

激发极化法与可控源音频大地电磁法在金属矿勘查中的应用

李丹,张哲*,田超,山显磊,康泉全,胡建华

(中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心,河北廊坊065201)

摘要:激发极化法与可控源音频大地电磁法是矿产资源勘查的有效技术手段,本文从提高金属矿勘查精准度和效率的角度,联合应用激发极化法与可控源音频大地电磁法进行金属矿勘探的技术研究。分析了激发极化法与可控源音频大地电磁法各自的原理和优势,以某地铅锌金属矿的勘查为例,探讨了激发极化法与可控源音频大地电磁法的综合应用策略,结果显示,两种方法在实际应用中可以实现优势互补,能够有效勘查深部隐藏的矿体,而且效率更高,成本更低。

关键词:激发极化法;可控源音频大地电磁法;矿产勘查

中图分类号:P618.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2736(2025)08-0115-9

0 引言

经济高质量发展新常态下,社会生产对各种矿产资源的需求持续增长,地表矿、浅部矿的矿产资源不断减少,矿产开采进入深部开采阶段,增大了找矿难度,运用科学高效的勘查技术,准确勘查金属矿产,成为技术人员需要解决的一个核心问题^[1]。单一勘查方法在实际应用中,存在多解性的问题,无法保障勘查结果的精准性,对此,可以尝试使用综合电法,推动激发极化法与可控源音频大地电磁法的深度结合,通过优势互补来提升勘查效果。实践证明,综合电法在金属矿勘查中,有着良好的找矿效果^[2]。

1 激发极化法与可控源音频大地电磁法概述

1.1 激发极化法

激发极化法 IP (Induced Polarization Method, IP 法) 的基本原理,是依照岩体和矿体的激发极化效应,寻找金属矿藏,解决水文地质问题,属于电法勘探方法的范畴。岩体和矿体的激电效应存在明显差异,通过向地下介质施加人工电场的

方式,金属矿和围岩的交界位置会出现电化学反应,形成相应的极化电荷积累。切断供电后,极化电荷会随着时间的延长逐渐衰减,继而产生附加二次电场,围绕二次电场的极化率、电阻率等参数信息,可以准确判断地下介质的电学差异,明确矿体、含水层等的分布情况^[3]。

激发极化法的优势体现在几个方面,一是抗干扰能力强,二次电场的信号受地表电性不均匀状况的影响较小,与地下介质固有属性相关,这也使得激发极化法在实际应用中不容易受外部环境因素的影响,有着较强的抗干扰能力^[4]。二是工作效率高,激发极化法能够同时采集多维度数据,如极化率、半衰期等,分析地下介质电学性质。三是金属矿识别,正负极化法能够实现对金属硫化物矿和石墨化地层的有效区分,例如,当电流密度为 $0.1\text{A}/\text{m}^2$ 时,黄铜矿的极化率为 20%,碳质板岩的极化率仅为 5%^[5,6]。

1.2 可控源音频大地电磁法

可控源音频大地电磁法 CSAMT (Controlled Source Audio-Frequency Magnetotellurics, CSAMT) 主要是使用人工控制的场源进行频率测深,能够克服天然场源信号微弱的缺陷^[7,8],不过电磁波

本身的非平面特性使得其资料的处理相对复杂。CSAMT 装置包含了发射部分和接收部分,人工场源则分为磁性源和电性源,后者比较常见,实际应用中,需要采用 1-3km 长的接地导线沿固定走向敷设,通过注入特定频率的交变电流在地下建立人工交变电磁场。在接地导线单侧或双侧 60 度张角的扇形探测区域内,按平行排列方式布设测量线缆。这种布置方式可形成以供电导线为基准的对称扇形探测区,通过测量电磁场响应实现地下电性结构探测。测点观测环节,应逐次改变供电频率,对测线方向相应频率的电场分量和磁场分量进行观测,计算随频率变化的阻抗相位及视电阻率,从而达到频率测深的目的^[9]。

CSAMT 同样有着独特的优势,一是勘探范围广,CSAMT 有着很强的穿透力,能够穿透到相对较深的区域,精准识别可能存在的矿体,并对矿体的具体位置、埋深以及贮藏规模等进行明确。二是信息全面,CSAMT 能够提供地下结构的测深信息和剖面信息,在面对金属矿产探测任务时,能够发挥理想效果。三是抗干扰能力强,CSAMT 具备优秀的抗干扰能力,在复杂地质环境中可以实现稳定工作,从而减少外部环境因素对探测结果的影响^[10]。

2 激发极化法与可控源音频大地电磁法在金属矿勘查中的综合应用

以某地铅锌金属矿的勘查为例,使用激发极化法与可控源音频大地电磁法进行勘查,两种方法相互验证和补充,借助激电中梯剖面,测量和识别激电异常,配合可控源音频大地电磁法,测量矿区内隐伏矿的位置、埋深等,确定区域成矿地质条件,为矿产的开采奠定坚实基础^[11]。

2.1 矿区地质特征

该矿区内地质构造十分复杂,可见多处构造异常,包括褶皱、断裂等。区域性断裂对于矿区内的成矿有着明显控制作用^[12,13],能够控制区域基本地层和岩浆岩分布。出露地层岩性复杂,有细砂岩、含泥质灰岩、玄武岩、粉砂岩等,铅锌

矿主要赋存区域为石炭纪地层和泥盆纪地层,最为典型的赋存结构为破碎带,不过后期地壳构造运动可能破坏矿体的完整性和连续性^[14]。依照铅锌矿矿物组合的基本特性,该区内铅锌矿主要分为两大类,第一类是重晶石化氧化型,矿石的品质相对较低,矿物组合为褐铁矿、闪锌矿、重晶石等,第二类是方解石硫化物型,矿石品质相对较高,矿物组合为方解石、黄铁矿、闪锌矿等^[11]。矿区地质简图见图 1。

为了更好地开展金属矿勘查,从矿区不同地层采集样本,测定其电阻率、极化率等电性参数,具体如表 1 所示。

根据区内岩石的出露以及钻探取得的标本情况,我们分别选取了含砂质泥岩、铅锌矿化、褐铁矿化和弱黄铁矿化灰岩、辉绿岩、构造角砾岩等进行了电阻率和极化率的测量。从测量的结果来看,泥岩的电阻率和极化率普遍偏小。

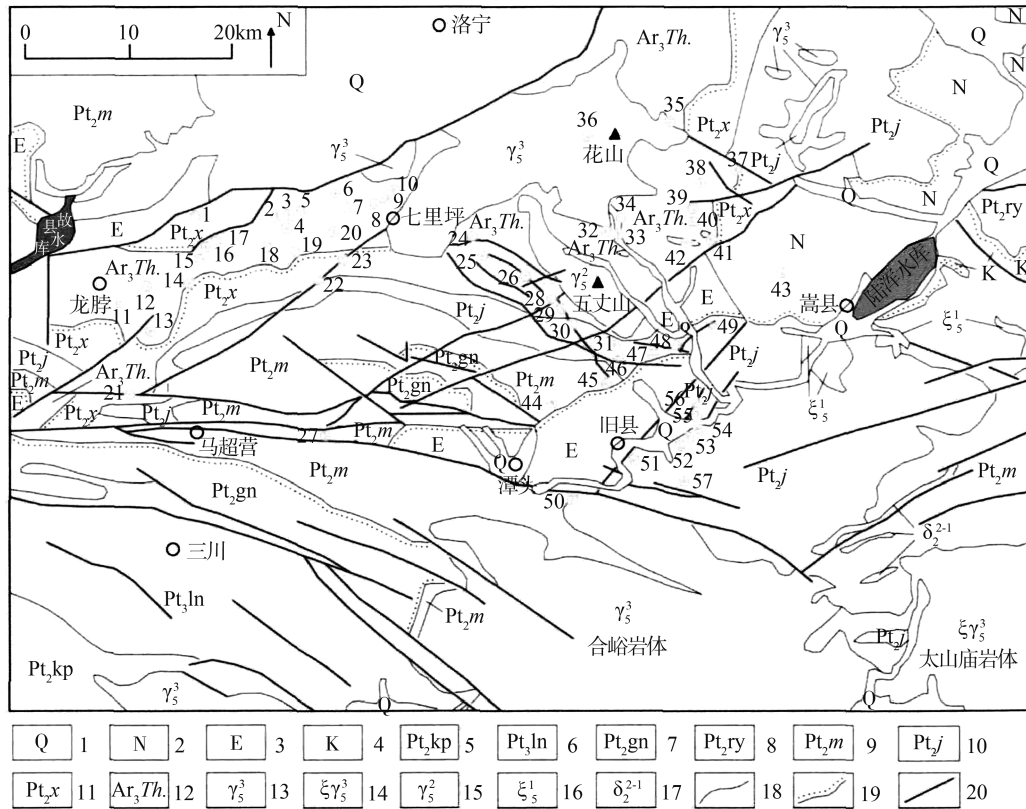
在灰岩标本中,含铅锌矿化灰岩呈现中阻高极化特征,而褐铁矿化灰岩则呈现高阻中高极化特征。弱黄铁矿化灰岩呈现中阻中极化特征,根据区域物性资料,区内岩石的电性特征变化较大,低阻体岩石与高阻体岩石交互出现,其中,泥岩随着泥质的增加,电阻率也不断降低。

测定中,本次测量采用多频相位采集方案,测定频率分别为 0.25Hz、1.0Hz 和 4.0Hz,配合 16s 周期的极化率测定,设置 100ms 信号延时和 200ms 总采样时长。对照表 1 数据分析表明,矿区内的砂质泥岩和辉绿岩地层呈显著低电阻率特征,各种矿化灰岩的电阻率普遍较高,矿体和围岩电性差异明显,能够为电法勘查工作提供良好的物性基础^[15]。

2.2 数据采集处理

2.2.1 数据采集

矿区长期致力于地质勘查活动,成功发现众多矿藏资源,并积累了丰富的勘探经验。然而,矿区地质条件总体复杂,存在诸多干扰因素,加之矿体埋藏深度较大,导致以往地质勘查中所采用的物探技术相对有限且单一。特别是传统电法勘探,由于其固有的局限性,如发射电流强度



1—第四系;2—新近系;3—古近系;4—白垩系;5—宽坪群;6—栾川群;7—官道口群;8—汝阳群;9—熊耳群马家组;10—熊耳群鸡蛋坪组;11—熊耳群许山组;12—太华群未分层;13—白垩纪花岗岩;14—白垩纪正长花岗岩;15—侏罗纪花岗岩;16—三叠纪正长岩;17—元古代闪长岩;18—地质界线;19—不整合界线;20—断层

图 1 矿区地质简图

表 1 矿区主要岩石标本电性参数

标本名称	相位/mrad			电阻率/ $\Omega \cdot m$	极化率/%
	0.25Hz	1.0Hz	4.0Hz		
含砂质泥岩	-3.29	-4.68	-7.17	415.72	0.52
铅锌矿化灰岩	-36.11	-28.02	-29.72	1402.65	10.46
辉绿岩	-11.99	-15.32	-17.11	263.56	2.18
褐铁矿化灰岩	-0.82	-0.95	-1.53	12113.48	1.32
构造角砾岩	-0.71	-0.82	-1.26	18501.33	0.59
弱黄铁矿化灰岩	-2.23	-2.72	-3.53	2624.22	1.61

不足和环境抗干扰能力较弱,未能实现理想的勘查效果。

因此,在综合考虑矿区整体地形地貌和地质水文条件的情况下,采用激发极化法与可控源音频大地电磁法进行找矿作业,为了保障找矿的精准度,先在已知矿段区域实施对比试验,检验方法的可行性,整理地球物理电性标志,总结最佳

技术组合,然后在未知区域勘查金属矿^[16]。数据采集环节,激发极化法供电极距 AB 为 2000m,测线长度 900-1000m,供电周期 32s,延时时间 220ms,叠加次数为 8 次。CSAMT 法 AB 为 1600m,发射极距和接收极距分别为 1600m 和 50m,收发距不低于 8000m,频率范围为 8192Hz-0.3125Hz^[17]。

2.2.2 数据处理

采集到的原始数据中存在不少冗余数据和无效数据,需要通过数据处理的方式做好筛分,提取出有价值的信息。不同勘查方法使用的数据处理技术也会有所差异。

(1) 时间域 IP。时间域 IP 中采集到的原始数据主要是时间域序列,在数据处理中,一是通过专业浏览软件调取接收装置采集的时序数据,系统核查电流、电压、周期及延时等核心参数的完整性与数值合理性等^[18]。二是采用周期同步叠加技术(Periodic Stacking),对多次采集的基波时间序列进行相位对齐、波形叠加和算术平均处理,实现信噪比的理论提升。三是实施电流归一处理,通过衰减曲线数据与发射电流波形的反褶积运算,推导标准 2A 电流激励下的电位衰减响应曲线。四是针对同一个测点进行不少于 3 次的观测,对比同一个参数的重现性,自动删除其中的畸变点或者不符合衰减规律的参数信息,选择均方误差在 5% 以内的数据,计算平均值,获取测点电阻率和极化率^[19]。

(2) CSAMT。矿区内存在比较严重的人文干扰问题,因此在 CSAMT 数据处理中,需要采取有效措施压制电磁干扰问题。具体来讲,一是原始数据解编,使用时间序列分析软件对采集的原始电磁场信号进行饱和度检测,筛选动态范围符合要求的有效数据段进行后续解编处理。二是采用信号增强技术对干扰数据进行处理,通过借助整周期叠加、高低通滤波等措施,压制谐波工频,显著提高数据质量。三是参数的求解,求解不同观测点不同频率在发射电流归一处理后的电场,借助专业的观测装置,通过迭代求解的方

式,获取电阻率以及相应的阻抗相位参数。四是静态位移校正,对于工作区内可能存在的近地表电性不均匀体,可以利用电磁阵列剖面处理的方法,做好电阻率静态位移的校正处理^[20]。

2.3 方法试验研究

IP 与 CSAMT 综合应用方法在实践中是否能够达到预期效果尚未可知,为了验证方法的可行性和实际效果,避免出现后续使用中勘查结果不准确等问题,在矿区内选择一片经过勘查已经发现矿藏的区域开展测试试验。该区域已知矿体包含了浅部矿(埋深在 400m 以内)和深部矿(埋深超过 400m,最大埋深 800m)。结合上文提到的数据处理流程,系统解译各测点观测数据,成功获得激发极化法(IP)的相位、电阻率和极化率参数,以及 CSAMT 的电阻率、阻抗相位参数,绘制相应的曲线图,通过 CSAMT 参数反演获得二维电阻率断面,经过多次迭代优化后,最终反演结果的拟合误差为 4.6%,表明反演结果可靠^[16]。满足地质解译精度要求。

在已知矿体区内,时间域 IP 的极化率表现出了明显的高极化率特征,电阻率则整体处于稳定状态,数值变化较小,时间域 IP 激电曲线如图 2 所示。CSAMT 反演电阻率断面图能够将矿体所在位置和走向清晰展示出来,矿体电阻率表现为从高到低分布。CSAMT 反演电阻率断面(见图 4)有着较强的对应性,可以直观显示地质体的分布特点,矿体所处区域的相位处于高值和低值交界处,向着高值区域倾斜^[19]。

结合图 2 和图 3 分析,空间层面上,电性异常与铅锌矿体有着清晰的对应关系,时间域 IP 剖

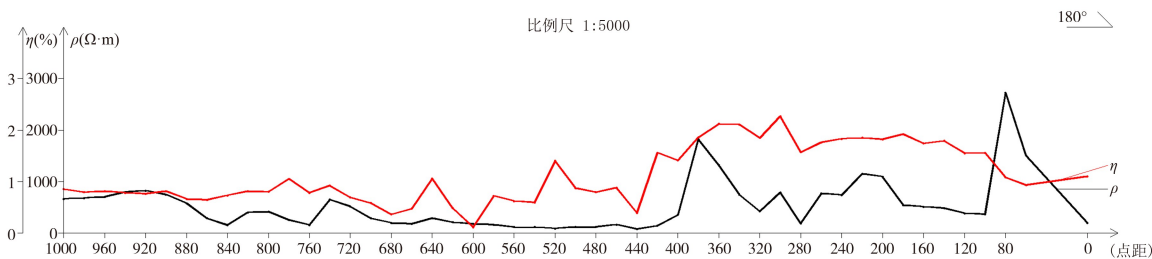


图 2 时间域 IP 激电曲线杨家岭激电中梯 L034 剖面图

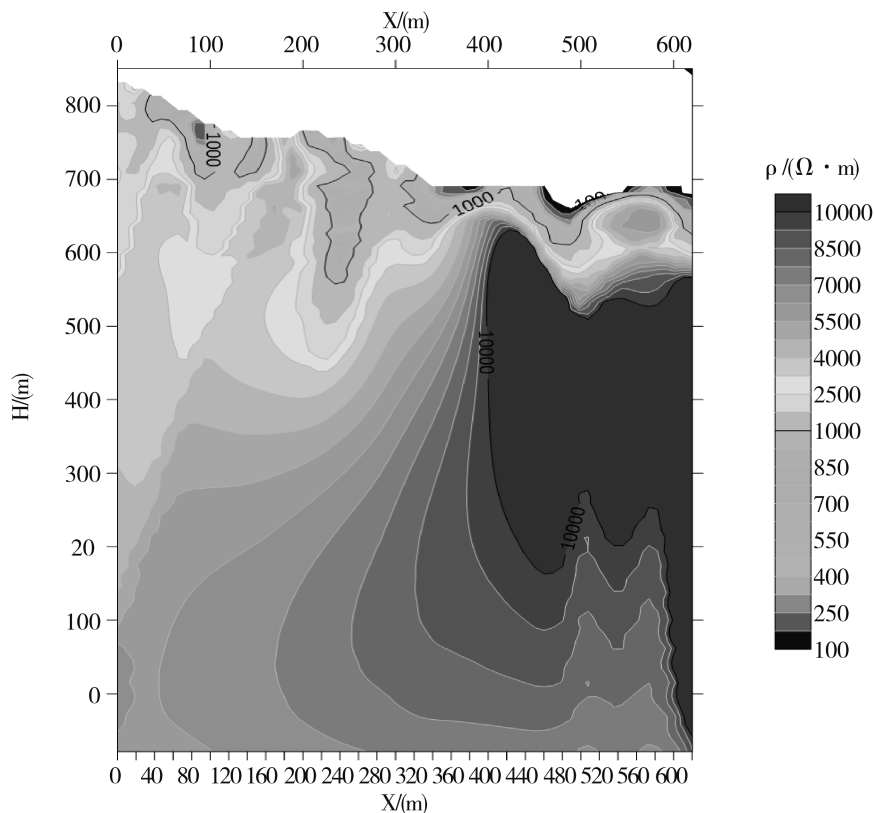


图3 CSAMT 反演电阻率断面

面以及 CSAMT 剖面测量得到的各种参数异常特征都能够用于间接找矿,很好地体现了综合方法在断裂构造识别、矿体追踪等方面的积极作用。三种方法在实际应用中的特点如下:

时间域 IP。已知矿体的激电特征表现为中低电阻、中高极化,时间域 IP 本身有着较高的工作效率,能够实现对地下特殊岩层极化率和电阻率异常的高效捕获,并且精准确定异常范围。

CSAMT。CSAMT 可以将地下矿体的埋深、位置和走向等准确反映出来,矿体通常赋存于低电阻率到高电阻率过渡段,更趋向于低电阻区域,这种方法在实际应用中有着较高的工作效率,能够帮助工作人员精准定位矿体的埋深和分布情况^[20]。

2.4 方法应用示范

结合上述试验确定了综合方法的可行性和可靠性,然后在矿区内选择新区域,运用 IP 与 CSAMT 综合应用方法实施找矿预测。将电性异常特征分为平面特征和空间特征,具体为:

(1)平面特征。借助 IP 测量的方式,获得区域内所有测点的电阻率和极化率,确认其分布特征。两类异常形态均呈带状分布,基本走向一致,区域内整体的极化率偏低且相对平稳,背景场值不超过 1%,最大值不超过 3%,且东部总体的电阻率数值明显较低。对照表 1 中的岩体电性测定结果分析,使用时间域 IP 测量得到的电阻率分布情况和区域内地层分布特征基本一致,误差在 2.2%左右。依照区域岩层极化率特征和电性异常标志,将“存在异常、达到一定规模、连续性好,相邻测线全部显示异常”作为确定激电异常的基本原则,划分 1 号、2 号和 3 号高极化区,其均为东北-西南走向,与地层走向一致,其中,1 号区域(IP1,见图 4,2 号和 3 号区域同理)处于测区中间位置,多条测线显示数值异常,整体表现为中高极化特征,电阻率特征为相对中阻,对照一致矿体特征,初步认定该异常是因为地层中铅锌矿赋存引发。2 号区域表现为低电阻率高极化的激电特征,极化率明显较 1 号区域更高,电阻率略低,与 1 号区域差别明显,认定存

杨家岭重点评价区激电中梯剖面平面图
比例尺 1:5000

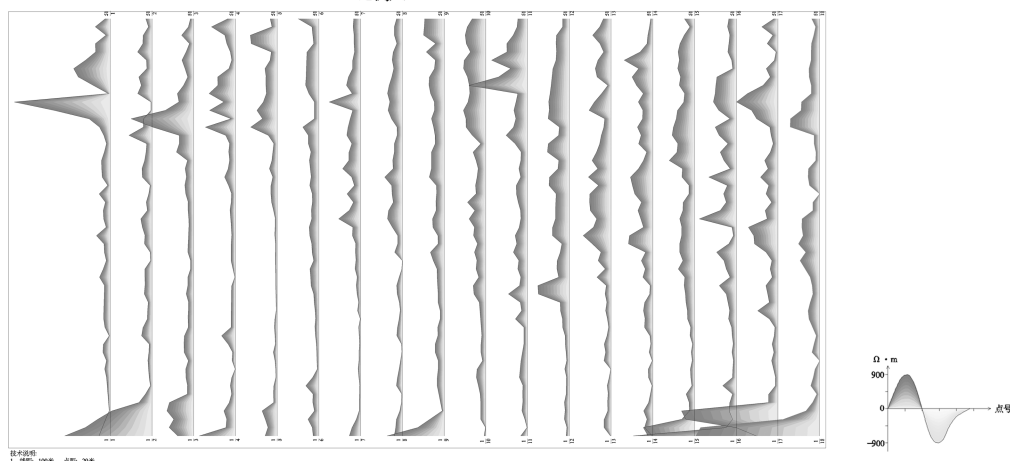


图4(a) 大功率IP的电阻率剖面平面图

比例尺 1:10000

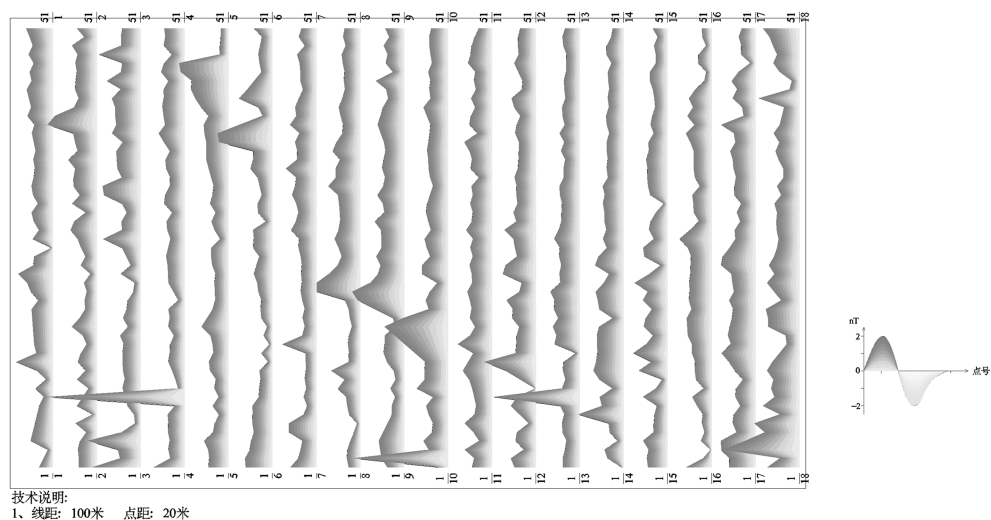


图4(b) 大功率IP的极化率剖面平面图

在新的矿体。3号区域位于已知区域的西侧,异常数值高,异常范围大,两侧梯度变化较陡,主要地质体为泥质灰岩。

(2)空间特征。为了更好地把握矿体的构造和埋深变化,采用CSAMT进行精细测深探测,通过获取地下不同深度的电性参数分布,精确解析矿体的空间展布形态和埋藏深度特征。具体如图5所示。

从图5中可以明显看到区域内地下电阻率在纵向与横向的分布情况,多条测线的剖面电阻率反演断面影像都表现出了良好的可比性,地电结构相似。结合上文提到的三个高极化区,1号区域处于点号90-110之间,CSAMT反演电阻率

的横向分布特征很好地体现了区域地层分布情况电阻率特征与IP电阻率特征保持了高度的一致性。2号区域处于点号245-300之间,反演电阻率显示,L005和L007线在该段表现为中高阻向低阻过渡的趋势,并且朝着深部延伸。L004线和L006线的地层分布特征相似,推测两条线的异常是由同一个源头引发。3号区域处于点号450-500之间,CSAMT反演电阻率显示的电性特征和南侧测线均发生了变化,电阻率从中高阻过渡到低阻,推测该区域可能存在构造破碎带或者岩性界面^[12]。

对比三个异常区域,认定2号区域存在深部矿体的可能性最大,可以将其作为找矿靶区。区

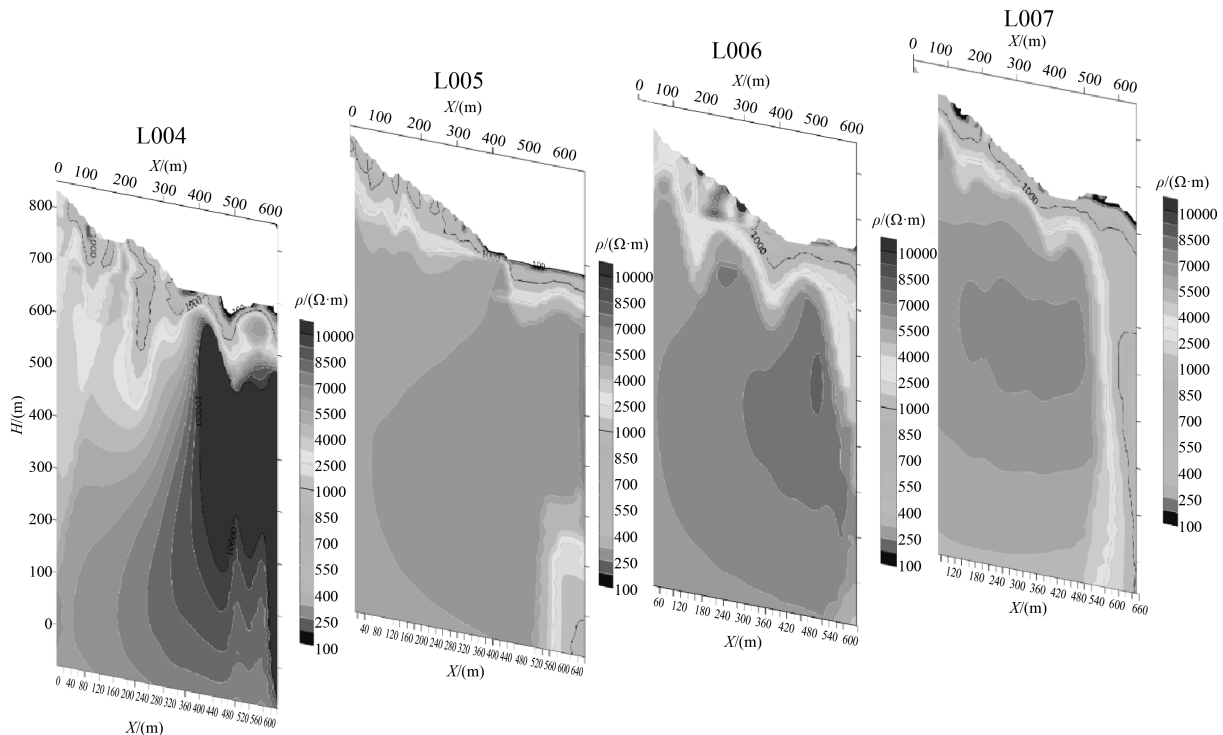


图5 CSAMT 反演电阻率剖面

域平面展布面积达 0.22km²,该异常区呈现典型的中阻-高极化电性组合特征,极化率存在明显异常,且异常边界表现为明显的梯度变化带,综合区域地层分布情况,认定其深部可能隐伏含金属矿的破碎带。

3 结论

以某地铅锌金属矿的勘查为例,使用激发极化法与可控源音频大地电磁法进行了金属矿勘查,得到如下结论:

(1)使用综合电法组合的方式,融合激发极化法与可控源音频大地电磁法各自的优势,实现了优势互补,能够有效勘查深部隐藏的矿体,而且效率高,成本低。

(2)在一些地形条件复杂的区域进行金属矿勘查时,应使用便携式设备,借助大电流供电、增加叠加次数等方式,提升数据信噪比,消除干扰因素,确保采集到的地质体电特征客观准确。

(3)本文提到的激发极化法与可控源音频大地电磁法组合方法在实际应用中取得了良好的成果,有着较强的代表性,对于类似区域的金

属矿勘查可以起到一定参考作用。

参考文献 (References):

- [1] 李建华,林品荣,杜炳锐,等.综合电法在隐伏矿产勘查中的应用研究[J].物探化探计算技术,2022,44(04):468-476.
- [2] 朱红军.激发极化法在滇西某铅锌多金属矿勘查中的应用[J].金属矿山,2009,44(12):89-92.
- [3] 雷清,程胜红,潘登,等.激发极化法在西刚果造山带尼阿里裂谷盆地铜多金属矿勘查中的应用[J].地震地磁观测与研究,2023,44(03):55-63.
- [4] 朱剑,范永宏,徐伟,等.大功率激发极化法与可控源音频大地电磁测深法在大际山地区铀-多金属矿勘查中的应用[J].世界核地质科学,2022,39(03):538-545.
- [5] 张燕,高振强,张延奔.激发极化法在深部找矿中的应用——以江苏省句容市大华山铜多金属矿勘查为例[J].世界有色金属,2021,36(04):56-57.
- [6] 程长厚,张振,李勇明,等.井中激发极化法在多金属矿勘查中的应用研究[J].资源信息与工程,2023,38(05):13-17,21.
- [7] 韩国胜.井中激发极化法在金属矿产勘查中的应

- 用[J]. 世界有色金属, 2023, 38(12): 169-172.
- [8] 黄凯, 邓耀辉, 农观海, 等. 激发极化法在黔西北丫都铅锌矿床勘查中的应用[J]. 矿产勘查, 2024, 15(07): 1195-1203.
- [9] 刘建权, 赵振华, 尹国庆, 等. 大功率激电测量在冀北温家营—马家沟银多金属矿勘查中的应用[J]. 矿产勘查, 2020, 11(11): 2495-2504.
- [10] 张景业, 杨秋玲, 符坚, 等. 大比例尺综合物探技术在栾川整装勘查区的应用[J]. 物探化探计算技术, 2020, 42(03): 376-381.
- [11] 史冬岩, 张坤, 张玉鹏, 等. 黑龙江省浅覆盖区地物化特征与找矿标志: 以黑河市 340 高地金矿化区为例[J]. 吉林大学学报(地球科学报), 2021, 51(04): 1042-1053.
- [12] 徐伟, 蒋宏, 朱剑, 等. 黔西南大际山铀多金属矿远景区土壤地球化学特征[J]. 铀矿地质, 2020, 36(06): 563-576.
- [13] 顾观文, 王顺吉, 武晔, 等. 类中梯装置的大功率三维激电法在甘肃花牛山金矿勘查中的应用[J]. 地质与勘探, 2023, 59(04): 872-882.
- [14] 张哲, 廖广志, 肖立志, 等. 基于机器学习算法预测核磁共振 T2 谱[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(17): 7282-7292.
- [15] 罗志亮, 汤井田, 周聪, 等. 频率域电磁法电场梯度视电阻率研究[J]. 石油地球物理勘探, 2025, 60(01): 243-252.
- [16] 张继伟, 谭慧. 可控源音频大地电磁和微动资料的拟二维联合反演[J]. 物探与化探, 2024, 48(04): 1094-1102.
- [17] 张一, 刘鹏磊, 王玉敏, 等. 综合物探技术在济南北部地热勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2024, 48(01): 58-66.
- [18] 王强, 田野, 刘欢, 等. 综合物探方法在煤矿采空区探测中的应用[J]. 物探与化探, 2022, 46(02): 531-536.
- [19] 汤井田, 任政勇, 化希瑞. 地球物理学中的电磁场正演与反演[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(04): 1181-1194.
- [20] 吕庆田, 张晓培, 汤井田, 等. 金属矿地球物理勘探技术与设备: 回顾与进展[J]. 地球物理学报, 2019, 62(10): 3629-3664.

作者简介:

第一作者: 李丹, 1989 年生, 男, 山西大同人, 中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心, 助理工程师, 主要研究方向为地球物理勘探、地质工程。Email: 2548655927@qq.com;

通讯作者: 张哲, 1994 年生, 男, 河北承德人, 硕士, 中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心, 助理工程师, 主要研究方向为地球物理勘探、地质资源与地质工程。Email: 839404589@qq.com

Application of Induced Polarization Method and Controlled Source Audio Magnetotelluric Method in Metal Mineral Exploration

LI Dan, ZHANG Zhe^{*}, TIAN Chao, SHAN Xianlei, KANG Quanquan, HU Jianhua

(Langfang natural resources comprehensive survey center, China Geological Survey, Langfang 065000, China)

Abstract: Induced polarization method and controlled source audio magnetotelluric method are effective technical means of mineral resources exploration. This paper studies the comprehensive application of induced polarization method and controlled source audio magnetotelluric method in metal mineral exploration from the perspective of improving the accuracy and efficiency of metal mineral exploration. The principles and advantages of induced polarization method and controlled source audio magnetotelluric method are analyzed. Taking the exploration of a lead-zinc mine as an example, the comprehensive application strategy of induced polarization method and controlled source audio magnetotelluric method is discussed. The results show that the two methods can achieve complementary advantages in practical application, and can effectively explore deep hidden ore bodies, with higher efficiency and lower cost.

Key words: induced polarization method; controlled source audio magnetotelluric method; mineral exploration