

doi:10.6053/j.issn.1001-1412.2025.01.015

# 激发极化法在青海哈龙尔玛地区铜钼钨多金属矿床勘查中的应用

贾波<sup>1</sup>, 何胜<sup>2,3</sup>, 米晓明<sup>1</sup>, 谢升浪<sup>1</sup>, 陈振兴<sup>1</sup>

(1. 青海省有色第四地质勘查院, 西宁 810007;

2. 中国地质调查局西宁自然资源综合调查中心, 西宁 810021;

3. 东华理工大学水资源与环境工程学院, 南昌 330013)

**摘要:** 青海哈龙尔玛地区位于东昆仑造山带, 该带是中国西部重要的矿产资源基地, 成矿类型复杂, 矿种丰富多样。工作区紧邻热水钼矿、哈陇休玛多金属矿及那更银矿, 区位优势明显。通过综合分析地球物理特征和成矿地质条件, 推测该区深部存在隐伏矿化体。经过激电中梯剖面测量和化探异常查证, 低阻高极化激电异常显示面状异常特征, 与地表发现的黄铁绢英岩化带套合较好, 异常规模大、强度高; 对低阻高极化异常地段实施槽探揭露, 圈出了铜钼钨矿体。采用激发极化法在该区寻找铜钼钨矿是有效的, 为该区下一步找矿部署和目标靶区提供了依据。

**关键词:** 激发极化法; 低阻高极化; 面状异常; 铜钼钨矿床; 哈龙尔玛地区; 青海省

**中图分类号:** P631.3 **文献标识码:** A

## 0 引言

青海省都兰县哈龙尔玛地区位于东昆仑东段, 属于东昆仑多旋回岩浆弧带, 其成矿类型主要有热液脉型、斑岩型和构造蚀变岩型<sup>[1-2]</sup>, 成矿作用与岩浆活动关系密切, 属伯喀里克-香日德印支期金、铅、锌、铁、石墨(铜、稀有、稀土)成矿带(IV-26-2)<sup>[3-6]</sup>, 已发现那更康切尔银矿、哈陇休玛钼矿点、各玛龙铅锌银矿、叶陇沟金矿、尕之麻金银矿等, 在构造蚀变岩型金矿和热液型银矿方面有重大突破<sup>[7]</sup>。2023年在该区肉早某日地区斑岩型铜多金属矿取得重大突破。肉早某日矿区的勘查前期, 地表开展的槽探及钻探验证, 找矿效果一般。通过综合分析地物资料, 结合可控源音频大地电磁测深成果, 在低阻高极

化异常地段利用深孔(1435.47 m)验证, 发现了多条厚大、高品位的隐伏铜多金属盲矿体, 表明该区存在隐伏斑岩型铜多金属矿。本文通过对哈龙尔玛与肉早某日地区开展激电测量并结合成矿特征综合分析, 研究成矿地质条件和深部找矿潜力, 为下一步实施钻探工程提供依据, 以期在寻找斑岩型矿床方面取得新突破。

## 1 研究区概况

### 1.1 地质概况

哈龙尔玛地区位于东昆仑中岩脉弧带, 夹持于昆北、昆中2条区域性深大断裂之间<sup>[3,8]</sup>, 经历了复杂的构造岩浆演化作用, 岩浆岩分布广泛, 构造复杂多样, 成矿地质条件十分优越。区内发育古老变质岩

收稿日期: 2024-08-01; 改回日期: 2024-12-15; 责任编辑: 沈名星

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(编号:DD20230389)、青海省省级地质勘查专项资金项目(编号:2024524109kc075)联合资助。

作者简介: 贾波(1988—), 男, 物化探高级工程师, 主要从事地球物理勘查与研究。通信地址: 青海省西宁市城东区祁连路站西巷火车站商业办公安置区2号地B3楼, 青海省有色第四地质勘查院。邮政编码: 810007。E-mail: 602487330@qq.com

通信作者: 何胜(1988—), 男, 物化探高级工程师, 主要从事地球物理勘查技术应用与研究。通信地址: 青海省西宁市城中区奉青路2号, 中国地质调查局西宁自然资源综合调查中心。邮政编码: 810021。E-mail: 395579229@qq.com

系,印支期、华里西期构造岩浆活动频繁,构造作用较复杂,成矿作用类型多样,化探、物探异常广布,周边已经发现验证多处成矿事实。

哈尔玛地区出露地层主要为古元古代金水口岩群、晚三叠世鄂拉山组及第四纪。断裂构造发育,以 NW 向为主,在调查评价区地层和岩体中广泛分布。断裂性质多样,有正断层、逆断层,也有性质不明的断层,断裂面多以北倾为主,南倾较少,倾角较陡,断裂规模大小不一,与成矿关系密切。岩浆活动十分强烈,岩浆岩分布广泛,主要为中酸性侵入岩。出露的侵入岩主要有晚元古代黑云母石英闪长岩、早二叠世二长花岗岩和石英闪长岩、晚三叠世花岗闪长岩和黑云母二长花岗岩,以及早侏罗世钾长花

岗岩、石英正长岩等。此外,区内零星分布有闪长岩、细晶岩、花岗斑岩等脉岩(图 1)。

哈尔玛地区圈出 HS<sub>Z1</sub><sup>33</sup> 号 1 : 5 万水系沉积物异常,异常以 Mo 元素为主,元素组合为 Cr、Ni、Au、Sb、Zn、Cu,异常北部已发现热水钼矿,证实为矿致异常。工作区中部 1 : 2.5 万地球化学异常以 Mo、Cu、W、Ag 元素为主。通过工作在调查评价区内发现 2 处黄铁绢英岩化带(I、II),共圈出 14 条铜银钨钼矿(化)体。其中, I 号黄铁绢英岩化带为本次工作研究重点,该带位于工作区东部,GA19 号异常中心,呈面状展布,地表出露约 1 km<sup>2</sup>。带内硅化、黄铁矿化、钾化、高岭土化、绢英岩化、云英岩化较为发育,局部具辉钼矿化、黄铜矿化。

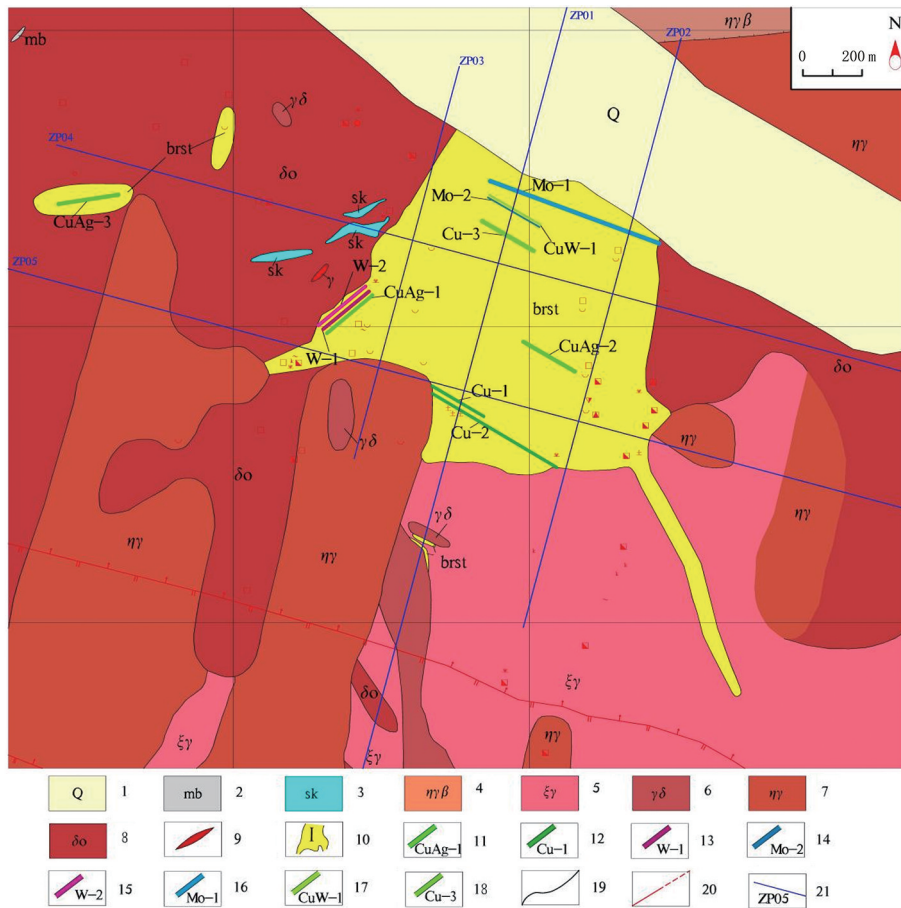


图 1 哈尔玛工作区地质简图

Fig. 1 Geological sketch of Halongerma area

- 1. 残破积物; 2. 大理岩; 3. 砂卡岩; 4. 似斑状二长花岗岩; 5. 钾长花岗岩; 6. 花岗闪长岩; 7. 二长花岗岩;
- 8. 石英闪长岩; 9. 酸性岩脉; 10. 绢英岩化带及编号; 11. 铜银钨矿体位置及编号; 12. 铜矿体位置及编号;
- 13. 钨矿体位置及编号; 14. 钼矿体位置及编号; 15. 钨矿化体位置及编号; 16. 钼矿化体位置及编号;
- 17. 铜钨矿化体位置及编号; 18. 铜矿化体位置及编号; 19. 地质界线; 20. 断层; 21. 激电剖面位置及编号

表1 岩(矿)石电性参数测定结果统计

Table 1 Statistics of electric property measurement of rocks and ores

岩性名称	块数	极化率(%)		电阻率( $\Omega \cdot m$ )	
		变化范围	算术平均值	变化范围	几何平均值
花岗闪长岩	30	0.20~4.79	1.11	1887.99~136554.22	10321.1
钾长花岗岩	31	0.09~3.32	0.93	1646.54~156626.49	13792.64
矽卡岩	32	0.43~2.11	0.93	21.95~8961.97	1098.23
石英闪长岩	30	0.36~7.46	0.96	80.06~47982.86	1586.22
孔雀石化硅化脉	30	0.35~16.91	1.64	37.30~8009.15	993.54
黄铁绢英岩化蚀变岩	30	0.35~19.62	2.69	20.41~6699.50	664
大理岩	30	0.32~7.37	1.04	40.59~6851.42	765.57
黑云斜长片麻岩	30	0.30~2.11	0.95	54.76~7500.72	786.99
二长花岗岩	30	0.48~4.40	1.10	99.04~7492.26	785.52

## 1.2 岩(矿)石物性特征

从标本电物性统计结果(表1)来看,大部分岩体呈现相对高阻,矽卡岩、大理岩、黑云斜长片麻岩电阻率相对较低,且3种岩性的极化率区间相对平稳;孔雀石化硅化脉及黄铁绢英岩化蚀变岩极化率相对较高,其中黄铁绢英岩化蚀变岩最高值达19.62%,为全区最高,平均电阻率为664  $\Omega \cdot m$ ,为全区电阻率最低,与其他岩性存在较大区别(图2)。通过标本测量发现本区岩性的极化率差异不大,但围岩与含矿化岩性的极化率差异较大,孔雀石化硅化脉及黄铁绢英岩化蚀变岩整体表现为中低电阻率、高极化率特征,说明在本区通过激发极化法找矿具备明显的地球物理前提条件。

## 2 工作技术方法

向岩(矿)石供入稳恒电流时,电位差随供电时间的延长而缓慢增大并逐渐趋于饱和,断电后电位差在断电瞬间降至某一数值,然后随着时间的延长而

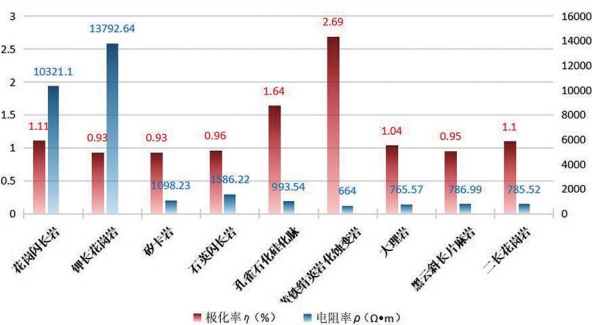


图2 岩(矿)石电性参数测定结果柱状图

Fig. 2 Histogram of electric property measurement of rocks and ores

缓慢衰减并逐渐趋于零,这种在充电和放电过程中产生随时间缓慢变化的附加电场现象称为激发极化效应(也称激电效应)<sup>[9-10]</sup>。不同岩(矿)石在外部电流场激发下都会产生激电效应,在激发极化法勘探中,表征岩(矿)石激电效应的最重要的物理量就是极化率(或频散率)。而岩石和矿石的极化率存在明显差异,金属矿石的极化率为10%~50%,明显大于不含石墨或碳质岩石的极化率值2%。这种差异为利用激发极化法寻找有色金属矿产奠定了重要的物理基础。激发极化法勘探就是以地下介质的极化率差异或充放电曲线的差异为基础,通过观测和研究激电场随时间和空间的变化规律以解决地质问题的一种地球物理勘探方法,简称激电法<sup>[11-13]</sup>。

本次工作采用的是加拿大GDD Instrumentation公司研制的GDD大功率直流激电仪,可同时进行2或8通道全波形数据采集,也可扩展到10、16、24和32道;接收机的电位观测精度可达0.5  $\mu V$ ,使用PDA掌上电脑操控仪器,可实时显示各采集道的接地状态、二次场衰减曲线等;发射机的最大供电电流20 A,稳流精度可达0.1%,供电电压150~2400 V且可14个档位切换。

本次激电工作采用中梯装置,选用参数:AB=1200 m, MN=40 m, T=32 s,延迟时间100 ms。

## 3 矿化异常特征

### 3.1 激电异常特征分析

从激电中梯等值线平面图上可以看出(图3),在I号黄铁绢英岩化带中显示宽缓的中低阻高激电异常,面状异常特征较明显,与圈出的I号黄铁绢英岩化带吻合;异常宽度大,极化率较高,极化率一般



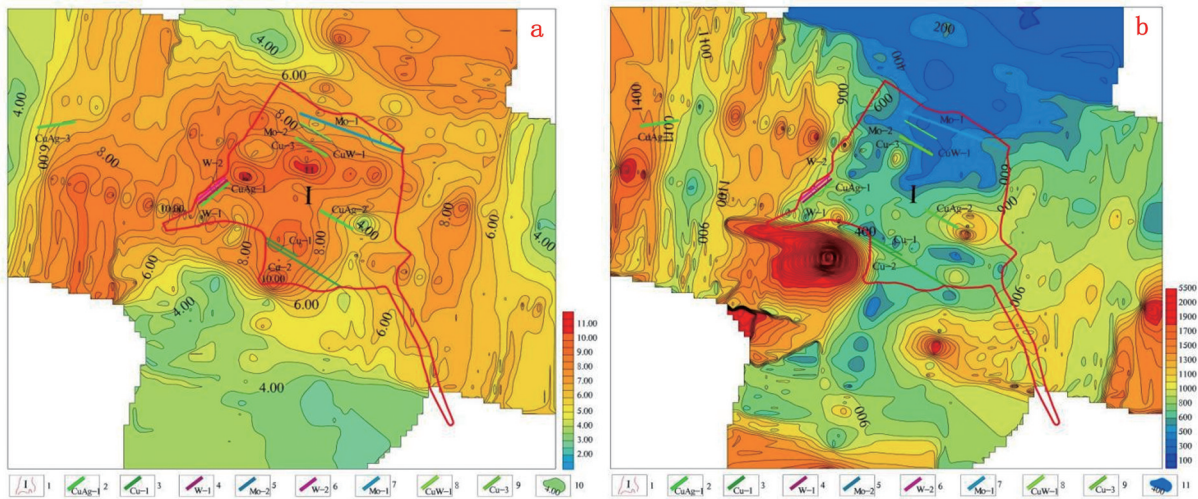


图 3 I 号黄铁绢英岩化带激电中梯视极化率 (a)、视电阻率 (b) 等值线平面图

Fig. 3 Plan Contour of  $\eta_p$  apparent  $\rho_s$  of central gradient array IP polarization (a) and resistivity (b) of phyllic alteration zone I

- 1. 绢英岩化带及编号; 2. 铜银矿体位置及编号; 3. 铜矿体位置及编号; 4. 钨矿体位置及编号;
- 5. 钼矿体位置及编号; 6. 钨矿化体位置及编号; 7. 钼矿化体位置及编号;

- 8. 铜钨矿化体位置及编号; 9. 铜矿化体位置及编号; 10. 视极化率异常等值线图; 11. 视电阻率异常等值线图



图 4 哈尔玛地区铜、钼矿化

Fig. 4 Map showing Cu, Mo mineralization

为 4.4%~11.26%，最高 12.12%。通过槽探揭露 (图 4)，已圈出铜钼矿体，激电异常显示区内含矿岩体 (斑岩体) 空间展布规模较大，深部具有较大的找矿空间。

典型剖面特征: ZP01 (图 5) 长 2120 m，方位 15°，剖面全线呈现正异常特征，磁异常峰值为 190.5 nT; 从激电剖面上看，激电异常特征与地表岩性分层有较高的吻合度。在激电剖面 1000~2120 m 处出现磁电异常相对套合较好的低阻高极化率异常，

视极化率峰值为 11.62%，对应视电阻率为 460.6  $\Omega \cdot m$ ，对应磁异常峰值约为 187.5 nT。

低阻高极化地段地表绢英岩化、高岭土化蚀变发育，采用槽探进行揭露，在 23HTC04 圈出铜矿体 2 条。其中，Cu-1 号矿体厚 1.03 m，品位 2.37%，岩石具硅化、黄铁矿化、黄铜矿化; Cu-2 矿体厚 1.13 m，品位 2.21%，赋矿岩性为孔雀石化石英脉，具硅化、黄铁矿化、黄铜矿化、辉铜矿化。从岩石学特征分析，该区存在斑岩型铜矿床矿化蚀变分带的

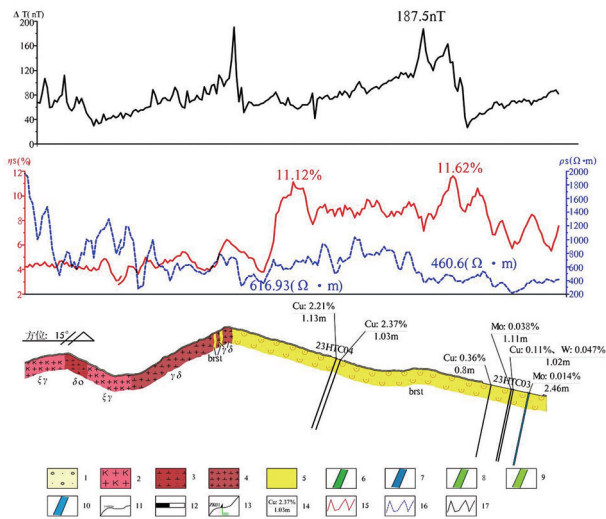


图5 ZP01地物综合剖面图

Fig. 5 Integrated geological and geophysical section ZP01

1. 第四系残坡积物; 2. 钾长花岗岩; 3. 石英闪长岩;
4. 花岗闪长岩; 5. 黄铁绢云岩; 6. 铜矿体; 7. 钼矿体;
8. 铜矿化体; 9. 铜钼矿化体; 10. 钼矿化体; 11. 槽探位置及编号;
12. 化学样采样位置及编号; 13. 设计钻孔位置及编号;
14. 矿体平均品位-真厚度; 15. 视极化率曲线;
16. 视电阻率曲线; 17. 磁异常曲线

高岭土化带和石英-绢云母化带的结合部特征的可能,深部具有寻找斑岩型铜矿床的潜力。

### 3.2 化探异常查证

GA19Cu、Mo(W、Ag、Pb、Zn、As、Sn)综合异常位于调查评价区东南部,异常以Cu、Mo、W元素为主,Cu元素峰值 $272 \times 10^{-6}$ 、面积 $1.77 \text{ km}^2$ 、衬度1.59;W元素峰值 $100 \times 10^{-6}$ 、面积 $2.69 \text{ km}^2$ 、衬度2.88;Mo元素峰值 $7.15 \times 10^{-6}$ 、面积 $0.98 \text{ km}^2$ 、衬度1.76;Ag元素峰值 $894 \times 10^{-9}$ 、面积 $1.74 \text{ km}^2$ 、衬度2.19,各元素三级浓度分带,浓集中心明显、峰值较高,套合性较好。

异常出露于印支期花岗闪长岩及华力西期二长花岗岩、石英闪长岩中,其中岩体顶部分布含铜、银、钨、钼矿化的黄铁绢英岩化带(I),通过开展物探工作,以低阻高极化率异常特征在该处圈定椭圆状激电异常带1条,面状异常特征较明显(图6)。在激电异常高值段揭露圈出铜银钨矿体7条(I-3Mo、I-6W、I-7CuAg、I-8CuAg、I-9Cu、I-10Cu、I-11CuAg)、铜钼矿化体4条(I-1Mo、I-2CuW、I-4Cu、I-5W),该异常为矿致异常。通过化探异常查证黄铁绢英岩化带与本次激电异常具有较好的对应关系,为下一步找矿靶区指明了方向。

## 4 找矿前景探讨

东昆仑造山带内中酸性岩体广布,与不同规模中酸性侵入体相伴有大量小规模(斑)岩体产出,这些小岩体与区内斑岩型矿床关系密切<sup>[14-16]</sup>。哈龙尔玛地区形成于印支晚期东昆仑强烈壳幔混合作用背景下,且可能遭受了一定的剥蚀,深部有一定的找矿潜力。

区域内已发现的斑岩型矿(床)点整体与NW向展布的弱磁异常关系较为密切。以往发现哈陵休玛、热水等钼(铜)矿床,2023年新发现哈龙尔玛、加当斑岩型铜钼多金属矿化点,显示沿哈陵休玛-哈龙尔玛及其延伸方向上具有较大的找矿空间。调查评价区内发现的黄铁绢英岩化带总体呈NW向展布,沿1:2.5万水系沉积物综合异常宏观上表现为NW向呈串珠状分布于弱磁异常地段,表明调查评价区找矿潜力较大。

I号黄铁绢英岩化带地表绢英岩化、高岭土化强,激电异常显示区内含矿岩体(斑岩体)空间展布规模较大,深部具有较大的找矿空间。针对深部地质情况的物探方法选择尤为重要,而磁法测量对隐伏岩体有较好的识别而常被运用于寻找与隐伏岩体有关的矿床(如斑岩型矿床)<sup>[17-19]</sup>,下一步开展磁法测量工作,为找矿工作部署提供目标靶区。

## 5 结语

(1)通过开展激电中梯测量,圈出了宽泛的高极化率异常区,与围岩的低极化率区分明显,利用该方法在无钻探数据支撑的覆盖区圈定异常,直接服务于找矿工作,取得了良好效果。该方法成本低、施工效率高,可为类似地区铜多金属矿勘查提供借鉴。

(2)I号黄铁绢英岩化带激电异常表现为低阻高极化面状异常特征,地表绢英岩化、高岭土化蚀变发育,槽探揭露圈出铜多金属矿体,从岩石学特征分析,具高岭土化带和石英-绢云母化带的矿化蚀变分带特征,深部具有寻找斑岩型铜矿床的潜力。哈龙尔玛工作区中部1:2.5万地球化学异常以Mo、Cu、W、Ag元素为主,异常规模大,强度高,通过调查评价工作,已圈出铜多金属矿体,有较好的对应性。



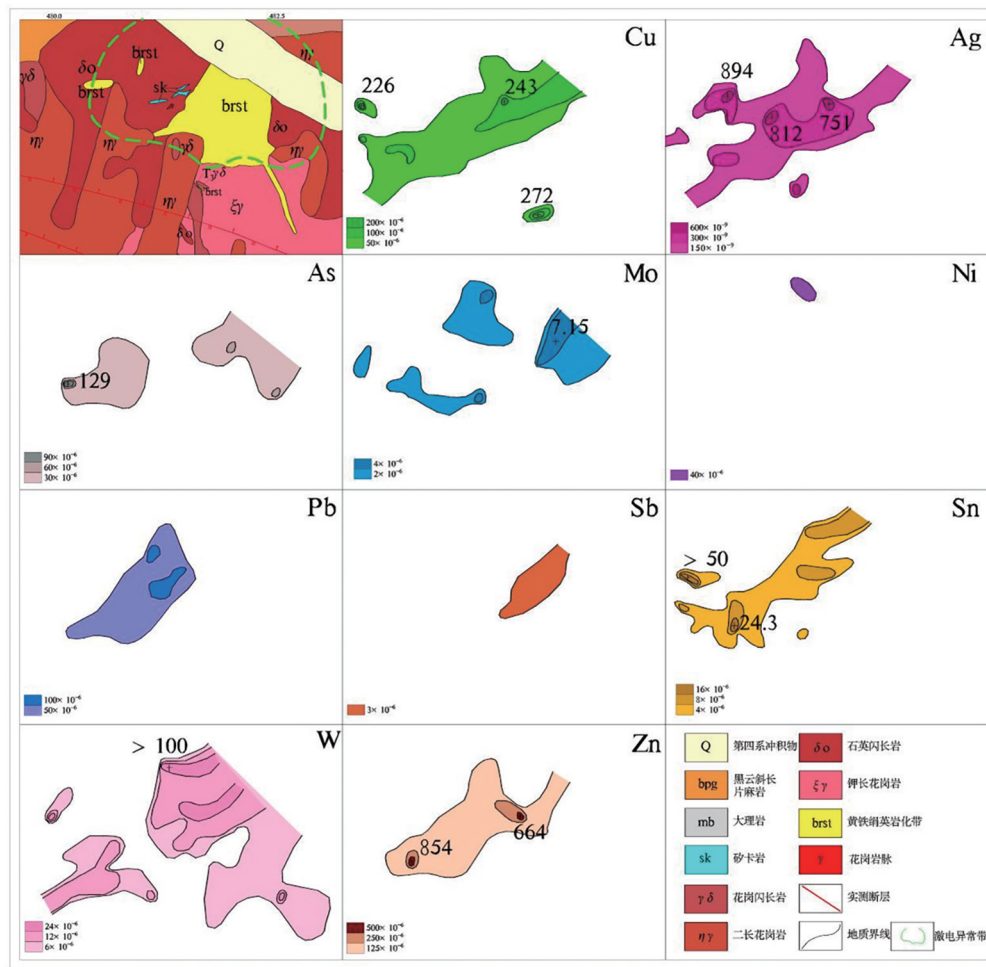


图 6 GA19 综合异常剖析图

Fig. 6 Interpretation map of comprehensive anomaly GA19

(3)通过激电测量和化探异常查证,可以显著增强找矿效果,低阻高极化激电面状异常特征与地表发现的黄铁绢英岩化带套合较好,异常规模大,强度高;对低阻高极化异常地段实施槽探揭露,圈出了铜钼钨矿体,了解了该区电性结构、岩体分布,查明了其规模、形态、埋深等,为下一步钻探工程布置提供了依据。

参考文献:

[1] 林贵,王宗胜,何书跃. 青海省骆驼峰地区斑岩型铜钼矿找矿前景分析[J]. 地质与资源, 2023, 32(5): 540 - 546.

[2] 钟明峰. 综合物探方法在青海省都兰县哈日扎多金属矿勘查中的应用研究[D]. 吉林大学, 2018.

[3] 潘彤. 青海成矿单元划分[J]. 地球科学与环境学报, 2017, 39(1): 16 - 33.

[4] 薛长军,张世龙,马炳德,等. 青海东昆仑各玛龙银多金属矿地质特征及找矿远景分析[J]. 矿产勘查, 2019(9): 2153 - 2161.

[5] 贾群子,杜玉良,栗亚芝. 青海省金属矿产成矿条件及成矿预测[M]. 中国地质大学出版社, 2016.

[6] 潘桂棠,肖庆辉,陆松年,等. 中国大地构造单元划分[J]. 中国地质, 2009, 36(1): 1 - 28.

[7] 谢升浪,孔维宾,李鑫,等. 东昆仑地区那更康切北银多金属矿地球化学特征及找矿前景[J]. 矿产勘查, 2020, 11(5): 880 - 889.

[8] 祁生胜,王秉璋,于文杰,等. 青海省矿产资源潜力评价成矿地质背景研究报告[M]. 北京:地质出版社, 2007.

[9] 傅良魁. 激发极化法[M]. 北京:地质出版社, 1982: 67 - 89.

[10] 郭振威,李方达,柳建新,等. 海洋有色金属矿产地球物理勘探进展[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(1): 285 - 306.

[11] 刘海飞,柳建新,刘嵘,等. 激发极化法在有色金属矿产勘查中的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(1): 203 - 222.

[12] 杨红. 激发极化法在漳平市永福铅锌矿区勘探中的应用[J]. 中国西部科技, 2008, 7(33): 20 - 21, 32.

[13] 许力,马润勇,潘爱芳,等. 激电测深和 CSAMT 法在陕西石泉地热勘查中的综合探测[J]. 河南科学, 2021, 39(1): 68 - 75.

[14] 许庆林,孙丰月,李碧乐,等. 东昆仑莫河下拉银多金属矿床花岗岩斑岩年代学、地球化学特征及其构造背景[J]. 大地构造与成矿学, 2014, 38(2): 421 - 433.

- [15] 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.
- [16] 袁万明,莫宣学,张爱奎,等. 青海省东昆仑斑岩带新发现[J]. 地学前缘, 2017, 24(6): 1-9.
- [17] 黎海龙,麦广田,区小毅. 综合物探在探测深部隐伏岩体的应用实例: 桥圩磁异常(桂 C-59-3)的综合解释[J]. 矿产与地质, 2016, 30(3): 439-445.
- [18] 黄海昆,王江超,郭培文,等. 内蒙古阿拉善右旗北大山中段物化探找矿应用[J]. 矿产与地质, 2019, 33(2): 317-324.
- [19] 王永德,李生虎. 青海益克郭勒斑岩型铜矿深部找矿潜力分析[J]. 矿产与地质, 2023, 37(4): 794-805.

## Application of IP geophysical method to Cu-Mo-W Polymetallic deposit exploration in Halongerma area in Qinghai province

JIA Bo<sup>1</sup>, HE Sheng<sup>2,3</sup>, MI Xiaoming<sup>1</sup>, XIE Shenglang<sup>1</sup>, CHEN Zhenxing<sup>1</sup>

(1. The 4th Non-ferrous metal Geological Survey Institute of Qinghai Province, Xining 810007, Qinghai province, China;

2. Xining Center of Natural Resources Comprehensive Survey, CGS, Xining 810021, Qinghai province, China;

3. School of Water Resources and Environmental Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi province, China)

**Abstract:** Halongerma area is located in east Kunlun organic belt. The belt is an important mineral resources base of the west China with complex metallogenic processes and multi-ore types. The study area is near Reshui Mo deposit, Halongxiuma polymetallic deposit and Nageng Ag deposit. Comprehensive analysis of geophysical characteristics and metallogenic conditions show that hidden mineralized bodies may occur to depth of the study area. Mid ladder profile measurement is conducted and large planar low resistivity and high polarization IP anomaly lineated. Checked by geochemical anomaly the geophysical anomaly fits whell the surgical phyllic alterat ion zone. Trenches are rigged at the anomaly and Cu-Mo-W ore bodies located thus IP polarization is effective for targeting polymetallic deposit in future exploration in the area.

**Key Words:** IP polarization method; low resistivity and high polarization anomaly; planar anomaly; Cu-Mo-W mineralization; Halongerma area; Qinghai province