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. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.03.005 ZHAO Z J, YANG T C, CAO Y J, et al. Application of CSAMT to Deep-edge Exploration in Crisis Mines: Take Antimony Exploration in the Daocaowan Mining Area of Hunan Province for an Example [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 39(3):36-44. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.03.005

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

赵志坚1,2,杨天春1*,曹运江1,鲁玉龙1,孙才红2,黄睿1

(1.湖南科技大学 地球科学与空间信息工程学院,湖南 湘潭 411201;2.湖南省国土空间调查监测所,湖南 长沙 410129)

摘 要:近年来,我国许多大中型有色金属矿山经过多年开采后,出现资源严重不足.文章主要针对危机矿山——湖南省锡 矿山锑矿的现状,探讨寻找接续资源的问题,以期在危机矿山深边部取得找矿突破.在锡矿山北部的稻草湾矿区共布设 11 条可控源音频大地电磁测深法(CSAMT)剖面,通过对探测数据进行预处理、静态校正以及二维反演计算等方法,研究该区 受断裂和地层联合控制的隐伏锑矿体的存在状态.研究成果突显了稻草湾矿区控矿断裂的分布特征,并由此推断出隐伏矿 体的标高位置.经后期钻孔验证可知:CSAMT 的解译结果与断裂构造和矿体的位置吻合,表明 CSAMT 法在该区找锑具有较 好的效果,可为今后类似的危机矿山深边部找矿提供科学依据.

关键词:CSAMT;静态校正;稻草湾;锑矿;危机矿山;深边部找矿

中图分类号:P631 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2024)03-0036-09

Application of CSAMT to Deep-edge Exploration in Crisis Mines: Taking Antimony Exploration in the Daocaowan Mining Area of Hunan Province for an Example

ZHAO Zhijian^{1,2}, YANG Tianchun¹, CAO Yunjiang¹, LU Yulong¹, SUN Caihong², HUANG Rui¹

(1. School of Earth Sciences and Spatial Information, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;2. Land Space Survey and Monitoring Institute of Hunan Province, Changsha 410129, China)

Abstract: In recent years, many large and medium-sized non-ferrous metal mines in China have experienced severe resource shortages after years of mining. Focusing on the current situation of the crisis mine, i.e. the Xikuangshan Antimony Mine in Hunan Province, the paper attempts to achieve breakthroughs in mineral exploration in the deep edge of the mine and find continuing resources. Eleven controlled-source audio-frequency magnetotellurics (CSAMT) profiles are laid out in the Daocaowan mining area in the northern part of Xikuangshan Mine. By means of pre-processing, static correction and two-dimensional inversion, the existence state of buried antimony orebody controlled by faults and strata in this area is studied. According to the research results, the distribution characteristics of ore controlling faults in the Daocaowan mining area have been highlighted, and the position of hidden ore bodies has been inferred. The later drilling verification shows that the interpretation results of CSAMT are consistent with the actual situation, such as the positions of fault structure

收稿日期:2024-04-25

基金项目:中国地质调查局老矿山深部和外围找矿项目资助(12120113083200)

^{*}通信作者,E-mail: ytc6803@163.com

area, and can provide scientific basis for future exploration of similar crisis mines in the deep edge. **Keywords**: CSAMT; static effect; Daocaowan; antimony deposit; crisis mine; deep edge prospecting

锑矿是中国的传统优势矿产,而且中国锑矿又以湖南省数量最多、成矿强度最大;随着锑矿勘查工作的进展,我国锑矿地质找矿和矿业开发的重点也逐渐向重要矿区深部转移^[1].锡矿山的锑矿以储量丰富,规模大而闻名全球,被誉为"世界锑都".锡矿山的锑矿主要受构造和地层联合控制^[2-5],其矿体主要赋存于上泥盆统佘田桥组灰岩中,断层下盘和背斜轴部是矿体富集的有利部位.经过长期开发与利用,锡矿山的锑资源接近枯竭,寻找接续资源迫在眉睫.锡矿山"箱型"背斜北倾伏端稻草湾和白云岩地区成矿地质条件优越,找矿前景较好^[6].稻草湾矿区构造复杂,断裂构造纵横交错,矿体埋深大,准确定位含矿层是该区找矿的难点所在,加之锑矿本身与围岩的物性差异不明显,常规电法勘探深度有限,定位深部锑矿和构造位置往往效果不佳.

CSAMT 测量具有探测深度大、抗干扰能力好、分辨率高等特点^[7],在有色金属找矿中取得过较好的应用^[8-18];同时,CSAMT 测量在贵州独山等多个锑矿区的攻深找盲过程中发挥过重要的作用^[19-20].所以,选择可控源音频大地电磁测深法(CSAMT)在稻草湾矿区开展深部找矿工作.该方法圈定了稻草湾矿区主要控矿构造分布特征以及有利的找矿靶区,通过实施钻孔验证,在 58 线和 68 线揭露了工业锑矿体,取得了较好的效果,CSAMT 测量能有效地探测稻草湾矿区深部构造发育情况和锑矿赋存部位,为同类型隐伏锑矿床深部找矿提供指导和借鉴.

1 研究区概况

1.1 区域地质概况

矿区大地构造位置处于扬子板块与华夏板块的过渡带,湘中涟源盆地的中央,位于 NE 向桃江—城步 深大断裂带和 NW 向新化—涟源隐伏断裂带的交汇处(图 1).区内构造格架主要以 NNE 向至 NE 向雪峰 山弧形构造带为主.板溪群浅变质岩系和泥盆系上统佘田桥组灰岩段是区域内锑矿主要赋矿层位.区内岩 浆岩活动频繁,以酸性岩浆岩为主,中-基性岩浆岩相对少见.地表出露有加里东-印支期白马山复式花岗 岩体^[21]、印支晚期沩山、歇马、紫云山等花岗岩体及花岗斑岩等岩脉^[22]、燕山期煌斑岩脉.区域矿产资源丰 富,内生矿产有锑、金、钨、铅、锌、黄铁矿等.锑矿是本区的重要矿产,按产出形态和产状可分为层状、似层 状和交错型脉状锑矿两大类.



图1 研究区大地构造位置(据胡阿香等(2016)修改)^[24]

1.2 矿区地质

稻草湾矿区出露的地层主要为中石炭统壶天群(CH)、下石炭统大塘组(C₁*d*)和岩关组(C₁*y*),其中中 石炭统壶天群(CH)发育于 F₇₅断层上盘的杨家山向斜核部,下石炭统大塘组(C₁*d*)出露于 F₇₅断裂上盘及 杨家山向斜两翼,岩关组(C₁*y*)出露于 F₇₅断裂下盘(图 2).石炭系岩性主要为碳酸盐岩、炭质页岩.稻草湾 矿区南部为锡矿山的老矿山矿床,出露的地层主要为上泥盆统锡矿山组(D₃*x*)和佘田桥组(D₃*s*),其中,佘 田桥组(D₃*s*³)页岩是该区的总屏蔽层,厚度 100 m 左右,佘田桥组(D₃*s*²)灰岩为锡矿山的主要赋矿地层, 厚度 220 m 左右.

矿区褶皱构造主要为稻草湾背斜和杨家山向斜.稻草湾背斜轴长近3km,轴线弯曲,整体轴向NE,背斜南西端扬起,北东端缓和倾伏,两翼岩层产状平缓,有舒缓起伏现象,倾角15°~30°,走向变化较大,背斜轴被多条NW,NWW向断层切割成多段.杨家山向斜发育于F₇₅断层上盘,是杨家山井田的主要控煤构造.

矿区断裂构造主体格架为井字形展布,主要分为 NE 向和 NWW 向两组, NE 向以 F₇₅, F₇₂, F₇₁等为代表, NWW 向以 F₁₄₅, F₈₀₄等为代表, 后者切割前者.

F₇₅断裂是桃江-城步基底断裂的重要组成部分^[23],全长 30 km 左右,为正断层.断裂发育于稻草湾矿区 西部,在稻草湾矿区内走向长度约 5 km,走向 NE,倾向 NW,倾角 45°~70°,上陡下缓,断裂面沿倾向呈波状弯曲,破碎带宽 40~60 m,最窄处 1~2 m,局部构成断块带.F₇₅与其下盘发育的 NE 组次级断裂 F₇₁,F₇₂,F₇₄等呈 "入字"型由南往北展布,该组分支断裂倾向 NW,倾角 50°~70°,断距一般 50~100 m,均为正断层.

锡矿山矿区自上而下划分了Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ号矿体,Ⅰ,Ⅱ号为层状、似层状矿体赋存于佘田桥页岩下部和灰岩间的硅化带中,矿体走向、倾向上连续性较好.Ⅲ,Ⅳ号为侧羽状、透镜状矿体,严格受断裂控制,产于 NE 向断裂下盘,与断裂的走向、倾向基本一致,矿体不连续,具有尖灭再现的特征.层状、似层状矿体规模最大,是该区的主要矿体.围岩蚀变主要为硅化、碳酸盐化、萤石化、黄铁矿化等,与锑矿关系最密切的是硅化.

矿区岩浆岩不发育,仅在矿区东部出露一条煌斑岩脉,走向 NE10°~NE25°,长度大于 10 km,宽 2~4 m, 倾角大于 80°,倾向 NW 或 SE.地表煌斑岩脉主要侵入于石炭系中,在灰岩中较宽而在页岩中较窄,最小仅 0.2 m.煌斑岩为成矿期的产物,与成矿没有直接关系^[24].



图 2 研究区地质简图(据赵志坚等(2024)修改)^[27]

1.3 矿区岩(矿)石电阻率特征

锡矿山矿区的岩矿石的物性特征,前人已经做过大量的测试研究工作.湖南省地质矿产局物探队在野外 对露头进行过小四极测量,在室内进行过标本架测量,并对前人的测试结果进行了总结.中南大学以往在室内 对锡矿山的矿石标本进行了强迫电流法测试,同时在野外现场露头上也进行了电性特征的测量.本次工作区 岩矿石物性特征参照湖南省地质矿产局物探队及中南大学测试结果,见表 1.测试结果表明:(1)不同单位测试的电性参数虽然具体数据不一致,但数量级基本一致,可以互相参照;(2)下石炭系地层的电阻率比上泥盆系地层的电阻率约高一个数量级,有一定差异性;(3)灰岩、砂岩为高阻,页岩为低阻;(4)在泥盆系地层中,矿体的盖层佘田桥页岩(D₃s³)和含赤铁矿层的泥塘里(D₃x³)岩石的电阻率为低阻;(5)纯矿体和黄铁矿含量较高的矿体电阻率较低,与区内其他岩石的电阻率存在数量级的差异;(6)断层的胶结物为中-低阻.该区不同地层和岩性的视电阻率具有一定程度上的差异,可为开展 CSAMT 测量提供工作基础.

数据来源	岩矿石名称 -	电阻率 / (Ω・ m)	
		变化范围	几何平均值
湖南省地质矿产局物探队	锑矿石	16~212	68
	龙口冲砂岩 D ₃ s ¹	3 458~61 240	5 571
	硅化灰岩 D ₃ s ^{2g}	55~61 240	2 116
	孟公坳灰岩 C ₁ y ²	1 076~11 920	5 224
	石磴子灰岩 C ₁ d ¹	550~8 940	2 689
	兔子塘灰岩 D ₃ x ²	1 596~14 120	6 450
	马牯脑灰岩 D ₃ x ⁴	7 730~47 100	20 580
	佘田桥灰岩 D ₃ s ²	5 140~47 100	20 580
	佘田桥页岩 D3s3	19~3 200	413
	测水组页岩 $C_1 d^2$	94~735	245
	断层胶结物	214~4 290	1 845
中南大学	石磴子灰岩 C ₁ d ¹	4 445~38 445	11 908
	佘田桥组下段 D3s1	3 773~26 000	13 490
	下石炭灰岩 C ₁ y	7 021~49 753	14 043
	马牯脑灰岩 D ₃ x ⁴	3 447~34 323	8 926
	兔子塘灰岩 D ₃ x ²	9 641~10 104	9 863
	泥塘里铁矿 D ₃ x ³	1 983~14 342	5 854
	长龙界页岩 D ₃ x ¹	1 720~12 632	4 832

表1 岩(矿)石标本电性测量参数

表1中,两单位对石磴子灰岩(C₁d¹)和马牯脑灰岩(D₃x⁴)测试结果的变化规律不是很一致,这可能 是由于所采集的标本不同、测试手段的不同所致,但二者不含矿,总体都表现为相对高阻,这不影响对后面 CSAMT 结果的解释.

2 CSAMT 工作方法技术

CSAMT 是通过有限长接地导线电流源向地下发送不同频率的交变电流,在地面一定范围内测量正交的电磁场分量,再通过计算卡尼亚电阻率 $\rho_s(\mathfrak{I}(1))$ 和阻抗相位 $\varphi(\mathfrak{I}(2))$ 来探测深部地质体分布的一种人工源频率域电磁测深方法.

$$\rho_{\rm s} = \frac{1}{5f} |E_x / H_y|^2; \tag{1}$$

 $\varphi = \varphi_{E_x} - \varphi_{H_y}.$

式中:f为频率; E_x 为x方向的电场强度,MV/km; H_y 为y方向的磁场强度,nT; φ_{E_x} 为电场相位; φ_{H_y} 为磁场相位.

本次采用的仪器为美国 Zonge 公司生产的 GDP-32 大地电磁系统,采用标量 CSAMT 测量方式.工作频率 为1~8 192 Hz,采用加密频点测量,电流为2~25 A,收发距5 km,供电偶极子长度1.5 km,满足远区测量要求.

由于研究区位于生产矿山附近,虽然干扰水平不大,但实际工作表明矿山电机车的瞬变干扰由于具有频带宽、能量大的特点,还是对本次数据产生了一定的干扰.因此,测量资料首先开展预处理工作,测量数据采用 CMT-Pro 软件进行预处理,对受干扰影响偏离较大的频点数据和进入近区的数据进行剔除;其次,采用小波分析法^[25]进行静态校正,小波分析法进行静态校正时仅去掉剖面浅部的"挂面条"现象,较为完

(2)

整的保留了剖面上有用信息,完整的反映了稻草湾背斜和断层的下延和产状等信息,表明了使用该方法进 行静态处理的有效性;最后采用商用 SCS2D 软件进行二维平滑反演(图 3),得到测点反演电阻率.



图 3 CSAMT 静态校正后二维反演剖面

本次在稻草湾矿区共布置了 11 条 CSAMT 剖面(图 4),物探剖面与地质勘剖面一致,剖面方向 300°~ 120°,测网为 150 m×50 m,各条测线长度均为 1 000 m,共完成物理点数共 231 个,检查点 20 个.



图4 研究区 CSAMT 测线布置平面

3 异常特征及解译

在数据处理和静态校正的基础上开展二维反演研究,根据异常特征推断矿区 NE 向 F₇₂, F₇₁, F₇₄断裂 和 NWW 向断裂 F₈₀₄, F₈₀₃的分布情况,确定了佘田桥页岩(低阻)与佘田桥灰岩(高阻)之间的异常梯度带 (R)为层状锑矿的目标靶区(图 5).



图 5 58~78 线的 CSAMT 二维反演剖面

3.1 断裂异常特征

 F_{72} 断裂:由 11 条剖面共同控制.58 线 600 m 附近存在一条 5~400 Ω ·m 的条带状低阻异常,从近地 表位置一直延伸到高程 200 m;60 线 600 m、62 线 750 m、64 线 600 m、66 线 700 m、68 线 700 m、70 线 650 m、 72 线 600 m、74 线 700 m、76 线 400 m、78 线 500 m 附近等均存在一条带状梯度变化带,其中 68 线的带状 梯度变化带延伸至-100 m;其他剖面则从地表延伸到高程+400 m~+200 m,变化区间为 25~500 Ω ·m,推 测该梯度变化带为 F_{72} 断裂破碎带所致,断裂走向 SW-NE 长大于 1.5 km,倾向 NW.

F₇₁断裂:由 11 条剖面共同控制.58 线 400 m 附近存在一条 100~400 Ω · m 的条带状低阻异常,从近 地表位置一直延伸到高程 300 m;60 线 350 m,62 线 400 m,64 线 400 m,66 线 400 m,68 线 400 m,70 线 400 m,72 线 200 m,74 线 100 m,76 线 100 m,78 线 200 m 附近等均有一条带状梯度变化带,梯度变化带从 近地表位置延伸至+500 m~+300 m,变化区间为 50~500 Ω · m,推测该梯度变化带为 F₇₁断裂破碎带所 致,断裂走向 SW- NE 长大于 1.5 km,倾向 NW.

F₇₄断裂:由 58-64 线 4 条剖面控制,58 线 200 m、60 线 250 m、62 线 250 m、64 线 250 m 附近均有一条 带状梯度变化带,梯度变化带从近地表位置延伸至+400 m~+300 m,视电阻率变化区间为 20~500 Ω·m, 推测该视电阻率梯度变化带为 F₇₄断裂破碎带所致,断裂走向 SW- NE 长大于 0.5 km,倾向 NW.

F₈₀₄断裂:由 68 线控制,位于该线 500 m 附近存在一条视电阻率 5~150 Ω·m 的陡倾斜条带状低阻异常,从近地表位置一直延伸到高程-200 m 附近,推测为 F₈₀₄断裂破碎带引起的异常反应,断裂倾向 NNE,倾角约 80°左右.

NWW 向 F₈₀₃断裂:由 58 线控制,在位于该测线 700 m 点号附近,显示存为一条 25~150 Ω·m 的陡倾 斜条带状低阻异常,从近地表位置一直延伸到高程-100 m 附近.

3.2 含锑目标层特征

从本次二维反演的 11 条测线整体看出,高低阻异常分带性明显,地表至+400 m 标高左右为一高阻异 常带,该高阻带整体往 SE 倾,主要以条带状分布,以剖面中部和东部反映比较明显,根据矿区地层及岩性 判断,该高阻异常带为下石炭统灰岩、页岩和上泥盆统锡矿山组灰岩所引起.在该高阻异常带下部逐渐出 现一低阻异常带,厚度约 150 m,该低阻异常带整体往 SE 倾,为矿体总屏蔽层(D₃s³)页岩和上部的赤铁矿 层所引起.在该低阻异常带下部为一厚大的高阻异常,该异常为佘田桥灰岩、佘田桥砂岩以及深部的棋梓 桥灰岩所引起,根据锡矿山揭露的地层厚度,该组灰岩、砂岩地层厚度约 1 000 m.通过分析得出,矿区整体 异常形态特征明显,显示为"高阻—低阻—高阻"的分布规律,由低阻向高阻过渡部位(R)即为含矿目标 体的赋存位置,根据锡矿山层状矿体赋存规律^[26]和岩矿石视电阻率值判断,靠近控矿断裂下盘,视电阻率 值在 400~2 000 Ω·m 最佳找矿靶区.

3.3 靶区选择

通过分析锡矿山矿区控矿规律,构造交汇部位是成矿、赋矿的有利条件^[4],靠近 NE 向控矿断层下盘 矿体变厚变富,远离断裂矿体变薄变贫,甚至尖灭.根据矿区控矿规律认识,结合物探工作成果,在58 线和 68 线存在2组构造交汇的有利部位,同时,异常显示这2处有含矿有利高低阻异常过渡带(R)分布.其中 58 线 F₇₂和 F₈₀₃断裂之间的 R 异常值范围为 400~2000 Ω·m,推断矿体赋存标高范围为+250 m~+150 m (图 7a).68 线, F₇₂和 F₈₀₄断裂交汇部位,有利含矿高低阻异常过渡带(R)呈现倾斜状,推测由 F₈₀₄断裂引 起,异常值范围为 400~1 000 Ω·m,矿体赋存标高范围为+50 m~150 m 标高(图 7b).据此优先选择 58 线 和 68 线靠近 F₇₂断裂下盘开展钻孔验证.

4 异常验证

4.1 地表查证

在布置钻孔验证之前,对 CSAMT 测量推断的 F₇₂断裂和 F₈₀₄断裂开展地表实地查证.在 58 线 650 m 附 近进行现场踏勘,发现 F₇₂断裂通过部位(图 6a),断裂上、下盘均为 C₁y³ 中厚层状灰岩,断裂上盘岩石具 轻微扭曲变形,下盘岩石具碎裂化,断裂破碎带由方解石、灰岩角砾及断层泥组成,宽约 1.1 m,产状 320°∠59°.

在 68 线 500 m 点位附近进行现场踏勘,发现 F₈₀₄断裂(图 6b),断裂发育于 C₁y³ 厚层状灰岩中,断裂 面平整,在断裂面上有方解石发育,方解石上可见明显的断层擦痕,断层产状 350°∠80°.通过野外地表查 证,证实了 CSAMT 测量推断的断裂位置与实际位置基本吻合.



图 6 F₇₂和 F₈₀₄断层野外查证位置

4.2 钻探验证

为验证 CSAMT 测量推断的含矿目标体及其位置,在 58 线 400 m 点位实施了 ZK1 钻孔(图 7a),在标高+230 m,视电阻率 500 Ω·m 左右的位置,揭露了受 F₇₂断裂和 NWW 向 F₈₀₃断裂联合控制的层状、似层 状锑矿体,辉锑矿呈不规则状、团块状等分布于硅化灰岩中(图 8a、图 8b),锑品位 0.72%~4.62%,矿体厚 度约 5.1 m,硅化灰岩厚度达 10 m,锑矿往 SE 倾,产状平缓,与异常套合较好,见矿位置在预测范围内.在 68 线 350 m 点位实施了 ZK2 钻孔(图 7b),在标高-100 m 视电阻率约为 400 Ω·m 左右的位置,揭露了受 F₇₂断裂和 NWW 向 F₈₀₄断裂联合控制的层状、似层状锑矿体,辉锑矿呈浸染状、针状等分布于硅化灰岩中 (图 8c、图 8d),锑品位 0.88%~6.27%,厚度约 4.3 m.钻孔见矿实际位置与推断的见矿范围相吻合,但与异 常倾向呈大角度相交,推测该处陡异常是受 NWW 向断裂构造影响而引起.本次钻孔揭露的锑矿体均为 F₇₂断层下盘同一含矿层位的层状锑矿体.







图 8 钻孔见矿岩芯样本

5 建议与结论

5.1 建议

1)本次 CSAMT 测量测深设定为 800 m,从结果来看,68 线矿体埋深已经达到 800 m,70 线~78 线矿体 埋藏深度已超过勘探设定深度 800 m,其异常反应有可能会出现一定的误差,建议下一步先在 58 线~68 线 范围开展勘查工作,由南至北逐一验证,待摸清规律后再开展 70 线以北的工作.

2) 稻草湾矿区断裂构造极为发育,本次工作主要对 NE 向断裂进行了解译,但对 NW 向、NWW 向的左 形平移的正断层没有解译,它们切错 NE 向断裂,对深部矿体有影响,建议下一步勘查工作应重点评价该 组 NW 向、NWW 向断裂的发育特征和控矿性.

5.2 结论

1)本次 CSAMT 测量基本查明了 NE 向 F₇₂, F₇₁, F₇₄和 NWW 向 F₈₀₄, F₈₀₃断裂的分布特征.

2)上泥盆系佘田桥组页岩段(D₃s³)和灰岩段(D₃s²)的高低阻梯度带(R)为该区深部锑矿的找矿 靶区.

3) CSAMT 法在稻草湾矿区深部找矿中能有效指导钻孔设计,指导深部勘探工作,为同类型矿床深部 找矿提供参考.

参考文献:

[1] 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.

[2] 戴塔根,陈国达.锡矿山锑矿控矿构造:"三层楼"模式及其意义[J].中南工业大学学报,1999(4):342-344.

[3] 胡雄伟, 裴荣富, 吴良士. 湖南锡矿山超大型锑矿聚矿构造分析[J]. 矿床地质, 1994, 13(S1): 90-91.

- [4] 陶琰, 高振敏, 金景福, 等. 湘中锡矿山式锑矿成矿地质条件分析[J]. 地质科学, 2002, 37(2): 184-195.
- [5] 匡文龙. 浅谈锡矿山超大型锑矿床的成矿模式[J]. 世界地质, 2000, 19(1): 26-30.
- [6] 谭梦林, 司妍博. 锡矿山锑矿现状认识及北端找矿前景分析[J]. 南方金属, 2018(2): 13-16.
- [7] 刘红涛,杨秀瑛,于昌明,等.用 VLF、EH4 和 CSAMT 方法寻找隐伏矿:以赤峰柴胡栏子金矿床为例[J]. 地球物理学 进展,2004,19(2):276-285.
- [8] 曾庆栋, 沈远超, 刘铁兵, 等. 胶东牟平发云夼金矿区地球物理综合找矿研究[J]. 湘潭矿业学院学报, 2001,16(4): 17-19.
- [9] 卢鸿飞, 王志福, 王恒, 等. CSAMT 测深和重力测量技术在哈密白山钼矿深部找矿和远景评价中的应用[J]. 地球物 理学进展, 2013, 28(3): 1547-1556.
- [10] 王振亮, 林天亮, 蔡永文, 等. CSAMT 法在东岗铜、铁矿勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2015, 39(2): 268-272.
- [11] 马振波,杨骁,苏永锋,等.河南栾川矿集区深部资源综合物探找矿勘查[J].地质与勘探,2022,58(4):846-856.
- [12] 陆桂福, 刘瑞德. 大功率激电和 CSAMT 在隐伏矿产勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2014, 38(5): 921-924.
- [13] 蒋卉, 黄理善, 卢见昆, 等. 物探方法 CSAMT 在桂北某金矿区深边部找矿预测应用[J]. 矿产与地质, 2023, 37(5): 1057-1062.
- [14] 黄理善, 侯一俊, 杨红, 等. 斑岩型铜矿床带条件约束的 CSAMT 数据精细处理和反演解释[J]. 物探与化探, 2015, 39(4): 817-822.
- [15] 陈小龙,高坡,程顺达,等.西藏帮浦东段一笛给铅锌矿区 CSAMT 异常特征与深部找矿预测[J]. 物探与化探, 2021, 45(2): 361-368.
- [16] XIA F, SONG H W, WANG M, et al. Analysis of prospecting polymetallic metallogenic belts by comprehensive geophysical method[J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2019(3): 237-244.
- [17] XU L Y, YIN Y T, JIN S, et al. CSAMT constraints on the metallogenic mechanism of the Zhaishang gold deposit, West Qinling, China[J]. Exploration Geophysics, 2022, 53(4): 359-371.
- [18] 刁理品, 黎树明. 贵州独山半坡锑矿 CSAMT 法深部找矿预测[J]. 金属矿山, 2017(2): 81-88.
- [19] 潘金权, 孙俊, 沈维佳, 等. 黔南独山锑矿田找矿突破思路及找矿模型[J]. 地质科技情报, 2017, 36(5): 181-186.
- [20] 柳建新, 刘嵘, 郭荣文, 等. 电磁法在有色金属矿产勘查中的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(1): 261-284.
- [21] 王川, 彭建堂, 徐接标, 等. 湘中白马山复式岩体成因及其成矿效应[J]. 岩石学报, 2021, 37(3): 805-829.
- [22] 丁兴, 孙卫东, 汪方跃, 等. 湖南沩山岩体多期云母的 Rb-Sr 同位素年龄和矿物化学组成及其成岩成矿指示意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(12): 3823-3840.
- [23] 吉让寿. 湖南锡矿山锑矿田成矿期构造特征及控矿机制[J]. 地球科学—武汉地质学院学报, 1986, 11(5): 525-532.
- [24] 胡阿香, 彭建堂. 湘中锡矿山中生代煌斑岩及其成因研究[J]. 岩石学报, 2016, 32(7): 2041-2056.
- [25] 于生宝,郑建波,高明亮,等. 基于小波变换模极大值法和阈值法的 CSAMT 静态校正[J]. 地球物理学报, 2017, 60 (1): 360-368.
- [26] 谌锡霖, 蒋云杭, 李世永, 等. 湖南锡矿山锑矿成因探讨[J]. 地质论评, 1983, 29(5): 486-492.
- [27] 赵志坚, 雷洁, 徐昊, 等. 湘中稻草湾锑矿区矿体空间分布规律及深边部找矿预测[J]. 矿产与地质, 2024, 38(2): 219-230.