doi: 10.11720/wtyht.2026.1082
王义利, 何培良, 马玉伟, 等. 太行山北段赤瓦屋铜钼矿区电性结构分析及成矿预测[J]. 物探与化探, 2026, 50(3): 449-457. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1082
Wang Y L, He P L, Ma Y W, et al. Electrical structure analysis and metallogenic prediction of the Chiwawu Cu-Mo deposit in the northern Taihang Mountains metallogenic belt[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(3): 449-457. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1082

太行山北段赤瓦屋铜钼矿区电性结构分析及成矿预测

王义利[1,2], 何培良[1], 马玉伟[1,2], 胡美兰[1,2]
(1. 河北省地质工程勘查院, 河北 保定 071000; 2. 河北省斑岩型矿床研究重点实验室, 河北 保定 071000)

摘 要: 赤瓦屋铜钼矿床是太行山成矿带北段重要的斑岩型铜钼矿区之一, 但近年来找矿工作进入瓶颈时期。由于研究区内以往的物探工作主要以激发极化法(简称激电)测量为主, 缺少深部物探工作。因此, 本文通过开展音频大地电磁测量, 获得矿区电性结构特征, 并结合地质、钻探资料进行综合研究分析, 研究结果认为, 高阻岩体下的低阻异常多为赋矿有利位置, 但浅部的断裂破碎带对矿体起到破坏作用。将电性主轴方向作为独立参数, 利用多测点—多频点阻抗张量统计成像技术, 统计分析了 2 条剖面的电性主轴分布特征及与成矿的关系。统计结果显示 L3 线电性主轴方向在较大深度范围内存在沿剖面连续变化的现象, 这表明其深部可能存在隐伏小岩体。本文的实例研究为 AMT 方法在矿产勘探中的应用提供了新的思路, 也为矿区下一步找矿工作提供一定指导。

关键词: 音频大地电磁测深; 电性主轴; 深部找矿; 多测点—多频点分析
中图分类号: P631; P31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2026)03-0449-09

0 引言

太行山北段成矿带是华北克拉通重要的成矿区域, 目前已经发现石湖大型金矿、大湾大型锌钼矿、木吉村大型铜矿和安妥岭大型钼矿、龙门大型钼矿等数十个大中型矿产地。赤瓦屋铜钼矿区位于成矿带中部, 目前钼矿已达到了中型规模, 找矿潜力大, 但近年来勘探工作进入瓶颈期, 需要实现深部找矿方面的突破。目前, 该矿区主矿体深度在 600 m 以下, 而前期矿区物探工作主要为激电面积测量和激电剖面测量, 探测深度有限。

栾卓然等、张志远等[1-3] 通过地、物、化、遥信息的综合处理对矿区及周边进行了研究, 认为其深部的找矿潜力巨大。音频大地电磁法(audio-magnetotellurics, AMT)具有施工方便、勘探深度大、不受高阻屏蔽等优点, 近年来在深部矿产勘探中应用广泛[4-10], 且在众多斑岩型矿床的实践成果[11-15] 也为本矿区开展物探工作提供了思路和借鉴。本文通过在研究区开展 AMT 测量工作, 结合地质、钻探成果综合研究赋矿有利部位的电性特征, 为后续找矿工作指明了方向。在以往大地电磁测深测量中, 电性主轴通常作为反演计算中的一个辅助参数, 但近年来, 陈小斌等、崔腾发等[16-18] 将其作为一个单独参数应用在郯庐断裂的构造分析中。本次工作也将电性主轴方向作为单独参数应用在矿产勘探中, 探讨深部构造走向变化与成矿之间的关系, 为矿区地质认识提供了新的信息, 也为 AMT 测量在矿产勘探中的数据应用提供新的思路。

1 地质与地球物理特征

1.1 地质背景

赤瓦屋铜钼矿床位于河北省保定市阜平县西南

收稿日期: 2025-03-18; **修回日期:** 2025-07-02
基金项目: 河北省地质矿产勘查开发局项目“太行山北段典型矿区电法测深效果对比应用研究”(13000023P0069B4101338)、“赤瓦屋铜钼矿区电性结构与成矿关系研究”(13000026P00329410427M)
第一作者: 王义利(1987-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事金属矿地球物理勘查工作。Email: 290229663@qq.com
通讯作者: 何培良(1988-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事金属矿地球物理勘查工作。Email: 2413764166@qq.com

区域，距县城直线距离 15 km，地处华北克拉通造山带北带。矿床位于赤瓦屋杂岩体中，岩体出露面积 59.3 km^2，矿区岩浆岩分布广泛，形成于早白垩世。该矿区岩体呈现由内向外分带特征，中心部位发育斑状花岗闪长岩，向外过渡为花岗闪长岩，最外缘环绕着环状石英闪长岩。岩体围岩主要为阜平岩群的坊里岩组与元坊岩组，岩性以黑云斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩为主。矿区已施工 7 个钻孔，钻孔结果显示隐爆角砾岩体在 ZK001 及 ZK301 孔 600 m 深度以下区段广泛发育，具碎裂结构及热液交代结构，角砾主要呈棱角—次棱角状，成分主要由斑状花岗闪长岩构成，偶见花岗斑岩。金属矿物以黄铜矿、辉钼矿、黄铁矿为主，呈细脉状分布于石英脉及黑云母细脉边缘或内部，局部可见黄铜矿与黄铁矿富集成团块状，辉钼矿呈星点状分布。结合矿区以往地质工作，目前认为角砾岩为钼铜矿主要赋矿围岩，花岗斑岩为成矿母岩（图 1）。

矿区构造以断裂为主，发育多条 SN 向断裂带，延伸长度普遍数百米至数千米。断裂带多被花岗闪长斑岩脉充填，少量由角砾岩、碎裂岩组成。与 SN 向断裂有关的构造裂隙异常发育，裂隙面普遍可见硅化、钾化，部分见黄铁矿化及铜钼矿化。矿床面型蚀变强烈，铜钼矿化为浸染状和细脉浸染状。地表矿化体沿 SN 向分布，钻探揭露深部存在厚大矿体[19]。

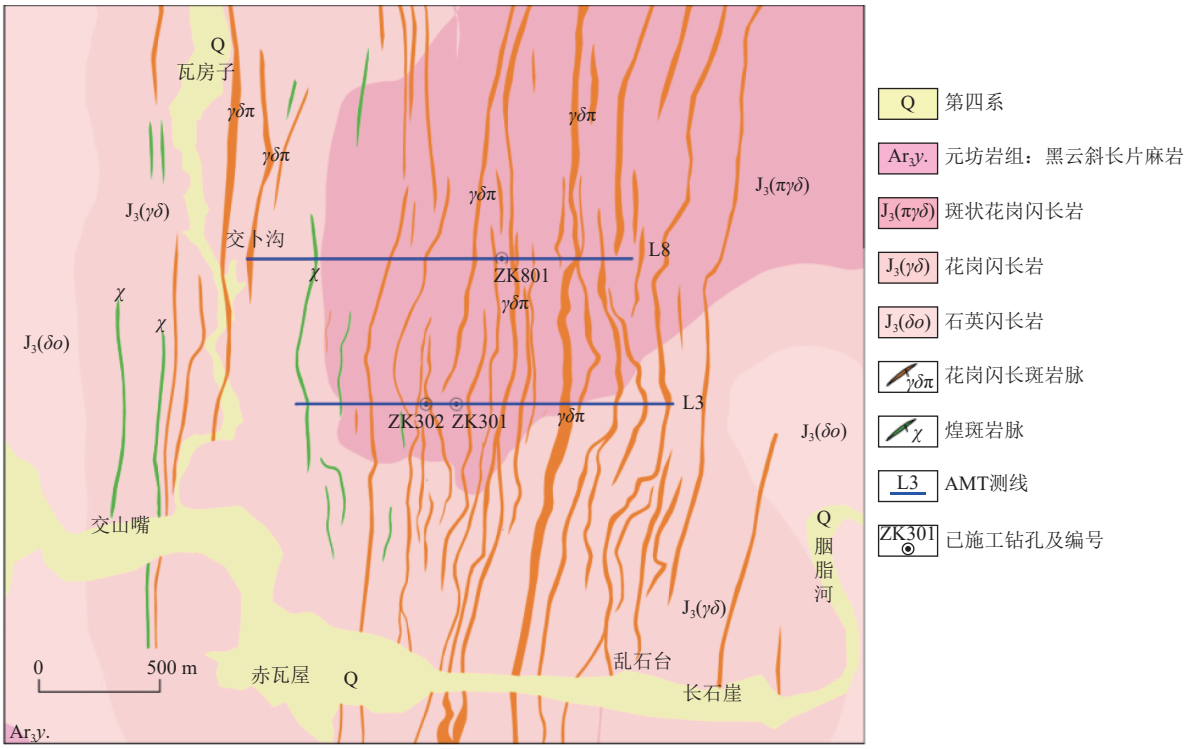


图 1　工作区地质及 AMT 测线布置

Fig. 1　Geological conditions of the working area and the layout of AMT survey lines

1.2　岩矿石电阻率特征

对测区内岩（矿）石做物性测试，主要岩（矿）石电性特征见表 1，测区内铜钼矿石、角砾岩与其余岩石之间有较明显的电性差异，电性参数表明，本区具有采用电法寻找隐伏铜钼矿体、探测断裂构造的较好物性条件。

表 1　赤瓦屋矿区实测岩石电阻率参数

Table 1　The measured rock resistivity parameters in the Chiwawu mining area

岩性名称	标本数/块	电阻率/(Ω·m)	电阻率均值/(Ω·m)
铜钼矿石（含黄铁矿）	32	117～1 167	431
角砾岩	31	144～950	441
花岗闪长岩	30	700～6 738	2 502
斑状花岗闪长岩	31	927～6 809	2 736

2　工作布设及技术参数

本次工作在前期的施工钻孔勘探线布设了 2 条剖面，方位 90°，点距 40 m，共 80 个测点，L3 测线位于测区中部，已施工钻孔有 ZK301、ZK302。L8 测线位于 L3 测线北部 600 m 处，已施工钻孔 ZK801。其中 ZK801、ZK302 深部未见厚大矿体，见矿效果不理想，ZK301 见矿效果好，铜钼钨矿体累计厚度 169.11 m，深部见厚大矿体，最大连续见矿厚度为 38.23 m。两

钻孔 ZK302 与 ZK301 相距 120 m, 距离较近, 见矿效果相差大, 具有较大的研究价值。以往矿区物探工作主要以激电面积工作和激电剖面工作为主, 缺乏深部物探工作。因此, 本文在 2 条勘探线布设大地电磁测深剖面, 从地球物理角度分析深部地质构造差异, 对本矿区找矿工作的突破提供支持。

此次 AMT 数据的采集是采用加拿大凤凰公司 V8 多功能电法仪, 通过十字交叉布极方式同步采集 E_x、E_y、H_x、H_y 共 4 个水平电磁场分量, 单点采集时长大于 40 min。数据处理是基于中国地震局地质研究所陈小斌研究员研发的 MT-pioneer 软件平台, 采用一维自适应正则化与二维 NLCG 算法联合反演, 以及选用 TM 模式反演获取二维反演电阻率剖面。

3　AMT 剖面电性结构分析

3.1　电性结构分析

L3 测线位于赤瓦屋岩体中部, 地表岩性主要为花岗闪长岩和斑状花岗闪长岩, ZK301 中自地表至标高 0 m 区域主要为斑状花岗闪长岩, 标高 0~400 m 主要为隐爆角砾岩, 角砾岩中赋存铜钼矿体, 为主矿体赋存位置。ZK302 揭露的岩性主要为花岗闪长岩, 见少量铜钼矿体。L3 剖面的电性特征以垂向分布为主, 总体可分为高、低、高 3 层, 反演电阻率其与钻孔投影见图 2。

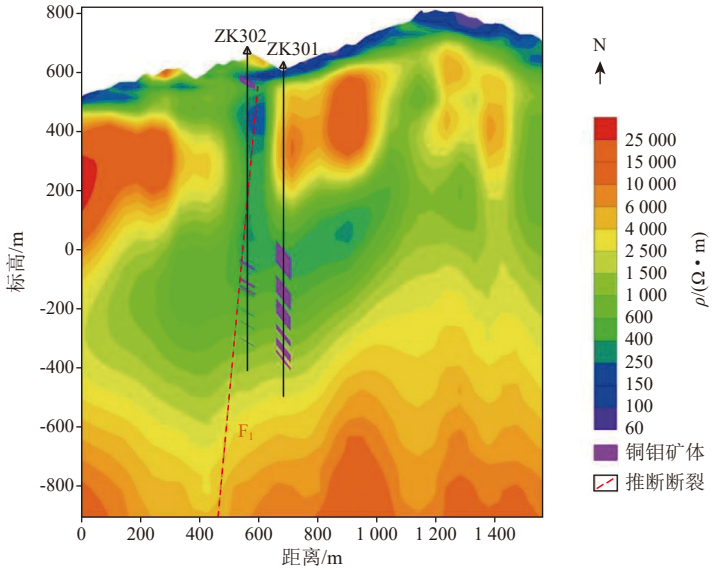


图 2　L3 线反演电阻率断面

Fig. 2　Two-dimensional inversion profile of line 3

低阻区主要分布于剖面中部, 其反演电阻率值大部分小于 1 500 Ω·m, 西低东高, 呈椭圆状、透镜状分布, 剖面中部低阻区呈条带陡倾状延伸至地表, 推断为断裂破碎发育区域。根据 ZK302 工程揭露, 该低阻带为斑状花岗闪长岩, 且发育黄铁矿化、黄铜矿化等, 岩心多处破碎裂隙发育, 并在标高−100 m 以下见两段近 30 m 的破碎带, 低阻条带是上述情况的综合反映。ZK302 在标高−400~0 m 的低阻区域揭露为隐爆角砾岩和铜钼矿体, 该区段见厚大矿体。高阻主要分布在标高−400 m 以下深部以及标高 0 m 以上浅部, 浅部高阻体间断分布, 反演电阻率大于 1 500 Ω·m, 主要为较完整的花岗闪长岩和斑状花岗闪长岩的反映。

L8 测线(图 3)位于 L3 测线北部 600 m, ZK801 揭露地表(标高 716 m)至标高 200 m, 以斑状花岗闪长岩与角砾岩为主, 黄铁矿化、黄铜矿化等金属矿化较发育, 破碎、裂隙发育。标高 200~−300 m 为斑状花岗闪长岩, 部分发育黄铁矿化、黄铜矿化, 岩心较完整, 破碎少。电性层主要以垂向分布为主, 总体可划分为两层, 低阻区位于剖面中东部, 总体呈“√”形特征, 反演电阻率普遍小于 1 500 Ω·m, 为斑状花岗闪长岩、矿化蚀变和破碎裂隙发育的综合反映。高阻区主要分布在剖面西部及深部, 东部呈向上突起形态, 反演电阻率普遍大于 1 500 Ω·m, 呈面状高阻特征, 主要为花岗闪长岩和斑状花岗闪长岩的反映。

3.2　电性主轴统计分析

大地电磁阻抗张量分解技术能够有效抑制浅层局部异常体干扰, 同时为二维反演提供高精度阻抗数据, 还可以获得随测点、频率变化的区域电性主轴方位, 为分析研究电性构造的几何特征分布提供基

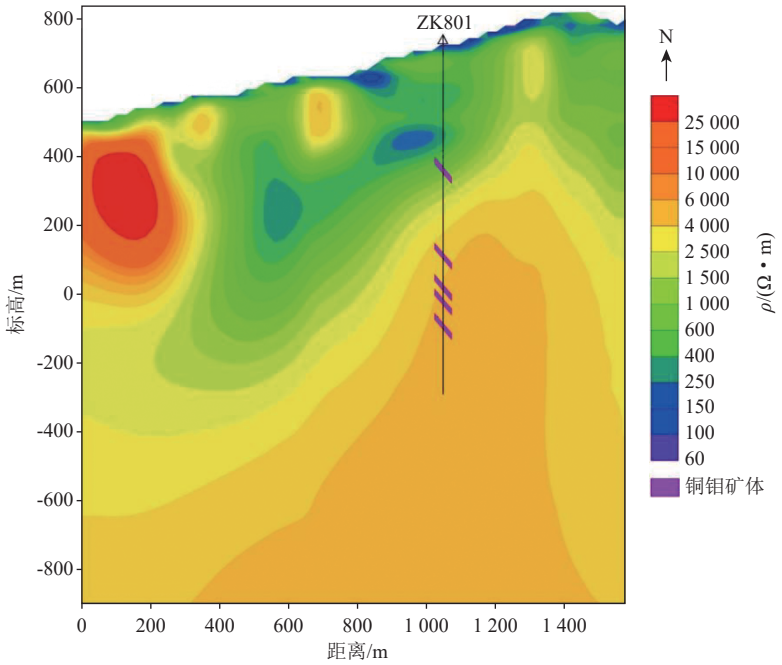


图 3　L8 线反演电阻率断面

Fig. 3　Two-dimensional inversion profile of line 8

本的数据支持[18]。本次工作基于 MT-pioneer 软件对 L3 测线和 L8 测线进行电性主轴多测点—多频点的统计成像分析。通过电性主轴方位统计分析对剖面不同深度构造特征和构造间几何关系进行了解。本次工作选用共轭阻抗法对剖面的阻抗张量进行分解，得到每个测点、每个频点的电性主轴方位参数。基于多测点—多频点电性主轴统计成像技术，实施分测段、分频段统计分析，并通过合并电性主轴方位一致的相邻区段，构建综合统计结果。主轴方位的计算中存在 90°模糊性问题，即无法判断电性主轴是 α 还是 α+90°，本次工作主要基于地质认识进行判别，但由于目前对深部地质认识较少，对主轴方位判断可能存在错误。图 4 给出了 2 条剖面电性主轴统计成像结果。

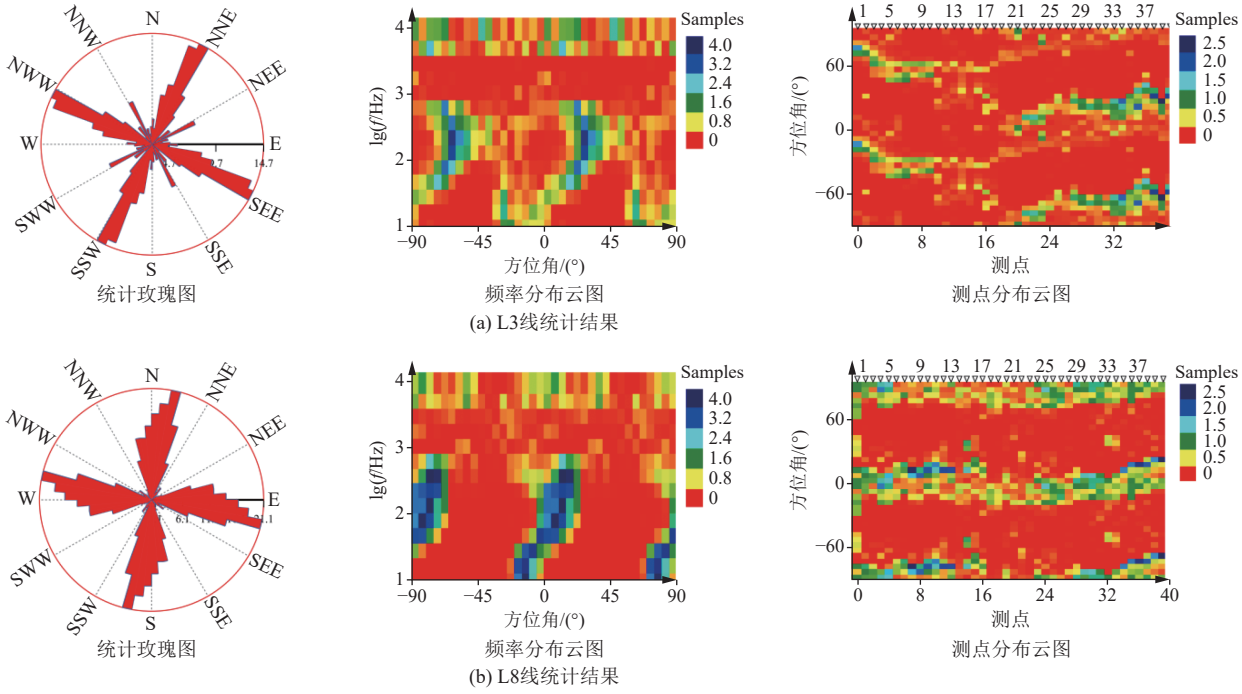


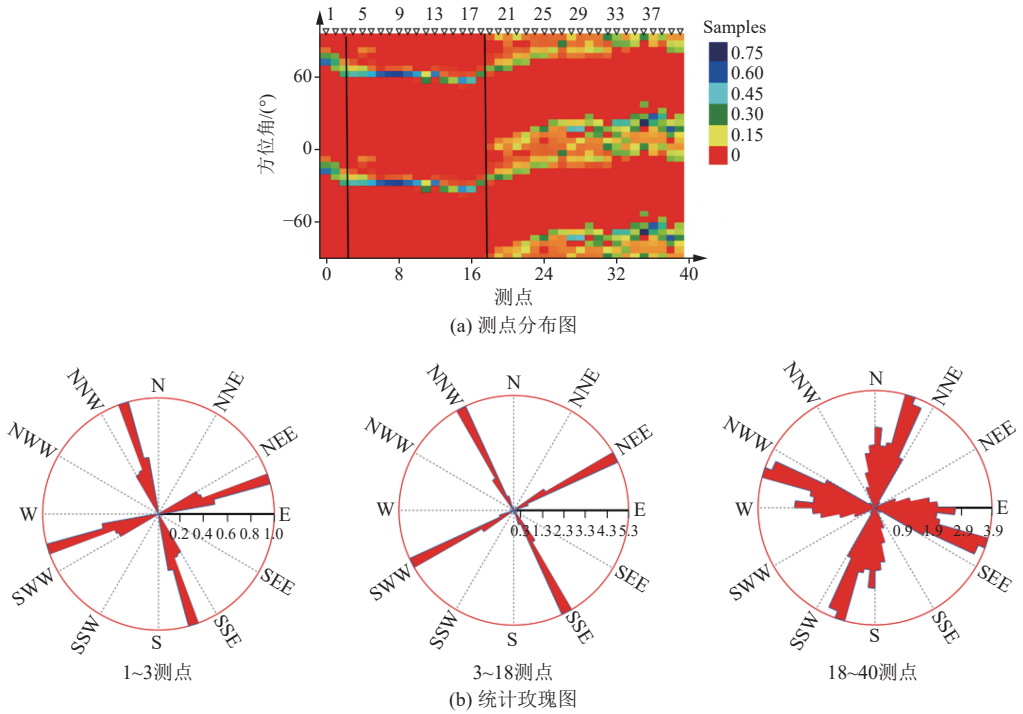
图 4　L3 线和 L8 线统计结果（统计过程施加了二维性加权）

Fig. 4　Statistical results of line 3 and line 8（the statistical process has applied two-dimensional weighting）

图 4a 显示了 L3 线全剖面统计结果, 玫瑰花瓣图中主轴有 NNE、NNW、NWW、SN 等多个方向, 且大多数主轴集中分布在 NNE 方向。频率分布云图显示中频段主轴相对集中 NNE 方向, 低频段主轴主要分布在 SN、NNW 方向。测点分布云图显示电性主轴沿剖面方向在 19 测点附近发生明显突变。图 4b 显示了 L8 线全剖面的统计结果, 从玫瑰花瓣图可以看出 L8 线剖面的主轴主要集中在 SN 方向, 与频率分布云图中频段主轴方位较为一致, 低频段主轴方位略微变化, 高频段分布较为散乱, 没有明显优势主轴。总体电性主轴方向在频率域具有一致性, 根据测点分布云图可以看出整条剖面主轴方位也基本具有一致性。这表明 L8 线构造变化较小, 沿剖面构造方向基本保持一致。

根据频率分布云图, 将 L3 线剖面大致分为 3 个不同频段进行分频段分测段统计, 780~3 000 Hz 受死频带影响, 数据质量较差, 删除数据点较多, 未进行统计分析。

图 5~图 7 显示了不同频段的测点分布云图, 可以较清晰地看出不同频段电性主轴沿剖面的变化。L3 线电阻率普遍较高, 100 Hz 频率以下多测点电阻率均在 10 000 Ω·m 以上。本次工作通过 MT-Pioneer 软件中集成的一种复杂模型下趋肤深度计算方法来计算趋肤深度, 该方法由 2007 年杨静、陈小斌[20]发展而来, 其基本思路是设定一个参考点, 然后沿传播方向场强衰减到参考点处的 1/e 所走过的距离。低频段 10~79 Hz, 按照趋肤深度推测最大深度约 15 km, 0~18 点电性主轴主要以 NNE 为主, 18~40 点主轴方向较为散乱, 但主要以 SN 向为主。中频段 79~780 Hz 按照趋肤深度推测最大深度约 8 km, 24~40 点电性主轴方向较为显著, 为 NNE 方向, 1 点向 24 点方向电性主轴发生连续变化, 电性主轴方向由 75°逐渐过渡为 15°左右。高频段 3 000~10 400 Hz, 按照趋肤深度推测最大深度大约为 600 m, 电性主轴方向较为散乱, 但 1~7 点、19~24 点、32~39 点电性主轴较为集中一致。1~7 点主要为 NNW 方向, 19~24 点电性主轴为近 SN 方向, 32~39 点电性主轴为近 NNE 方向。



(a) 测点分布图

(b) 统计玫瑰图

图 5　L3 线低频段(10~79 Hz)电性主轴统计

Fig. 5　The statistical of the main axis of the low-frequency band (10~79 Hz) of the line 3

根据电性主轴的变化情况, 沿剖面方向总体大致可以分为西段(1~3 测点)、中段(10~79 Hz 的 3~18 测点、79~780 Hz 的 3-23 测点)、东段(10~79 Hz 的 18~40 测点、79~780 Hz 的 23~40 测点)3 个不同特征分区。西段电性主轴随频率变化不大, 表明该测段深浅部可能为一整体, 推测主要受花岗闪长岩与斑状花岗闪长岩接触的影响。中段在低频部分电性主轴显著集中, 表明中段在低频部分可能为同一整体。随着频率的升高, 中段构造发生明显变化, 出现不同的电性主轴集中方向。说明中低频之间发生了构造变化, 其中部分测段中低频之间主轴方位差异较显著, 可能存在结构不整合现象。东段低频部

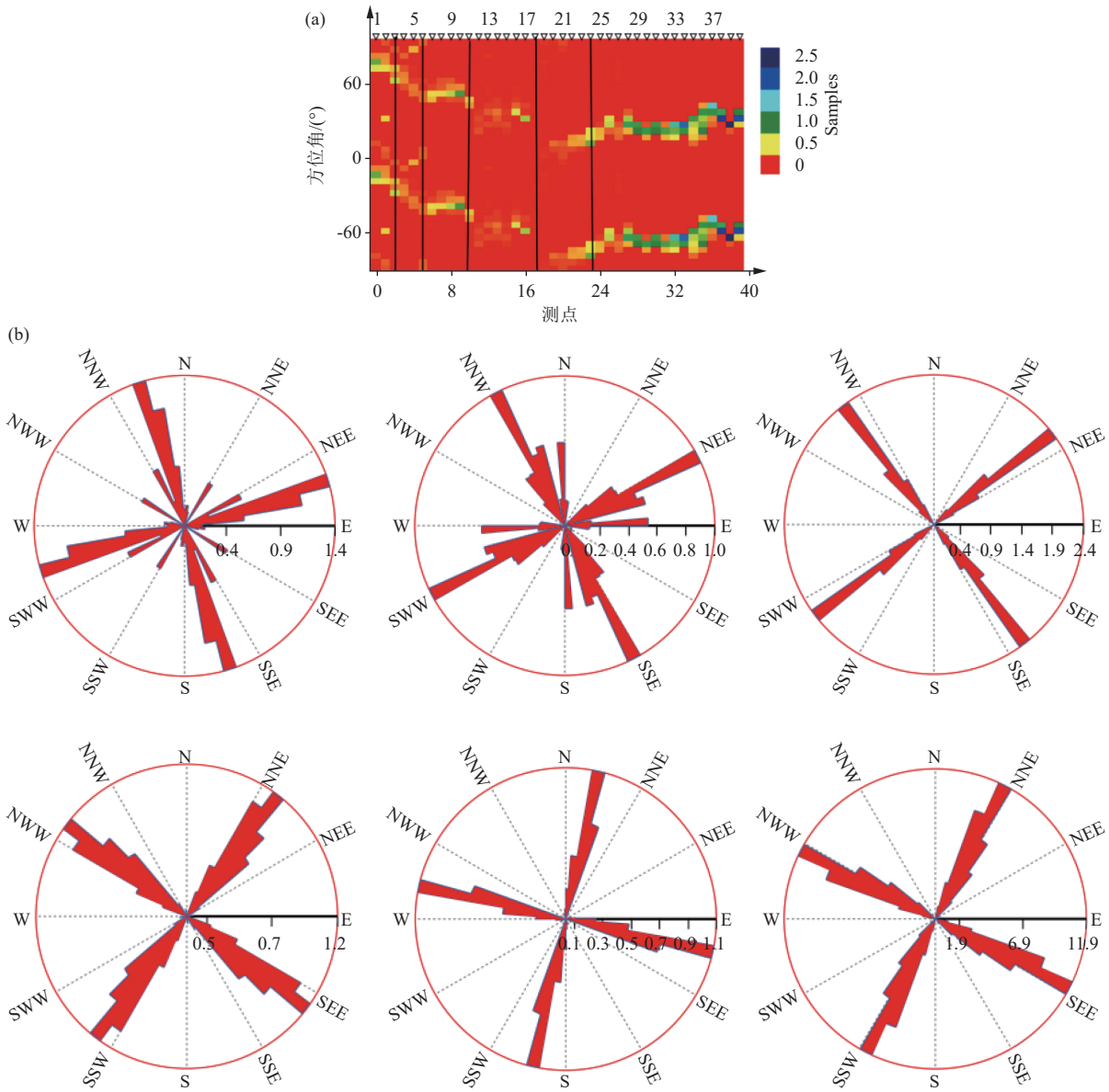


图 6　L3 线中频段(79~780 Hz)电性主轴统计

Fig. 6　The statistical of the electrical main axis in the medium frequency band (79~780 Hz) of line 3

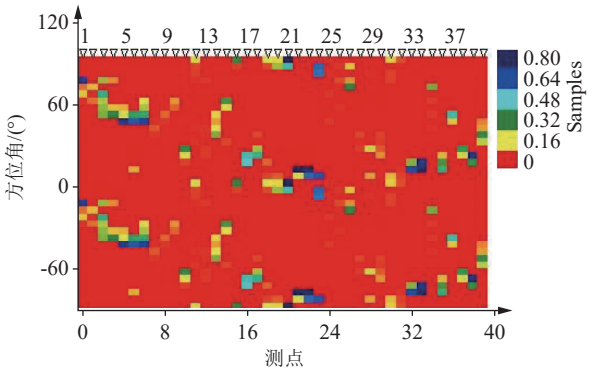


图 7　L3 线 3 000~10 400 Hz 测点分布云图

Fig. 7　Cloud map of distribution of measuring points on L3 line 3 000~10 400 Hz

分电性主轴较乱，但大体以近 SN 向为主，推测可能与岩浆活动较剧烈有关。东段中频段电性主轴较为集中，表明主要受同一方向构造影响。整条剖面浅部高频部分整体电性主轴杂乱，部分测段主轴方位较集中，未进行分测段统计。

4　讨论

对比两条剖面音频大地电磁测深反演结果和钻孔结果，可以发现，厚大矿体赋存于岩体中部囊状低阻异常内，低阻囊状异常主要受矿化发育和角砾岩发育的影响。矿体上方的高电阻率分布是较完整岩体的反映。ZK302 位于陡倾低阻带处，受断裂破碎发育影响，未形成厚大矿体。

在斑岩型矿床中，花岗斑岩成矿母岩常呈小岩体侵入。此次电性主轴统计结果显示，L3 线深部电

性主轴沿剖面方向存在明显变化。在 10~79 Hz 低频段, 19 测点两侧电性主轴存在明显差异, 电性主轴方向相差约 30°, 同时东测段电性主轴方向较杂乱, 表明深部结构较复杂, 可能受多期岩浆活动的影响。79~780 Hz 中频段, 同样存在东西测段的明显差异, 其中 3~24 测点, 电性主轴方向沿剖面方向发生连续变化, 在 800 m 左右的剖面距离内, 电性主轴方向由 75°变化到 15°, 发生了约 60°的变化。电性主轴在较大深度范围内呈现一致性且沿剖面连续变化, 表明可能存在隐伏小岩体。钻探工作在这一剖面范围内厚大矿体的发现, 也表明两者具有紧密联系。

对比 L3 测线及 L8 测线电性主轴方向统计结果及钻孔见矿情况差异, 可以得出, 矿区成矿与电性主轴沿剖面的变化具有紧密联系。对于大地电磁测深的二维反演, 反演结果受剖面长度影响较大[21], 一般要求反演深度小于剖面长度。由于剖面长度有限, 以及随深度增大导致的探测精度严重降低, 本次工作未进行更大深度的电阻率反演, 但矿区主要为大面积岩浆岩地区, 背景电阻率较高, 根据趋肤深度估算, 探测频率可以到达较大深度。因此通过多测点—多频点电性主轴统计结果可以分辨出地下深部电性主轴分布特征, 揭示深部构造特征, 为矿区地质演化认识和深部找矿提供更丰富的信息。

汤中立等[22] 提出的小岩体成大矿理论中论述了成矿物质在地壳中岩浆房聚集后, 小岩体侵位至浅部形成有关大型矿床。因此, 隐伏侵入小岩体的发现对矿床规律的认识及后续的勘探工作具有重要意义。本次工作由于数据有限, 对可能存在的隐伏小岩体的分布范围及岩浆房位置等未能刻画, 但为后续勘探工作的方向提供了借鉴。

5　结论

本次研究通过对 AMT 测量反演结果、电性主轴统计分析及钻孔勘探情况进行分析, 得到以下结论和认识: ①高阻区包围的囊状低阻异常为隐爆角砾岩及厚大矿体发育区, 地表向深部延伸的带状低阻异常, 主要受断裂发育、岩石破碎影响, 找矿意义不大, 并且可能对厚大矿体起到破坏作用。②突破了以往将电性主轴仅作为反演辅助参数的局限, 通过多测点多频点统计分析发现, 本矿区矿床形成与电性主轴在较大深度范围内沿剖面的连续变化具有紧密联系, 推测深部可能存在隐伏小岩体侵入, 为认识矿区深部结构和演化提供新信息, 既指导后续勘探工作, 也为相似矿区地球物理勘探提供了新思路。

参考文献(References):

[1] 栾卓然, 唐力军, 许立风, 等. 太行山北段赤瓦屋铜矿遥感地质调查与遥感综合找矿预测 [J]. 河北地质大学学报, 2024, 47(6): 34−40.
Luan Z R, Tang L J, Xu L F, et al. Remote sensing geological survey and comprehensive mineral exploration prediction of chiwawu copper mine in the north section of Taihang Mountains[J]. Journal of Hebei GEO University, 2024, 47(6): 34−40.

[2] 栾卓然, 马国玺, 李谦谦, 等. 太行山北段赤瓦屋铜钼矿及外围地—物—化—遥综合信息找矿靶区预测 [J]. 中国地质, 2024, 51(4): 1139−1160.
Luan Z R, Ma G X, Li Q Q, et al. Characteristics of the Chiwawu Cu-Mo deposit in the northern section of Taihang Mountains and the prediction of prospecting target area using geological, geophysical, geochemical and remote integrated information[J]. Geology in China, 2024, 51(4): 1139−1160.

[3] 张志远, 王文浩, 丁照月, 等. 太行山北段河北阜平县赤瓦屋钼铜矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其对找矿的指示 [J]. 地质通报, 2021, 40(9): 1522−1529.
Zhang Z Y, Wang W H, Ding Z Y, et al. Molybdenite Re-Os isochron age of the Chiwawu Mo-Cu deposit in Fuping County, Hebei Province in northern Taihang Mountains and its prospecting significance[J]. Geological Bulletin of China, 2021, 40(9): 1522−1529.

[4] 姚文, 郭军, 孙崇波, 等. 四川石棉大渡河地区金矿带基于 AMT 的地质—地球物理找矿模型 [J]. 物探与化探, 2024, 48(5): 1247−1257.
Yao W, Guo J, Sun C B, et al. AMT-based geological-geophysical prospecting model for the gold ore zone in the Daduhe area, Shimian County, Sichuan Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(5): 1247−1257.

[5] 夏时斌, 廖国忠, 邓国仕, 等. 高密度电法和音频大地电磁测深法在西南岩溶地区地下水勘探中的应用 [J]. 物探与化探, 2024, 48(3): 651−659.
Xia S B, Liao G Z, Deng G S, et al. Application of high-density electrical resistivity tomography and audio magnetotellurics for groundwater exploration in the Karst area in southwestern China[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(3): 651−659.

[6] 周珂珂. 西藏朱诺斑岩铜矿音频大地电磁法探测研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
Zhou K K. Study on audio magnetotelluric detection of junuo porphyry copper deposit in Xizang[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2021.

[7] 王佳龙, 邸兵叶, 张宝松, 等. 音频大地电磁法在地热勘查中的应用——以福建省宁化县黄泥桥地区为例 [J]. 物探与化探, 2021, 45(3): 576−582.
Wang J L, Di B Y, Zhang B S, et al. The application of audio frequency magnetotelluric method to the geothermal exploration: A case study of Huangniqiao area, Ninghua County, Fujian Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(3): 576−582.

[8] 刘成功, 景建恩, 金胜, 等. 广西大厂矿田深部成矿预测及成矿机制研究 [J]. 物探与化探, 2021, 45(2): 337−345.

Liu C G, Jing J E, Jin S, et al. A study of deep metallogenic prediction and metallogenic mechanism of the Dachang deposit in Guangxi[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(2): 337−345.

[9] 朱自串, 周丹, 李德文, 等. 音频大地电磁测深法在老挝万象盆地钾镁盐矿产勘探中的运用效果 [J]. 物探与化探, 2019, 43(6): 1268−1276.
Zhu Z C, Zhou D, Li D W, et al. The application of natural field audio magnetotellurics sounding to the exploration of the Vientiane basin potassium salt deposit in Laos[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(6): 1268−1276.

[10] 王阳玲, 左焕成, 肖扬, 等. 综合物探方法在多不杂斑岩型铜金矿床的应用 [J]. 地质找矿论丛, 2017, 32(3): 462−467.
Wang Y L, Zuo H C, Xiao Y, et al. Application of integrated geophysical methods to ore prospecting in Duobuza porphyry Cu(Au) deposit, Tibet[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2017, 32(3): 462−467.

[11] 何俊飞. 综合物探在新兴都斛铜矿床勘查中的应用 [J]. 物探与化探, 2024, 48(2): 375−381.
He J F. Application of comprehensive geophysical prospecting in exploration of the Duhu copper deposit in Xinxing County[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(2): 375−381.

[12] 游越新, 邓居智, 陈辉, 等. 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, 2023, 47(3): 638-647.
You Y X, Deng J Z, Chen H, et al. Application of integrated geophysical methods in deep prospecting of Laochang Polymetallic Deposit, Lancang, Yunnan[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(3): 638-647.

[13] 孔志召. 太行山中段寺沟岩体电性结构分析及深部成矿预测 [J]. 物探与化探, 2018, 42(5): 882−888.
Kong Z Z. The geoelectric structure characteristics and mineral prospecting of the Sigou rock mass in Middle Taihang Mountain[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(5): 882−888.

[14] 李忠, 张小兵, 汪金明, 等. EH4 在深部隐伏岩(矿)体探测中的应用——以东炉房铜钼多金属矿为例 [J]. 地质力学学报, 2023, 29(1): 48−59.
Li Z, Zhang X B, Wang J M, et al. Application of EH4 in deep concealed rock (ore) body detection: A case study of Donglufang Cu-Mo Polymetallic Deposit[J]. Journal of Geomechanics, 2023, 29(1): 48−59.

[15] 李建力, 何绍龙, 李彦波, 等. AMT 地球物理技术在西藏拿顿金铜矿找矿中的应用 [J]. 四川有色金属, 2021(2): 36−39.
Li J L, He S L, Li Y B, et al. Application of AMT geophysics in gold-copper ore prospecting in nadun, Tibet's[J]. Sichuan Nonferrous Metals, 2021(2): 36−39.

[16] 陈小斌, 蔡军涛, 王立凤, 等. 大地电磁资料精细处理和二维反演解释技术研究(四)——阻抗张量分解的多测点—多频点统计成像分析 [J]. 地球物理学报, 2014, 57(6): 1946−1957.
Chen X B, Cai J T, Wang L F, et al. Refined techniques for magnetotelluric data processing and two-dimensional inversion(Ⅳ): Statistical image method based on multi-site, multi-frequency tensor decomposition[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(6): 1946−1957.

[17] 崔腾发, 陈小斌, 邓琰. 郯庐断裂带南段大地电磁主轴方位统计分析及其意义 [J]. 地球物理学进展, 2020, 35(4): 1238−1249.
Cui T F, Chen X B, Deng Y. Statistical analysis of geo-electrical strike beneath the southern section of Tanlu fault zone and its significance[J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(4): 1238−1249.

[18] 陈小斌, 郭春玲. 大地电磁资料精细处理和二维反演解释技术研究(五)——利用阻抗张量成像识别大地线性构造 [J]. 地球物理学报, 2017, 60(2): 766−777.
Chen X B, Guo C L. Refined techniques for data processing and two-dimensional inversion in magnetotelluric(Ⅴ): Detecting the linear structures of the Earth by impedance tensor imaging[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(2): 766−777.

[19] 卢弘鹏, 亢谱嘉, 安跃辉, 等. 河北省阜平县赤瓦屋铜多金属矿阶段普查地质报告 [R]. 河北省地质工程勘查院, 2021.
Lu H P, Kang P J, An Y H, et al. Geological report on stage general survey of Chiwawu Cu-Polymetallic Deposit in Fuping County, Hebei Province[R]. Hebei Institute of Geological Engineering Exploration, 2021.

[20] 杨静, 陈小斌. 剖面长度对大地电磁二维 TM 模式反演的影响 [J]. 地震地质, 2010, 32(3): 372−381.
Yang J, Chen X B. Effect of profile length on the two-dimensional magnetotelluric inversion of tm mode[J]. Seismology and Geology, 2010, 32(3): 372−381.

[21] 陈小斌, 叶涛, 蔡军涛, 等. 大地电磁资料精细处理和二维反演解释技术研究(七)——云南盈江——龙陵地震区深部电性结构及孕震环境 [J]. 地球物理学报, 2019, 62(4): 1377−1393.
Chen X B, Ye T, Cai J T, et al. Refined techniques for data processing and two-dimensional inversion in magnetotelluric(Ⅶ): Electrical structure and seismogenic environment of Yingjiang-Longling seismic area[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(4): 1377−1393.

[22] 汤中立, 段俊, 徐刚, 等. 小岩体成(大)矿理论与实践 [J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(5): 1015−1025, 1004.
Tang Z L, Duan J, Xu G, et al. Theory and practice of small intrusive mineralization[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(5): 1015−1025, 1004.

Electrical structure analysis and metallogenic prediction of the Chiwawu Cu-Mo deposit in the northern Taihang Mountains metallogenic belt

WANG Yi-Li[1,2], HE Pei-Liang[1], MA Yu-Wei[1,2], HU Mei-Lan[1,2]

(1. *Hebei Institute of Geological Engineering Exploration*, *Baoding* 071000, *China*; 2. *Hebei Key Laboratory of Research on Porphyry Deposits*, *Baoding* 071000, *China*)

Abstract: The Chiwawu Cu-Mo deposit is an important porphyry-hosted Cu-Mo mining area in the northern Taihang Mountains metallogenic belt. However, the prospecting work in this area has encountered bottlenecks in recent years. The geophysical exploration in the past was dominated by the induced polarization surveys, barely reaching the deep strata. Given this, this study conducted an audio magnetotelluric sounding, obtaining the electrical structure of the mining area. Electrical structures combining geological and drilling data can lead to the following conclusions: The low-resistivity anomalies beneath high-resistivity rock masses represent play fairways, while the shallow fault damage zones had a disruptive effect on ore bodies. Additionally, by setting the electrical principal axis orientation as an independent parameter, this paper analyzed the distribution characteristics of electrical principal axes along two profiles and their relationships with mineralization using the statistical imaging technique based on multi-site multi-frequency impedance tensor decomposition. The statistical results indicate continuous variations in the electrical principal axis orientation within a greater depth range along the Profile L3, suggesting the probable presence of deep-seated concealed small rock masses. This finding provides new insights for the application of the Audio-frequency Magnetotelluric (AMT) method in mineral exploration and offers guidance for the next phase of mineral search in the mining area. This study provides new insights into the application of the AMT method in mineral exploration and offers guidance for future prospecting in this mining area.

Key words: audio magnetotelluric (AMT) sounding; electrical principal axis; deep prospecting; multi-site multi-frequency analysis

（本文编辑: 王萌）