第 58 卷 第 4 期 2025 年 (总 242 期)

北 西 地 质

NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 58 No. 4 2025(Sum242)



**引文格式:**陈实,李平,李大海,等.新疆北部造山带岩浆铜镍硫化物矿床地球物理勘查现状与展望[J].西北地质, 2025, 58(4): 118-130. DOI: 10.12401/j.nwg.2025055

**Citation:** CHEN Shi, LI Ping, LI Dahai, et al. Current Status and Prospects of Geophysical Exploration of Magmatic Cu-Ni Sulfide Deposits in Northern Xinjiang Orogenic Belt[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(4): 118–130. DOI: 10.12401/j.nwg. 2025055

# 新疆北部造山带岩浆铜镍硫化物矿床地球物理 勘查现状与展望

陈实,李平,李大海,牛辉,胡尊平,张静

(新疆维吾尔自治区地质研究院,新疆乌鲁木齐 830000)

摘要:新疆北部造山带内产出的岩浆型铜镍矿床是中国西北地区重要的铜镍资源基地。在岩浆铜镍硫化物矿床的地球物理勘查过程中,总结建立了高磁化率、高重力、高极化率、低电阻率"三高一低"的综合地球物理找矿标志,进而指导发现和评价了一批中大型矿床。随着重要成矿带地质工作程度不断提升,岩浆铜镍硫化物矿床的找矿方向逐渐转向深边部隐伏矿,对深部矿体的勘查需求明显增加。笔者结合新疆北部造山带环境岩浆铜镍硫化物矿床的地质特征,分析了区内近年来铜镍矿勘查中地球物理工作模式的现状及存在难点,针对性的探讨多项地球物理新技术应用前景,为岩浆铜镍硫化物矿床实现大深度、精细化探测目标提供新思路。
关键词:岩浆铜镍硫化物矿床;无人机航空磁测技术;三维激电;高分辨率地震勘探;重磁三维反演中图分类号:P618.63
文献标志码:A

## Current Status and Prospects of Geophysical Exploration of Magmatic Cu-Ni Sulfide Deposits in Northern Xinjiang Orogenic Belt

CHEN Shi, LI Ping, LI Dahai, NIU Hui, HU Zunping, ZHANG Jing

(Xinjiang Geological Research Academy, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

**Abstract:** The magmatic Cu-Ni sulfide deposits produced in the northern orogenic belt of Xinjiang are important Cu-Ni resource bases in northwest China. In the process of geophysical exploration of magmatic Cu-Ni sulfide deposits, comprehensive geophysical prospecting indicators of High magnetism, High weight, High polarizability, Low resistivity (Three High with One low) were summarized and established, which guided the discovery and evaluation of a number of medium and large deposits. With the continuous improvement of geological work in the mineralization zone, the exploration direction of magmatic Cu-Ni sulfide deposits has gradually shifted to concealed and deep orebodies, and the difficulty of exploration has significantly increased. Based on

收稿日期: 2024-12-12; 修回日期: 2025-04-08; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目:新疆重点研发计划项目"天山成矿带铜镍钴资源预测与潜力评价"(2023B03006-4)、"戈壁荒漠浅覆盖及高寒深 切割区找矿技术集成与智能预测课题"(2023B03017-3),新疆地质局地质科技项目青年人才计划"基于空地井多源 数据的地球物理综合解释方法研究"(XGBYP202505)联合资助。

作者简介:陈实(1992-),男,高级工程师,主要从事矿产地球物理技术应用研究工作。E-mail:1312206901@qq.com。

the geological characteristics of magmatic Cu-Ni sulfide deposits in northern Xinjiang, the author analyzed the current status and existing problems of geophysical exploration modes in the area in recent years, and explored the application prospects of multiple new geophysical technologies, providing new ideas for achieving deep and refined detection targets of magmatic Cu-Ni sulfide deposits.

**Keywords**: magmatic Cu-Ni ore; unmanned aerial magnetic survey technology; 3D induced polarization; high-resolution seismic exploration; 3D inversion of gravity and magnetic

岩浆型铜镍矿床是指受镁铁质-超镁铁质岩体控制的富含 Cu、Ni的硫化物矿床,其在成矿背景方面可 分为3类:大陆陆内或边缘裂解背景、造山带后碰撞 伸展背景和大火成岩省背景(汤中立,2006,2011;高 晓峰等,2025)。新疆北部位于中亚造山带的南部偏 西地区,是全球显生宙陆壳增生与改造最明显的地区, 经历了增生造山、碰撞后伸展和大陆改造作用3个阶 段。因此,新疆北部岩浆型铜镍矿在成因上多与古生 代晚期发育的镁铁-超镁铁岩密切相关。针对该类矿 床具有含矿岩体规模小、多期次侵入、岩体呈局部带 状分布、岩相分异程度较高的特点(张照伟,2015, 2021),传统"重力-磁法-激电"综合物探技术在岩 浆型铜镍矿勘查中圈定镁铁-超镁铁岩体平面范围、 识别岩体含矿性等任务中发挥了重要的先导作用。

新疆作为中国重要的矿产资源基地,铜、镍两类 战略性矿种已成为优势矿种,矿产资源储量居全国前 五,开发中的大中型矿床多位于东天山及阿勒泰山南 部地区,成矿环境主要以造山带为主,成矿后期叠加 了多期次的构造改造、次生富集事件(薛洪伟,2024)。 近年来,随着新一轮找矿突破战略行动的深入实施, 成矿带内地质工作程度不断提高,发现露头矿的难度 越来越大,找矿工作逐渐转入寻找覆盖区隐伏矿、矿 山深部盲矿体的新阶段。

面对新的找矿形势,传统或单一的物探技术应用 效果有限,需要采用更大深度、更高分辨率的地球物 理探测新技术,结合精细数据处理方法,快速有效地 开展铜镍矿勘查评价工作。近年来,在新疆北部岩浆 型铜镍硫化物矿床的勘查工作中,地球物理探测新技 术的示范应用工作得到重视和推广,工作模式从传统 的地面重磁电面积测量逐渐延展为"空-地-井"一 体化勘查的新模式(张杰,2013)。应用地球物理新技 术促进了区内岩浆岩铜镍矿的找矿突破工作,其中, 无人机航磁新技术为深切割区的数据采集工作提供 了重要支撑,三维激电新技术拓展了激电技术的探测 深度和数据精度,重磁数据三维反演新技术可快速获 取浅覆盖区地质构造信息。

笔者在系统总结新疆北部造山带内岩浆型铜镍 矿地质-地球物理特征基础上,分析了常规地球物理 探测技术在矿床勘查中的应用现状,阐述了不同地质 地貌环境中物探技术应用存在的困难,针对性地提出 具有良好应用前景的新技术新方法,并探讨了其应用 适用性,以期在新一轮找矿行动中取得新的找矿应用 效果。

## 1 岩浆型铜镍矿的地质-地球物理特征

新疆北部岩浆型铜镍矿在成因上与造山带内的 镁铁--超镁铁岩体密切相关(邓振球, 1990)。这些含 铜镍矿化岩体主要受控于5条镁铁-超镁铁岩带,阿 尔泰造山带喀拉通克岩带位于东准噶尔古生代多岛 弧盆系,西天山造山带菁布拉克岩带位于伊宁-中天 山微地块,兴地岩带位于塔北活动陆缘带,东天山造 山带黄山岩带位于科克森套-康古尔俯冲增生杂岩带, 北山岩带位于北山古生代活动陆缘带(图1)。在成岩 时代上,喀拉通克岩带、黄山岩带及北山岩带均形成 于早二叠世,也是区内重要的成矿成岩时代,兴地岩 带形成于元古宙,菁布拉克岩带则形成于早古生代。 在成矿特征上,上述岩带基本具有如下共性:①与区 域性韧性剪切带或深大断裂相伴,次一级断裂严格控 制了含矿岩体的产出形态。②均赋存小型镁铁--超镁 铁岩体内,岩体面积多为 0.03~5 km<sup>2</sup>,具有明显的 "小岩体成大矿"的特征。

喀拉通克岩带由 13 个小岩体组成, 区域上位于 二台断裂带与额尔齐斯断裂带交汇点南西侧, 呈 NW 向分布在长 200 km、宽 10~20 km 的范围内, 含矿岩 体基性程度相比其他岩带明显偏低。喀拉通克大型 铜镍矿床位于该岩带的中部, 已发现 9 个镁铁质-超 镁铁质岩体, 均侵位于下石炭统南明水组火山沉积碎 屑岩地层中, 地层中局部发育碳质板岩。矿区内发现 有 13 个镁铁质岩体, Y1-Y11 号岩体集中分布于矿区



#### 图1 新疆北部大地构造及岩浆型铜镍矿床分布图



西部,G21-G22 号岩体分布于矿区东部,面积0.1~0.3 km<sup>2</sup>, 多数为隐伏岩体(图 2a)。其中Y1、Y2、Y3 为主要的 赋矿岩体,Y1 岩体基本全岩矿化,Y2、Y3 岩体以稀疏 或稠密浸染状为主,岩体垂向分异较好,从浅至深为 角闪辉长、苏长和闪长岩相,苏长岩相为主要含矿岩 相。在物性特征上,铜镍矿体相对母岩(或围岩)具有 高密度、强磁性、高极化率、低阻特征,显著的物性差 异使得喀拉通克矿床具有"高重、高磁、高极化率、 低电阻率"的综合地球物理特征。在喀拉通克1号 岩体重磁测量等值线图中(图 2b),高磁(300 nT)、高 剩余重力(0.3 mGal)的异常范围与含矿岩体的平面范 围保持高度一致,显示了"重磁同源"解释方法在圈 定该类矿床找矿靶区任务中的重要作用。

黄山岩带是区内岩浆型铜镍矿床分布最多的一 个地区,东西向展布于康古尔区域断裂的两侧,镁铁 质岩带呈现分段集中分布的特点。前人认为黄山岩 带的范围向西不会超过库木塔格沙垄,但近年来在沙 垄以西发现了路北、云海、白鑫滩等中型铜镍矿床, 极大地拓展了黄山岩带向西的找矿空间。黄山岩带 的镁铁--超镁铁质岩体多呈半隐伏状态产出,出露面 积多小于 3 km<sup>2</sup>,平面形态基本以透镜状、近藕节状展 布,受岩体高分异作用,矿体多产出于岩体中下部或 底部。其矿床产出具有"东多西少、东富西贫、东早 西晚"的特点,东部黄山、图拉尔根、葫芦等大型矿 床开发程度较高,最大开采深度超过1000m,新发现 的路北、白鑫滩等矿床处于勘探初期,勘探深度不足 500m。黄山岩带内以沙垄为界,东西各段矿床在重 磁场特征上略有不同:东段岩体地磁异常幅值大于 1000nT,普遍高于西段岩体,初步认为该特征与岩体 规模及岩体中磁黄铁矿含量差异有关,重磁高异常套 合一致,黄山岩体在矿集区地球物理场中表现为典型 的高剩余重力(>0.3mGal)、高磁(>1000nT)、高视 极化率(>15%)的典型特征;西段的白鑫滩、路北矿 床的物探高异常一致性较差,多与断裂破坏、构造改 造等因素有关。

北山岩带可细分为坡北岩带和笔架山岩带,共发 现镁铁质岩体超过 30 个,空间分布严格受控于区内 的红柳河断裂及白地洼断裂。相比于喀拉通克岩带 及黄山岩带,北山地区镁铁--超镁铁质岩体表现出 "规模大、带状展布、矿化蚀变程度低"的地质特征。 在区域地球物理场特征中,坡北、笔架山等岩体均位 于"白地洼"重力高的边缘梯级带上,在矿区重力场

2025年



沼泽沉积; 2. 洪积冲积层; 3. 红色黏土层; 4. 粉砂质泥岩、泥板岩、片理化沉凝灰岩; 5. 泥板岩夹少量沉凝灰岩;
6. 沉凝灰岩、霏细岩薄层; 7. 泥板岩; 8. 碎屑硅化凝灰岩、霏细岩; 9. 红桂石板岩、砂岩、含碳质沉凝灰岩;
10. 霏细岩; 11. 钠长斑岩; 12. 花岗斑岩; 13. 花岗闪长岩; 14. 闪长岩; 15. 辉绿玢岩; 16. 玄武安山岩、安山岩;
17. 含矿岩体及编号; 18. 氧化矿体; 19. Δz 正异常等值线; 20. Δg 剩余正异常等值线;
a. 喀拉通克岩群地质图; b. 喀拉通克 Y1 岩体地质图

#### 图2 喀拉通克岩带地质-地球物理综合图

Fig. 2 Geological and geophysical comprehensive map of Karatongke rock belt

中也表现为弱重异常,坡北岩带、笔架山岩带、旋窝 岭岩体处于区域负磁异常中,异常幅值-200~-100 nT。 坡北岩体重力场表现为条带状高剩余重力异常中内 套多个重力低环形异常,航磁场中表现为 NE 向磁场

梯度带上的似椭圆状负磁异常,局部高磁平面形态为 不规则串珠状,研究认为局部低重力异常与橄榄石的 氧化、伊丁石化有关,负磁成因与镁铁--超镁铁岩体剩 余磁化强度远大于感应磁化强度且方向相反有关(庄

笔者在总结新疆北部主要岩浆铜镍硫化物矿床 地质-地球物理特征的基础上(表1),通过综合分析得 出以下认识:由于岩浆型铜镍矿形成于岛弧边缘的造 山带,区域深大断裂极大地影响了成矿岩体的分布范 围,在区域重力场中显示为梯度带;区域航磁可较好 的反映控矿岩体的成矿背景,1:5万以上的大比例尺 航磁中,100~300 nT的局部弱异常需要重点检查,而 小比例尺的航磁成果中难以辨认成矿岩体;在中大比 例尺激电中梯扫面成果中,由于蚀变带富含硫化物, 极化率幅值明显升高,多呈现为中低电阻率特征。在 矿集区尺度的地球物理特征方面,认为以下3个条件 是开展物探工作的有利物性条件:①含矿岩体一般为 镁铁--超镁铁质的高密度体。②岩体中普遍含有磁铁 矿、黄铁矿、黄铜矿等强磁性物质,磁化率明显升高。 ③在岩浆分异及上涌过程中经历了硫化物浸染作用, 广泛发育的硫化物使得岩体表现出显著的高极化率 (姚卓森, 2014)。

#### 铜镍矿地球物理勘查现状 2

前人依据矿床岩体与地层之间的物性差异,建立 了岩浆型铜镍矿中"高重、高磁、高极化率、低电阻 率"的地球物理找矿标志,形成了一套基于重磁电技 术的多尺度地球物理探测技术体系。具体工作模式 为:①通过区域成矿带尺度开展的重磁面积测量工作 划分区域断裂与识别成矿地质体。②通过矿集区尺 度的高精度磁测及激电中梯测量圈定含矿岩体的平 面展布范围。③通过勘探线剖面的激电测深及电磁 测深识别深部岩体含矿性。这套趋于成熟的岩浆型 铜镍矿的地球物理探测模式,已在多个矿集区取得了 显著的勘探成果(唐小平, 2022)。

#### 2.1 重磁勘查技术

重磁勘探以地质体与围岩之间具有密度或磁性 差异为物理基础,采用扫面测量模式快速采集目标区 的重力场或磁场数据,经过各项校正处理后,可获得

表 1 新疆北部主要岩浆铜镍硫化物矿床地质-地球物理特征一览表

Tab. 1 List of geological and geophysical characteristics of major magmatic Cu-Ni sulfide deposits in Northern Xinjiang							
岩体名称	矿床规模	平面形态及 面积(km <sup>2</sup> )	矿体赋存 位置	围岩类型	勘探深度	地球物理特征	资料来源
喀拉通克	超大型	纺锤形; 1.7	岩体中心或 中下部	石炭系南明 水组	>1 000 m	航磁异常为孤立等轴状高磁异常,极大 值150 nT(隐伏岩体幅值<100 nT);剩余 重力异常0.1~0.2 mGal	秦克章等, 2014
黄山东	大型	扁长菱形; 2.8	岩体底部	中石炭系干 墩组	>1 000 m	航磁极大值211 nT,地磁极大值1300 nT, 剩余重力极大值1.15 mGal;含矿岩体表 现为低阻高极化	绍行来, 2012
葫芦	中型	似葫芦状; 0.75	岩体中下部 和底部	下石炭统梧 桐窝子组	< 500 m	航磁极大值375 nT, 地磁极大值2224 nT, 剩余重力极大值0.75 mGal; 含矿岩体表 现为低阻高极化	夏明哲等, 2008
图拉尔根	大型	透镜状; 0.6	产于岩体 中部	中—上石炭 统火山碎屑 岩	<700 m	航磁异常北东段>1000 nT、向南东方向 迅速减弱, 地磁极大值2383 nT, 剩余重 力异常极大值1.1 mGal; 含矿岩体表现为 低阻高极化	三金柱等, 2007
路北云海	中型	扁圆状; 3.64	浅层矿;岩 体底部	下石炭统小 热泉子组	<400 m	航磁中为孤立的弱磁异常, 地磁极大值 约400 nT; 路北区重力异常相对较低; 含矿岩体表现为中阻高极化	李大海等, 2018
白鑫滩	中型	纺锤状; 1.5	岩体底部, 呈似层状	中—下奥陶 统恰干布拉 克组	<500 m	呈现高磁、低重、高极化率、 低电阻特征	韩建华等, 2022
红石山	中型	菱形; 5.3	岩体底部	下石炭统红 柳园组	< 500 m	地磁极大值1356 nT, 弱低重异常, 含矿 岩体表现为低阻高极化	苏本勋等, 2009
坡十	大型	椭圆状; 3.2	岩体底部	古元古界敦 煌岩群	< 500 m	地磁异常极大值600 nT,强正磁异常套 合重力低(-0.6 mGal)异常,激电显示低 阻和较高极化率异常	秦克章等, 2012
启鑫	中型	带状; 150	岩体底部	古元古界敦 煌岩群	< 500 m	航磁范围-55~195 nT, 地磁-320~280 nT, 弱重异常带,含矿岩体表现为低阻高 极化	刘月高等, 2019

地下岩体的重力异常和磁异常。通常情况下,镁铁--超镁铁质岩体的密度和磁化率会明显高于围岩,从而 在地表形成明显的重磁高值异常。

1:5万重磁面积测量是区内地球物理调查工作 的重要技术,基本已实现了成矿带全覆盖。在研究程 度较高的东天山成矿带,1:2.5万或更小比例尺数据 以航空重磁为主,1:1万或更大比例尺的地面高精度 磁测数据多集中在矿集区尺度;而在其他成矿带,区 域重磁勘探的工作程度较低,多以5万或更小比例尺 航磁数据为主(图3、图4)。



图3 新疆北部重力工作程度图(截至 2022 年)

Fig. 3 Gravity method work degree map in Northern Xinjiang



图4 新疆北部磁法工作程度图(截至 2022 年) Fig. 4 Magnetic method work degree map in Northern Xinjiang 由于重力和磁场均属于随距离呈指数关系衰减 的位场,作为高密度、高磁化率的镁铁--超镁铁含矿岩 体,赋存深度越大,其异常强度衰减越多,直至统一于 背景场。磁场相对重力场随深度衰减速率更快,因而 磁异常反映的地质体深度较浅,地表若出露有铜镍矿 体,磁异常形态严格对应于地表矿化且表现为极强的 锯齿状峰值,异常幅值在1000~2000 nT范围内;若 地表只有岩体,磁异常形态较为平缓,幅值范围一般 为100~500 nT。重力异常与磁异常也有着类似的变 化规律,地表矿化对应极高的尖峰异常值,岩矿体隐 伏深度不同,引起剩余重力异常的变化也不同。因此, 前人在区内圈定该类型矿床的找矿靶区时,多以"重 磁同源"为原则,优选高磁、高重套合一致的综合异 常开展查证工作。

#### 2.2 激电勘查技术

岩浆型铜镍矿床因其含有丰富的硫化物,会产生 明显的激发极化现象,即极化率高值异常。岩矿石在 稳恒电流场和交变电流场激发下均可观测到激电效 应,据此产生了时间域激电法(TIP)和频率域激电法 (SIP)。两种方法在反映岩矿石的激电效应上是一致 的,但在有些方面存在差异:TIP 测量参数为极化率或 充电率,SIP 测量参数为频散率或相位;TIP 设备体积 大系统复杂,适合在平原地区开展激电普查工作,SIP 设备轻便、抗干扰能力强,能在地形切割强烈、存在 电磁干扰的地区发挥更大的作用。

目前对激电技术的应用主要为矿集区尺度的激 电扫面及激电测深工作。其中,1:5万时间域激电 普查技术由刘士毅等人提出、庄道泽等(2004)引入 新疆后,广泛应用于区内各类金属矿产普查工作中, 成为找矿突破行动中综合物探项目中的主要调查方 法之一。受限于工作效率,1:5万激电面积测量覆 盖率较低,只在部分找矿有利区段开展工作(图5)。 1:1万大比例尺激电普查及激电测深工作为查明岩 体的含矿性发挥了重要作用,但激电测深存在效率 极低,探测深度有限的难题,极大影响了该技术的找 矿作用。





在数据处理方面,对于激电异常的解释仍以"发现异常-定性分析"为主,激电测深中二维反演成果的应用效果欠佳。受到激电勘探中电场体积效应的影响,激电异常的上界面通常与岩体的顶界面有关,反演深度与钻孔定位深度吻合度不高。

#### 2.3 电磁勘查技术

电磁法是以地壳中不同岩矿石之间电性差异为 物理基础,通过观测人工或天然形成电磁场的时间和 空间分布规律,实现查明深部地质构造的目标。

目前,在区内应用最为广泛的是可控源大地电磁

测深技术(CSAMT),最大勘探深度 1.5 km,相比于天 然源大地电磁技术,具有效率高、抗干扰、分辨率较 好等优点,重点应用于普查区勘探线剖面的构造识别、 岩体划分及钻探指导等工作。与激电测深技术类似, 电磁剖面成果易受到体积效应和旁侧效应的影响, 单一剖面或方法的异常多解性程度高,难以开展合理 的地质解释(柳建新,2019)。在数据处理方面,静校 正处理流程过于模式化,缺少针对性;剖面的反演成 像在中深部分辨率明显降低,不利于开展深部找矿 工作。

#### 2.4 井中地球物理勘探

在深部矿产资源勘查中,深部矿体异常弱、地表 干扰严重等问题影响了物探工作的效果,井中地球物 理探测技术能够在钻孔中实现全方位测量,避开了浅 部干扰,更接近地质体,具有较高的垂向分辨率(米宏 泽,2019)。其中,地--井瞬变电磁技术、井中三分量磁 测及井中激发极化法在寻找深部隐伏矿中有着独特 的优势。

在上一阶段铜镍矿普查项目中,由于国产测井设 备的数据精度及稳定性不高,多数普查项目中未开展 综合地球物理测井工作,一定程度上限制了深部找矿 的勘查效果。近年来,中国成功研制了多种高精度、 小孔径的井中地球物理勘查技术装备,各项技术指标 已与国际先进产品保持同步(张杰,2013;袁桂琴, 2016),应提升井中物探新设备在铜镍矿普查工作的 应用水平,联合地面物探测量成果建立地-井一体化 探测体系,为矿区攻深找盲工作提供新思路。

## 3 深部勘查制约难点

在矿区勘查工作中,有效应用地球物理技术需要 满足3个前提条件:目标地质体与周围介质之间存在 明显的物性差异;目标地质体具有一定的埋藏深度和 规模;观测仪器采集的信号能区分有用信号和干扰信 号。新疆北部造山带内特殊的地理地质条件给成矿 带内寻找隐伏矿、矿体精细化探测方面带来了困难和 挑战,在提升勘查精度及增大勘查深度方面主要存在 以下难点:

(1)前人总结的"三高一低"的物性特征,在找 矿实践过程中很难一以论之。这类组合特征只有在 含矿岩体形态简单、岩相分异清楚、围岩物性差异明 显的前提条件下才能成立。对于北疆造山带内的铜 镍矿床,很少有同时满足上述条件的矿床,产生的重 磁电异常也很难统一到"三高一低"典型特征中。 如东天山地区部分镁铁-超镁铁岩体因抗风化能力较 弱或构造蛇纹岩化,在重力资料中表现为相对低重异 常;月牙湾铜镍矿2号岩体、坡北岩体在地面磁测资 料中表现为强负磁异常,影响矿致异常的识别工作。

(2)在造山带核心区多为切割强烈、地形起伏 强烈的山区,根据近年来的找矿经验,山区内具有 显著的铜镍矿找矿潜力。区域性的重磁测量成果是 优选铜镍矿找矿靶区的重要基础资料,上述区域覆 盖的中小比例尺航磁成果中,由于采用直升机航测, 飞行高度较大,已知矿床的镁铁质岩体多形成弱磁 异常,重力工作由于地形改正精度低影响异常划分, 因此,切割强烈区的重磁工作亟需采用效率高、设 备轻便、精度高的物探仪器开展大比例尺重磁面积 测量工作。

(3)综合分析岩浆型铜镍矿的成矿层位,铜镍矿 体多位于橄榄岩或辉橄岩体中下部,激电测深作为识 别岩体含矿性最有效的手段,近年来在多个矿集区的 应用中发现,普遍存在勘探深度不足、异常解释不佳 的问题。常规的激电勘查技术受限于装备技术水平, 多采用 5~10 kW 功率的发射电源,在提升野外工作 便捷性的同时,也限制了勘探深度,最大探测深度不 足 400 m, 难以获取"第二找矿深度"的地质信息。 此外,新疆北部地区地层中普遍存在富含碳质、土壤 盐渍化、地表干燥等不利因素,严重影响了激电测深 的探测效果和异常识别工作。

(4)北疆地区广泛分布大面积的中新生界覆盖区, 仅戈壁、荒漠覆盖区所占的总面积就高达 22 万 km<sup>2</sup>, 占北疆地区总面积的 48%,特别是造山带边缘的覆盖 区找矿潜力巨大。区内多数岩体呈现隐伏特征,传统 的地质工作难以发现有效的找矿线索,需要对覆盖区 已有的地质资料进行二次开发,综合地质、物探、化 探成果圈定新的找矿靶区。

## 4 铜镍矿勘查的新方法与新技术

随着地球物理技术的不断发展,以无人机航磁、 大功率三维激电、高分辨率地震勘探、三维反演为主 的新技术快速进步,上述方法的仪器设备在工作效率、 勘探深度、数据分辨率、抗干扰能力方面得到明显提 升,在多个矿区勘查中取得了良好的应用效果,为不 同地质地貌条件中的铜镍矿数据采集及信息处理提 供了新的解决方案。

## 4.1 无人机航空磁测技术

近十年来,基于无人机平台的航磁技术得到快速 发展,与传统的航空物探相比,无人机航磁技术具有 分辨率高、机动性强、成本低、操作简单、智能化等优 势,可在交通难到达区、地形切割强烈区开展大比例 尺航磁扫面工作,实现深切割地区隐伏岩体快速定位 的工作目标。

无人机平台根据动力形式可分为: 垂起固定翼、 无人直升机、多旋翼。其中, 多旋翼航磁系统适合进 行超低空高分辨率异常检查或重点区精细测量(王猛, 2022; 刘双, 2023)。国内多家科研单位或企业已研制 开发了基于无人机飞行平台的航空磁测系统, 如中国 地调局彩虹系列、中国海洋大学 Z3 型、浙江大年科 技 DN20-G4 型、深圳加泰科 GTK 系列等,上述装备 搭载了高精度光泵磁力仪,均具备超低空沿地形起伏 飞行能力。武雪山等(2021)采用小型旋翼无人机及 数采组成的航磁测量系统在备战铁矿开展高山深切 割地形条件下的测试与应用,获得了关键区域高精度 磁异常数据,推断出了区内存在的隐伏磁铁矿体。 2024年,新疆地质调查院使用旋翼无人机航磁系统在 东天山哈密铜镍矿区开展了地磁及航磁的对比应用, 无人机飞行高度为 100 m。通过对应分析,认为无人 机航磁能克服交通不便、地形切割强烈等困难,工作 效率提高数十倍,查明了区内成矿镁铁-超镁铁岩体 的空间分布特征,反映的磁场特征与同比例尺地面磁 测结果基本一致(图 6)。



a. 矿区地貌图; b.1:1万地磁△T等值线图; c.1:1万航磁△T等值线图

图6 东天山哈密铜镍矿区磁测成果对比图

Fig. 6 Comparison of magnetic survey results in East Tianshan Mountains Hami Co-Ni mining area

### 4.2 三维激电技术

近年来,国内研究人员突破了超大功率、分布式 激电设备的关键技术,激电技术在观测空间、观测装 置、电极布置上不再拘泥于常规观测方式,三维观测 装置配合百千瓦级别的超大功率发射系统,可获取更 为丰富、更大深度的地质体地电信息(胡玉平,2021)。 北京有色地质矿产研究院自主研发了震旦大功率三 维激电系统,最大发射功率 180 kW,总体技术指标达 同类进口仪器水平。2022年,该系统在新疆阿舍勒铜 矿、哈密红石铜多金属矿进行了示范性应用,对环形 山新发现异常进行了验证,钻孔见硫化物与激电剖面 异常套合较好探测。2024年,新疆地质调查院应用该 技术在云海铜镍矿区开展三维探测(图7),"180 kW 大功率发射源+百套接收机"的工作模式,可快速获 取矿区4 km<sup>2</sup>内的电性分布特征,与常规激电测深成 果相比,三维激电技术克服了区内地表盐渍化、局部 炭质层的影响,探测深度超过 800 m,电阻率断面信息 与矿体吻合程度较高。在现阶段矿产勘查的基础上, 在 400 m 以下发现了新的高极化率异常区域,极大地 拓宽了区内的找矿空间。







#### 4.3 高分辨率浅层地震勘探

浅层地震具有精度高、探测深度大、可定量解释 的特点,能弥补重、磁、电勘探在寻找隐伏矿体方面 中存在的不足(王柯淇, 2021)。长期以来, 地震勘探 在金属矿勘查中效果不佳,主要原因是金属矿的复杂 地质特征难以满足地震勘探的基本条件。肖骑彬等 (2005)在图拉尔根铜镍矿区、白石泉铜镍矿区开展了 地震勘探工作,与电磁测深成果对比综合解译出成矿 有利部位及控矿构造。刘建勋等(2017)将该方法技 术应用于新疆喀拉通克铜镍矿区深部找矿,把压制干 扰噪声作为数据采集和资料处理的重点,采用强能量 震源激发、小道间距、高覆盖次数的观测系统,推测 该无反射透明区可能为中性或酸性隐伏岩体(图 8), 部分成果得到钻孔验证(薛国强, 2023)。此外,以密 集台阵短周期探测为主的被动源地震探测具有成本 低、探测深度大、范围广的特点,逐步应用在其他类 别的金属矿深部探测工作中,胶东地区基于地震短周

期密集台阵开展的被动源地震探测,获得了胶东地区的精细地壳结构特征,为研究区的构造背景和深部动力学过程提供了有力的地球物理学证据。

#### 4.4 重磁数据三维反演

重磁异常需要经过反演才能得到岩(矿)体的密 度或磁化率参数信息。随着计算机硬件水平的提升, 重磁反演模型已经不局限于二维水平层状界面,可快 速拟合三维复杂地质体,该项技术已经应用于世界级 矿床的发现与详查勘探中。严加永等(2019)采用重 磁三维物性反演技术,获得长江中下游成矿带磁化率 和密度差三维模型,根据物性与岩性对应关系,识别 和分析了区内岩浆岩体三维空间结构。索奎等(2018) 利用高精度重磁数据使用约束反演获得了研究区地 下海拔-10 km以浅的三维密度和磁性结构。邓震等 (2019)在准噶尔北缘浅覆盖区充分应用重磁三维物 性反演技术,融合地质、地球化学、浅钻等综合信息, 获取了图幅基岩地质图,成功预测并发现了覆盖层之



图8 新疆北部喀拉通克铜镍矿区地震勘探成果图(刘建勋等, 2017) Fig. 8 Seismic exploration results of Karatongke Cu-Ni mining area in Northern Xinjiang

下的隐伏蛇绿混杂岩带。

## 5 结论

(1)区内的铜镍矿找矿工作正由找露头矿转入找 隐伏矿的阶段,形成了系统的中小比例尺的航空重磁 数据,成矿带内的控矿构造认识已趋于一致。针对岩 浆型铜镍矿常具有"小岩体成大矿"的特点,中大比 例尺的重磁资料难以通过异常查证发现成矿岩体。 因岩体形态、成矿类型、矿体形状、赋存深度、碳质围 岩干扰等因素的复杂性,而使得传统地球物理勘探方 法在小岩体类型铜镍硫化物矿床的勘探中遇到瓶颈, 需要更有效新颖的地球物理探测技术应用到该类矿 床的勘探工作中。

(2)新疆北部成矿带在地理景观上多属戈壁荒漠 类,地表出露岩体少,风化程度高,明显加大了地表找 矿的工作难度,三维激电技术配合大功率电场源,最 大探测深度近1km,可在含盐碱地层中获得高信噪比 的激电数据。造山带内部分区域因地形条件较差致 使找矿精度不高,无人机航空磁测技术可克服勘查区 地形切割强烈的工作困难,能快速完成大比例尺航磁 测量任务,准确定位隐伏岩体的平面位置,极大地拓 宽了找矿空间。在新一轮铜镍找矿工作中,应综合成 矿地质特征及物探技术优势,充分应用地面重磁电及 综合测井技术,针对性选择大深度、高精度的探测新 技术,通过实例应用构建"空-地-井"一体化的岩浆 型铜镍矿地球物理探测模式。

(3)在矿集区尺度应用新技术的同时,应注意加 强已有地球物理资料的二次开发工作。如利用大比 例尺重磁数据进行三维物性反演,构建岩体的三维空 间形态,为深部找矿提供新依据,精细划分矿区内的 岩体边界与控矿构造,服务于铜镍矿的地球物理勘探 和解译工作。

致谢:在论文写作过程中,参考了大量的文献 资料,在此向所有的学者、作者及整理者致以衷心 的感谢!

## 参考文献(References):

- 邓震, 孟贵祥, 汤贺军, 等. 浅覆盖区 1:5 万基岩地质填图实践 探索——以准噶尔北缘克什克涅绍喀尔 (L45E009020) 图 幅为例[J]. 地球学报, 2019, 40(5):651-660.
- DENG Zhen, MENG Guixiang, TANG Hejun, et al. 1: 50000 Bedrock Geological Mapping in Shallow Overburden Area: A Case Study of Kashkeneshakar Sheet (L45E009020) on the Northern Margin of Junggar Basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2019, 40(5): 651–660.

邓振球.新疆铜镍硫化物矿床地质-地球物理模式及找矿标志

[J]. 新疆地质, 1990, 8(3): 193-204.

- DENG Zhenqiu. Geological Geophysical Model and Guide of Prospecting of copper-nickel Sulphide Deposit in Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 1990, 8(3): 193–204.
- 高晓峰, 隋清霖, 尤敏鑫, 等. 造山带岩浆铜镍硫化物矿床深部 动力学机制探讨[J]. 西北地质, 2025, 58(3): 206-220.
- GAO Xiaofeng, SUI Qinglin, YOU Minxin, et al. Study on Dynamic Mechanism of Magmatic Copper-Nickel Sulfide Deposits in Orogenic Belts[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(3): 206– 220.
- 胡玉平,张广纯,高珍权,等.基于三维激电勘探的综合地学信 息三维找矿模型[J].矿产勘查,2021,7(12):1582-1586.
- HU Yuping, ZHANG Guangchun, GAO Zhenquan, et al. Three Dimensional Ore Prospecting Model with Comprehensive Geoscientific Information Based on 3D IP Exploration[J]. Mineral Exploration, 2021, 7(12): 1582–1586.
- 韩建华,赵恒乐,李鑫,等.东天山白鑫滩铜镍矿成矿特征及找 矿启示[J].新疆地质,2022,40(1):129-134.
- HAN Jianhua, ZHAO Hengle, LI Xin, et al. Mineralization Characteristics of the Baixintan Copper-nickel Deposit in East Tianshan and Its Prospecting Enlightenment[J]. Xinjiang Geology, 2022, 40(1): 129–134.
- 李大海,田江涛.东天山路北铜镍矿地质特征及岩石地球化学 特征[J].新疆地质,2018,35(4):423-428.
- LI Dahai, TIAN Jiangtao. Geological Characteristics and Lithogeochemical Features of Lubei Cu-Ni deposit, Eastern Tianshan[J]. Xinjiang Geology, 2018, 35(4): 423–428.
- 刘建勋,周建勇,徐明才,等.地震勘查技术在喀拉通克矿区的 应用[J].物探与化探,2017,41(3):437-444.
- LIU Jianxun, ZHOU Jianyong, XU Mingcai, et al. The Application of Seismic Exploration Technology in the Kalatongke Orefield[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(3): 437– 444.
- 柳建新,赵然,郭振威.电磁法在金属矿勘查中的研究进展[J]. 地球物理学进展,2019,34(1):151-160.
- LIU Jianxin, ZHAO Ran, GUO Zhenwei. Research Progress of Electromagnetic Methods in Exploration of Metal Deposit[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(1): 0151-0160.
- 刘双, 胡祥云, 郭宁, 等. 无人机航磁测量技术综述[J]. 武汉大 学学报 (信息科学版), 2023, 48(6): 823-840.
- LIU Shuang, HU Xiangyun, GUO Ning, et al. Overview on the UAV Aeromagnetic Survey Technology [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(6): 823–840.
- 刘月高,吕新彪,阮班晓,等.新疆北山早二叠世岩浆型铜镍硫 化物矿床综合信息勘查模式[J].矿床地质,2019,38(3): 644-666.
- LIU Yuegao, LU Xinbiao, RUAN Banxiao, et al. A Comprehensive Information Exploration Model for Magmatic Cu-Ni Sulfide Deposits in Beishan, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 2019, 38(3): 644–666.
- 米宏泽.金属矿地下地球物理勘查技术的研究现状与发展思考 [J].矿产勘查, 2019, 10(3): 601-605.

MI Hongze. Research Status and Development Thinking of Under-

ground-geophysical Exploration Techniques for Metal Deposits[J]. Mineral Exploration, 2019, 10(3): 601–605.

- 秦克章,唐冬梅,苏本勋,等.北疆二叠纪镁铁-超镁铁岩铜、镍 矿床的构造背景、岩体类型、基本特征、相对剥蚀程度、 含矿性评价标志及成矿潜力分析[J].西北地质,2012, 45(4):83-116.
- QIN Kezhang, TANG Dongmei, SU Benxun, et al. The Tectonic Settingstyle, Basic Feature, Relative Erosion Degree, Ore-bearing Evaluation Sign, Potential Analysis of Mineralization of Cu-Nibearing Permian Maficultramafic Complexs, Northern Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2012, 45(4): 83–116.
- 秦克章,田野,姚卓森,等.新疆喀拉通克铜镍矿田成矿条件、 岩浆通道与成矿潜力分析[J].中国地质,2014,41(3): 912-935.
- QIN Kezhang, TIAN Ye, YAO Zhuosen, et al. Metallogenetic Conditions, Magma Conduit and Exploration Potential of the Kalatongk Cu-Ni Orefield in Northern Xinjiang[J]. Geology in China, 2014, 41(3): 912–935.
- 三金柱,惠卫东,秦克章,等.新疆哈密图拉尔根全岩矿化岩浆 铜-镍-钴矿床地质特征及找矿方向[J]. 矿床地质,2007, 26(3):307-316.
- SAN Jinzhu, HUI Weidong, QIN Kezhang, et al. Geological Characteristics of Tulargen Magmatic Cu-Ni-Co Deposit in Eastern Xinjiang and its Exploration Direction[J]. Mineral Deposits, 2007, 26(3): 307–316.
- 绍行来.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. Research For Geophysical Characteristics And Prospecting Application On Huangshan-Jingerquan Ultramafic-Complex Belt In Eastern Tianshan of Xinjiang[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012.
- 苏本勋,秦克章,孙赫,等.新疆北山地区红石山镁铁-超镁铁岩体的岩石矿物学特征:对同化混染和结晶分异过程的启示 [J].岩石学报,2009,25(4):873-887.
- SU Benxun, QIN Kezhang, SUN He, et al. Petrological and mineralogical characteristics of Xinjiang: Hongshishan mafic-ultramafic complex in Beishan area. Implications for assimilation and fractional crystallization[J]. Acta Petrologica Sinica., 2009, 25(4): 873–887.
- 索奎,张贵宾,梅岩辉,等.重磁三维反演伊犁盆地中部密度和 磁性结构[J].地球物理学报,2018,61(8):3410-3419.
- SUO Kui, ZHANG Guibin, MEI Yanhui, et al. Density and Magnetic Susceptibility Distribution of Central Yili Basin by Three-dimensional Inversion of Gravity and Magnetic data[J]. Chinese Journal Geophysics, 2018, 61(8): 3410–3419.
- 唐小平,冯治汉,刘生荣,等.西北地区区域地球物理调查工作 现状与展望[J].西北地质,2022,55(3):191-199.
- TANG Xiaoping, FENG Zhihan, LIU Shengrong, et al. Present Situation and Prospect of Regional Geophysical Survey in Northwest China[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(3): 191–199.
- 汤中立, 闫海卿, 焦建刚, 等. 中国岩浆硫化物矿床新分类与小 岩体成矿作用[J]. 矿床地质, 2006, 25(1): 1-9.
- TANG Zhongli, YAN Haiqing, JIAO Jiangang, et al. New Classifica-

tion of Magmatic Sulfide Deposits in China and Oreforming Processes of Small Intrusive bodies [J]. Mineral Deposits, 2006, 25(1): 1–9.

- 汤中立,钱壮志,姜常义,等.岩浆硫化物矿床勘查研究的趋势 与小岩体成矿系统[J].地球科学与环境学报,2011,33(1): 1-9.
- TANG Zhongli, QIAN Zhuangzhi, JANG Changyi, et al. Trends of Research in Exploration of Magmatic Sulfide Deposits and Small Intrusions Metallogenic System[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(1): 1–9.
- 王猛, 刘媛媛, 王大勇, 等. 无人机航磁测量在荒漠戈壁地区的 应用效果分析[J]. 物探与化探, 2022, 46(1): 206-213.
- WANG Meng, LIU Yuanyuan, WANG Dayong, et al. Application effect Analysis of UAV Aeromagtic Survey Technology in Desert and Semidesert Regions[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(1): 206–213.
- 王柯淇,王治国,高静怀,等.金属矿产资源探测的地震方法:综 述与展望[J].地球物理学进展,2021,36(4):1607-629.
- WANG Keqi, WANG Zhiguo, GAO Jinghuai, et al. Seismc Methods for Exploration of Metal Mineral Resources: Review and Proect [J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(4): 1607–629.
- 武雪山, 黄松, 于昌明, 等. 旋翼无人机航磁测量系统在备战铁 矿中的应用[J]. 新疆地质, 2021(39): 667-378.
- WU Xueshan, HUANG Song, YU Changming, et al. Application of Rotorcraft UAV Aeromagnetic Measurement Systemin Beizhan Iron-depsit[J]. Xinjiang Geology, 2021(39): 667–378.
- 夏明哲,姜常义,钱壮志,等.新疆东天山葫芦岩体岩石学与地 球化学研究[J].岩石学报,2008,24(12):2749-2760.
- XIA Mingzhe, JIANG Changyi, QIAN Zhuangzhi, et al. Geochemistry and petrogenesis for Hulu intrusion in East Tianshan, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(12): 2749– 2760.
- 肖骑彬,蔡新平,徐兴旺,等.浅层地震与 MT 联合技术在隐伏 金属矿床定位预测中的应用--以新疆哈密图拉尔根铜镍矿 区为例[J].矿床地质,2005,24(6):676-683.
- XIAO Qibin, CAI Xinping, XU Xingwang, et al. Application of Shallow Seismic Technology and Magnetotellurics to Location Prognosis of Concealed Metallic Deposits: Case Study of Tulargen Cu-Ni Mining Area, Hami, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 2005, 24(6): 676–683.
- 薛国强,周楠楠,唐冬梅.岩浆型铜镍硫化物矿床综合地球物理 勘查技术:以新疆喀拉通克为例[J].岩石学报,2023,39(4): 1117-1124.
- XUE Guoqiang, ZHOU Nannan, TANG Dongmei. Geophysical Technology for Exploration of Magmatic Ni-Cu Sulfide Deposits: Case Study in Kalatongke Deposit[J]. Acta Petrologica Sinica, 2023, 39(4): 1117–1124.
- 薛洪伟, 三金柱, 李凤明, 等. 2023 年新疆地质勘查进展及 2024 年重点工作[J]. 新疆地质, 2024, 42(1): 1-6.
- XUE Hongwei, SAN Jinzhu, LI Fengming, et al. Progress of Geological Exploration in Xinjiang in 2023 and Key Tasks for 2024[J]. Xinjiang Geology, 2024, 42(1): 1–6.

姚卓森,秦克章.造山带中岩浆铜镍硫化物矿床的地球物理勘

探:现状、问题与展望[J].地球物理学进展,2014,29(6): 2800-2817.

- YAO Zhuosen, QIN Kezhang. Geophysical Exploration for Magmatic Cu-Ni Sulfide Deposits Problems and Vistas[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(6): 2800–2817.
- 严加永,罗凡,张昆,等.长江中下游成矿带岩浆岩体三维空间 结构:来自重磁三维反演的证据[J].地质科学,2019,54(3): 853-875.
- YAN Jiayong, LUO Fan, ZHANG Kun, et al. Three-dimensional Spatial Structure of Plutons in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River metallogenic Belt: Evidence from Three-dimensional Inversion of Gravity and Magnetic [J]. Chinese Journal of Geology, 2019, 54(3): 853–875.
- 袁桂琴,马冰,张桂平.国外矿产勘查井中物探技术应用新动态 [J].地质科技情报,2016,35(1):184-189.
- YUAN Guiqin, MA Bing, ZHANG Guiping. New Dynamic of Borehole Geophysical Technology Application of Mineral Exploration Abroad[J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(1): 184–189.
- 张照伟, 钱兵, 王亚磊, 等. 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, 2021, 54(1): 82-99.
- ZHANG Zhaowei, QIAN Bing, WANG Yalei, et al. Geological Characteristics and Prospecting Potential of Magmatic Ni-Cu SulfideDeposits in Northwest China[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(1): 82–99.
- 张照伟,李文渊,张江伟,等.新疆北部岩浆铜镍硫化物矿床地 质分布特点与成矿背景探讨[J].西北地质,2015,48(3): 335-354.
- ZHANG Zhaowei, LI Wenyuan, ZHANG Jiangwei, et al. Geological Distribution Characteristics and Metallogenic Background of Magmatic Ni-Cu Sulfide Deposits in the North Part of Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2015, 48(3): 335–354.
- 张杰, 邓晓红, 郭鑫, 等. 地-井 TEM 在危机矿山深部找矿中的 应用实例[J]. 物探与化探, 2013, 37(1): 30-34.
- ZHANG Jie, DENG Xiaohong, GUO Xin, et al. Typical Cases of Applying Borehole TEM to Deep Prospecting in Crisis Mines[J].[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(1): 30–34.
- 庄道泽.新疆负磁异常特征及其地质意义初探[J].地质论评, 2016,11(62):189-190.
- ZHUANG Daoze. The Characteristics and Geological Exploration of Negative magnetic Anomaly of Xinjiang[J]. Geological Review, 2016, 11(62): 189–190.
- 庄道泽,孟贵祥,陈蜀雁,等.成矿带1:5万激发极化法普查的 初步尝试——以东天山铜矿带1:5万电法快速普查示范 为例[J].地质通报,2004,23(7):707-713.
- ZHUANG Daoze, MENG Guixiang, CHEN Shuyan, et al. Preliminary Test of Induced Polarization Method in 1 : 50000 Reconnaissance in a Metallogenic Belt-example from the Demonstration of 1: 50000 Rapid Electric Reconnaissance in the East Tianshan Copper Metallogenic Belt, Xinjiang[J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(7): 707–713.