

综合找矿技术在东昆仑造山带卡而却卡铜多金属矿床勘查中的应用与启示

张正虎¹,李 兄²,张大明³,白国龙^{3*},李 华²,保善斌²,孙金磊⁴

(1. 青海省有色第三地质勘查院; 2. 青海省地质调查局; 3. 青海省第三地质勘查院;
4. 吉林大学地球科学学院)

摘要:针对东昆仑造山带隐伏矿体勘查的局限性,以卡而却卡铜多金属矿床为例,通过区域地质调查、地球化学异常识别及综合找矿技术的应用,系统分析了矿床地质特征、成矿机制,建立了综合找矿模型。研究表明,该矿床的形成与晚三叠世—早侏罗世中酸性岩浆侵入活动密切相关,岩体与围岩接触带是主要控矿构造;综合找矿技术的应用显著提高了勘查成功率,取得了找矿突破,验证了综合找矿模型在东昆仑造山带寻找斑岩型铜矿的适用性,并揭示了区域岩浆活动、构造演化与成矿作用的内在联系。该研究不仅为东昆仑造山带矿产勘查提供了科学依据和实践指导,还丰富了区域成矿理论,对隐伏矿体勘查具有重要的学术价值和实际应用潜力。

关键词:东昆仑造山带;卡而却卡;斑岩型;地质特征;成矿机制;找矿技术方法;综合找矿模型

中图分类号:TD11 P632

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)10-0103-08

doi:10.11792/hj20251015

引 言

东昆仑造山带是中国重要的成矿带之一,具有丰富的矿产资源^[1-3]。其中,卡而却卡铜多金属矿床的发现为研究斑岩型铜矿成矿机制提供了重要实例^[4]。卡而却卡铜多金属矿床为典型斑岩型矿床,位于青藏高原北缘东昆仑造山带西段,介于昆中断裂与昆南断裂之间,构造演化复杂,成矿条件优越^[5-6]。近年来,前人通过高精度磁法测量、可控源音频大地电磁测深(CSAMT)及三维反演技术,显著提升了深部矿体的识别能力^[7-8]。此外,地球化学异常的多元素组合分析为靶区圈定提供了新思路。例如,对AS33乙3综合异常的成功验证,揭示了Cu-Pb-Zn-Ag共生分带规律对斑岩-矽卡岩复合型矿床的指示意义^[9-10]。然而,东昆仑造山带复杂构造背景下的成矿模型仍需进一步细化,特别是在岩体接触带控矿机制与多期构造叠加关系的解析方面^[11]。本研究以卡而却卡铜多金属矿床为例,系统整合区域地质调查、地球物理探测及地球化学异常数据,旨在构建适用于高寒山区隐伏矿体的综合找矿模型。通过厘清岩浆活动、构造演化、成矿响应的耦合关系,不仅可为东昆仑造山带斑岩型铜矿勘查提供技术示范,还能为类似构造背景区

的成矿预测理论补充科学依据^[12-15]。研究成果对实现青藏高原北缘矿产资源接续突破具有重要实践价值。

1 区域地质背景

卡而却卡铜多金属矿床大地构造位置为东昆仑弧盆系之北昆仑岩浆弧带西缘(见图1-A),区域构造演化复杂且成矿条件优越^[16]。区域地层由古元古代金水口岩群、奥陶系—志留系滩间山群和石炭系浩特洛哇组构成,分别记录了早期构造—热事件、古生代海相沉积环境及石炭纪陆内裂谷沉积特征^[17]。区域经历了多期次构造—岩浆活动,形成褶皱、断裂和剪切带等复杂构造样式^[18]。晚三叠世—早侏罗世,区域中酸性岩浆侵入活动广泛,主要岩性为花岗闪长岩和二长花岗岩,与成矿作用时空耦合^[19]。在岩浆热液作用下,形成以卡而却卡铜多金属矿床为代表的大中型铜多金属矿床群,构成重要斑岩型铜矿成矿带^[20]。卡而却卡铜多金属矿床以铜矿化为主,伴生钼、金、银等有益组分,矿体主要赋存于岩体与围岩接触带,体现岩浆活动、构造演化与成矿作用的内在联系^[21],为探讨斑岩型铜矿成矿机制提供理想对象^[22]。东昆仑造山带构造演化分3个阶段:海西期(300~450 Ma)洋壳

收稿日期:2025-06-15; 修回日期:2025-08-01

基金项目:青海省省级地质勘查专项资金项目(2023085029ky004,2025003060kc038)

作者简介:张正虎(1990—),男,工程师,从事地质矿产勘查工作;E-mail:291161317@qq.com

*通信作者:白国龙(1985—),男,高级工程师,从事地球物理勘查工作;E-mail:121775642@qq.com

俯冲形成火山岛弧^[12];印支期(200~250 Ma)昆北断裂活化致陆陆碰撞^[13];燕山期(80~150 Ma)后碰撞伸

展形成斑岩成矿系统,为成矿提供动力学条件^[23-25]。

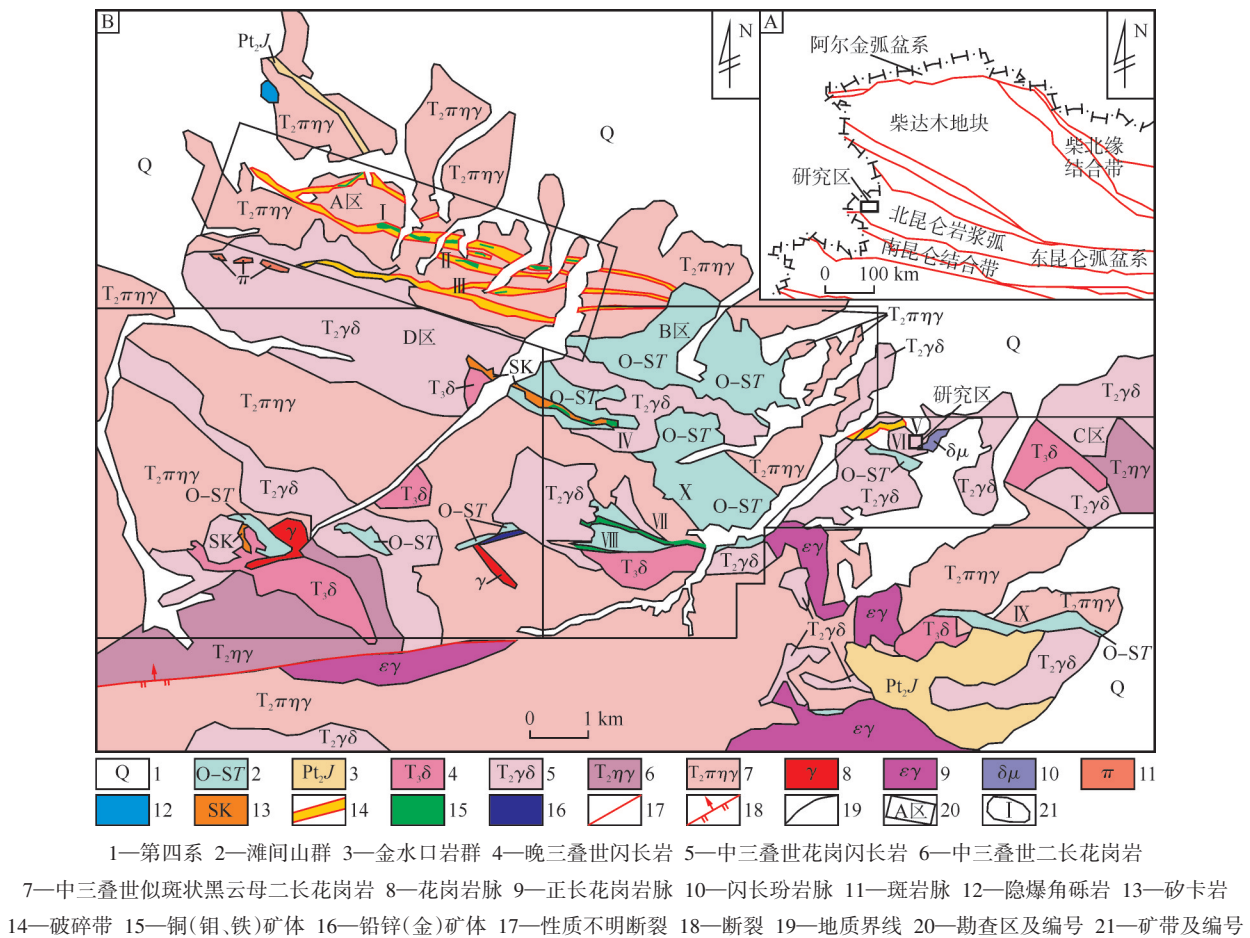


图1 卡而却卡铜多金属矿床大地构造位置图(A)及矿区地质图(B)

Fig. 1 Geotectonic location map of the Ka'erqueka Cu polymetallic deposit (A) and geological map of the mining area (B)

2 矿区及矿床地质特征

卡而却卡铜多金属矿床隶属于东昆仑铁-铅-锌-铜-钴-金-钨-锡-石棉成矿带^[5]。结合矿区地质及矿化特征,划分出A、B、C、D 4个区。矿区地层主要为奥陶系—志留系滩间山群,广泛分布于B区和C区^[24](见图1-B)。矿区断裂十分发育,根据其延伸方向可分为2组:一组呈北西西向展布,另一组为北东走向。其中,北西西向断裂是矿区最主要的构造形迹,由多条相互平行、间隔均匀的断裂组成,这些断裂后期受北东向平移断裂的切割改造,显示出复杂的构造演化历史^[9]。岩浆活动以中三叠世中酸性侵入岩为主^[8],包括出露面积占60%以上的似斑状黑云母二长花岗岩及主要分布于B区的花岗闪长岩。

A区共圈出矿带3条,目前控制长度1.5~3.5 km,宽40~150 m,产于似斑状黑云母二长花岗岩中,总体走向北西,倾向北东,倾角65°~85°^[15]。A区共圈出铜矿体35条,I-M5矿体为主矿体,长度

1 122 m,厚度1.15~20.37 m,平均值4.63 m,厚度较稳定;向深部延伸20~512 m,平均值302 m;铜品位0.23%~1.12%,平均值0.66%^[7]。除I-M5矿体外,其他矿体长度一般为49~520 m,厚度1.01~8.16 m,向深部延伸50~498 m,铜品位0.22%~1.12%。矿体形态以透镜状为主,空间展布特征与矿带产状高度吻合,呈串珠状排列,总体走向北西,倾向北东,倾角50°~65°,矿化类型以黄铜矿化为典型特征^[14]。

在B区地表勘查中,共发现3条矿带,其走向总体呈北西西向,延伸2.5~3.5 km,宽度10~100 m。矿带主要赋存于中三叠世花岗闪长岩、似斑状黑云母二长花岗岩与滩间山群地层的接触带中,产状表现为南倾,倾角较陡,为70°~85°^[26]。该区已查明120条铜钼锌铁矿体,矿体形态以不连续的透镜状为主,走向延伸100~400 m,厚度1.04~9.59 m,向下延伸37~248 m,整体倾向西南,倾角30°~65°。矿石矿物组合以黄铜矿和闪锌矿为主,局部可见磁铁矿富集现象^[27]。其中,VII号砂卡岩化带(矿带)矿体呈似层状或

透镜状,产状南倾,倾角 $70^{\circ}\sim 85^{\circ}$,矿体规模变化较大,长度 $127\sim 1\,740\text{ m}$,厚度 $1.01\sim 25.48\text{ m}$,向深部延伸 $15\sim 777\text{ m}$ ^[28]。C区共圈定36条铅锌金矿体,矿体空间分布严格受控于破碎蚀变带及岩体接触带,形态以透镜状为主,倾向西南,倾角 $60^{\circ}\sim 85^{\circ}$,矿体延伸 $100\sim 441\text{ m}$,厚度 $1.18\sim 18.27\text{ m}$,向深部延伸 $40\sim 378\text{ m}$ 。矿石矿物以闪锌矿和方铅矿为主,脉石矿物主要为石英、钾长石及斜长石^[29]。金属矿物组合包括黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿、自然铜、磁铁矿、闪锌矿和方铅矿等。矿石结构以他形一半自形粒状结构为主,矿石构造包括稀疏浸染状构造、星点状构造,局部为网脉状构造^[30]。

3 综合找矿技术应用与找矿突破

3.1 区域地质调查与成矿背景分析

前期,在开展1:20万区域地质调查期间,在索拉吉尔发现了铜矿化线索,并通过验证,圈出了8条铜矿体,其成因类型为矽卡岩型。随后,索拉吉尔发生

零星采矿活动。与此同时,进行1:20万水系沉积物测量工作,共圈定了46处综合异常,并提供了丰富的地球化学资料。其中,AS33乙3、AS34乙3综合异常位于卡而却卡铜多金属矿区内,为后续找矿工作提供了重要依据。

3.2 地球化学异常识别与靶区圈定

在东昆仑造山带内,地球化学测量对矿产勘查的效果显著,曾在五龙沟、果洛龙洼大型金矿床,以及浪木日铜镍矿床等矿床中发挥重要作用^[1,21,31-36]。2003年,野拉赛以西发现3条含铜破碎蚀变带及多处铜矿化线索,显示该区有巨大找矿潜力。随后,工作部署调整,预查区西扩,针对1:20万水系沉积物异常,开展1:5万水系沉积物测量,共圈定9处异常(见图2),异常元素组合呈现多元素共生特征,且具有显著的地球化学响应强度。主要成矿元素Cu与Pb、Zn、Au、Ag、Bi、Hg、W、Sn、Mo、As、Sb等具有典型的伴生组合关系^[31]。值得注意的是,这些异常在空间分布上与已知矿带具有明显的对应关系,显示出良好的找矿指示意义。

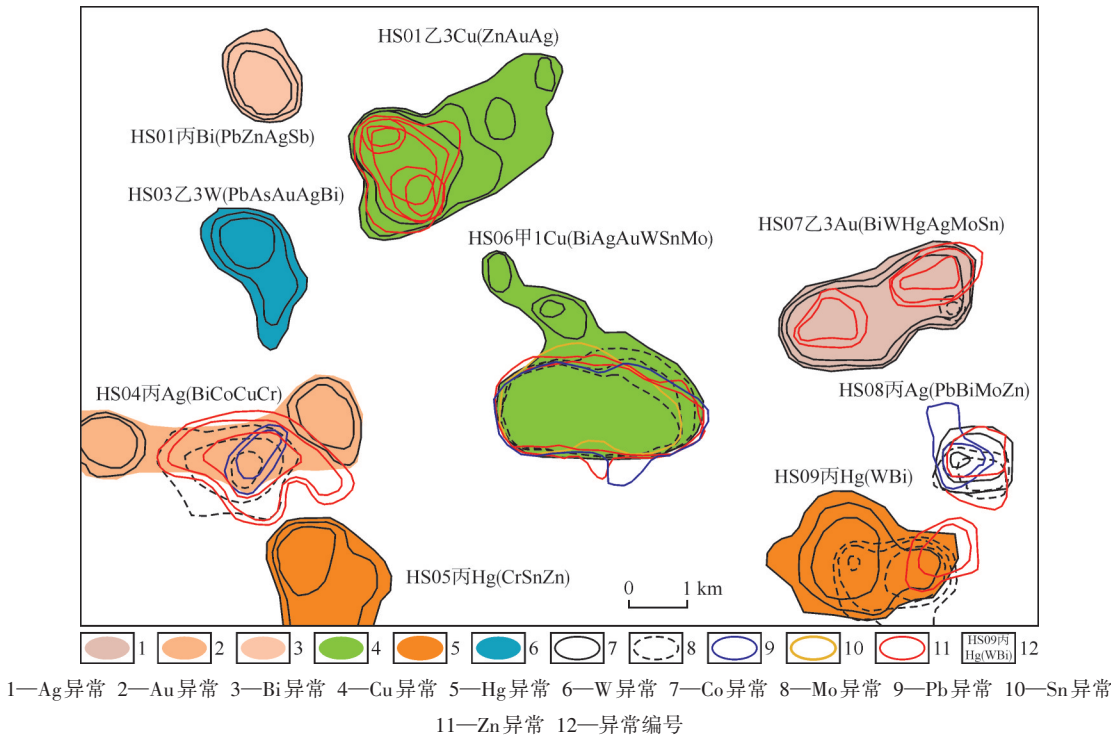


图2 卡而却卡铜多金属矿区水系沉积物异常

Fig. 2 Stream sediment anomalies in the Ka'erqueka Cu polymetallic district

3.3 找矿突破

在研究区内,通过磁法和电法测量,成功圈定了多处与化探异常及已知矿带吻合的磁电异常。后续深部钻探验证工作成果显著,在B区发现了IV号矿带,C区发现了热液型铅锌矿体,并且该矿体还伴生金。基于这些发现,将A、B、C3个区确定为重点研究区域,针对不同区域的不同地质特征,分别采用不同

的勘查方法开展普查工作。其中,A区的I、II、III号矿带主要利用钻探工程进行勘查;B区的IV、VII号矿带则综合运用了电法、磁法、槽探、硃探、钻探工程等多种手段;C区的V、VI号矿带主要采用槽探和钻探工程开展工作。基于对区域成矿规律和地质背景的系统研究,前人明确了矿床的主要成因类型,创新性地提出了“A区斑岩型、B区矽卡岩型、C区热液脉型”

的成矿系列模式^[37]。这一理论认识对矿区后续矿产勘查的重点目标类型、矿种选择及勘探方向具有重要的指导价值。在早期勘查阶段,矿区实施了1:5万高精度地面磁测工作。M3-9磁异常在剖面测量中表现为相对孤立且异常特征较弱的局部异常,与邻近的M14、M15磁异常相比,其异常强度和分布范围均较为有限,因而未能获得充分关注。青海省“358地质勘查工程”实施期间,青海省第三地质矿产勘查院重点对B区的Ⅶ、Ⅷ、X号矿带(对应M3-9磁异常)开展了系统的普查评价工作。勘探过程中,首先,完成了1:1万高精度磁法测量,使得M3-9磁异常的空间特征得到更清晰的展现。其次,为进一步提高异常解释精度并为工程部署提供可靠依据,在该异常区实施了1:2 000精细磁法测量,使异常内部结构特征和空间定位更加明确。基于1:2 000精细磁法测量数据,对A区1勘探线M3-9磁异常进行了三维反演解释。同时,在该勘探线开展了激发极化中梯剖面测量,获得了显著的低阻高极化异常响应。基于上述综合物探成果,施工了ZK101验证钻孔(终孔深度687.41 m),揭露了含磁铁矿化的矽卡岩带和工业矿体(见图3),同时发现具有经济价值的铜锌矿化。见矿后,通过对岩芯样品系统的磁性参数测试,结合钻孔资料对1:2 000精细磁法测量剖面进行了正演模拟。综合二维正演拟合、三维反演解释及激电异常特征,在钻孔ZK101北侧布置了验证钻孔,成功在深部发现厚层铁多金属矿体,实现重大找矿突破。经初步评价,矿床规模已达中型。

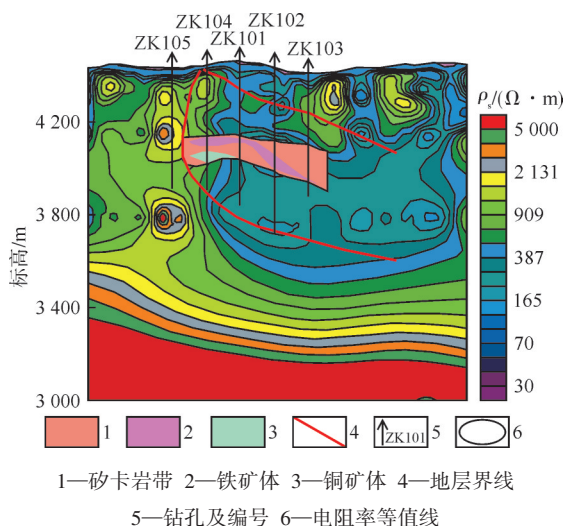


图3 M3-9磁异常I号勘探线CSAMT反演剖面图

Fig. 3 CSAMT inversion section along Exploration Line I at Magnetic Anomaly M3-9

从宏观上追索矿体,了解矿体空间赋存状态和矿区深部地质构造情况,在M3-9磁异常内部署了可控

源音频大地电磁测深剖面。根据可控源音频大地电磁测深剖面异常施工的2个钻孔,深部均发现矿化(见图4)。在A区外围的M6磁异常中,新发现1处具全岩矿化的隐爆角砾岩筒,已发现该隐爆角砾岩筒剥蚀程度较低。该类型矿床的发现对东昆仑造山带祁漫塔格地区寻找斑岩型铜多金属矿具有很大启示意义。在B区,无论是强磁异常,还是弱磁低缓正异常,均能较准确地确定矿(化)体、矽卡岩带、破碎蚀变带位置;重力低异常可有效圈定岩体的分布范围,重力梯级带对应岩体与围岩的接触带,是一种间接找矿方法;激电测量对铜多金属矿具有较好的找矿效果,但在碳质地层和黄铁矿发育地段,无法准确提取异常信息,此时需开展重磁工作,以圈定成矿有利区段;对于永冻层,常规激电受供电方式及功率的影响,无法探测到深部的电性特征,而利用偶极方式供电的可控源音频大地电磁测深能解决此问题,并且能清晰地圈定深部含矿矽卡岩带、蚀变带及地层界线。对18号铁矿点、D区及其他物化探的矿致异常开展了预查找矿工作,进一步拓展了找矿空间,为后续普查提供了支撑。在M3-9磁异常地表300 m以下埋深的隐伏铁多金属矿找矿取得了重大突破,并新发现了X号矿化带;C区的金矿找矿也取得了重要进展,展现出良好的找矿前景。

3.4 综合找矿模型构建

地质标志表明,该矿床形成于中三叠世俯冲-碰撞转换阶段,成矿岩体主要包括花岗闪长岩、似斑状黑云母二长花岗岩和花岗斑岩。矿体主要赋存于岩体与祁漫塔格群接触带的矽卡岩、花岗斑岩蚀变带及隐爆角砾岩中,围岩以碳酸盐岩和中基性火山岩为主,这些岩性易于交代形成矽卡岩型矿体^[21]。地球物理标志方面,磁法测量显示磁异常可分为区域性和局部性2类。局部性磁异常形态较规则、范围有限,强磁异常通常对应地表磁铁矿化现象,而弱磁异常可能指示深部存在磁铁矿或磁黄铁矿矿体^[22]。激电测量结果显示,极化率异常呈现显著的南北向分带现象,表现为“低—高一低—高”交替变化特征。低值区对应第四系,中等偏低值区反映岩浆岩体分布,高值区则与黄铁矿化蚀变带高度吻合。电阻率异常特征为:高值电阻率异常对应于金水口岩群和滩间山群,中高值电阻率异常指示岩体分布范围,中低值电阻率异常反映黄铁矿化带,而低值电阻率异常则代表第四系^[23]。重力勘探数据表明,布格重力异常均为负值,高值布格重力异常与金水口岩群和滩间山群相对应,低值布格重力异常反映第四系,中等值布格重力异常则指示中酸性侵入岩体^[24]。地球化学标志表现为:水

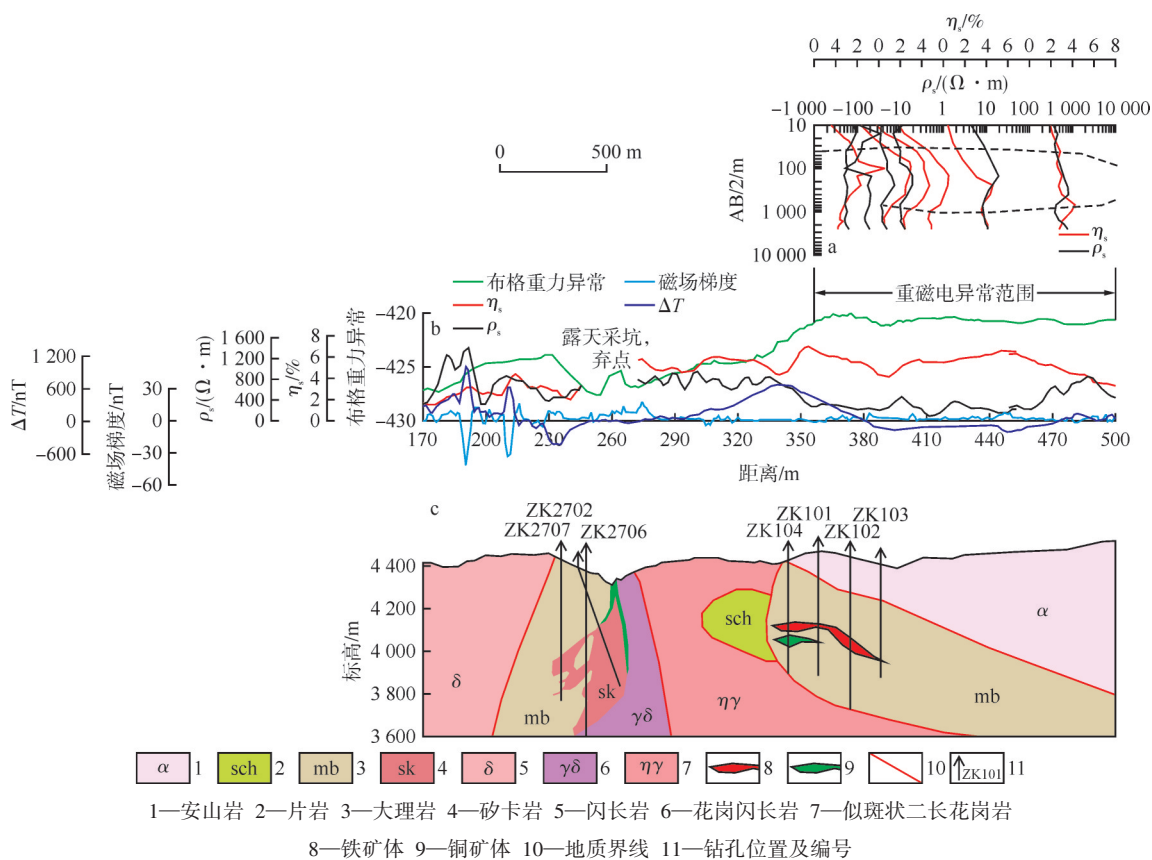


图4 VII矿带典型剖面重磁电综合成果图

Fig. 4 Integrated gravity-magnetic-electrical results of a typical section across Ore Belt VII

系沉积物中Cu、Pb、Zn、Au、Ag、Bi、Hg、W、Sn、Mo等元素的组合异常,与已知矿带在空间分布上具有良好的对应关系^[25]。矿区位于中三叠世板块俯冲向碰撞过渡的构造阶段,地壳与地幔的相互作用及俯冲板块局部熔融引发的地壳熔融事件,促成了与矿产形成相关的花岗质岩浆岩发育。该岩体群主要分布于昆北断裂南侧次级断裂附近,其产出形态显著受北西西向区域构造格局控制^[19]。矿体空间分布主要取决于侵入岩与祁漫塔格群地层的接触界面,其中,I、II、III、V号矿带的产出同时受到北西西向、近东西向断裂系统及斑岩体侵入裂隙的多重影响。相关研究表明,隐爆角砾岩筒是该区域隐爆角砾岩型矿床的关键控矿和储矿构造^[20](见图5)。与成矿相关的岩体主要为花岗闪长岩、似斑状黑云母二长花岗岩及花岗斑岩3类,分别主导不同金属矿床的形成。基于地质、地球物理和地球化学标志的系统分析,构建了卡而却卡铜多金属矿床综合找矿模型(见表1),为后续矿产资源勘查工作提供了理论指导^[26]。

4 找矿经验与启示

4.1 区域地质调查与成矿背景分析的重要性

前人在索拉吉尔开展的1:20万区域地质调查,

发现了铜矿化线索并圈出铜矿体,为后续找矿奠定了基础^[32];在柴达木盆地周缘开展的水系沉积物测量工作中,圈定的综合异常为找矿提供了重要依据^[33]。这表明,区域地质调查能够揭示区域内的成矿地质背景和潜在矿化信息,是矿产勘查工作的前提和基础。在开展矿产勘查工作前,必须先进行系统的区域地质调查,全面了解区域的地质构造、地层分布、岩浆活动等情况,结合地球化学测量等手段,准确识别成矿有利区和矿化线索,从而为后续的找矿工作指明方向,提高找矿效率。

4.2 地球化学异常识别与靶区圈定的关键作用

东昆仑造山带地球化学测量在五龙沟等大型金矿床勘查中发挥了重要作用。野拉赛以西发现的含铜破碎蚀变带及铜矿化线索,促使工作部署调整,通过1:5万水系沉积物测量圈出综合异常,这些异常与已发现矿带对应,显示出巨大的找矿潜力。这说明地球化学异常识别能够有效指示矿体的位置和规模,是圈定找矿靶区的关键手段^[33]。要重视地球化学测量方法的应用,根据不同地区的地质条件选择合适的地球化学测量手段,如水系沉积物测量等^[34-35]。通过对测量数据的深入分析,识别出异常元素组合、异常强度和分布规律,进而圈定出具有找矿意义的靶区。同

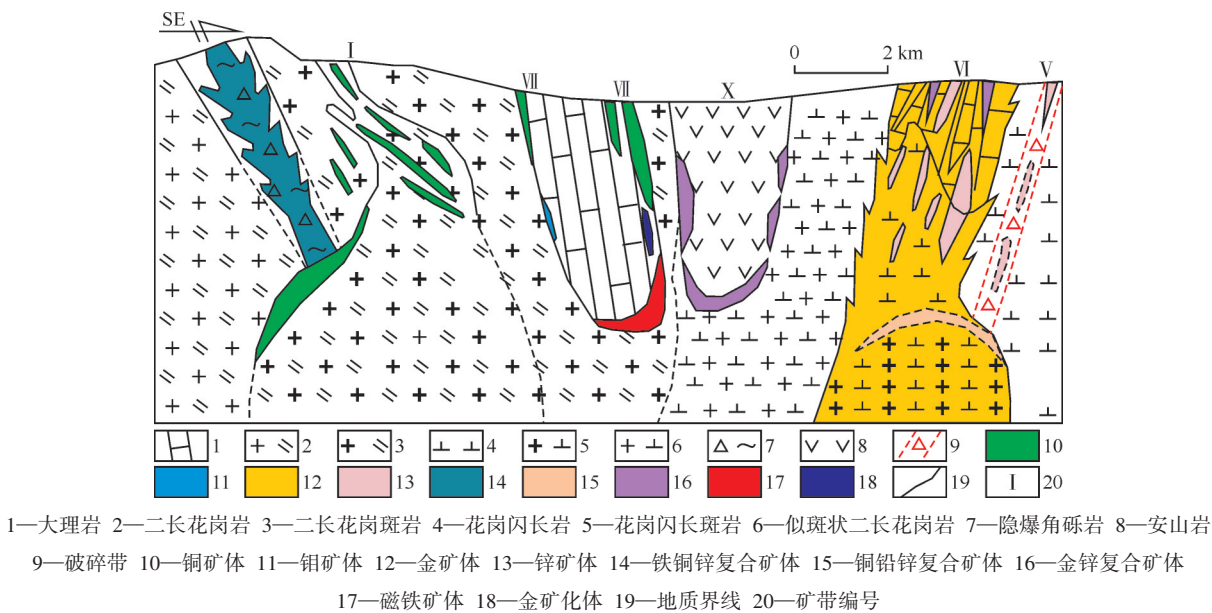


图5 卡而却卡铜多金属矿床成矿模式

Fig. 5 Metallogenic patterns of the Ka'erqueka Cu polymetallic deposit

表1 卡而却卡铜多金属矿床综合找矿模型

Table 1 Integrated prospecting model of the Ka'erqueka Cu polymetallic deposit

类别	具体内容	特征描述
地质标志	成矿时代	中三叠世
	构造环境	同碰撞(俯冲-碰撞转换)
	地层	滩间山群
	围岩	碳酸盐岩、中基性火山岩、矽卡岩、花岗岩、花岗斑岩
	构造特征	主体构造线北西向,矿体受岩体与地层接触带、断裂及裂隙控制
	岩浆岩	似斑状二长花岗岩、花岗闪长岩、花岗斑岩
	矿体特征	热液脉型、斑岩型、矽卡岩型,形态复杂,V号矿带产出透镜状金矿体
	矿石特征	主要为黄铜矿矿石,部分矿带矿石复杂,发育含金黄铁矿
	围岩蚀变	接触带发育矽卡岩化、硅化等;花岗岩蚀变带发育硅化、绢英岩化等
地球化学标志	成矿期次	矽卡岩阶段、石英硫化物阶段、热液阶段
	水系沉积物异常	Cu、Pb、Zn、Au、Ag、Bi、Hg、W、Sn、Mo等组合异常
	磁法	强磁异常,正负伴生,强度大,梯度陡;低平缓异常指示隐伏矿体
地球物理标志	电法	低阻高极化异常,电阻率约200Ω·m,极化率高出背景值2%~3%
	重力	局部布局重力异常0.2~1mGal,围岩密度不同,异常表现不同

时,要结合地质背景对异常进行综合分析,排除假异常,提高圈定找矿靶区的准确性^[36]。

4.3 综合找矿技术方法应用的必要性与效果

卡而却卡铜多金属矿区通过磁法和电法测量圈定磁电异常区域,并采用多种勘查方法对不同区域进行勘查,实现了找矿突破,扩大了矿床规模。前期未引起重视的M3-9磁异常,经过高精度磁法扫面和多种方法的综合应用,最终发现了厚大铁多金属矿体。这表明,单一找矿方法往往难以取得理想效果,综合运用多种找矿技术方法能够更全面地了解矿体特征和地质构造,提高找矿成功率^[35]。在矿产勘查过程中,应综合运用多种找矿技术方法,如磁法、电法、重

力、激电法、可控源音频大地电磁测深等地球物理方法,以及钻探、槽探、硐探等工程手段。根据不同地区的地质条件和找矿目标,有针对性地选择和组合这些方法,充分发挥各方法的优势,相互补充、印证,从而更准确地确定矿体的位置、规模、形态和赋存状态,实现找矿突破^[36]。

4.4 综合找矿模型的理论创新与实践应用

4.4.1 理论创新与综合找矿方法体系

卡而却卡铜多金属矿床综合找矿模型的建立,通过系统整合地质、地球物理和地球化学等多学科信息,构建了创新的“地质-物探-化探”三位一体协同验证体系。该模型不仅阐明了矿床形成于中三叠世俯

冲-碰撞转换环境的成矿背景,更揭示了岩体-围岩接触交代作用与断裂系统共同控制的多类型矿化空间分布规律。研究证实,北西向断裂是主要控矿构造,花岗闪长岩、花岗斑岩等中酸性侵入体与祁漫塔格群碳酸盐岩的接触带是矽卡岩型矿化的有利部位,而隐爆角砾岩筒则为热液脉型矿化提供了重要空间。通过地质标志(构造-岩性组合)、地球物理标志(强磁异常+高极化率+低阻组合)和地球化学标志(Cu-Pb-Zn-Au-Mo元素组合)的有机结合^[4],实现了成矿信息的有效提取和相互印证,显著提高了找矿预测的准确性,为东昆仑造山带同类矿床研究提供了新的理论框架。

4.4.2 实践应用与勘查成效

该模型在实践中形成了“区域筛选—重点圈定—靶区验证”的递进式勘查流程。首先,通过1:5万水系沉积物测量开展区域扫面工作,结合地质背景类比筛选远景区;其次,采用1:1万地质填图与高精度磁法测量圈定构造-岩性有利区;最后,通过激电剖面测量和重力测量进行靶区验证。这一方法体系在祁漫塔格成矿带的实际应用中成效显著。特别值得指出的是,通过磁法异常与Cu异常的叠合分析可快速定位矿化带,再结合激电剖面异常精确指导钻孔布设的技术路线,使勘探效率大大提升,同时大幅降低了勘查风险与成本。这种优化的工作流程为商业性矿产勘探提供了可复制、可推广的技术范式^[37]。

5 结 论

1)卡而却卡铜多金属矿床地质特征表明,成矿与晚三叠世—早侏罗世中酸性岩浆侵入活动密切相关,岩体与围岩接触带是主要的控矿构造。

2)综合找矿技术的应用,如高精度磁测、重力、激电、可控源音频大地电磁测深等地球物理方法,以及钻探、槽探、硐探等工程手段,显著提高了找矿成功率,实现了找矿突破。

3)建立的综合找矿模型为东昆仑造山带寻找类似斑岩型铜矿提供了科学依据和有效的技术方法,具有重要的指导意义。

[参 考 文 献]

- [1] 赵娟,许光,杨宝荣,等.青海东昆仑地区1:2.5万地球化学测量方法技术及应用成果[J].西北地质,2018,51(1):209-217.
- [2] 张健,张正虎,李小亮,等.东昆仑造山带东段色日金矿床地质特征及成因[J].黄金,2025,46(2):62-71.
- [3] 张先福,吴树宽,赵立志,等.青海省都兰县哈图稀土矿床地质特征及成矿模式[J].黄金,2023,44(12):71-76,81.
- [4] 张大明,张爱奎,屈光菊,等.东昆仑西段卡而却卡铁铜多金属矿床成矿模式及找矿模型[J].西北地质,2020,53(1):91-106.
- [5] 张爱奎,莫宣学,李云平,等.青海西部祁漫塔格成矿带找矿新进展及其意义[J].地质通报,2010,29(7):1 062-1 074.
- [6] 丰成友,李东生,屈文俊,等.青海祁漫塔格索拉吉矽卡岩型铜钼矿床辉钼矿铼-钨同位素定年及其地质意义[J].岩矿测试,2009,28(3):223-227.
- [7] 李世金,孙丰月,王力,等.青海东昆仑卡而却卡多金属矿区斑岩型铜矿的流体包裹体研究[J].矿床地质,2008,27(3):399-406,382.
- [8] 王松,丰成友,李世金,等.青海祁漫塔格卡而却卡铜多金属矿区花岗闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年及其地质意义[J].中国地质,2009,36(1):74-84.
- [9] 高永宝,李侃,钱兵,等.东昆仑卡而却卡铜钼铁多金属矿床成矿年代学:辉钼矿 Re-Os 和金云母 Ar-Ar 同位素定年约束[J].大地构造与成矿学,2018,42(1):96-107.
- [10] 汪冰,张大明,魏本赞,等.高分辨率遥感在青海卡而却卡地区铜多金属矿找矿预测中的应用[J].地质找矿论丛,2017,32(1):107-113.
- [11] 冶建虎,田滔,吴树宽,等.青海都兰诺木洪郭勒地区地球化学异常特征、找矿潜力及找矿效果[J].黄金,2023,44(1):88-93.
- [12] 宋忠宝.青海省中酸性侵入岩与斑岩型、矽卡岩型矿床[M].北京:地质出版社,2016.
- [13] 李东生,张占玉,苏生顺,等.青海卡而却卡铜钼矿床地质特征及成因探讨[J].西北地质,2010,43(4):239-244.
- [14] 于森,丰成友,赵一鸣,等.青海卡而却卡铜多金属矿床流体包裹体地球化学及成因意义[J].地质学报,2014,88(5):903-917.
- [15] 张雨莲,贾群子,宋忠宝,等.青海省卡而却卡铜多金属矿床A区斑岩型和B区矽卡岩型成矿岩体特征对比[J].西北地质,2014,47(4):114-122.
- [16] 穆媛芮,朱玉芳,孔婕,等.青海卡而却卡地区遥感找矿信息提取研究[J].新疆地质,2017,35(2):211-215.
- [17] 王鹏鸣,袁永忠,李明辉,等.胶东纱岭金矿区水文地质特征[J].黄金,2023,44(5):78-81.
- [18] 胡博心,刘彦兵,韩彪,等.陕西铍厂沟金矿床Au I 矿体黄铁矿热电性特征及深部找矿预测[J].黄金,2023,44(6):79-84.
- [19] 李碧乐,孙丰月,于晓飞,等.青海东昆仑卡而却卡地区野拉塞铜矿床成因类型及成矿机制[J].岩石学报,2010,26(12):3 696-3 708.
- [20] 高鹏,耿涛,冀显坤,等.东昆仑祁漫塔格地区激电测量中常见问题及解决方法[J].西北地质,2017,50(4):232-237.
- [21] 侯长才,李玉莲,李永太,等.青海东昆仑五龙沟地区化探次生晕觅金效果探讨[J].西北地质,2019,52(1):183-194.
- [22] 张爱奎,刘永乐,刘光莲,等.青海祁漫塔格成矿带冰沟南地区成矿类型及找矿前景[J].西北地质,2015,48(4):125-140.
- [23] 陈博,张占玉,耿建珍,等.青海西部祁漫塔格山卡而却卡铜多金属矿床似斑状黑云二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄[J].地质通报,2012,31(增刊1):463-468.
- [24] 丰成友,王松,李国臣,等.青海祁漫塔格中晚三叠世花岗岩:年代学、地球化学及成矿意义[J].岩石学报,2012,28(2):665-678.
- [25] 李俊锋,王正威,李晨晖,等.河南土木崖银多金属矿床地质特征及成因探讨[J].黄金,2022,43(3):15-20.

- [26] 莫生娟,代威,金延邦,等.青海省祁漫塔格地区卡而却卡矿床地质特征及找矿方向[J].中国锰业,2018,36(3):44-47.
- [27] 李泽峰,何利,赵建鹏,等.卡而却卡外围地区铜多金属矿地质特征及找矿前景分析[J].中国锰业,2018,36(4):107-111.
- [28] 高延龙,杜等虎,王志军,等.甘肃文县安坝里金矿床地质特征及成矿作用[J].黄金,2022,43(9):28-34.
- [29] 马璟璟,陈澍豪,代威,等.青海省卡而却卡铜多金属矿地球化学特征与成矿规律[J].中国锰业,2018,36(5):64-66,73.
- [30] 张会琼,王京彬,王玉往.山西灵丘支家地铅锌银矿隐爆角砾岩筒的岩相分带性研究及其勘查意义[J].地质论评,2012,58(6):1 046-1 055.
- [31] 白国龙,何书跃,赵勇,等.CSAMT法在祁漫塔格隐盲矿勘查中的应用效果——以卡而却卡矿区为例[J].物探化探计算技术,2015,37(5):606-609.
- [32] 赵拓飞.青海东昆仑西段卡尔却卡-阿克楚克赛地区镍、铜成矿作用研究[D].长春:吉林大学,2021.
- [33] 马冬,孙国胜,李雪,等.青海省都兰县沟里地区金矿床地质特征及成因[J].黄金,2022,43(11):13-18.
- [34] 李东生,张文权,田承盛,等.青海祁漫塔格地区主要矿床类型找矿方法探讨[J].西北地质,2013,46(4):131-141.
- [35] 牟江涛,吉明甲,魏丽琼,等.基于加权信息量法的找矿靶区优选方法——以青海省都兰县沟里地区金矿为例[J].黄金,2025,46(4):72-78.
- [36] 宋威方,邹院兵,徐加林,等.鸡公山岩体南缘娘娘顶钼矿床地质特征与找矿潜力分析[J].黄金,2024,45(7):80-87.
- [37] 青海省自然资源厅,青海省地质调查局.青海省重要矿床发现史与经验启示[M].北京:地质出版社,2020.

Application of integrated prospecting technologies in exploration of Ka'erqueka Cu polymetallic deposit, East Kunlun Orogenic Belt and its enlightenment

Zhang Zhenghu¹, Li Xiong², Zhang Daming³, Bai Guolong³, Li Hua², Bao Shanbin², Sun Jinlei⁴

(1. Qinghai No.3 Institute of Geological Exploration for Non-ferrous Metals; 2. Qinghai Geological Survey;

3. No.3 Exploration Institute of Geology Resources of Qinghai Province;

4. College of Earth Sciences, Jilin University)

Abstract: To address the limitations in exploring concealed orebodies within the East Kunlun Orogenic Belt, a case study of the Ka'erqueka Cu polymetallic deposit was conducted. Through regional geological surveys, identification of geochemical anomalies, and the application of integrated prospecting technologies, the geological characteristics and metallogenic mechanisms of the deposit were systematically analyzed, leading to the establishment of an integrated prospecting model. Results indicate that the formation of the deposit is closely related to Late Triassic-Early Jurassic intermediate-acid magmatic intrusions, with the rock mass-surrounding rock contact zone serving as the primary ore-controlling structure. The application of integrated prospecting technologies significantly improves exploration efficiency, achieves breakthroughs in mineral discovery, and validates the suitability of the integrated prospecting model for porphyry-type copper deposits in the East Kunlun Orogenic Belt. This study also reveals the intrinsic relationships among regional magmatic activities, tectonic evolution, and mineralization. The findings not only provide a scientific basis and practical guidance for mineral exploration in the East Kunlun Orogenic Belt but also enrich regional metallogenic theory, demonstrating significant academic value and potential for practical application in exploring concealed orebodies.

Keywords: East Kunlun Orogenic Belt; Ka'erqueka; porphyry type; geological characteristic; metallogenic mechanism; prospecting technology and method; integrated prospecting model