doi: 10.11720/wtyht.2026.1238
李忠, 汪金明, 张蓉, 等. 音频大地电磁法在巍山笔架山锑矿外围深部勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2026, 50(4): 665-672. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1238
Li Z, Wang J M, Zhang R, et al. Application of the audio-frequency magnetotelluric method in deep mineral exploration along the periphery of the Bijiashan antimony deposit in the Weishan area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(4): 665-672. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1238

音频大地电磁法在巍山笔架山锑矿外围深部勘查中的应用

李忠[1,2,3], 汪金明[1,2,3], 张蓉[1,2,3], 李元彬[1,2,3], 宋旭锋[1,2,3], 赵明红[4], 马超文[4]

(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. 云南省三江成矿作用及资源勘查利用重点实验室, 云南 昆明 650051; 4. 云南南方地勘工程有限公司, 云南 大理 671000)

摘 要: 笔架山锑矿属于中低温热液型矿床; 依据矿区地质特征和电性特征, 利用音频大地电磁测深对矿区外围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。构建了矿区音频大地电磁法成(找)矿理论模型; 确定了矿区音频大地电磁法找矿标志: 背斜轴部及两翼转折地段(层间破碎带)在剖面显示呈"马鞍状"展布的中高阻接触带上。成功查明背斜核部分布特征(西陡东缓), 有效圈定背斜轴部和层间破碎带的位置; 该位置推断为成矿有利部位; 通过钻探验证物探异常, 发现隐伏锑矿化体, 实现了深部找矿突破, 证明了该方法有效; 研究结果表明, 音频大地电磁法对探测笔架山锑矿床及同类型矿床是有效的地球物理方法。

关键词: 云南巍山; 笔架山锑矿区; 电性; 音频大地电磁法; 成 (找) 矿理论模型
中图分类号: P631; P31 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-8918(2026)04-0665-08

0 引言

目前全国正在进行新一轮找矿突破战略行动, 已取得不错成绩[1-4], 在深部找矿取得了重大突破[5-8]; 地质找矿主体向深部转移[9-10], 老矿山的深部找矿是其找矿主体之一, 故对寻找深部矿的方法(手段)尤其重要。物探为一种经济快速的手段在今后的深部找矿工作中发挥着越来越大的作用, 音频大地电磁法是物探主要方法之一; 音频大地电磁法具有探测大、精度高、分辨率好、快速、轻便等优点, 在探测深部矿体得到广泛且成功的运用[11-12]。

锑素有"工业味精"之美誉, 与国民经济和社会发展、国防军工、日常生活密不可分, 广泛应用在阻燃剂、玻璃、陶瓷、催化剂、耐火材料等领域[13-14]。因其特殊的资源属性和战略意义, 美国、欧盟、日本、英国等都将锑列为关键矿产[15-16]。锑是我国的优势矿种之一, 锑资源储量和产量长期保持世界第一, 但由于开采强度大, 资源保护不力等原因, 我国锑矿资源储量的消耗速度远大于可开采储量的增长速度, 资源优势正在逐步丧失[17]。笔架山锑矿区位于永平—巍山矿集区南段, 是云南省第二大锑矿床[13], 现已枯竭停产。前人从矿床成因[18] 和成矿作用[19] 进行了研究, 但未针对矿区外围及深部进行调查研究。本文运用音频大地电磁法对矿区外围深部地质构造进行探测与解析, 以查明深部构造特征及有利成矿部位, 为后期在矿区的外围及深部开展地质矿产勘查工作提供地球物理依据(资料), 具有一定的指导意义。

收稿日期: 2025-07-14; **修回日期**: 2025-11-05
基金项目: 云南省地质勘查基金项目"云南省巍山县肚故皮锑矿普查"(K202406); 新一轮找矿突破战略行动科技支撑项目"隐伏矿体找矿模型构建与精准定位"(ZKKJ20240)
第一作者: 李忠(1982-), 男, 江西人, 硕士, 高级工程师, 从事地球物理与地球化学研究工作。Email: 278618901@qq.com
通讯作者: 汪金明(1986-), 男, 云南人, 高级工程师, 从事地球物理与地球化学研究工作。Email: 395088031@qq.com

1　矿区地质特征

矿区位于昌都—思茅陆块(Ⅴ)之次级漾濞—南涧褶皱束中段(兰坪—思茅盆地),地处澜沧江断裂带和哀牢山断裂带之间,是永平—巍山矿集区重要组成部分(图 1a)。矿区主要地层为上三叠统麦初箐组 (T_3m)、挖鲁八组(T_3wl)、三合洞组三段(T_3s^3) 以及第四系(Q)(图 1b)。麦初箐组 (T_3m) 分为 4 段: 四段 (T_3m^4) 主要岩性为泥质粉砂岩夹泥灰岩; 三段 (T_3m^3) 分为 2 亚段: 二亚段主要岩性为泥岩、粉砂岩夹灰岩、石英砂岩,一亚段主要岩性为石英砂岩夹粉砂岩、泥岩; 二段 (T_3m^2) 主要岩性为砂质泥岩和砂岩; 一段 (T_3m^1) 分为 2 亚段: 二亚段主要岩性为石英砂岩夹泥质粉砂岩,一亚段主要岩性为泥质粉砂岩夹石英砂岩,局部见炭质泥岩。挖鲁八组(T_3wl)主要岩性为炭质粉砂岩夹泥岩。三合洞组三段(T_3s^3) 主要岩性为灰岩夹燧石结核、燧石条带; 该层为矿区重要含矿层位,在该层顶部层间滑动破碎带内常出现硅化、锑矿化、萤石化等蚀变矿化,形成锑矿、萤石矿工业矿体。矿区位于黑惠江复式背斜南段; 该背斜形态狭窄。区内断层发育北西向 F_3、F_4 及 NE 向 F_{30}、F_{32} 两组。

2　音频大地电磁法野外工作方法、数据处理及物性特征

2.1　音频大地电磁法野外工作方法

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[20]。采用由美国两家公司(EMI, Geometrics)生产的连续电导率剖面仪(EH4)。工作频率采用高频模式: 10 Hz～100 kHz。布极主要采用“十”型装置,观测数据采用全频域及张量模式,点极距为 30 m, 1 频段(10～1 kHz)叠加次数为 16, 7 频段(750～100 kHz)叠加次数为 8; 在不影响成果下,尽量远离干扰源; 在采集数据时,附近钻机未施工。3 条 AMT 剖面(1、3、5 线)布设于矿区外围北部(图 1)。

2.2　音频大地电磁法数据处理

野外原始数据优良级达 90%,没有不合格测

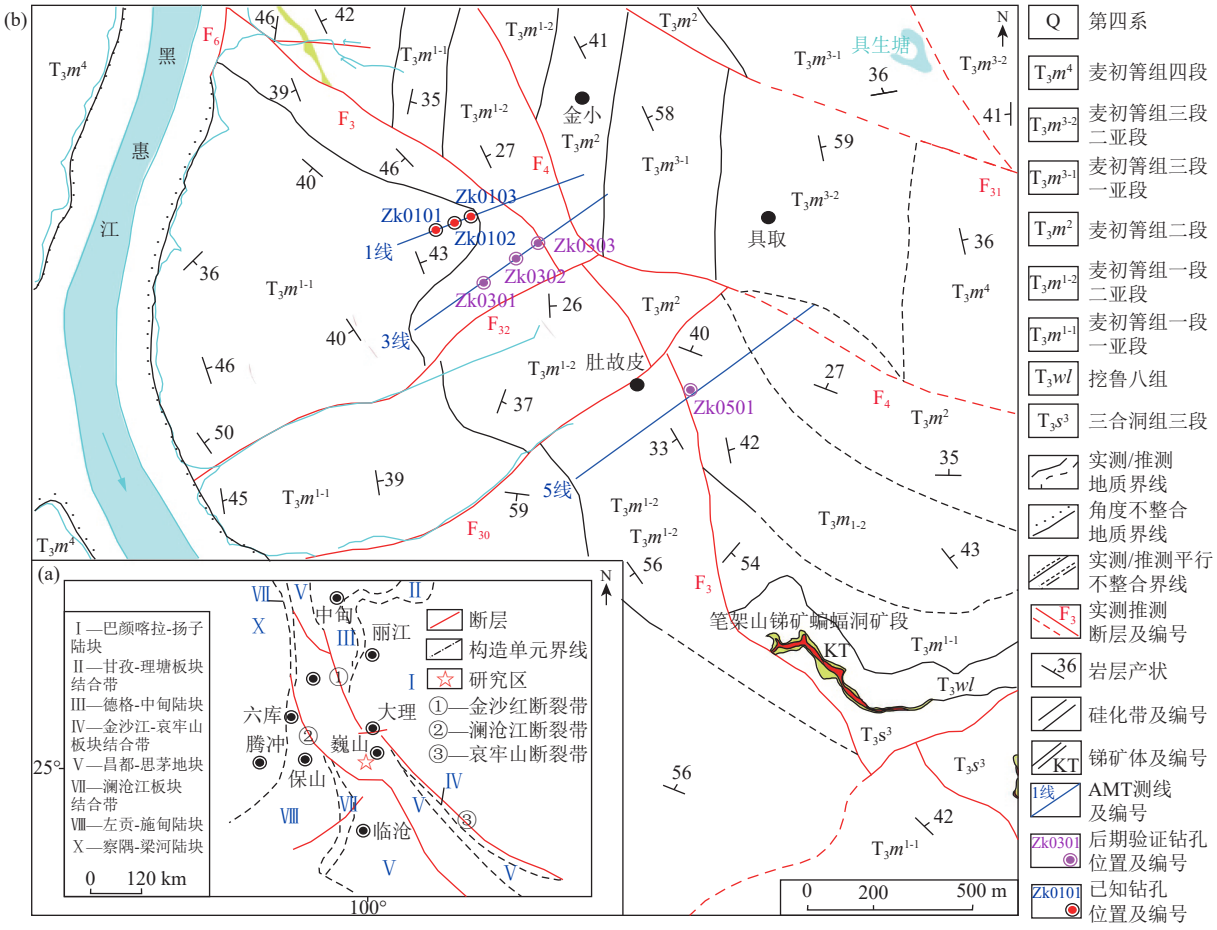


图 1　矿区及外围地质(a)和区域构造(b)

Fig. 1　Geological (a) and regional structural (b) of the mining area and its periphery

点。数据处理过程: ①利用 IMAGEM 软件对野外数据进行时间序列筛选, 剔除明显存在干扰的时间序列; ②重新计算张量阻抗; ③运用音频大地电磁法软件进行处理; ④利用 SCS-2D 软件进行二维反演; ⑤构建电性断面和地质解释推断(图 2)[21]。

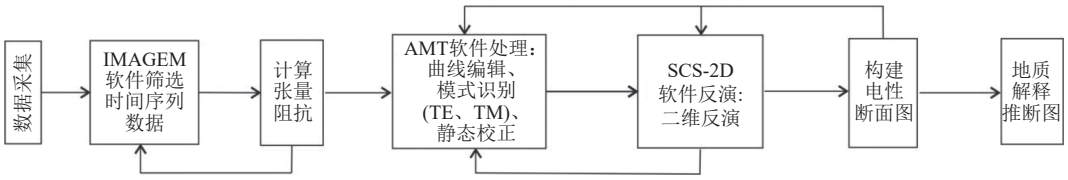


图 2　AMT 资料处理流程

Fig. 2　Flow of the AMT data processing

2.3　矿区物性（电性）特征

本次在矿区电阻率测定采取野外露头对称小四极的方式进行, 总共测定 350 组; 表 1 为岩石电性电阻率测试统计结果。

表 1　岩石电性电阻率统计

Table 1　Statistical of electrical resistivity of rocks

地层	代码	岩性	测定组数	视电阻率ρ/(Ω·m)			
				变化范围	平均值	综合值	
麦初箐组三段	T_3m^3	锑矿石	39	84～595	156	156	730
		石英砂岩	15	939～3 028	2 018	766	
		粉砂岩、泥岩	50	109～601	260		
麦初箐组二段	T_3m^2	粉砂岩、砂岩	34	835～1 359	1 055	1 055	
麦初箐组一段	T_3m^1	石英砂岩	46	394～5 945	1 966	932	
		泥质粉砂岩	59	188～778	481		
挖鲁八组	T_3wl	炭质泥岩、粉砂岩	49	15～599	315	315	
三合洞组三段	T_3s^3	灰岩	58	580～7 372	2 433	2 433	

通过分析原始测量数据及表 1 可知, 矿区岩石电阻率数值从大到小依次为灰岩>石英砂岩>砂岩>粉砂岩>炭质泥岩>锑矿石; 地层电阻率数值从大到小依次为三合洞组>麦初箐组>挖鲁八组>锑矿石。三合洞组灰岩电阻率平均值为 2 433 Ω·m, 与挖鲁八组(315 Ω·m)和锑矿石(156 Ω·m)存在明显电性差异; 挖鲁八组和锑矿石之间电性差异较明显。因此, 该矿区具备采用音频大地电磁测深(EH4)探测的物性(电性)条件。

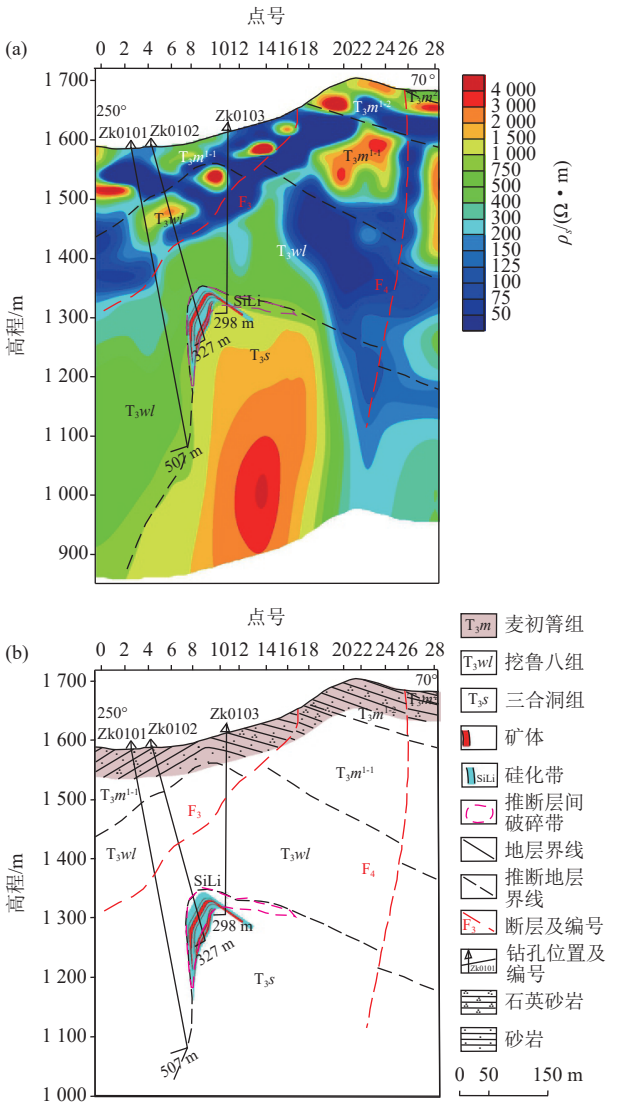
3　AMT 剖面结果

3 条 AMT 剖面与地质剖面套合; 1 线剖面为已知地质剖面(图 3), 钻孔是已知钻孔(ZK0101、ZK0102、ZK0103); 由于 1 线 AMT 剖面视电阻率反演成果与已知钻孔资料吻合, 故 1 线设置反演参数是合理的, 参数为: 地下顶层(第一层)厚度为 15 m, 层与层厚间系数为 1.08, 设置层数为 21, 最后反演深度约 750 m。其余两条剖面(3、5 线)视电阻率反演参数与 1 线设置参数一致, 钻孔为验证钻孔(ZK0301、ZK0302、ZK0303、ZK0501); 根据物性测定结果、地质资料及已知钻探资料综合对 3 条 AMT 剖面进行解释推断。

3.1　1 线剖面视电阻率反演结果与解释

从反演视电阻率剖面(图 3)可见, 浅部显示为高、低阻相间的特征; 中深部西段(0～18 点号)呈中高阻特征, 中深部东段(18～28 点号)呈中低阻特征; 底部呈高阻特征。浅部低阻带推断主要为地层界线(麦初箐组一段一、二亚段、麦初箐组与挖鲁八组)和断裂(F_3、F_4), 高阻推断局部为石英砂岩; 中深部中低阻推断为挖鲁八组炭质粉砂岩和局部断裂破碎带; 深部和底部高阻推断为三合洞组灰岩。推断断裂(F_3、F_4)错动了地层。背斜轴部推断位于 8～10 号点间, 埋深约 250 m; 背斜西翼推断较陡, 东翼较缓。层间破碎带(硅化带)推断位于高程约 1 350 m; 层间破碎带呈西陡东缓展布特征。以上推断成果与已知钻孔(ZK0101、ZK0102、ZK0103)资料较吻合。钻孔揭露了层间破碎带(硅化带)最厚达 30 m 和数条矿体。

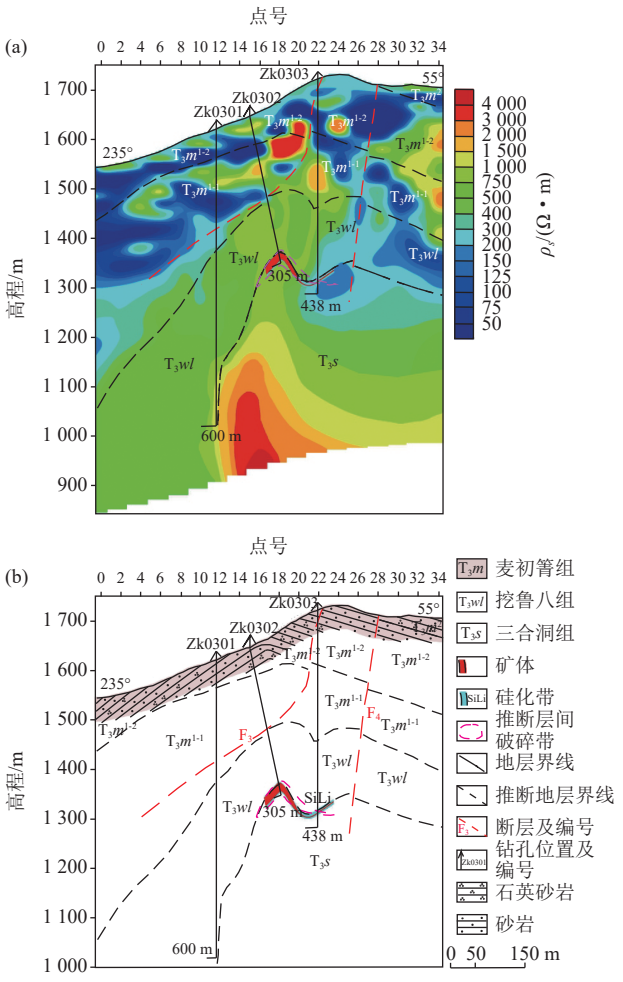
根据 1 线剖面成果、已知钻孔及地质资料综合



a—AMT 剖面反演结果; b—地质及物探推断断面

图 3　1 线物探综合剖面

Fig. 3　Comprehensive geophysical profile of line 1



a—AMT 剖面反演结果; b—地质及物探推断断面

图 4　3 线物探综合剖面

Fig. 4　Comprehensive geophysical profile of line 3

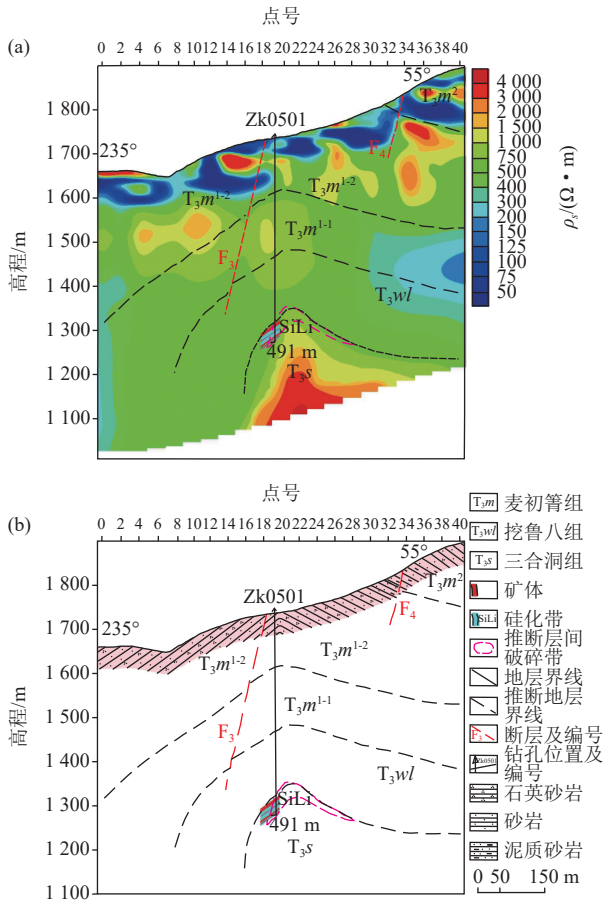
分析, 背斜轴部及两翼转折地段(层间破碎带)处于三合洞组(T_3s)灰岩与挖鲁八组(T_3wl)炭质粉砂岩接触部; 层间破碎带在剖面显示呈“马鞍状”展布的中高阻接触带上; 层间破碎带是矿区的成矿有利部位。

3.2　3 线剖面视电阻率反演结果与解释

从反演视电阻率剖面(图 4)上可见, 浅部电性较复杂; 中深部整体呈中高阻特征, 底部呈高阻特征。浅部低阻带推断主要为地层界线(麦初箐组一段一、二亚段、麦初箐组与挖鲁八组)和断裂(F_3、F_4), 局部存在偏差, 高阻推断局部为石英砂岩; 中深部中低阻推断为挖鲁八组炭质粉砂岩和局部断裂破碎带; 深部和底部高阻推断为三合洞组灰岩。推断断裂(F_3、F_4)错动了地层。背斜轴部推断位于 16～18 号点间, 埋深约 290 m。层间破碎带(硅化带)推断位于高程约 1 375 m; 层间破碎带两翼均呈较陡展布特征。以上推断成果与后期验证钻孔(ZK0301、ZK0302、ZK0303)资料较吻合, 局部存在误差。钻孔揭露了层间破碎带(硅化带)最厚达 20 m 和厚层矿体。

3.3　5 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 5)上可见, 整个剖面电性特征呈“马鞍”状展布, 背斜构造明显; 整个剖面自地表至深部整体呈低、高阻相间层—中高阻层—中阻层—中高阻层共 4 层电性特征; 表层低、高阻相间层推断为地层中的岩性(粉砂岩、石英砂岩)发生变化的原因; 浅部中高阻层推断为挖鲁八组粉砂岩和石英砂岩; 深部中阻层推断为炭质粉砂岩; 底部中高阻层推断为三合洞组灰岩。背斜轴部推断位于 18～20 号点间, 埋深约 390 m, 背斜西翼推断较陡, 东翼较缓。层间破碎带(硅化带)推断位于高程约 1 355 m; 层间破碎带呈西陡东缓展布特征。以上推断成果与后期验证钻孔(ZK0501)资料较吻合。钻孔揭露了层间破碎带(硅化带)最厚达 30 m 和数条矿体。



a—AMT 剖面反演结果; b—地质及物探推断断面

图 5　5 线物探综合剖面

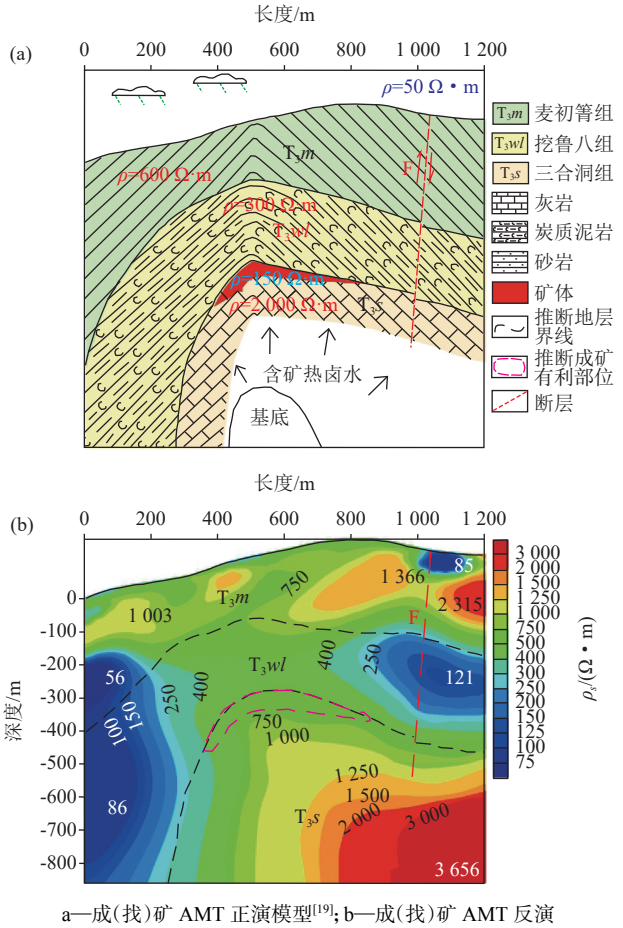
Fig. 5　Comprehensive geophysical profile of line 5

4　讨论

4.1　根据 AMT 讨论矿体与构造和地层的关系

根据音频大地电磁测深成果和已知矿区资料及前人分析成果综合分析, 初步认为晚古生代晚期, 澜沧江洋向东俯冲, 而金沙江洋向西俯冲, 产生了思茅—兰坪盆地, 在近 NE 向与近 NS 向共同构造挤压作用应力下, 形成了盆地内近 NS 向的黑惠江复式背斜(西陡东缓)等褶皱构造, 以及盆地内的 NW、NEE 向断裂系统与推覆构造和隐伏中轴断裂[19]。新生代以来, 受印—亚大陆碰撞的影响, 盆地内部发生大规模走滑断裂, 沿早期产生的隐伏中轴断裂带发育喜马拉雅期岩浆活动、幔流上涌等[22]。在黑惠江复式背斜轴部及附近部位, 上三叠统三合洞组灰岩刚性, 易破碎, 在近水平应力作用下, 与上伏地层炭质粉砂岩间形成层间破碎带, 成为矿区重要的控矿和容矿构造; 在剖面显示呈“马鞍”状展布的中高阻接触带上(图 3、4、5)。地层中的雨水沿断裂(F_3、F_4)和裂隙向深部下渗, 在幔流上涌和岩浆热动力驱动下, 深部热液与下渗地下水混合形成成矿热液。三合洞组灰岩化学性质活泼, 易于交代。当含矿热液沿导矿断裂(F_3、F_4)和裂隙进入层间破碎带时, 在褶皱造成的虚脱空间及次级背斜的转折部位富集沉淀, 顶板的炭质粉砂岩不易渗透, 起到遮挡作用, 使含矿物质不易溢出, 而集中在灰岩内部进行充分交代矿化, 为锑矿形成创造了条件(图 6a)。故该矿床属于中低温热液型矿床[18]。

断裂(F_3)位于背斜西翼, 推断向西较缓倾斜, 并未切穿三合洞组灰岩, 构造活动较弱; 在剖面背斜西翼深部整体呈中高阻为主。断裂(F_4)推断为深部断裂及构造活动较强; 断裂(F_4)在剖面显示产状较陡及中深部呈中低为主, 并切穿三合洞组灰岩中; 断裂(F_4)附近部位较破碎, 故在背斜东翼难以形成较厚矿体。锑矿层空间整体呈“西陡东缓”和“西厚东薄”展布特征(图 3~4)。



a—成(找)矿 AMT 正演模型[19]; b—成(找)矿 AMT 反演

图 6　笔架山锑矿成(找)矿 AMT 模型

Fig. 6　AMT model of Bijiashan antimony deposit formation (exploration)

4.2　构建音频大地电磁法成(找)矿模型

3 条 AMT 剖面成果、物性结果及笔架山锑矿成矿模式图[19], 揭示了矿区的深部地质构造及矿体

分布格架，并初步建立矿区音频大地电磁法成(找)矿理论模型。正演模型中断裂(F)视电阻率取值 50 Ω·m，矿体视电阻率取值 150 Ω·m，三合洞组灰岩视电阻率取值 2 000 Ω·m，挖鲁八组视电阻率取值 300 Ω·m，麦初箐组视电阻率取值 600 Ω·m。根据正演模型生成理论数据再经过反演得到成(找)矿模式 AMT 视电阻率反演(图 6b)；成(找)矿 AMT 反演图与正演模型图及实测 3 条 AMT 剖面成果的形态一致；特别断裂和背斜转折部位(成/找矿有利部位)位置吻合(图 3~5)。音频大地电磁测深方法存在“体积效应”的特性，一方面模糊了模型体的边界，另一方面可以放大目标体的规模[23-24]；“体积效应”导致电性异常往往可能比实际地质体的规模大；在 AMT 反演成果局部存在电性异常面积过大。

4.3 音频大地电磁法的意义

目前大部分浅部矿和老矿山处于开采枯竭状态，故向深部勘查矿产是未来的主方向；褶皱虚脱部位(背斜轴部)、断层及破碎带等构造均是矿体控矿和容矿构造[25-28]，故音频大地电磁法能圈定褶皱虚脱部位(背斜轴部)、断层及破碎带等构造，能有效指导间接找矿。音频大地电磁法有效探测深度 1 km，甚至达 4 km。音频大地电磁法不仅对背斜轴部、断裂及破碎带反映较敏感，而且对岩体反映较敏感[12]。在以后深部地质矿产勘查中，矿体与背斜、断裂、破碎带及岩体有关的矿床，应注重运用音频大地电磁法。

5 结论

1)矿区音频大地电磁法找矿标志：背斜轴部及两翼转折地段(层间破碎带)在剖面显示呈“马鞍状”展布的中高阻接触带上，层间破碎带是矿区的成矿有利部位。

2)矿区剖面 AMT 测深结果显示，背斜西翼较陡、东翼较缓，能有效圈定背斜轴部和层间破碎带的位置，起着间接找矿作用。

3)判识断裂 2 条(F_3、F_4)，推断断裂(F_4)为深部断裂，其构造活动较强，并切穿三合洞组灰岩。

4)音频大地电磁法在笔架山矿区的成功应用表明，该方法对探测同类型矿床是有效的地球物理方法。

参考文献(References)：

[1] 李海军，张善明，梁新强，等. 内蒙古复兴屯超大型银铅锌矿床地质特征及找矿标志 [J]. 矿床地质，2023，42(6)：1175−1194.
Li H J, Zhang S M, Liang X Q, et al. Geological characteristics and prospecting indicators of Fuxingtun giant Ag-Pb-Zn deposit in Inner Mongolia[J]. Mineral Deposits, 2023, 42(6): 1175−1194.

[2] 张朋，刘豹，杨晓飞，等. 新疆阿尔金西段瓦石峡南锂铍稀有金属矿成矿背景与勘查进展 [J]. 中国地质调查，2024，11(3)：17−24.
Zhang P, Liu B, Yang X F, et al. Metallogenic background and exploration progress of the southern Waishixia lithium-beryllium rare metal deposit in the western Altyn Tagh of Xinjiang Province[J]. Geological Survey of China, 2024, 11(3): 17−24.

[3] 张招崇，王怀洪，谢秋红，等. “禹城式”矽卡岩型富铁矿的形成机制 [J]. 现代地质，2024，38(1)：1−12.
Zhang Z C, Wang H H, Xie Q H, et al. Genetic mechanism of the“Yucheng-type”High-grade skarn iron deposits[J]. Geoscience, 2024, 38(1): 1−12.

[4] 李勇，王东波，樊金虎，等. 辽宁大东沟超大型低品位金矿的发现及地质意义 [J]. 中国矿业，2025，34(1)：233−238.
Li Y, Wang D B, Fan J H, et al. Discovery and geological significance of ultra-large low-grade gold deposit in Dadonggou, Liaoning Province[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(1): 233−238.

[5] 欧阳永棚，曾闰灵，舒立旻，等. 朱溪钨铜矿床深部石英脉型黑钨矿成因及其地质意义 [J]. 桂林理工大学学报，2023，43(2)：184−192.
Ouyang Y P, Zeng R L, Shu L M, et al. Genesis and geological significance of quartz vein-type wolframite in the deep of Zhuxi W-Cu deposit[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2023, 43(2): 184−192.

[6] 宋欣，严康，王超，等. 西秦岭湘潭子金矿深部找矿取得新发现(6.358 t)[J]. 中国地质，2024，51(6)：2105−2106.
Song X, Yan K, Wang C, et al. New discovery (6.358 t) of the deep prospecting at the Xiangtanzi gold deposit in West Qinling[J]. Geology in China, 2024, 51(6): 2105−2106.

[7] 赵志坚，杨天春，曹运江，等. CSAMT 在危机矿山深边部勘查中的应用——以湖南稻草湾矿区锑矿为例 [J]. 湖南科技大学学报:自然科学版，2024，39(3)：36−44.
Zhao Z J, Yang T C, Cao Y J, et al. Application of CSAMT to deep-edge exploration in crisis mines: -taking antimony exploration in the daocaowan mining area of Hunan Province for an example[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology:Natural Science Edition, 2024, 39(3): 36−44.

[8] 李忠，白兵，黄钊，等. 音频大地电磁法在羊场超大型隐伏磷矿勘查中的应用 [J]. 地球学报，2025，46(2)：449−455.
Li Z, Bai B, Huang Z, et al. Application of audio magnetotelluric method in the exploration of large-scale hidden phosphate ore in Yangchang[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2025, 46(2): 449−455.

[9] 吕志成，龙宝林，庞振山，等. 找矿突破战略行动以来中国主要金属矿产勘查进展及未来勘查规划 [J]. 矿产勘查，2024，15(11)：1974−1990.
Lyu Z C, Long B L, Pang Z S, et al. Exploration progress of major metal mineral resources in China and future exploration plan[J]. Mineral Exploration, 2024, 15(11): 1974−1990.

[10] 王登红，代鸿章，刘善宝，等. 中国战略性关键矿产勘查开发进展与新一轮找矿的建议 [J]. 科技导报，2024，42(5)：7−25.
Wang D H, Dai H Z, Liu S B, et al. Progress in strategic critical minerals exploration and production and proposals for a new round of prospecting in China[J]. Science & Technology Review, 2024,

42(5): 7−25.

[11] 谭红艳, 吕骏超, 刘桂香, 等. 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, 2011, 47(6): 1133−1141.
Tan H Y, Lyu J C, Liu G X, et al. Application of the audio-frequency magnetotelluric method to search for concealed ore bodies in southeastern Hubei Province[J]. Geology and Prospecting, 2011, 47(6): 1133−1141.

[12] 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 the Donglufang copper-molybdenum polymetallic deposit, Shangri-la, China[J]. Journal of Geomechanics, 2023, 29(1): 48−59.

[13] 周艳晶, 李建武, 王高尚, 等. 全球锑矿资源分布及开发现状 [J]. 中国矿业, 2014, 23(10): 13−16.
Zhou Y J, Li J W, Wang G S, et al. Distribution and development situation of global antimony resources[J]. China Mining Magazine, 2014, 23(10): 13−16.

[14] 王岩, 王登红, 王永磊, 等. 基于地质大数据的中国锑矿空间分布规律定量研究 [J]. 中国地质, 2021, 48(1): 52−67.
Wang Y, Wang D H, Wang Y L, et al. Quantitative research on spatial distribution of antimony deposits in China based on geological big data[J]. Geology in China, 2021, 48(1): 52−67.

[15] 毛景文, 杨宗喜, 谢桂青, 等. 关键矿产——国际动向与思考 [J]. 矿床地质, 2019, 38(4): 689−698.
Mao J W, Yang Z X, Xie G Q, et al. Criticalminerals: International trends and thinking[J]. Mineral Deposits, 2019, 38(4): 689−698.

[16] 王登红. 关键矿产的研究意义、矿种厘定、资源属性、找矿进展、存在问题及主攻方向 [J]. 地质学报, 2019, 93(6): 1189−1209.
Wang D H. Study on critical mineral resources: significance of research, determination of types, attributes of resources, progress of prospecting, problems of utilization, and direction of exploitation[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(6): 1189−1209.

[17] 王加昇, 付浩, 侯德发, 等. 华南锑矿带单锑型锑矿床 “两层楼” 二元成矿模型——以滇东南木利锑矿床为例 [J]. 地球学报, 2024, 45(4): 502−514.
Wang J S, Fu H, Hou D F, et al. The “two-story binary metallogenic model” for pure stibnite deposits in the South China antimony ore belt: A case study of the Muli antimony deposit in southeastern Yunnan Province[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2024, 45(4): 502−514.

[18] 肖昌浩, 李龚健, 刘欢, 等. 云南巍山笔架山锑矿床辉锑矿稀土微量元素特征及其矿床成因意义 [J]. 地质力学学报, 2016, 22(2): 310−324.
Xiao C H, Li G J, Liu H, et al. Characteristics of rare earth and trace elements of stibnite from the bijiashan antimony deposit, southwest Yunnan: Implications for ore genesis[J]. Journal of Geomechanics, 2016, 22(2): 310−324.

[19] 佟子达. 滇西巍山笔架山锑矿田成矿作用研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
Tong Z D. Metallogenesis of the bijiashan antimony orefield in Weishan County, western Yunnan Province[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018.

[20] 刘国栋. 电磁法和电磁法仪器新进展 [M]. 北京: 地震出版社, 2007.
Liu G D. The new progress of electrognetic method and instruments[M]. Beijing: EarthquakePress, 2007.

[21] 李忠, 吴中海, 汪金明, 等. 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, 2021, 27(2): 317−325.
Li Z, Wu Z H, Wang J M, et al. Using EH4 audio-magnetotelluric sounder to detect the gigantic Qiaojia paleo-landslide and its structural characteristics[J]. Journal of Geomechanics, 2021, 27(2): 317−325.

[22] 邓军, 王长明, 李文昌, 等. 三江特提斯复合造山与成矿作用研究态势与启示 [J]. 地学前缘, 2014, 21(1): 52−64.
Deng J, Wang C M, Li W C, et al. The situation and enlightenment of the research of the tectonic evolution and metallogenesis in the Sanjiang Tethys[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(1): 52−64.

[23] 杨剑, 王桥, 刘伟, 等. 基于宽频大地电磁法的页岩气探测实践——以川西南沐川地区须家河组为例 [J]. 沉积与特提斯地质, 2022, 42(3): 444−454.
Yang J, Wang Q, Liu W, et al. Shale gas detection practice based on the BMT method: A case study of the Xujiahe Formation in the Muchuan area, southwestern Sichuan Basin[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2022, 42(3): 444−454.

[24] 万汉平, 谢迎春, 王桥, 等. 西藏谷露地热田地热资源前景及勘探方向 [J]. 沉积与特提斯地质, 2023, 43(2): 249−260.
Wan H P, Xie Y C, Wang Q, et al. The geothermal prospect and exploration direction of Gulu geothermal field in Tibetan Plateau[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2023, 43(2): 249−260.

[25] 石明, 胡润楚, 冯德山. CSAMT 法在半坡锑矿外围深部找矿中的应用效果 [J]. 地球物理学进展, 2016, 31(3): 1158−1163.
Shi M, Hu R C, Feng D S. CSAMT at the Banpo antimony deposit in the external application of deep ore prospecting effect[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(3): 1158−1163.

[26] 张玙, 金灿海, 沈战武, 等. 滇东北巧家茂租铅锌矿成矿流体中的碳来源及矿床成因浅析 [J]. 矿物岩石, 2018, 38(4): 49−55.
Zhang Y, Jin C H, Shen Z W, et al. The resources of carbon isotope in ore-forming fluids and discussion of ore genesis of the Maozu Pb-Zn deposit, northeast Yunnan Province[J]. Mineralogy and Petrology, 2018, 38(4): 49−55.

[27] 周锃杭, 杨剑波. 云南羊虎头锑矿床矿物组构特征及成因 [J]. 矿产勘查, 2019, 10(12): 3050−3053.
Zhou Z H, Yang J B. Mineral configuration and genesis of Yanghutou antimony deposit, Yunnan[J]. Mineral Exploration, 2019, 10(12): 3050−3053.

[28] 张伟, 廖国忠, 廖震文, 等. 滇东北地区 MVT 型隐伏铅锌矿床的勘查模式研究: 以茂租铅锌矿床为例 [J]. 沉积与特提斯地质, 2023, 43(4): 779−796.
Zhang W, Liao G Z, Liao Z W, et al. Study on the prospecting model of concealed MVT lead-zinc deposits in northeastern Yunnan Province: A case study of Maozu lead-zinc deposit[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2023, 43(4): 779−796.

Application of the audio-frequency magnetotelluric method in deep mineral exploration along the periphery of the Bijiashan antimony deposit in the Weishan area

LI Zhong [1, 2, 3], WANG Jin-Ming [1, 2, 3], ZHANG Rong [1, 2, 3], LI Yuan-Bin [1, 2, 3],
SONG Xu-Feng [1, 2, 3], ZHAO Ming-Hong [4], MA Chao-Wen [4]

(1. *Yunnan Institute of Geological Survey* (*Yunnan Institute of Geological Sciences*), *Kunming* 650216, *China*; 2. *Key Laboratory of Sanjiang Metallogeny and Resources Exploration and Utilization*, *MNR*, *Kunming* 650051, *China*; 3. *Yunnan Key Laboratory of Sanjiang Metallogeny and Resources Exploration and Utilization*, *Kunming* 650051, *China*; 4. *Yunnan Southern Geological Exploration Engineering Co.*, *Ltd.*, *Dali* 671000, *China*)

Abstract: The Bijiashan antimony deposit represents a medium- to low-temperature hydrothermal deposit. Based on the geological characteristics and electrical properties of the deposit, and employing the audio-frequency magnetotelluric (AMT) method, this study detected and analyzed the deep geological structures along the periphery of the deposit, thus effectively identifying the electrical and structural characteristics of the deposit in the subsurface space. Specifically, an AMT-based theoretical model of mineralization (prospecting) was constructed for the deposit. An AMT-based prospecting criterion was determined for the deposit: the anticlinal axis and the transition zones of anticlinal flanks (i.e., interlayer fracture zones) are located on the middle- to high-resistivity contact zone, which exhibits a saddle-shaped distribution on the section. Accordingly, the distribution of the anticlinal core, characterized by steep western and gentle eastern portions, was identified. The anticlinal axis and interlayer fracture zones were accurately localized. Their locations were presumed to be favorable areas for mineralization. The drilling verification of geophysical anomalies reveals the concealed antimony mineralized bodies, marking a breakthrough in deep mineral prospecting and proving the feasibility of the AMT method. Overall, the results of this study demonstrate that the AMT method is an effective geophysical technique in exploring the Bijiashan antimony deposit and other similar deposits.

Key words: Weishan area, Yunnan Province; Bijiashan antimony deposit; electrical property; audio-frequency magnetotelluric (AMT) method; theoretical model of mineralization (prospecting)

(本文编辑: 王萌)