

基于广域-编码源电磁测深的白银厂小铁山 VHMS 型矿床深部找矿模型构建

郭小刚^{1, 2, 3}, 戴霜^{1, 2}, 罗维斌⁴, 郭伟亮⁵, 廖永锋⁶, 韩峰^{2, 3},
周小红⁷, 王秦^{2, 3}, 韩盼^{2, 3}

1.兰州大学地质科学与矿产资源学院, 甘肃兰州, 730000; 2.自然资源部黄河上游战略性矿产资源重点实验室, 甘肃兰州, 730046; 3.甘肃省有色金属地质调查局白银矿产勘查院, 甘肃白银, 730900; 4.兰州资源环境职业技术大学, 甘肃兰州, 730021; 5.中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙, 410083; 6.白银有色集团股份有限公司小铁山矿, 甘肃白银, 730900; 7.北京金浩林勘探技术有限公司, 北京, 100080

摘要: 深部就矿找矿是白银厂 VHMS 型铜多金属矿田找矿突破的关键, 但传统地球物理方法受浅表电磁干扰与深部低分辨率限制。为克服上述难题, 本研究创新联合广域电磁法 (WFEM) 与编码源电磁测深法 (CSES) 开展小铁山矿田深部勘查。结果表明: 铁锰硅质岩和铅锌矿石电阻率低于 $100 \Omega \cdot m$, 赋矿石英角斑凝灰岩电阻率平均值约 $191 \Omega \cdot m$, 主要控矿地质体次石英角斑岩电阻率较高 (平均值约 $1976 \Omega \cdot m$), 电性差异显著。次火山岩侵入体呈树枝状高阻异常 ($>1500 \Omega \cdot m$), 其两侧过渡带低阻异常 ($\rho < 400 \Omega \cdot m$)、矿体延深部位及顶部低阻异常为有利找矿地段。2 种方法在在火山岩复杂地层区联合应用可发挥协同效应, 广域电磁法可有效揭示火山岩基底及深部高阻岩体电性结构, 编码源电磁测深法可实现对中浅层低阻矿化带的精细刻画。结合成矿动力学机制, 提出“火山机构-热液对流-构造活化”复合成因模型, 并构建了地质-地球物理“岩浆-构造-蚀变”协同找矿模型, 据此圈定 4 处找矿靶区。为钻探工程验证提供了依据, 对白银厂矿田深部勘查及区域示范具有重要的指导意义。

关键词: 白银厂小铁山 VHMS 铜多金属矿床 广域电磁法 编码源电磁测深法 找矿模型 深部找矿

中图分类号: P612; P622+.2; P631.3

收稿日期: 2024-11-13

Construction of a Deep Prospecting Model for the Baiyinchang Xiaotieshan VHMS-type Deposit Based on Wide-Field Coded-Source Electromagnetic Sounding Method

Guo Xiaogang^{1,2,3}, Dai Shuang^{1,2}, Luo Weibin⁴, Guo Weiliang⁵, Liao Yongfeng⁶,
Han Feng^{2,3}, Zhou Xiaohong⁷, Wang Qin^{2,3}, Han Pan^{2,3}

1.School of Earth Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu China; 2.Key Laboratory of Strategic Mineral Resources of the Upper Yellow River, Ministry of Natural Resources, Lanzhou 730000, Gansu China; 3.Baiyin Mineral Exploration Institute of Gansu Nonferrous Metal Geological Exploration Bureau, Baiyin 730900, Gansu China; 4.Lanzhou Resources and Environment VOC-TECH University, Lanzhou 730021, Gansu China; 5.School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410083, Hunan China; 6.Xiaotieshan Mining Company of Baiyin Nonferrous Group Co., LTD, Baiyin 730900, Gansu China; 7. Beijing Horin Exploration Technology Co., LTD, Beijing 100080, China.

Abstract: (Objective) Prospecting for ore bodies in the deep and peripheral zones remains pivotal for breakthroughs in the volcanic-hosted massive sulfide (VHMS)-type Cu-polymetallic ore field of the Baiyinchang district. However, conventional geophysical methods face limitations due to shallow electromagnetic interference and insufficient resolution at depth. **(Methods)** To address these challenges, this study innovatively integrated the Wide-Field Electromagnetic Method (WFEM) and Coded Source Electromagnetic Sounding (CSES) for deep exploration in the Xiaotieshan mining area. **(Results)** The results demonstrate that the resistivity of ferromanganese siliceous rocks and lead-zinc ores is below $100 \Omega \cdot m$, while the ore-hosting Quarte-keratophyre tuffs exhibit a low resistivity (mean value: $191 \Omega \cdot m$). In contrast, the subquartz-keratophyre, as the main ore-controlling geological unit, shows significantly higher resistivity (mean value: $1976 \Omega \cdot m$), revealing quantifiable electrical contrasts. Subvolcanic intrusions are characterized by dendritic high-resistivity anomalies ($>1500 \Omega \cdot m$), with favorable prospecting targets identified in transitional zones ($<400 \Omega \cdot m$), deep extensions of known ore bodies, and low-resistivity anomalies atop high-resistivity zones. **(Conclusions)** The combined application of two geophysical methods in complex stratigraphic regions of volcanic rocks

[基金项目]国家重点研发计划 (No.2022YFC2903305)、甘肃省自然资源科技创新与应用研究项目 (No.202406)、自然资源部黄河上游战略性矿产资源重点实验室开放课题资助项目 (No. YSMRKF202209) 与白银有色集团股份有限公司商业风险勘查项目 (小铁山矿采矿权标高以下普查 (第一阶段) 施工项目) 联合资助。

[第一作者]郭小刚 (1989-), 男, 在读博士, 高级地矿工程师, 主要研究矿产资源综合勘查与评价. E-mail: xgguogansu@163.com. ORCID: 0000-0003-4784-9741.

[通讯作者]戴霜 (1967-), 男, 教授, 博士, 主要从事板块构造与成矿作用研究, E-mail: daisher@lzu.edu.cn.

demonstrates synergistic effects: the wide-field electromagnetic method effectively reveals the electrical structure of volcanic basement and deep-seated high-resistivity rock masses, while the encoded-source electromagnetic sounding method enables high-precision delineation of middle-shallow low-resistivity mineralized zones. Based on integrating geophysical anomalies and metallogenic dynamics, a composite genetic model—termed "volcanic structure–hydrothermal convection–tectonic activation"—is proposed to elucidate the multi-stage mineralization processes. A geological-geophysical "magma-tectonic-alteration synergistic prospecting model" was established, delineating four prospective targets. These findings provide critical constraints for drill hole verification and offer scientific guidance for deep-peripheral exploration in the Baiyinchang ore field and regional analog studies.

Keyword: Xiaotieshan Deposit of the Baiyinchang District; VHMS-Type Copper Polymetallic Deposit; Wide Field Electromagnetic Method; Coded Source Electromagnetic Sounding Method; Prospecting Model; Deep Prospecting

0 引言

随着全球浅表矿产资源日益枯竭,深部资源勘查已成为保障矿产资源可持续供给的战略需求(底青云等, 2019)。老矿山因长期开采活动形成的采空区、地下工程构筑物及浅部电磁噪声干扰,导致传统地球物理方法面临信号衰减显著、分辨率不足等瓶颈(柳建新等, 2016)。近年来,广域电磁法(Wide-Field Electromagnetic Method, WFEM)与编码源电磁测深法(Coded Source Electromagnetic Sounding, CSES)通过技术创新,显著提升了深部地质体的探测能力,为老矿山深边部找矿提供了突破性技术支撑。广域电磁法基于半空间电磁场理论构建广域视电阻率模型,突破了传统可控源音频大地电磁法(CSAMT)的平面波理论限制(何继善, 2010),使探测深度由常规的 500 米提升至 3000 米以上(肖晓等, 2024);采用多频同步发射技术与动态自适应滤波算法有效抑制了工频干扰(石郝等, 2017);长偶极非接触式电极布置方案显著降低浅表设施引起的电磁耦合干扰(石郝等, 2017; 何继善, 2019)。在安徽铜陵冬瓜山矽卡岩型铜矿深部勘查中实现了精细数据去噪,探测深度达-3 km,反演结果与 1000 m 以浅已知地层、岩体及矿体分布高度吻合(肖晓等, 2024);在内蒙古某银铅锌矿 1000 m 深度圈定低阻异常带,垂向分辨率较 CSAMT 提升 2.8 倍,钻探验证为铅锌银矿体(朱裕振和徐从跃, 2011);在北秦岭蟒岭矿集区腰庄铜矿勘查中反演推断岩体顶面深度,钻探验证发现隐伏花岗岩体及外接触带铜矿(化)体(张晓团等, 2024);在湖南水口山铅锌矿强干扰矿区清晰圈定断裂构造带,反演结果与已知地质剖面基本一致,指导了深部靶区圈定(石郝等, 2017)。编码源电磁测深法的技术核心是采用逆重复 M 序列编码调制发射电流波形,通过循环互相关运算抑制非相关噪声以显著提升信噪比,使有效信号增益达到 20 dB 以上(汤井田和罗维斌, 2008; 罗维斌等, 2012; 高曙德等, 2017);通过调整编码参数和优化激发极化效应适用于含高阻基底或低阻夹层的复杂地层区(柳建新等, 2008);在浅层勘探中也具有分辨率高和抗干扰能力强的优势(贾晨星等, 2024)。

甘肃白银厂作为我国西部祁连山造山带重要的火山岩赋矿型块状硫化物(VHMS)铜多金属矿田(Hou et al., 2008; 郭小刚等 2025),其典型的“黑矿”型矿床小铁山已累计探明铜、铅、锌金属资源量约 160 万吨。历经 40 余年开采,浅部矿体(垂深 ≤ 740 m)已近枯竭,深部资源接续成为保障矿山可持续发展的关键。然而,深边部勘查依然面临技术瓶颈:(1)采空区与工业设施导致强电磁干扰;(2)深部矿体与围岩物性差异微弱,重力和磁法勘探对矿田深部地质体的分辨力不够(郭小刚等, 2022);(3)可控源音频大地电磁测深法(CSAMT)受地形起伏影响较大,虽然有较好的横向分辨力,但对静态效应与地形影响的处理欠佳(张旭等, 2010);瞬变电磁测深法(TEM)受地形影响小,深部分辨力较高,但易受矿区工业电流干扰(王胜涛等, 2023);(4)根据近年来的地质勘探成果分析认为其深部还有望找到新的接续资源,但其电性结构特征尚不明晰。

因此,针对小铁山矿区深部地质结构复杂、电磁干扰强烈等勘查难题,本研究创新性地联合应用广域电磁法(WFEM)与编码源电磁测深法(CSES)在矿区 7、9、11、13 线开展剖面测量工作,通过构建“深浅结合、抗噪协同”的探测技术体系和多参数约束反演揭示深部地质异常体的分布特征,结合矿区地质特征、成矿规律与找矿信息建立地质-地球物理找矿模型,可以为深部钻探验证工程布设提供依据,对白银厂矿田深部勘查及区域示范 also 具有重要的意义。

1 地质背景和矿床地质

1.1 地质背景

甘肃白银厂铜多金属矿田位于北祁连造山带东段(宋叔和, 1982; 郭介人, 1992; Song et al., 2013),

南接中祁连地块，北临阿拉善地块（图 1a）。北祁连造山带经历了中寒武世陆壳裂解、晚寒武世-早奥陶世裂谷扩张向洋壳过渡、中奥陶世岛弧环境、中-晚奥陶世转变为岛弧裂谷和弧后盆地张裂环境，形成了完整的沟-弧-盆体系（夏林圻等 2016；Song et al., 2013；Wang et al., 2014；Zhao et al., 2018）。伴随着奥陶纪强烈的俯冲-碰撞作用海底火山猛烈爆发，产生了大量的含矿热液流体和同生断裂系统，为 VHMS 型铜多金属矿床的形成提供了有利的地质条件。

白银厂矿田主要出露寒武系黑刺沟组、香毛山组和奥陶系白银岩群（图 1b）。黑刺沟组主要岩性为浅变质的基性火山岩夹碎屑岩，沿矿田北、西、南三面呈半环状分布；香毛山组以浅变质的碎屑岩为主，分布在矿田东部；奥陶系白银岩群为一套低绿片岩相的双峰式火山岩，主要由石英角斑岩、角斑岩等熔岩和中酸性集块岩、凝灰岩以及凝灰质砂岩组成，基性火山岩与酸性火山岩常伴生产出，表现为流纹岩-玄武岩组合（计波等，2024）。奥陶系白银岩群火山岩整体呈穹隆状产出，酸性火山岩是主要的赋矿层位。规模较大的北东东向 F1 断裂是区内最主要的控岩控矿构造。重磁异常数据显示矿田内可能还存在多条近南北向和北东东向的隐伏基底断裂（郭小刚等，2022，2025）。

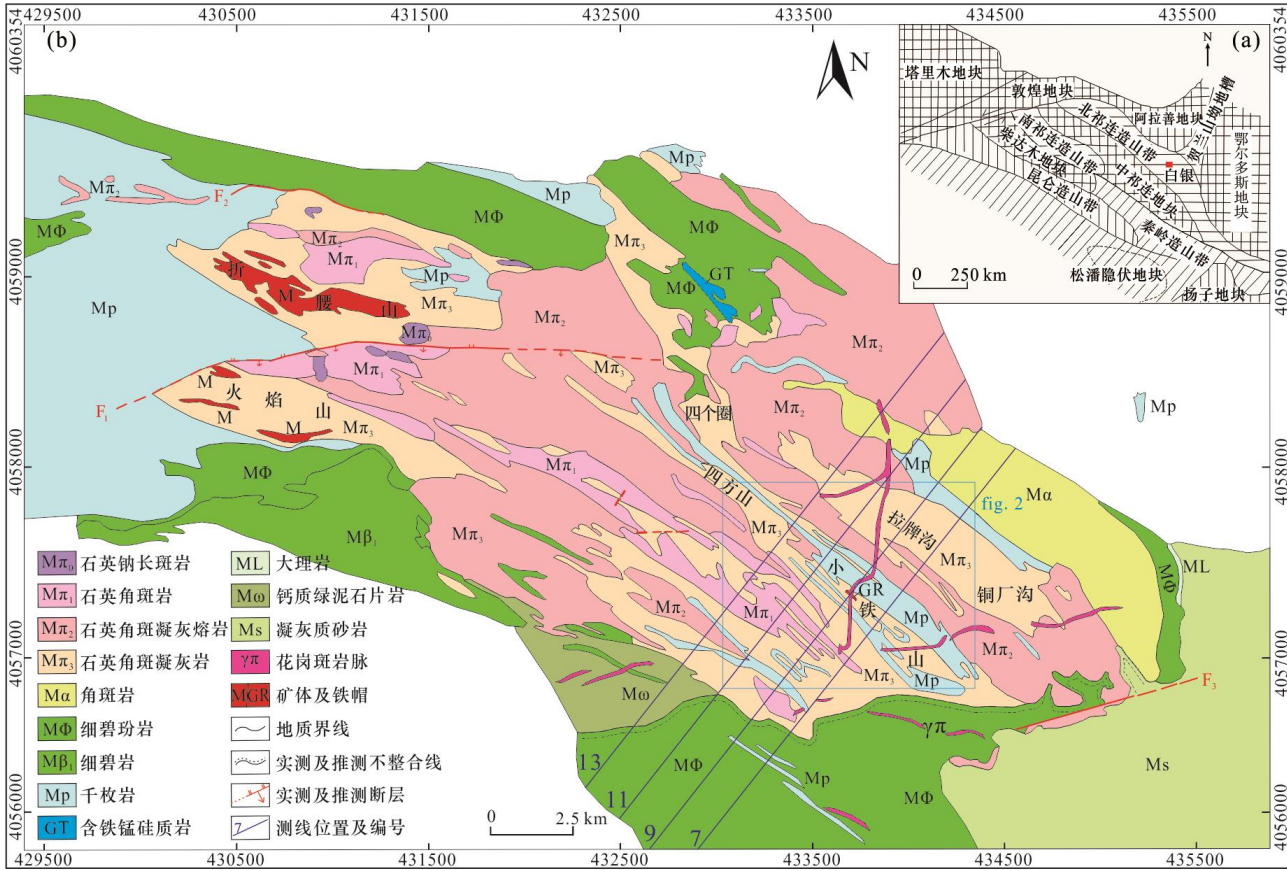


图 1 甘肃白银厂铜多金属矿田构造地质简图（a.据郭介人等，1992 修改；b.据郭小刚等，2025 修改）
Fig.1 Tectonic and geological sketch of the Baiyinchang Cu-polymetallic field, Gansu (a.after Wu et al.,1992; b.after Guo et al.,2025)

1.2 矿床地质

矿田由折腰山、火焰山、拉牌沟、四个圈、四方山、小铁山、铜厂沟 7 个矿床组成（图 1b），其中位于矿田南东部的小铁山是矿田内最大的矿床。矿体主要赋存在含酸性-中酸性角砾、集块的石英角斑凝灰岩中（图 2）。矿体上盘为火山喷发间歇期的碎屑沉积岩和喷发相的石英角斑凝灰岩，下盘以次火山岩相的石英角斑岩为主。矿床由 3 个大矿体和 9 个小矿体构成，主要为似层状和透镜状。矿体连续性较好但形态较复杂，沿走向与倾向均有尖灭、再现、分枝、复合、膨缩等现象。I 号和 III 号主矿体位于 9 线~10 线之间，矿体走向近北西向，向东局部扭转为北西西向。矿体倾角有浅部向深部逐渐变陡的趋势，即由浅部的 40~60° 在 1600 米左右变为 70~80°，直至直立；局部矿体产状变化较大，在剖面上具褶曲现象；矿体埋深变化也较大，总体呈现东部浅、西部深的特点，埋深由 10~50m 变化为 350~400m。II 号主矿体位于另一个含矿层内，其产状特征与 I 号和 III 号主矿体相似（图 3）。

小铁山矿床的矿石中主要金属矿物有黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿等，次要金属矿物有（砷）黝铜矿、辉铜矿、斑铜矿、铜兰、褐铁矿等；脉石矿物主要有石英、重晶石、斜长石、石膏、绿泥石、绢云

母等；围岩蚀变较发育，主要有绿泥石化、绢云母化、硅化、黄铁矿化。较特殊的蚀变有碳酸盐化和重晶石化等（甄世军等，2013；梁婉娟等，2016；郭小刚等，2025）。

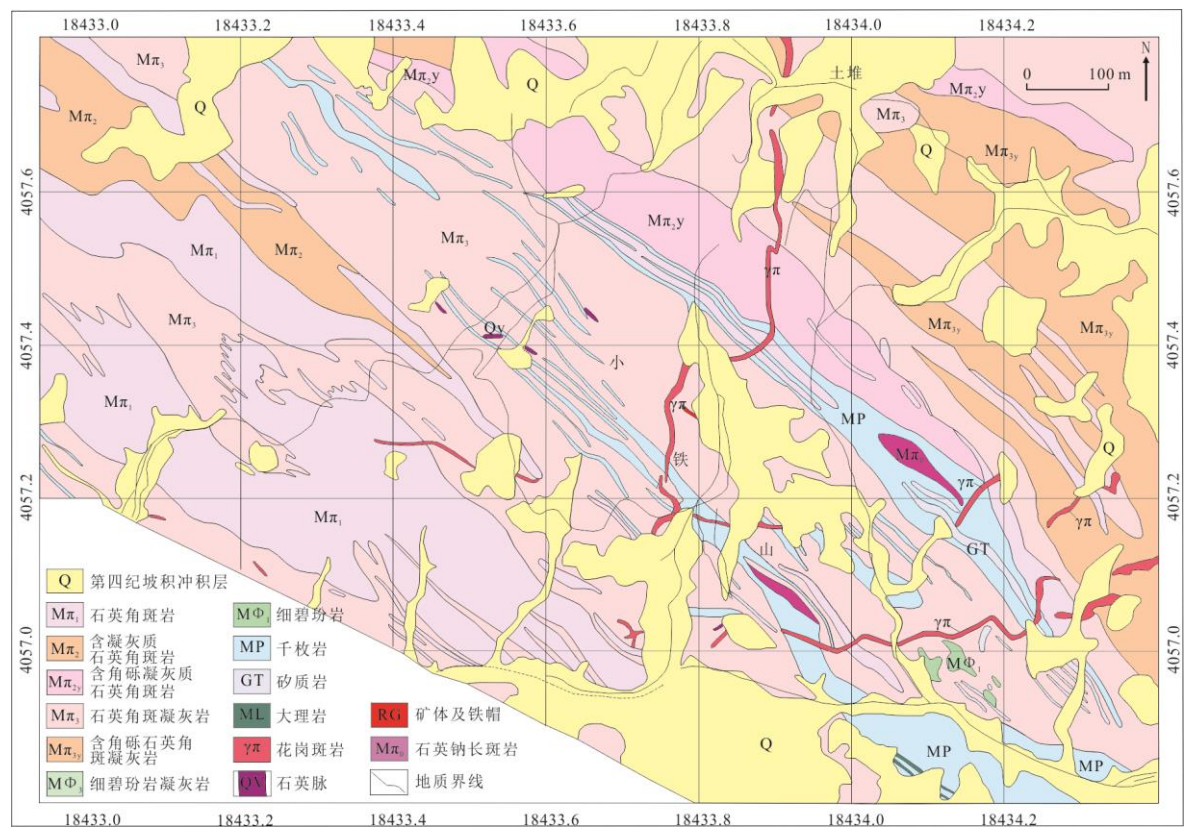


图2 甘肃白银厂铜多金属矿田小铁山矿床地质简图（据廖时理，2014 修改）

Fig.2 Geological sketch map of Xiaotieshan deposit, Baiyinchang Cu-polymetallic field, Gansu (after Liao, 2014)

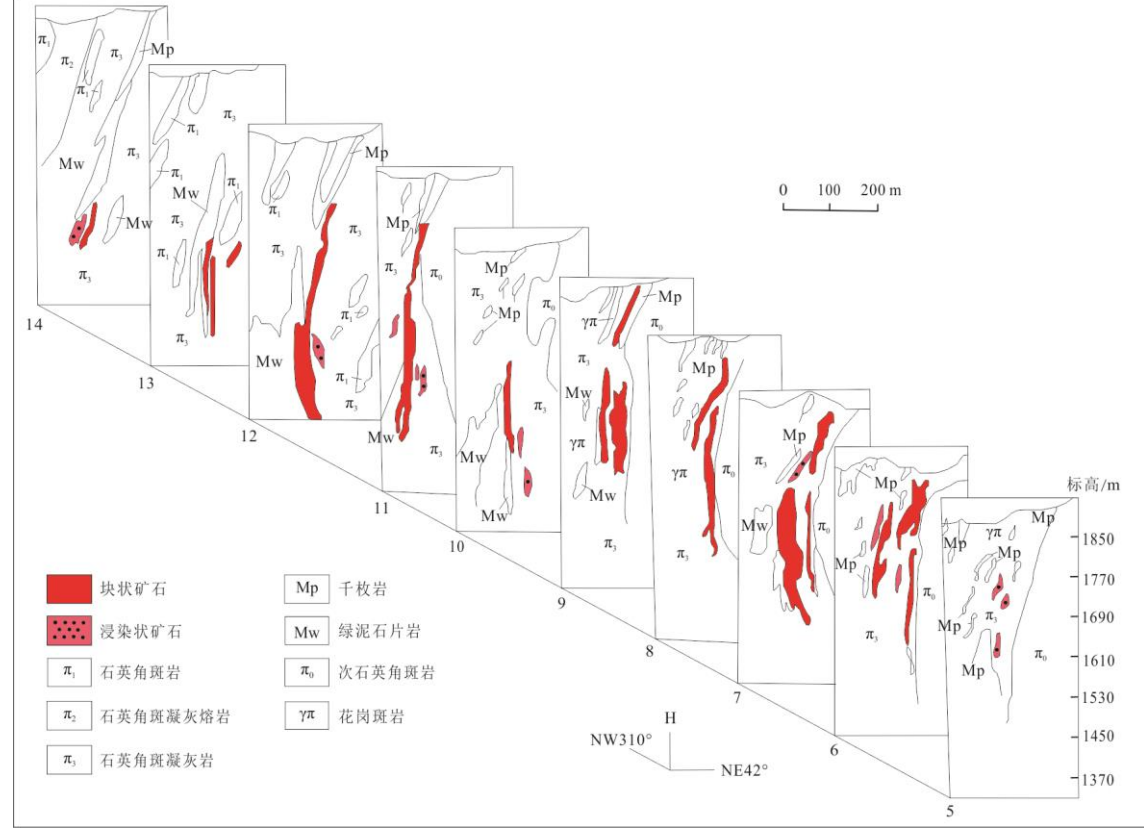


图3 小铁山矿床联合剖面图（引自廖时理，2014）

Fig.3 Joint section of the Xiaotieshan deposit (from Liao, 2014)

1.3 地球物理背景

白银厂矿田布格重力异常场西高东低，剩余重力异常场大致呈现出正负相间的特征；西部折腰山-火焰

山地区火山口表现为规模较大的环状或似圆形正异常，东部火山口则表现为小范围等轴状负异常。剩余重力异常梯度带与矿床分布密切相关(图 4a)。例如，折腰山矿床位于 $-0.2 \sim 3.8 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$ 梯度带，小铁山矿床位于 $-0.2 \sim -0.1 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$ 梯度带。磁异常场可分为四个磁异常区，各矿床均处于中部正负变化的磁场区内；矿田西部火山口周围常见圆形或似圆形正磁异常（ $30 \sim 136 \text{ nT}$ ）与负磁异常（ $-36 \sim -150 \text{ nT}$ ）；东部火山口表现为被正磁异常环绕的磁负异常（ $-30 \sim -337 \text{ nT}$ ）（图 4b）。矿田中部白银岩群火山穹窿构造表现为大范围嵌套式环状重力异常，反映基底断裂和火山喷发中心的分布。重磁异常数据构造反演结果显示区内以 NEE 向 F1、F2 断裂和近 NS 向 F3-F7 断裂为主，形成棋盘网格状构造格局。NEE 向断裂为岩浆通道，控制火山岩岩性及岩相分布；近 NS 向断裂稍晚形成，与 NEE 向断裂共同控制矿体空间展布(郭小刚等, 2022)。

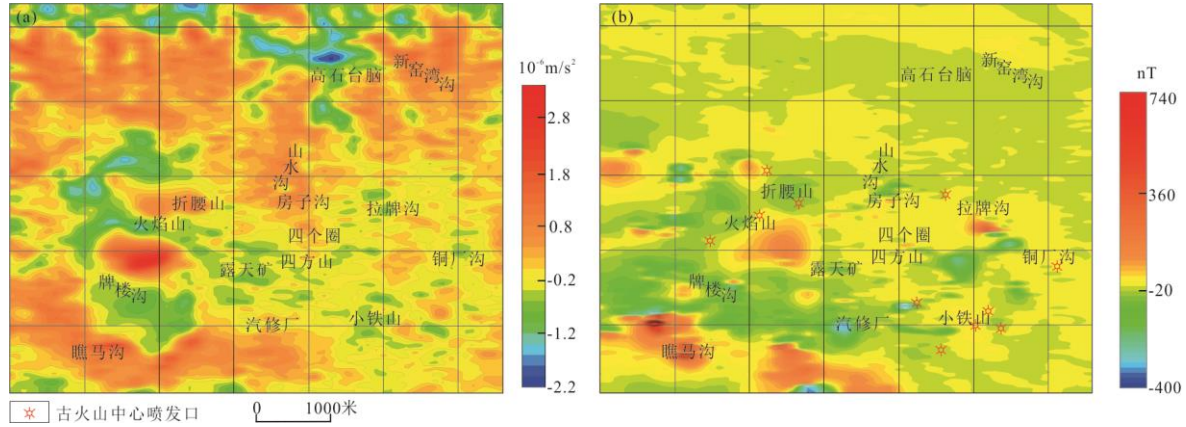


图 4 剩余重磁异常场等值线图（引自郭小刚等, 2022）

Fig.4 Contours of residual gravity and magnetic anomaly field (from Guo et al., 2022)

a. 剩余布格重力异常; b. 剩余磁异常

a. residual bouguer gravity anomaly; b. residual magnetic anomaly

2 原理和数据采集

2.1 广域电磁法

(1) 基本原理

广域电磁法是在可控源音频大地电磁测深法(CSAMT)和磁偶源频率测深法 (MELOS) 的基础上提出的一种人工源频率域电磁测深法，该方法采用 2^n 伪随机 7 频波激发电磁场，提高了观测效率和精度，只观测水平电场 E_x 计算全区视电阻率扩展了观测范围，具有探测深度大，观测效率高的优点（何继善, 2010, 2019; 汤井田等, 2015）。

本文以 E- E_x 观测装置为例，介绍广域视电阻率定义方法。在均匀大地表面，水平电偶极源产生的电场水平 E_x 分量可表示为：

$$E_x = \frac{IdL}{2\pi\sigma r^3} [1 - 3\sin^2\varphi + e^{-ikr}(1 + ikr)], \quad (1)$$

根据(1)式可以定义的广域视电阻率公式如下：

$$\rho_a = K_{E-E_x} \frac{\Delta V_{MN}}{I} \frac{1}{F_{E-E_x}(ikr)}, \quad (2)$$

式中： $K_{E-E_x} = \frac{2\pi r^3}{dL \cdot MN}$ 为装置系数， $\Delta V_{MN} = E_x \cdot MN$ ； $F_{E-E_x}(ikr) = 1 - 3\sin^2\varphi + e^{-ikr}(1 + ikr)$ 。

上式构成了广域视电阻率的计算基础。电场响应未作任何近似处理，因而本方法可在“远区”和部分“非远区”在内的广大区域进行测量，观测人工源电磁场的一个分量（而不是彼此正交的一组电、磁分量），便可计算广域视电阻率值（何继善, 2010）。

(2) 数据采集方法

采用中南大学自主研发的广域电磁法仪器系统（E- E_{MN} 型）开展数据采集工作（图 5a），该系统配置的宽频带发射装置具有多频段同步激发能力，工作电压与电流分别限制在 1000 V 和 200 A 以内。信号源采用 2^n 序列伪随机 7 频波，11 次分频段激发，基频覆盖 0.0117-8192 Hz 宽频域。本次勘探选取 39 个优选频率（0.5-6144 Hz）实施多频同步测量，有效提升了探测效率。

测区采用规则网格布设方案，布设 4 条平行测线，测线间距 200 m，单测线长度 3 km（图 5a）。观测系统参数设置如下：发射偶极 AB 长度 1.1 km，收发距介于 8.3-10.0 km 之间，测点间距 40 m，完成总物

理测点 300 个。数据采集过程严格遵循《广域电磁法技术规程》(DZ/T 0407-2022) 技术要求, 前期通过室内一致性试验验证仪器稳定性, 测得相对均方误差均低于 1% 的质控阈值。

采集的 300 个物理点中, I 类质量点 255 个 (占比 85%), II 类质量点 45 个 (占比 15%), 无 III 类无效数据, 数据合格率达 100%。质量监控体系包含 24 个独立检查点 (占工作总量 8%), 经统计检验, 检查点与原始数据的总平均相对误差为 0.88%, 显著优于规范要求的误差控制标准。该数据质量评价结果充分验证了观测系统参数设置的合理性与数据采集过程的可靠性。

2.2 编码源电磁测深法

(1) 基本原理

编码源电磁测深法是基于系统辨识理论发展的一种宽频域电磁测深法。其核心特征体现在: ①采用 6 阶逆重复 M 序列伪随机编码信号作为激励电流源, 通过电性接地偶极子 (AB) 激发编码电磁场, 其频带覆盖范围显著优于传统谐波激励方式; ②观测系统仅需采集垂直磁场分量 (H_z) 或水平磁场分量 (H_y), 同采样率记录激发电流信号和磁场响应信号, 运用循环互相关法估计磁场频率响应并计算全区视电阻率, 无需严格的时间同步; ③通过引入循环互相关算法与双相位 FFT 谱分析技术, 有效提升抗干扰能力与数据信噪比 (汤井田和罗维斌, 2008; 王若等, 2016; 罗维斌等, 2021)。

本次工作将成熟的互相关系统辨识方法应用于电磁测深, 选择水平电偶源轴向装置, 只观测水平磁场 H_y 获得地电系统的电阻率频谱。其原理如下:

由互相关法系统辨识理论, 系统输入 u 和输出 y 的互相关包含系统冲激响应, 有:

$$R_{yu}(t) = h_s(t) * h_e(t) * R_u(t), \quad (3)$$

式中, $h_s(t)$ 是观测系统的冲激响应, $h_e(t)$ 是待探测大地系统 (或其他待辨识系统) 的冲激响应, $R_u(t)$ 是输入信号的自相关, $R_{yu}(t)$ 系统输入与输出信号的互相关。在复数域有:

$$S_{yu}(s) = H_s(s) H_e(s) S_u(s), \quad (4)$$

式中 $S_{yu}(s)$ 和 $S_u(s)$ 分别是互相关 $R_{yu}(t)$ 和自相关 $R_u(t)$ 的拉普拉斯变换, $H_s(s)$ 和 $H_e(s)$ 分别是观测系统自身 $h_s(t)$ 和待辨识系统 $h_e(t)$ 的拉普拉斯变换。将拉氏变量 s 用 $j\omega$ 替换, 则待辨识大地系统的频率传递函数:

$$H_e(j\omega) = \frac{S_{yu}(j\omega)}{S_{uu}(j\omega)} / H_s(j\omega), \quad (5)$$

由式(5)互相关法可获得大地 (或其他待辨识系统) 的频率响应特性。观测系统本身的频率响应 $H_s(j\omega)$ 也能够应用本文提出的方法辨识出, 这里假设其值为 1, 所以式 (5) 变为:

$$H_e(j\omega) = \frac{S_{yu}(j\omega)}{S_{uu}(j\omega)}, \quad (6)$$

若引入无干扰参考信号 $ss(t)$, 分别与输出信号和输入信号分别做互相关, 再变换到频率域, 选取对应频率相除得到系统频率响应:

$$H_e(j\omega) = \frac{P_{cys}(j\omega)}{P_{cus}(j\omega)}, \quad (7)$$

式中 $P_{cys}(j\omega)$ 和 $P_{cus}(j\omega)$ 分别是互相关 $R_{ys}(t)$ 和互相关 $R_{us}(t)$ 的互功率谱。

可将激发电流作为系统输入 u 信号, 观测的水平磁场 H_y 作为地电系统输出 y 信号。由层状模型表面水平电偶极源激发的电磁场解析公式:

$$H_r = -\frac{IdL}{2\pi r} \sin\phi \left[\int_0^\infty \frac{\lambda}{\lambda + \frac{m_1}{R^*}} J_1(\lambda r) d\lambda + r \int_0^\infty \frac{m_1}{R^*} \frac{\lambda}{\lambda + \frac{m_1}{R^*}} J_0(\lambda r) d\lambda \right], \quad (8a)$$

$$H_\phi = \frac{IdL}{2\pi r} \cos\phi \left[\int_0^\infty \frac{\lambda}{\lambda + m_1/R^*} J_1(\lambda r) d\lambda \right], \quad (8b)$$

$$H_y = H_r \sin\phi + H_\phi \cos\phi, \quad (8c)$$

式中: $R^* = \coth \left[m_1 d_1 + \coth^{-1} \frac{m_1}{m_2} \coth \left(m_2 d_2 + \dots + \coth^{-1} \frac{m_{N-1}}{m_N} \right) \right]$, $m_j = \sqrt{\lambda^2 - k_j^2}$, $k_j^2 = i\omega\mu_0\sigma_n$,

μ_0 为自由空间导磁率, ϕ 为观测点相对于水平电偶源中点的方位角。 r 为收发距, λ 为空间频率, 它具有距离倒数的量纲。

特别地, 当 $N=1$ 时, 可得到均匀半空间表面磁场水平分量 H_y 表达式:

$$H_r^0 = -\frac{IdL}{2\pi r} \sin\phi \left[\int_0^\infty \frac{\lambda}{\lambda + m_1} J_1(\lambda r) d\lambda + r \int_0^\infty \frac{\lambda m_1}{\lambda + m_1} J_0(\lambda r) d\lambda \right], (9a)$$

$$H_\phi^0 = \frac{IdL}{2\pi r} \cos\phi \left[\int_0^\infty \frac{\lambda}{\lambda + m_1} J_1(\lambda r) d\lambda \right], (9b)$$

$$H_y^0 = H_r^0 \sin\phi + H_\phi^0 \cos\phi, (9c)$$

从上式可以看出，地层电阻率参数不显现，而是隐含在地层波数 m_1 中。

依据式 (8c) 可计算出给定层状模型的水平磁场分量 H_y 。

水平磁场 H_y 频率响应(式 8, 9)是以 Hankel 积分形式给出的，本文采用基于连分式加速收敛的直接数值积分法。

由计算出的层状模型表面水平电偶极源的 H_y 分量的频率响应，推导出 H_y 全区视电阻率计算方法 (汤井田和何继善, 2005; 罗维斌等, 2021):

$$p_e^{|H_y|}(\omega) = \rho_1 \frac{|H_y(\omega)|^2}{|H_y^0(\omega, \rho_1)|^2}, (10)$$

式中 $H_y(\omega)$ 为实测 H_y 与电流信号经互相关辨识的频率响应, $H_y^0(\omega, \rho_1)$ 为均匀半空间表面的水平磁场响应，在迭代计算中，每次改变电阻率，需要计算式 (10) 均匀半空间表面水平磁场响应。

(2) 数据采集方法

数据采集系统由长沙巨杉智能科技有限公司研发的智能化仪器组成，包含高精度发射端与接收端模块 (图 5b)。发射系统基于 6 阶逆重复 M 序列伪随机编码技术，通过水平电偶极子源 (AB 极距 1.9 km) 激发宽频电磁场，输出参数设置为电压 0-1000 V、电流 7-16 A (稳流/稳压模式)，并集成 GPS 同步触发功能。接收系统采用轴向观测装置，沿场源轴向布设垂向测线采集水平磁场 H_y 分量，接收机配置 6 通道 (电/磁道各 3 路)、24 位模数转换器及多档采样率 (150 Hz 至 24 kHz)，通过频段自适应采样策略实现全频段信号捕获。

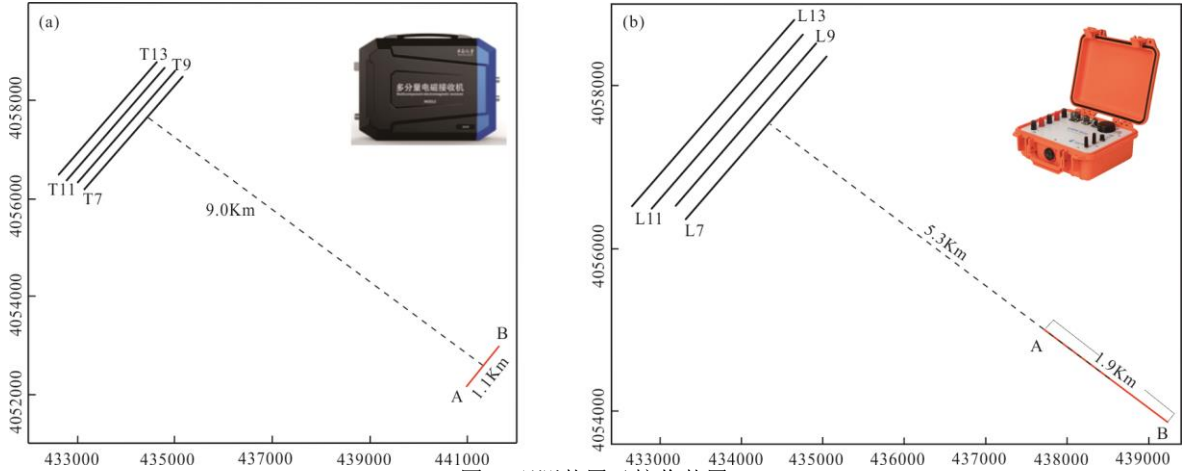


图 5 观测装置及接收装置

a. 广域电磁法观测装置和 E-EMN 接收装置; b. 编码源电磁测深观测装置和接收装置

Figure 5 Observation Systems and Receiving Devices

a. Wide-field electromagnetic method observation system and E-EMN receiving device; b. Encoded-source electromagnetic sounding observation system and receiving device

数据采集采用分频段递进激发模式，分低频段 1 (码率 126 Hz)、低频段 2 (码率 200 Hz)、中频段和 高频段四个子频段，覆盖 $1-10^4$ Hz 宽频域；采样率和采样时长分别对应为 150 Hz/800 s、150 Hz/700 s、2400 Hz/80 s 及 24 kHz/8 s 的采样参数组合，4 次分频激发获取了 150 余个频点的响应信息。测线布置基本同广域磁法剖面，4 条平行测线 (L7/L9/L11/L13) 总长度 10.8 km，测线间距 200 m，测点间距 40 m (图 5b)，单排列多频段数据采集时长在 15 分钟内。

质量控制体系包含①仪器标定：施工前对 2 台接收机及 4 支磁传感器进行现场标定，标定曲线符合仪器响应特征，系统误差均低于 3%；②方法抗噪性：基于循环互相关算法提取电流-磁场响应函数，结合多周期叠加技术有效压制非相关干扰；③参数优化：通过收发距 5.3 km 的远区观测配置，保障电磁场扩散满足波区探测条件。实测数据经谱分析与误差评估，其信噪比与频点密度均满足《电磁测深法技术规范》要求，为后续反演解释提供了高精度原始数据集。

3 数据处理和反演

3.1 广域电磁法数据处理和反演

采用中南大学何继善院士团队研发的《地球物理资料综合处理解释一体化系统》进行广域电磁法数据解译与模型反演，其流程遵循多尺度地球物理信息融合理论，具体技术环节如下：

(1) 数据预处理与噪声抑制

通过时频联合分析实现数据质量控制①原始数据降噪预处理：基于曲线形态学特征识别并剔除野值点、跳变点，消除瞬态干扰；②静态效应校正：结合频率-视电阻率等值线图的空间分布特征，采用空间域低通滤波算法削弱近地表电性不均匀引起的静态偏移；③曲线优化：利用人机交互式界面实施频点级数据筛选，对残余纵向噪声进行精细化编辑，构建平滑的频率-视电阻率拟断面图。

(2) 电性结构多尺度解析

①定性分析：综合原始频散曲线类型、等频率视电阻率平面分布及拟断面图形态特征，结合区域地质-地球物理先验信息，识别电性界面空间展布规律，划分构造单元，推断基底起伏、断裂带位置及岩性分布特征。

②定量反演：采用 WFEM 无约束反演算法构建分层连续介质模型，反演策略包括：基于 Occam 原理的一维连续介质反演，通过正则化约束实现模型粗糙度与数据拟合度的最优平衡；应用非线性共轭梯度法开展二维连续介质反演，迭代过程中采用自适应步长策略加速收敛。反演参数设置为最大迭代次数 15 次、分层数 40 层，反演目标函数采用最小二乘范数（索光运等，2019），实测数据与理论响应拟合误差范围为 3.0093%~4.5823%，满足地质解释精度需求。

(3) 反演结果验证与地质解释

反演输出模型通过以下途径验证可靠性①残差分析：各测点拟合误差均低于 5%，表明模型响应与实测数据具有高度一致性；②多维度交叉检验：结合区域电测深剖面、钻孔资料进行模型横向连续性验证；③物性约束：将反演电阻率参数与岩芯测试结果对比，确保电性-岩性对应关系的合理性。最终模型定量揭示了不同电性层（低阻覆盖层、高阻基岩等）的三维空间展布特征，为研究区深部构造解析提供了高分辨率地球物理证据。

3.2 编码源电磁测深法数据处理和反演

本研究基于 MATLAB 平台自主研发的 GSCSEM1.0 专业数据处理系统，实现编码源电磁测深数据的全流程解析与参数提取：

(1) 数据预处理与信号增强

①时间序列趋势项校正：对原始磁场 H_y 与发射电流 I_{AB} 时间序列进行趋势项校正，消除直流偏置及仪器漂移影响；②异常点剔除：采用滑动窗口统计法识别离散野值点，结合三次样条插值算法重构缺失数据，提升时域信号完整性；③抗干扰优化：针对强电磁干扰区段，实施分段自适应滤波处理，保留有效频带信号特征。

(2) 频域系统响应辨识

①互相关谱分析：对 H_y 与 I_{AB} 时间序列执行循环互相关运算，同步计算 I_{AB} 自相关函数，通过双相位快速傅里叶变换（FFT）获取互功率谱密度（ H_y-I_{AB} ）与自功率谱密度（ $I_{AB}-I_{AB}$ ）；②阻抗响应解算：基于系统传递函数理论，将互功率谱与自功率谱在相同频点处进行比值运算 $Z(f) = \frac{S_{HyI_{AB}}(f)}{S_{I_{AB}I_{AB}}(f)}$ 提取地电系统的复阻抗频响应函数。

(3) 全区视电阻率计算

①基于电阻率等效原理的迭代计算：依据层状地电模型水平电偶极子源电磁场理论，将实测阻抗谱用均匀半空间模型响应等效，采用牛顿-拉夫逊迭代算法求解全区视电阻率 $\rho_e^{H_y}(f)$ ；②分频段配置：按 4 个采样频段采样率和数据长度，共获取 178 个有效频点，覆盖 1-10250 Hz 宽频域，确保较高的垂向分辨率。

(4) 电阻率频率梯度分析与地层划分

①电阻率频率梯度计算方法：定义电阻率频率梯度函数（式 11），量化相邻频点视电阻率随频率的相对变化率：

$$\rho_e^{|H_y|dz}(f_i) = \frac{\log_{10}(\rho_e^{|H_y|}(f_i)) - \log_{10}(\rho_e^{|H_y|}(f_{i-1}))}{\log_{10}(f_i) - \log_{10}(f_{i-1})}, \quad (11)$$

②地质解释准则：由高频至低频方向，正梯度值 $\rho_e^{|H_y|dz} > 0$ 表征浅部至深部电阻率递减；负梯度值 $\rho_e^{|H_y|dz} < 0$ 则指示浅部至深部电阻率增大，梯度极值点对应电性界面转折位置。

4 综合解释

4.1 岩(矿)石物性特征

岩矿石标本的采集、物性测试与统计能更好地反应研究区内岩（矿）石地球物理特征并为异常解释提供物性基础。本次工作在研究区共采集 12 类岩性标本 368 块，同时收集了以往工作测定的铅锌矿石、铁锰硅质岩、角斑凝灰岩和角斑岩 4 类岩（矿）石物性参数，统计结果参见表 1。

表 1 研究区岩（矿）石标本物性参数统计表
 Table 1 The Statistical table of physical parameters of rocks (ores) in the study area

序号	样本名称	样本数	电阻率（Ω·m）			
			极小值	极大值	算数均值	几何均值
1	绢母千枚岩	30	138.13	930.13	420.85	370.40
2	粉砂质千枚岩	29	954.79	8055.46	3866.19	3389.50
3	含炭质千枚岩	28	287.64	8709.91	2307.59	1804.15
4	硅质千枚岩	30	87.50	1141.26	584.00	499.06
5	次石英钠长斑岩	25	446.54	5609.54	2706.31	2223.31
6	硅质岩	31	1332.77	11490.25	5563.50	4948.44
7	花岗斑岩脉	34	68.95	557.54	209.64	173.52
8	细碧岩	35	100.52	1076.7	293.13	248.12
9	次石英角斑岩	31	976.53	3518.36	1996.45	1868.10
10	石英角斑岩	32	334.82	4671.19	1729.41	1276.29
11	石英角斑凝灰熔岩	33	200.88	3282.58	1305.79	1111.38
12	石英角斑凝灰岩	30	90.11	378.32	191.96	168.76
13*	铅锌矿	33	15.35	231.72		59.64
14*	铁锰硅质岩	31	21.23	139.78		54.48
15*	角斑凝灰岩	35	316.98	444.86		375.51
16*	角斑岩	33	468.88	756.52		595.58

注：物性参数采用加拿大生产的 GDDSCIP 型电性参数仪测定，标*数据来自收集资料。

从表 1 可以看出，各类岩（矿）石电阻率变化依次为铁锰硅质岩<铅锌矿矿石<石英角斑凝灰岩<花岗斑岩脉<细碧岩<绢母千枚岩<角斑凝灰岩<硅质千枚岩<角斑岩<石英角斑凝灰熔岩<石英角斑岩<含炭质千枚岩<次石英角斑岩<次石英钠长斑岩<粉砂质千枚岩<硅质岩；其中铁锰硅质岩、铅锌矿矿石的电阻率小于 100 Ω·m，赋矿的石英角斑凝灰岩电阻率较低（算数平均值 191.96Ω·m），次石英角斑岩属于较高电阻率岩石（算数平均值 1996.45 Ω·m），硅质岩电阻率最高且变化较大（算数平均值 5563.50 Ω·m）；区内岩（矿）石具有明显的物性差异，为本次应用研究提供了基础。

4.2 广域电磁测深剖面推断解释

基于电性-岩性对应关系，结合物性参数、地质剖面及探采工程数据对 T7、T9、T11、T13 四条测线反演电阻率剖面开展多尺度地质解译，从各广域电磁测深反演剖面可看出不同的电性层分布特征与地层及次火山岩侵入体具有良好的吻合性（图 6）。

T7、T9、T11、T13 测线南段 (0-200 m) 发育宽缓中低阻异常 ($50\text{--}300\ \Omega\cdot\text{m}$)，结合细碧岩-细碧凝灰岩物性特征，解译为基性火山岩优势分布区，异常规模由南东向北西 (T7→T13) 逐渐扩展，反映火山岩相横向非均质性。中段 (200-600 m) T7、T9 线呈现中高阻向低阻 ($1200\rightarrow 250\ \Omega\cdot\text{m}$) 过渡特征，对应石英角斑凝灰熔岩与凝灰岩互层；T11、T13 线以低阻异常为主 ($<300\ \Omega\cdot\text{m}$)，指示凝灰岩主体发育，局部高阻异常 (T7、T9 线) 揭示次火山岩侵入体侧伏延伸趋势，侵入体产状与区域构造应力场具一致性。600-1000 m 区间浅部 (垂深 300-1800 m) 低阻异常 ($<300\ \Omega\cdot\text{m}$) 与小铁山矿化凝灰岩及硫化物矿体高度耦合，矿化带呈 SW 倾向，侧伏延伸至 800-1100 m 范围，深部产状陡倾甚至反转，与下盘近直立次火山侵入体构成耦合控矿结构。1000-1400 m 区间呈宽缓中高阻背景 ($>560\ \Omega\cdot\text{m}$) 叠加不规则高阻异常，表征次火山侵入体深部扩展，其北西向规模显著大于浅部，与小铁山矿床深部矿化强度空间匹配，揭示岩浆-热液活动对成矿系统的控制作用。1400-2100 m 区段中低阻异常 ($<300\ \Omega\cdot\text{m}$) 与铜厂沟铜锌矿床北西向延伸带对应，异常分布受矿化的石英角斑凝灰岩及多金属硫化物矿体控制，表明该区为潜在成矿远景区。2100-3000 m 区段中低阻异常场上叠置条带状高阻异常 ($>600\ \Omega\cdot\text{m}$)，结合区域岩相分析，解译为隐伏次火山岩侵入体与中性-基性火山岩 (角斑岩-细碧岩) 互层结构，高阻体空间配置可能指示深部岩浆通道。

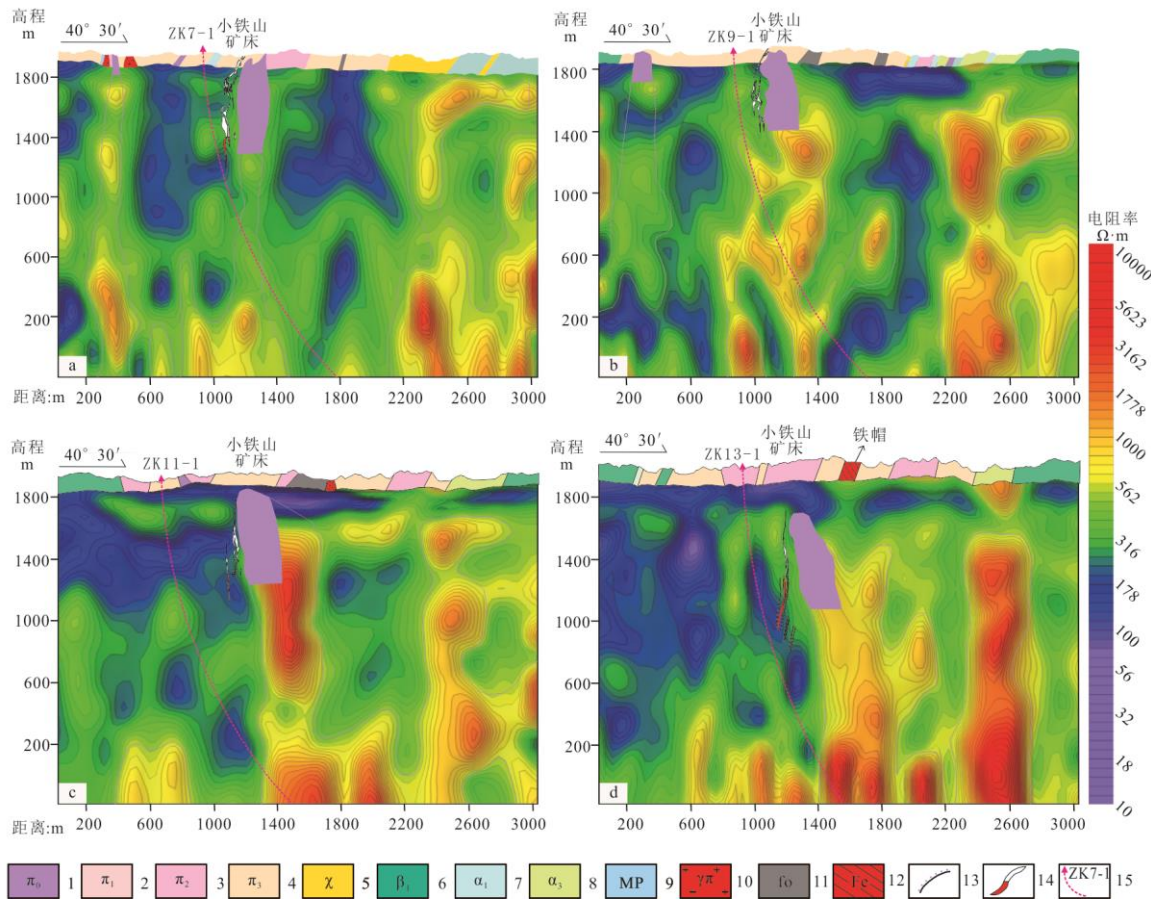


图6 白银厂铜多金属矿田小铁山矿床广域电磁测深反演剖面图

a.T7 线反演剖面图；b.T9 线反演剖面图；c.T11 线反演剖面图；d.T13 线反演剖面图

1-次石英角斑岩；2-石英角斑岩；3-石英角斑凝灰熔岩；4-石英角斑凝灰岩；5-集块岩；6-细碧岩；7-角斑岩；8-角斑凝灰岩；9-千枚岩；10-花岗斑岩；11-矿化蚀变带；12-铁帽；13-实/推测不整合界限；14-矿体；15-钻孔

Fig.6 Wide field electromagnetic method inversion sections of the Xiaotieshan deposit in the Baiyinchang Cu-polymetallic field

a. Line T7 inversion section; b. Line T9 inversion section; c. Line T11 inversion section; d. Line T13 inversion section

1-Subquarte Keratophyre; 2-QuarteKeratophyre; 3-Quarterkeratophyretufflava; 4-Quarte-keratophyre tuff; 5-Agglomerate; 6-Spilite; 7-Keratophyre; 8-Keratophyre tuff; 9-Phyllite; 10-Granite porphyry; 11-Mineralized alteration zone; 12-gossan; 13-measured / inferred unconformity; 14-orebody; 15-Borehole

4.3 编码源电磁测深剖面推断解释

通过计算编码源电磁频率测深原始数据并绘制四条剖面的视电阻率断面图，结合已有的重磁异常、地质资料对划分的各电性层与地质体的相互关系进行了解释推断 (图 7)：

测线南段 0-250m 范围呈宽缓低阻背景场 ($30\text{--}100\ \Omega\cdot\text{m}$) 叠加不规则中低阻异常，与基性火山岩系 (细碧岩-细碧凝灰岩) 分布区高度吻合。其中近直立纺锤状中低阻异常 ($100\text{--}300\ \Omega\cdot\text{m}$) 具有显著垂向延伸特征，结合岩脉物性参数 ($70\text{--}560\ \Omega\cdot\text{m}$)，解译为后期侵入酸性花岗斑岩脉的电磁响应，暗示浅部裂隙系统

发育。中段 250~750m 范围电阻率场呈现显著的横向分带，中心高阻核（800-2000 $\Omega\cdot m$ ）向外过渡为中低阻带（300-800 $\Omega\cdot m$ ）。高阻异常体呈串珠状-纺锤状组合，形态学分析表明高阻核（>1500 $\Omega\cdot m$ ）对应次石英角斑岩及石英角斑凝灰熔岩体，其 NW-SE 向侧伏特征在 L11 线表现最为显著（异常体膨大率达 120%），向东逐渐尖灭；过渡带中低阻异常（300-800 $\Omega\cdot m$ ）表征石英角斑凝灰岩优势分布区，电阻率梯度变化反映火山碎屑岩与熔岩互层结构。750~1400m 范围内北侧低阻异常区（25-100 $\Omega\cdot m$ ）与小铁山矿床主矿化带空间耦合，典型特征包括：低阻体垂向延伸深度达 800 m，与硫化物矿体（10-230 $\Omega\cdot m$ ）电性特征一致；南侧起因暂不清楚的低阻异常呈现环状结构，可能指示隐伏热液蚀变带或次级矿化中心；高阻异常体（>500 $\Omega\cdot m$ ）呈 NW 向雁列式排列，揭示次火山岩侵入通道受区域断裂控制。1400~2000m 范围内，L9 和 L13 线发育大规模纺锤状高阻异常（>1000 $\Omega\cdot m$ ），垂向延伸至海拔 1500-1800 m，地表为花岗斑岩脉群，可能指示深部存在较大规模的次火山岩侵入体；L7 和 L11 线宽缓低阻场（50-150 $\Omega\cdot m$ ）与铜厂沟-拉牌沟成矿带对应，异常区段内见典型“低阻囊状体”，反映多金属硫化物富集与凝灰岩矿化的复合效应。2000m 以北浅部（垂深 0-800 m）的中低阻异常（20-150 $\Omega\cdot m$ ）表征中基性火山岩；深部（>800 m）中高阻异常场（>300 $\Omega\cdot m$ ）内嵌条带状高阻体（>600 $\Omega\cdot m$ ），结合重磁异常梯度带特征，解译为 NW 向隐伏次火山岩体，其扩张趋势（SE→NW）与区域构造应力场相符。

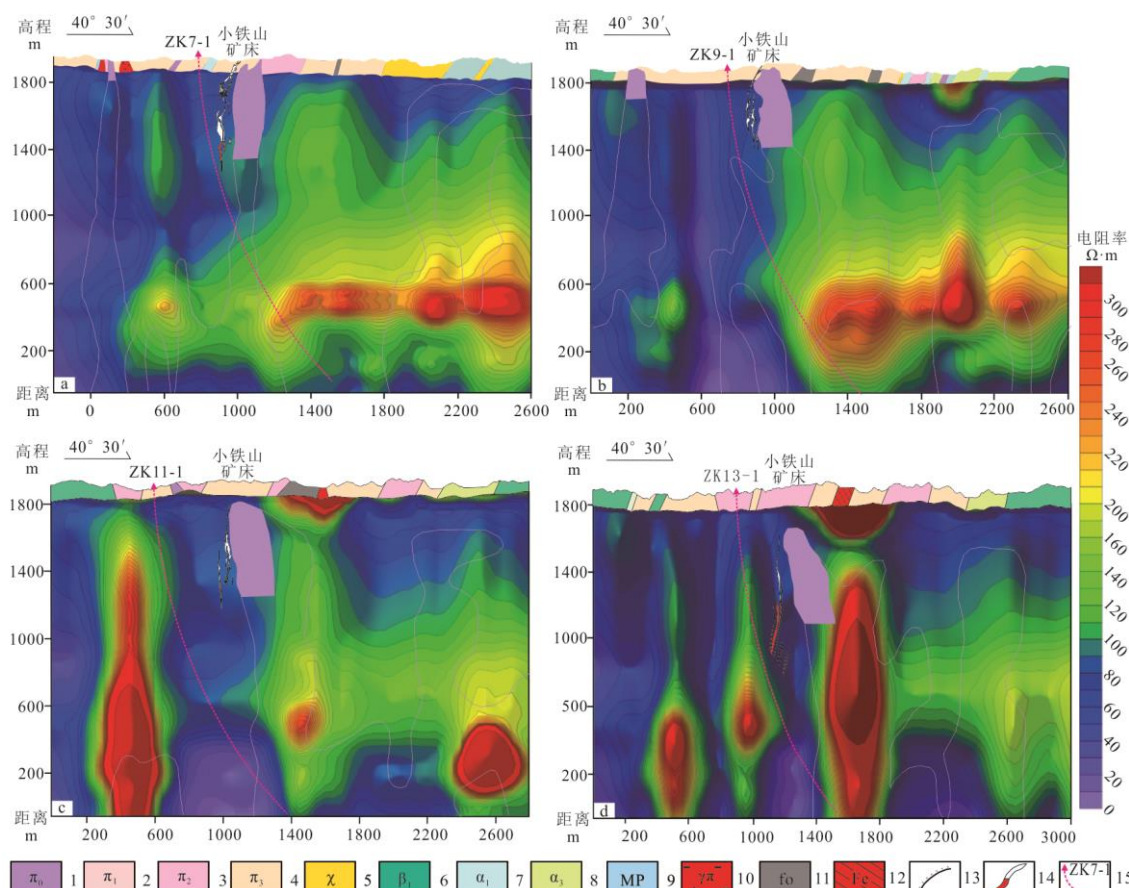


图 7 白银厂铜多金属矿田小铁山矿床编码源电测深反演剖面图

a.L7 线反演剖面图；b.L9 线反演剖面图；c.L11 线反演剖面图；d.L13 线反演剖面图

1-次石英角斑岩；2-石英角斑岩；3-石英角斑凝灰熔岩；4-石英角斑凝灰岩；5-集块岩；6-细碧岩；7-角斑岩；8-角斑凝灰岩；9-千枚岩；10-花岗斑岩；11-矿化蚀变带；12-铁帽；13-实/推测不整合界限；14-矿体；15-钻孔

Fig.7 Coded source electromagnetic sounding method inversion sections of the Xiaotieshan deposit in the Baiyinchang Cu-polymetallic field

a. Line L7 inversion section; b. Line L9 inversion section; c. Line L11 inversion section; d. Line L13 inversion section
1-Subquarte Keratophyre; 2-QuarteKeratophyre; 3-Quartekeratophyretufflava; 4-Quarte-keratophyre tuff; 5-Agglomerate; 6-Spilitite; 7-Keratophyre; 8-Keratophyre tuff; 9-Phyllite; 10-Granite porphyry; 11-Mineralized alteration zone; 12-gossan; 13-measured / inferred unconformity; 14-orebody; 15-Borehole

4.4 矿床成因及矿体就位规律

关于白银厂矿田火山活动与热液作用的时空关系、物质来源及成矿过程的主控因素：（1）岩浆侵入体对成矿的贡献；（2）火山喷发沉积与后期热液改造的主次关系；（3）变质作用对矿床的改造程度；长期存

在争议(甘肃冶金地质三队, 1975; 宋叔和, 1982; 边千韬, 1989)。

前人早已注意到白银厂矿田内已知矿体与次火山侵入体之间的联系: 小铁山的矿体分布与次火山侵入体有明显的空间关系, 在 7 线剖面上次火山侵入体位于矿体下盘, 呈厚板状分布。由矿体中心及下部向两侧和上部呈块状铜铅锌矿、块状含铜黄铁矿、浸染状铜铅锌矿、浸染状铜矿石组合 (图 8)。矿石的水平 and 垂向分带与折腰山矿床蚀变岩筒的典型矿石分带特征具有相似性, 证明火山喷发后期或间歇期侵入的次火山岩与成矿具有密切的关系 (彭礼贵等, 1998)。同时, 小铁山、火焰山矿床的部分矿体还直接赋存于接触带或次火山侵入体内。折腰山和小铁山矿床黄铁矿结构、成分研究发现不同类型的矿石内黄铁矿具有岩浆热液、火山热液和沉积成因多重特征(郭小刚等, 2025)。

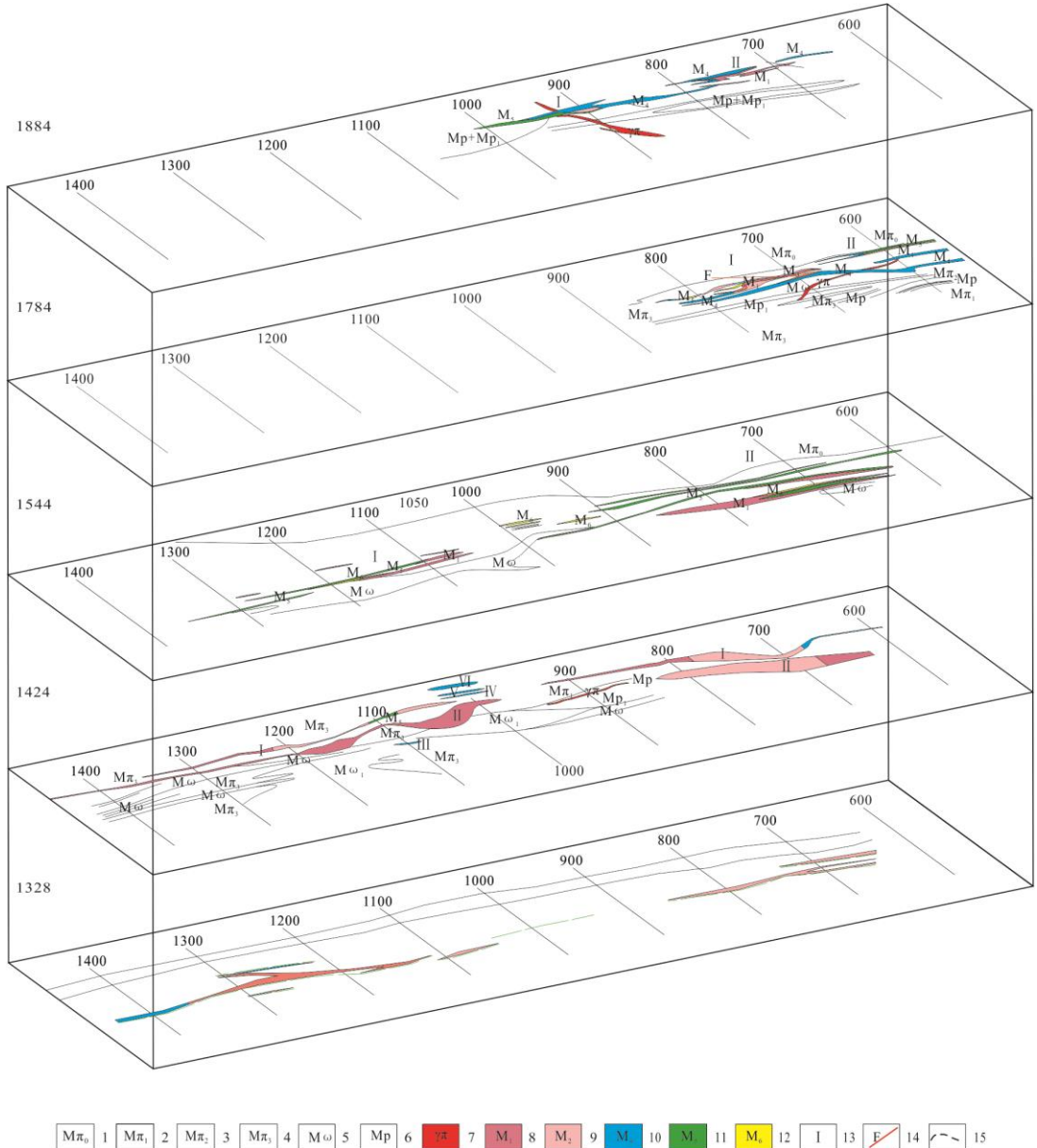


图 8 甘肃白银厂小铁山铜多金属矿床矿化空间分布特征

1-次石英角斑岩; 2-石英角斑岩; 3-石英角斑凝灰熔岩; 4-石英角斑凝灰岩; 5-绿泥石岩; 6-千枚岩; 7-花岗斑岩; 8-块状铜铅锌矿石; 9-块状铜矿石; 10-浸染状铅锌矿石; 11-浸染状铜矿石; 12-块状黄铁矿矿石; 13-矿体编号; 14-实测及推测断层; 15-实测及推测地质界线

Fig. 8 Spatial distribution characteristics of mineralisation in XiaotieshanCu-polymetallic deposit, Baiyinchang, Gansu, China
1-Subquarte Keratophyre; 2-QuarteKeratophyre; 3-Quarterkeratophyretufflava; 4-Quarte-keratophyre tuff; 5-Chlorite Rock; 6-Phyllite; 7-Granite porphyry; 8-massiveCu-Zn-Pb ore; 9- massiveCu ore; 10- impregnation Zn-Pb ore; 11- impregnation Cu ore; 12-massivepyrite ore; 13-orebody number; 14-measured / inferred faults; 15-measured / inferred geological boundary

对小铁山矿床矿体空间分布特征与所在编码源电磁测深、广域电磁测深剖面电性特征之间的位场关联性进行分析研究发现: 小铁山矿床主要的赋矿岩性为喷发相的石英角斑凝灰岩, 主要矿体位于次火山侵入体上盘的接触带内。物性测试表明, 次石英角斑岩的电阻率平均值在 1868 $\Omega \cdot m$ 左右, 呈相对高阻; 而赋矿母岩石英角斑凝灰岩和矿体围岩石英角斑凝灰熔岩的电阻率不超过 1111 $\Omega \cdot m$ 。I、II、III号主矿体均位于

2 号高电阻体的上盘, 且矿体产状严格受高阻体形态的控制, 矿体产状与高阻体几何形态呈镜像关系 (图 9a,c), 表明岩浆热液交代是主要的成矿作用。同时, 在 T13 线物探异常踏勘检查过程中于 2 号与 3 号高阻异常的结合部新发现了一处铁帽 (Cu:0.9%, Pb:4.53%, Zn:0.58%), 出露长约 15m, 宽约 5m。铁帽两侧对称分布的褐铁矿化、绢云母化、硅化蚀变带宽度超 50m, 具有中低温岩浆期后热液成矿的典型特征。小铁山主要矿体与新发现铁帽的对称分带特征符合岩浆期后热液成矿模型。

综上所述, 白银厂矿田矿床成因具有多阶段特征。中晚奥陶世 (454-469 Ma) 北祁连持续向华北板块俯冲, 构造环境由岛弧裂谷向弧后盆地转换。在此背景下, 软流圈地幔部分熔融产生的岩浆与上地壳组分发生混染形成弧后岩浆, 携带成矿流体沿基底断裂喷溢至海底, 为 VHMS 型铜多金属矿床形成奠定了基础 (郭小刚等, 2025)。具体成矿过程表现为: (1) 喷发沉积阶段: 火山活动末期主火山口塌陷引发局部应力集中, 富含金属硫化物的岩浆通过同生断裂上侵并形成较为成熟的海底热液循环系统, 在近海底形成块状、纹层状沉积型铜铅锌、铅锌矿石; (2) 热液叠加阶段: 次火山岩侵入驱动热液对流, 岩浆流体与海水混合并置换近海底地层形成置换型成因的块状铜铅锌、铜锌矿石; (3) 构造活化阶段: 区域构造应力驱动断裂活化, 并形成网脉状、脉状铜 (铅锌) 矿体。同生断裂系统及次火山侵入体是重要的控矿因素; 海底置换过程是形成大吨位 VHMS 矿床的关键因素 (Hou et al., 2008; Nozaki et al., 2021; Xiao et al., 2024)。

4.5 地质-地球物理找矿模型及找矿靶区

(1) 地质-地球物理找矿模型

VHMS 型铜多金属矿床主要受俯冲板片上方的火山机构、同生断裂构造、岩性组合等因素的控制 (Zhao et al., 2022; Duan et al., 2022); 成矿物质通常来源于遭受热液蚀变的海底火山岩和下伏热液系统的岩浆挥发相; 典型的块状硫化物矿石和大规模的黄铁矿化蚀变系统为地球物理电磁法勘探提供了有利的条件 (Xiao et al., 2024; 郭小刚等, 2025)。

小铁山矿床作为典型的 VHMS 型矿床, 其成矿作用受控于古生代海相火山-沉积序列中的酸性次火山岩侵入体。该次火山岩侵入体作为最直接的成矿地质体具有明显的高阻特征 ($>1500 \Omega \cdot m$), 地球物理异常呈向上发散、向下收敛的树枝状形态。赋矿围岩石英角斑凝灰岩具有较低的电阻率 (平均值 $300-500 \Omega \cdot m$), 在高阻异常两侧呈现出宽缓的条带状低阻异常 ($200-400 \Omega \cdot m$); 块状矿体 ($<100 \Omega \cdot m$) 及上盘绿泥石-黄铁矿-绢云母蚀变带则表现为不规则网格状低阻异常 ($150-300 \Omega \cdot m$)。三维电性结构揭示"边部矿化层-核部岩浆通道-深部热源系统"成矿体系: (1) 边部矿化层: 硫化物矿化带赋存于低阻石英角斑凝灰岩中 (平均值 $300-500 \Omega \cdot m$), 其低阻异常 ($<150 \Omega \cdot m$) 与块状闪锌矿-方铅矿-黄铜矿-黄铁矿矿石呈显著空间耦合 (图 9b, d)。侵入体顶部网格状低阻异常 ($150-300 \Omega \cdot m$) 形成垂向电性梯度界面, 反映热液交代过程中硫化物沉淀与蚀变分带; (2) 核部岩浆通道: 高阻次火山岩体 ($1500 \Omega \cdot m$) 沿北西侧侧伏侵入, 接触带构成成矿流体运移通道, 岩体膨大部位 (如 L11 线) 对应矿化强度峰值 (图 9a, c)。两侧低阻带 ($200-400 \Omega \cdot m$) 与绿泥石-绢云母蚀变及浸染状矿化对应; (3) 深部热源系统: 基底高阻体群 ($>1500 \Omega \cdot m$) 揭示深部岩浆房热液补给通道, 符合 VHMS 矿床"双层热液对流"模型 (Franklin et al., 2005), 并为岩浆热液补给机制提供了地球物理证据。

(2) 找矿靶区

小铁山矿床成矿作用受控于三要素耦合机制: 矿田内分布规模较大的火山喷发相石英角斑凝灰岩为岩浆热液淋滤作用提供成矿物质来源, 次火山岩旁侧发育的次级断裂系统及高孔隙度岩石结构构成流体运移-沉淀空间, 大规模的次火山岩侵入体则提供充足的热源、流体和成矿物质。基于地质-地球物理找矿模型, 建立三级找矿标志体系: (1) 一级标志 (岩体控矿): NW 向高阻次火山岩体 ($\rho>1500 \Omega \cdot m$) 侧伏端, 重点关注岩体厚度突变区 (如 L11 线膨大部位); (2) 二级标志 (矿化响应): 高阻体接触带 300-500 m 范围内的过渡型低阻异常 ($200-500 \Omega \cdot m$), 指示硫化物矿化前锋带; (3) 三级标志 (热源指示): 基底高阻体群 ($\rho>600 \Omega \cdot m$) 与重磁梯度带交汇部位, 反映深部成矿潜力。结合地表热液蚀变矿物组合特征, 圈定 4 处找矿靶区: ①已知矿体深部延伸区 (标高 <800 m); ②北部拉牌沟 7-9 线低阻异常区 ($\rho<300 \Omega \cdot m$); ③次火山岩下盘 13 线 1700 m 铁帽发育段; ④南部 16 线车路沟南西侧含铜硅质岩分布区。

5 结论

(1) 广域电磁法和编码源电磁测深法联合探测技术可有效识别深部高阻岩体与浅部低阻矿化异常,

抗工频干扰能力优于传统方法。

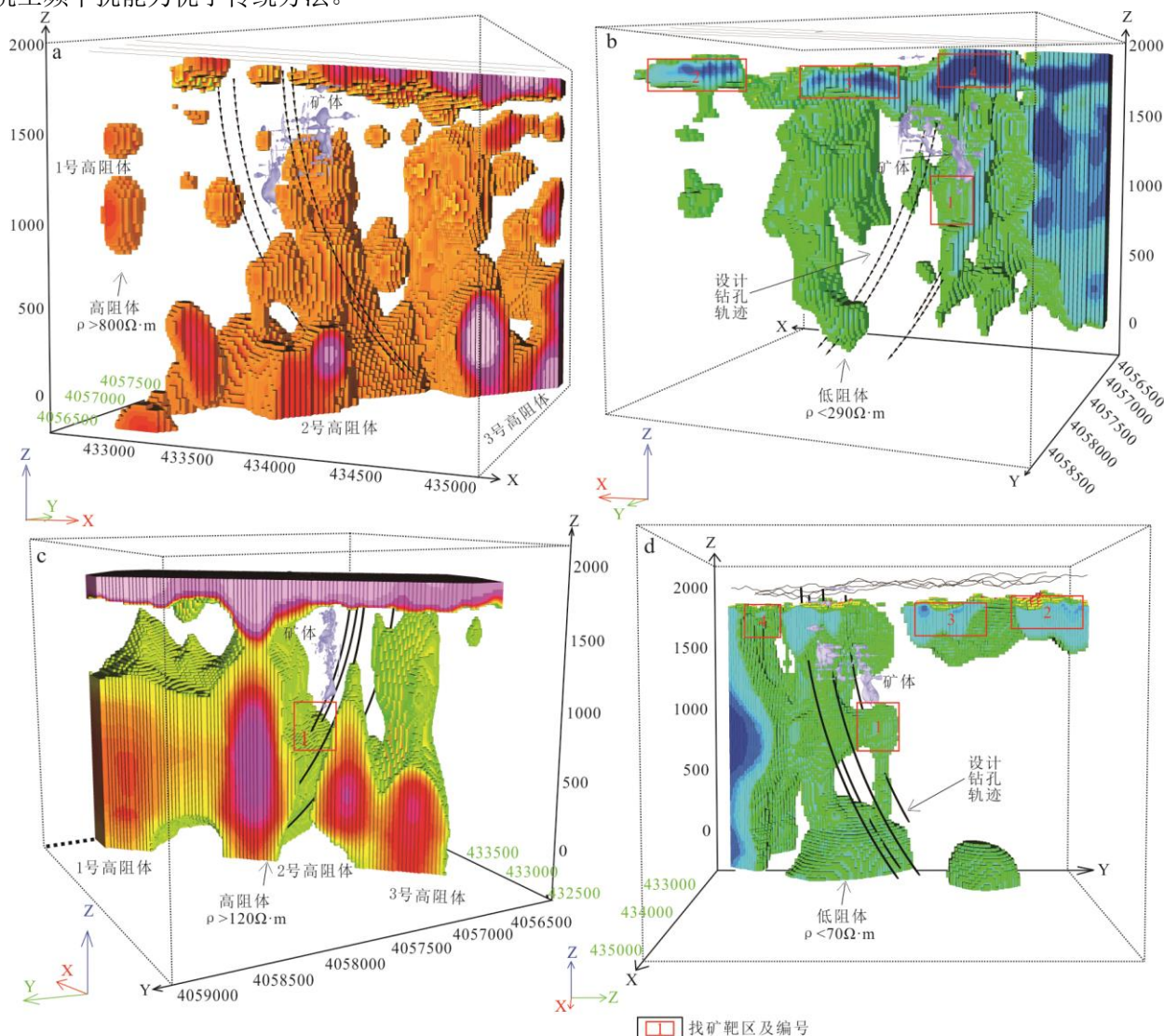


图9 白银厂铜多金属矿田小铁山矿床地球物理找矿模型

a.广域电磁测深高电阻率异常体；b.广域电磁测深低电阻率异常体；

c.编码源电磁测深高电阻率异常体；d.编码源电磁测深低电阻率异常体

Fig.9 Geophysical prospecting model of the Xiaotieshan deposit in the Baiyinchang Cu-polymetallic field

a. wide field electromagnetic method high-resistivity anomaly; b. wide field electromagnetic method low-resistivity anomaly;

c. coded source electromagnetic sounding method high-resistivity anomaly; d. coded source electromagnetic sounding method low-resistivity anomaly

(2) 次火山岩侵入体 ($\rho > 1500 \Omega \cdot m$) 与石英角斑凝灰岩 ($\rho < 500 \Omega \cdot m$) 的电性二分结构是次火山岩控矿型 VHMS 矿床的关键标志, 过渡带低阻异常 ($\rho < 400 \Omega \cdot m$) 指示硫化物富集。

(3) 成矿作用受火山机构塌陷、次火山岩热液活动及断裂活化三阶段控制, 深部岩浆通道 ($\rho > 1500 \Omega \cdot m$) 为成矿提供持续热源

(4) 广域电磁法和编码源电磁测深成果为构建 VHMS 型铜多金属矿床"岩浆-构造-蚀变"协同找矿模型提供了关键地球物理约束: ①高阻岩体侧伏方向指示成矿流体运移优势路径; ②基底热源系统的电性异常结构可评估成矿系统保存完整性; ③浅部低阻异常形态可区分矿化类型。

(5) 综合地质-地球物理找矿模型、三级找矿标志及地表矿化蚀变发育特征, 在矿床深部及外围圈定 4 处找矿靶区, 为后续钻探验证指明了方向。

致谢: 甘肃省有色金属地质勘查局总工程师/高级工程师周宏、地质处处长/教授级高级工程师方春家, 白银有色集团股份有限公司总工程师韩国生、白银有色集团股份有限公司小铁山矿总工程师/教授级高级工程师刘武团在野外工作及研究工作中给予帮助和指导, 北京金浩林勘探技术有限公司提供了三维建模软件(浩拓经典三维建模软件(64 位))和技术指导, 在此一并致以衷心的感谢。中南大学地球科学与信息物理学院李帝铨教授、胡艳芳老师、甘肃省有色地质调查院虎金荣、丁志

军高级工程师等人及全部野外工作人员在数据采集、分析处理过程中都付出了辛勤的劳动，在作者内无法详细列举，谨此表示谢忱和歉意。

References

- Bian, Q. T., 1989. Geological Structure and Mineralization Model of Baiyinchang Ore Field. Beijing: Seismological Press, 59–65(in Chinese).
- Di, Q. Y., Zhu, R. X., Xue, G. Q., et al., 2019. New Development of the Electromagnetic (EM) Methods for Deep Exploration. *Chinese Journal of Geophysics*, 62(6): 2128–2138 (in Chinese with English abstract).
- Duan, W. Y., Li, X. P., Schertl, H., et al., 2022. C-O-H-S Fluids Released by Oceanic Serpentinite in Subduction Zones: Implications for Arc-Magma Oxidation. *Earth and Planetary Science Letters*, 594: 117709. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117709>
- Franklin, J. M., Gibson, H. L., Jonasson, I. R., et al., 2005. Volcanogenic Massive Sulfide Deposits. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 98: 523–560.
- Gao, S. D., Luo, W. B., Su, Y. G., et al., 2017. Geo-Resistivity Observational Experiment Based on Encoded Source. *Acta Seismologica Sinica*, 39(4): 506–519 (in Chinese with English abstract).
- Guo, X. G., Chen, S. Y., Li, Z. C., et al., 2022. Gravity-Magnetic Anomalies and Tectonic Characteristics of the Baiyinchang Cu-Polymetallic Ore Field in Gansu Province. *Geology and Exploration*, 58(5): 1057–1069 (in Chinese with English abstract).
- Guo, X. G., Dai, S., Han, F., et al., 2025. Research Progress on the Genesis and Metallogenic Model of the Baiyinchang Cu Polymetallic Ore District in Gansu: A Review. *Mineral Deposits*, 44(2):432-456 (in Chinese with English abstract).
- He, J. S., 2010. Wide Field Electromagnetic Sounding Methods. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 41(3): 1065–1072 (in Chinese with English abstract).
- He, J. S., 2019. Theory and Technology of Wide Field Electromagnetic Method. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 29(9): 1809–1816 (in Chinese with English abstract).
- Hou, Z. Q., Zaw, K., Rona, P., et al., 2008. Geology, Fluid Inclusions, and Oxygen Isotope Geochemistry of the Baiyinchang Pipe-Style Volcanic-Hosted Massive Sulfide Cu Deposit in Gansu Province, Northwestern China. *Economic Geology*, 103(2): 269–292. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.103.1.269>
- Ji, B., Li, X. M., Shi, C., et al., 2024. Zircon U-Pb Ages, Hf Isotopes and Geochemistry of Bimodal Volcanic Rocks in Baiyin Group, Eastern North Qilian. *Journal of Earth Science*, 49(7): 2490–2507 (in Chinese with English abstract).
- Jia, C. X., Cheng, H., Fu, S., et al., 2024. High Frequency Electromagnetic Experiment Based on Spread Spectrum Coded Signals. *Progress in Geophysics*, 39(3): 1251–1259 (in Chinese with English abstract).
- Liang, W. J., Yan, G. S., Li, J. S., et al., 2016. Characteristics of Fluid Inclusions of the Xiaotieshan Lead Zinc Polymetallic Deposit in Gansu Province. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35(2): 317–327 (in Chinese with English abstract).
- Liao, S. L., 2014. Progressively Determine Prospecting Targets and Quantitative Forecast of Baiyin Ore District, Gansu Province [D]. Wuhan: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- The Third Team of Gansu Metallurgical Geology, 1975. A Study on the Relationship Between Acidic Volcanic Activities and Mineralization in the Baiyin Area. *Geology and Exploration*, (08): 32-40 (in Chinese).
- Liu, J. X., Sun, H. L., Chen, B., et al., 2016. Review of the Gravity and Magnetic Methods in the Exploration of Metal Deposits. *Progress in Geophysics*, 31(2): 713–722 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. X., Tong, X. Z., Yang, X. H., et al., 2008. Application of Real-Coded Genetic Algorithm in Two-Dimensional Magnetotelluric Inversion. *Progress in Geophysics*, 23(6): 1936–1942 (in Chinese with English abstract).
- Luo, W. B., Ding, Z. J., Gao, S. D., et al., 2021. Wide Field Electromagnetic Sounding Using Y-Component Magnetic Field with Horizontal Current Dipole Source. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 45(1): 46–56 (in Chinese with English abstract).
- Luo, W. B., Li, Q. C., Tang, J. T., 2012. Coded Source Electromagnetic Sounding Method. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(1): 341–349 (in Chinese with English abstract).
- Nozaki, T., Nagase, T., Takaya, Y., et al., 2021. Subseafloor Sulphide Deposit Formed by Pumice Replacement mineralisation. *Scientific Reports*, 11(1): 8809–8809.

- Peng, L. G., Li, X. M., Ren, Y. X., et al., 1998. Researches on Metallogenetic Regularity and Deep-Seated Ore-Hunting in Zheyaoshan Deposit, Baiyin Ore Field, Gansu. *Northwest Geoscience*, (1): 1–51 (in Chinese with English abstract).
- Shi, H., Pei, J., Luo, Z. J., et al., 2017. Comparison of the Exploration Effect of Wide Field Electromagnetic Method and CSAMT in Production Mines: A Case Study of Shuikoushan. *Mineral Resources and Geology*, 31(4): 766–772 (in Chinese with English abstract).
- Song, S. G., Niu, Y. L., Su, L., et al., 2013. Tectonics of the North Qilian Orogen, NW China. *Gondwana Research*, 23(4): 1378–1401. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.02.004>
- Song, S. H., 1982. A Study of Pyritic Copper and Polymetallic Mineral Deposits (Cu, Pb, Zn): The Correlation and Research Tendency of Some of the Worldwide Mineral Belts and Ore Deposit Types. In: *Collected Works of the Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences* (5). Beijing: Geological Press: 5–37 (in Chinese).
- Suo, G. Y., Li, D. Q., Hu, Y. F., 2019. One-Dimension Parallel Constrained Inversion of E-Ex Wide Field Electromagnetic Method Based on Analytical Jacobian Matrix. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 43(1): 55–61 (in Chinese with English abstract).
- Tang, J. Q., He, J. S., 2005. Controlled Source Audio Magnetotelluric Method and Its Application. Changsha: Central South University Press (in Chinese).
- Tang, J. Q., Luo, W. B., 2008. Pseudo-Random Electromagnetic Exploration Based on Invert-Repeated M-Sequence Correlation Identification. *Chinese Journal of Geophysics*, 51(4): 1226–1233 (in Chinese with English abstract).
- Tang, J. Q., Ren, Z. Y., Zhou, C., et al., 2015. Frequency-Domain Electromagnetic Methods for Exploration of the Shallow Subsurface: A Review. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(8): 2681–2705 (in Chinese with English abstract).
- Wang, M. J., Song, S. G., Niu, Y. L., et al., 2014. Post-Collisional Magmatism: Consequences of UHPM Terrane Exhumation and Orogen Collapse, N. Qaidam UHPM Belt, NW China. *Lithos*, 210: 181–198. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.10.006>
- Wang, R., Yin, C. C., Wang, M. Y., et al., 2014. CSAMT Sensitivity Analysis for 1D Models. *Progress in Geophysics*, 29(3): 1284–1291 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. T., Lin, C. H., Wang, X. D., 2023. Effect of Transmitter Waveform on 1D Modeling and Inversion of Transient Electromagnetic Method Data. *Geoscience*, 37(1): 99–106 (in Chinese with English abstract).
- Wu, J. R., 1992. Analysis of Geologic Characteristics and Ore-Forming Conditions of Pyritic-Copper-Polymetallic Deposits in Baiyinchang Orefield, Gansu. *Northwest Geoscience*, (2): 83–96 (in Chinese with English abstract).
- Xia, L. Q., Li, X. M., Yu, J. Y., et al., 2016. Mid-Late Neoproterozoic to Early Paleozoic Volcanism and Tectonic Evolution of the Qilian Mountain. *Geology in China*, 43(4): 1087–1138 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, B., Chen, H. Y., Feng, Y. Z., et al., 2024. Episodic Magmatism Contributes to Sub-Seafloor Copper Mineralization: Insights from Textures and Geochemistry of Zoned Pyrite in the Ashele VMS Deposit. *American Mineralogist*, 109(5): 925–940. <https://doi.org/10.1130/B36853.1>
- Xiao, X., Li, Y. H., Tang, J. T., et al., 2024. Application of Wide-Field Electromagnetic Method in Deep Mineral Exploration of Tongling: A Case Study of the Dongguashan Copper Mine. *Mineral Exploration*, 15(9): 1593–1606 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. T., Li, X. L., Zhou, B., et al., 2024. Application of Wide-Field Electromagnetic Sounding Method to Deep Prospecting in the Mangling Ore Concentration Area in North Qinling: A Case Study of the Yaozhuang Ore District. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 48(6): 1609–1617 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X., Liu, K. H., Li, X., 2010. Application of Static Correction CSAMT-Joint Inversion Method. *Northwestern Geology*, 43(2): 38–43 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, S. Y., Yang, A. Y., Langmuir, C. H., et al., 2022. Oxidized Primary Arc Magmas: Constraints from Cu/Zr Systematics in Global Arc Volcanics. *Science Advances*, 8(12): eabm0718. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abk0718>
- Zhao, Z. X., Wei, J. H., Santosh, M., et al., 2018. Late Devonian Postcollisional Magmatism in the Ultrahigh-Pressure Metamorphic Belt, Xitieshan Terrane, NW China. *Geological Society of America Bulletin*, 130(5–6): 999–1016. <https://doi.org/10.1130/B31772.1>

- Zhen, S. J., Du, Z. Z., Liang, W. J., et al., 2013. Sericitization of Baiyinchang Copper Polymetallic Deposit. *Acta Mineralogica Sinica*, 33(S2): 544–545 (in Chinese).
- Zhu, Y. Z., Xu, C. Y., 2011. Experimental Application of Wide-Field Electromagnetic Method in Deep Prospecting. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 35(6): 743–746 (in Chinese with English abstract).

附中文文献:

- 边千韬, 1989. 白银厂矿区地质构造及成矿模式. 北京: 地震出版社: 59–65.
- 底青云, 朱日祥, 薛国强, 等, 2019. 我国深地资源电磁探测新技术研究进展. 地球物理学报, 62(06): 2128–2138.
- 甘肃冶金地质三队, 1975. 白银地区酸性火山活动与成矿关系的探讨. 地质与勘探, (08): 32–40.
- 高曙德, 罗维斌, 苏永刚, 等, 2017. 编码源地电阻率观测试验. 地震学报, 39(4): 506–519.
- 郭小刚, 陈守余, 李志晨, 等, 2022. 甘肃白银厂铜多金属矿田重磁异常及构造特征. 地质与勘探, 58(05): 1057–1069.
- 郭小刚, 戴霜, 韩峰, 等, 2025. 甘肃白银厂铜多金属矿田矿床成因及成矿模式研究进展综述. 矿床地质, 44(2): 432–456.
- 何继善, 2010. 广域电磁测深法研究. 中南大学学报(自然科学版), 41(03): 1065–1072.
- 何继善, 2019. 大深度高精度广域电磁勘探理论与技术. 中国有色金属学报, 29(09): 1809–1816.
- 计波, 李向民, 时超, 等, 2024. 北祁连东段白银岩群双峰式火山岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素及地球化学特征. 地球科学, 49(7): 2490–2507.
- 贾晨星, 程辉, 傅崧原, 等, 2024. 基于扩频编码信号的高频电磁测深实验研究. 地球物理学进展, 39(03): 1251–1259.
- 梁婉娟, 严光生, 李景朝, 等, 2016. 甘肃小铁山铅锌多金属矿床流体包裹体特征. 地质通报, 35(2): 317–327.
- 廖时理, 2014. 甘肃省白银地区找矿靶区逐级圈定与定量预测(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学(武汉).
- 柳建新, 孙欢乐, 陈波, 等, 2016. 重磁方法在国内外金属矿中的研究进展. 地球物理学进展, 31(2): 0713–0722.
DOI:10.6038/pg20160229.
- 柳建新, 童孝忠, 杨晓弘, 等, 2008. 实数编码遗传算法在大地电磁测深二维反演中的应用(英文). 地球物理学进展, 23(06): 1936–1942.
- 罗维斌, 丁志军, 高曙德, 等, 2021. 测量磁场水平分量 H_y 的电性源广域电磁测深法. 物探与化探, 45(1): 46–56.
- 罗维斌, 李庆春, 汤井田, 2012. 编码电磁测深. 地球物理学报, 55(1): 341–349.
- 彭礼贵, 李向民, 任有祥, 等, 1998. 甘肃白银厂折腰山矿床成矿规律及深部找矿研究. 西北地质科学, (1): 1–51.
- 石郝, 裴婧, 罗振军, 等, 2017. 广域电磁法和可控源音频大地电磁法在生产矿山探测效果的比对——以水口山为例. 矿产与地质, 31(4): 766–772.
- 宋叔和, 1982. 黄铁矿型铜和多金属矿床——世界范围内一些主要矿带和矿床类型的对比及研究趋势. 中国地质科学院矿床地质研究所文集(5). 北京: 地质出版社, 5–37.
- 索光运, 李帝铨, 胡艳芳, 2019. 基于解析雅克比矩阵的 E-Ex 广域电磁法一维并行约束反演. 物探化探计算技术, (01): 55–61.
- 汤井田, 何继善, 2005. 可控源音频大地电磁法及其应用. 长沙: 中南大学出版社.
- 汤井田, 罗维斌, 2008. 基于相关辨识的逆重复 m 序列伪随机电磁法. 地球物理学报, 51(4): 1226–1233.
- 汤井田, 任政勇, 周聪, 等, 2015. 浅部频率域电磁勘探方法综述. 地球物理学报, 58(08): 2681–2705.
- 王若, 殷长春, 王妙月, 等, 2014. CSAMT 法一维层状介质灵敏度分析. 地球物理学进展, 29(3): 1284–1291.
- 王胜涛, 林昌洪, 王旭东, 2023. 发射电流波形对瞬变电磁一维正反演的影响. 现代地质, 37(01): 99–106.
- 郭介人, 1992. 白银厂矿田黄铁矿型铜-多金属矿床的地质特征及成矿条件分析. 西北地质科学, (02): 83–96.
- 夏林圻, 李向民, 余吉远, 等, 2016. 祁连山新元古代中-晚期至早古生代火山作用与构造演化. 中国地质, 43(4): 1087–1138.
- 肖晓, 李银航, 汤井田, 等, 2024. 广域电磁法在深部矿产勘查中的应用——以铜陵冬瓜山铜矿为例. 矿产勘查, 15(9): 1593–1606.
- 张晓团, 李新林, 周斌, 等, 2024. 广域电磁法在北秦岭蟒岭矿集区深部找矿中的应用——以腰庄矿区为例. 物探与化探, 48(6): 1609–1617.
- 张旭, 刘宽厚, 李貅, 2010. CSAMT 的静校正应用——联合反演法. 西北地质, 43(02): 38–43.

甄世军, 杜泽忠, 梁婉娟, 等, 2013. 白银厂铜多金属矿床的绢云母化. 矿物学报, 33(S2): 544-545.

朱裕振, 徐从跃, 2011. 广域电磁法深部找矿实验效果. 物探与化探, 35(6): 743-746.