

文章编号: 1000-4734(2020)04-0502-08

激发极化法在黔西北洗线沟铅锌矿床 找矿中的应用

卢卯¹, 黄凯¹, 蒋海民¹, 曾道国¹, 蒲庆隆¹, 唐永永²

(1. 贵州省有色金属和核工业地质勘查局 地质矿产勘查院, 贵州 贵阳 550005; 2. 中国科学院 地球化学研究所
矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 黔西北地区铅锌矿的勘查已经进入攻深找盲阶段, 常用物探方法在该区是否可以发现300~1000 m或更深的铅锌矿致异常, 是很多贵州物探工作者正在思考和探索的一个重要课题, 问题的解决与否对于该区目前及今后的找矿工作具有很强的现实意义。根据时间域激发极化法测深的理论, 认为在使用大功率、合适的装置和延时等参数条件与深部隐伏盲矿耦合较好的情况下, 可以发现大于300 m深部铅锌矿致异常。为证实该方法深部应用的可行性, 作者在黔西北赫章洗线沟已知铅锌矿体上开展了不同装置、不同供电周期的大功率激发极化法测深试验。试验结果表明, 采用加密等比装置测量方式, 选择合适的极距, 在采用供电周期为32 s, 延时为200 ms, 采样宽度200 ms时, 可以发现较好的深部铅锌矿异常, 等比对称四极测深 $MN/AB=1/10$, 取深度校正系数为0.41进行反演, 可以准确确定异常位置, 值得在该区推广使用。

关键词: 时间域激发极化法; 加密等比装置; 深度校正; 洗线沟铅锌矿

中图分类号: P631

文献标识码: A

doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2020.40.027

第一作者: 卢卯, 男, 1981年生, 高级工程师, 长期从事物探技术与管理工作. E-mail: 33270690@qq.com

Application of the induced polarization method in mineral prospecting of the Xixiangou lead-zinc deposit in the northwestern Guizhou, China

LU Mao¹, HUANG Kai¹, JIANG Hai-min¹, ZENG Dao-guo¹, PU Qing-long¹, TANG Yong-yong²

(1. Institute of Geology and Mineral Resource Exploration, Non-Ferrous Metals and Nuclear Industry Geological Exploration Bureau of Guizhou, Guiyang 550005, China; 2. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China)

Abstract: The exploration of lead-zinc ore in the Northwestern Guizhou has been currently focused on the concealed Pb-Zn resources in depth of the area. Whether found the geophysical anomalies, caused by the lead-zinc mineralization, could be detected or discovered at depth of 300–1000 m or even deeper place in this area by using normal geophysical prospecting methods is an important research topic which is currently considered by many geophysical prospecting workers in Guizhou Province. Whether the problem could be solved or not is of great practical significance to the present and future prospecting work of Pb-Zn resources in this area. Based on the theory of time-domain induced polarization sounding method, we have believed that under the condition of better coupling between the parameters, including high power, suitable device, and delay timing, and concealed orebodies in depth, the anomalies caused by lead-zinc orebodies in depth of higher than 300 m can be found. In order to verify the feasibility of this method applied to the mineral exploration in depth, we have carried out the high-power induced polarization sounding test by using different devices and different times of power supply cycles on the boreholes of known orebodies in the Xixiangou lead-zinc deposit in Hezhang of the Northwestern Guizhou in this paper. The test results show that good anomalies, caused by Pb-Zn orebodies in depth, can

收稿日期: 2020-06-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: U1812402; 41430315)

be outlined with the data obtained by using the encryption unequal ratio device measurement method of the IP ladder under conditions including the suitable distance of electrodes, the power supply cycle time of 32s, the delay time of 200 ms, and the sampling width of 200 ms. The locations of IP anomalies inverted by using data of the isometric symmetrical quadrupole sounding measurement of IP under MN/AB=1/10 and depth correction coefficient of 0.41 can be accurately determined. Therefore, this method is worth to be promoted for applying into the exploration of Pb-Zn resoces in this area.

Keywords: The time-domain induced polarization method; encryption unequal ratio device; depth correction; the Xixiangou lead-zinc deposit

黔西北黔铅锌成矿区是贵州省重要的铅锌产地之一, 一直以来, 许多学者针对该区的找矿模式^[1-2]、地质特征、控矿条件^[3-7]、成矿规律、成矿预测^[8-12]做了大量研究, 多认为该区地质条件优越, 已知矿区深部具有较好的找矿潜力。但怎样在该地区找到深部隐伏铅锌矿, 是一个值得探讨的技术问题。激发极化法 (IP) 中梯装置和对称四级测深作为一种有效的找矿方法组合, 在该区应用已取得良好的找矿效果^[13-15]。加大功率, 改变装置和测量参数是否可以发现更深的隐伏铅锌矿体, 前人研究认为, 提高信噪比, 选择一种探测深度大的排列, 合适的采样参数与深部矿耦合较好的情况下, 大功率激电测量可以获得较好的深部铅锌矿异常, 是激电法寻找深部隐伏矿的关键^[16]。本文在前人研究的基础上, 在黔西北赫章洗线沟矿区已知矿体上开展不同装置、不同供电周期、延时和取样宽度的大功率激发极化法试验, 并对该方法的应用效果进行总结, 以期在今后的深部找矿研究和成矿预测中提供参考。

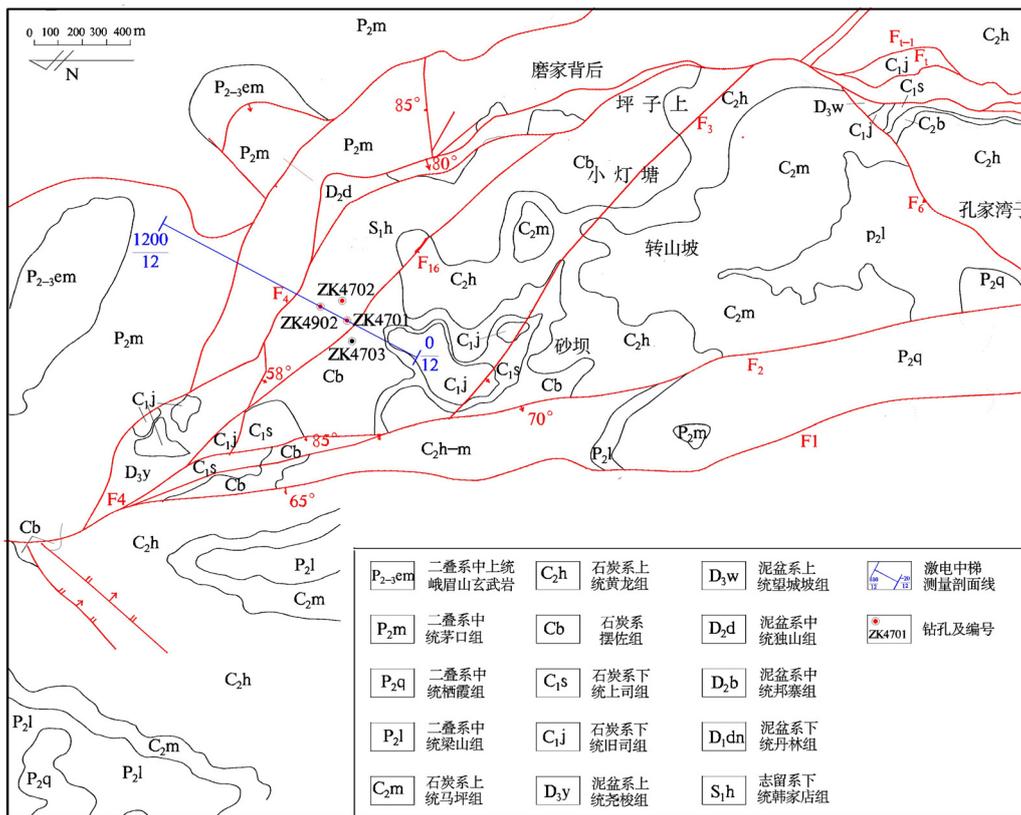


图1 矿区地质及物探工作布置简图

Fig. 1. A sketch map for geology and planned geophysical exploration works in the deposit.

1 研究区地质概况

赫章洗线沟铅锌矿床 NW、SE 分别紧邻猪拱塘超大型铅锌矿床^[7]和铜炉上铅锌矿床, 出露的地层及分布主要岩性有志留系韩家店组(S_{1h})泥岩, 泥盆系丹林组 (D_{1dn}) 硅质白云岩、邦寨组 (D_{2b}) 石英

砂岩、独山组 (D₂d) 白云岩夹泥质白云岩、望城坡组 (D₃w) 灰岩、尧梭组 (D₃y) 白云岩; 石炭系旧司组 (C₁j) 炭质泥岩、上司组 (C₁s) 灰岩、摆佐组 (C₁₋₂b) 白云岩、黄龙组 (C₂h) 灰岩、马平组 (C₂m) 薄层灰岩; 二叠系梁山组 (P₂l) 石英砂岩夹炭质页岩、栖霞组 (P₂q)、茅口组 (P₂m) 灰岩、峨眉山玄武岩组 (P₂₋₃em)。矿床赋矿层位主要为茅口组 (P₂m), 容矿岩石为灰岩。

矿区构造发育, 主要由北西向张性主断裂 F₄ 及近南北向派生的张性分支断裂 F₁、F₂ 构成, 层间剥离带、张性断裂空间及隐伏羽状张裂空间见铅锌矿氧化矿和硫化矿产出。

目前钻孔工程控制铅锌矿(化)体走向长最大约 1500 m, 宽 30~350 m, 延深大于 500 m, 厚度 0.42~6.9 m, 矿石平均品位 w(Pb)= 6.96%, w(Zn)= 17.16%, 伴生 w(Ag)= 65.73×10⁻⁶。在近地表主要见铅锌氧化矿及氧化矿与硫化矿的混合矿石, 深部为硫化铅锌矿石。氧化的金属矿物有菱锌矿、白铅矿、赤铁矿、褐铁矿、铅铁矾等, 脉石矿物有方解石、白云石等。硫化矿物以闪锌矿为主, 其次为方铅矿、黄铁矿。

2 测区地球物理特征

本次电性测试使用仪器为 SCIP 样本岩芯 IP 测试仪, 测试均在野外完成, 岩芯和标本均采用切割机切割成规则柱形, 经过 24 h 浸泡, 尺寸采用多功能游标卡尺进行测量, 过程严格按照《岩矿石物性调查技术规程》(DD2006-03) 8.2.5.3 进行。

岩芯电性测试以赫章洗线沟铅锌矿区见矿钻孔 ZK4701 所采岩芯进行, 岩(矿)石电性参数数据测试统计见表 1, 经过成图(图 2)显示, 各层位岩石具有如下电性特征: 1) 泥盆系望城坡至尧梭组白云质灰岩、志留系韩家店组砂岩和二叠系梁山组黑色炭质砂岩具有低电阻率、低极化率, 极化率和电阻率曲线不规则跳跃强烈, 跳跃幅度差距明显, 其整体上升或降低位置与地层界面对应; 2) 二叠系栖霞-茅口组泥晶灰岩和结晶灰岩层位低极化率相对稳定, 电阻率曲线跳跃明显, 总体呈低极化高电阻率特征。在铅锌矿体上下部位电阻率剧烈跳跃, 推测与围岩发生强烈的硅化、碳酸岩化热液蚀变作用, 形成高阻地质体有关; 3) 铅锌矿段低阻高极化特征明显, 是典型的矿致异常找矿标志。

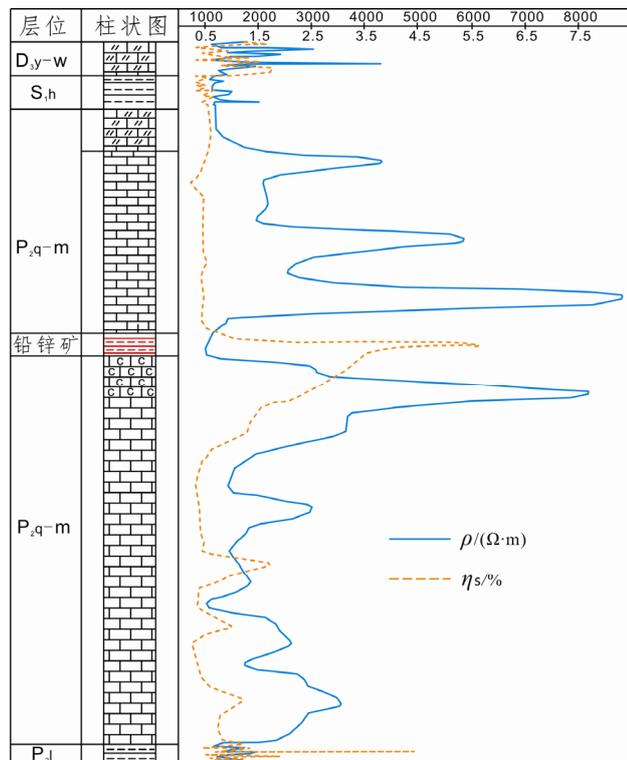


图 2 岩芯样测试极化率、电阻率曲线图

Fig. 2. Curves of polarizabilities and resistivities for core samples.

表 1 岩(矿)石电性参数统计表

Table 1. Statistical table of electric parameters for rocks (ores)

层位	岩性	η/%			ρ/(Ω·m)			备注
		块数	变化范围	均值	块数	变化范围	均值	
D ₃ w-y	白云质灰岩	31	0.2~1.8	0.9	31	396~14227	6286	实测
S ₁ h	粉砂岩	30	0.2~0.6	0.4	30	313~4214	1007	实测
P ₂ q-m	灰岩	30	0.1~2.6	0.5	30	4085~34115	8072	实测
P ₂ l	页岩	30	0.3~4.8	1.0	30	180~4050	1893	实测
	铅锌矿	8	3.6~6.0	4.8	8	17~85	63	实测

3 工作方法及参数选择

3.1 方法及设备

岩芯电性参数测量结果显示, 本区具备开展激发极化法测量的前提, 但从以往经验来看, 激发极化法想要达到较深的勘探深度, 必须有较大的功率和适合的极距和最佳测量参数, 为了解决这些问题, 使得测量达到较好的效果, 本次以已知见矿钻孔 ZK4701 (见矿深度 $H=468\text{ m}$) 为中心, 开展实验性激电测量工作。

仪器使用重庆奔腾仪器厂生产的 WDFZ-10T 大功率激电发射系统, 接收系统采用 WDJ3-3 多道数字直流激电接收机。

3.2 电极排列方向的选择

工作剖面以已知见矿钻孔 ZK4701 为中心, 基本垂直构造、地层走向和矿体走向布置, 为进一步研究极化体的产状, 电极排列方向沿剖面垂直于极化体的走向布极, 且电极排列方向尽可能与地形等高线一致, 故布极方向选择 26° 。

3.3 极距设计及参数

理论上, 激发极化法对称四极测深 $l_{AB/2}$ 为测量深度, 但因地下空间复杂多变, 诸多因素使得实际测量与理论差别较大, 这需要对测量地区物性等地下空间信息有足够的了解, 设计合理的测量装置和参数, 以达到更深更准确的测量目的, 本次测量工作以钻孔岩芯电性测试为前提, 结合以往经验对测量各项参数进行设计。

第 1 组选用大功率激发极化法对称四极测深进行试验, $l_{AB}=2500\text{ m}$, 供电周期为 16 s , 延时选择 200 ms , 采样宽度选择 100 ms 。极距采用不等比装置和等比装置进行, 根据本区所见矿体宽度 $30\sim 350\text{ m}$ 不等, 而 ZK4701 所见矿体宽度未能确认的情况, 需要选择合适的 l_{MN} 才能更好的发现矿体, 通常可以取预计要寻找的矿体的水平厚度作为最佳 l_{MN} 极距^[9], 故不等比装置采用 2 种不同极距 l_{MN} 进行试验, 测量极距 l_{MN} 与供电极距 l_{AB} 的比分别为 $l_{MN}/l_{AB}\approx 0.30$ 和 $l_{MN}/l_{AB}\approx 0.18$, 保持在 $1/30\sim 1/3$ 的范围, 详见电测深极距表 2。

等比装置严格按照 $l_{MN}/l_{AB}=1/10$ 进行, 保持 l_{MN} 与供电极距 l_{AB} 的比保持在 $1/30\sim 1/3$ 范围的最小值, 根据该区深部矿的延伸情况, $l_{AB/2}$ 深部间距加密设计为 50 m , l_{MN} 与 l_{AB} 等比同步增大, 我们把这样的极距设计称为加密等比装置, 详见电测深极距表 3。

根据第 1 组数据结果, 为减小电磁耦合效应对激电法的干扰和提高观测精度, 第 2 组选择了加密等比装置, 考虑到极化率与供电时间和测量延迟时间的关系, 供电周期 16 s , 测量深度可能有限, 本次测量供电周期采用更长的 32 s 和 64 s , 延时选择 200 ms , 采样宽度选择 200 ms 。 $l_{MN}/l_{AB}=1/10$, 最大 $l_{AB}=2500\text{ m}$, 为 $4\sim 5$ 倍的勘查目标深度。

表 2 大功率激电不等比装置对称四极测深极距表

Table 2. Table of symmetrical quadrupole sounding distances of the high power IP unequal ratio device

$l_{AB/2}$	1.5	2.5	4	6	9	15	25	40	65	100	150	220	340	500	750	1000	1250
	← 0.5 →		← 3 →			← 12 →						← 40 →					
$l_{MN/2}$	← 0.5 →		← 3 →			← 20 →						← 70 →					

表 3 大功率激电加密等比装置对称四极测深极距表

Table 3. Table of symmetrical quadrupole sounding distances of the high-power IP encryption equal-ratio device

$l_{AB/2}$	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
$l_{MN/2}$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
$l_{AB/2}$	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	
$l_{MN/2}$	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	

3.4 激电中梯测量

根据矿区矿体特征, 本区矿体宽度在 30~350 m 不等, 想要在勘查深度加大的情况下或得较好的矿致激电中梯异常, 本次试验考虑 l_{MN} 取能与深部矿体最大宽度相当的极距, 根据等比对称四级测深, $l_{AB/2}$ 在 1150 m 处, l_{MN} 为 115 m 时, 获得深部矿致异常较好, 综合测量的各种因素, 本次激电中梯剖面测量参数 $l_{MN/2}=100$ m, $l_{AB/2}=1500$ m, 测量点距 20 m, 供电周期为 32 s, 延时 200 ms, 采样宽度 200 ms。

4 数据处理及成果分析

在钻孔 ZK4701 位置, 激发极化法对称四级测深野外数据采集, 获得测量数据为 V_p (mV), I (mA) 和 η (%), 通过对装置系数 K 和 ρ 进行计算, 对不等比装置采用 $\lg l_{AB/2}$ 为横坐标, 极距变化部分用小 l_{MN} 和大 l_{MN} 的测量值的算术平均值为成图数据, 等比装置采用 $l_{AB/2}$ 为横坐标, 极化率和电阻率为各装置的纵坐标成图。从图 3 可以看到, 不同的 l_{MN}/l_{AB} 获得的激电测深异常在浅部具有相似的极化率曲线形态, 深部各极化率曲线虽为衰减趋势, 但表现出各自不同的形态特征。 $l_{AB/2}$ 从 250 开始, $l_{MN}/l_{AB} \approx 0.18$ 比 $l_{MN}/l_{AB} \approx 0.3$ 峰值特征更明显, 但两者均表现出数据跳动较剧烈, 连续性不强的特点。 $l_{MN}/l_{AB} = 0.10$ 不仅有明显的峰值异常和异常宽度, 而且异常连续性好, 测点数据信息丰富, 信息量大; 从图 4 可知, $l_{MN}/l_{AB} = 0.10$ 同样比其他两组有更好的高阻异常反映, 异常峰值和异常宽度明显, 且曲线形态光滑连续; 以上情况说明 $l_{MN}/l_{AB} = 0.10$ 具有更好的极化率和电阻率异常, 且获得的深部信息更可靠, 更有利于推断深部地质体。

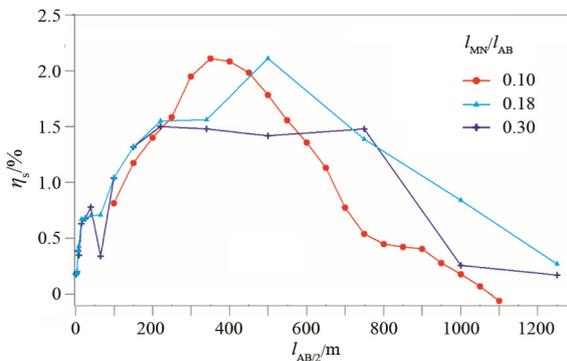


图 3 不同 MN/2 极距的极化率曲线图

Fig. 3. Curves for polarizabilities surveyed under different MN/2 electrode distances.

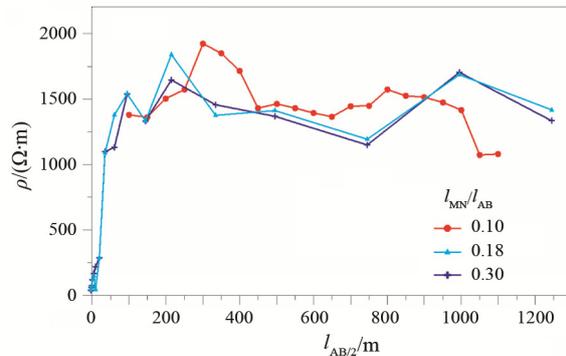


图 4 不同 MN/2 极距的电阻率曲线图

Fig. 4. Curves for resistivities surveyed under different MN/2 electrode distances.

从供电周期为 16 s 的 l_{MN}/l_{AB} 为等比装置的曲线看, 深部衰减明显, 在测量过程我们增大供电电压、供电电流和减小和加大 l_{MN} 均未能继续或得正常的测量值, 说明供电周期为 16 s 测量深度可能有限, 故采用加密等比装置增加测量更大的供电周期为 32 s 和 64 s 的 2 组数据。

图 5 和图 6 显示, $l_{AB/2} < 1000$ m, 加密等比装置不同的供电周期激电测深极化率电阻率曲线形态特征相似, 总体呈单峰高极化率高电阻率特征, 峰值明显, 异常连续多点宽度较大, 供电周期较小的 2 组极化率异常幅度较大较强。当供电周期为 16 s 时, $l_{AB/2}$ 大于 950 m 开始, 极化率曲线衰减较快, 测

量值低于 0.02%； $l_{AB/2}$ 大于 1100 m 后无测量值，电阻率曲线显示浅部高电阻率峰值异常明显，深部同样未能反映低阻异常。当供电周期为 32 s 时， $l_{AB/2}$ 大于 950 m 开始，极化率值逐渐增大，形成深部单峰异常，在 $l_{AB/2}=1200$ m 处达到最高值 1.55%，之后逐渐趋于平稳，高极化率异常明显； $l_{AB/2}$ 为 250~450 m 段电阻率与较小的供电周期基本相同，高电阻率异常明显，且曲线形态连续光滑，深部 $l_{AB/2}$ 在 1000~1200 m 段，出现“V”字形态的低阻异常，异常明显，电阻率最低至 400 $\Omega\cdot m$ 。当供电周期为 64 s 时， $l_{AB/2}$ 大于 950 m 开始，极化率值逐渐增大，有极高化率异常，但异常幅值不大，强度不高，异常宽度较大较平缓；电阻率与较小的供电周期基本相同，高阻异常明显，电阻率整体比供电周期较小的两组测深值要高，在 $l_{AB/2}>450$ 开始幅度增强；深部 $l_{AB/2}$ 在 1000~1200 m 段，出现“V”字形态的低阻异常，电阻率最低至 520 $\Omega\cdot m$ 。

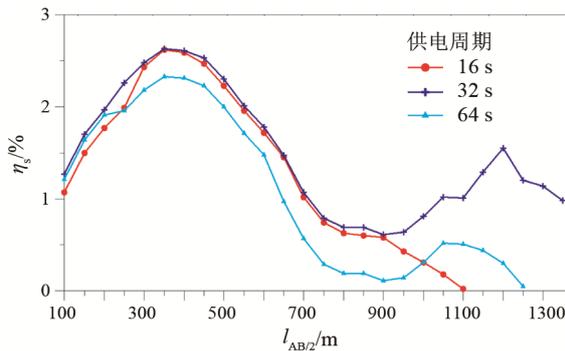


图5 不同供电周期极化率曲线图

Fig. 5. Curves for polarizabilities surveyed under different times of power supply cycles.

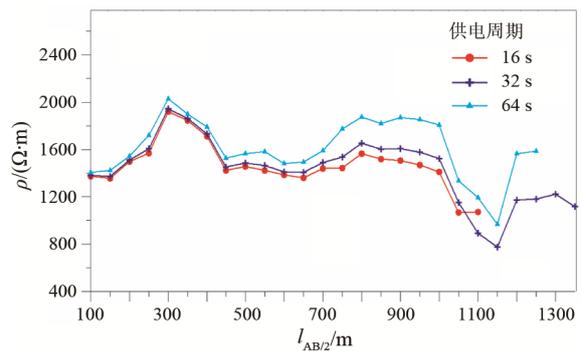


图6 不同供电周期电阻率曲线图

Fig. 6. Curves for resistivities surveyed under different times of power supply cycles.

综上所述，当断电时间为 16 s、32 s 和 64 s 时，均能很好的反映浅部 $l_{AB/2}<1000$ m 以浅的极化率异常体；在深部 $l_{AB/2}>1000$ m 时，较小的供电周期受测量时间的影响，测量深度有限，供电周期 16 s 未能反映深部低阻高级化率异常，供电周期 32 s 和 64 s 能很好的反应深部低阻高级化异常，电阻率特征没有很大的区别，但供电周期 32 s 获得的极化率异常峰值更明显，异常幅度更大，说明供电周期为 32 s 时，在该区具有低阻高级化异常特征，且异常幅度明显，容易识别。

通过多组测深数据与钻孔 ZK7401 对比分析发现，各异常深度和实际的矿化蚀变带和见矿位置存在较大差异，这需要在工作中，结合物性测试和已知矿位置进行经验校正。

装置和供电周期的试验结果认为， $T=32$ s 时，能更好的反映深部地质体异常，根据其极化率和电阻率异常（图 7），对比电性参数测试结果我们发现，浅部的高阻高级化率异常与矿化蚀变特征相符，取 $l_{AB/2}=350$ m，极化率最大值为 2.63% 为矿化带的埋深计算深度校正系数为 0.41，对 $T=32$ s 的测深曲线进行校正（图 8），浅部高阻高级化异常深度为 143~164 m，深部低阻高级化率异常深度为 471~492 m，与见矿深度 468 m 基本吻合。

通过测深试验研究认为，合适的供电周期，较大的供电极距和测量极距，可以获得深部激电测深异常，但激发极化法对称四极测深在野外数据采集过程中，工作难度较大，效率低，如果激法极化法中梯装置能够在平面上发现异常的位置，再做测深验证，这样可以起到事半功倍的效果。根据测试结果，选择供电极距 $l_{AB}=2500$ m，测量极距 $l_{MN}=200$ m， $T=32$ s，在 12 线做了中梯测量，从测量结果看，在剖面 160/12—560/12 段低阻高级化异常明显，640/12—760/12 段高阻高级化异常明显，但极化率曲线跳跃，通过对极化率数据进行 3 点滤波，去除跳点，异常变得明显（图 9）。根据物性测试结果，160/12—560/12 段低阻高级化率异常符合矿致异常特征，推断该异常为深部透镜状矿体引起的矿致异常，对应 ZK4701 所见矿体；640/12—760/12 段高阻高级化率异常可能为深部低品位矿体异常所致，具有深部找矿意义。

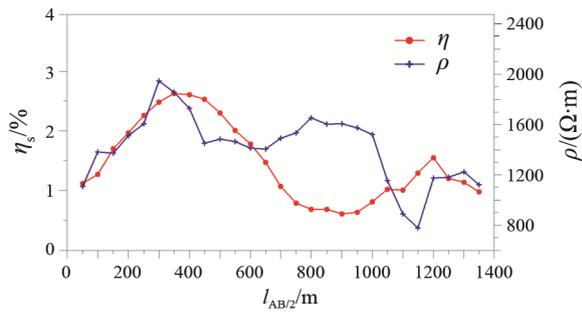


图 7 $T=32$ s 测深极化率电阻率曲线图
Fig. 7. Curves for polarizabilities and resistivities by sounding measurement at $T=32$ s.

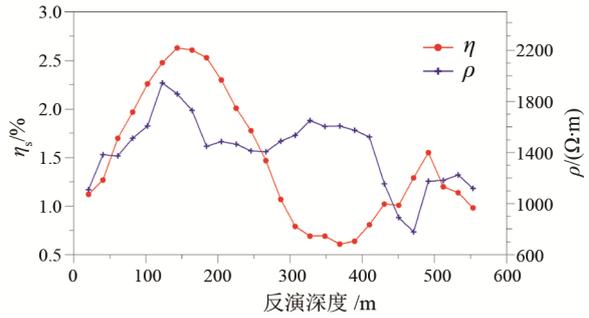
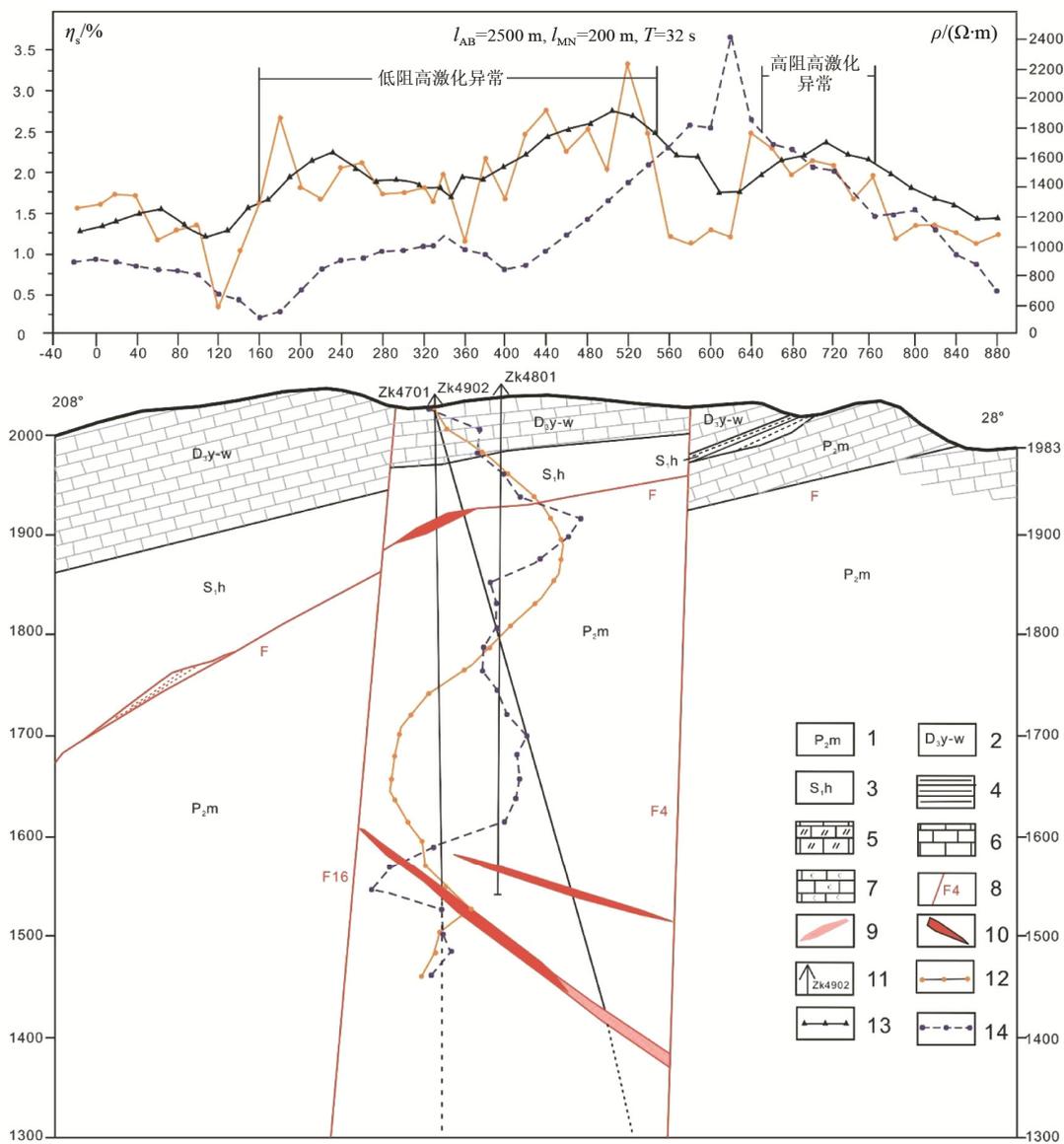


图 8 $T=32$ s 测深极化率电阻率反演曲线图
Fig. 8. The inverted curves for polarizabilities and resistivities by sounding measurement at $T=32$ s.



1-二叠系中统茅口组; 2-泥盆系上统望城坡和尧梭组; 3-志留系韩家店组; 4-炭质砂页岩; 5-白云质灰岩; 6-灰岩; 7-炭质灰岩;
8-断层及编号; 9-矿化体; 10-矿体; 11-钻孔及编号; 12-极化率; 13-极化率三点滤波; 14-电阻率

图 9 12 线地质物探综合剖面图

Fig. 9. Comprehensive section for the No.12 geological and geophysical exploration line.

5 结论

1) 基于矿石与围岩的电性差异特征显著, 结合见矿钻孔物探数据信息挖掘, 数据处理反演深度校正系数取 0.41, 可以提高矿致异常推断的准确性, 相邻区可以借鉴应用。

2) 根据大功率激发极化法不同极距和不同参数的测试试验结果, 大功率激发极化法大极距的 I_{AB} 和 I_{MN} 中梯扫面, 加密等比装置测深, 选择合适的供电周期 T (本次试验最佳周期为 32 s), 可以获得大于 300 m 深度的激电矿致异常。

3) 该区矿体受构造控制, 沿断层下盘层间破碎带透镜状似层状分布特征, 矿体可能随破碎层面产状的变化而变化, 其激电中梯低阻低缓高极化特征, 激电测深低阻高极化单峰异常, 是该区是区内铅锌找矿的重要标志。

参考文献:

- [1] 刘幼平. 黔西北赫章地区铅锌矿成矿规律及找矿模式初探[J]. 贵州地质, 2002, 19(3): 169-174.
- [2] 金中国, 黄智龙. 黔西北铅锌矿床控矿因素及找矿模式[J]. 矿物学报, 2008, 28(4): 467-472.
- [3] 张盛泽, 袁月琴. 黔西北铅锌成矿带控矿地质特征及找矿远景分析[J]. 贵州地质, 2007, 03(5): 193-195.
- [4] 王亮, 张嘉玮, 向坤鹏, 等. 黔西北地区地球物理特征与铅锌矿控矿构造分析[J]. 现代地质, 2019, 33(2): 325-336.
- [5] 代启勇. 贵州省赫章县白腊厂观音山铅锌矿床地质特征及控矿条件分析[J]. 贵州地质, 2015, 32(3): 190-195.
- [6] 宋振涛, 管少斌, 刘禹, 等. 黔西北铅锌成矿带成矿地质条件与找矿标志[J]. 矿产与地质, 2017, 31(3): 460-471.
- [7] 吴大文, 何良伦, 蔡京辰, 等. 贵州赫章县猪拱塘铅锌矿床主矿体地质特征及找矿标志[J]. 贵州地质, 2019, 36(4): 299-306.
- [8] 黄智龙, 张伦尉, 李晓彪. 黔西北铅锌成矿区找矿前景浅析[J]. 矿物学报, 2007, 27(s1): 427-431.
- [9] 陈国勇, 邹建波. 黔西北地区铅锌矿成矿规律探讨[J]. 贵州地质, 2008, 25(2): 86-94.
- [10] 冯玉国, 黄杰, 覃鹏. 黔西北赫章地区铅锌矿远景[J]. 矿产与地质, 2009, 23(3): 225-229.
- [11] 金中国, 黄智龙. 黔西北岷都-蟒洞断裂带铅锌成矿地质特征及找矿潜力分析[J]. 地质与勘探, 2009, 45(2): 20-26.
- [12] 曾道国, 金中国, 罗洪远, 等. 隐伏铅锌矿的找矿预测技术方法探讨——以黔西北丫都铅锌矿床为例[J]. 矿产勘查, 2018, 9(6): 1197-1204.
- [13] 王家骥. 激发极化法在黔西北某铅锌矿勘查中的应用[J]. 四川地质学报, 2014, 34(1): 130-135.
- [14] 卢卯, 蒋海民, 陈贤武, 等. 贵州省赫章县洗线沟—老君洞铅锌矿区物探 TEM 测量报告[R]. 贵州省有色地质矿产勘查院, 2007.
- [15] 闫维华, 刘永锋, 游连强. 综合物探方法在黔西北某铅锌矿勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2016, 40(4): 688-694.
- [16] 温佩琳, 赵秋海. 大深度激发极化法初步探讨[J]. 物探与化探, 1996, 20(5): 329-330.
- [17] 贵州开元矿业有限公司. 赫章县水塘堡乡洗线沟-铜烘山矿区铅锌矿资源情况[R]. 贵州开元矿业有限公司, 2019.
- [18] 柯马罗夫 B A. 激发极化法电法勘探[M]. 北京: 地质出版社, 1983: 241-242.
- [19] 贵州省有色地质矿产勘查院. 黔西北地区铅锌银矿床地质特征、成矿规律、找矿方向及资源评价研究[R]. 2007.