引用格式：李忠，张小兵，汪金明，等，2023. 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，29（1）：48−59. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2022037

Citation: LI Z，ZHANG X B，WANG J M，et al.，2023. Application of EH4 in deep concealed rock (ore) body detection: A case study of the Donglufang copper-molybdenum polymetallic deposit, Shangri-la, China[J]. Journal of Geomechanics，29（1）：48−59. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2022037

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

李　忠[1,2]，张小兵[1,2]，汪金明[1,2]，肖高强[3]，张有荣[1,2]，段召艳[1,2]

LI Zhong[1,2]，ZHANG Xiaobing[1,2]，WANG Jinming[1,2]，XIAO Gaoqiang[3]，ZHANG Yourong[1,2]，DUAN Zhaoyan[1,2]

1. 云南省地质调查院（云南省地质科学研究院），云南 昆明 650216；
2. 自然资源部三江成矿作用及资源勘查利用重点实验室，云南 昆明 650051；
3. 云南省地质调查局，云南 昆明 650216

1. *Yunnan Institute of Geological Survey (Yunnan Academy of Geological Sciences)*, *Kunming* 650216, *Yunnan*, *China*;
2. *Key Laboratory of Sanjiang Metallogeny and Resources Exploration and Utilization*, *MNR*, *Kunming* 650051, *Yunnan*, *China*;
3. *Yunnan Geological Survey*, *Kunming* 650216, *Yunnan*, *China*

Application of EH4 in deep concealed rock (ore) body detection: A case study of the Donglufang copper-molybdenum polymetallic deposit, Shangri-la, China

Abstract: This study uses the method of Audio-frequency magnetotelluric sounding (EH4) to detect and analyze the deep geological structure in the Donglifang mining area. The underground spatial electricity and structural characteristics were effectively determined. We built an EH4-based indicator system for localizing ore bodies and summarized the relationship between the apparent resistivity anomalies and the ore bodies in the EH4 profile. The shallow veined or columnar low-resistance bodies may correspond to the low–medium temperature hydrothermal gold, lead, and zinc polymetallic ore bodies; the columnar medium-resistance or medium –low resistance bodies correspond to the silica or porphyry copper–molybdenum polymetallic ore bodies; the medium-resistance bodies correspond to the medium acidic magmatic rocks (porphyrites and porphyries). We identified eleven concealed ore bodies in the deep of the mine area, five of which are consistent with the drill holes, and the remaining six have an excellent prospect of finding ore bodies. It is further inferred that larger-scale porphyry copper–molybdenum ore bodies are formed in the deep rock body. This study proves that the EH4 is an effective geophysical method for finding concealed rock (ore) bodies in the Dongxuofang copper-molybdenum polymetallic mine or this type of deposit.

Keywords: EH4; Donglufang deposit of Yunnan province; copper–molybdenum polymetallic deposit; electrical property; concealed rock (ore) body; prospecting signs

摘　要：采用音频大地电磁测深（EH4）对东炉房铜钼多金属矿区深部地质构造进行探测分析，有效确定了矿区地下的空间电性和结构特征。通过构建音频大地电磁法（EH4）找矿标志，总结了 EH4 剖面视电阻率异常特征与矿体关系：浅部呈脉状或柱状低阻体对应中低温热液型金、铅、锌多金属矿体，呈柱状中阻体或中低阻体对应矽卡岩型或斑岩型铜钼多金属矿体，中阻体对应中酸性岩浆岩（玢岩、斑岩）。圈定了矿区深部隐伏矿体 11 处，其中 5 处与钻孔吻合，其余 6 处找矿前景良好；进一步推断在深部岩体

基金项目：中国地质调查局地调项目（DD20160016-14）

This research is financially supported by the Geological Survey Program of the China Geological Survey (Grant DD20160016-14).

第一作者：李忠（1982—），男，硕士，高级工程师，从事地球物理与地球化学研究工作。E-mail: 278618901@qq.com

通讯作者：肖高强（1983—），男，硕士，高级工程师，从事地球物理与地球化学研究工作。E-mail: 13057980@qq.com

收稿日期：2022−03−30；**修回日期：**2022−07−18；**责任编辑：**王婧

中形成规模较大的斑岩型铜钼矿。研究表明音频大地电磁测深法针对东炉房铜钼多金属矿或者该类型矿床寻找隐伏岩（矿）体是有效的地球物理方法。

关键词：EH4；云南东炉房；铜钼多金属矿；电性；隐伏岩(矿)体；找矿标志
中图分类号：P319.3+2　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1006−6616（2023）01−0048−12
DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2022037

0　引言

目前国内大部分地区的地表露头矿和浅表矿已基本查明，地质找矿主体已向中深部、深部隐伏矿体转变(薛建玲等，2020；贾然等，2021)，因此隐伏矿床找矿方法的突破显得更加迫切。近年来，音频大地电磁测深(EH4)以探测精度高、分辨率好、快速、轻便等优点不仅在矿产勘查(杜荣光和胡斌，2006；欧阳南，2009；肖朝阳等，2011；蒋鑫和黄小喜，2011；王斌等，2014；姚大为等，2015；李忠等，2017；李玉录等，2018；沈小庆等，2021；李天成等，2022)、地质工程勘查(柳建新等，2008，张建成和王通，2015；李英宾等，2019；李忠等，2021)和水文调查(赵俊等，2017)等领域广泛使用，同时在隐伏矿床预测中也得到了广泛且成功的应用。申萍等(2007)针对国内 25 个不同类型的金属矿床采用 EH4 进行了隐伏矿定位预测，钻孔验证后效果显著；谭红艳等(2011)在鄂东南丰南山找矿靶区应用 EH4 进行定位预测，确定找矿靶位，后期得到钻孔验证，并发现工业隐伏铜金富矿体。

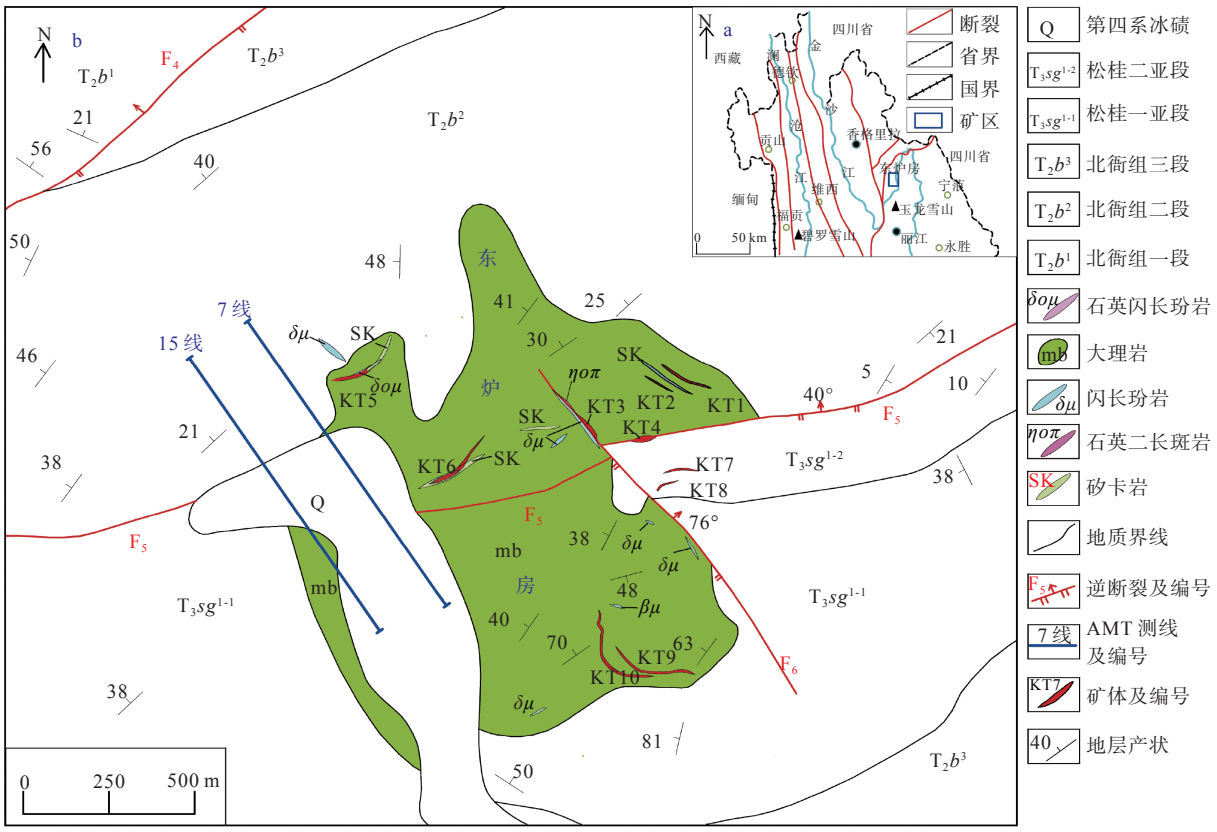
西南三江香格里拉地区广泛发育与印支−燕山期近南北向展布酸性岩浆岩有关的斑岩型−矽卡岩型−热液脉型铜钼多金属矿床或矿(化)点三十余处，中型及以上规模矿床有普朗、红山、红牛、铜厂沟、雪鸡坪、羊拉等。该地区目前已成为中国重要的斑岩型铜矿床勘查开发基地之一，引起了国内外地质工作者的广泛关注(曾普胜等，2004；徐兴旺等，2006；冷成彪等，2007；李文昌和曾普胜，2007；王守旭等，2008；曹殿华等，2009；Li et al.，2011；Yu et al.，2014；Yang et al.，2017)。香格里拉市东炉房铜钼多金属矿床已被评价为中型矿床，矿床类型为斑岩型−矽卡岩型−热液脉型复合型矿床(段召艳等，2021)，已有研究在其成矿地质条件(伍建兢等，2015；段召艳等，2021)、成矿规律(余海军，2018)、地球物理(张小兵等，2017)、土壤地球化学(王紫，2013；张小兵等，2017)等方面做了大量调查研究工作，指出矿区深部和外围具有较大找矿前景，有望达到大型矿床规模，但均不能准确查清深部矿(岩)体构造。文章利用音频大地电磁测深(EH4)对矿区深部地质构造进行探测和解析，对矿化异常体开展定位预测，成功解决了制约该矿区深部找矿的地质问题；同时，通过钻探验证物探异常，发现隐伏铜钼多金属矿化体，实现了深部找矿突破，证明了方法的有效性。

1　矿区地质特征

东炉房铜钼多金属矿区主要出露地层为三叠系的北衙组(T_2b)和松桂组(T_3sg^1)以及第四系(Q)(图 1)。北衙组(T_2b)按岩性可分为三段：一段(T_2b^1)为灰岩、灰岩夹泥灰岩及粉砂岩；二段(T_2b^2)为白云质灰岩夹灰岩、泥灰岩，其中有岩体(脉)侵入，形成大理岩、矽卡岩化带，为铜钼矿主要赋矿部位；三段(T_2b^3)为灰岩夹白云质灰岩。松桂组(T_3sg^1)按岩性可分为两个亚段：一亚段是灰岩，见闪长玢岩脉侵入，局部形成大理岩，节理、裂隙发育，具赤铁矿化、褐铁矿化，为金、铅锌矿体的主要富集部位；二亚段是泥岩和石英砂岩。矿区构造相对复杂，整体位于白花山−白莲果北东向复式向斜南东翼，断裂构造以北东向(F_4、F_5)为主，次为北西向(F_6)，岩体内部次级节理、裂隙和断裂极为发育(余海军，2018；段召艳等，2021)。

2　岩矿石物性特征

对矿区矿石标本(岩心)采用 SCIP 测试仪进行电阻率测定，对露头岩石采用小四极装置测定，共测定 240 组，其结果见图 2。由图可知：①矿区围岩与矿石、矿化岩石的电阻率存在明显差异，灰岩>大理岩>石英闪长玢岩/石英二长斑岩>冰碛砂砾>含金褐铁矿、赤铁矿>铅锌矿>黄铜矿化矽卡岩；②赋矿围岩主要为大理岩、灰岩和石英闪长玢岩/石英二长斑岩，相对呈中高阻特征，其中大理岩电阻率在 981～3686 Ω·m 之间，几何平均值为 2170 Ω·m；灰

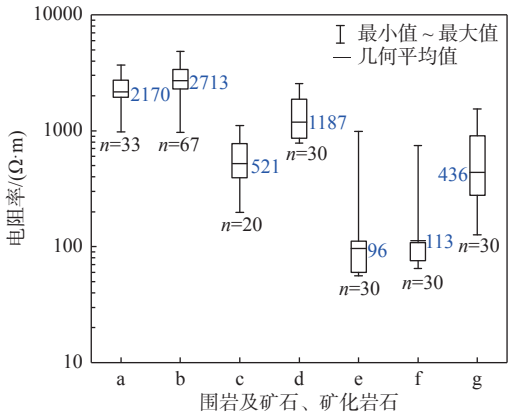


a—矿区位置图；b—矿区地质图

图 1 东炉房铜钼多金属矿区地质图

Fig. 1 Geological map of the Donglufang copper–molybdenum polymetallic mining area

(a) Location sketch map of the mining area; (b) Geological map of the mining area



a—大理岩；b—灰岩；c—冰碛砂砾；d—石英闪长玢岩/石英二长斑岩；e—黄铜矿化矽卡岩；f—铅锌矿；g—含金褐铁矿、赤铁矿；*n*—样品数

图 2 围岩与矿石、矿化岩石电阻率箱线图

Fig. 2 Boxplot of resistivity of surrounding rock, ore, and mineralized rock

a–marble; b–limestone; c–moraine grit; d–quartz diorite porphyrite/beschtauite; e–chalcopyrite skarn; f–lead–zinc ore; g–gold-bearing limonite and hematite; *n*–number of samples

岩电阻率在 969～4822 Ω·m 之间，几何平均值为 2713 Ω·m；石英闪长玢岩/石英二长斑岩电阻率在 785～2586 Ω·m 之间，几何平均值为 1187 Ω·m；③接触带矿化石黄铜矿化矽卡岩电阻率在 56～985 Ω·m 之间，几何平均值为 96 Ω·m；热液脉型矿石铅锌矿电阻率在 65～748 Ω·m 之间，几何平均值为 113 Ω·m；含金褐铁矿、赤铁矿电阻率在 127～1543 Ω·m 之间，几何平均值为 436 Ω·m；与围岩相比，矿石、矿化岩石相对呈低阻特征。可见，矿区具备采用音频大地电磁测深（EH4）探测矿区地下隐伏岩（矿）体的物性条件。

3 EH4 音频大地电磁测深野外工作方法、数据处理及定性分析

3.1 EH4 音频大地电磁测深野外工作方法

音频大地电磁法是利用天然音频电磁场作为场源，研究地下电阻率结构的测深方法（刘国栋，

2007）。研究采用由美国两家公司（EMI、Geometrics）生产的音频大地电磁测深仪（EH4），工作频率采用 10 Hz～100 kHz 的高频模式，布极主要采用“十”字型装置，观测数据采用全频域及张量模式。两条 EH4 剖面（7 线、15 线）布设于矿区西部（图 1），7 线剖面长 1 km，15 线剖面长 950 m，两条剖面相距 200 m，剖面布设方位 145°。测深点点距为 50 m，在断裂和矿体地段点距为 25 m，个别点位中误差约 22 m（陡坎），其余点位点位中误差均小于 3 m。离测线约 200 m 处有 2 台钻机，在采集数据时，钻机没有施工。

3.2　数据处理

测深点总体数据质量优良级占比超过 80%，单个测点数据质量最低为合格级。总体数据处理过程：①利用 IMAGEM 软件对原始数据进行时间序列处理，剔除明显存在干扰的时间序列；②重新计算张量阻抗；③利用 AMT 处理软件进行处理（曲线编辑、静校正等）；④运用 SCS-2D 软件进行二维反演；⑤构建电性断面图和地质解释推断图（图 3；李忠等，2021）。

3.3　定性分析

依据单测深点的视电阻率曲线特征和剖面电阻率及相位–频率拟断面图形态特征，定性分析研究区地下电性的分布特征，并初步建立地下介质模型，为二维反演（SCS-2D）的初始地电模型建立提供依据（李忠等，2021）。如图 4 所示，34/7 号测深点两个模式（TM、TE）曲线形态都为 HH 型，首支对应深部的大理岩或大理岩和斑岩/玢岩岩体的接触带，中深部高阻为大理岩，中间对应中部的矿体和斑岩/玢岩岩体，尾支对应浅部的大理岩（已知钻孔 ZK0708、ZK0704 证实加推断）；32/15 号测点两个模式（TM、TE）曲线形态都为 HH 型，深部（低频）为大理岩，中深部（中低频）为矿体和斑岩/玢岩岩体，中部（中频）为大理岩或大理岩与斑岩/玢岩岩体的接触带，浅部（高频）为玢岩岩体（后期钻孔 ZK1508 验证加推断）。从视电阻率和相位断面图（图 5，图 6）可以看出，整体断面图具有很明显的分段（层）特征，视电阻率断面图与相位断面对应关系正好相反；中段视电阻率相对较低，就是矿体和岩体；中深部视电阻率相对较高，对应岩性为大理岩。特别是在视电阻率突变处，相位上的突变也对应地很好，说明数据可靠，真实反映了剖面电性构造的特点。

4　结果

4.1　构建音频大地电磁法（EH4）找矿标志

根据已有研究成果（余海军，2018；段召艳等，2021），矿区内碳酸盐岩被中酸性岩浆岩侵入，在深部岩体内形成斑岩型钼（铜）矿体，在围岩（碳酸盐岩）接触带、层间滑动带和构造破碎带形成矽卡岩铜钼多金属矿体，在构造虚脱空间由含矿热液沉淀富集形成地温热液型金、铅、锌多金属矿体，在空间上由岩体到围岩构成钼（铜）→铜（钼）、铁→铅、锌、金的复合成矿系统和成矿元素分带（图 7）。结合电性特征，灰岩和大理岩呈高阻电性特征，中酸性岩浆岩（玢岩、斑岩）呈中阻电性特征，矿石和矿化岩石如黄铜矿化矽卡岩、铅锌矿、含金褐铁

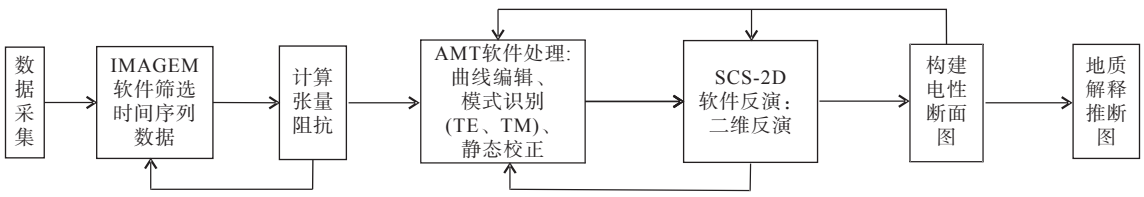


图 3　EH4 资料处理流程图（Li et al., 2021）

Fig. 3　Flow chart of the EH4 data processing (Li et al., 2021)

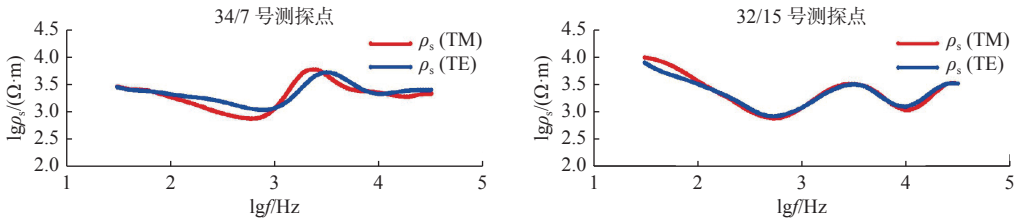
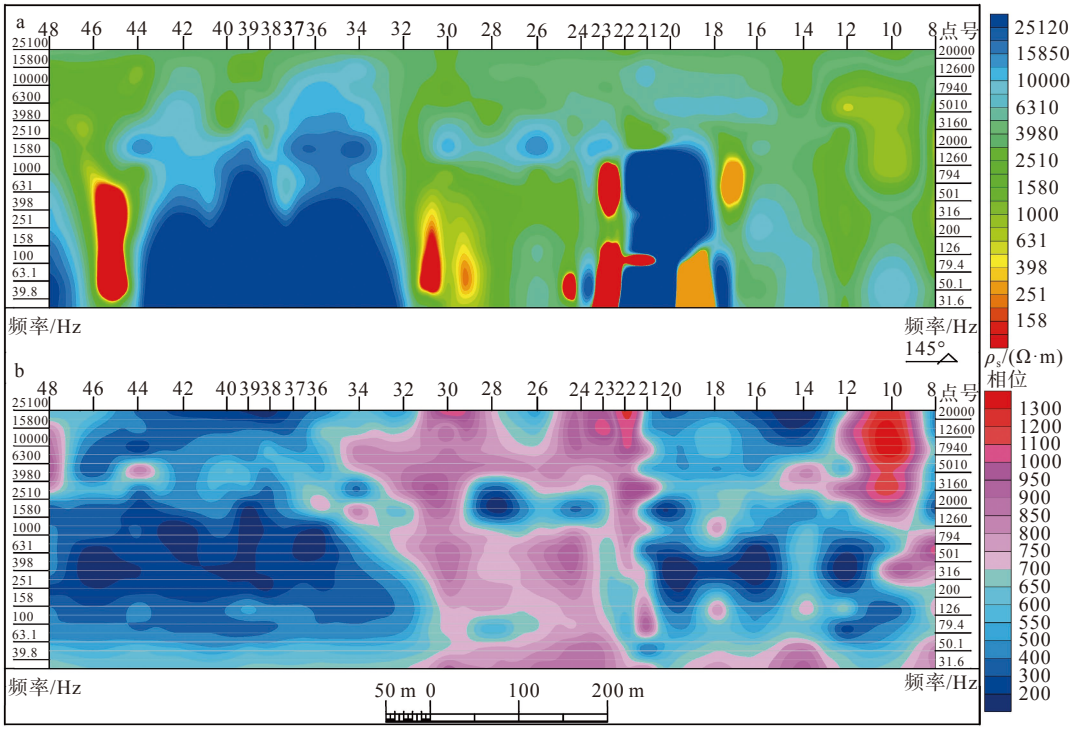


图 4　视电阻率曲线图

Fig. 4　Graphs of apparent resistivity

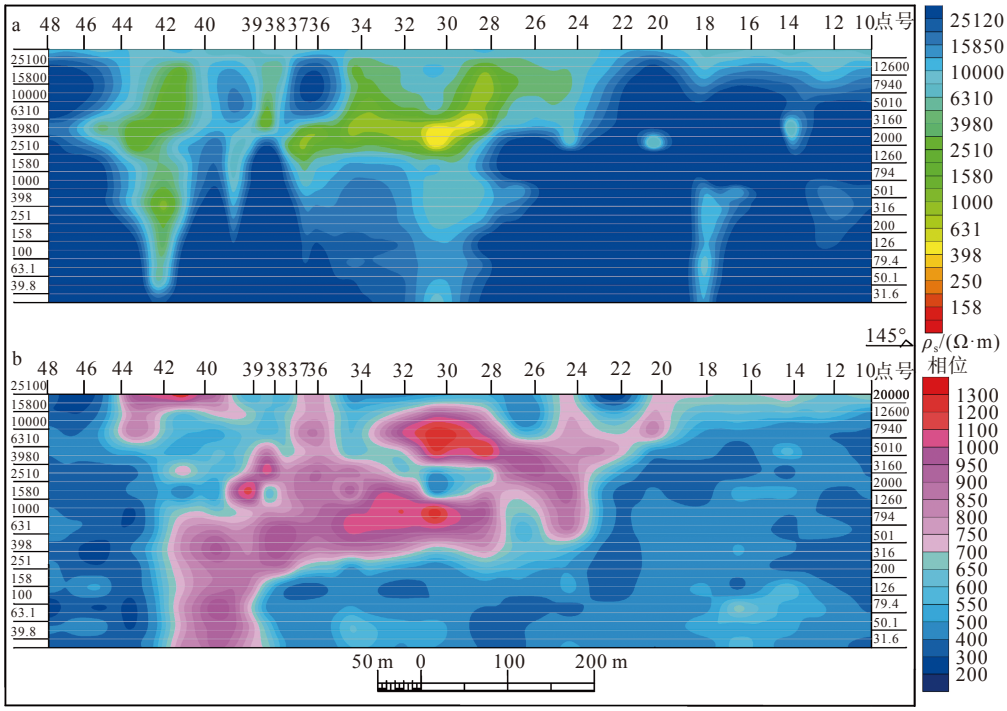


a—视电阻率–频率测深拟断面图；b—相位–频率测深拟断面图

图 5 7 线视电阻率及相位–频率测深拟断面图

Fig. 5 Pseudo-section maps of the apparent resistivity–frequency and phase–frequency soundings of Line 7

(a) Pseudo-section map of the apparent resistivity–frequency sounding ; (b) Pseudo-section map of the phase–frequency sounding



a—视电阻率–频率测深拟断面图；b—相位–频率测深拟断面图

图 6 15 线视电阻率及相位–频率测深拟断面图

Fig. 6 Pseudo-section maps of the apparent resistivity–frequency and phase–frequency soundings of Line 15

(a) Pseudo-section map of the apparent resistivity–frequency sounding ; (b) Pseudo-section map of the phase–frequency sounding

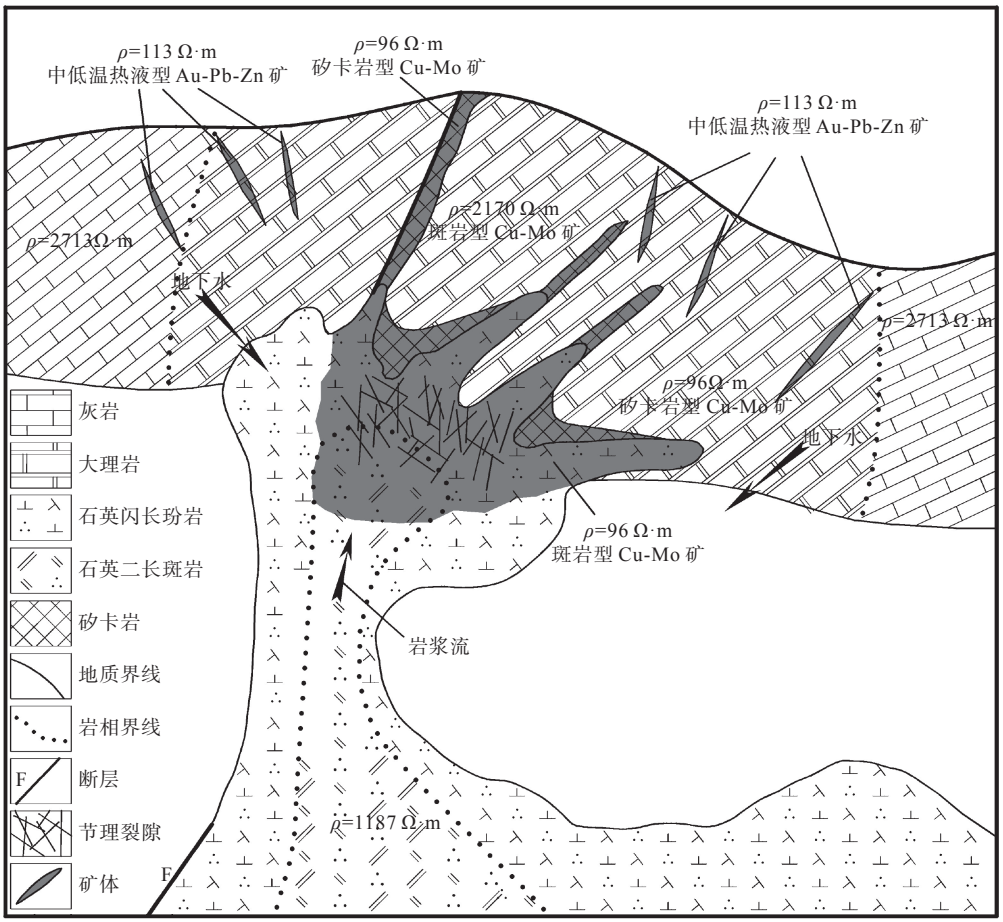


图 7　东炉房铜钼多金属矿床成矿多样性模式图（据段召艳等，2021 修改）

Fig. 7　Metallogenic diversity pattern of the Donglufang copper–molybdenum polymetallic deposit(modified from Duan et al., 2021)

矿、赤铁矿呈低阻电性特征，围岩、岩体与矿石、矿化岩石之间存在明显的电性差异，因此根据不同地质体的电性差异及空间位置关系可构建如下找矿标志：高阻体→围岩（灰岩、大理岩）；中阻体→中酸性岩浆岩（玢岩、斑岩）；低阻体且空间上位于岩体中心位置→斑岩型钼（铜）矿体；低阻体且空间上位于岩体与碳酸盐岩的接触带上→矽卡岩型铜钼多金属矿体；低阻体且空间上远离岩体，赋存于碳酸盐岩地层中，并具褐铁矿化、赤铁矿化→中低温热液型金、铅、锌多金属矿体。

4.2　EH4 剖面成果

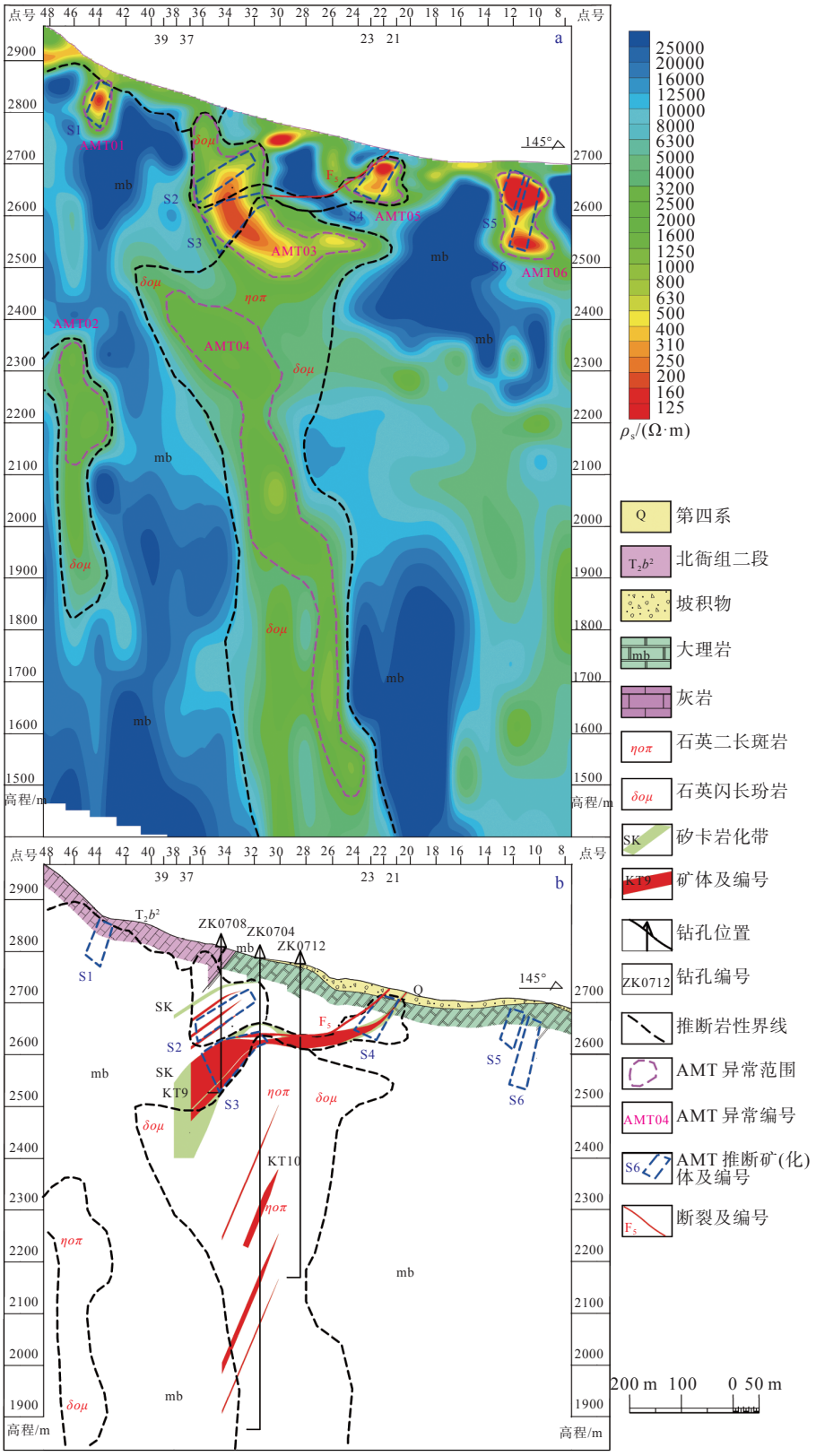
7 线剖面钻孔是已知钻孔（ZK0708、ZK0704、ZK0712），15 线剖面钻孔是验证钻孔（ZK1508）。根据成矿模式图（图 7）和物性测定结果对两条 EH4 剖面（图 8，图 9）进行解释推断。

4.2.1　7 线剖面视电阻率反演结果与解释

从反演视电阻率剖面图（图 8）上可见，在剖面北段（38—48 点号），浅部低阻体（AMT01）推断以铅锌矿（S1）为主的矿体；中深部中阻体（AMT02）推断岩性为石英闪长玢岩/石英二长斑岩岩体；其余高阻体推断为大理岩。

在剖面中段（20—38 点号），由浅部至底部呈柱状中阻体推断岩性石英闪长玢岩/石英二长斑岩岩体，石英二长斑岩位于岩体中心，石英闪长玢岩位于岩体两侧；浅部呈斜马鞍状展布低阻体（AMT03）推断以辉钼、黄铜矿（S2）为主和以辉钼、黄铜矿（S3）为主矿体；浅部低阻体（AMT05）推断以黄铜矿（S4）为主矿体。S3 和 S4 矿体推断受向北倾断裂（F5）控制。中深部中阻体（AMT04）推断为石英闪长玢岩和石英二长斑岩岩体，局部含辉钼、黄铜矿化。石英二长斑岩位于岩体中心，石英闪长玢岩位于岩体两侧，其余高阻体推断岩性为大理岩。

在剖面南段（8—20 点号），低阻体（AMT06）推断以铅锌矿（S5、S6）为主矿体，其余中高阻体推断岩性为大理岩。S2 和 S3 矿体、断裂（F_5）和岩体（斑岩、玢岩）均与已知钻孔（ZK0708、ZK0704）吻合。

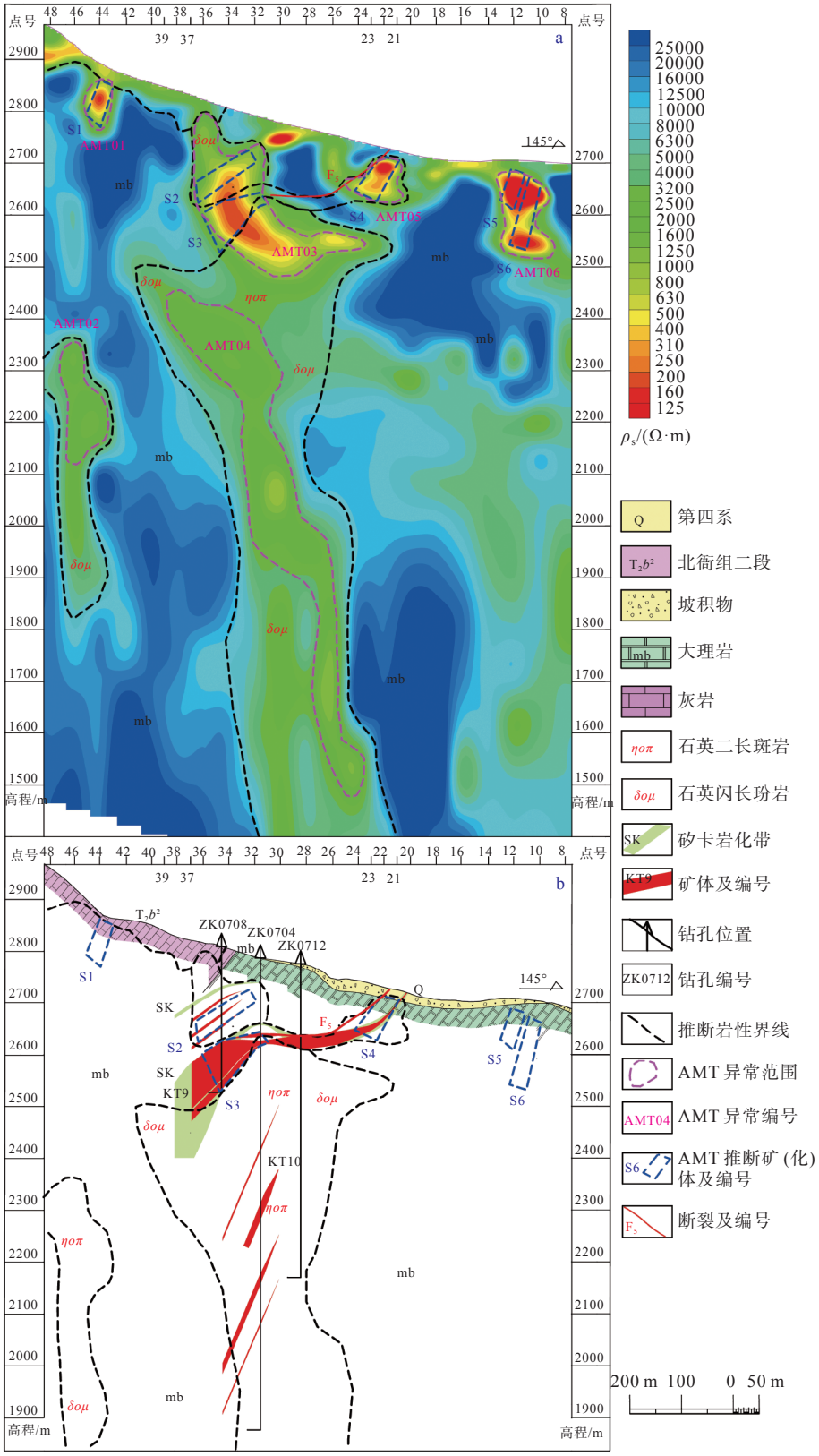


a—EH4 剖面反演结果图；b—地质及物探推断断面图

图 8 7 线物探综合剖面图

Fig. 8 Comprehensive geophysical profile of Line 7

(a) Profile inversion results by the EH4 method; (b) Sectional map inferred by the geological and geophysical explorations



a—EH4 剖面反演结果图; b—地质及物探推断断面图

图 9　15 线物探综合剖面图

Fig. 9　Comprehensive geophysical profile of Line 15

(a) Profile inversion results by the EH4 method; (b) Sectional map inferred by the geological and geophysical explorations

已知钻孔揭露断裂(F_5)为控(容)矿断裂,并向深部延伸;矿体(KT9)受断裂(F_5)控制,所以矿体(KT9)呈带状展布。断裂(F_5)是深部热液上升通道,为浅部形成中低温热液型金、铅、锌多金属矿体提供能量,热液与碳酸盐岩进行蚀变,形成大理岩带。

4.2.2 15线剖面视电阻率反演结果与解释

从反演视电阻率剖面图(图9)上可见,整条剖面自北向南呈现高阻—中低阻—高阻“两高夹一低”的电性特征。在剖面北段(40—48点号),44点号浅部低阻体(AMT07)推断以铅锌矿(S7)为主矿体,中深部高阻推断岩性为大理岩。

在剖面中段(22—40点号),由浅部至底部上宽下窄呈柱状中阻体推断岩性为石英闪长玢岩/石英二长斑岩岩体,石英二长斑岩位于岩体中心,石英闪长玢岩位于岩体两侧。浅部低阻体(AMT08)推断以辉钼、黄铜矿(S8)为主矿体;中部低阻体(AMT09)推断以辉钼、黄铜矿(S9)为主矿体;深部低阻体(AMT10)推断以辉钼、黄铜(S10)为主矿体;高阻体推断为大理岩。

在剖面南段(10—22点号),18点号浅部低阻体(AMT11)推断以辉钼、黄铜矿(S11)为主矿体,其余高阻体推断为大理岩。

S9和S11矿体推断受向北倾断裂(F_5)控制。S9矿体、石英闪长玢岩、深部断裂(F)和岩体(斑岩、玢岩)均得到后期钻孔(ZK1508)验证。深部断裂(F)推断是控(容)矿断裂(F_5)。

根据7线已知钻探资料,S3和S4两矿体为单个矿体(KT9),推断S9和S11两矿体连成单个矿体(KT9);S10矿体推断为KT10。

S1、S5、S6和S7矿体属于中低温热液型金、铅、锌矿,S2、S3、S4和S9矿体属于矽卡岩型铜钼矿和斑岩型铜钼矿,S8、S10和S11矿体属于斑岩型铜钼矿。EH4剖面视电阻率反演电性特征形态与成矿模式图形态一致(图7,图8,图9),岩体(斑岩、玢岩)呈柱状、脉状展布。预测S4、S5、S6、S8、S10和S11矿体为找矿有利部位,并推断深部岩体形成了较大规模的斑岩型铜钼矿,如S10矿体和AMT02低阻体。

4.3 讨论

音频大地电磁测深(EH4)法,其高频模式探测深度可达1 km,低频模式探测深度可达4 km,比传统电法(激电法)探测深度更深;此外,EH4对构造(断裂)或呈柱状体(岩体)探测效果良好,可达到间接指导找矿作用。该方法解译参数单一(视电阻率、相位),具有一定的多解性,建议:①结合已知地质和钻探等相关资料进行解译,可大大提高解译的准确性;②野外施工时间避开冬季,因EH4音频大地电磁测深仪存在接收信号弱区(1000～3000 Hz),且冬季期间天然电磁信号较弱,因此该频率区段(1000～3000 Hz)数据质量不理想,会影响整个测点数据质量;③关注时间序列数据,使用软件自动或人工剔除存在明显干扰信号时间序列片段,进而提升整个测点数据质量。

近年来,音频大地电磁测深(EH4)不仅在矿产勘查、地质工程勘查和水文调查领域得到广泛使用,在油气探测(黄元有等,2017)也取得不错效果。随着数据处理软件不断的升级和EH4音频大地电磁测深仪的完善或升级(EH5),EH4音频大地电磁测深仪在深部探测会得到进一步运用,同时期运用领域(范围)也会越来越广。

5 结论

(1)矿区物性(电性)测定结果和对矿区剖面EH4测深结果揭示,电阻率数值从大到小依次为围岩(碳酸盐大理岩)>岩体(斑岩、玢岩)>金属矿体(铜、钼、金、铅、锌),各类岩(矿)石电性差异明显。

(2)构建了该区音频大地电磁法(EH4)找矿标志:低阻体且空间上位于岩体中心位置→斑岩型钼(铜)矿体;低阻体且空间上位于岩体与碳酸盐岩的接触带上→矽卡岩型铜钼多金属矿体;低阻体且空间上远离岩体,赋存于碳酸盐岩地层中,并具褐铁矿化、赤铁矿化→中低温热液型金、铅、锌多金属矿体;中阻体→中酸性岩浆岩(玢岩、斑岩);高阻体→围岩(灰岩、大理岩)。

(3)根据矿区剖面EH4测深成果,圈定了S4、S5和S6等6个矿体是下一步找矿有利部位,进一步推断在深部岩体中形成规模较大的斑岩型铜钼矿。

(4)东炉房铜钼矿区探测隐伏岩(矿)体应用结果说明,EH4技术具有探测深度大、对断裂、岩(矿)体等反映直观的特点,能够有效探测深部隐伏的岩(矿)体的形态、产状,确定其位置;根据断裂构造带的电性特征,可以有效地确定断裂构造的形态。EH4音频大地电磁测深法对东炉房铜钼矿或者该类型矿床寻找隐伏岩(矿)体是有效的地球物理方法。

References

CAO D H, WANG A J, LI W C, et al., 2009. Magma mixing in the Pulangpor-

phyry copper deposit: evidence from petrology and element geochemistry[J]. Acta Geologica Sinica, 83(2): 166-175. (in Chinese with English abstract)

DU R G, HU B, 2006. Application of continuous imaging system of EH4 conductance in geological exploration in Yinchangpo[J]. Mineral Resources and Geology, 20(4-5): 534-537. (in Chinese with English abstract)

DUAN Z Y, DONG T, DU B, et al., 2021. Characteristics of porphyry-hydrothermal mineralization and prospecting prediction of the Donglufang Cu-Mo deposit in the Shangri-La area, northwestern Yunnan Province[J]. Geology and Exploration, 57(4): 837-851. (in Chinese with English abstract)

HUANG Y Y, XIN T L, CHEN Q, et al., 2017. Test effect of the EH-4 low frequency models for shale gas geological survey at the Chuxiong Basin, Yunnan[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 39(S2): 30-38. (in Chinese with English abstract)

JIA R, WANG H R, WANG G W, et al., 2021. Three-dimensional geological modeling and deep prospectivity of the Xigou Pb-Zn-Ag-Au deposit, Henan Province[J]. Earth Science Frontiers, 28(3): 156-169. (in Chinese with English abstract)

JIANG X, HUANG X X, 2011. Application of EH4 system for prospecting concealed ore deposit in the overburden area[J]. Mineral Exploration, 2(6): 784-788. (in Chinese with English abstract)

LENG C B, ZHANG X C, WANG S X, et al., 2007. Geochemical characteristics of porphyry copper deposits in the Zhongdian area, Yunnan as exemplified by the Xuejiping and Pulang porphyry copper deposits[J]. ActaMineralogicaSinica, 27(3-4): 414-422. (in Chinese with English abstract)

LI T C, FANG W X, WANG L, et al., 2022. Application of integrated geophysical method in prospecting: a case study of the magnetite-type IOCG deposits in the Moon Mountain exploration area, Copiapo, Chile[J]. Journal of Geomechanics, 28(1): 22-35. (in Chinese with English abstract)

LI W C, ZENG P S, 2007. Characteristics and metallogenic model of the Pulangsuperlargeporphyry copper deposit in Yunnan, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science& Technology Edition), 34(4): 436-446. (in Chinese with English abstract)

LI W C, ZENG P S, HOU Z Q, et al., 2011. The Pulang porphyry copper deposit and associated felsic intrusions in Yunnan province, southwest China[J]. Economic Geology, 106(1): 79-92.

LI Y B, LI Y, ZHANG Z B, et al., 2019. The application effect of EH-4 under different geological backgrounds[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 43(3): 529-535. (in Chinese with English abstract)

LI Y L, XING L J, BAI Z H, et al., 2018. The application of comprehensive geophysical prospecting method to the exploration of the Yuejinshan iron deposit in Qinghai[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 42(5): 889-895. (in Chinese with English abstract)

LI Z, XIAO G Q, XU J, 2017. EH-4 conductivity imaging and geochemical comprehensive method in Fangyang hill of Zhenkang exploration the application of lead and zinc iron mining area[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 39(S2): 105-109. (in Chinese with English abstract)

LI Z, WU Z H, WANG J M, et al., 2021. Using EH4 audio-magnetotelluric sounder to detect the gigantic Qiaojiapaleo-landslide and its structural characteristics[J]. Journal of Geomechanics, 27(2): 317-325. (in Chinese with English abstract)

LIU G D, 2007. The new progress of electrognetic method and instruments[M]. Beijing: Earthquake Press. (in Chinese)

LIU J X, JIANG L X, YAN J B, et al., 2008. Application of EH4 electromagnetic image system in survey of tunnels engineering for expressways[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 5(6): 652-656. (in Chinese with English abstract)

OUYANG N, 2009. Analysis of anomalies of No 2, 3, 4 low resistance on EH-4 high frequency magnetotelluric depth in deep prospecting in Tongshankou ore district[J]. Resources Environment & Engineering, 23(4): 500-503. (in Chinese with English abstract)

SHEN P, SHEN Y C, LIU T B, et al., 2007. Application of stratagem EH4 system to prediction of hidden ore bodies[J]. Mineral Deposits, 26(1): 70-78. (in Chinese with English abstract)

SHEN X Q, YANG B N, HE S, et al., 2021. Application of audio magnetotelluric method in prospecting for deep hidden manganese ore: a case study in the Pujue manganese mine in Songtao, Guizhou, China[J]. Journal of Geomechanics, 27(6): 987-997. (in Chinese with English abstract)

TAN H Y, LV J C, LIU G X, et al., 2011. Application of the audio-frequency magnetotelluric method to search for concealed ore bodies in southeastern Hubei province[J]. Geology and Exploration, 47(6): 1133-1141. (in Chinese with English abstract)

WANG B, CHEN X Q, FAN Z J, et al., 2014. Application of EH4 continuous conductivity meter to the study of ore-controlling structures in the Jinlongshan gold deposit of Zhen'an country, Shaanxi Province[J]. Geology and Exploration, 50(3): 564-571. (in Chinese with English abstract)

WANG S X, ZHANG X C, LENG C B, et al., 2008. Stable isotopic compositions of the Hongshan skarn copper deposit in the Zhongdian area and its implication for the copper mineralization process[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(3): 480-488. (in Chinese with English abstract)

WANG Z, 2013. Soil geochemical characteristics and prospecting direction of copper polymetallic mine area in Laba-Donglufang, Zhongdian[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology. (in Chinese)

WU J J, YANG L M, DUAN Z Y, 2015. The characteristics and prospecting criteria of Donglufang Cu-Mo deposit, Xianggelila[J]. Yunnan Geology, 34(3): 209-214. (in Chinese with English abstract)

XIAO Z Y, HUANG Q T, ZHANG S J, et al., 2011. Application of EH4 electromagnetic image systemin mineral resource exploration: an example from the Huangjindong gold ore deposit[J]. Geotectonica et Metallogenia, 35(2): 242-248. (in Chinese with English abstract)

XU X W, CAI X P, QU W J, et al., 2006. Later cretaceous granitic porphyritic Cu-Mo mineralization system in theHongshan area, Northwestern Yunnan and its significances for tectonics[J]. ActaGeologicaSinica, 80(9): 1422-1433. (in Chinese with English abstract)

XUE J L, PANG Z S, CHENG Z Z, et al., 2020. Basic problems and methods of deep mineral exploration[J]. Geological Bulletin of China, 39(8): 1125-1136. (in Chinese with English abstract)

YANG L Q, DENG J, GAO X, et al., 2017. Timing of formation and origin of the Tongchanggou porphyry-skarn deposit: implications for Late Cretaceous Mo-Cu metallogenesis in the southern Yidun Terrane, SE Tibetan Plateau[J]. Ore Geology Reviews, 81: 1015-1032.

YAO D W, ZHU W, WANG D Y, et al., 2015. The effect of applying audio-frequency magnetotelluric method to the deep geological exploration: a case study of Wushan periphery in the Jiurui ore concentration area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 39(1): 100-103. (in Chinese with English abstract)

YU H J, LI W C, YIN G H, et al., 2014. Zircon U-Pb Ages of the Granodioritic Porphyry in the Laba Molybdenum Deposit, Yunnan, SW China and its geological implication[J]. ActaGeologicaSinica(English Edition), 88(4): 1183-1194.

YU H J, 2018. Compositemetallogenic system and exploration research of the Geza porphyry Belt, SW China[D]. Wuhan: China University of Geosciences. (in Chinese with English abstract)

ZENG P S, WANG H P, MO X X, et al., 2004. Tectonic setting and prospects of porphyry copper deposits in Zhongdian Island Arc Belt[J]. ActaGeoscienticaSinica, 25(5): 535-540. (in Chinese with English abstract)

ZHANG J C, WANG T, 2015. Application of EH4 conductivity imaging system in exploration of deep buried landslide deformation[J]. Geotechnical Investigation& Surveying, 43(2): 94-98. (in Chinese with English abstract)

ZHANG X B, XIAO G Q, ZHANG Y R, et al., 2017. Geophysical-geochemical characteristics and prospecting potential analysis of Donglufang Cu polymetallic deposit in Shangri-la, Yunnan province[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 39(S2): 23-29. (in Chinese with English abstract)

ZHAO J, XIANG L Z, LI Z, et al., 2017. Application of integrated geophysical prospecting in the hydrogeology investigation and it's applicability analysis[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 39(S2): 110-115. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

曹殿华, 王安建, 李文昌, 等, 2009. 普朗斑岩铜矿岩浆混合作用: 岩石学及元素地球化学证据[J]. 地质学报, 83(2): 166-175.

杜荣光, 胡斌, 2006. EH4电导率连续成像系统在银厂坡地质勘查中的应用[J]. 矿产与地质, 20(4-5): 534-537.

段召艳, 董涛, 杜斌, 等, 2021. 滇西北香格里拉东炉房铜钼矿床斑岩-热液成矿特征及找矿预测[J]. 地质与勘探, 57(4): 837-851.

黄元有, 信太岭, 陈强, 等, 2017. EH-4低频模式在楚雄盆地页岩气地质调查中的试验效果[J]. 云南大学学报(自然科学版), 39(S2): 30-38.

贾然, 王浩然, 王功文, 等, 2021. 河南栾川西沟铅锌银金矿床三维地质建模与深部找矿预测评价[J]. 地学前缘, 28(3): 156-169.

蒋鑫, 黄小喜, 2011. EH4在覆盖区寻找隐伏矿床中的应用[J]. 矿产勘查, 2(6): 784-788.

冷成彪, 张兴春, 王守旭, 等, 2007. 云南中甸地区两个斑岩铜矿容矿斑岩的地球化学特征: 以雪鸡坪和普朗斑岩铜矿床为例[J]. 矿物学报, 27(3-4): 414-422.

李天成, 方维萱, 王磊, 等, 2022. 综合地球物理方法找矿应用: 以智利科皮亚波地区月亮山磁铁矿型IOCG矿床为例[J]. 地质力学学报, 28(1): 22-35.

李文昌, 曾普胜, 2007. 云南普朗超大型斑岩铜矿特征及成矿模型[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 34(4): 436-446.

李英宾, 李毅, 张占彬, 等, 2019. 不同地质背景下EH-4的应用效果[J]. 物探与化探, 43(3): 529-535.

李玉录, 邢利娟, 拜占红, 等, 2018. 综合物探方法在青海省跃进山铁矿勘查中的应用[J]. 物探与化探, 42(5): 889-895.

李忠, 肖高强, 许晶, 2017. EH-4电导率成像技术和化探综合方法在镇康放羊山铅锌铁矿区勘查中的应用[J]. 云南大学学报(自然科学版), 39(S2): 105-109.

李忠, 吴中海, 汪金明, 等, 2021. 利用EH4音频大地电磁测深仪探测巧家巨型古滑坡及其结构面特征[J]. 地质力学学报, 27(2): 317-325.

刘国栋, 2007. 电磁法和电磁法仪器新进展[M]. 北京: 地震出版社.

柳建新, 蒋玲霞, 严家斌, 等, 2008. EH4电磁成像系统在高速公路隧道工程勘察中的应用[J]. 工程地球物理学报, 5(6): 652-656.

欧阳南, 2009. 铜山口矿区深部找矿EH-4高频大地电磁测深低阻2、3、4异常解析[J]. 资源环境与工程, 23(4): 500-503.

申萍, 沈远超, 刘铁兵, 等, 2007. EH4连续电导率成像仪在隐伏矿体定位预测中的应用研究[J]. 矿床地质, 26(1): 70-78.

沈小庆, 杨炳南, 何帅, 等, 2021. 音频大地电磁法在深部隐伏锰矿找矿中的应用: 以贵州松桃普觉锰矿为例[J]. 地质力学学报, 27(6): 987-997.

谭红艳, 吕骏超, 刘桂香, 等, 2011. EH4音频大地电磁测深方法在鄂东南地区寻找隐伏矿体的应用[J]. 地质与勘探, 47(6): 1133-1141.

王斌, 陈孝强, 樊战军, 等, 2014. EH4连续电导率仪在陕西省镇安县金龙山矿区控矿构造研究中的应用[J]. 地质与勘探, 50(3): 564-571.

王守旭, 张兴春, 冷成彪, 等, 2008. 中甸红山矽卡岩铜矿稳定同位素特征及其对成矿过程的指示[J]. 岩石学报, 24(3): 480-488.

王紫, 2013. 中甸拉巴—东炉房矿区土壤地球化学特征与找矿方向[D]. 昆明: 昆明理工大学.

伍建兢, 杨丽梅, 段召艳, 2015. 香格里拉县东炉房铜钼矿特征及找矿标志[J]. 云南地质, 34(3): 209-214.

肖朝阳, 黄强太, 张绍阶, 等, 2011. EH4电磁成像系统在金矿勘探中的应用: 以黄金洞金矿为例[J]. 大地构造与成矿学, 35(2): 242-248.

徐兴旺, 蔡新平, 屈文俊, 等, 2006. 滇西北红山晚白垩世花岗斑岩型Cu-Mo成矿系统及其大地构造学意义[J]. 地质学报, 80(9): 1422-1433.

薛建玲, 庞振山, 程志中, 等, 2020. 深部找矿基本问题及方法[J]. 地质通报, 39(8): 1125-1136.

姚大为, 朱威, 王大勇, 等, 2015. 音频大地电磁法在武山外围深部勘

查中的应用[J]. 物探与化探, 39(1): 100-103.

余海军, 2018. 格咱斑岩带复合成矿系统及找矿方向 [D]. 武汉: 中国地质大学.

曾普胜, 王海平, 莫宣学, 等, 2004. 中甸岛弧带构造格架及斑岩铜矿前景[J]. 地球学报, 25(5): 535-540.

张建成, 王通, 2015. EH4 电磁法在深埋滑坡变形体探测中的应用[J]. 工程勘察, 43(2): 94-98.

张小兵, 肖高强, 张有荣, 等, 2017. 云南省香格里拉县东炉房铜多金属矿区物化探异常特征及找矿潜力分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 39(S2): 23-29.

赵俊, 向龙洲, 李忠, 等, 2017. 综合物探在水文地质调查中的应用及适用性分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 39(S2): 110-115.

开放科学（资源服务）标识码（OSID）：

可扫码直接下载文章电子版，也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯