doi: 10.11720/wtyht.2026.1106
眭超, 简楚, 滕鹏, 等. TFEM 与 AMT 在深部铜矿勘查中的应用效果对比[J]. 物探与化探, 2026, 50(2): 200-206. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1106
Sui C, Jian C, Teng P, et al. A comparative study on the application performance of time-frequency and audio magnetotelluric methods in deep copper exploration[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(2): 200-206. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1106

TFEM 与 AMT 在深部铜矿勘查中的应用效果对比

眭超[1], 简楚[1], 滕鹏[1], 徐学贵[2], 邓子清[2]
(1. 四川省第四地质大队, 四川 成都, 610036; 2. 四川省第九地质大队, 四川 德阳, 618000)

摘 要: 四川省拉拉矿田具有低阻覆盖层厚、埋深大、矿层薄的特点, 通过对比时频电磁法(TFEM)与音频大地电磁法(AMT)在拉拉矿田深部铜矿勘查中的适用性差异, 以解决深部目标体识别精度不足的问题。在本区进行时频电磁法和音频大地电磁法勘查应用试验, 并与已知钻孔资料进行对比后发现, 时频电磁法在分辨率上具有明显优势, 可以有效识别出矿层或含矿层位置, 是重点靶区详查的首选方法, 音频大地电磁法在浅层结构初步探测中具有优势且成本效益高。研究成果为丰富本区在深部矿产勘查中物探方法的选择方面提供了有益的应用案例。

关键词: 拉拉铜矿; 时频电磁法(TFEM); 音频大地电磁法(AMT); 深部找矿
中图分类号: P631;P31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2026)02-0200-07

0 引言

随着拉拉地区铜矿浅部易勘、易采资源的枯竭, 该区找矿工作面临着埋深大、目标层位薄的难题。现阶段对拉拉地区矿产资源的勘查主要采用传统的重力、磁法、激发极化法和地震法。重力和磁法勘探纵向分辨率相对较低[1], 激发极化法分辨率较高, 但在该地区的探测深度较浅[2-4], 地震法分辨率较高, 在控矿构造、块状硫化物矿体、层控矿床的探测方面取得了一定的探测效果[5]。近年来兴起的被动源反射地震方法也被用于本地区, 取得了良好的勘探效果[6], 但其成本较高。现阶段, 在深部找矿中应用最为广泛的是电磁法, 在拉拉地区深部找矿中主要采用的是天然场音频大地电磁法[7], 但此方法存在场源信号频带有限、随机性大、难以针对特定目标层优化、反演结果可能存在多解性等缺点。

近年来人工场源电磁法的应用逐渐普遍, 应用最广泛的是可控源音频电磁法 (controlled source audio magnetotelluric, CSAMT) 和长偏移距瞬变电磁法 (long offset transient electromagnetic sounding, LOTEM)。何继善提出的广域电磁法 (wide field electromagnetic, WFEM)[8] 进一步优化了频率域数据的采集技术, 为频率域电磁勘探开辟了更广阔的道路。为进一步提高探测精度并克服频率域和时间域各自的不足, 何展翔等[9] 提出了时频电磁法 (time frequency electromagnetic, TFEM), 采用时间域—频率域一体化方法,直接进行联合反演,获得电阻率和极化率, 有效提高了对目标的识别能力。时频电磁这些年在中国及非洲地区得到了广泛的推广和应用, 成为油气资源勘探中一种不可或缺的重要手段[10], 尤其对硫化物矿床的勘查有较好的应用效果, 也逐步应用于矿产资源、地热资源勘查开发中。本文以拉拉矿田外围红泥坡铜矿勘查工作中采用时频电磁方法找矿的实践为例, 并与同区域的音频大地电磁进行了对比, 总结了该方法应用的初步效果, 展示了该方法在铜矿深部勘查中的应用前景。

1 时频电磁技术

时频电磁勘探技术(TFEM)于 21 世纪初发展起来, 其原理是利用地质体的电导率差异性, 观测其在

收稿日期: 2025-03-31; **修回日期:** 2025-07-28
基金项目: 深地国家科技重大专项(2024ZD1001603-3-2); 四川省第四地质大队科技创新项目(2024003)
第一作者: 眭超(1991-), 男, 本科, 工程师, 主要从事矿床地球物理勘探工作。Email: suichao_scdzj4@163.com
通讯作者: 简楚(1989-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事矿床地球物理勘探工作。Email: jianchu_scdzj4@163.com

电磁场作用下的瞬态响应与频率响应, 实现地下结构的探测。该方法将频率域测深与时间域测深统一在一个系统中,可根据勘探目标的深度选择不同频率和不同类型的激发波形。在资料反演中引入具有极化效应的 Cole-Cole 模型, 可以同时研究多个参数: 电场和磁场、电阻率 (电导) 和极化率, 以及多组相位和双频相位。这些参数反映的是地下岩石物理特性方面的差异。通过这些信息可以比较严密地反演重构地下物性模型, 如电阻率、极化率以及物性特征[11]。

TFEM 工作方式与长偏移距瞬变电磁法(LOTEM)或可控源音频大地电磁法(CSAMT)类似, 如图 1 所示, 在工区布置两个供电电极 A 和 B, 人工向地下供入较大电流, 进行大功率的电脉冲方波激发[12], 激发方式采用过零或不过零方波, 从高频到低频连续激发, 每个频率重复激发若干次, 重复次数视频率的高低设置, 高频的重复次数多, 低频的重复次数少。在一定距离的远处进行数据采集, 每个测站由电采集站和磁采集站组成, 包括 5 个分量张量, 即两个水平磁场和一个垂直磁场, 即 H_x、H_y 和 H_z; 两个水平电场, 即 E_x 和 E_y。测站间距较小时, 磁采集站的数量可以减少, 可以数个测站布设 1 个三分量磁采集站。接收系统通过 GPS 与发射同步接收每个频率重复激发的所有信号[13], 该方法初用于深部油气探测[9, 13-15]。总结起来, 该方法具有如下特点: ①可同时测量电场分量和磁场分量, 弥补了只观测单分量磁场对高阻薄层分辨率低的不足; ②同时研究电阻率、纵向电导、极化率和双频相位差等多个参数, 不但可以研究电性构造, 还可以研究目标体的电阻率和层极化性; ③采用变周期的多脉冲连续激发, 由于不同周期的方波包含不同频率的激发信号, 其对地层的分辨率也是不相同的, 周期越短包含的高频成分越丰富, 因而分辨率较高, 周期越长则相反, 但勘探深度则较大[9]。

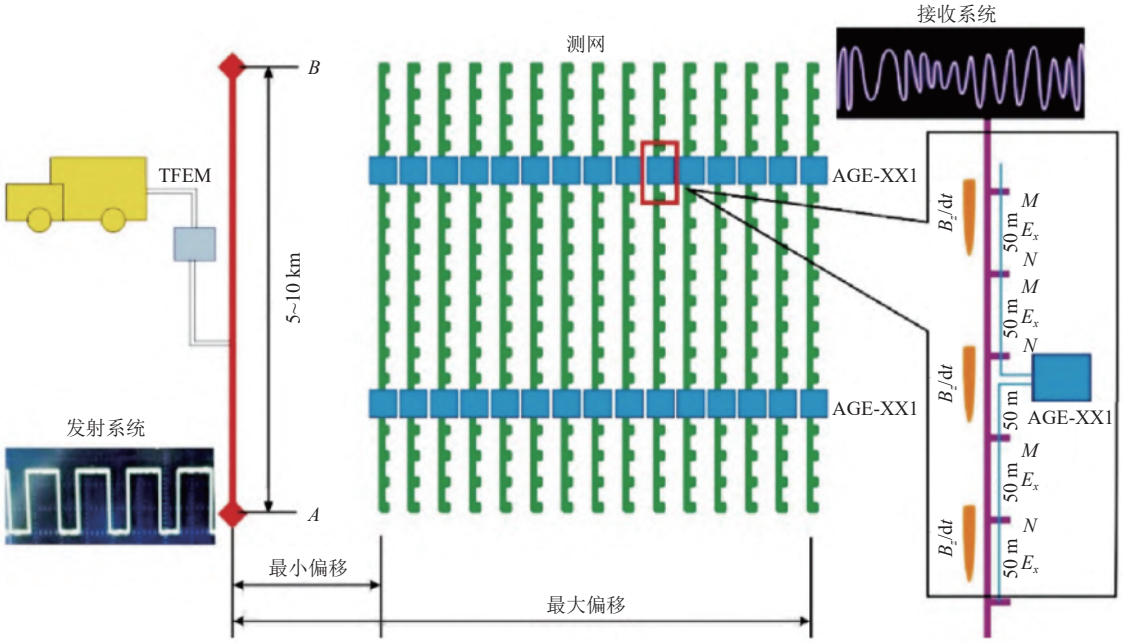


图 1　时频电磁法工作流程示意[16]

Fig. 1　Schematic of time-frequency electromagnetic method operation

2　工作区地质

2.1　地质概况

工作区位于拉拉铜矿(见图 2), 出露地层有前震旦系河口群大团箐组(Pt_1d)白云石英片岩、黑绿色变斑状眼球状石榴角闪黑云片岩、绢云炭质板岩夹薄层白云石大理岩及钙质变砂岩; 落凼组(Pt_1n)石英钠长岩、磁铁石英钠长岩、二云石英钠长片岩、白云石英钠长片岩及大理岩; 新桥组(Pt_1s)含石榴钙质白云片岩、灰紫色条纹条带状变砂岩、白云石英片岩夹炭质板岩及白云石大理岩透镜体; 天生坝组(Pt_1t)块状变钠质火山岩—磁铁石英钠长岩, 石英纳长岩、角闪石英纳长岩夹白云石英片岩, 钙质白云石英片岩, 斑状石英纳长岩, 含石榴石石英白云片岩; 前震旦系昆阳群(Pt_2K)白云石大理岩、大理岩、石英岩、千枚岩、板岩; 上三叠统白果湾组(T_3b)砂砾岩层; 第四系(Q)黄褐色黏土及砂、碎石。工作区东南侧出露侏

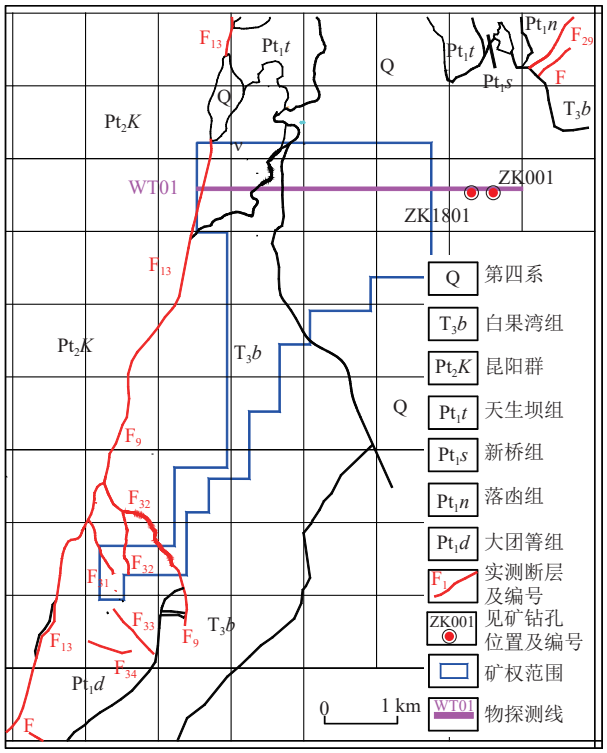


图 2　工作区地质简图

Fig. 2　Simplified geological map of the work area

罗系下统益门组(J_1y)泥岩、泥灰岩、白云岩、长石石英砂岩;中统新村组(J_2x)泥岩、页岩、泥灰岩、粉砂岩、长石砂岩。

工作区位于区域性近 SN 向断裂 F_{13} 东侧,呈 NNE-SSW 穿过工作区北西角;东侧逆断层 F_{29} 由于第四系覆盖,在工作区内未显示。

岩浆岩主要为晋宁晚期侵入的辉长岩、辉绿岩,以岩脉的形式穿插于其他岩石中,局部以透镜体出露。围岩蚀变较低,主要有绿泥石化、硅化、碳酸盐化、炭化、赤铁矿化、钠长石化、黑云母化、少量绢云母化。

2.2　工作区电性特征

工作区覆盖严重,故本次试验工作参数参考东部邻区海林铜矿的参数[17-18]。在主要岩性中,炭质板岩电阻率为低阻特征,其余主要岩石表现为高阻特征。次要岩石中,砾岩表现为高阻特征,石榴绿泥黑云片岩和辉长岩表现为中高阻特征,长石石英砂岩表现为中低阻特征。黄铜矿表现为低阻特征,黄铁矿、黄铜矿化含炭质白云石英钠长片岩表现为中阻特征,含少量黄铁、黄铜矿石英钠长岩表现为中高阻特征。极化率方面,炭质板岩、高品味黄铜矿石表现为高极化特征,含矿岩石表现为中等极化特征,其余主要岩石表现为低极化特征。

主要岩性除炭质板岩外均表现为高阻—中低极化特征,如表 1 所示,黄铜矿石为低阻—高极化特征,含矿的岩石为中—高阻中低极化特征,矿(化)体与主要围岩有明显电性差异,而本区低阻围岩(长石石英砂岩、炭质板岩、黄铜矿和黄铁矿)通常在含矿层上部,因此,通过电法可以划分岩性位置,推测成矿有利区,为下一步地质找矿工作提供依据。

3　TFEM 与 AMT 对比

3.1　反演参数对比

TFEM 点距 80 m,电极距 80,反演频率 0.45~1 464.77 Hz,*AB* 距 4.2 km,收发距 6 km,发射电流 76 A。AMT 点距 80 m,电极距 80,反演频率为

表 1　标本电性参数测量统计

Table 1　Statistics of electrical parameter measurements for specimens

标本编号	标本名称	标本个数	电阻率/(Ω·m)			极化率/%		
			最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
B1	砾岩	2	5 163	9 236	7 199	3.52	5.26	4.25
B2	长石石英砂岩	4	437	1 382	932	1.10	4.60	2.57
B3	石榴绿泥黑云片岩	5	1 654	6 498	2 908	2.52	12.52	7.02
B4	辉长岩	4	2 106	4 416	3 160	0.47	5.42	3.50
B5	炭质板岩	13	34	2 693	437	15.92	47.42	34.87
B6	板岩	5	1 220	9 367	5 094	0.54	6.52	4.14
B7	二云石英钠长片岩	4	3 363	8 177	5 969	2.15	7.42	4.25
B8	白云石英钠长片岩	4	5 395	18 736	10 815	1.82	9.63	6.83
B9	绿泥二云石英钠长片岩	4	3 614	22 054	8 748	0.51	7.36	5.34
B10	绿泥白云石英片岩	34	777	47 465	7 679	1.62	14.25	7.18
B11	黄铁矿、黄铜矿化含炭质白云石英钠长片岩	3	137	2 570	1 348	4.70	17.38	15.70
B12	黄铁矿、黄铜矿化绿泥石化英钠长岩	11	2001	4 887	3 506	2.31	8.33	4.17
B13	黄铁矿、黄铜矿化石英钠长岩	20	2 825	6 474	3 940	2.99	32.72	10.5
B14	黄铜矿石(高品位)	3	278	555	406	45.72	56.23	51.98

0.52~1 589.58, 采集时间 60 min。

3.2　数据处理对比

从 TFEM 方法理论及实际应用出发, 通过对数据处理、解释方法的系统分析, 提出合适的工作流程, 如图 3 所示, 包括 4 个主要步骤: 数据预处理、电性异常计算、电性反演和综合解释[19]。

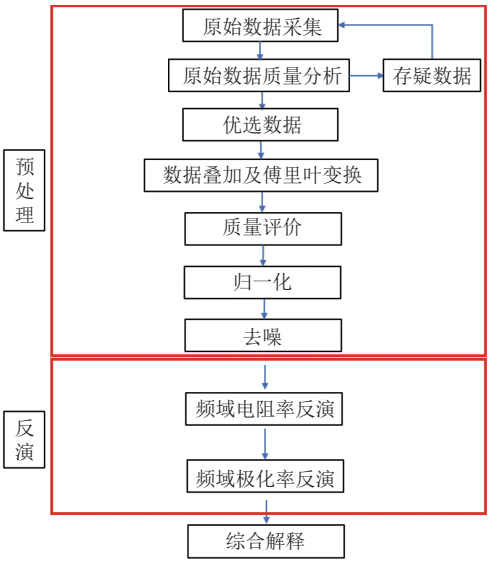


图 3　TFEM 数据处理流程

Fig. 3　TFEM data processing workflow

AMT 采用成熟、先进的数据处理技术对原始数据进行处理, 有效去除各种干扰, 合理分析异常起因, 如图 4 所示。对 AMT 剖面各点数据进行了前期的预处理, 包括部分测点的重新编辑、AMT 测点曲线圆滑、消除静位移处理等工作。在此基础上, 展开 AMT 资料的定量反演处理, 除了使用传统反演方法外, 还选择了带地形二维 AMT 共轭梯度成像等。

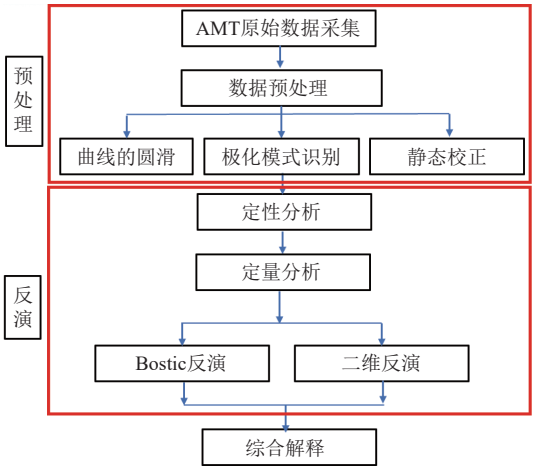


图 4　AMT 数据处理流程

Fig. 4　AMT Data Processing Workflow

3.3　反演结果对比

根据时频电磁法所得到的结果(图 5a、b), 电阻率和极化率横向上具有明显的分带特征, 纵向上具有明显的分层特征。

横向上, 由西向东分为 2 个电性变化带: 推断断层以西呈现高阻特征, 推测为辉长岩; 断层附近表现为低阻破碎带, 连续性较好, 表层推测局部存在白果湾组(T_3b)砂砾岩层。

断层以东, 地层连续性较好, 纵向上表现出 7 个电性层:

1)第 1 电性层深度自地表至埋深 150 m 左右, 为相对中等电阻层, 电阻率值在 100 Ω·m 以下, 局部具有极化率异常, 推断为第四系(Q)地层, 地层较为连续, 分布均匀, 岩性以砂、砾石层为主, 在工作区分布广泛。

2)第 2 电性层深度自上覆地层底部至埋深 150~360 m, 为相对高阻层, 电阻率值在数百欧姆·米, 极化率异常较低, 推断为天生坝组上段(Pt_1t^2)块状变钠质火山岩为主地层, 与下覆地层交界位置为含矿层位。

3)第 3 电性层深度自上覆地层底部延伸至埋深 240~300 m, 为相对低阻层, 电阻率值在数十欧姆·米, 在上部分布带状极化率异常, 推断为天生坝组下段(Pt_1t^1)以炭质板岩为主地层。

4)第 4 电性层深度自上覆地层底部延伸至埋深 280~300 m, 为相对高阻层, 电阻率值在数百欧姆·米, 推断为天生坝组上段(Pt_1t^1)块状变钠质火山岩为主地层, 为本区含层。

5)第 5 电性层深度自上覆地层底部延伸至埋深 200~170 m, 为相对高阻层, 电阻率值在数百欧姆·米, 极化率异常较低, 推断为新桥组(Pt_1s)白云石英片岩夹炭质片岩。

6)第 6 电性层深度自上覆地层底部延伸至埋深 230~260 m, 为中等阻层, 电阻率值在数百欧姆·米, 极化率异常较低。推断为落凼组上段(Pt_1n^2)石英纳长岩, 受到铜铁矿层的影响表现为中阻。

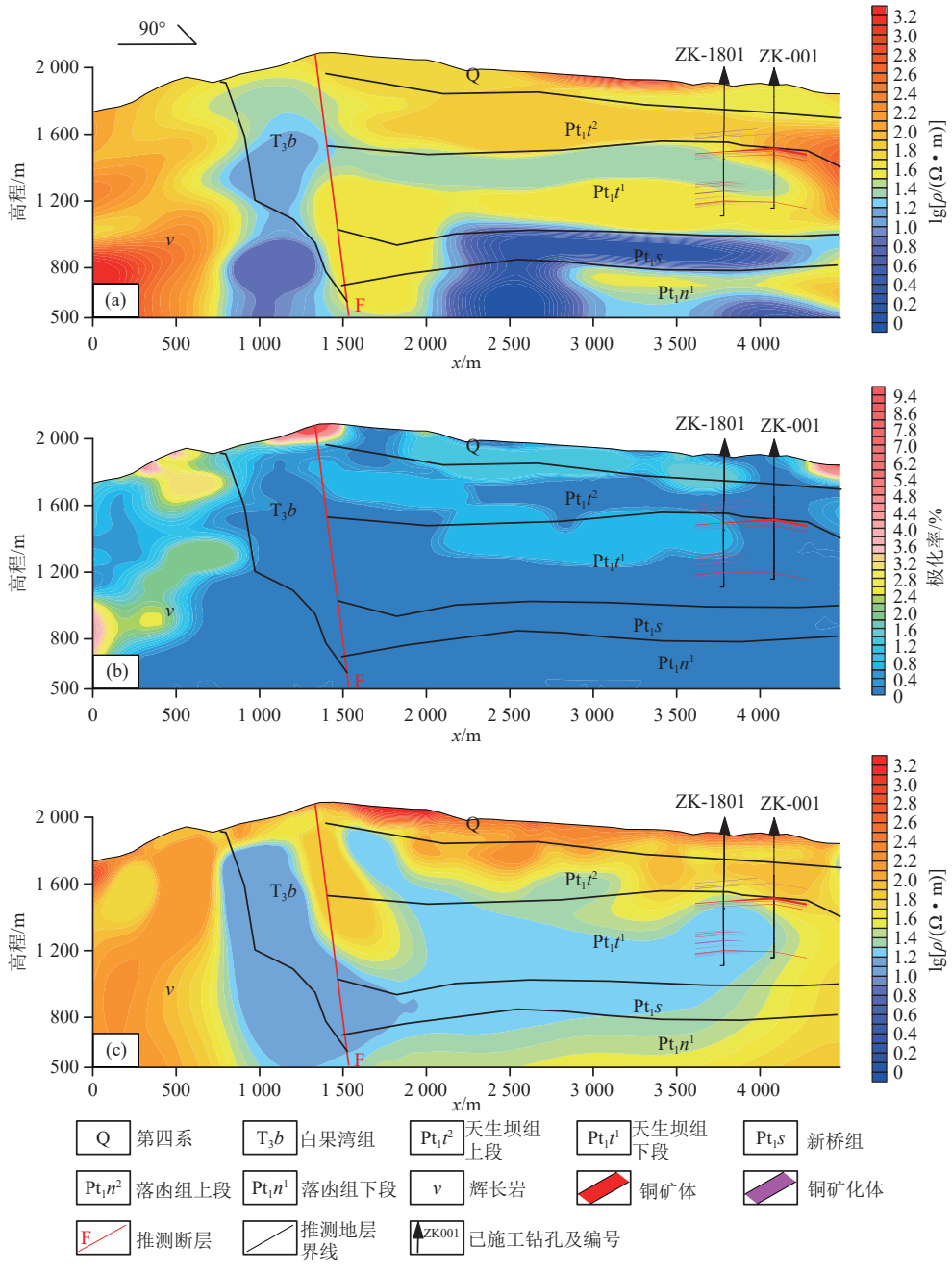
7)第 7 电性层深度自上覆地层底部延伸至埋深 230~260 m, 为中低阻层, 电阻率值在几十到数百欧姆·米, 极化率异常较低, 推断为落凼组下段(Pt_1n^1)黑云片岩。

反观音频大地电磁测深成果(图 5c), 横向上电性分层不明显, 表层至深部虽然也表现出了垂向电性分层, 但从上到下表现为相对高阻—低阻—高阻的 3 层电性结构, 深部电性细节结构较为粗糙。

3.4　对比分析

已施工钻孔 ZK-1801、ZK-001 揭露了 4 层矿体, 铜的平均品位为 0.63%, 埋深为 280~715 m, 矿体在走向和倾向上均控制程度不高。

通过对 ZK1801 钻孔结合物性参数绘制电阻率



a—时频电磁电阻率反演断面; b—时频电磁极化率反演断面; c—音频大地电磁电阻率反演断面

a— time-frequency electromagnetic resistivity inversion section; b—time-frequency electromagnetic polarization inversion cross-section; c—audio frequency magnetotelluric resistivity inversion section

图 5　WT01 线综合断面

Fig. 5　Comprehensive cross-section of line WT01

理论模型，并对 TFEM 和 AMT 反演结果进行一维曲线提取，并进行三者对比(图 6)，可以看出在主要矿层处 TFEM 与正演结果较符合，AMT 整体与地层也较对应，但细节区分度明显较 TFEM 低，通过 TFEM 可以看出矿层位于低阻、高极化区上下层梯度带中，而矿层在 AMT 中则体现为整体低阻，TFEM 可更有效、准确地对矿体进行推断。

从已施工钻孔成果来看，低阻层为炭质板岩、含炭质岩性的反映，时频电磁反映出含矿层位于高低电阻梯度带或中等电阻带中，矿体多分布在无极化率异常区域，或极化率异常带上下区域。音频大地电磁多反映含矿层位位于低电阻带中。

4　结论

通过在红泥坡铜矿开展时频电磁法与音频大地

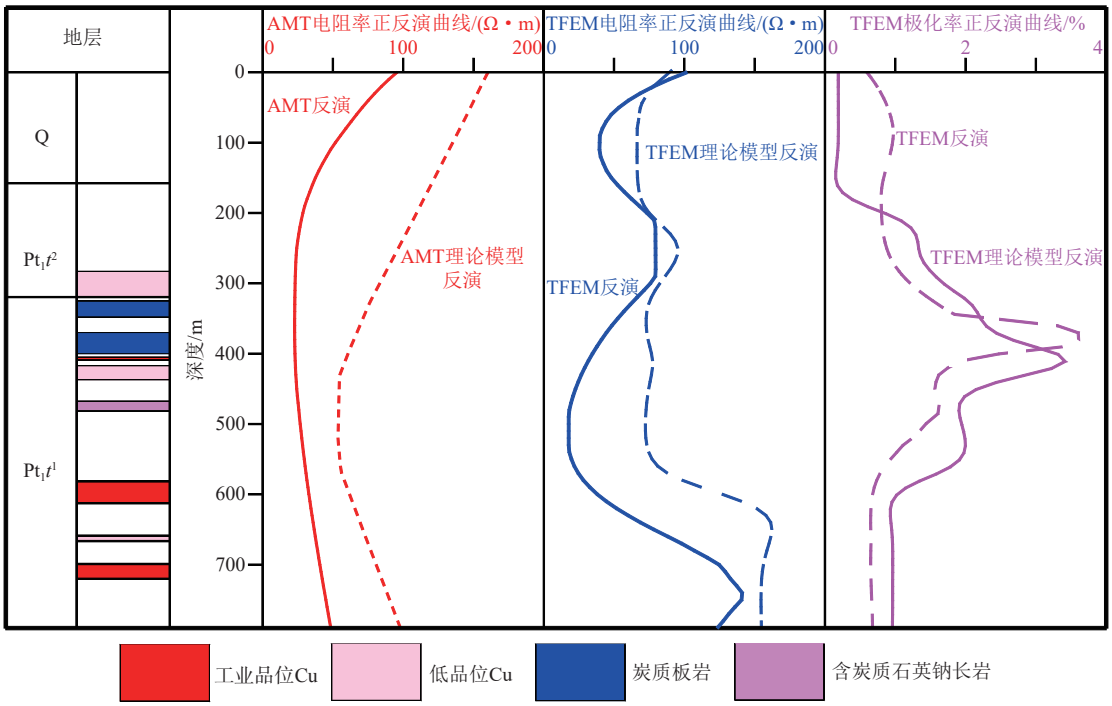


图 6　ZK1801 钻孔正反演 1D 曲线对比

Fig. 6　Comparison of 1D forward and inversion curves for borehole ZK1801

电磁法的应用试验，并与钻孔资料对比，说明时频电磁法在深部铜矿找矿中的应用前景。

1）因时频电磁场源为增强二次场，信噪比高，在低阻厚覆盖层区、干扰区观测时，时频电磁探测数据明显要优于音频大地电磁，时频电磁横向、纵向上的分辨率均优于音频大地电磁。

2）时频电磁可设计发射频率及功率，可针对特定目标层优化发射频率，有利于对目标地层结构的精细化解释推断，得到的电性结构更加精细，可有效地定位含矿层位位置，为深部勘查钻孔的选择提供较为可靠的地球物理数据依据，而音频大地电磁依靠天然场频率，只能大致确定区域内地层的分布是否稳定，无法精确指导含矿层的位置。

3）时频电磁提供了电阻率、极化率、双频相位差等参数供技术人员进行地下电性结构的分析，这种多参数的综合利用有利于提高反演结果的准确性，降低了单参数带来的多解性，但其参数的联合处理解释还有待于研究。

4）TFEM 因人工源可控性和多参数优势，在深部铜矿应用方面，其在精度、可靠性和适应性方面优于 AMT，但成本较高；AMT 则更适用于大范围、低成本普查。

参考文献（References）：

[1] 邱林, 周军, 刘晓葳, 等. 综合物探在四川会理拉拉 M163-1 航磁异常查证中的应用 [J]. 物探化探计算技术, 2016, 38(5): 603−604.
Qiu L, Zhou J, Liu X W, et al. Application of integrated geophysical methods in the verification of aeromagnetic anomaly M163-1 in Huili, Sichuan[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 38(5): 603−604.

[2] 王闻文. 拉拉铜矿及外围深部隐伏矿体预测中地球物理方法应用研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
Wang W W. Application research of geophysical methods in the prediction of deep concealed orebodies in the Lala Copper Deposit and its peripheral areas [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.

[3] Wang J L, Lin P R, Wang M, et al. Three-dimensional tomography using high-power induced polarization with the similar central gradient array[J]. Applied geophysics, 2017, 14(2): 291−300.

[4] Wang J L, Lin P R, Wang M, et al. A multiple parameter extraction and electromagnetic coupling correction technique for time domain induced polarisation full waveform data[J]. Exploration Geophysics, 2019, 50(2): 113−123.

[5] 徐明才, 柴铭涛, 荣立新, 等. 厚覆盖区金属矿地震方法技术研究 [J]. 物化探计算技术, 2007, 29(6): 492−496.
Xu M C, Chai M T, Rong L X, et al. Research on seismic methods for metal deposits in thick overburden areas[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, 29(6): 492−496.

[6] 肖扬, 郑革辉, 杨涛, 等. 被动源反射地震方法在四川拉拉矿田海林铜矿勘查中的应用试验 [J]. 地质找矿论丛, 2022, 37(2): 249−254.
Xiao Y, Zheng G H, Yang T, et al. Experimental application of passive source seismic reflection method in exploration of Hailin copper deposit, Lala ore field, Sichuan Province[J]. Contributions to

Geology and Mineral Exploration, 2022, 37(2): 249−254.

[7] 刘家铎, 王绪本, 张成江, 等. 康滇地轴中南段铜多金属深部隐伏矿体预测方法研究成果报告 [R]. 成都: 成都理工大学, 2013.
Liu J D, Wang X B, Zhang C J, et al. Research report on prediction methods for deep concealed copper-polymetallic orebodies in the central-southern segment of Kangdian Axis[R]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.

[8] 何继善. 广域电磁法和伪随机信号电法 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
He J S. Wide-field electromagnetic method and pseudo-random signal electrical method[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.

[9] 何展翔, 王绪本, 孔繁恕, 等. 时—频电磁测深法(C)//中国地球物理学会第十八届年会, 2002.
He Z X, Wang X B, Kong F S, et al. Time-frequency electromagnetic sounding method[C]//Proceedings of the 18th Annual Conference of the Chinese Geophysical Society, 2002.

[10] 索孝东, 何展翔, 石东阳. 时频电磁技术新进展及北疆深层目标应用实例 [C]//中国石油学会 2017 年物探技术研讨论会, 2017.
Suo X D, He Z X, Shi D Y. New advances in time-frequency electromagnetic technology and application cases for deep targets in Northern Xinjiang[C]// Proceedings of the 2017 Geophysical Technology Symposium of the Chinese Petroleum Society, 2017.

[11] 赵志, 何展翔, 杨树江, 等. 时频电磁技术新进展及实例研究 [C]//中国地球物理学会第二十六届年会, 2010.
Zhao Z, He Z X, Yang S J, et al. New advances and case studies of time-frequency electromagnetic technology[C]//Proceedings of the 26th Annual Conference of the Chinese Geophysical Society, 2010.

[12] 何展翔, 陈忠昌, 任文静, 等. 时频电磁 (TFEM) 勘探技术: 数据采集系统 [J]. 石油地球物理勘探, 2020, 55(5): 1131−1137,937.
He Z X, Chen Z C, Ren W J, et al. Time-frequency electromagnetic (TFEM) exploration technology: Data acquisition system[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2020, 55(5): 1131−1137,937.

[13] 何展翔. 人工源时间—频率电磁测深方法 [P]. 中国专利, ZL03150098.6, 2006.
He Z X. Artificial source time-frequency electromagnetic sounding method[P]. China Patent, ZL03150098.6, 2006.

[14] Dong W B, Zhao X M, Liu F, et al. The time-frequency electromagnetic method and its application in western China[J]. Applied Geophysics, 2008, 5(2): 127−135.

[15] He Z X, suo X D, HU Z Z, et al. Time-frequency electromagnetic method forexploring favorable deep igneous rock targets: A case study from north Xinjiang[J]. JournalofEnvironmentaland Engineering Geophysics, 2019, 24(2): 215−224.

[16] 杨志成, 陈海宏, 周玲玲, 等. 时频电磁法在金牛湖地区深部地热资源勘查中的应用 [J]. 工程地球物理学报, 2024, 21(1): 81−91.
Yang Z C, Chen H H, Zhou L L, et al. Application of time-frequency electromagnetic method in deep geothermal resource exploration in Jinniu lake area[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2024, 21(1): 81−91.

[17] 邓波. 四川省会理县海林铜矿普查项目物探工作专题报告 [R]. 成都: 四川省地质矿产勘查开发局四〇三地质队, 2022.
Deng B. Special geophysical survey report for the prospecting project of Hailin copper deposit in Huili county, Sichuan province[R]. Chengdu: 403 Geological Team, Sichuan Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, 2022.

[18] 刘晓葳. AMT 及磁法在拉拉铜矿外围航磁异常查证中的应用研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
Liu X W. Application research of AMT and magnetic methods in the verification of aeromagnetic anomalies in the peripheral area of Lala copper deposit[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.

[19] 何展翔, 董卫斌, 赵国, 等. 时频电磁(TFEM)技术: 数据处理 [J]. 石油地球物理勘探, 2021, 56(6): 1391−1399.
He Z X, Dong W B, Zhao G, et al. Time-frequency electromagnetic (TFEM) technology: Data processing[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2021, 56(6): 1391−1399.

A comparative study on the application performance of time-frequency and audio magnetotelluric methods in deep copper exploration

SUI Chao [1], JIAN Chu [1], TENG Peng [1], XU Xue-Gui [2], DENG Zi-Qing [2]

(1. *No. 4 Geological Team of Sichuan Province*, *Chengdu* 610036, *China*; 2. *No. 9 Geological Team of Sichuan Province*, *Deyang* 618000, *China*)

Abstract: The Lala copper deposit in Sichuan Province is characterized by a thick low-resistivity cover, a great burial depth, and thin ore layers. By comparing the differences in the applicability of the time-frequency electromagnetic method (TFEM) and the audio magnetotelluric method (AMT) to deep copper exploration in this deposit, this study aims to address the issue of insufficient accuracy in the identification of deep targets. The TFEM and AMT methods were applied to the study area for tests. The comparison of the test results with existing drilling data revealed that the TFEM method exhibited a higher resolution than the AMT method and effectively identified the positions of ore layers or zone-bearing layers. These characteristics establish the TFEM method as a preferred approach for the detailed survey of key target areas. Nevertheless, the AMT method remains cost-effective for preliminary exploration of shallow structures. This study offers a valuable case for enriching geophysical methods for deep ore exploration in the study area.

Key words: Lala copper deposit; time-frequency electromagnetic (TFEM); audio magnetotelluric (AMT); deep ore prospecting

（本文编辑: 王萌）