

音频大地电磁法在贵州遵义隐伏锰矿找矿勘查中的应用

肖 林¹, 陈云明¹, 刘志臣^{1,2,4}, 杨炳南^{2,3,4},
陈 登^{1,2,4}, 肖 亮¹, 王家俊³, 代 迪¹, 杨佳鑫¹, 苟 熠¹

(1. 贵州省地矿局 102 地质大队, 贵州 遵义 563003; 2. 中国地质大学(武汉),
湖北 武汉 430074; 3. 贵州省地矿局 103 地质大队, 贵州 铜仁 554300;
4. 自然资源部基岩区矿产资源勘查工程技术创新中心, 贵州 贵阳 550081)

[摘 要] 贵州遵义锰矿是我国二叠纪重要的锰矿床类型之一。近年来, 遵义锰矿浅部资源日趋枯竭, 找矿工作从浅部转向了深部, 对隐伏锰矿的找矿迫在眉睫。在找寻隐伏锰矿中, 原有的找矿勘查方法遇到了瓶颈, 本文在结合大量地质研究的基础上, 基于深部地层、构造、含矿岩系的电性差异, 在研究区首次应用音频大地电磁法对隐伏锰矿体开展探索研究。研究发现, 通过精细化的数据反演, 该方法能够较好地反映研究区深部地层、构造及含矿岩系的展布特征, 并部署钻探验证, 所揭露的岩矿层位、构造特征和音频大地电磁法解译吻合程度较高。该方法可推广到研究区及其同类型区域的锰矿找矿勘查中, 是锰矿找矿预测的有效方法之一。

[关键词] 音频大地电磁法; 找矿勘查; 隐伏锰矿; 贵州遵义

[中图分类号] P618.32; P631.3⁺25 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1000-5943(2021)04-0412-07

1 引言

贵州遵义锰矿自上世纪 40 年代发现以来, 一直是研究的热点, 先后许多学者专家对遵义锰矿的矿床地质特征(刘巽锋等, 1989; 陶平等, 2005; 林贵生等, 2006; 陈登等, 2019)、矿床成因(韩忠华等, 2007; 刘平等, 2008; 杨瑞东等, 2009, 2018; 刘志臣等 2013, 2015, 2016; Xu et al, 2021)、成矿环境(杨瑞东等, 1993; 刘巽锋等, 2001; 崔忠强等, 2014; Deng et al, 2016)、成矿模式(陈文一等, 2003; 魏泽权等, 2011)、成矿时代(程玛莉等, 2011; 刘志臣等, 2018)、岩相古地理

和构造古地理(刘志臣等, 2019; 汪洋等, 2020; Liu et al, 2021)等方面开展了不同程度的研究, 并取得了丰富的成果。最近研究认为, 贵州遵义二叠纪锰矿属气液喷溢沉积型锰矿床(刘志臣等, 2019; 汪洋等, 2018), 遵义次级裂谷盆地结构控制了遵义锰矿带的分布, 锰矿在地堑盆地中沉积成矿, 在地垒区无锰矿分布(刘志臣等, 2019)。

研究区以往的找矿勘查方法主要应用钻探工程控制浅部(集中在 200~300 m)的锰矿资源, 几乎没有应用其他的技术方法, 然而, 随着近年来浅部锰矿资源的日趋枯竭, 找矿工作向深部转移, 单靠钻探工程控制的模式已很难满足寻找深部隐伏锰矿体的需求, 不仅钻探工程量投入较大, 而且施

[收稿日期] 2021-07-12 **[修回日期]** 2021-09-29

[基金项目] 贵州省锰矿资源预测评价科技创新人才团队(黔科合平台人才[2018]5618)、贵州省优秀科技青年培养计划(黔科合平台人才[2019]5654)、贵州遵义锰矿整装勘查区矿产地质调查与找矿预测(尚嵇幅)(DD20190159-2020-11)、整装勘查区矿产地质调查与找矿预测(WKZB1911BJM300369)、贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2017]2951)、贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2019]2868)、黔地矿科合[2019]2号、黔地矿科合[2020]2号、贵州省地矿矿产勘查开发局重大研究课题(黔地矿科合[2021]3号)联合资助。

[作者简介] 肖林(1991—), 男, 工程师, 学士, 从事区域地质调查、矿产地质勘查工作。E-mail: 546778361@qq.com。

[通讯作者] 陈云明(1982—), 男, 高级工程师, 硕士, 长期从事矿产地质勘查工作。E-mail: 89059841@qq.com。

工周期长、风险高。为了降低找矿风险,除了开展锰矿找矿的理论创新,对找矿新方法的研究也迫在眉睫,(刘志臣等,2016)率先在研究区开展了地球物理找矿方法的应用研究,运用可控源音频大地电磁测深探寻500~800 m深度范围的锰矿找矿,取得了较好的效果。目前,研究区锰矿找矿勘查已突破1 500 m的深度,且深部的盆地结构特征判断也十分重要。国内外研究认为,音频大地电磁法在深部1 000~1 500 m的探测中可达到较好的效果,另外,该方法对识别深部盆地结构格局和同沉积断裂有较好的精度(Attwa M et al, 2018;杨炳南等,2018)。

在研究黔东大塘坡锰矿时,(杜远生等,2015)、(周琦等,2017)和(杨炳南等,2018)应用音频大地电磁法探寻深部地层、构造、含锰岩系及其盆地特征等,取得了较好进展。

经过对比研究贵州遵义锰矿区地层、构造和含锰盆地等特征,该区具备应用音频大地电磁法的条件,因此,首次应用了该方法,进行数据精细

反演,指导找矿预测和找矿勘查工作,取得了较好效果。

2 区域地质概况

按照中国成矿区带的划分(陈毓川等,2010),贵州遵义锰矿属于滨太平洋成矿域扬子成矿省,III级成矿单元中属上扬子中东部(台褶带)铅、锌、铜、银、铁、锰、汞、锑、磷、铝土矿、硫铁矿成矿带。区内矿产极为丰富,矿产有煤、硫铁矿、锰矿、铝土矿、石灰岩等,主要矿产为锰矿,仅产于二叠系地层中。大地构造位置位于羌塘-扬子-华南板块-扬子陆块,上扬子地块-黔北隆起区的毕节弧形褶皱代与凤冈南北向隔槽式褶皱变形区交接部位,区域内构造发育,以褶皱为主,呈北东、北北东向分布;断层走向与褶皱轴线基本一致,以高角度断层为主。区域出露地层为寒武系、奥陶系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系地层,缺失志留系地层,均为沉积岩地层(图1)。

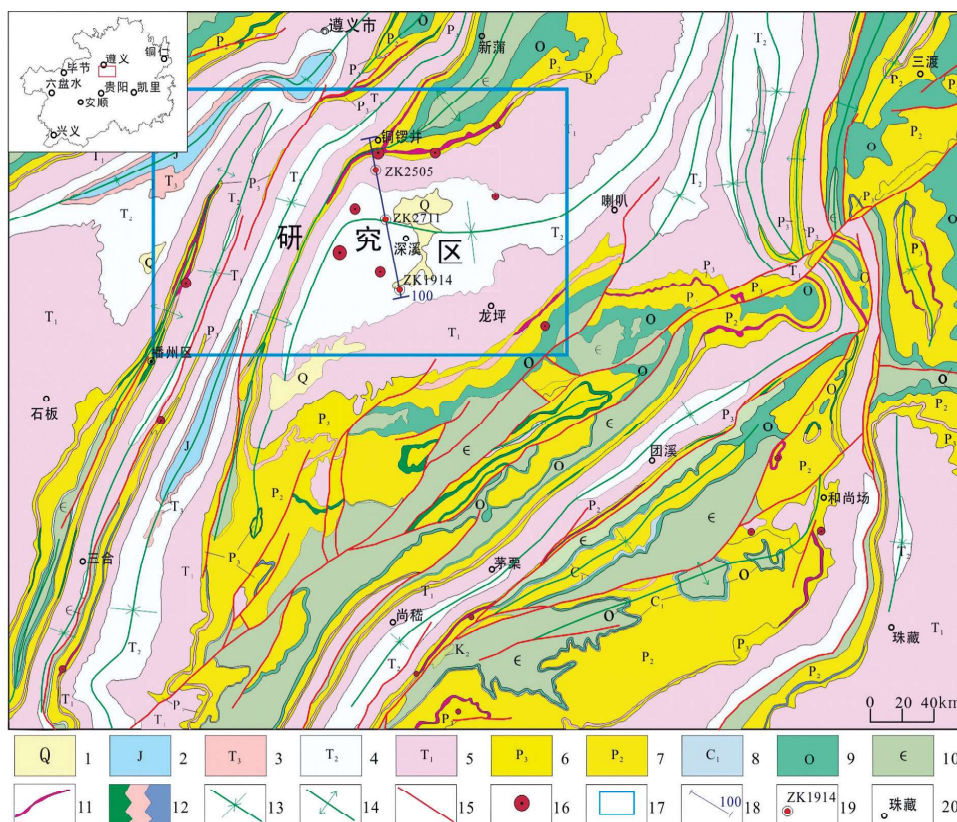


图1 遵义锰矿区区域地质简图(据贵州省地矿局102地质大队2019,2021改编)

Fig. 1 Regional geological sketch of Zunyi Manganese mining area

1—第四系;2—侏罗系;3—三叠系上统;4—三叠系中统;5—三叠系下统;6—二叠系乐平统;7—二叠系阳新统;8—石炭系下统;9—奥陶系;10—寒武系;11—锰矿层;12—硅质岩/粘土岩/硅质灰岩;13—向斜;14—背斜;15—断层;16—锰矿(床)点;17—研究区;18—物探剖面位置及编号;19—钻孔位置及编号;20—地名

研究区地层属羌塘-扬子-华南地层大区之扬子地层区,黔北地层分区,毕节-瓮安地层小区(贵州省地质矿产勘查开发局,2017)。出露地层均为沉积岩地层,自老至新为:二叠系阳新统茅口组(P_2m),二叠系乐平统龙潭组(P_3l)、长兴组(P_3ch),三叠系下统夜郎组(T_1y)、三叠系下-中统嘉陵江组(T_{1-2j})、三叠系中统关岭组(T_2g)。

研究区含锰岩系为茅口组第三段,被上覆二叠系龙潭组平行不整合覆盖,整合于下伏的二叠系茅口组第二段(P_2m^2)硅质灰岩之上,含锰岩系一般厚0.99~9.61 m,由一套灰色、深灰色及浅肉红色的菱锰矿、粘土岩、含锰粘土岩及浅灰绿色凝灰岩组成。锰矿体产于含锰岩系底部,走向为北东东-南西西,走向长约2.5 km,倾向延伸约1.8 km,呈层状、似层状产出,矿体厚度为0.50~4.16 m,平均厚2.50 m,锰品位一般为15.26%~42.27%,平均为23.68%。矿石矿物主要为菱锰矿,次为钙菱锰矿、锰方解石、水褐锰矿、软锰矿等,脉石矿物主要为粘

土,次为硫化物、绿泥石等,矿石结构以角砾状结构为主,次为碎屑状结构、鲕粒结构,主要为无定向构造、纹层状构造、斑杂状构造等。 $\omega(Mn)/\omega(Fe)$ 的比值为1.78~5.91,平均值为3.95, $\omega(CaO+MgO)/\omega(SiO_2+Al_2O_3)$ 比值为0.38~2.27,平均为0.90。矿石自然类型为碳酸锰矿石,工业类型为中硫、高铁、造渣组分也较高的低磷、低硅的酸性富锰矿石,矿床成因为气液喷溢沉积型锰矿床。

3 地球物理特征

采用小四极法在研究区内谢家坝地区二叠系茅口组、龙潭组、长兴组,三叠系夜郎组、嘉陵江组及第四系中采集了包括灰岩、白云岩、粘土岩、泥岩、块状锰矿石、粘土等不同岩矿石,实测了155个物性点,归纳总结了研究区的视电阻率参数物性特征(表1)。测量仪器为重庆地质仪器厂生产的DZD-6A电法仪。

表1 遵义锰矿整装勘查区岩矿石电性参数测定结果统计表

Table 1 Statistics of measurement results of rock and ore electrical parameters in Zunyi

Manganese filly equipped exploration area

岩性名称	地层代号	电阻率($\Omega \cdot m$)	
		变化范围	平均值
粘土	Q	234.68~425.93	265.42
白云岩	T_{1-2j}	1 285.08~1 712.22	1 498.65
灰岩	T_1y^2 、 P_3ch 、 P_2m	2 118.39~6 768.30	4 443.35
泥岩	P_3l	274.11~544.1	330.73
块状锰矿石	P_3l 与 P_2m 之间	77.6~478.8	205.60

第四系粘土、夜郎组三段、龙潭组泥岩及块状锰矿石电阻率值较低,其平均值低于 $400 \Omega \cdot m$;嘉陵江组(T_{1-2j})白云岩电阻率平均值为 $1 498.65 \Omega \cdot m$;夜郎组第二段(T_1y^2)、长兴组(P_3ch)、茅口组(P_2m)灰岩电阻率较高,其电阻率平均值大于 $4 000 \Omega \cdot m$ 。

研究区含锰岩系位于龙潭组与茅口组之间,主要由茅口组三段的含锰粘土岩及碳酸锰矿层等组成,含锰岩系综合电性特征为低电阻率,其上覆的长兴组灰岩和下伏茅口组灰岩同为高电阻率特征,是判断含锰岩系存在的间接标志,含锰岩系与其它岩性差异明显,具备电法物探勘查条件。

4 工作原理及数据处理

4.1 方法原理

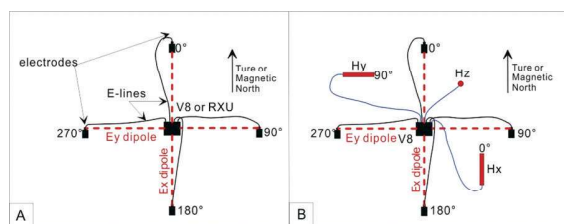
音频大地电磁法基本原理是以天然大地电磁

场为场源,观测互相垂直的两个方向上若干频率的电场水平分量和磁场水平分量,然后利用电场振幅和磁场振幅计算阻抗电阻率;观测电场相位和磁场,用以计算阻抗相位;用阻抗电阻率和阻抗相位联合反演计算电阻率参数,最后利用反演的电阻率进行地质推断解释。通过研究地电断面的变化,来解决找矿、找水、研究地质等问题。该方法适用于中浅层深入调查,探测深度一般在2 000 m之内,频率范围是 $10 000 \text{ Hz} \sim 1 \text{ Hz}$,因为其高频部分 $10 000 \text{ Hz} \sim 1 000 \text{ Hz}$ 所在频段的声波人耳能听到,所以称为“音频”,单点采集时间约60 min。

AMT可以提供TE和TM两个模式的视电阻率和阻抗相位用于视电阻率反演。根据趋肤效应,把波在地下介质传播中振幅衰减到地面振幅值 $1/e$ 的深度定义为趋肤深度 $\delta = \sqrt{2/\omega\mu\sigma} \approx 503 \sqrt{\rho/f}$ (Niblett et al., 1996), Jones(2006)认为趋

肤深度与地下介质的电阻率和采集周期有关,地下介质电阻率越高,穿透深度越大,采集周期越长,穿透深度越大,可以通过测量从高频到低频的电磁响应来获取地下介质由浅到深的电性结构。

野外观测时(如图2所示),所有的仪器盒子使用两个电极来测量一个电道的数据,电道的终端为埋置于25 cm深的盐水泥浆坑的不极化电极罐,电极线组成一个直角十字架,采集盒子位于正中。



A—辅助站;B—主测站

图2 V8-AMT测量装置布置图(据杨炳南等,2018)

Fig. 2 Layout of V8-AMT measuring device

野外施工时,用高精度eTrex手持GPS卫星定位仪找到测点位置,并在此位置用罗盘指挥工作人员在测网坐标系“北”“南”“东”“西”(这里的方向有测网坐标系而定,此处说的北不一定是正北)四个方向距测站 $20\text{ m}\pm$ (每个电道电极距40 m)埋设四个不极化电极,方位角的误差 $\pm 1^\circ$;然后按对应电极方向,将四条电极线连接到对应的终端上。用万用表测量 E_x 和 E_y 两个电道的接地电阻(尽可能保证小于 $2\,000\ \Omega\cdot\text{m}$)、DC电位及AC电位,并记录到班报表上;同时,分别垂直于 E_x 、 E_y 方向水平放置两根磁棒 H_x 、 H_y 。

4.2 数据处理及反演

研究区内音频大地电磁法工作采用凤凰地球物理有限公司的第八代地球物理数据采集系统—V8 System 200. net采集野外数据,采集频率范围 $10\,400\sim 0.35\text{ Hz}$,采集参数为磁道数据和电道数据。共完成1条剖面,测线总长19.4 km,点距 $100\sim 200\text{ m}$,完成了128个测点的数据采集工作。剖面布设时避免了遵义城区人文干扰,剖面方位为 170° ,大致垂直于锰矿体展布方向布设。野外采集电极距长约40 m,单点采集时间约60 min。

对AMT数据处理和反演,是采用凤凰地球物理有限公司提供的SSMT-2000和成都理工大学开发的MTsoft2D数据处理反演软件。数据处理过程为:导入SSMT2000软件,输入时间序列文件、标定文件、测点参数文件,生成傅立叶变换因

子,所有同时选择的采集数据必须有同样的傅立叶变换频率参数,这些参数是以二进制保存在Fourier Transform Parameters(PFT)文件中,然后从参考点的数据中用robust程序进行再处理,输出MTPlot软件可读的数据处理文件,输出文件中包含每个频点的crosspower(一个单频的叠加因子),SSMT2000数据处理的最终过程是将离散傅立叶变换(DFT)的结果进行再处理生成crosspower数据。crosspower会保存在输出结果中,它即可图形显示,也能被用MT2D-soft这个软件进行反演。数据处理包括“编辑平滑”、“测点处理”、“曲线拟合”、“静态校正”、“空间滤波”等(Jiracek,1990)。

完成各种地形校正(韩骑等,2015)、数据平滑(即对干扰信息的压制和有用信号识别等)、二维空间滤波等方法后,可进行起伏地形下的二维反演和成像解释。

本次物探工作数据反演参考已知地质资料,将各种反演方法逐一反演,与已知地质资料进行详细对比后,选择带地形非线性共轭梯度反演(Fletcher R et al.,1964;Siripunvaraporn W et al.,2000;Rodi W et al.,2001;韩波等,2012;康敏等,2017),以一维Bostick反演结果为初始模型,反演深度为2.0 km,最大迭代次数为20次,最小拟合精度设置为0.05,平滑系数为0.05。

5 成果解释及钻探验证

5.1 异常的判别

研究区断层异常特征总体是二维板状体形态特征,向下延伸较深。相对于围岩介质的电阻率,断层可表现为低阻断层和高阻断层,决定于断层的物质成分、胶结程度、破碎带宽度、含水性等特性和围岩电阻率特性。一般来说,活动断层电阻率值较低,断层越老,胶结程度越强,电阻率值越高;断层破碎带越宽,越破碎,电阻率相对较小;地下和地表水越丰富,电阻率越小;压性断层少水,则为高阻,张性断层富水,则为低阻。因此,判断断层最直接的依据是视电阻率断面图的横向电性是否连续。也就是说,横向电性即横向的视电阻率曲线发生了较明显的下陷或上凸,使其两侧的电性差异明显,表现为一个很明显的 discontinuity。

在地层分层效果上表现为:位于龙潭组下伏

地层茅口组第三段的含锰岩系和龙潭组以泥岩、粉砂质泥岩为主的地层呈低电阻率电性特征,其上覆的长兴组、三叠系地层和下伏的茅口组地层以灰岩为主,呈高电阻率电性特征。

5.2 异常解释推断

研究区内共实测了1条剖面,为100剖面。经过对AMT数据处理和反演,生成了AMT反演成果图,研究区锰矿层位于茅口组第三段含锰岩系,被上覆二叠系乐平统龙潭组平行不整合覆盖,整合覆盖于下伏二叠系阳新统茅口组第二段

(P_2m^2) 硅质灰岩之上,其分布范围严格受硅质灰岩分布范围控制(刘巽锋等,1989)。含锰岩系底板为较厚的茅口组第二段硅质灰岩,顶板为厚度巨大的龙潭组泥岩、粉砂质泥岩及灰岩,二者间出现了较为明显的低阻区。根据含锰岩系顶底板电性差异,可圈定出含锰岩系的空间分布位置、形态和深部的延伸情况,以及深部构造分布特征,为钻探施工和找矿预测提供一定的依据。

通过对研究区地质特征和物性特征进行综合分析研究,对100剖面反演结果进行解释(图3)。

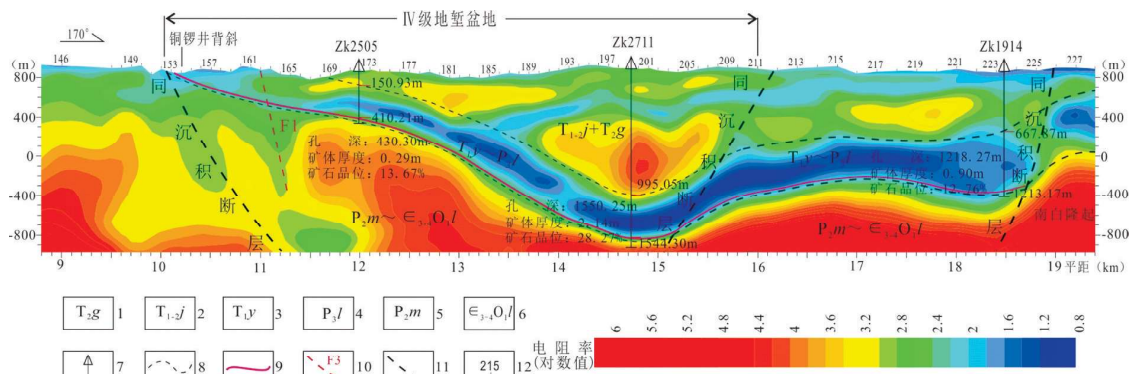


图3 100剖面地球物理综合成果解释图(据贵州省地矿局102地质大队,2019;汪洋等,2020改编)

Fig. 3 Interpretation map of comprehensive geophysical results of section 100

1—三叠系关岭组;2—三叠系嘉陵江组;3—三叠系夜郎组;4—二叠系龙潭组;5—二叠系茅口组;6—寒武-奥陶系娄山关组;7—钻孔位置;8—推测地层界线;9—含锰岩系;10—推测断层;11—推测同沉积断层;12—AMT测量点

(1) 图面电阻率垂向上及横向上变化明显。垂向上对探测区域各倾斜岩层分层效果较好,剖面北段101-160号点大体表现为两层电性结构特征,由地表往下总体表现为“低—高”的变化模式;剖面南段160-228号点大体表现为四层电性结构特征,由地表往下总体表现为“低—高—低—高”的变化模式。关岭组泥岩、泥质白云岩显示相对低阻电性,嘉陵江组灰岩、白云岩显示高阻电性,夜郎组和龙潭组泥岩、砂岩、粘土岩显示低阻电性,茅口组-奥陶系灰岩显示高阻电性。

(2) 横向上根据电阻率的不连续性,推测在110、130、152、211、226号点附近存在同沉积断层,其中110、226号点处的断层为控制Ⅲ级深溪-八里地堑盆地的同沉积断层;130、152、211处的断层为控制Ⅳ地堑盆地的同沉积断层。铜锣井背斜核部位于155号点附近。162号点附近推测有1条次级断裂异常,编号为F1,推测为后期构造。

5.3 钻探验证

采用音频大地电磁法在遵义锰矿整装勘查区

开展了工作,对间接控制锰矿成矿的地堑盆地、同沉积断层以及成矿后构造进行了解,为了验证成果解释的可靠性和该方法间接控制与锰矿成矿有关的地堑盆地、同沉积断层的有效性,在100剖面线170、200、223点附近分别施工了钻孔ZK2505、ZK2711、ZK1914进行揭露验证。其中,钻孔ZK2505孔深为430.30m,施工至孔深150.93m揭穿嘉陵江组灰岩,在孔深410.21m揭穿龙潭组粘土岩,孔深410.21~410.79m揭露含锰岩系,锰矿体真厚0.29m,Mn品位13.67%,见矿良好;钻孔ZK2711孔深为1550.25m,揭露至孔深995.05m揭穿嘉陵江组灰岩,在孔深1544.30m揭穿龙潭组粘土岩,孔深1544.30~1548.55m揭露含锰岩系,锰矿体真厚2.14m,Mn品位28.27%,见矿极好;钻孔ZK1914孔深为1218.27m,施工至孔深667.87m揭穿嘉陵江组灰岩,在孔深1213.17m揭穿龙潭组粘土岩,孔深1213.17~1216.12m揭露含锰岩系,锰矿体真厚0.90m,Mn品位12.76%,见矿良好。施工完成的各个钻孔揭露的相应层位、含锰岩系位置与音频大地电磁法

解释的断面吻合较好,解释的同沉积断层及地堑盆地形态和位置通过专项填图工作验证也吻合,该方法应用在贵州遵义锰矿整装勘查中寻找和预测深部与锰矿成矿有关的地堑盆地和同沉积断层是有效的,对锰矿勘查工作指导效果极佳。在今后的锰矿勘查中,在找矿重点区域采用大比例尺音频大地电磁法,将该方法取得的成果与地质、钻孔等资料结合,进行综合分析和深入研究,为下一步锰矿找矿突破提供更为详实的资料,以进一步指导锰矿整装勘查工作。

6 结论

(1)遵义锰矿整装勘查区不同岩矿石的电性特征差异明显,含锰岩系底板的茅口组灰岩显示高阻电性,以泥岩为主的龙潭组以及龙潭组下伏茅口组第三段的含锰岩系显示低阻电性,其上覆盖的长兴组灰岩显示高阻电性。

(2)在遵义锰矿整装勘查区采用音频大地电磁法开展工作,通过电性特征的差异,音频大地电磁法物探成果总体上能够反映该区地层、构造及含矿岩系的展布特征,效果明显,具有较好的指导意义。

(3)经施工的钻探验证,揭露的岩矿石层位和音频大地电磁法解释的吻合程度较高,找矿效果较为显著,该方法有望为后续研究区内锰矿勘查工作和区域同类型的锰矿找矿预测提供详实有效的依据。

[参考文献]

- 陈登,汪洋,刘志臣,等. 2019. 贵州遵义播州区和尚场锰矿床地质特征[J]. 矿产与地质, 33(3): 427-433.
- 陈毓川,王登红,等. 2010. 中国成矿区带划分方案[M]. 北京:地质出版社.
- 陈文一,王中刚,刘家仁. 2003. 贵州二叠纪岩相古地理与沉积矿产关系[J]. 古地理学报, 5(1): 17-20.
- 程玛莉,魏怀端,刘坤,等. 2011. 贵州二叠系锰矿成矿特征及成矿时代探讨[J]. 贵州大学学报, 28(1): 53-58.
- 崔忠强,刘志臣,张远国,等. 2014. 贵州遵义锰矿成矿环境分析[J]. 矿业工程研究, 29(2): 60-65.
- 杜远生,周琦,余文超,等. 2015. Rodinia 超大陆裂解、Sturtian 冰期事件和扬子地块东南缘大规模锰成矿作用[J]. 地质科技情报, 34(6): 1-7.
- 贵州省地矿局 102 地质大队. 2019. 贵州省遵义市锰矿整装勘查区矿产调查与找矿预测子项目成果总报告[R].
- 贵州省地矿局 102 地质大队. 2021. 贵州遵义锰矿整装勘查区矿产地质调查与找矿预测成果总报告[R].
- 贵州省地质矿产勘查开发局. 2017. 贵州省区域地质志[M]. 北京:地质出版社.
- 韩波,胡祥云,何展祥,等. 2012. 大地电磁反演方法的数学分类[J]. 石油地球物理勘探, 47(1): 177-187.
- 韩琦,胡祥云,程正璞,等. 2015. 自适应非结构有限元 MT 二维起伏地形正反演研究[J]. 地球物理学报, 58(12): 4675-4684.
- 韩忠华,潘家州. 2007. 浅析贵州二叠系锰矿与峨眉山玄武岩之关系[J]. 贵州地质, 4(3): 197-201.
- 康敏,胡祥云,康健,等. 2017. 大地电磁二维反演方法分析对比[J]. 地球物理学进展, 2(2): 476-486.
- 林贵生,李赞. 2006. 遵义锰矿地质特征及找矿潜力分析[J]. 中国锰业, 24(3): 26-29.
- 刘平,廖友常,殷科华,等. 2008. 与火山活动有关的热液沉积锰矿—以贵州二叠纪锰矿为例[J]. 中国地质, 35(5): 992-1006.
- 刘巽锋,王庆生,高兴基. 1989. 贵州锰矿地质[M]. 贵阳:贵州人民出版社.
- 刘巽锋,王庆生,高兴基. 2001. 贵州锰矿地质[M]. 贵阳:贵州人民出版社.
- 刘志臣,张远国,陈登,等. 2013. 贵州遵义锰矿区“白泥塘层”硅质岩地球化学特征及其地质意义[J]. 矿物学报, 33(4): 265-270.
- 刘志臣,王聪,张远国,等. 2015. 贵州遵义锰矿床地球化学特征及成因分析[J]. 矿物学报, 35(4): 481-488.
- 刘志臣,颜佳新,陈登,等. 2016. 贵州遵义深溪大型隐伏锰矿床的发现及成因探讨[J]. 地质论评, 62(s): 217-218.
- 刘志臣,吴发刚,骆红星,等. 2016. CSAMT 法在贵州遵义锰矿整装勘查中的运用[J]. 物探与化探, 40(2): 342-348.
- 刘志臣,颜佳新,周琦,等. 2018. 贵州遵义二叠纪成矿时代及锰矿成因探讨[C]. 第十四届全国矿床学会会议论文, 943-944.
- 刘志臣,周琦,颜佳新,等. 2019. 二叠纪贵州遵义次级裂谷盆地结构及其对锰矿的控制作用[J]. 古地理学报, 21(3): 517-526.
- 陶平,杜昌乾,马荣,等. 2005. 贵州及邻区二叠系锰矿地质特征及成矿作用探讨[J]. 贵州地质, 22(2): 103-108.
- 陶平,袁良军,向文勤,等. 2012. 贵州省锰矿资源潜力评价报告[R]. 贵州省地质调查院.
- 汪洋,刘志臣,陈登,等. 2018. 贵州遵义二叠纪锰矿古天然气喷口群的发现及地质意义[J]. 贵州地质, 35(2): 81-87.
- 汪洋,刘志臣,陈登,等. 2020. 贵州遵义二叠系茅口组锰矿成矿建造、盆地原型及锰矿相带特征[R]. 古地理学报, 22(5): 989-1000.
- 魏泽权,熊敏. 2011. 遵义地区锰矿成矿模式及找矿前景分析[J]. 贵州地质, 28(2): 104-107.
- 杨炳南,胡祥云,周琦,等. 华南南华纪古天然气渗漏沉积型锰矿 AMT 勘查技术方法研究[J]. 贵州地质, 2018, 35(4): 105-111.
- 杨瑞东,颜承锡. 1993. 贵州早二叠世茅口晚期成锰环境及锰矿远景预测[J]. 贵州科学, 11(2): 65-71.
- 杨瑞东,程玛莉,魏怀端. 2009. 贵州水城二叠系茅口组含锰岩系地质地球化学特征与锰矿成因分析[J]. 大地构造与成矿学, 32(4): 613-619.

- 杨瑞东,程玛莉,高军波,等. 2018. 贵州二叠系茅口组顶部锰矿沉积特征及矿床成因研究[J]. 地质学报, 92(4): 804-816.
- 周琦,杜远生,袁良军,等. 2017. 古天然气渗漏沉积型锰矿床找矿模型-以黔湘渝毗邻区南华纪“大塘坡式”锰矿为例[J]. 地质学报, 91(10): 2285-2298.
- Attwa M, Henaish A. 2018. Regional structural mapping using a combined geological and geophysical approach: A preliminary study at Cairo-Suez district, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 144 (aug.): 104-121.
- Deng X D, Li J W, Vasconcelos P M. 2016. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of supergene Mn-oxides from the Zunyi Mn deposit, Guizhou Plateau, SW China: Implications for chemical weathering and paleoclimatic evolution since the late [J]. *Miocene*, 445: 185-198.
- Fletcher R, Reeves C M. 1964. Function minimization by conjugate gradients[J]. *Computer J*, 7(2): 149-154.
- JIRACEK G R. 1990. Near-surface and topographic distortions in electromagnetic induction [J]. *Surveys in Geophysics*, 11 (2): 163-203.
- Ledo J. 2005. 2-D versus 3-D magnetotelluric data interpretation [J]. *Surveys in Geophysics*, 26: 511-543.
- Li G, Xiao X, Tang J T, et al. 2017. Near-source noise suppression of AMT by compressive sensing and mathematical morphology filtering[J]. *Applied Geophysics*, 14(4): 581-589.
- Liu Zhi-chen, Zhou Qi *, Liu Ke, et al. 2021. Sedimentary features and paleogeographic evolution of the middle Permian trough basin in Zunyi, Guizhou, South China [J]. *Journal of Earth Science*. doi:https://doi.org/10.1007/s12583-021-1406-2.
- Ren Z Y, Kalscheuer T, Greenhalgh S, et al. 2014. A finite-element-based domain-decomposition approach for plane wave 3D electromagnetic modeling[J]. *Geophysics*, 79(6): 255-268.
- Rodi W, Mackie R L. 2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion [J]. *Geophysics*, 66 (1): 174-187.
- Xu H, Gao J B, Yang R D, et al. 2021. Metallogenic mechanism of large manganese deposits from Permian manganese ore belt in western South China Block: New mineralogical and geochemical evidence [J]. *Ore Geology Reviews*, 132(5): 103993.
- Siripunvaraporn W, Egbert G. 2000. An efficient data - subspace inversion method for 2-D magnetotelluric data [J]. *Geophysics*, 65(3): 791-803.

Application of Audio Frequency Magnetotelluric Method in Prospecting and Exploration of Concealed Manganese deposit in Zunyi, Guizhou

XIAO Lin¹, CHEN Yun-ming¹, LIU Zhi-chen^{1,2,4}, YANG Bing-nan^{2,3,4},
CHEN Deng^{1,2,4}, XIAO Liang¹, WANG Jia-jun³, DAI Di¹, YANG Jia-xin¹, GOU Yi¹

(1. 103 Geological Party, Guizhou Bureau of Geology & Mineral Exploration and Development, Zunyi 563003, Guizhou, China; 2. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. 103 Geological Party, Guizhou Bureau of Geology & Mineral Exploration and Development, Tongren 554300, Guizhou, China; 4. Innovatin Center of Ore Resources Exploration Technology in the Region Bedrock, Ministry of Natural Resources of China, Guiyang 550081, Guizhou, China)

[Abstract] Zunyi manganese deposit in Guizhou is one of the important manganese deposits in Permian in China. In recent years, the shallow resources of Zunyi Manganese deposit are becoming increasingly exhausted, and the prospecting work has shifted from shallow to deep. The prospecting for concealed manganese deposit is imminent. In the search for concealed manganese ore, the original prospecting and exploration methods have encountered a bottleneck. Based on a large number of geological studies, due to the electrical differences of deep strata, structures and ore bearing rock series, audio magnetotelluric method is used to explore and study the concealed manganese ore body for the first time in the study area. It is found that through refined data inversion, this method can better reflect the distribution characteristics of deep strata, structures and ore bearing rock series in the study area, and deploy drilling verification. The revealed rock and ore horizons, structural characteristics and audio magnetotelluric interpretation are in good agreement. This method can be extended to the manganese ore prospecting and exploration in the study area and its similar areas. It is one of the effective methods for manganese ore prospecting and prediction.

[Key Words] Audio - frequency magnetotellurics; Prospecting and exploration; Concealed manganese deposit; Zunyi Guizhou