磁异常特征及其找矿指示[J].西北地质,2025, 58(3):97-107. DOI: 10.12401/j.nwg.2024101

Citation: LIU Long, DU Hui, TANG Xiaoping, et al. Characteristics of Magnetic Anomalies and Geological Significance in the Southern Hongshigang Area of the Eastern Tianshan Mountains, China[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(3): 97–107. DOI: 10.12401/j.nwg.2024101

东天山红石岗南地区隐伏地质体磁异常 特征及其找矿指示

刘隆^{1,2},杜辉^{1,2,*},唐小平^{1,2},刘生荣^{1,2},王亚磊¹,荆德龙¹,李倩宇³

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心,陕西西安 710119;2. 中国地质调查局造山带地质研究中心, 陕西西安 710119;3. 浙江水利水电学院,浙江杭州 310018)

摘 要: 近些年, 金属矿产勘查重点逐渐向岩体未出露的覆盖区隐伏矿床转移, 但是在前期的调查工作中, 由于覆盖层较厚很难得到地下异常体信息。位于东天山铜镍成矿带的红石岗一带出露的镁铁-超镁铁质岩体显示了良好的找矿潜力, 1:5万航磁和重力资料显示其南部第四系覆盖区分布一高磁高重力套合异常, 目前对该异常尚未开展调查研究。因此本研究在红石岗南调查区进行了高精度地面磁测工作, 采用磁异常化极、垂向一阶导数、归一化总梯度法、二维剖面模拟和三维磁异常反演方法对该区域内隐伏异常体进行初步勘探研究, 发现调查区内存在的5处显著磁异常, 隐伏异常体的平均磁化率约6000×10⁻⁵ SI, 埋深约200~300m, 存在5个主要的小异常体, 走向为近SW-NE向, 岩层向北侧倾斜。结合地质资料和岩石物性判断, 该处异常体可能是镁铁-超镁铁质岩体, 且磁化率较高。同时, 利用磁异常指出与前人推断位置一致的近 SW-NE 向黄山-镜儿泉深大断层和调查区内的次级断裂, 可为铜镍矿床提供有利的成矿环境。因此, 红石岗南调查区的隐伏异常体存在较大的铜镍矿找矿潜力, 同时本研究为后续在该区域所开展的勘探工作, 提供了可信的地球物理资料。

关键词:磁法勘探;隐伏异常体;二维剖面模拟;三维反演;红石岗南

中图分类号: P631.2 文献标志码: A

码:A

文章编号:1009-6248(2025)03-0097-11

Characteristics of Magnetic Anomalies and Geological Significance in the Southern Hongshigang Area of the Eastern Tianshan Mountains, China

LIU Long^{1,2}, DU Hui^{1,2,*}, TANG Xiaoping^{1,2}, LIU Shengrong^{1,2}, WANG Yalei¹, JING Delong¹, LI Qianyu³

Xi'an Center of China Geological Survey/Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710119, Shaanxi, China;
Centre for Orogenic Belt Geology of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China;
Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, Zhejiang, China)

收稿日期: 2023-04-12; 修回日期: 2024-06-14; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目:中国地质调查局项目"西北地区区域地球物理调查"(DD20243470)、"天山-北山成矿带战略性矿产调查" (DD20240074),陕西省自然科学青年基金"含起伏地表模型2.5D逆时偏移成像及其在渭河盆地氦气勘探中的应用" (2202JQ-241)联合资助。

作者简介:刘隆(1996-), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事矿产地球物理研究。E-mail: liulongsio@163.com。

^{*}通讯作者: 杜辉(1987-), 男, 高级工程师, 主要从事重磁电等地球物理方法研究。E-mail: 296772098@qq.com。

Abstract: In recent years, the emphasis of metal mineral exploration has gradually shifted to the hidden deposits in the covered areas where the rock mass is not exposed. However, it is difficult to obtain the information of underground abnormal bodies in the early investigation work because of the thick overlying layer. The Mafic and ultramafic rock mass outlying in the Hongshigang area of the Eastern Tianshan Cu-Ni metallogenic belt shows good prospecting potential. The 1:50 000 aeromagnetic data and gravity data show that there is a high magnetic and high gravity coupling anomaly in the southern Quaternary covered area, which has not been investigated yet. Therefore, this study conducted high-precision ground magnetic survey work in the southern Hongshigang area and used magnetic anomaly reduced to the pole, vertical first derivative, normalized total gradient method, two-dimensional profile simulation, and three-dimensional magnetic anomaly inversion methods to conduct preliminary exploration and research on the underground anomalous bodies in the area. It was found that there are five significant magnetic anomalies in the investigation area, and the average magnetic susceptibility of the hidden anomalous bodies is about 6000×10^{-5} SI, with a depth of about 200-300 meters. There are five main small anomalous bodies, which strike nearly southwest-northeast and dip to the north. Combined with geological data and rock physical properties, the anomalous bodies in this area may be mafic and ultramafic rock bodies with high magnetic susceptibility. Magnetic anomalies are used to indicate the Huangshan-Jingerquan faults in the southwest-northeast direction which are consistent with the inferred position of predecessors and the secondary fault in the investigated area, which could provide a favorable metallogenic environment for copper-nickel deposits. Therefore, the underground anomalous bodies in the southern Hongshigang area have great prospecting potential for copper-nickel deposits, and this study provides reliable geophysical data for subsequent exploration work in the area.

Keywords: magnetic prospecting; underground anomalous bodies; two-dimensional profile simulation; three-dimensional inversion; southern Hongshigang

新疆东天山铜镍成矿带是中国重要的铜镍矿集 区(Feng et al., 2018; 师震等, 2019), 分布有香山、黄山、 图拉尔根、葫芦等多个铜镍硫化物矿床,其空间分布 可划分为两个带,分别受康古尔大断裂和黄山大断裂 控制。位于黄山东至图拉尔根成矿带之间的浅覆盖 区,是黄山断裂成矿带之间的空白区,成矿潜力巨大。 新疆地矿局物化探大队、中国国土资源航空物探遥感 中心、中国地质调查局西安地质调查中心等单位在该 区域开展过1:5万综合物化探调查和1:5万、 1:20万重力、航磁调查以及1:5万矿产地质调查等。 新疆地质矿产勘查开发局第六地质大队根据区域航 空磁测成果,在大黄山浅覆盖区发现多个航磁异常, 利用综合物探方法推测出类似黄山东的基性-超基性 岩体,并在钻孔中发现了含铜镍矿超基性岩体,初步 估算矿体规模达到中型。尽管取得了一定的进展,但 是该区域依然存在很大的找矿潜力,因此依据大黄山 的找矿成果,对大黄山一带浅覆盖区内的物探异常进 行筛选,发现红石岗南区域存在1:5万航磁异常与 重力异常套合较好,同时前人研究表明,该浅覆盖区

域北侧的红石岗岩体具有形成铜镍硫化物矿床的潜力 (王志福等,2012;王亚磊等,2017;Feng et al.,2018),目 前对红石岗南区域调查研究程度不高,该区存在大规 模第四系覆盖,无岩体出露,1:5万航磁数据表明在 该区的负异常背景场上叠加少量局部正磁异常,异常 形态多呈椭圆状,磁异常幅值较小,因此很难评估该 区域存在的隐伏异常体,难以对其成矿潜力进行评价。 因此,笔者在附近区域矿床及岩体研究的基础上,开 展高精度地面磁测,对该调查区磁异常数据采用磁异 常化极、垂向一阶导数、归一化总梯度法、二维剖面 模拟和三维磁异常反演方法进行研究,实现对区内隐 伏异常体和断裂构造的初步勘探研究,确定了异常体 的数量、磁化强度、埋深、产状要素、规模及断裂构造 的位置,为探测隐伏异常体和后续在该区域所开展的 勘探工作,提供了可信的地球物理依据和勘查实例。

1 区域地质和地球物理背景

东天山红石岗南调查区位于新疆维吾尔自治区

哈密市东南约160km,整体上大地构造位于准噶尔洋 壳板块与塔里木陆壳板块的聚合处,中天山隆起和吐 哈盆地之间(王亚磊等, 2017),区内地层出露主要以 泥盆系和石炭系为主,少量奥陶系、志留系和侏罗系 (Xiao et al., 2017)。红石岗南调查区在康古尔-黄山 韧性剪切带内(宫辰, 2020),处于东天山铜镍成矿带 东段,附近存在多处铜镍矿床,如图拉尔根、葫芦、黄 山、黄山东、香山铜镍矿等,红石岗镁铁--超镁铁质岩 体位于土墩-镜儿泉断裂和黄山-镜儿泉断裂之间,而 红石岗南调查区位于黄山-镜儿泉断裂以南,整体处 于镜儿泉矿集区(图 la)。在黄山-康古尔断裂的北部, 主要岩层为梧桐窝子组深灰色-灰绿色的海相喷发岩, 而南侧则出露干墩组深灰-灰黑色浅变质的硅质岩、 泥质岩等。区内铜镍矿和镁铁--超镁铁质岩体主要分 布于这两套地层中(王志福等, 2012)。调查区内侵入 岩以花岗岩类为主,镁铁-超镁铁质岩为辅,镁铁-超 镁铁质岩主要为晚石炭世--早二叠世(王亚磊等, 2017),铜镍矿床也主要赋存于这些岩体中,整体呈 SW—NE向分布,年代学研究表明矿集区内铜镍硫化 物矿床均形成于早二叠世(韩宝福等, 2004; Mao et al., 2016; 师震等, 2019)。

区域航磁调查成果显示(图 1b)黄山-镜儿泉断裂 以北存在诸多正磁异常,异常幅值大于 200 nT,其中 位于黄山和香山附近,夹于土墩-镜儿泉断裂和黄山-镜儿泉断裂的区域存在一片高磁区域,异常最强处幅 值高于 800 nT。该区域存在的矿床普遍位于土墩-镜 儿泉断裂和黄山-镜儿泉断裂附近,矿床附近区域磁 异常整体小于 200 nT。雅满苏断裂形成连续的串珠 状磁异常(图 1b), 而雅满苏断裂以北, 大范围新生代 沉积物覆盖区,磁异常很低。南侧中北天山北缘断裂 东北部存在条带状高磁异常带,异常幅值高于200 nT。 红石岗南调查区附近磁异常相对香山和黄山区域整体 较弱(图 1b~图 1c),磁异常呈扁椭圆状,长轴方向约 40°,长约8 km,宽约4 km,异常值140~250 nT,极大 值 282 nT, 北侧伴生似圆形正磁异常, 长约 3.5 km, 异 常极大值约 252 nT(图 1c)。整个调查区对应在高重 力和低重力异常之间的梯度带上,等值线呈密集束状, 梯度变化率 4.4 mGal/km(图 1d)。



图1 东天山地区主要铜镍矿床及镁铁-超镁铁岩体分布图(a)(据 Mao et al., 2014 修改);东天山地区航磁异常图(b); 红石岗南地区航磁异常图(c)和 红石岗南地区布格重力异常图(d)

Fig. 1 (a) The distribution map of important copper-nickel deposits and mafic-ultramafic intrusion in the Eastern Tianshan Mountains;
(b) Aeromagnetic anomaly map of the Eastern Tianshan Mountains;
(c) Aeromagnetic anomaly map of the southern Hongshigang area;
(d) Bouguer gravity anomaly map of the southern Hongshigang area

整个红石岗南调查区表层覆盖新生代沉积物 (图 la),沉积层较厚,地形平缓,受控于区域性主干断 裂带所派生的次级断裂或裂隙系统,可能为镁铁--超 镁铁质岩浆的就位与成矿提供了良好的导矿和储矿 空间(王亚磊等,2017)。由于岩浆活动是矿产形成的 关键性因素之一(杨大欢等,2021;肖丹等,2022),因 此红石岗南调查区可能会存在铜镍硫化物矿床赋存 于镁铁-超镁铁质岩体中。

2 岩矿石磁性特征

由于调查区内覆盖层较厚,且针对该区域还未开 展任何钻探工作,因此需要使用调查区附近岩石样品 的磁性数据参考,根据前人的研究,区内岩石出露的 主要岩石类型为闪长岩、辉长岩和苏长岩等(王亚磊 等,2017;师震等,2019),因此统计了附近铜镍矿床岩 石标本的体积磁化率、剩磁和Q比(图2,表1),其中 Q 比 是 柯 尼 希 斯 贝 格 比 (Koenigsberger ratio, Q 比) (Koenigsberger, 1938), 是剩余磁化和感应磁化的比值, $Q = M_R/M_i = \text{NRM}[A/m]/\kappa[SI] \times H[A/m], 其中 M_R 表示$ 剩余磁化, Mi表示感应磁化, NRM 是自然剩余磁化强 度(Natural remanent magnetization), *k*是岩石样品的磁 化率,H是当地地磁场强度,在文中计算时使用的地 磁场强度为 45.68 A/m (57 406.2 nT)。 O 比大于 1 表 明磁异常场主要是由剩余磁化引起, Q比小于1主要 是由感应磁化引起,Q比等于1表明感应磁化和剩余 磁化起同样的作用。一般而言,大陆喷出岩具有较高 的Q比(Parkinson et al., 1985),但具有商业价值的铁

矿床几乎都具有低 Q 比(Jahren, 1965)。虽然这些统 计数据并不能代表所有岩性单元的真实值,但根据区 内标本的实测值可以为磁异常的正反演提供有效的 约束。



a.数据来自于王庆功(2021); b.数据来自于王成(2018); c.数据 来自于邵行来(2012); d.数据来自于惠卫东等(2011); e.数据来 自于乔天成(2016)

图2 岩矿石磁性能图

Fig. 2 Magnetic properties of rock and ore

统计结果表明(图 2),该区域的岩矿石磁化率的 常见值处于 10¹×10⁻⁵~10⁵×10⁻⁵ SI,剩磁常见值则为 10¹× 10⁻³~10⁵×10⁻³ A/m。橄榄岩、矿化岩石和铜镍矿石普遍 具有高磁化率和高剩磁,与围岩存在显著的磁性差异 (图 2),和矿化有关的这些岩石磁化率高于 10³×10⁻⁵ SI, 绝大多数样品的 Q 比小于 1,这表明在矿化区域,岩矿 石的感应磁化可能主导着区域磁异常。而调查区附

表 1 区域岩矿石磁性范围统计表 Tab. 1 Statistical table of magnetic range of rock and ore

			-	-
岩石类型	磁化率(10 ⁻⁵ SI)	剩磁(10 ⁻³ A/m)	<i>Q</i> 比	备注
区域变质岩	14~72	13~25	0.4~3.91	包括变粒岩、片岩等
沉积岩	$50 \sim 101$	$50 \sim 100$	1.10~4.44	包括砂岩、粉砂岩
花岗岩	19~50	$10\!\sim\!50$	1.15~2.22	图拉尔根、黄山东样品
闪长岩	12~458	11~150	$0.17 \sim 2.22$	图拉尔根、图拉尔根钻孔、黄山东样品
凝灰岩	$40 \sim 290$	11~50	0.15~2.22	图拉尔根、图拉尔根钻孔、黄山东样品
辉长岩	91~165	$14 \sim 150$	$0.29\!\sim\!2.02$	图拉尔根钻孔、黄山东样品
辉石岩	37~806	11~226	$0.29 \sim 0.65$	图拉尔根钻孔样品
橄榄岩	$2160\!\sim\!3610$	196~792	$0.20 \sim 0.45$	黄山东、图拉尔根岩心、土墩井中、黄山井中样品
矿化橄榄岩	$7470{\sim}17800$	$1290\!\sim\!12200$	0.13~1.91	黄山东、土墩井中、黄山井中样品
铜镍矿石	$3560\!\sim\!18800$	417~7910	0.23~1.88	图拉尔根岩心样品

近的区域变质岩、沉积岩和花岗岩的磁性偏弱(图 2, 表 1),闪长岩、凝灰岩、辉长岩和辉石岩稍强,但磁化 率整体小于 10³×10⁻⁵ SI, 剩磁强度小于 300×10⁻³ A/m。 该区域所有岩矿石的 Q 比处于 0.1~10之间,大部分 样品的 Q 比小于 1(图 2),这表明该区域的围岩磁性 可能也是由感应磁化主导的,当然 Q 比也与岩矿石中 的磁性矿物的浓度和粒度有关(刘隆等, 2021),需要 进一步研究。因此,根据图 2 和表 1 的结果,含矿超 基性岩体的磁化率普遍大于6 000×10⁻⁵ SI,因此在后续 二维剖面模拟和三维反演中,假设异常体平均磁化率 为 6 000×10⁻⁵ SI 进行物性约束。

3 数据采集与处理

2022年由中国地质调查局西安地质调查中心在 红石岗南调查区(图 1)进行了 100 m×40 m 网格的地 面高精度磁测,测区约 80 km²。数据采集和处理流程 见图 3,在获得地磁场总强度 T后,通过日变改正和基 于国际地磁参考场 IGRF13th模型(Wardinski et al., 2020)的正常场改正(IGRF改正)之后得到地磁场异 常 ΔT ,整个调查区的研究区总磁场强度、磁倾角和磁 偏角的平均值分别为 57 335.79 nT、63.56°和-0.35°,磁 测总精度为 2.44 nT。 对磁异常数据进行化极处理,以消除斜磁化影响 (Baranov, 1957; 骆遥, 2013),并进行垂向一阶导数计 算,更好地确定磁性体边界。而为了确定异常体的场 源信息,对化极后的磁异常数据剖面进行归一化总梯 度法计算。归一化总梯度法通过在跨越磁场源的截 面上构造一个特殊变换的场(总归一化梯度),使其可 以用来探测源位置(Elysseieva, 2019)。另一方面,为 了估算到异常体的深度并圈定异常体形态,使用了 Geosoft 公司的 Oasis Montaj 软件中的 2D GM-SYS 建 模模块,创建一个假设的地质模型,并计算磁响应 (Ran et al., 2017; Ekwok et al., 2019, 2022)。用于建模 的两条剖面 A'-A 和 B'-B 数据来源于原始磁异常剖 面数据,剖面走向分别为 315°和 334°,模拟中使用真 实地形数据,观测高度为实际仪器高度,约2 m。

最后进行三维反演和可视化, 在本研究中为了解 决正则化平滑反演难以揭示真实的地质情况, 模糊的 边界不能很好地反映地质结构(Vanzon, 2006; Sun, 2014; Utsugi, 2019)和平滑度反演通常会低估恢复的 磁化率的值(Sun, 2015)的情况, 所以采取稀疏范式的 三维反演方法(Meng, 2018)。在正则化中使用混合*L*_p 范数解决反演问题。利用迭代重加权最小二乘法(Iterative Reweighted Least Square, IRLS)进行离散和评估, 改写最小的模型组分, 通过有限差分算子代替梯度项



图3 数据处理过程和研究思路

Fig. 3 Data processing process and research ideas

等步骤,得到最终的正则化函数。 L_p 范数正则化是高 度非线性的,随着迭代过程的进行和阈值趋近于0,正 则化函数的重点关注模型值的范围,直到迭代持续到 算法达到预定义的收敛标准。开源框架 SimPEG (Cockett et al., 2015)已实现混合 L_p 范数反演,本研究 中的三维模型反演工作均在 SimPEG 中进行,反演中 使用地形数据为真实地形数据。

通过对磁异常数据的处理、二维剖面模拟、三维 反演及可视化,可以确定异常体的数量、磁化强度、 埋深、产状要素等。进一步结合区域地质资料和物性 资料,判断异常体的岩性、规模和形态等(图 3)。

4 结果

4.1 平面磁异常解释

原始磁异常等值线图表现磁异常带总体呈现近

SW-NE 走向, 异常中心存在高值, 可达 220 nT, 异常 高值呈条带状(图 4a),主要异常位于调查区南侧,呈 现近 SW-NE 走向。化极后磁异常形态突出, 圈定了 5个主要的磁异常(图 4b)。C-1 异常位于红石岗南调 查区西部,整体异常幅值较小,幅值约210nT,呈现近 SW-NE 走向,为条带状正磁异常(图 4b)。因此该处 异常体为近 SW-NE 走向, 北侧等值线下降较缓慢, 因 此异常体埋藏可能较深并北倾。C-2异常是整个调查 区的主要异常,位于调查区中心,呈现近 SW-NE 走向, 椭圆状正磁异常,异常幅值约为160 nT(图4b),因此 异常体为近 SW-NE 走向。通过对等值线异常分析, 其正值范围很大,西北侧等值线下降缓慢,而东南侧 下降很快,表明异常体向西北侧倾斜且埋藏很深。C-3异常位于调查区北部,为圆状正磁异常,幅值约160nT (图 4b)。C-4 异常则处于调查区东北部, 异常整体走 向为近 SW-NE 走向, 异常幅值约 110 nT, 东北侧等值



图4 调查区原始磁异常平面等值线图(a)、调查区磁异常化极平面等值线图(b)、调查区化极磁异常垂向一阶导数(c)和 剖面 A'-A 和 B'-B 的磁异常归一化总梯度计算结果(d)

Fig. 4 (a) Contour map of the RTP magnetic anomaly in the survey area (b) Contour map of the RTP magnetic anomaly in the survey area (c) The first vertical derivative of the RTP magnetic anomaly in the survey area and (d) Normalized total gradient of magnetic anomalies for profiles A'-A and B'-B

线下降缓慢,而西南侧下降很快并出现较低值,表明 异常体向东北侧倾斜且埋藏很深(图4b)。C-5 异常幅 值与C-4 异常接近,但异常等值线西侧等值线下降缓 慢,而东北侧下降很快并出现较低值,所以异常体可 能向西侧倾斜(图4b)。同时化极磁异常显示在调查 区北侧和南侧存在串珠状磁异常,与存在的断裂构造 相关,其中北侧异常走向为SW-NE(图4b~图4c),垂 向一阶导数更清晰地展示了该处异常(图4c蓝色箭头 所指推测断层),可能是黄山-镜儿泉断裂。南部异常 (图4c紫色箭头所指推测断层)走向一致,可能为区 内的次级断裂。垂向一阶导数结果也显示出其他5 个异常体的顶面局部隆起处的地质边界(图4c)。

选取的红石岗南调查区磁异常数据两条剖面 A'-A和 B'-B(图 4a显示剖面位置)应用归一化总梯度法进行计算,极值最大值对应的深度和埋藏异常体的中心深度相关。从图 4d 的结果来看穿越 C-1 异常体的剖面 A'-A下方异常中心深度约 200 m, C-1 异常体中心对应的埋藏深度可达 200 m, 穿越 C-2 异常体的剖面 B'-B下方异常深度与剖面 A'-A类似,因此 C-2异常体埋藏深度可达 200~300 m, 但规模大于 C-1 异常体

4.2 二维剖面模拟和三维反演模型的地球物理解译

进行二维剖面模拟的两条剖面 A'-A 和 B'-B 沿

着 ES-WN 方向(图 4a),贯穿调查区西侧 C-1 异常体 和中心地区 C-2 异常体,剖面走向分别为 315°和 334° (图 4f),模拟误差均小于 2.62 nT(图 5)。在跨越 C-1 异常体的剖面 A'-A 观察到一个规模相对较小的磁性 异常体,由于上层新生代沉积物覆盖层的磁性接近 0, 背景磁化率设置为 1× 10⁻⁵ SI,剖面 A'-A 的磁异常主 要来源于 C-1 异常体。C-1 异常幅值较小,假设异常 体磁化率为 6 000 × 10⁻⁵ SI,得到的二维总磁强度模型 显示在约 240 m 的深度存在约 120 m 厚度的异常体 (图 5a)。而穿越 C-2 异常体的剖面 B'-B 观察到一个 规模较大的磁性异常体,假设异常体磁化率为 6 000 × 10⁻⁵ SI 时,获得的二维总磁强度模型显示在约 280 m 的深度存在约 160 m 厚度的异常体(图 5b)。二维剖 面模拟的结果与归一化总梯度法确定的场源深度基 本是一致的。

三维反演模型和可视化处理更好地揭示了隐伏 异常体的形态特征和分布规律(图 6),恢复的观测数 据(图 6a)和实际数据拟合的很好(图 4a)。在红石岗 南调查区,三维反演异常体的最大磁化率为10000× 10⁻⁵ SI,假设剩余磁化与当前地磁场方向一致时,将剩 余磁化强度转换为磁化率,根据图 2 中磁性强度最强 的矿化样品计算,该区域样品磁化率最大值为17000× 10⁻⁵ SI,反演恢复的磁化率结果在这个范围内,因此是



图5 剖面 A'-A 和 B'-B 的二维总磁强度模型

Fig. 5 The two-dimensional total magnetic intensity model of profiles A-A' and B'-B



图6 三维反演恢复的磁异常(a)、三维反演磁化率模型 200 m 深度(海拔高度 1 180 m)切片(b)、三维反演磁化率模型 264 m 深度(海拔高度 1 116 m)切片(c)和红石岗南调查区隐伏异常体三维可视化图像,显示阈值 0.06 SI(d)

Fig. 6 (a) Prediction of magnetic anomalies, (b) 200 m depth (Altitude 1 180 m) slice of 3D inversion susceptibility model, (c) 264 m depth (Altitude 1 116 m) slice of 3D inversion susceptibility model and (d) Three-dimensional visualization image showed a threshold value of 0.06 SI of the underground anomalous body in the southern Hongshigang area

可信的。通过反距离插值法对反演结果进行处理,生 成三维可视化模型(图 6b~图 6d)。可观察到异常体 走向为近 SW-NE向(图 6b~图 6d),存在 5 个主要的 异常体,异常体磁化率接近 6 000 × 10⁻⁵ SI,主要分布 在红石岗南调查区中部和北部,形态接近长轴圆柱体, 中部为调查区最大异常体(即 C-2 异常体),北部存在 多个较小的异常体,异常体整体向北倾,埋深可能位 于新生代沉积覆盖层之下,约 200~300 m。

需要注意的是,反演时模型区域进行适当的扩大 以减小边界效应,对反演数据进行补空,边界处未出 现畸变(图 6b~图 6d),但反演结果垂向分辨率有待提 高,存在一定的细节缺失。整体上,多种方法分析磁 异常的结果对调查区隐伏异常体的水平和垂直位置 限定相一致。

5 找矿潜力分析

通过在红石岗南调查区开展的地面高精度磁测, 并利用磁异常化极、归一化总梯度法、二维剖面模拟、 三维磁异常反演确定了红石岗南调查区异常体的数 量、磁化强度、埋深、产状要素及规模。化极数据显 示存在5个正磁异常,走向普遍为近SW-NE向,异常 体向东北侧倾斜且埋藏很深(图4a、图4b),北部和南 部的串珠状异常指示调查区内存在两条近SW-NE向的断裂(图4b、图4c),其中北部为前人推断的黄 山-镜儿泉断裂,南部为调查区内的次级断裂(图4c)。 利用归一化总梯度法确定了异常体的埋深可能达到200~300 m(图 4d),二维模拟和三维可视化模型进一步对异常体的形态进行了精细刻画,异常体平均磁化率值约 6000 × 10⁻⁵ SI,走向主要为近 SW-NE 向并向北侧倾斜。

在对红石岗南异常体的岩性进行判断时,需要考 虑该区域存在大规模新生代沉积物的覆盖,根据对北 山裂谷带梧桐窝子组、甘泉组沉积物(He et al., 2021) 和黄山-镜儿泉侏罗系煤窑沟群底砾岩(邵行来, 2012a) 的磁性测试,其磁化率平均值小于100×10⁻⁵ SI,几乎 没有磁性。因此,红石岗南调查区的异常体与新生代 沉积物和石炭统沉积岩无关。尽管该区域存在泥盆 统火山岩,但除泥盆系下统大南湖组第四亚组凝灰岩、 中基性火山凝灰岩显著高值(13000×10⁻⁵SI)外,泥盆 系下统大南湖组的凝灰岩、火山角砾、粉砂岩大部分 磁化率为 100 × 10⁻⁵ SI 和 1 000 × 10⁻⁵ SI 量级, 且此区 域范围内泥盆统火山岩主要出露在土墩-镜儿泉断裂 以北(图 1b), 所以红石岗北和红石岗的磁性异常体不 是泥盆统火山岩。因此在红石岗区域异常体可能与闪 长岩、花岗岩类及镁铁~超镁铁质岩体相关(图 1b)。 根据表1的统计结果,图拉尔根和黄山东的闪长岩 的磁化率为 12× 10⁻⁵~458 × 10⁻⁵ SI, 剩磁量级为 11× 10⁻³~150×10⁻³ A/m, 远小于二维模拟和三维反演得 到的异常体平均磁化率 6000 × 10⁻⁵ SI。而花岗岩类 的磁化率为 19× 10⁻⁵~50× 10⁻⁵ SI, 剩磁量级为 10× $10^{-3} \sim 50 \times 10^{-3}$ A/m(表 1), 也远小于异常体平均磁化 率6000×10⁻⁵ SI,东天山成矿带其他区域的闪长岩和 花岗岩类也存在类似的磁性(邵行来等, 2010; 刘璎等, 2011; 惠卫东等, 2011, 2012; Xiao, 2017; 吴功成, 2018; 侯朝勇等, 2021)。因此, 红石岗南调查区的异常体不 是闪长岩和花岗岩类。

根据表 1 的结果, 橄榄岩和矿化样品具有显著的 高磁化率和剩磁值, 结合区域地质情况, 推测红石岗南 调查区的隐伏异常体可能是镁铁-超镁铁质岩体, 其平 均磁化率约为 6 000 × 10⁻⁵ SI, 该区域新生代沉积物覆 盖层厚度约 50~140 m, 下石炭统沉积岩厚度较大(李 形泰, 2011), 岩体埋深约 200~300 m, 走向主要为近 SW—NE向, 岩层向北侧倾斜。同时前人推断黄山-镜 儿泉断裂通过红石岗南调查区(图 1b), 化极磁异常和 垂向一阶导数的结果(图 4b、图 4c)指示了黄山-镜儿 泉断裂走向一致的次级断裂(图 4c)。区域断裂构造 意味着在基底内的薄弱地带,其为侵入体创造了侵入 条件,超镁铁质岩等岩石的侵入对于矿床形成具有重 要的控制作用,当超镁铁质岩侵入到地下时,其高温和 高压作用会促进地下矿物的熔融和矿床的形成,同时 改变地下流体的成分和运移路径,影响矿床的分布 (Yurichev,2017;石煜等,2022),已在黄山-镜儿泉断裂 带上发现多个铜镍矿床(图 1a)。因此,在红石岗南地 区可能存在镁铁-超镁铁岩和岩浆对中泥盆统火山岩 和石炭统沉积岩(图 1b)地广泛入侵,源区由岩石圈地 幔和软流圈地幔组成,岩浆入侵期间遭受地壳物质的 混染(王亚磊等,2017;师震等,2019)。而侵位于干墩 组的镁铁-超镁铁质岩体普遍规模较大,且含矿性较好 (尹希文,2015;宋谢炎等,2022),因此,红石岗南调查 区存在的超镁铁质岩体具有较好的找矿潜力。

6 结论

(1)通过高精度地面磁测和磁异常处理,在红石 岗南调查区识别出 5 个磁性隐伏异常体,平均磁化率 约 6000×10⁻⁵ SI, 埋深约 200~300 m, 呈 SW-NE 走向 且向北倾斜,表明存在高磁性地质体空间展布特征。

(2)调查区中心发育 C-2 磁异常体, 埋藏于浅覆 盖层下方, 厚度约 160 m, 与南部推测断层接触, 结合 三维反演结果揭示其可能为镁铁--超镁铁质岩体, 与 区域铜镍矿成矿岩体属性相符。

(3)新推断的两处断层走向与区域大构造协调一 致,揭示了黄山东-图拉尔根成矿带浅覆盖区的深部 构造格架,断层系统为岩浆通道形成和物质运移提供 了有利构造条件。

(4)异常体高磁化率特征与断层构造空间耦合关 系表明,该区域具备基性-超基性岩型铜镍矿床的成 矿地质条件,建议针对隐伏岩体与断层交汇部位开展 深部找矿验证。

致谢:感谢各位审稿专家提出的宝贵意见!

参考文献(References):

- 宫辰.哈密红石岗铜镍矿矿床地质特征及找矿前景[J].中国金 属通报,2020(21):49-50.
- GONG Chen. Geological characteristics and prospecting potential of the Hongshigang copper-nickel deposit in Hami, Xinjiang[J]. China Metal Bulletin, 2020(21): 49–50.

韩宝福,季建清,宋彪,等.新疆喀拉通克和黄山东含铜镍矿镁

铁-超镁铁杂岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意 义[J]. 科学通报, 2004, 49(22): 2324-2328.

- HAN Baofu, JI Jianqing, SONG Biao, et al. SHRIMP zircon U-Pb ages and geological significance of the Kalatongke and Huangshandong Cu-Ni-bearing mafic-ultramafic complexes in Xinjiang[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(22): 2324–2328.
- 侯朝勇,蔡厚安,裴森龙.综合物化探方法在新疆哈密月牙湾铜镍 矿勘查中的应用[J].矿产与地质,2021,35(6):1116-1123.
- HOU Chaoyong, CAI Houan, PEI Senlong. Application of comprehensive geophysical and geochemical methods in the exploration of Yueyawan copper nickel deposit in Hami, Xinjiang[J]. Mineral Resources and Geology, 2021, 35(6): 1116–1123.
- 惠卫东,赵鹏大,秦克章,等.东天山图拉尔根铜镍硫化物矿床 综合信息找矿模型的应用[J].地质与勘探,2011,47(3): 388-399.
- HUI Weidong, ZHAO Pengda, QIN Kezhang, et al. Application of comprehensive information to exploration of the Tulargen Cu-Ni sulfide deposit in Eastern Tianshan, Xinjiang[J]. Geology and Exploration, 2011, 47(3): 388–399.
- 李彤泰.新疆哈密市黄山基性-超基性岩带铜镍矿床地质特征 及矿床成因[J].西北地质,2011,44(1):54-60.
- LI Tongtai. Geological Features and Metallogenesis of Cu-Ni Deposit in Basic-to-Ultrabasic Zone of Huangshan, Hami Area[J]. Northwestern Geology, 2011, 44(1): 54–60.
- 刘璎, 孟贵祥, 严加永, 等. 重磁 3D 物性反演技术在金属矿勘探 中的应用[J]. 地质与勘探, 2011, 47(3): 448-455.
- LIU Ying, MENG Guixiang, YAN Jiayong, et al. Application of 3D property inversion for gravity and magnetic data to metal mineral exploration[J]. Geology and Exploration, 2011, 47(3): 448–455.
- 刘隆,周建平,吴涛,等.大洋中脊玄武岩磁性特征[J].地球物 理学进展,2021,36(5):1880-1890.
- LIU Long, ZHOU Jianping, WU Tao, et al. Magnetic characteristics of basalt on mid-ocean ridge[J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(5): 1880–1890.
- 骆遥. Hartley 变换化极 [J]. 地球物理学报, 2013, 56(9): 3163-3172.
- LUO Yao. Hartley transform for reduction to the pole[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(9): 3163–3172.
- 乔天成.高精度磁法在铜镍多金属矿普查工作中的应用[J].新 疆有色金属,2016,39(1):36-39.
- QIAO Tiancheng. Application of high-precision magnetic method in the prospecting of Cu-Ni polymetallic deposits[J]. Xinjiang Youse Jinshu, 2016, 39(1): 36–39.
- 邵行来.东天山黄山—镜儿泉超镁铁岩带地球物理特征研究及 找矿应用 [D].北京:中国地质大学(北京), 2012.
- SHAO Xinglai. Study on geophysical characteristics and prospecting application of the Huangshan-Jingerquan ultramafic rock belt in East Tianshan[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012.
- 邵行来, 薛春纪, 戴德文, 等. 新疆哈密葫芦岩浆 Cu-Ni 矿勘查 地球物理异常特征[J]. 现代地质, 2010, 24(2): 383-391.
- SHAO Xinglai, XUE Chunji, DAI Dewen, et al. Characteristics of

Geophysical Anomalies of the Prospecting for Hulu Magmatic Cu-Ni Deposit in Hami of Xinjiang[J]. Geoscience, 2010, 24(2): 383–391.

- 邵行来,薛春纪,周耀明.哈密图拉尔根镁铁-超镁铁岩磁法异 常解释[J].新疆地质,2012a,30(4):425-429.
- SHAO Xinglai, XUE Chunji, ZHOU Yaoming. The Interpretation of Ground Magnetic on the Tulargen Mafic-ultramafic Complex in Hami, Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 2012a, 30(4): 425–429.
- 石煜, 王玉往, 王京彬, 等. 东天山黄山东和黄山西铜镍硫化物 矿床含矿超镁铁岩的成岩-成矿作用机制: 来自斜长石成 分的约束[J]. 地球科学, 2022, 47(9): 3244-3257.
- SHI Yu, WANG Yuwang, WANG Jingbin, et al. Petrogenesis and Metallogenesis Mechanism of the Ore-Bearing Ultramafic Rocks from the Huangshandong and Huangshanxi Ni-Cu Sulfide Deposits, Eastern Tianshan: Constraints from Plagioclase Compositions[J]. Earth Science, 2022, 47(9): 3244–3257.
- 师震,陈宏骏,钱壮志,等.东天山红石岗镁铁—超镁铁质岩体 成因及铜镍成矿潜力[J].地球科学与环境学报,2019, 41(2):156-169.
- SHI Zhen, CHEN Hongjun, QIAN Zhuangzhi, et al. Genesis and Cu-Ni Metallogenetic Potential of Hongshigang Mafic-ultramafic Intrusion in East Tianshan, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2019, 41(2): 156–169.
- 宋谢炎,邓宇峰,颉炜,等.新疆黄山-镜儿泉铜镍硫化物成矿带 岩浆通道成矿特征及其找矿意义[J].矿床地质,2022, 41(6):1108-1123.
- SONG Xieyan, DENG Yufeng, XIE Wei, et al. Ore-forming processes in magma plumbing systems and significances for prospecting of Huangshan-Jingerquan Ni-Cu sulfide metallogenetic belt, Xinjiang, NW China[J]. Mineral Deposits, 2022, 41(6): 1108–1123.
- 王成.重、磁、电综合勘探方法在寻找铜镍矿中的应用[J].新 疆有色金属,2018,41(4):13-17.
- WANG Cheng. Application of integrated gravity, magnetic, and electrical exploration methods in Cu-Ni deposit prospecting[J]. Xinjiang Youse Jinshu, 2018, 41(4): 13–17.
- 王庆功.综合物探方法在新疆某铜镍矿勘探中的应用[J].甘肃 冶金,2021,43(2):96-98+104.
- WANG Qinggong. Application of Comprehensive Geophysical Exploration Method in the Exploration of Cu-Ni Deposit in Xinjiang[J]. Gansu Metallurgy, 2021, 43(2): 96–98+104.
- 王志福,吴飞,谭克彬,等.哈密红石岗铜镍矿矿床地质特征及 找矿前景[J].新疆地质,2012,30(3):307-311.
- WANG Zhifu, WU Fei, TAN Kebin, et al. Geological Characteristics and Prospecting Potential of the Hongshigang Cu-Ni Sulfide Deposit in Hami, Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 2012, 30(3): 307–311.
- 王亚磊,张照伟,陈寿波,等.新疆东天山红石岗北铜镍矿化镁 铁质岩体岩石成因及成矿潜力分析[J].地质学报,2017, 91(4):776-791.
- WANG Yalei, ZHANG Zhaowei, CHEN Shoubo, et al. Petrogenesis and Metallogenic Potential Analysis of Mafic Intrusion in the Hongshigangbei Ni Cu Sulfide Mineralization in East Tianshan,

Xinjiang[J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(4): 776–791.

- 吴功成. 新疆白石泉铜镍矿矿床地质与找矿预测 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- WU Gongcheng. Geology and prospecting prediction of the Baishiquan Cu-Ni deposit in Xinjiang[D].Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- 肖丹,宋泽友,宋维国.我国岩浆硫化物型镍矿床伴生矿产综合 勘查评价指标探讨[J].国土资源导刊,2022,19(1):48-53.
- XIAO Dan, SONG Zeyou, SONG Weiguo. Comprehensive Exploration and Assessment of Magmatic Type of Nickel Sulfide Deposits in China[J]. Land & Resources Herald, 2022, 19(1): 48–53.
- 杨大欢,古志宏.广东与燕山期岩浆作用有关矿产资源的区域 成矿分带特征及成因[J].矿产与地质,2021,35(4):603-609.
- YANG Dahuan, GU Zhihong. Regional metallogenic zonation and genesis of mineral resources related to Yanshanian magmatism in Guangdong[J]. Mineral Resources and Geology, 2021, 35(4): 603–609.
- 尹希文.新疆香山铜镍硫化物矿床岩浆深部过程与找矿方向探 讨[J].西北地质,2015,48(3):22-30.
- YIN Xiwen. Magma Deep Process and Prospecting Direction of Xiangshan Ni-Cu deposit, Eastern Tianshan, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2015, 48(3): 22–30.
- Baranov V. A new method for interpretation of aeromagnetic maps; pseudo-gravimetric anomalies[J]. Geophysics, 1957, 22(2): 359–382.
- 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.
- Ekwok S E, Achadu O-I M, Akpan A E, et al. Depth Estimation of Sedimentary Sections and Basement Rocks in the Bornu Basin, Northeast Nigeria Using High-Resolution Airborne Magnetic Data[J]. Minerals, 2022, 12(3): 285.
- Ekwok S E, Akpan A E, Ebong E D. Enhancement and modelling of aeromagnetic data of some inland basins, southeastern Nigeria[J]. Journal of African Earth Sciences, 2019, 155; 43–53.
- Elysseieva I s, Pašteka R. Review Paper: Historical development of the total normalized gradient method in profile gravity field interpretation[J]. Geophysical Prospecting, 2019, 67(1): 188– 209.
- Feng Y, Qian Z, Duan J, et al. Geochronological and geochemical study of the Baixintan magmatic Ni-Cu sulphide deposit: New implications for the exploration potential in the western part of the East Tianshan nickel belt (NW China)[J]. Ore Geology Reviews, 2018, 95: 366–381.
- He J, Fan Z, Xiong S, et al. Geophysical prospecting of copper-nickel deposits in Beishan rift zone, Xinjiang[J]. China Geology,

2021, 4(1): 126-146.

- Jahren C E. Magnetization of keweenawan rocks near duluth, minnesota[J]. Geophysics, 1965, 30(5): 858.
- Koenigsberger J G. Natural residual magnetism of eruptive rocks[J]. Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity, 1938, 43(3): 299–320.
- Mao Y J, Qin K Z, Li C, et al. Petrogenesis and ore genesis of the Permian Huangshanxi sulfide ore-bearing mafic-ultramafic intrusion in the Central Asian Orogenic Belt, western China[J]. Lithos, 2014, 200–201: 111–125.
- Mao Y J, Qin K Z, Tang D M, et al. Crustal contamination and sulfide immiscibility history of the Permian Huangshannan magmatic Ni-Cu sulfide deposit, East Tianshan, NW China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2016, 129: 22–37.
- Meng Z. Three-dimensional potential field data inversion with L0 quasinorm sparse constraints [J]. Geophysical Prospecting, 2018, 66(3): 626–646.
- Parkinson W D, Barnes C D. In situ determination of Koenigsberger ratio[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 1985, 32(1): 1-5.
- Ran X J, Xue L F ,Zhang Y Y , et al. The 3D Visualization of 2D GM-SYS Gravity-Magnetic Inversion Sections Based on Go-CAD[C]//2017 International Conference on Robots & Intelligent System (ICRIS). Huai An City, China: IEEE, 2017. 325–328.
- Sun J, Li Y. Adaptive Lp inversion for simultaneous recovery of both blocky and smooth features in a geophysical model[J]. Geophysical Journal International, 2014, 197(2): 882–899.
- Sun J, Li Y. Multidomain petrophysically constrained inversion and geology differentiation using guided fuzzy c-means clustering [J]. Geophysics, 2015, 80(4): ID1–ID18.
- Utsugi M. 3-D inversion of magnetic data based on the L1–L2 norm regularization [J]. Earth, Planets and Space, 2019, 71(1): 73.
- Vanzon T, Roy-Chowdhury K. Structural inversion of gravity data using linear programming[J]. Geophysics, 2006, 71(3): J41– J50.
- Wardinski I, Saturnino D, Amit H, et al. Geomagnetic core field models and secular variation forecasts for the 13th International Geomagnetic Reference Field (IGRF-13)[J]. Earth Planets and Space, 2020, 72(1): 155.
- Xiao F, Wang Z. Geological interpretation of Bouguer gravity and aeromagnetic data from the Gobi-desert covered area, Eastern Tianshan, China: Implications for porphyry Cu-Mo polymetallic deposits exploration[J]. Ore Geology Reviews, 2017, 80: 1042–1055.
- Yurichev A N, Chernyshov A I. New Ore Minerals from the Kingash Ultramafic Massif, Northwestern Eastern Sayan[J]. Geology of Ore Deposits, 2017, 59(7): 626–631.