金川外围铜镍矿靶区查证综合物探技术应用——以宁远堡地区杨家大山矿点为例

贺景龙[1,2],高奇[1,2*],贾煦[1,2],刘诚[1,2],赵兴志[1],赵晓军[1],秦宁[1]

1.中国地质调查局西安矿产资源调查中心,陕西 西安 710100;
2.中国地质调查局金矿勘查技术创新中心,陕西 西安 710100

摘 要:物探方法是铜镍矿勘查的核心技术手段,为了解决靶区定位精度差和效率低的问题,采用综合物探方法对金川铜镍矿外围靶区进行查证,并验证其成效。以宁远堡地区杨家大山矿点作为典型案例,通过整合高精度磁法、激电中梯测量和双边三极激电测深等物探技术,应用"筛选+赋权"的融合方法处理电阻率、极化率和ΔT这3个参数的数据融合,多维度勘查靶区,精准圈定靶区内重点找矿区段,显著提升勘查工作的效率和精准度。经钻探工程验证,发现多段黄铁矿化,并在264~269 m深段发现视厚度约为5 m的硫铁矿体(S含量为13.60%~26.43%,Fe含量为10.65%~15.58%),为金川铜镍矿后续外围区域找矿工作提供技术参考。

关键词:铜镍矿;靶区查证;综合物探方法;杨家大山矿点;靶区定位;金川矿区

中图分类号:P631 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2518(2026)04-0881-14 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2026.04.310

引用格式:贺景龙,高奇,贾煦,等.金川外围铜镍矿靶区查证综合物探技术应用——以宁远堡地区杨家大山矿点为例[J].黄金科学技术,2026,34(4):881-894.HE Jinglong,GAO Qi,JIA Xu,et al.Application of Comprehensive Geophysical Exploration Technology in Target Area Verification of Copper-Nickel Ore Around Jinchuan—A Case Study of Yangjiadashan Ore Spot in Ningyuanbao Area[J].Gold Science and Technology,2026,34(4):881-894.

金川铜镍矿是我国最大的岩浆钴镍硫化物矿床,其镍、钴资源储量分别约占国内资源总储量的68.6%和50.0%,是保障国家有色金属战略资源供给的核心基地(侯增谦等,2020;王岩等,2020;张照伟等,2022)。随着高科技产业的蓬勃发展,以及全球对低碳环保要求的不断提升,国家对镍、钴等战略性矿产资源的刚性需求持续攀升(王辉等,2019;张照伟等,2021)。由于矿产资源的快速消耗,目前我国镍、钴资源的对外依存度高达90%以上,供需结构性失衡导致资源保障压力尤为突出(翟裕生,2020;李文渊,2022a)。经过多年开采,金川矿床主矿体资源消耗加剧,其外围及深边部找矿成为维持矿山可持续发展的关键。

针对金川铜镍矿及外围区域,以往开展了大量的基础研究和勘查工作。在矿床成因和成矿规律方面,梳理了金川矿床岩浆演化与硫化物熔离成矿机制,明确了矿床与超基性岩体的空间关联(段俊等,2025)。在勘查技术手段应用方面,验证了常规物探方法在深部岩体识别中的基础作用,聚焦金川矿床钴的赋存状态与富集过程,为外围钴镍共生矿

收稿日期:2025-10-23;**修订日期:**2026-03-25

基金项目:国家科技重大专项"地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项"(编号:2025ZD1007104)、中国地质调查局项目"西秦岭造山带大地电磁基础调查"(编号:DD20240207003)、"战略性矿产勘查物探技术支撑(西安矿产中心)"(编号:DD20243333)和"扬子西南缘富磷矿空间就位机制研究与高效评价技术方法示范"(编号:2023ZRBSHZ059)联合资助

作者简介:贺景龙(1988—),男,陕西渭南人,工程师,从事矿产资源勘查地球物理数据处理与解译工作。E-mail:448394136@qq.com

***通信作者:**高奇(1992—),男,陕西黄陵人,工程师,从事地球物理电磁法勘探与物探数据处理工作。E-mail:568809865@qq.com

© Editorial Department of *Gold Science and Technology* (CC BY-NC-ND)

体勘查提供了矿物学依据(高辉等,2009)。在金属矿勘查中,前人应用综合物探方法(重力、磁法和电法等)取得了良好进展:一是在多金属勘查领域,如金、铅锌多金属矿和深部金属矿勘查中,物探方法能够精准识别构造破碎带和岩体,明确矿体分布或发现找矿线索,解决深部多金属矿定位难题,为钻孔布设提供依据(陶鹏飞等,2022;夏强等,2024;陈实等,2025;邓发云等,2025;李子永等,2026);二是在单一特色矿种勘查中,物探方法针对性强、找矿精度高,可有效服务不同区域特色矿种的找矿预测与靶区圈定工作(曹秋义等,2017;于兵等,2022);三是矿山深边部及外围勘查中,物探方法能够提升矿山深边部及外围隐伏矿体预测准确性(游越新等,2023;廖圣柱等,2024;吕登等,2025;殷启春等,2025;刘瑾等,2026;王玉玺等,2026)。

尽管前人对金川铜镍矿及其外围开展了诸多研究工作并取得重要进展,但仍存在尚未解决的地质科学问题与勘查技术瓶颈,主要表现在:一是金川铜镍矿外围是否存在未知隐伏含矿超基性岩体,以及能否形成具有工业价值的铜镍矿床,尚没有明确定论;二是传统勘查技术手段在地表覆盖区难以取得突破,综合物探找矿技术方法在该区域的应用效果及异常识别精度仍需验证。综合物探方法在金属矿勘查中具有成本低和效率高的优势,但仍存在一些不足,表现在:一是针对复杂地质背景的应用适配性不足,其在金川外围特殊地形条件下的有效性尚未明确;二是依赖传统技术组合,缺乏多参数融合技术的创新应用,异常区分能力有限,难以适配复杂伴生矿精准勘查需求。

针对上述不足,结合金川外围找矿的核心科学问题,选择金川铜镍矿外围的宁远堡杨家大山地区作为研究区,协同应用高精度磁法、激电中梯和三极测深等物探方法,创新采用"筛选+赋权"多参数融合技术,整合磁异常、视电阻率和视极化率等核心参数,改进综合物探方法的应用效果,提升物探异常解释准确性,精准圈定找矿靶区并通过钻探验证,解决金川铜镍矿外围隐伏含矿岩体识别,以及矿与非矿异常区分等关键问题,为金川外围铜镍矿找矿提供技术支撑与实践参考,切实提升国家有色金属战略资源保障能力。

1 研究区地质概况

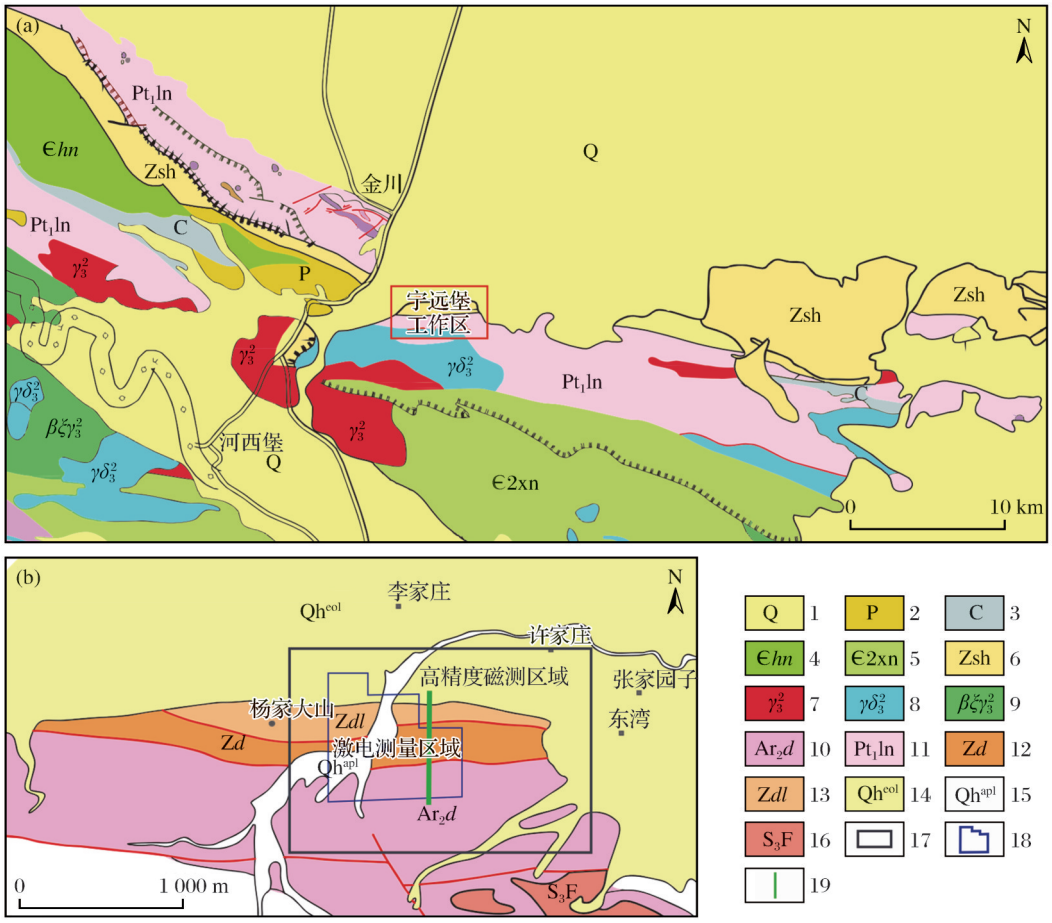
1.1 区域地质背景

金川铜镍矿所处区域地质构造复杂,位于板块碰撞带附近,经历了多期次的构造运动和岩浆活动。该矿床位于阿拉善地块西南缘,其北部、南部和西部分别与潮水盆地、河西走廊盆地及祁连早古生代造山带相邻(宫江华等,2011;闫海卿等,2015)。宁远堡研究区地处金川岩体东南侧,由于受周边多构造单元的相互作用控制,地层以前寒武纪变质基底和古生代沉积盖层为主,龙首山断隆构造单元整体被从深部逆冲推覆而呈现陡倾斜状态,推测金川岩体的另一端仍可能赋存有厚大的岩浆镍钴硫化物矿体(李文渊等,2022b;王亚磊等,2023)。东湾磁异常的发现,预示着岩体东南部可能存在次级岩浆脉体或隐伏磁性地质体。同时,该时期与金川岩体相关的中酸性岩浆活动仍具有一定延续性。太古宇白家嘴组与含矿超基性岩体密切相关,该岩体沿NW向深断裂的次级构造侵入,为铜镍矿成矿提供了物质基础和赋存空间(图1)。

1.2 研究区地质特征

研究区出露岩性主要为太古宇龙首山群东大山组(Ar_2d)斜长变粒岩、二云石英片岩、石英岩和大理岩,烧火筒组(Z*sh*)白云岩和硅质白云岩,大岭沟组(Z*d*)白云岩,以及东岭子沟组(Z*dl*)砾状白云岩、绢云千枚岩夹含碳千枚岩。区内断层主要有2组:一组以NE向为主,为走滑断层,如金川河走滑断层;另一组为近EW向断层,表现为向南逆冲的断层性质。区内岩体主要有2种:一是烧火筒组内的基性—超基性岩,以辉长岩为主,主要以脉体形式出现;二是志留纪侵入的花岗闪长岩和花岗岩,大片分布在研究区南侧。

结合航空物探异常特征推断,研究区深部可能存在隐伏含矿超基性岩体,推测该类隐伏岩体呈不规则岩墙状,岩体内部可能存在膨缩和分支现象,其中凹槽部分控矿作用明显。参考金川铜镍矿成矿特征,推测该隐伏含矿超基性岩体的矿石矿物组成多样,金属硫化物以磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铁矿等为主(王亚磊等,2023;张照伟等,2023)。工业矿体形态各异,呈似层状和透镜状等,矿石构造主要有浸染状、致密块状和网脉状等。上述推测的成



1.第四系;2.二叠系;3.石炭系;4.寒武系韩母山群;5.寒武系香山群;6.震旦系烧火筒群;7.奥陶纪花岗岩;8.奥陶纪花岗闪长岩;9.奥陶纪辉长辉绿岩;10.中太古界龙首山群东大山岩组;11.中太古界龙首山群;12.震旦系大龄沟组;13.震旦系东岭子沟组;14.第四系亚砂土;15.第四系河床砂砾沉积;16.志留纪侵入岩;17.高精度磁测区域;18.激电中梯测量区域;19.激电测深剖面

图1　宁远堡研究区地质简图

Fig. 1　Geological map of Ningyuanbao study area

矿相关特征,决定了研究区物探响应的复杂性和多样性。

研究区与金川铜镍矿床属同一构造地质单元,具有相同的地质背景,二者在地质地层分布和物探异常特征上具有相似性。在地质地层分布方面,均处于龙首山构造带关键部位,断层发育(金川铜镍矿以近EW向逆冲断层为主,研究区也发育近EW向向南逆冲断层和NE向走滑断层),均分布有基性—超基性岩(金川铜镍矿含矿岩体以超基性岩为主,研究区烧火筒组内分布有基性—超基性岩脉体,推测深部赋存有隐伏含矿超基性岩体)。在物探异常特征方面,航空布格重力异常显示研究区与金川铜镍矿具有相同的高重力异常特征,该异常通常对应深部高密度基性—超基性岩体,与金川铜镍矿"重力高异常对应含矿超基性岩体"的成矿规律一致,航磁异常显示磁性整体较弱,与金川铜镍矿外围隐伏含矿岩体的航磁特征相近。金川铜镍矿主矿体对应高磁异常,外围隐伏矿体及岩体磁性相对较弱。地表未显示化探异常,推测受覆盖层遮挡或矿体埋深影响较大。经地表检查,未发现超基性岩体,南部分布有中酸性花岗岩。结合物化探异常及区域构造背景,推断研究区深部赋存有隐伏含矿超基性岩体,与金川铜镍矿具有相似的成矿条件,深部找矿潜力巨大。

1.3　岩石物性特征

宁远堡研究区岩石标本电性测量仪器采用

GDD-SCIP激电标本测量仪，供电周期为16 s，极化率为二次电压与一次电压的比值，无量纲。磁性参数采用KM-7磁化率测量仪进行磁化率参数测量。表1所示为岩（矿）石标本电、磁参数统计结果，其中超基性岩和矿石参数引自吉林大学（赵建宇，2019）。

表1 岩（矿）石标本电、磁参数统计

Table 1 Statistics of electrical and magnetic parameters of rock （ore） specimens

地层	岩性	电阻率/(Ω·m)		极化率/%		磁化率/($\times10^{-3}$SI)	
		范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
龙首山岩群	石英片岩	220~8 009	3 486	0.30~1.68	0.72	0.01~0.12	0.09
	石英岩	1 206~10 839	8 864	0.20~1.56	0.58	0.00~0.06	0.04
	大理岩	521~8 161	3 439	0.42~1.92	0.96	0.04~0.22	0.10
烧火筒组	白云岩	821~1 628	1 104	0.76~3.28	1.68	0.08~0.52	0.26
	硅质白云岩	456~2 058	1 440	0.45~1.88	1.21	0.04~0.48	0.22
大岭沟组	白云岩	368~1 964	1 279	0.68~2.66	1.66	0.06~0.44	0.21
东岭子沟组	绢云千枚岩	414~1 608	1 099	1.6~8.6	4.17	0.01~0.18	0.11
	含碳千枚岩	102~428	168	6.8~28.4	18.2	0.01~0.20	0.12
	超基性岩	367~3 627	2 304	0.0~62.2	12.7	0.28~6.52	4.6
	矿石	2~2 782	35	5.4~34.2	19.1	0.40~32.9	14.0

根据岩石标本电、磁参数测定统计结果，研究区含超基性岩及矿石表现为低电阻率、高极化率和高磁化率的物性特征，与其他地层岩石的物性特征有明显的差异，使得综合物探方法在研究区应用具有物性基础。

2 物探方法选择与数据处理

2.1 综合物探方法选择依据

结合金川铜镍矿成矿特征和研究区地质背景，选取3种针对性综合物探方法，主要依据如下：

（1）高精度磁法：基于铜镍矿与基性岩体的空间关联性，通过探测基性岩体（含隐伏岩体）引发的磁异常，结合区域构造走向，间接推断矿体赋存位置，辅助圈定找矿靶区。

（2）激电中梯测量法：利用铜镍矿共生岩浆硫化物的激电效应，通过地表电位响应测算视极化率，识别硫化物富集区域，精准圈定矿体相关激电异常。

（3）双边三极激电测深法：为明确激电异常深部产状和延伸特征，通过多供电方向异常联合反演，精确定位矿体深部埋深，为后续工程布设与钻孔验证提供物探支撑。

2.2 综合物探方法测点部署情况

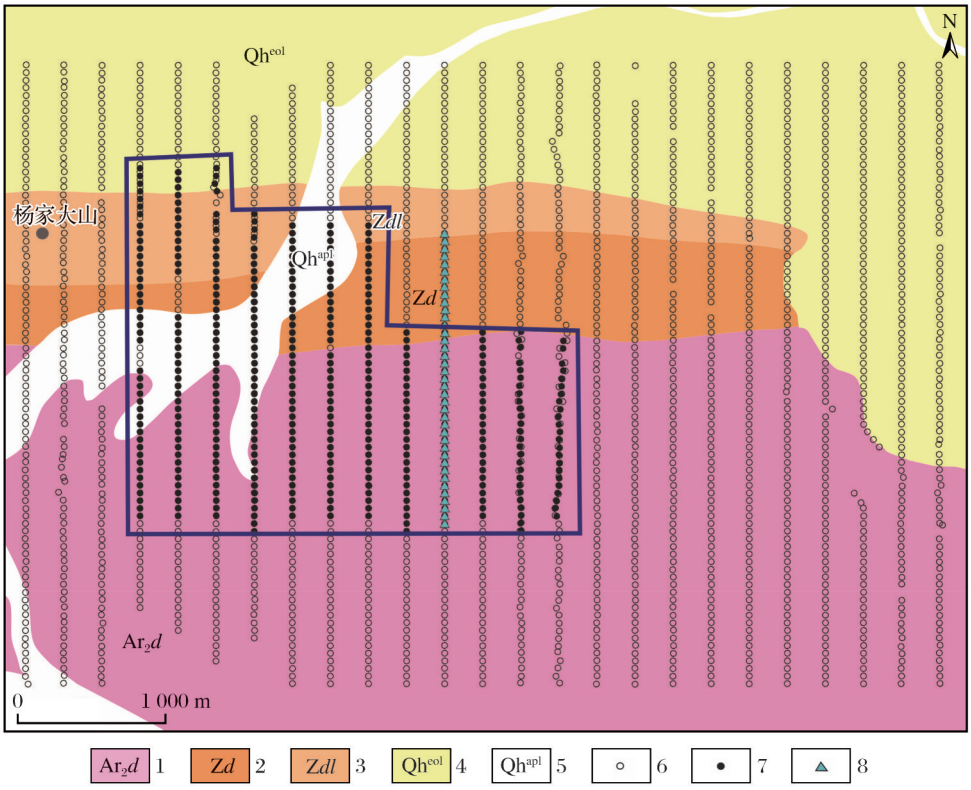
研究区位于金昌市金川区宁远堡镇东部，该区地层分布情况如图1所示，北部以全新统（Qh^{eol}）风成亚沙土覆盖层为主，南部出露龙首山群东大山岩组（Ar_2d）二云石英片岩、磁铁石英岩和白云石大理岩，震旦系大龄沟组（Z*d*）白云岩，震旦系东岭子沟组（Z*dl*）绢云千枚岩、含碳千枚岩和硅板岩，局部见有泥盆系乏牛坡沟单元（D_1F）二长花岗岩体侵入。本次布设测线方位角为0°（与地层走向基本垂直），线距为100 m，点距为20 m，兼顾经济效益和分辨精度。完成高精度磁法测量4.1 km^2、1∶1万激电中梯测量0.8 km^2，激电测深33点，测点布设如图2所示。

2.3 数据采集与处理

结合测区干扰因素和地质条件，优化各方法采集参数，采用专业软件完成数据处理，确保数据精度以满足找矿要求。具体如下：

（1）高精度磁法测量：采用100 m×20 m测线网格，以RTK定位和GSM-19T高精度质子磁力仪（分辨率小于等于0.1 nT，灵敏度小于等于0.01 nT）采集数据，提前校正仪器漂移、避开强磁干扰并进行10%重复观测（误差小于等于±2 nT）。数据经GeoIPAS V4.5软件处理，采用IGRF-13国际地磁参考场模型完成多项改正，以52 093 nT作为正常场T_0，据此计算异常△*T*值并绘制等值线图。

（2）激电中梯测量：选用全波形激电接收仪器，确定供电极距（900 m）、测量极距（20 m）等优化参数，观测412个测点（重复观测19个），视电阻率与视极化



1.龙首山群东大山岩组二云石英片岩、磁铁石英岩和白云石大理岩;2.震旦系大龄沟组白云岩;3.震旦系东岭子沟组绢云千枚岩、含碳千枚岩和硅板岩;4.第四系亚砂土;5.第四系砂砾沉积;6.高精度磁测点位;7.激电中梯点位;8.激电测深点位

图2　综合物探方法布设点位图

Fig. 2　Layout point map of comprehensive geophysical survey method

率均方相对误差均满足规范要求。利用GeoIPAS4.2软件,基于观测参数计算电阻率和金属因子,经克里金插值绘制视电阻率和视极化率等值线图。

(3)双边三极激电测深:采用ELOG-4三维大功率激电系统,布设620 m测深剖面(点距为20 m),确保有效探测深度达300 m,复测率为4.0%且误差符合标准。数据经ELOG-4 V2.2软件预处理获取基础参数,再通过Res2DInv V2024软件完成反演和地形校正,采用克里金插值绘制拟断面图,精确计算视电阻率和视极化率。

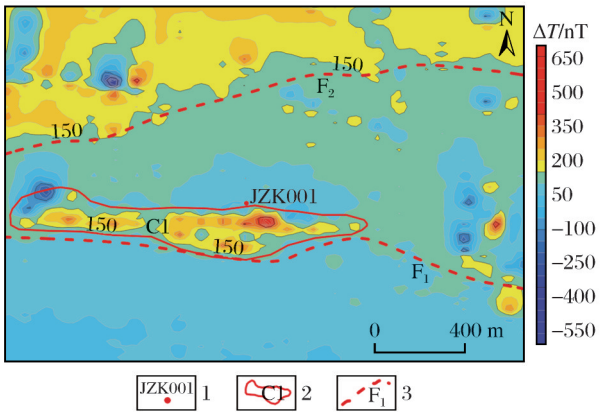
3　综合物探方法应用与成果解释

金川铜镍硫化物矿床具有高磁、高极化和低电阻的物性特征,因此本次综合物探方法采用航磁快速圈定—地面磁法解剖查证—激电中梯聚焦异常区—激电测深精细定位的递进式工作流程,逐步缩小找矿靶区,明确异常深部特征,为后续工程验证和勘查工作提供依据。

3.1　高精度磁法测量成果解释

宁远堡研究区地面高精度磁法测量ΔT化极等值线平面图如图3所示,区域磁场整体呈"北高南低、中部局部高"的异常特征。自北向南可划分为3个异常区,分别是:北部高磁异常区(片状分布,西宽东窄,异常值为150~450 nT),中部中磁异常区(片状分布,西窄东宽,异常值为-550~150 nT),南部低磁异常区(片状分布,西宽东窄,异常值为-200~50 nT)。其中,南部低磁异常区内圈定条带状高磁异常C1(东西长度约为1 500 m,南北宽度为100~360 m)。根据异常特征,圈定出2条线性构造,分别为F_1和F_2。

结合研究区实际地层分布特征,异常成因及构造解译如下:研究区北部高磁异常区推断是由全新系(Qh^{eol})风成亚沙土覆盖层下伏地质体引起;中部中磁异常推断是由震旦系大龄沟组(Zd)白云岩、震



1.钻孔位置;2.圈定正磁异常;3.推断断裂构造

图3 高精度磁测△*T*化极等值线平面图与初步解译结果

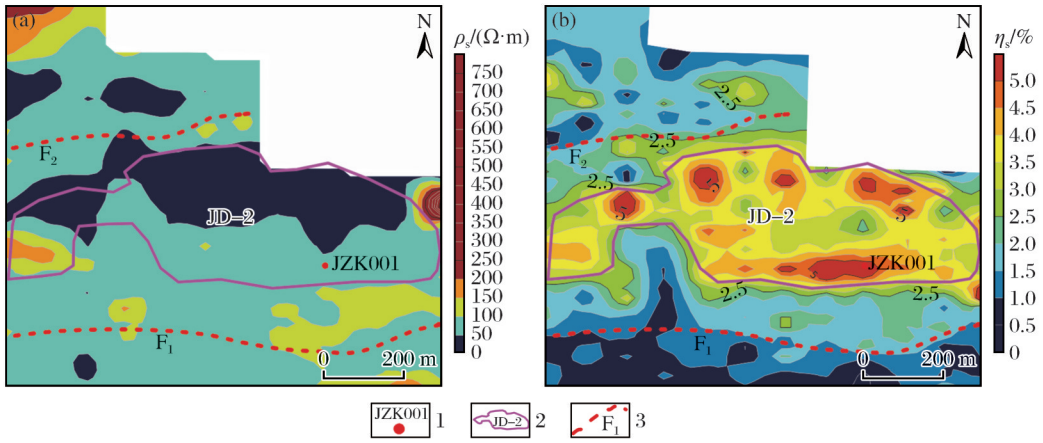
Fig. 3 Contour map of high-precision magnetic survey △*T* pole and preliminary interpretation results

旦系东岭子沟组(Z*dl*)绢云千枚岩、含碳千枚岩和硅板岩引起;南部低磁异常推断是由龙首山群东大山岩组(Ar_2d)二云石英片岩引起;条带状高磁异常C1推断是泥盆系乏牛坡沟单元(D_1F)二长花岗岩体所致;线性构造F_1推断是龙首山群东大山岩组与震旦系大龄沟组的地层分界线,实为断层接触;线性构造F_2推断是震旦系大龄沟组与东岭子沟组的地层分界线,推断为断层接触。

3.2 激电中梯测量

激电中梯测量视电阻率异常特征如图4(a)所示,整体表现为低电阻特征(多数电阻率值小于100 Ω·m),局部发育高电阻异常,按分布区域可划分为:南部高阻异常(100~200 Ω·m,范围较大)、北部高阻异常(100~300 Ω·m,范围次之)和东部高阻异常(100~800 Ω·m,范围最小)。

测区视极化率异常特征如图4(b)所示,自南向北表现为"中间高、两侧低"带状分布,中间高极化异常西窄东宽(南北宽度为200~400 m,异常值为2.5%~6.0%),东西两侧未圈闭且延伸正常;北部低极化异常(宽度约为300 m,异常值小于3%)和南部低极化异常(宽度小于300 m,异常值小于2.5%)均未圈闭且仍有延伸。



1.钻孔位置;2.圈定激电异常;3.推断断裂构造;(a)视电阻率等值线平面图;(b)视极化率等值线平面图

图4 激电中梯测量视等值线异常解释图

Fig. 4 Interpretation diagrams of apparent contour anomaly in IP intermediate gradient survey

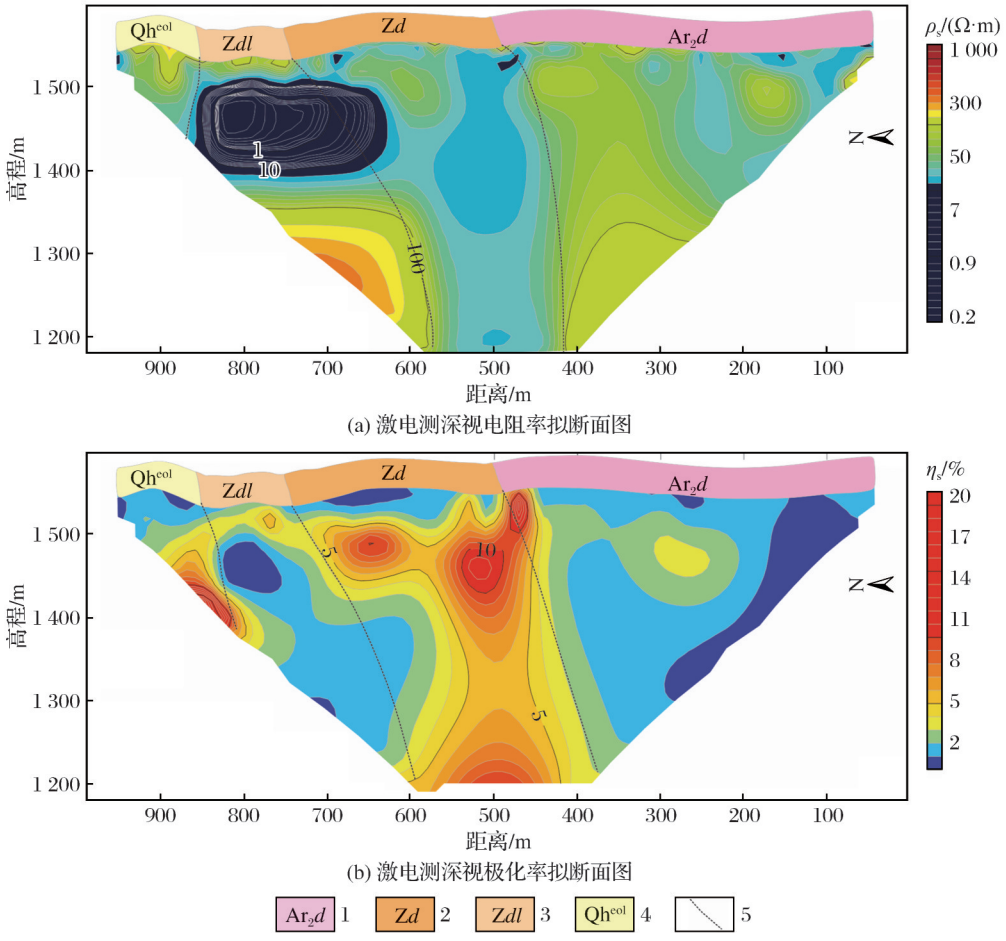
视电阻率和视极化率异常特征基本与实际地质情况相吻合。测区龙首山群东大山岩组(Ar_2d)表现为中等电阻率、偏低极化率的电性特征;震旦系大龄沟组(Z*d*)表现为较低电阻率、高极化率的电性特征;震旦系东岭子沟组(Z*dl*)表现为较低电阻率、中等偏低极化率的电性特征。因此,测区中部的带状高极化率异常推断是由侵入的中基性岩体和震旦系大岭沟组(Z*d*)白云岩引起。

3.3 双边三极激电测深

结合实际地质情况,在测区采用激电中梯测量方法寻找硫化物型铜镍矿会受到含碳千枚岩的干扰。在圈定地磁、激电异常的基础上,选取较好的激电异常开展剖面激电测深(剖面位置见图2),解析异常深部产状。

双边三极激电测深剖面视电阻率拟断面图和视极化率反演拟断面图(图5)显示:剖面南部50~

400 m段呈低阻、低极化特征,极化率小于等于3%,电阻率小于100 Ω·m;剖面中部450~700 m段呈低阻、高极化特征,极化率大于5%,电阻率小于40 Ω·m,推断该段异常与岩浆硫化物铜镍矿化有关;剖面北部700~950 m段呈低阻、低极化特征,极化率小于等于3%,电阻率小于100 Ω·m。



1.龙首山群东大山岩组二云石英片岩、磁铁石英岩和白云石大理岩;2.震旦系大龄沟组白云岩;3.震旦系东岭子沟组绢云千枚岩、含碳千枚岩以及硅板岩;4.第四系亚砂土;5.推断地层界线

图5　双边三极激电测深反演视电阻率和视极化率拟断面图

Fig. 5　Pseudo-section diagram of apparent resistivity and apparent polarization rate inverted by bilateral tripole induced polarization sounding

3.4　综合成果

本次综合物探工作异常特征突出,主要成果有:地面磁法圈定的条带状高磁异常C1,推断与中基性岩体相关,为铜镍矿找矿提供间接线索;激电中梯圈定的高极化异常JD-1,结合激电测深深部解译结果,推断与岩浆硫化物矿化体相关,为后续工程验证及进一步勘查工作指明了核心靶区。

4　综合成果分析与钻探验证

本次在金川铜镍矿外围开展综合物探技术应用,聚焦综合成果的深度解析和钻探验证,通过"筛选+赋权"数据融合技术,解决单一物探手段的多解性和异常解释不准确等问题,结合钻探工程验证融合成果的可靠性,为金川铜镍矿外围找矿提供科学依据和实践支撑。

4.1　综合成果分析

浅部矿产勘查对物探技术的分辨率要求较高,单一的物探手段易存在多解性、异常解释不准确及大面积异常无法精细剖析的问题,因此本次综合成

果分析采用“筛选+赋权”的数据融合技术，将高精度磁测获取的磁异常ΔT、激电中梯测量获取的视电阻率ρ_s和视极化率η_s三大核心参数进行多参数融合，显著提高了数据解释精度和可靠性，凸显与铜镍矿相关的异常特征。

多参数数据融合的核心目标是凸显与铜镍矿成矿相关的特定范围异常值，剔除干扰信息，其完整工作流程包括清洗数据—权重分配—异常指数计算—参数融合。各步骤细节（含权重分配、指数计算公式和融合逻辑等）如下：

第一步：数据清洗。针对高精度磁测获取的磁异常ΔT、激电中梯测量获取的视电阻率ρ_s和视极化率η_s三大核心参数的原始数据，进行系统筛选和预处理，剔除空值、缺失值及极端异常值，其中极端异常值采用3σ准则剔除，即剔除偏离数据均值3倍标准差以上的数据；然后，对筛选后的数据进行标准化处理，将不同量纲的参数进行归一化处理，消除量纲差异对融合结果的影响，标准化公式为

$$x_i^*=\frac{x_i-x_{\min}}{x_{\max}-x_{\min}} \tag{1}$$

式中：x_i^*为第i个数据的标准化参数值；x_i为第i个数据的原始参数值；$x_{\max}$为该参数的最大值；$x_{\min}$为该参数的最小值。

第二步：权重分配。权重分配的核心依据是各参数与铜镍矿成矿的关联性强弱，结合金川铜镍矿“高磁、高极化、低电阻”的核心物性特征，采用层次分析法（AHP）确定ΔT、ρ_s和η_s三大参数的异常贡献权重。

权重分配的原则是铜镍矿与基性岩体紧密相关，磁异常ΔT是识别基性岩体（含隐伏岩体）的核心指标，对成矿异常的指示作用最强，分配最高权重；视极化率η_s直接反映岩浆硫化物的富集程度，是识别矿体的关键指标，分配次高权重；视电阻率ρ_s主要用于区分岩性和排除非矿干扰，对成矿异常的直接指示作用较弱，分配最低权重。

具体分配逻辑与权重值确定是通过层次分析法构建判断矩阵，对三大参数的关联性进行打分，经一致性检验（一致性比例CR<0.1，满足检验要求）后，最终确定三大参数的异常贡献权重：磁异常ΔT权重ω_1 = 0.5，视极化率η_s权重ω_2 = 0.35，视电阻率ρ_s权重ω_3 = 0.15（权重总和为1，满足归一化要求）。

第三步：异常指数计算。基于上述权重分配，采用线性加权求和模型计算每个测点的综合异常指数I_h，该模型能够有效整合三大参数的异常信息，凸显与成矿相关的高异常区域，计算公式为

$$I_h=\omega_1\cdot\Delta T^*+\omega_2\cdot\eta_s^*+\omega_3\cdot(1-\rho_s^*) \tag{2}$$

式中：I_h为综合异常指数（取值范围为[0,1]）；ΔT^*为标准化后的磁异常值；η_s^*为标准化后的视极化率值；ρ_s^*为标准化后的视电阻率值；ω_1、ω_2和ω_3分别为三大参数的异常贡献权重。视电阻率采用$(1-\rho_s^*)$参与综合异常指数计算，主要原因是：研究区铜镍硫化物矿体表现为低阻、高极化特征，电阻率值越低，指示成矿潜力越大。标准化后的电阻率参数ρ_s^*与成矿有利程度呈负相关关系，因此通过ρ_s^*将其反向，使低阻异常对综合异常的贡献增强，高阻背景贡献减弱，更加符合铜镍矿的地球物理找矿规律。

第四步：参数融合。当综合异常指数计算完成后，采用“条件筛选+可视化增强”的融合方法，进一步凸显成矿相关异常：首先，结合研究区成矿背景，设定综合异常指数筛选阈值（本次确定$I_h\geq0.6$为高异常区，$0.4\leq I_h<0.6$为中异常区，$I_h<0.4$为背景区），筛选出与铜镍矿成矿相关的异常区域；其次，运用GeoIPAS软件对筛选后的异常区域进行可视化增强处理，采用不同颜色梯度标注高、中、低异常区，清晰呈现异常的空间分布特征、形态及延伸方向，同时叠加前期推断的构造线和地层界线，实现物探异常与地质特征的耦合分析。

三参数融合成果分析如图6所示。其中，图6(d)所示为综合异常指数I_h空间分布与构造耦合图，横坐标为研究区平面横坐标（单位：m），纵坐标为研究区平面纵坐标（单位：m）。构造带分布：主要集中在测区南部，为F_1、F_2断层接触界线及其周边区域，该区域与综合异常高值区。构造带位于测区中部，即F_1（龙首山群东大山岩组与震旦系大龄沟组断层接触界线）、F_2（震旦系大龄沟组与东岭子沟组断层接触界线）及其周边区域。

综合异常值I_h对于划分地层分界比较有优势，结合其空间分布特征能够清晰地推断地层分界。同时，考虑到与铜镍矿相关岩体的物性特征——高磁、高极化率，以及综合异常高值主要分布在测区南部的特点，推断地层界线与构造界线基本吻合的

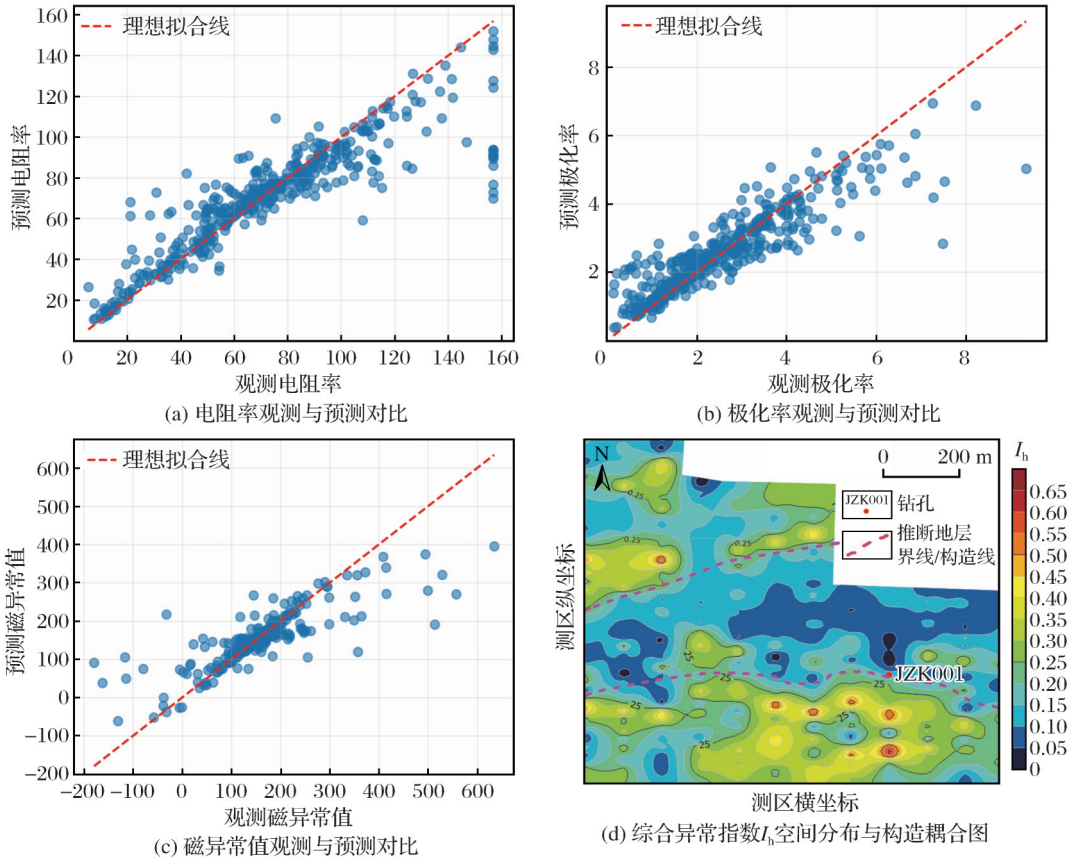


图6　三参数融合成果分析图

Fig. 6　Analysis diagrams of three-parameter fusion results

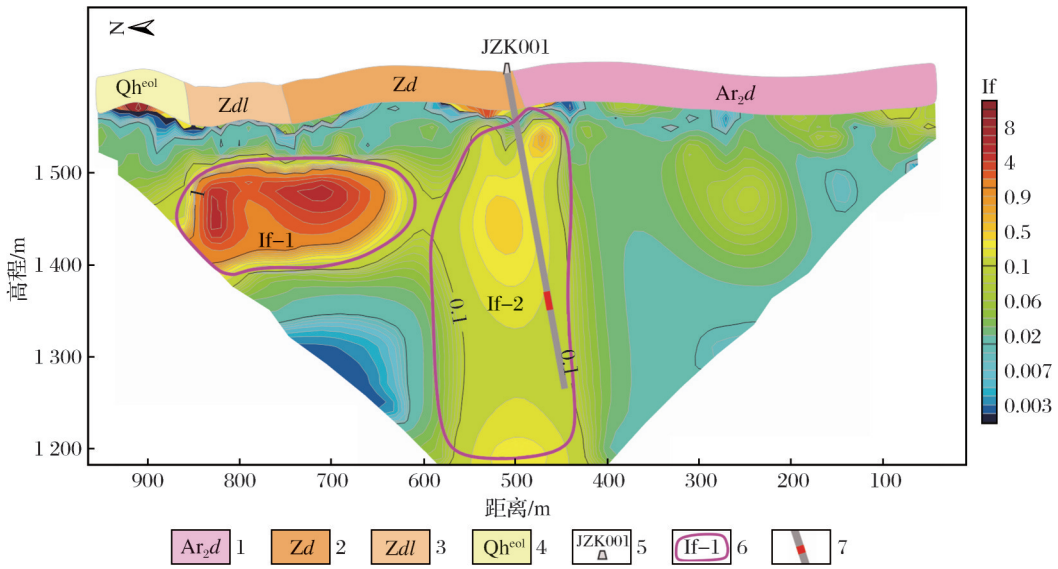
区域(南部构造带)可能隐伏基性岩体,硫化物矿体作为基性岩体相关的成矿产物,大概率分布在该构造带内,为后续钻探验证指明了核心靶区。

4.2　钻探验证

钻探验证是检验综合物探成果可靠性、确认矿体是否存在的核心手段,本次钻探验证严格依据综合成果分析结论,在测区南部构造带内的综合异常高值区(I_h≥0.6)北侧边缘与背景区(I_h<0.4)的过渡部位布设钻孔,结合双边三极激电测深查明的异常深部产状与延伸情况,基于铜镍矿"低阻高极化"的核心特征,精准确定钻孔定位、钻孔倾向及钻探深度,确保钻探工作的精准性和有效性。

在激电测深异常圈定过程中,为排除碳质地层的干扰(碳质地层表现为"更低电阻率、更高极化率",易与硫化物矿体异常混淆),如图7所示,本次采用"视极化率与视电阻率比值"构建新的综合异常值I_f,通过分析测区碳质地层的电性特征确定异常是否为碳质地层干扰异常。激电测深测量视电阻率范围为0.1~1 000 Ω·m,视极化率范围为0.1%~20.0%,各参数归一化后,含碳地层电阻率值更低,基本小于0.25,高极化率异常基本大于0.25。据此,确定I_f>1的异常为碳质地层干扰异常,I_f≤1的异常为潜在硫化物矿体异常。基于该标准,对圈定的2处综合异常(If-1和If-2)进行分类判定:If-1异常I_f值为1.2~8.5,判定为碳质地层干扰异常;If-2异常I_f值为0.7~0.9,判定为有效硫化物异常,本次重点对If-2异常开展钻探验证。

JZK001验证钻孔核心验证综合异常If-2,其具体参数如下:钻孔位于测区南部构造带内,钻孔倾向175°,倾角为75°,设计钻探深度为350 m,实际完成钻探深度351.28 m,岩心采取率大于等于85%,满足矿产勘查钻探规范要求。附JZK001钻孔柱状图见图8,清晰标注各深度地层岩性、矿化特征和异常参数等关键信息。



1.龙首山群东大山岩组二云石英片岩、磁铁石英岩和白云石大理岩;2.震旦系大龄沟组白云岩;3.震旦系东岭子沟组绢云千枚岩、含碳千枚岩以及硅板岩;4.第四系亚砂土;5.钻孔;6.激电异常;7.钻孔及见矿位置(红色为见矿段)

图7 激电综合异常钻孔验证图

Fig. 7 Borehole verification diagram of induced polarization comprehensive anomaly

JZK001钻孔钻进过程中,在多个深度段发现黄铁矿化现象,具体分布深度及特征如下:①深度为5~10 m:黄铁矿化发育在灰岩中,呈半自形粒状,星点状构造,矿化程度较弱,化验分析结果显示S含量为1.25%~2.30%,Fe含量为4.90%~5.67%;②深度为153~165 m:黄铁矿化发育在斜长角闪岩、花岗岩、安山岩和含碳千枚岩中,呈细脉状和浸染状构造,矿化程度中等,S含量为0.20%~2.87%,Fe含量为3.20%~6.28%;③深度为264~269 m:黄铁矿化发育在凝灰岩中,呈细脉状和星点状构造,矿化程度较高,S含量为13.60%~26.43%,Fe含量为10.65%~15.58%。

其中,在深度264~270 m段发现的厚层硫铁矿体,该矿段呈块状—浸染状构造,视厚度为5 m,岩心连续性好,矿化均匀,化验分析结果显示,该矿段S含量为13.60%~26.43%,Fe含量为10.65%~15.58%,进一步证实该矿段为硫化物富集区,与前期综合物探融合成果(If-2有效异常)及激电测深低阻高极化异常特征完全吻合。

本次钻探验证成果具有重要的找矿意义。一方面,证实了"筛选+赋权"多参数融合方法的科学性和可靠性,验证了综合物探异常解释的准确性,为同类地区铜镍矿浅部勘查提供了可借鉴的技术方法;另一方面,JZK001钻孔发现的硫铁矿体,进一步佐证了测区南部构造带内存在硫化物矿化,为金川铜镍矿外围找矿拓宽了思路,打破了传统找矿局限,有助于金川铜镍矿取得进一步找矿突破,为后续大规模勘查工作奠定了坚实的基础和技术支撑。

5 结论

综合物探方法在金川铜镍矿外围靶区查证中发挥着关键作用。选择金川铜镍矿外围宁远堡杨家大山地区作为研究对象,围绕铜镍矿找矿需求,系统开展综合物探方法应用、多参数融合分析及钻探验证研究,得出以下主要结论:

(1)针对金川铜镍矿"高磁、高极化、低电阻"的物性特征,选取高精度磁法、激电中梯测量和双边三极激电测深3种方法协同应用,构建了"航磁圈定—地面磁法查证—激电中梯聚焦—激电测深精细定位"的递进式找矿流程,有效解决了单一物探手段异常的多解性以及大面积异常难以精细剖析的问题,显著提升了找矿勘查的效率和准确性,成功圈定出测区南部构造带为找矿有利地段,为金川铜镍矿外围找矿指明了方向。

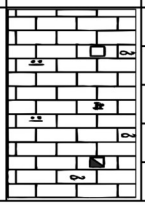
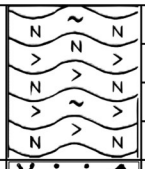
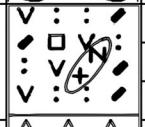
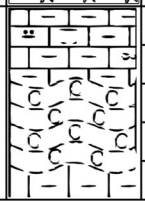
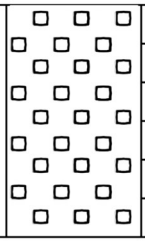
岩性描述	柱状图	样品编号	采样位置/m			分析结果	
			自	至	样长	w(S)/%	TFe/%
含硅质条带灰岩，层间见星点状黄铁矿		H1	5.48	6.48	1.0	1.68	4.93
		H2	6.48	7.48	1.0	1.25	4.90
		H3	7.48	8.48	1.0	2.28	5.67
		H4	8.48	9.48	1.0	1.92	5.58
		H5	9.48	10.68	1.2	2.30	5.13
.....							
含黄铁矿的绿泥石化斜长角闪片岩，岩石中发育石英脉和方解石脉，呈细脉状稀疏分布		H67	153.7	154.7	1.00	0.29	4.47
		H68	154.7	155.4	0.65	0.97	4.93
		H69	155.4	156.4	1.00	0.26	5.38
		H70	156.4	157.0	0.60	0.19	6.11
含黄铁矿安山质晶屑凝灰岩夹斜长花岗岩，黄铁矿呈星点状、稀疏细脉状		H71	157.0	158.2	1.20	0.21	6.28
		H72	158.4	159.2	0.80	2.87	3.86
		H73	159.2	160.2	1.00	0.12	4.96
含黄铁矿的安山岩，黄铁矿呈星点状分布		H74	160.2	161.2	1.00	0.14	4.71
		H75	161.2	162.2	1.00	0.20	4.11
黄铁矿化含硅质条带碳质千枚岩，硅质条带沿层理发育		H76	162.2	163.2	1.00	0.15	4.58
		H77	163.2	164.2	1.00	1.14	4.08
		H78	164.2	165.2	1.00	0.82	4.62
		H79	165.2	165.8	0.60	1.13	3.20
		H80	165.8	166.8	1.00	1.10	3.37
.....							
黄铁矿呈自形—半自形粒状结构		H139	264.6	265.3	0.75	2.68	3.22
		H140	265.3	266.3	1.00	15.62	10.65
		H141	266.3	267.3	1.00	26.43	15.58
		H142	267.3	268.3	1.00	13.61	10.94
		H143	268.3	269.3	1.00	25.61	14.81
		H144	269.3	270.4	1.10	22.8	12.76
.....							

图8　JZK001钻孔含矿段柱状图

Fig. 8　Histogram of ore-bearing section of JZK001 borehole

(2)提出了“筛选+赋权”多参数融合技术,通过“数据清洗—权重分配—异常指数计算—参数融合”的完整流程,实现了磁异常$\triangle T$、视电阻率ρ_s和视极化率η_s三大参数的有效融合。采用层次分析法(AHP)确定三大参数异常贡献权重($\triangle T$值为0.5、η_s值为0.35、ρ_s值为0.15),通过线性加权求和模型计算综合异常指数I_h,结合条件筛选和可视化增强,精准凸显了成矿相关异常,有效排除了碳质地层等非矿干扰,大幅提高了物探数据解释的精度和可靠性。

(3)钻探验证结果证实了综合物探成果及多参数融合技术的科学性,JZK001钻孔(验证If-2有效异常)在264~269 m深度段发现视厚度为5 m的硫铁矿体(S含量为13.60%~26.43%,Fe含量为

10.65%~15.58%),且多个深度段发育有黄铁矿化,与前期综合物探圈定的低阻、高极化异常及综合异常高值区完全吻合,佐证了测区南部构造带内存在硫化物矿化,为金川铜镍矿外围找矿提供了坚实的科学依据和技术支撑。

(4)基于本次研究成果,提出后续找矿勘查方向:一是将"筛选+赋权"多参数融合技术推广应用在金川铜镍矿深部及同类地区铜镍矿浅部勘查中,结合数学统计方法与数据处理算法,进一步提升复杂地质条件下的异常识别精度;二是重点围绕测区南部构造带及综合异常高值区,开展后续加密勘查工作,深入剖析隐伏基性岩体分布及硫化物矿体延伸特征,推动金川铜镍矿外围找矿取得更大突破。

参考文献(References):

曹秋义,山亚,冯博,等,2017.综合物化探方法在黑龙江滚子沟地区铀矿勘查中的应用与研究[J].矿产勘查,8(5):869-874.Cao Qiuyi, Shan Ya, Feng Bo, et al, 2017. Application and study of integrated geophysical-geochemical method in uranium deposit area in Gunzigou area, Heilongjiang[J].Mineral Exploration,8(5):869-874.

陈实,赵玉京,屈栓柱,等,2025.综合物探技术在新疆准噶尔东北缘金格勒铜矿中的应用研究[J].新疆地质,43(1):193-199.Chen Shi, Zhao Yujing, Qu Shuanzhu, et al, 2025. Application of comprehensive geophysical exploration technology in the Jingele: Cu mine on the Xinjiang Junggar northeastern margin [J]. Xinjiang Geology, 43(1):193-199.

邓发云,裴有生,胡音箫,等,2025.青海东昆仑各玛龙银多金属矿床M1磁异常综合物探找矿潜力分析[J].西北地质,58(3):86-96.Deng Fayun, Pei Yousheng, Hu Yinxiao, et al, 2025. Prospecting potential analysis of M1 magnetic anomaly based on the geophysical in Gemalong Ag polymetallic deposit, east Kunlun, Qinghai Province[J]. Northwestern Geology,58(3):86-96.

段俊,Teuku Amrul Mahdi,王宁,等,2025.金川铜镍矿床多硫同位素和铁同位素特征及成因意义[J].西北地质,58(4):56-68.Duan Jun, Teuku Amrul Mahdi, Wang Ning, et al, 2025. Characteristics and genetic implications of multiple sulfur and iron isotopes in the Jinchuan Cu-Ni Deposit [J].Northwestern Geology,58(4):56-68.

高辉,Hronsky J,曹殿华,等,2009.金川铜镍矿床成矿模式、控矿因素分析与找矿[J].地质与勘探,45(3):218-228.Gao Hui, Hronsky J, Cao Dianhua, et al, 2009. An analysis on metallogenetic model and ore-control factors of Jinchuan Cu-Ni(PGE) magmatic sulfide deposit and its exploration implications [J]. Geology and Exploration, 45(3): 218-228.

宫江华,张建新,于胜尧,2011.阿拉善地块南缘龙首山岩群及相关岩石的起源和归属:来自LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄的制约[J].岩石矿物学杂志,30(5):795-818.Gong Jianghua, Zhang Jianxin, Yu Shengyao, 2011. The origin of Longshoushan Group and associated rocks in the southern part of the Alxa block: constraint from LA-ICP-MS U-Pb zircon dating[J].Acta Petrologica et Mineralogica,30(5): 795-818.

侯增谦,陈骏,翟明国,2020.战略性关键矿产研究现状与科学前沿[J].科学通报,65(33):3651-3652.Hou Zengqian, Chen Jun, Zhai Mingguo, 2020. Current status and frontiers of research on critical mineral resources[J]. Chinese Science Bulletin,65(33):3651-3652.

李文渊,2022a.中国岩浆铜镍钴硫化物矿床成矿理论创新和找矿突破[J].地质力学学报,28(5):793-820.Li Wenyuan, 2022a. Study of ore-forming theoretical innovation and prospecting breakthrough of magmatic copper-nickel-cobalt sulfide deposits in China[J].Journal of Geomechanics,28(5):793-820.

李文渊,董福辰,王永和,2022b.西北地区矿产资源潜力评价[M].武汉:中国地质大学出版社.Li Wenyuan, Dong Fuchen, Wang Yonghe, et al, 2022b. Evaluation of mineral resources potential in northwest China[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press.

李子永,张利峰,刘亚东,等,2026.综合物探在栖霞金山金矿深边部找矿预测中的应用[J].黄金科学技术,34(1):115-127.Li Ziyong, Zhang Lifeng, Liu Yadong, et al, 2026. Application of integrated geophysical exploration techniques in deep and edge prospecting and prediction of the Jinshan gold deposit in Qixia[J]. Gold Science and Technology,34(1):115-127.

廖圣柱,王子豪,贾慧涛,等,2024.综合物探在矿山深部资源勘查中的应用[J].工程地球物理学报,21(2):267-278.Liao Shengzhu, Wang Zihao, Jia Huitao, et al, 2024. Application of comprehensive geophysical exploration in deep mines resource exploration[J].Chinese Journal of Engineering Geophysics,21(2):267-278.

刘瑾,熊盛青,朱莹洁,2026.基于航磁数据的金川铜镍矿深边部成矿有利区预测[J].地球物理学报,69(2):810-823.Liu Jin, Xiong Shengqing, Zhu Yingjie, 2026. Predic-

tion of deep and peripheral metallogenic-prospective zones in the Jinchuan Cu-Ni deposit using aeromagnetic data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 69(2): 810-823.

吕登，张国亮，郑斐，等，2025. 湖北宜昌红桂香铜矿区综合物探异常特征及找矿潜力分析[J]. 资源环境与工程，39(1)：29-35. Lü Deng, Zhang Guoliang, Zheng Fei, et al, 2025. Comprehensive geophysical anomaly features and prospecting potential of Hongguixiang copper deposit in Yichang, Hubei[J]. Resources Environment & Engineering, 39(1): 29-35.

陶鹏飞，张静，陈实，等，2022. 综合物探方法在新疆阿奇山铅锌多金属找矿中的应用研究[J]. 中国矿业，31(增刊1)：140-145. Tao Pengfei, Zhang Jing, Chen Shi, et al, 2022. Application of comprehensive geophysical prospecting method in lead-zinc polymetallic prospecting in Aqishan, Xinjiang[J]. China Mining Magazine, 31(Suppl.1): 140-145.

王辉，丰成友，张明玉，2019. 全球钴矿资源特征及勘查研究进展[J]. 矿床地质，38(4)：739-750. Wang Hui, Feng Chengyou, Zhang Mingyu, 2019. Characteristics and exploration and research progress of global cobalt deposits[J]. Mineral Deposits, 38(4): 739-750.

王亚磊，李文渊，林艳海，等，2023. 金川超大型铜镍矿床钴的赋存状态与富集过程研究[J]. 西北地质，56(2)：133-150. Wang Yalei, Li Wenyuan, Lin Yanhai, et al, 2023. Study on the occurrence state and enrichment process of cobalt in Jinchuan giant magmatic Ni-Cu sulfide deposit[J]. Northwestern Geology, 56(2): 133-150.

王岩，王登红，孙涛，等，2020. 中国镍矿成矿规律的量化研究与找矿方向探讨[J]. 地质学报，94(1)：217-240. Wang Yan, Wang Denghong, Sun Tao, et al, 2020. A quantitative study of metallogenic regularity of nickel deposits in China and their prospecting outlook[J]. Acta Geologica Sinica, 94(1): 217-240.

王玉玺，王晓伟，王怀涛，等，2026. “分类建模，成果融合”综合信息定量找矿预测技术与找矿应用：以金川超大型铜镍矿区及外围为例[J]. 地学前缘，33(5)：337-349. Wang Yuxi, Wang Xiaowei, Wang Huaitao, et al, 2026. “Classification modeling and outcome integration” comprehensive quantitative mineral exploration prediction technology and application: a case study of the Jinchuan ultralarge Cu-Ni ore deposit and its periphery[J]. Earth Science Frontiers, 33(5): 337-349.

夏强，廖思睿，刘相钊，等，2024. 综合物探方法在青海莫哈尔金多金属矿区的找矿勘查应用[J]. 矿产与地质，38(4)：753-760. Xia Qiang, Liao Sirui, Liu Xiangzhao, et al, 2024. Application of comprehensive geophysical exploration method in the exploration of Mohar gold polymetallic deposit in Qinghai[J]. Mineral Resources and Geology, 38(4): 753-760.

闫海卿，刘巧峰，汤中立，等，2015. 龙首山地块的构造属性：来自U-Pb锆石年龄的约束[J]. 中国工程科学，17(2)：59-72. Yan Haiqing, Liu Qiaofeng, Tang Zhongli, et al, 2015. Structural properties of the Longshoushan block: constraint from LA-ICP-MS U-Pb zircon dating[J]. Engineering Science, 17(2): 59-72.

殷启春，纪元，王康，等，2025. 浅覆盖区浅成低温热液型金矿地球物理勘查方法——以黑龙江省黑河市阿陵河矿区为例[J]. 黄金科学技术，33(2)：225-238. Yin Qichun, Ji Yuan, Wang Kang, et al, 2025. Geophysical exploration method of epithermal gold deposit in shallow overburden area: a case study of Alinghe mining area in Heihe City, Heilongjiang Province[J]. Gold Science and Technology, 33(2): 225-238.

游越新，邓居智，陈辉，等，2023. 综合物探方法在云南澜沧老厂多金属矿区深部找矿中的应用[J]. 物探与化探，47(3)：638-647. You Yuexin, Deng Juzhi, Chen Hui, et al, 2023. Application of integrated geophysical methods in deep ore prospecting of Lanchang polymetallic mining area in Lancang, Yunnan[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 47(3): 638-647.

于兵，王常东，余弘龙，等，2022. 综合物探测量在大兴安岭南段炒米房地区铀矿勘查中的应用[J]. 地质与勘探，58(5)：1070-1081. Yu Bing, Wang Changdong, Yu Honglong, et al, 2022. Application of comprehensive geophysical survey to uranium prospecting of the Chaomifang area in the southern section of Daxing'an Mountains[J]. Geology and Exploration, 58(5): 1070-1081.

翟裕生，2020. 矿床学思维方法探讨[J]. 地学前缘，27(2)：1-12. Zhai Yusheng, 2020. On the method of thinking in studying mineral deposits[J]. Earth Science Frontiers, 27(2): 1-12.

张照伟，钱兵，王亚磊，等，2021. 中国西北地区岩浆铜镍矿床地质特点与找矿潜力[J]. 西北地质，54(1)：82-99. Zhang Zhaowei, Qian Bing, Wang Yalei, et al, 2021. Geological characteristics and prospecting potential of magmatic Ni-Cu sulfide deposits in northwest China[J]. Northwestern Geology, 54(1): 82-99.

张照伟，谭文娟，杜辉，等，2023. 金川岩浆镍钴硫化物矿床深部找矿勘查技术研究[J]. 西北地质，56(6)：242-253.

Zhang Zhaowei, Tan Wenjuan, Du Hui, et al, 2023. Study on exploration techniques of deep ore prospecting in Jinchuan magmatic Co-Ni sulfide deposit, northwest China[J]. Northwestern Geology, 56(6): 242-253.

张照伟, 谭文娟, 王小红, 等, 2022. 西北地质调查与战略性矿产找矿勘查[J]. 西北地质, 55(3): 44-63. Zhang Zhaowei, Tan Wenjuan, Wang Xiaohong, et al, 2022. Geological survey and prospecting of strategic minerals in northwest China[J]. Northwestern Geology, 55(3): 44-63.

赵建宇, 2019. 综合地球物理方法在金川铜镍硫化物矿床深部勘查中的应用[D]. 长春: 吉林大学. Zhao Jianyu, 2019. Application of comprehensive geophysical method in deep exploration of Jinchuan copper-nickel sulfide deposit[D]. Changchun: Jilin University.

Application of Comprehensive Geophysical Exploration Technology in Target Area Verification of Copper-Nickel Ore Around Jinchuan—A Case Study of Yangjiadashan Ore Spot in Ningyuanbao Area

HE Jinglong[1,2], GAO Qi[1,2], JIA Xu[1,2], LIU Cheng[1,2], ZHAO Xingzhi[1], ZHAO Xiaojun[1], QIN Ning[1]

1. *Xi'an Center of Mineral Resources Survey, China Geological Survey, Xi'an* 710100, *Shaanxi, China*;

2. *Technology Innovation Center for Gold Ore Exploration, China Geological Survey, Xi'an* 710100, *Shaanxi, China*

Abstract: Cu-Ni sulfide deposits represent critical strategic resources within the non-ferrous metal sector. However, the exploration of these deposits, particularly in deep and peripheral regions, is fraught with significant challenges due to complex overburden and concealed ore bodies. Traditional geophysical methods, when applied singularly, exhibit notable limitations in this context, such as pronounced anomaly multiplicity and reduced interpretative accuracy, thereby hindering detailed exploration efforts around the extensive Jinchuan Cu-Ni deposit. This study addresses the technical challenges associated with the unclear identification of concealed ultramafic ore-bearing rock masses and the ambiguous differentiation between ore and non-ore anomalies. The research focuses on the Yangjiadashan area, located in the southeastern periphery of the Jinchuan rock mass. By integrating regional geological conditions and rock physical properties, the study employs a combination of high-precision magnetic surveys, induced polarization (IP) mid-gradient measurements, and bilateral three-pole IP sounding for field exploration. This study introduces an innovative "screening+weighting" multi-parameter fusion method designed to integrate magnetic ΔT, apparent resistivity, and polarizability data. This approach effectively mitigates lithological and overburden interference, reduces data redundancy, and enhances the precision of delineating concealed ore targets. Drilling validation has revealed a continuous pyrite ore body with an apparent thickness of approximately 5 meters at a depth of 264 to 269 meters, exhibiting sulfur and iron contents ranging from 13.60% to 26.43% and 10.65% to 15.58%, respectively. These findings confirm the applicability of the integrated geophysical and multi-parameter fusion technology for deep prospecting in the peripheral area of the Jinchuan deposit. Furthermore, this research offers a valuable technical reference for the detailed exploration of concealed copper-nickel ore bodies in similar mining regions and supports subsequent deep resource exploration of the Jinchuan deposit.

Key words: copper-nickel ore; target area verification; comprehensive geophysical exploration method; Yangjiadashan ore spot; target location; Jinchuan mining area