doi: 10.11720/wtyht.2026.1094
杨磊, 赵向奎, 王晓东, 等. 音频大地电磁法对冀东某隐伏斑岩型钼多金属矿床指示作用研究[J]. 物探与化探, 2026, 50(3): 458-468. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1094
Yang L, Zhao X K, Wang X D, et al. Audio magnetotelluric method: Implications for a concealed porphyry-hosted molybdenum-polymetallic deposit in eastern Hebei province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(3): 458-468. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1094

音频大地电磁法对冀东某隐伏斑岩型钼多金属矿床指示作用研究

杨磊, 赵向奎, 王晓东, 张立剑, 苗群峰, 于浩, 付荣钦
(河北省地质矿产勘查开发局第四地质大队 冀北战略创新合作平台, 河北 承德 067000)

摘 要: 华北板块北缘冀东地区多金属矿床发育, 多为与斑岩有关的多金属矿床, 研究区位于承德北东部, 是一典型的流纹斑岩型钼多金属矿床。该矿区地表出露隐爆角砾岩、流纹岩以及太古宇黑云角闪斜长片麻岩。根据对以往资料的分析研究, 推测含矿的流纹斑岩位于隐爆角砾岩下部, 埋深一般大于 500 m。利用传统的物探方法较难准确地定位深部钼多金属矿床的赋存位置。本文首次采用音频大地电磁法(AMT)在本区开展对隐伏斑岩型钼多金属矿床的定位试验研究, 利用钼多金属矿低阻的特性, 以电阻率 1 000 Ω·m 为异常上限, 在研究区深部圈定了低阻异常范围, 结合研究区地质成矿规律, 试图根据电阻率低阻异常定位深部隐伏钼多金属矿床; 根据推断钼多金属矿体的有利成矿位置, 提出两个验证钻孔, 经验证, 在 01 号孔深部见到了厚 504 m 的工业品位钼矿体, 在 02 号孔深部见到了厚 185 m 的钼矿体以及厚 200 m 的铅锌矿体, 成功预测了钼多金属矿体位置。并利用 AMT 电阻率分布特征在本区构建了斑岩型钼多金属地球物理三维找矿模型, 为定位隐伏深度较大的斑岩型钼多金属矿床提供了地球物理找矿新依据。

关键词: 隐伏斑岩型钼多金属矿床; 音频大地电磁法 (AMT); 低阻异常; 三维找矿模型
中图分类号: P631.3; P31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2026)03-0458-11

0 引言

冀北燕辽多金属成矿带是中国重要的多金属成矿带, 带内钼多金属矿床多与燕山期中酸性侵入体关系密切[1-2], 研究区位于华北地台北缘燕山台褶带与内蒙地轴衔接部位丰宁—隆化深断裂东段温家沟—东山断裂带内, 断裂带南北两侧经历了不同的地质发展演化历史, 形成了特征明显不同的地层、构造、岩浆岩及矿产。1979~1984 年, 河北省地矿局第四地质大队针对该区浅部的硫铁矿开展初步普查工作, 投入钻探工作量 9 745.83 m, 最深孔 774.81 m, 在标高 200 m 深度见到了低品位 Mo 矿体, 控制厚度最大约 90 m, 钻孔未穿透矿层。该期工作初步查清了磴上矿区的地质特征, 对浅部的硫铁矿体进行了控制; 由于当时受成矿规律认识的限制, 对深部的钼多金属矿认识不足, 未进行进一步的勘查工作。近年来, 随着物探技术的提高, 利用合适的物探方法可以指导深部找矿, 于是对该区进行了立项勘查工作。

地球物理勘探是研究地球深部电性结构的一种重要手段, 其中天然场音频大地电磁测深法(audio magnetotelluric, AMT)较其他常规电法勘探方法具有设备轻便、勘探深度大、工作效率高的特点[3]。AMT 是以天然交变电磁场为场源, 在地表同步观测其电场、磁场分量, 并根据不同分量之间的线性关系, 在频率域获取诸如视电阻率、阻抗相位等多种响应函数, 最后结合已有地质资料选取合适的反演方法得到电阻率模型, 进而达到勘探的目的[4]。考虑到

收稿日期: 2025-03-24; **修回日期:** 2025-06-16
基金项目: 河北省地质勘查基金项目冀北矿集区成矿机理研究项目(13000025P003294103391)
第一作者: 杨磊(1991-), 男, 高级工程师, 毕业于吉林大学勘查技术与工程(应用地球物理)专业, 一直从事地球物理勘查和矿产勘查工作。Email: 1121962591@qq.com
通讯作者: 赵向奎 (1985-), 男, 硕士, 工程师, 毕业于河北地质大学, 一直从事矿产勘查工作。Email: dzsdzxk1985@163.com

该区钼多金属矿体具有埋藏深度大(一般埋深均大于 500 m), 且在深部的赋存状态和位置不明确的特征, 利用常规的物探方法很难达到对深部多金属矿体的勘探目的。本文首次在该区钼多金属矿勘探中通过 AMT 的测量工作成果, 利用电阻率异常结合地质成矿规律圈定了深部钼多金属矿体的有利成矿位置, 经验证达到了很好的找矿应用效果。并且, 利用电阻率三维模型建立了研究区的成矿模型, 为今后本区域寻找此类型的钼多金属矿床提供了新方法和新思路。

1　研究区地质背景

研究区地处华北地台北缘燕山台褶带与内蒙地轴衔接部位, 属台褶带大庙穹断束(Ⅳ)级大地构造单元[5]。出露地层主要为太古宇单塔子群凤凰咀组, 其次为新生界第四系全新统。受区域构造控制, 岩浆岩以燕山晚期的次火山岩—流纹斑岩为主, 伴生隐爆角砾岩, 隐爆角砾岩体蚀变以绢云母化为主, 其次有硅化、绿泥石化, 硅化强烈时形成绢英岩化, 伴生有黄铁矿化, 为全筒式蚀变。但蚀变程度不一, 靠近流纹岩体者蚀变程度强, 远离岩体者弱。矿化以黄铁矿为主, 较为普遍, 局部较强者形成硫铁矿, 铅锌矿多分布在流纹斑岩体的边部和构造破碎带中; 钼矿化多产于深部的流纹斑岩体内部或靠近流纹斑岩体的隐爆角砾岩中, 并富集成矿。中性岩脉在区内零星出露(图 1)。

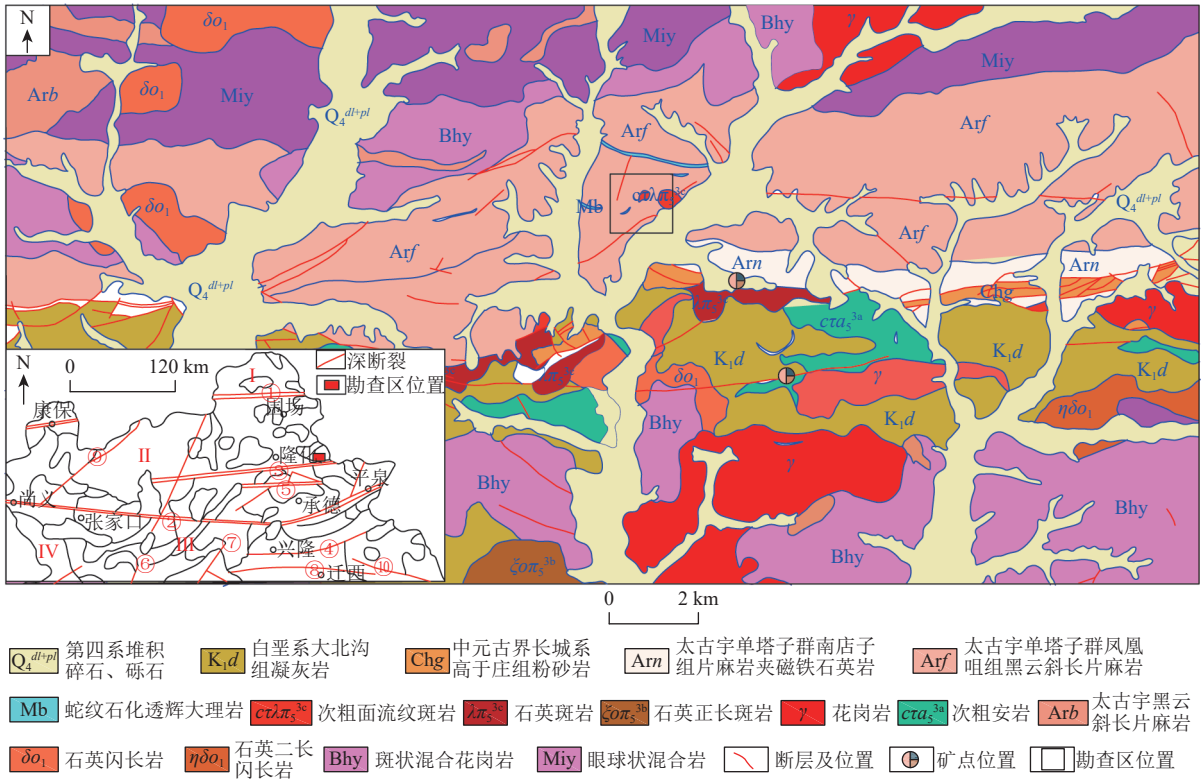


图 1　研究区区域地质

Fig. 1　Regional geological map of the study area

2　研究区地球物理特征

2.1　岩矿石电性特征

地表采集测量标本共计 105 块, 包括了研究区的主要岩性, 如黑云斜长片麻岩、大理岩、流纹岩、流纹斑岩、隐爆角砾岩及硫铁矿, 电性参数测定结果见表 1。研究区内含硫化物的隐爆角砾岩表现出中—低电阻率、高极化率特征, 电阻率常见值为 402 Ω·m, 极化率常见值为 3.5%; 硫铁矿在区内表现出低电阻率、高极化的特征, 电阻率常见值为 50 Ω·m。大理岩表现出高电阻率、中极化率的特征, 且电阻率为全区最高, 常见值为 5 416 Ω·m; 流纹岩表现出中—高阻、中—低极化特征, 电阻率常见值为 4 074 Ω·m; 研究区内广泛发育的黑云斜长片麻岩表现为中阻、低极化特征, 电阻率常见值为 1 509 Ω·m。钼矿体和铅锌矿体均表现出低阻的特征, 电阻率常见值分别为 177 Ω·m 和 138.9 Ω·m; 从测定的标本电性结果来

表 1　研究区物性标本电性测定结果统计

Table 1　Statistical of electrical measurement results of surface physical specimens in the study area

标本岩性名称	测量块数	ρ/(Ω·m)	ρ/(Ω·m)	η/%	η/%
		变化范围	常见值	变化范围	常见值
黑云斜长片麻岩	31	654~2 666	1 509	0.99~2.15	1.53
大理岩	6	3 399~9 276	5 416	0.75~1.3	1.06
流纹岩	30	1 501~9 525	4 074	0.19~0.88	0.55
爆破角砾岩	31	135~838	402	1.6~7.8	3.5
硫铁矿	7	23~106	50	3.8~12.11	6.58
钼矿体	35	73~988	177	0.9~11.6	3.95
铅锌矿体	14	49~935	138.9	2.3~6.6	3.9

看，岩矿石的电阻率高低取决于其硫化物多金属的含量，硫化物含量越高，岩矿石的电阻率越低；不含硫化物或含硫化物少的岩矿石，电阻率则表现为高值[6]。

2.2　AMT 工程布设及地球物理特征

2.2.1　研究区 AMT 工程布设及技术路线

在本矿区主要开展 AMT 勘探工作。主要目的是查明区内岩矿石电性分布特征，推断钼多金属矿体在深部的赋存范围，构建本区地球物理成矿模型，为地质工作布设探矿工程提供地球物理依据。在研究区共布设了 AMT 测线 8 条，线距 100 m，点距 80 m，共完成 AMT 测点 88 个（图 2）。

开始工作前，首先在研究区内开展极距实验，分别采用 20 m、25 m 和 30 m 共 3 种电极距进行野外实验，从极距实验结果可以看出，采用 30 m 电极距时，由于采集信号强度较大，高频段数据易受干扰，采用 20 m 和 25 m 电极距时均可以取得较好的结

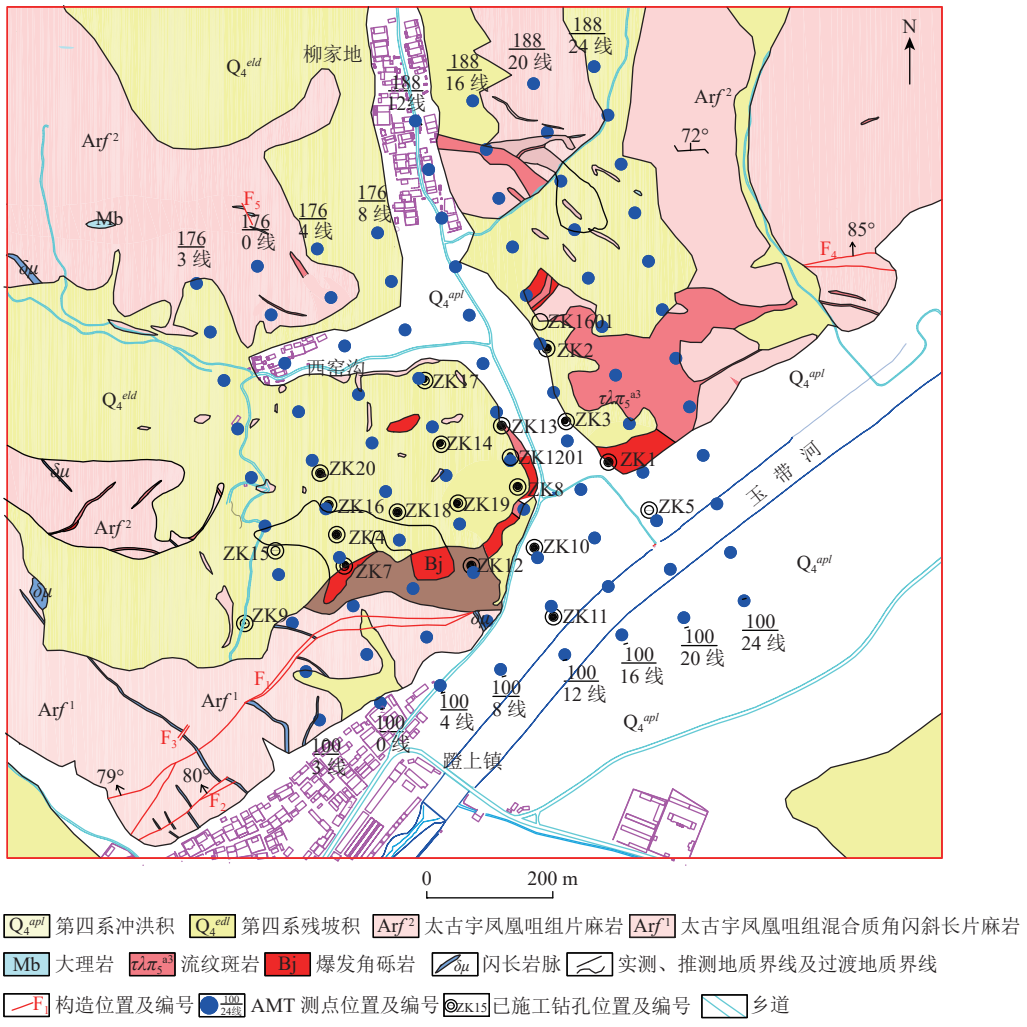


图 2　研究区 AMT 测点布设

Fig. 2　Layout of AMT measuring points in the study area

果, 故本次采用 25 m 电极距, 若干扰较强时, 电极距可减小至 20 m。根据采集时间试验结果, AMT 数据采集采取了 30~45 min 的观测记录, 干扰区及信号较弱时延长观测时间, 以增加有效迭加次数; 采用 AC 耦合方式提高/低频数据的采集质量。最大限度地设置子功率谱(xpr)数, 提高干扰信号时段的分辨率, 以便有效地剔除干扰严重的子功率谱。全区所有测点使用相同的频率范围, 观测记录频带为 10 400~0.35 Hz。

音频大地电磁测量的数据采集工作采用“十”字型装置的张量观测方式, 研究区各测点获得曲线中高频数据质量较好(图 3), 少量测点低频数据稳定性较差。测点中一级数据点有 72 个, 其曲线光滑, 视电阻率和相位曲线连续性良好, 没有突跳阻抗值。曲线整体形态符合视电阻率理论曲线形态。二级点有 16 个, 其低频数据质量较差, 分析低频部分误差较大的原因主要是靠近了居民区或大棚等低频干扰源, 造成低频信号干扰严重, 信号稳定性较差。本次完成的测点中一级率 81.8%, 二级率 18.2%, 不合格点 0 个, 符合测点质量要求。

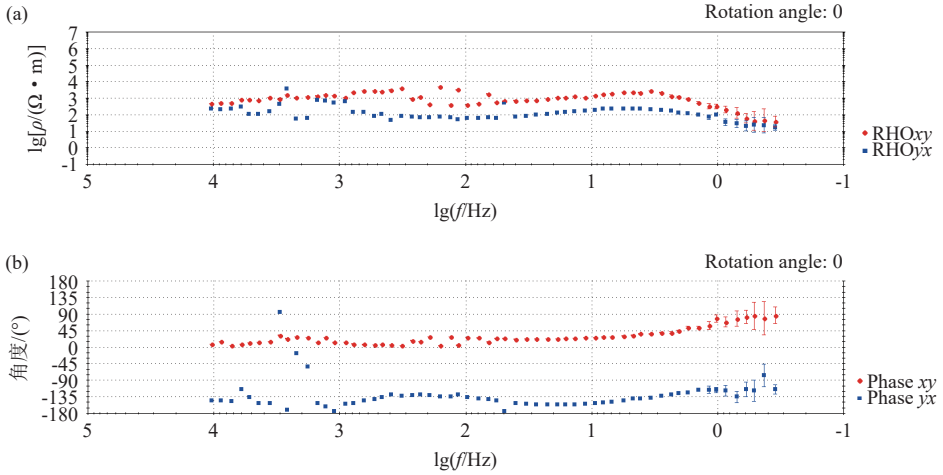


图 3　8 线 148 点视电阻率(a)和阻抗相位(b)观测曲线

Fig. 3　Observation curves of apparent resistivity (a) and impedance phase (b) for 148 points in line 8

2.2.2　研究区 AMT 地球物理特征

对在研究区内测量的 8 条 AMT 测深断面进行反演计算。反演是以原始观测数据为基础, 采用 TM 单一模式, 针对每条剖面分别开展了一维、二维反演, 其中二维反演是重点。结合本区地质特征, 采用一维 Bostick、二维快速松弛反演方法进行计算, 选择最优化结果进行解释分析, 反演拟合误差为 4.29%。对各线反演结果进行分析(图 4), 研究区电阻率整体上以中—高电阻率值为背景, 各断面浅部和中部均存在低阻区。

其中 3 线位于工区北侧, 地表的地形整体具有南部高、北部低的特征。从剖面反演获得的电性结构来看, 横向上呈现为电性的高阻—低阻—高阻分布特征, 揭示了沿剖面方向存在着显著的电性变化。断面中部电阻率整体呈现低阻特征, 电阻率变化范围为 500~1 000 Ω·m, 该低阻部分从地表向深部延伸范围较大, 从地表延伸到深部约 1 800 m, 横向上宽度约 400 m, 且规模相对稳定。0 线沿剖面从北到南表现为低阻—高阻的电性特征, 电阻率变化范围为 100~130 000 Ω·m, 断面上电阻率呈现出北部至中部为相对低阻、南部为高阻的特征, 北部至中部的低阻带沿地表向深部延伸约 1 700 m。4 线沿剖面从北到南表现为高阻—低阻—高阻的电性特征, 电阻率变化范围为 90~350 000 Ω·m, 断面上电阻率呈现出中部为相对低阻, 北部和南部为高阻的特征, 中部的低阻带沿地表向深部延伸约 2 000 m。8 线沿剖面从北到南表现为高阻—低阻—高阻的电性特征, 电阻率变化范围为 120~570 000 Ω·m, 断面上电阻率呈现出中部为相对低阻, 北部和南部为高阻的特征; 中部的低阻带沿地表向深部延伸约 2 200 m, 宽约 400 m, 沿垂向在断面反演深度范围内未封闭。12 线沿剖面从北到南表现为高阻—低阻—高阻的电性特征, 电阻率变化范围为 50~450 000 Ω·m, 断面上电阻率呈现出中部为相对低阻、北部和南部为高阻的特征, 中部的低阻带沿地表向深部延伸约 1 800 m, 宽约 240 m。16 线沿剖面从北到南表现为高阻—低阻的电性特征, 电阻率变化范围为 130~380 000 Ω·m, 断面上电阻率呈现出中南部相对低阻、北部为高阻的特征, 中南部的低阻带沿地表向深部延伸约 1 300 m, 低阻带从地表向下宽度逐渐变窄。20 线浅

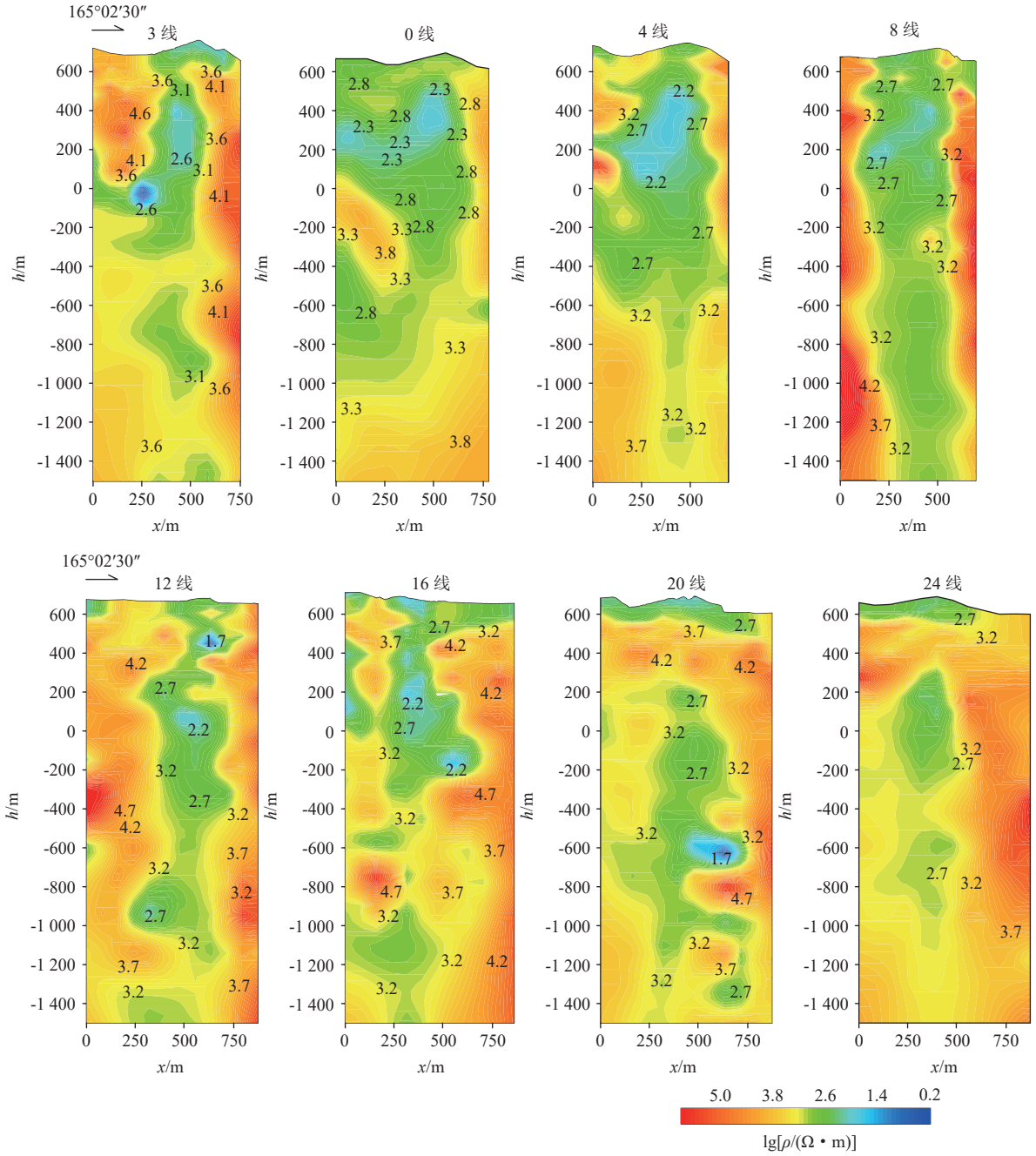


图 4　研究区 8 条线的 AMT 反演断面

Fig. 4　AMT inversion profile of 8 lines in the study area

部为低阻的电性特征，电阻率变化范围为 140~220 000 Ω·m，断面 200~600 m 高程范围内存在 1 个高阻层，高阻层下部表现出南北两侧为高阻、中间低阻的电性分布特征，低阻带从 200 m 深度延伸到−1 000 m，垂向延伸约 1 200 m，宽约 250 m。24 线位于研究区东部，断面浅部表现为低阻的电性特征，电阻率变化范围为 260~210 000 Ω·m，在断面 200~600 m 高程范围内存在 1 个高阻层，高阻层下部表现出南北两侧为高阻、中间低阻的电性分布特征，低阻带从 200 m 深度延伸到−900 m，垂向延伸约 1 100 m，宽约 160 m[7-8]。

根据低阻异常的分布范围，笔者由 3 线~24 线圈定了 1 条长 700 m、宽 160~400 m 的低阻异常带，东西两侧异常未封闭。该异常带在 8 线向深部延伸最大，向两侧异常规模逐渐变小。

2.2.3　AMT 电阻率异常圈定及验证

研究区以往钻孔等地质资料成果表明，圈定深部含矿的隐爆角砾岩和流纹斑岩是本次勘探的最主要目的，钼多金属矿体主要赋存在上述两种岩石中。根据由已知到未知的推断原则，结合地表岩矿石电性测量成果，区内岩矿石硫化物的含量决定了其电阻率异常的特征，硫化物含量越高，引起的电阻

率值越低, 硫化物含量越低, 引起的电阻率值越高, 根据上述特征结合钻孔控制矿体的情况, 强硫化物发育区岩石(黄铁矿、钼矿和铅锌矿)引起的电阻率异常一般小于 1 000 Ω·m, 与隐爆角砾岩和流纹斑岩有关的钼多金属矿多赋存在小于 1 000 Ω·m 的低阻异常带内。因此, 在各剖面以 1 000 Ω·m 为异常上限圈定低阻异常, 并对 AMT 电性断面结果进行了推断解释。各线低阻异常区推断为强硫化物发育区, 结合以往地质资料, 圈定了重点剖面 12 线和 16 线钼多金属在深部的优势成矿区(图 5), 并提出了两个验证钻孔编号 01 和 02。

经布设完成的 01 孔验证可以看出, 在钻孔 50~670 m 深度见到了强黄铁矿化岩石, 在钻孔 627~1 210 m 深度见到了厚层的流纹斑岩型钼矿体(图 6), 验证了该异常是由硫化物钼多金属矿床引起的低阻异常(图 7)[9]。

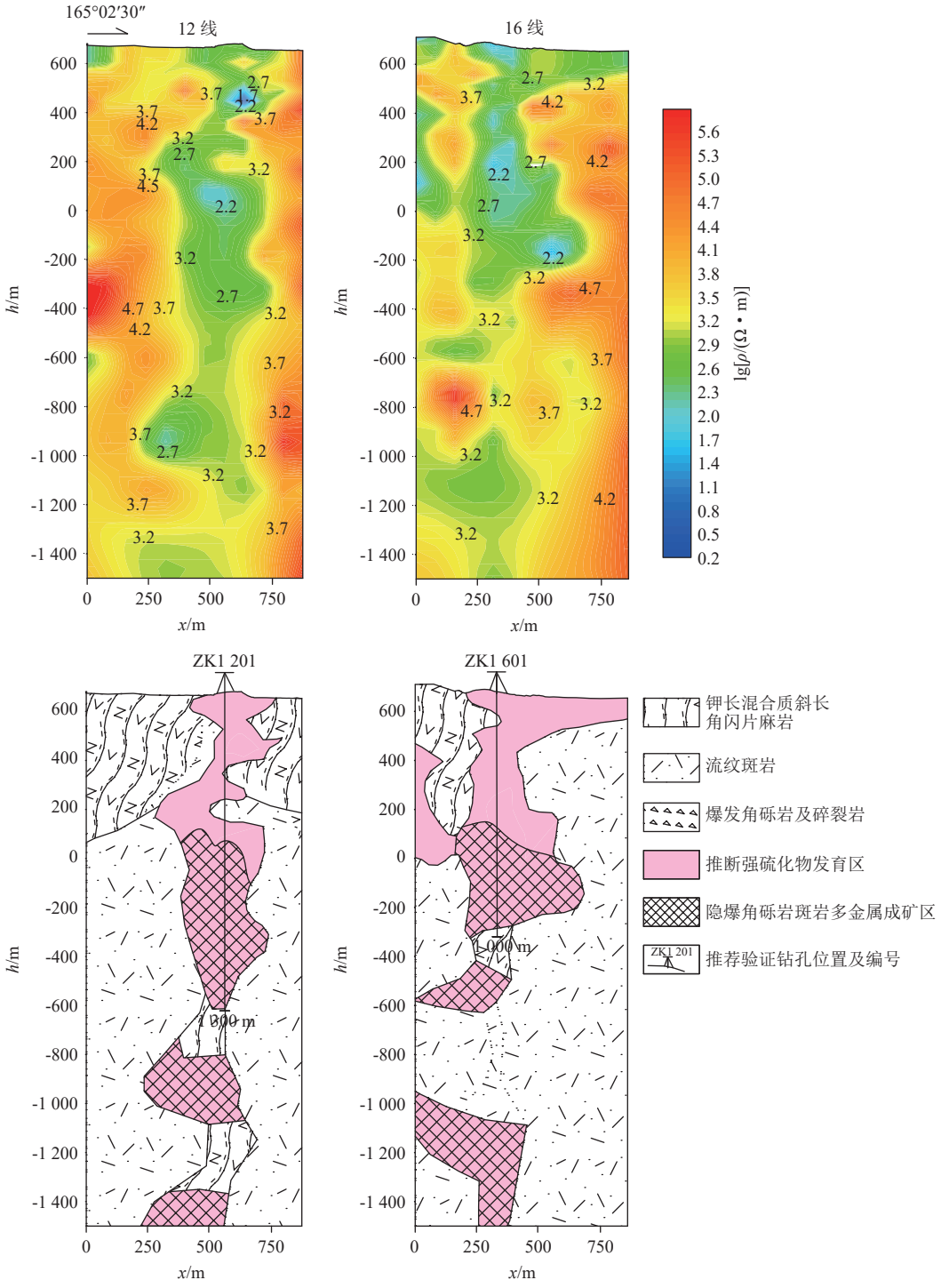


图 5　研究区 12 线、16 线 AMT 电阻率推断解释断面及建议钻孔布设

Fig. 5　Inferred section of AMT resistivity of line 12 and line 16 in the study area and proposed borehole layout



(a) 01 孔钼矿体岩心　　(b) 01 孔强硫化物岩石岩心

图 6　流纹斑岩型钼矿体

Fig. 6　Flow patterned porphyry molybdenum ore body

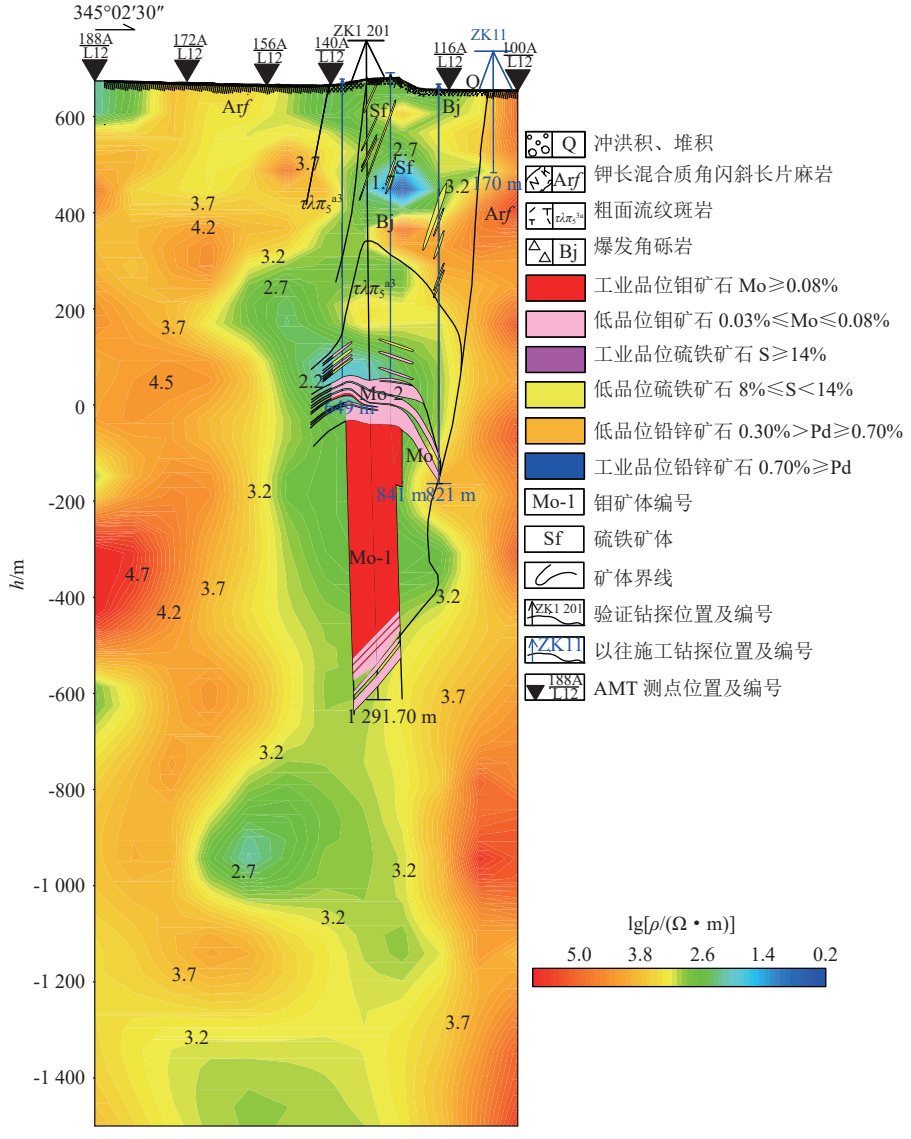


图 7　12 线钻孔验证综合断面

Fig. 7　The 12-line borehole verifies the integrated profile

经 02 孔验证，在钻孔上部见到了强黄铁矿化岩石，在 523~708 m 深度见到了厚度较大的钼矿体，在 708~961 m 深度见到了多层厚度较大的铅锌矿体（图 8），验证了 16 线低阻异常是由硫化物钼多金属矿床引起的低阻异常（图 9）。

3　地球物理三维找矿模型的建立

利用 AMT 测量推断成果以及钻孔验证成果可以得到，钼多金属矿体电阻率一般分布在 10~1 000



(a) 02 孔钼矿体岩心　　(b) 02 孔铅锌矿体岩心

图 8　硫化物钼多金属矿

Fig. 8　Sulfide molybdenum polymetallic ore

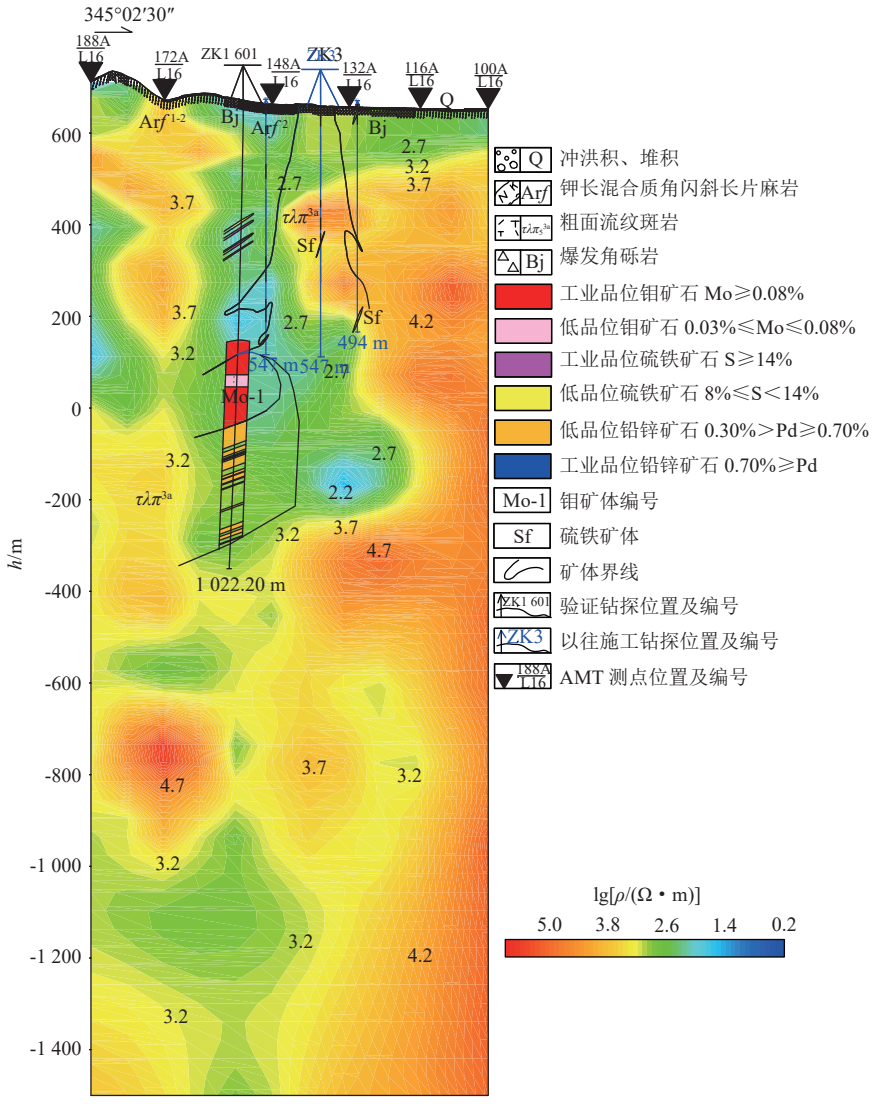


图 9　16 线钻孔验证综合断面

Fig. 9　The line 16 borehole verifies the integrated profile

Ω·m, 电阻率的高低与硫化物金属矿的含量相关, 硫化物含量越高, 电阻率越低。根据这一特征, 尝试利用 AMT 测量反演数据在研究区三维空间圈定钼多金属矿的有利成矿空间(图 10)。在电阻率三维结果中, 以 1 000 Ω·m 电阻率为异常上限圈定的低阻异常区域(图 10 中的紫色曲面)在三维空间上呈现为一不规则筒状体, 该筒状体是以 8 线为中心, 从−1 400 m 深度向上, 随着深度的上升, 异常范围逐渐向四周扩大, 此异常区在 3 线向西部未封闭。与硫化物有关的钼多金属矿体即赋存在此异常范围内[10]。

研究表明, 冀北斑岩型钼矿床成矿物质多来源于壳幔部分熔融混合源。该区流纹斑岩侵入岩体提

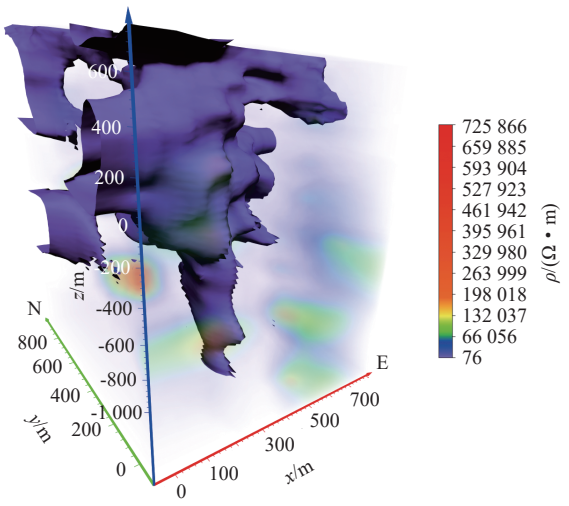


图 10　AMT 电阻率三维模型南西视图

Fig. 10　South-west view of a 3D model of AMT resistivity

供了成矿的物质、流体和动力，岩浆作用后期，从流纹斑岩岩体分异出来的含矿流体在岩体热动力和流体的内压力作用下沿着构造裂隙向外运移，在流体向外运移的路径上，由于物理化学条件的改变，发生不同性质的成矿作用，并在不同部位堆积了不同种类的金属元素，形成一系列不同的矿床类型、矿化类型、围岩蚀变和元素组合[11]。已控制的钼多集中在靠近 8 线中心通道附近，铅锌矿多分布在离中心通道较远的岩体边部和岩体周边的构造破碎带中，该区多金属空间分带清晰地展现了含矿流体从岩浆体逸出后并在有利条件下堆积相应金属元素的图景。表明高温元素钼主要成矿地段是在靠近斑岩体或斑岩体中上部，中低温元素铅锌主要赋存在离斑岩体较远的断层裂隙或斑岩体边部，表明它们是同一个构造—岩浆—成矿作用在时空演化过程中流体化学动力学状态和成矿元素迁移性状综合演变的产物，共同构成了一套完整的从高温高压→低温低压演化的系列[12-14]。

结合本区电阻率三维模型和地质成矿规律，推测流纹斑岩体沿深断裂从深部沿丰宁—隆化深断裂东段温家沟—东山断裂带上升侵入太古代片麻岩地层中，由于被太古代片麻岩地层阻挡，流纹斑岩体前端高温高压流体在深部爆裂，形成了隐爆角砾岩。后期流纹斑岩在冷却的过程中，岩浆房内钼铅锌元素随斑岩岩浆就位后，随着岩体冷却析出的富含硫化物的含矿流体沿着以 8 线中部的低阻异常为中心的构造裂隙向上运移，在流体向外运移的路径上由于物理化学条件的改变，发生不同性质的成矿作用，在压力减小的环境影响下，辉钼矿开始沉淀富集，在斑岩体内部和靠近斑岩体的隐爆角砾岩中富集成矿。在温度下降的环境影响下，铅锌元素开始在岩体远端边部和断裂带内沉淀富集成矿，形成了以 8 线为中心，向东西两侧延伸的不规则漏斗状硫化物发育区，钼、铅锌多金属矿位于该低阻区内。

根据已有地质资料和低阻异常分布特征，认为位于 8 线主通道附近（0 线~16 线）的低阻区，含矿流体形成时温度较高，有利于钼元素的富集，是寻找钼矿的有利位置。远离主通道（3 线、20 线和 24 线）的低阻区，含矿流体温度逐渐降低，有利于中—低温铅锌元素的析出富集，是寻找铅锌矿的有利位置[15]。

4　结论及讨论

1）通过 AMT 法在研究区钼多金属矿区的试验工作，基本了解了研究区的电阻率分布特征，并在各勘查线断面中圈定了低阻异常范围，依据物性参数及以往地质成果，根据电阻率低阻异常带特征，推断了含矿蚀变带空间赋存位置。对重点勘查线 12 线和 16 线的电阻率异常进行了推断解释并进行了钻探工程验证，在推断矿体位置处见到了厚大的钼、铅锌矿体，取得了可喜的找矿成果，验证了低阻异常是由强硫化物（黄铁矿、钼和铅锌多金属矿）所引起，证明 AMT 对隐伏的隐爆角砾岩、斑岩型钼多金属矿具有很好的指示作用。

2）利用 AMT 电阻率建立三维模型，可以对成矿期富含硫化物的含矿流体的分布范围进行合理圈定，预测与斑岩成矿相关的多金属有利成矿区，从而达到寻找钼、铅锌多金属矿的目的。这为研究区斑岩型多金属矿的成矿模式的建立提供了地球物理依据，成功的找矿经验可以为其他此类型的矿床找矿提供借鉴。

3）受工作区施工因素的限制，研究区 3~8 线剖面长度为 560 m，12~24 线剖面长度为 720 m，为了能达到地质成矿模型的解释目的，各线反演深度设为 2 km，这可能会导致深部的反演结果受到旁侧不均匀地质体的影响，从而导致剖面间反演结果的可比对性差以及对深部地质认识出现偏差等问题。根据在 12 线和 16 线对已施工钻孔的验证地质成果与反演结果的对比，证明各线 1 200 m 以浅的反演结果较为可靠，能够较好地指示钼多金属矿的赋存位置，对于深部的反演信息有待进一步通过其他地球物理方法或钻探工程验证。

参考文献（References）：

[1]　侯增谦，杨志明. 中国大陆环境斑岩型矿床：基本地质特征、岩浆

热液系统和成矿概念模型 [J]. 地质学报, 2009, 83(12): 1779−1817.
Hou Z Q, Yang Z M. Porphyry deposits in continental settings of China: Geological characteristics, magmatic-Hydrothermal system, and metallogenic model[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(12): 1779−1817.

[2] 薛燕萍, 袁小平, 梁景利, 等. 河北平泉市柴家沟钼矿床地质特征、找矿标志及成因探讨 [J]. 矿产与地质, 2023, 37(1): 39-48.
Xue Y P, Yuan X P, Liang J L , et al. Geological characteristics, prospecting marker and genesis discussion of Chaijiagou molybdenum deposit in Pingquan City of Hebei[J]. Mineral Resources and Geology , 2023, 37(1): 39-48.

[3] 何继善. 可控源音频大地电磁法 [M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1990.
He J S. Controlled source audio magnetotelluric method[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1990.

[4] 何帅, 杨炳南, 阮帅, 等. 三维 AMT 正反演技术对贵州马坪含金刚石岩体探测的精细解释 [J]. 物探与化探, 2022, 46(3): 618−627.
He S, Yang B N, Ruan S, et al. Fine interpretation of the exploration results of diamond-bearing rock masses in maping area, Guizhou using the 3D AMT forward modeling and inversion technologies[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(3): 618−627.

[5] 张莉莉, 江思宏, 李红梅, 等. 河北丰宁撒岱沟门钼矿床成岩成矿年代学及成矿岩体地球化学特征 [J]. 地球学报, 2019, 40(5): 708−724.
Zhang L L, Jiang S H, Li H M, et al. Metallogenic and petrogenic geochronology and geochemical features of the ore-related granite in the Sadaigoumen Mo Deposit, Fengning, Hebei Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2019, 40(5): 708−724.

[6] 杨明远, 张汉雄, 马超, 等. AMT 在新疆三屯河地区地下赋水性研究中的应用 [J]. 物探与化探, 2023, 47(6): 1441−1449.
Yang M Y, Zhang H X, Ma C, et al. Application of audio magnetotellurics in the study of the subsurface water-bearing properties of the Santunhe area, Xinjiang[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(6): 1441−1449.

[7] 喻翔, 汪硕, 胡英才, 等. 二连盆地北部玄武岩覆盖区电性结构与铀成矿环境研究 [J]. 物探与化探, 2022, 46(5): 1157−1166.
Yu X, Wang S, Hu Y C, et al. Study on electrical structure and uranium metallogenic environment of basalt-covered area in the northern Erlian Basin[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(5): 1157−1166.

[8] 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 Geochemi cal Exploration, 2024, 48(2): 375−381.

[9] 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.

[10] 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 ore prospecting of Laochang polymetallic mining area in Lancang, Yunnan[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(3): 638−647.

[11] 梁磊. 海南省千家地区钼铅锌矿成矿规律探讨 [D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
Liang L. Metallogenetic characteristics research of molybdenum and lead-zincin in Qianjia, Hainan Province[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.

[12] 陈大磊, 王润生, 贺春艳, 等. 综合地球物理探测在深部空间结构中的应用——以胶东金矿集区为例 [J]. 物探与化探, 2022, 46(1): 70−77.
Chen D L, Wang R S, He C Y, et al. Application of integrated geophysical exploration in deep spatial structures: A case study of Jiaodong gold ore concen-tration area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(1): 70−77.

[13] 陆桂福, 米宏泽, 刘瑞德, 等. 综合物探在斑岩型银钼多金属矿勘查中的应用 [J]. 物探与化探, 2014, 38(4): 835−839.
Lu G F, Mi H Z, Liu R D, et al. The application of integrated geo physical exploration technology to the prospecting for porphyry sil ver-molybdenum polymetallic deposits[J]. Geophysical and Geo chemical Exploration, 2014, 38(4): 835−839.

[14] 杨宗耀, 唐菊兴, 任东兴, 等. 西藏斯弄多银多金属矿床地球物理和地球化学勘查进展 [J]. 地球科学, 2024, 49(3): 1081−1103.
Yang Z Y, Tang J X, Ren D X, et al. Geochemical and geophysical exploration in Sinongduo Ag polymetallic deposit, Tibet[J]. Earth Science, 2024, 49(3): 1081−1103.

[15] 张前进, 杨进. 综合电法在深部隐伏矿体勘查中的应用实例 [J]. 物探与化探, 2010, 34(1): 40−43.
Zhang Q J, Yang J. The application of integrated electric methods to the exploration of deep concealed ore bodies[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 34(1): 40−43.

Audio magnetotelluric method: Implications for a concealed porphyry-hosted molybdenum-polymetallic deposit in eastern Hebei province

YANG Lei, ZHAO Xiang-Kui, WANG Xiao-Dong, ZHANG Li-Jian,
MIAO Qun-Feng, YU Hao, FU Rong-Qin

(*The 4th Geological Brigade of Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration Strategic Mineral Prospecting Innocation and Cooperation Platform*, *Chengde* 067000, *China*)

Abstract: Polymetallic deposits, primarily porphyry-related polymetallic deposits, are hosted in eastern Hebei province in the northern margin of the North China Block. The study area, located in northeastern Chengde, is a typical rhyolite porphyry-hosted molybdenum-polymetallic deposit. Within this area, cryptoexplosive breccias, rhyolites, and the Archean biotite amphibole plagiogneisses are exposed on the surface. Based on previous data, it is speculated that the ore-bearing rhyolite porphyries occur beneath the cryptoexplosive breccias, with a burial depth generally exceeding 500 m. However, the deep-seated molybdenum-polymetallic deposits can barely be accurately located with traditional geophysical methods. Therefore, this paper used the audio magnetotelluric (AMT) method for the first time to locate the concealed porphyry-hosted molybdenum-polymetallic deposits in this area. Based on the low-resistivity characteristic of the molybdenum-polymetallic ores, and with 1 000 Ω·m as the upper limit, the range of low-resistivity anomalies was delineated in the deep strata of the study area. Then, combining the geological metallogenic patterns in the study area, this study tried to locate the deep-seated concealed molybdenum-polymetallic deposits based on low-resistivity anomalies. According to the speculated favorable metallogenic positions of molybdenum polymetallic ore bodies, two boreholes were drilled for verification. An industrial-grade molybdenum ore body with a thickness of 504 m was discovered deep in No. 1 borehole, while a molybdenum ore body with a thickness of 185 m and a lead-zinc ore body with a thickness of 200 m were discovered at depth in No. 2 borehole, successfully predicting the positions. Moreover, based on the resistivity distribution revealed by AMT, a three-dimensional geophysical model was established for the exploration of porphyry-hosted molybdenum-polymetallic deposits in this area. This model provides a new geophysical approach for locating deep-seated concealed porphyry-hosted molybdenum-polymetallic deposits.

Key words: concealed porphyry-hosted molybdenum-polymetallic deposit; audio magnetotelluric (AMT) method; low-resistivity anomaly; three-dimensional model for mineral exploration

（本文编辑：王萌）