DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.06.080

音频大地电磁法在深部隐伏锰矿找矿中的应用——以贵州松 桃普觉锰矿为例

沈小庆^{1,2},杨炳南^{1,2,3},何 帅^{1,2},张德实^{1,2} SHEN Xiaoqing^{1,2}, YANG Bingnan^{1,2,3}, HE Shuai^{1,2}, ZHANG Deshi^{1,2}

1. 贵州省地质矿产勘查开发局 103 地质大队,贵州 铜仁 554300;

2. 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;

3. 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院,湖北 武汉 430074

1. 103 Geological Exploration Team, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Tongren 554300, Guizhou, China;

2. Engineering Technology Innovation Center of Mineral Resources Explorations in Bedrock Zones, Ministry of Natural Resources, Guiyang 550081, Guizhou, China;

3. Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China

SHEN X Q, YANG B N, HE S, et al., 2021. Application of audio magnetotelluric method in prospecting for deep hidden manganese ore: A case study in the Pujue manganese mine in Songtao, Guizhou, China [J]. Journal of Geomechanics, 27 (6): 987–997. DOI: 10.12090/j.issn.1006–6616.2021.27.06.080

Abstract: The Pujue manganese deposit is a typical Datangpo-type sedimentary deposit of Nanhua period in eastern Guizhou. In the Pujue mining area the early-formed sedimentary manganese deposits were significantly influenced by the subsequent structures in aspects of burial and preservation. Analyzing the deep tectonic framework and its relationship with the manganese-bearing rock series is of great importance to the ore-prospecting prediction and deep exploration of the manganese deposits in the area as well. Our aim is to find out the spatial distribution of metallogenic geological bodies and fault structures and their relationship in the Pujue Manganese mining area. We used audio magnetotelluric method to study the characteristics of underground electrical structure and tectonic framework in the area, and built a theoretical model similar to the geoelectric structure of the study area based on the physical property analysis. Through inversion calculation under different schemas, we gave preference to a two-dimensional inversion method of nonlinear conjugate gradient TM model, which is suitable for Occam-TE one-dimensional inversion as the initial model. We used the above inversion method to invert the measured data from the area, and thus identified the spatial distribution characteristics between the tectonic framework and the manganese-bearing rock series and their contact relationship. It demonstrates that the fault F_0 hasn't damaged the manganese-bearing rock series in the deep. Our research results show that AMT is of great significance in guiding the deep prospecting prediction in the Pujue manganese mining area and its adjacent areas.

Key words: Pujue manganese deposit; audio magnetotelluric method; inversion; tectonic framework

第一作者简介:沈小庆(1987—),男,硕士,工程师,主要从事地球物理勘查与应用工作。E-mail: 125796350@qq.com

通讯作者:杨炳南(1985—),男,硕士,高级工程师,主要从事地球物理勘查与应用工作。E-mail: 648417001@gq.com

收稿日期: 2021-04-13; 修回日期: 2021-06-20; 责任编辑: 范二平

引用格式: 沈小庆,杨炳南,何帅,等,2021. 音频大地电磁法在深部隐伏锰矿找矿中的应用: 以贵州松桃普觉锰矿为例 [J]. 地质力学学报,27 (6): 987-997. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.06.080

基金项目:贵州省锰矿资源预测评价科技创新人才团队项目(黔科合平台人才 [2018] 5618);贵州省科技计划项目(黔科合支撑 [2019] 2868,黔科合平台人才 [2019] 5654);贵州省地矿局地质科研项目(黔地矿科合 [2019] 2号)

This research is financially supported by the Project of Science and Technology Innovation Talent Team of Manganese Mineral Resources Prediction and Evaluation in Guizhou Province (QKHPTRC [2018] 5618), Science and Technology Program of Guizhou Province (QKHZC [2019] 2868 and QKHPTRC [2019] 5654), and Geological Research Project of Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development (QDKKH [2019] No. 2)

摘 要: 普觉锰矿是黔东地区典型的南华纪"大塘坡式"沉积型锰矿床。区内一系列后期构造对早期形成的沉积型锰矿的埋藏和保存具有重要影响,深部构造格架及其与含锰岩系之间关系的勘查分析对区内找矿预测和深部锰矿勘查十分关键。为了查明普觉锰矿区成矿地质体和断裂构造的空间分布及其相互关系,采用音频大地电磁法(简称 AMT)对区内地下电性结构特征和构造格架进行研究。在物性分析的基础上,构建了与测区地电结构大致相似的构造理论模型,通过开展不同模式的理论模型反演计算,优选出了适宜于研究区的 Occam-TE 一维反演为初始模型的非线性共轭梯度 TM 模式二维反演方法。运用上述反演方法对区内实测数据进行反演,识别了区内构造格架和含锰岩系的空间展布特征及二者的接触关系,查明了断层 Fo 在深部未对含锰岩系造成破坏。应用研究结果表明, AMT 对指导普觉锰矿区及毗邻地区开展深部找矿预测意义重大。

关键词: 普觉锰矿; 音频大地电磁法; 反演; 构造格架 中图分类号: P631.3 文献标识码: A

0 引言

贵州铜仁松桃锰矿整装勘查区是中国重要的 大型锰矿资源基地(覃英等, 2013; 李啸, 2014)。近十年来,贵州省地矿局103地质大队通 过长期产、学、研、用相结合,提出了一种新的 锰矿床类型——气液喷溢沉积型锰矿床,并建立 了锰矿裂谷盆地喷溢沉积成矿理论(周琦和杜远 生,2019)。运用该成矿理论先后指导发现了整装 勘查区4个世界级超大型隐伏锰矿床和1个特大型 富锰矿床 (周琦等, 2016a), 实现了国内锰矿找 矿有史以来的最大突破(杨胜堂和涂飞飞, 2017; 李建威等, 2019)。贵州松桃普觉锰矿位于锰矿整 装勘查区南部,区内锰矿资源找矿潜力巨大(张 遂等, 2018)。多年来, 在区内开展了成矿地质背 景、成矿系统、找矿关键技术等大量研究工作 (周琦等, 2013),但对于矿体深部埋藏与特征、 后期保存条件(后生构造)的研究程度不高,研 究方式局限,运用有效的物探方法在该区进行深 部锰矿勘查,评价后期深部构造与成矿地质体显 得尤为重要。

高密度电法(杨玉蕊等,2012)、瞬变电磁 (薛国强,2004;闫述等,2009)、激发极化法 (李金铭,2004)等传统物探方法仅适合中浅部勘 查,高精度磁法在呈弱磁性的深部锰矿体勘探中 收效基微(张传华,1985;熊光楚,1994)。随着 物探新理论、新技术、新方法的日趋成熟(底青 云等,2019;米宏泽,2019),通过多年的应用研 究与实践,具有较大探测深度的音频大地电磁法 已成为当前应用最广泛的深部电磁勘探方法之一 (何梅兴等,2017;何帅等,2019)。音频大地电 磁法以天然的平面电磁波作为场源,通过观测相 互正交的电磁场分量来探测地下不同深度介质的 导电性结构 (Chave and Jones,2012;李忠等, 2021)。近年来,针对锰矿整装勘查区南华纪"大 塘坡式"沉积型锰矿床 (周琦等,2017;杨炳南 等,2018),运用音频大地电磁法识别矿区构造格 架、探测地下电性结构、预测矿体展布形态及空 间位置,建立了南华纪"大塘坡式"锰矿地质-地 球物理找矿模型,有效指导了深部找矿工作。

1 研究区概况

1.1 地质概况

松桃普觉锰矿区位于上扬子东缘成矿带中南段,处于扬子地块东南缘与华夏地块的结合地带, 大地构造位置位于扬子陆块与南华活动带过渡区 的江南造山带的西南段(戴传固等,2008, 2010)。根据周琦等(2016b)通过对南华纪地层 系统和地层分区的研究,研究区位于石阡-松桃-古丈Ⅲ级地堑盆地中的普觉Ⅳ级地堑盆地(图1, 图 2)。

研究区地层主要有青白口系红子溪组(Pt_3h), 南华系中统两界河组(Nh_2l)、铁丝坳组(Nh_2t)、 大塘坡组(Nh_2d),南华系上统南沱组(Nh_3n), 震旦系至寒武系老堡组(Z-Cl)、震旦系下统陡山 沱组(Z_1d),寒武系第二统九门冲组(C_2jm)、变 马冲组(C_2b)、杷榔组(C_2p)、清虚洞组 (C_2q),寒武系第三统高台组(C_3g)、石冷水组 (C_3s),寒武系第三统至芙蓉统娄山关组($C_{3-4}ls$) 及第四系(Q)。研究区位于梵净山穹状背斜北东



1—控制Ⅲ级地堑盆地和地垒的同沉积断层;2—控制Ⅳ级地堑盆地和地垒的同沉积断层;3—Ⅳ级地堑盆地及所控制的锰矿床名称;4—Ⅲ 级地堑盆地范围;5—Ⅲ级地垒范围;6—研究区大地构造所在位置;7—同沉积断层编号;8—研究区在石阡-松桃-古丈(Ⅲ级)地堑盆地 中的位置

图1 黔东及毗邻区南华纪早期武陵次级裂谷盆地结构与构造古地理图 (周琦等, 2016b)

Fig. 1 Structural and tectonic paleogeographic sketch of the Wuling secondary rift basin in the Early Nanhua period in eastern Guizhou and its adjacent areas (Zhou et al., 2016b)

1-Synsedimentary faults that controlling 3rd-order graben basin and horst; 2-Synsedimentary faults that controlling 4th-order graben basin and horst; 3-Name of the Mn deposits controlled by 4th-order graben basin; 4-Range of 3rd-order graben basin; 5-Range of 3rd-order graben basin; 6-Geotectonic location of the study area; 7-Number of synsedimentary faults; 8-Location of the study area in the Shiqian-Songtao-Guzhang graben basin



1-两界河期-铁丝坳期砂砾岩沉积; 2-大塘坡早期黑色炭质页岩; 3-大塘坡中晚期粉砂质页岩; 4-同沉积断层; 5-菱锰矿体

图 2 黔渝湘毗邻区南华纪两界河-大塘坡期南华裂谷盆地复原 (周琦等, 2016b)

Fig. 2 Reconstruction of the Nanhua rift basin in Liangjiehe-Datangpo stages of the Nanhua period in the Guizhou-Hunan-Chongqing border area, South China (Zhou et al., 2016b)

1-Glutenite deposits the Liangjiehe-Tiesiao stages; 2-Black carbonaceous shale in the early Datangpo stage; 3-Silty shale in the middle and late datangpo stages; 4-Synsedimentary fault; 5-Rhodochrosite

侧,区内以一系列北北东、北东向断裂、褶曲为 主的构造格架(图3)。区内褶皱主要有猴子坳向 斜,主要断裂有红石断裂、三阳断裂、扬立掌断 裂、木耳断裂、水银厂断裂等。

区内锰矿是一种新的锰矿床类型——气液喷 溢沉积型锰矿床,是典型的南华纪"大塘坡式"



1-走滑断裂; 2-逆断层; 3-正断层; 4-性质不明断层; 5-AMT 点位; 6-研究区位置

图 3 研究区主要断裂格局及 AMT 测线点位布设图

Fig. 3 Map showing the pattern of main faults and the layout of AMT surveyline points

1-Strike-slip fault; 2-Reverse fault; 3-Normal fault; 4-Fault of unknown nature; 5-AMT point; 6-Location of the study area

沉积型锰矿。锰矿体产于南华系下统大塘坡组第 一段(Nh₂d¹)中,俗称"含锰岩系",其岩性主 要由菱锰矿、炭质页岩、黏土岩组成。区内锰矿 为隐伏的锰矿床,矿体形态简单,呈层状、似层 状产出,具有品位高、厚度大、延伸展布广等特 点。锰矿体顶板为粉砂质炭质页岩,局部顶板为 薄层凝灰质黏土岩。锰矿体底板为炭质页岩,少 数矿体直接与铁丝坳组含砾砂岩接触,其底板为 含砾砂岩。

1.2 物性特征

在系统收集研究区以往物性资料的基础上, 采用 DZD-6A 多功能电法仪补充测量了岩矿石野外 露头、钻孔岩心物性数据。经综合分析,归纳了 研究区物性特征(表1)。

由表1可见,区内寒武系第三统至芙蓉统娄山 关组(ϵ_{3-4} ls)、寒武系第三统石冷水组(ϵ_{3} s)和 寒武系第二统清虚洞组($\epsilon_{2}q$)岩性主要为灰岩、 白云岩,平均电阻率大于 3000 $\Omega \cdot m$,呈高阻电性 特征;寒武系第二统杷榔组($\epsilon_{2}p$)、变马冲组 ($\epsilon_{2}b$)、九门冲组($\epsilon_{2}jm$)岩性主要为粉砂质页 岩、炭质页岩,平均电阻率小于 1000 $\Omega \cdot m$,呈低

表1 岩(矿)矿物性特征统计

Table 1 Statistics of physical properties of rocks (minerals)

| 岩性名称 | 地层代号 | 样点数/ | 电阻率 平均值/ | 极化率 平均值/ |
|-------|--|------|--|-------------|
| | | 尽 | $(\Omega\boldsymbol{\cdot}\mathrm{m})$ | % |
| 地表黏土 | Q | 31 | 135.71 | 1.62 |
| 白云岩 | $\mathop{\mathrm{\mathfrak{S}}}\nolimits_{\operatorname{3-4}} ls,\mathop{\mathrm{\mathfrak{S}}}\nolimits_2 q,\operatorname{Z}_1 d,\operatorname{Nh}_2 l$ | 52 | 3203.29 | 1.86 |
| 灰岩 | $\mathfrak{E}_2 q$ | 38 | 5121.47 | 1.67 |
| 砂岩 | $\epsilon_2 p$, $\epsilon_2 b$ | 40 | 1677.38 | 1.88 |
| 页岩 | $\mathrm{Nh}_2 d^2$ 、 $\mathrm{C}_2 jm$ | 35 | 540.98 | 2.30 |
| 炭质页岩 | $\mathrm{Nh}_2 d^1$ | 41 | 24.41 | 20.28 |
| 含砾砂岩 | Nh_3n , Nh_2t | 45 | 1662.41 | 2.76 |
| 板岩 | Pt ₃ h | 68 | 1382.70 | 2.22 |
| 氧化锰矿石 | $\mathrm{Nh}_2 d^1$ | 30 | 49.86 | 8.27 |
| 块状锰矿石 | $\mathrm{Nh}_2 d^1$ | 35 | 19.04 | 11.98 |

阻电性特征; 震旦系 (Z) 中上部岩性为白云岩, 下部为炭质页岩,其综合电阻率低于 3000 $\Omega \cdot m$; 南华系上统南沱组 (Nh₃n)、南华系中统大塘坡组 二段 (Nh₂d²) 岩性主要为含砾砂岩、黏土岩、粉 砂质页岩,其综合电阻率介于 1000~2000 $\Omega \cdot m$, 呈相对低阻电性特征; 南华系中统大塘坡组一段 (Nh₂d¹),即含锰岩系岩性主要为炭质页岩和锰矿 体,电性特征为低阻; 南华系中统铁丝坳组 (Nh₂t) 岩性为含砾砂岩,其电阻率大于 1000 Ω·m; 南华系中统两界河组 (Nh₂l) 岩性主要为白云岩, 电阻率大于 3000 Ω·m;青白口系红子溪组 (Pt₃h) 岩性主要为变余砂岩和板岩,综合电阻率大于 1000 Ω·m。

参考岩矿石电阻率特征,将岩性电阻率特征 相近的相邻地层进行合并。如寒武系第三统至芙 蓉统娄山关组、寒武系第三统石冷水组岩性主要 为电阻率特征呈高阻的白云岩,寒武系第二统清 虚洞组岩性主要为电阻率特征呈高阻的灰岩,将 以上3个地层合并划分为高阻电性层。总体上研究 区地下电性结构可划分为"高阻—低阻—中高阻" 3层模式(图4)。

2 AMT 野外数据采集与处理

此次 AMT 研究工作采用 V8 多功能电法工作 站开展野外数据采集,投入1台主机,型号为 V8-6R,1台辅助接收机,型号为 RXU-3ER。采用 "十"字交叉型布极方式进行四分量张量观测,采 集频率范围 0.35~10400 Hz,采集参数为磁道数据 和电道数据。基于研究经费考虑,完成1条剖面, 测线总长 11 km,点距 50~200 m,共计 100 个测 点的数据采集工作。AMT 剖面南东段地形起伏较 大、植被茂密。北西段地势相对平缓,观测条件 较好。测区总体电磁干扰较弱,主要干扰源为零 散分布于测区的村寨民用电线。AMT 剖面方位角



图 4 研究区电性结构特征图

Fig. 4 Diagram showing the resistivity structure of the study area

147°,大致垂直于普觉Ⅳ级地堑盆地空间展布方向,与区内燕山期北东向构造垂直,与北北东向构造斜交。通过开展不同观测时间试验(图 5)、不同电极距长度试验(图 6)等系列采集参数试验,优选出了适合研究区的野外采集技术参数,即采集参数增益设置为 1,低通滤波选择 0 档,野外采集电极距长度为 40 m,单点采集时间大于60 min。



a—观测时间 30 min; b—观测时间 45 min; c—观测时间 60 min

图 5 不同观测时间测点曲线对比

Fig. 5 Comparison of measuring point curves at different observation times

(a) A 30-minute observation; (b) A 45-minute observation; (c) A 60-minute observation

野外采集的 AMT 原始资料记录的是测点电场和磁场分量的时间序列,通过数据处理获取测点的视电阻率和相位等 AMT 参数的响应。首先根据测点班报记录更改测点参数信息,采用 Fourier 变换法进行 AMT 的频谱分析,然后使用 Robust 处理技术

计算大地电磁的阻抗张量,获取用于编辑的互功 率谱。通过人机交互的方式对子功率谱进行筛选, 剔除严重受干扰的功率谱,保留质量高的功率谱 参与统计计算。预处理后的 AMT 资料导入 MTSoft2D 软件作编辑平滑、静态校正 (Jiracek,



a-电极距为 20 m; b-电极距为 30 m; c-电极距为 40 m

图 6 不同电极距测点曲线对比

992

Fig. 6 Comparison of measuring point curves with different electrode distances

(a) A 20-meter electrode spacing; (b) A 30-meter electrode spacing; (c) A 40-meter electrode spacing

1990)、地形校正(韩骑等,2015)等进一步处理。图7a-7c为160~164号测点经简单编辑平滑后的电阻率曲线。由图可见,各曲线连续性好,形态明确,表明测点数据质量较好。162号点由于

受静态效应影响, xy 曲线和 yx 曲线分离, 需作静态校正处理(图 7b)。图 7d—7f 为通过观察相邻测点电阻率数据曲线特征,采用曲线平移法实现 162 号点静态校正后的曲线(图 7e)。



蓝色—xy 曲线; 红色—yx 曲线

图 7 162 号测点静校正前后曲线对比

Fig. 7 Comparison of curves before and after static correction at measuring point 162 Blue-the xy curve; Red-the yx curve

3 理论模型反演计算

3.1 理论模型建立

根据研究区地电结构特征,在不考虑地形因素的情况下,建立"高一低一高"3层电性结构的 简化构造模型(图8)。模型长度为4km,深度为 3km,在2.5km处发育正断层,断层切穿整个模型,断距为0.5km。模型上部表示为寒武系第二 统至芙蓉统碳酸盐岩高阻层,其电阻率填充为 1500Ω·m;模型中部表示为寒武系第二统与南华 系碎屑岩低阻层,忽略相对较薄的震旦系下统陡 山沱组白云岩高阻夹层,电阻率填充为500Ω·m, 在其底部设置了以炭质页岩和锰矿体为主的含锰 岩系低阻层,电阻率填充为50Ω·m;模型深部表 示为青白口系含砾砂岩、浅变质岩为主的高阻层, 深部电阻率填充为2500Ω·m;正断层电阻率填充 为100Ω·m。使用 Mtsoft2D 正演模块采用50×50 的矩形网格剖分单元对该模型进行二维有限元正 演(刘向冲,2019)。按照对数等间距在0.35~ 10400 Hz 范围内取与实测频率相同的60个测量频 点,模拟计算40个测点 TE 模式和 TM 模式的视电



图 8 正断层地电模型

Fig. 8 Geoelectric model of the normal fault

3.2 理论模型反演计算

目前,针对 AMT 资料较为成熟的反演方法有 Bostick 反演法(周虬,1985)、快速松弛反演法 (Smith and Booker, 1991)、二维 Occam 反演法 (De Groot-Hedlin and Constable, 1990)、非线性共 轭梯度反演法(Rodi and Mackie, 2001)。Bostick 反演法是一种拟二维的近似反演方法,可以快速 直观地显示视电阻率随深度的变化情况,但具有 反演结果精度不高的缺点。快速松弛反演法是通 过减少正演的次数,从而减少反演运算时间,该 方法的反演结果具有多解性。二维 Occam 反演法相 对于快速松弛反演法具有稳定的收敛性,但其反演 计算时间较长。非线性共轭梯度反演法(NLCG) 相对于其他反演方法具有计算结果稳定、效率高 等优点,但其对初始模型的依赖性较强。通过对 比各反演方法的优缺点(康敏等,2017),笔者分 别选用 Bostick 和 Occam 一维反演结果作为初始模 型,采用非线性共轭梯度反演法优选适合于理论 模型的二维反演模式,将该反演模式运用于研究 区实测数据的反演。

理论模型的6种不同模式反演结果如图9所 示,以 Occam-TE 模式一维反演为初始模型,二维 反演采用 TE 模式、TM 模式、TE 和 TM 联合模式 的反演结果如图 9a—9c。以 Bostick-TE 模式一维反 演为初始模型,二维反演采用 TE 模式、TM 模式、 TE 和 TM 联合模式的反演结果如图 9d—9f。NLCG 6种不同模式的反演结果在纵向上均呈现了"高— 低一高"的3层电性结构,各层厚度与理论模型 相当。但对于横向电性特征的辨识以及构造的识 别表现不一。在图 9a—9c 中,通过上部 2.5 km 附 近和中部低阻层的电阻率不连续性, 较好地识别 了断层性质及其发育特征,对由于断层错动引起 的地层横向变化有较高的灵敏度。特别是在图 9b 模式下的反演结果与理论模型最为吻合。在图 9d—9f中,中部低阻层在横向上从左至右具有抬 升趋势,这是模型横向电性变化的综合反映,对 构造识别不敏感。另外,理论模型反演结果可见, 电性特征呈低阻的含锰岩系在反演断面中并非位



a—初始模型 Occam-TE 数据+TE 反演; b—初始模型 Occam-TE 数据+TM 反演; c—初始模型 Occam-TE 数据+TE&TM 反演; d—初始模型 Bostick-TE 数据+TE 反演; e—初始模型 Bostick-TM 数据+TE 反演; f—初始模型 Bostick-(TE+TM)数据+TE 反演;

图 9 不同初始模型及参数的 NLCG 反演成果图

Fig. 9 NLCG inversion results of different initial models and inversion methods

(a) Initial model Occam-TE data+TE inversion; (b) Initial model Occam-TE data+TM inversion; (c) Initial model Occam-TE data+TE inversion; (d) Initial model Bostick-TE data+TE inversion; (e) Initial model Bostick-TM data+TE inversion; (f) Initial model Bostick(TE+TM) data+TE inversion

于低阻层中部电阻率值最低的位置,而是位于低 阻层底部,电阻率由低向高渐变的过渡带。这为 实测剖面推测含锰岩系埋深及其空间展布提供了 理论支撑。

通过反演结果对比分析,认为采用图 9b 中的模式,即以 Occam-TE 一维反演为初始模型的二维 NLCG-TM 反演模式更能客观反映理论模型电性结构 特征,有利于断裂构造的识别。实测 AMT 数据经处 理后,采用上述反演模式进行二维带地形反演。

4 实测 AMT 剖面电性结构分析

根据岩性资料、物性资料以及电阻率等值线 连续的原则,鉴于地层岩性电性差异和 AMT 的分 辦率,参考剖面地质模型(图10),对反演图(图 11)相关岩性相近的地层层位进行了电性层合并, 划分出了a、b、c、d共4个电性区块。其中,a 为高阻层,反映了寒武系第三统至芙蓉统娄山关 组至寒武系第二统清虚洞组碳酸盐岩地层;b为低 阻层,反映了以页岩、炭质页岩等碎屑岩为主的 寒武系第二统至南华系中上统地层;c为高阻层, 是青白口系变余砂岩、板岩电性特征的综合反映; d为由b至c的过渡层,即是低阻向高阻过渡的相 对中高阻层。通过理论模型反演分析,含锰岩系 位于断面低阻体下部,处于由低阻向高阻渐变的 过渡带。结合断面低阻体形态,推测了含锰地质 体大致空间形态,其埋深由北西至南东逐渐加大, 整体呈单斜状。



1—红子溪组;2—清水江组;3—两界河组;4—铁丝坳组;5—大塘坡组第二段;6—南沱组;7—震旦系;8—牛蹄塘组;9—九门冲组; 10—变马冲组;11—杷榔组;12—清虚洞组;13—寒武系第三统至芙蓉统;14—板岩;15—变余砂岩;16—推测含锰岩系;17—粉砂质页 岩;18—含砾砂岩;19—砂岩;20—炭质页岩;21—灰岩;22—白云岩;23—第四系松散堆积体;24—推测断层

图 10 900 号剖面地质模型图

Fig. 10 Geological model of the profile 900

1-The Hongzixi formation; 2-The Qingshuijiang formation; 3-The Liangjiehe formation; 4-The Tiesiao formation; 5-The second section of the Datangpo formation; 6-The Nantuo formation; 7-The Sinian system; 8-The Niutitang formation; 9-The Jiumenchong formation; 10-The Bianmachong formation; 11-The Palang formation; 12-The Qingxudong formation; 13-Cambrian third system to Furong system; 14-Slate; 15-Blastopsammite; 16-Supposed manganese-bearing rock series; 17-Sand shale; 18-Pebbled sandstone; 19-Sandstone; 20-Coaly shale; 21-Limestone; 22-Dolomite; 23-Quaternary loose deposits; 24-Supposed fault

断面浅部 156 号点附近两侧电阻率差异明 显,表现为高阻与低阻的岩性分界面,推测为研 究区主要的控矿断层 F₀,F₀断层延伸较深,深部 未对含锰岩系造成破坏。180 至 210 号点低阻层 电阻率等值线不连续,推测是由已知断层 F₁引 起。240 至 280 号点之间,电阻率等值线横向不 连续,具有明显的低阻上凸特征,推测是由 F₂、 F₃断层引起。300 号点下方横向的电阻率等值线 发生了较明显的低阻上凸,在其深部伴有电性分 界面, 推测由 F_4 断层与隐伏的 F_5 断层组合成的 "锲形"构造。

由于剖面地层产状较陡,构造较发育,纵向 电性结构在不同区段有所不同。在 112~156 号点 范围,为单一的高阻结构;在 156~210 号点范围, 电性结构为"低阻—相对高阻"渐变的双层模式; 在 210~230 号点范围,电性结构为"高阻—低 阻—相对高阻"的3 层模式;230~310 号点范围, 电性结构为"高阻—低阻"的双层模式。



a—寒武系娄山关组和清虚洞组岩性组合层; b—寒武系第二统至南华系中上统岩性组合层; c—青白口系地层; d—南华系与青白口系过渡 带岩性组合层; 1—推测地层界线; 2—推测断层及编号; 3—推测含锰地质体

图 11 900 号剖面 NLCG 反演成果图

Fig. 11 Results of the profile 900 from the NLCG inversion

(a) Lithologic combination layers of the Cambrian Loushanguan formation and the Qingxudong formation; (b) Lithologic combination layers from the second Cambrian to the middle-upper Nanhua system; (c) The Qingbaikou formation; (d) Lithologic assemblage layer in the transitional zone between the Nanhua system and the Qingbaikou system

1-Supposed stratigraphic boundaries; 2-Supposed faults and numbers; 3-Supposed manganese-bearing geological bodies

5 结论

(1)通过岩矿石电性特征分析,建立了研究 区总体"高阻—低阻—中高阻"3层的电性结构分 层模式。实测AMT 剖面地表不同位置出露地层岩 性和电性差异较大,地层产状较陡,剖面电性结 构为单层、双层、三层的多元组合类型。

(2)建立与研究区地电结构近似的构造理论 模型,采用6种不同反演模式对理论模型进行反演 计算,通过反演结果对比分析,优选出了适合研 究区的最佳反演参数组合:初始模型 Occam-TE 数 据+NLCG-TM 反演,即选用 Occam 反演法对 TE 数 据做一维反演,以一维反演结果为初始模型对 TM 数据做非线性共轭梯度反演。

(3) AMT 剖面反演成果清晰地反映了地层岩 性空间展布和构造格架。通过理论模型正反演分析,含锰岩系位于断面低阻层底部,结合实测数 据反演剖面低阻层的展布特征,间接地识别了含 锰地质体的空间展布形态,查明了后期构造 F₀等 断层与含锰地质体的接触关系,为分析研究区锰 矿成矿地质条件和深部找矿预测提供了地球物理 依据。

(4)研究表明,音频大地电磁法能够有效的 识别研究区地电结构及深部构造展布特征。通过 理论模型的反演研究,优选最佳反演方案,能够 更加客观地对实测数据进行反演和解释,为区内 锰矿深部找矿提供地球物理支撑。

References

- CHAVE A D, JONES A G, 2012. The magnetotelluric method [M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- DAI C G, ZHANG H, HUANG Q H, 2008. Typical tectonic styles and their geologic significance in eastern Guizhou province [J]. Journal of Geomechanics, 14 (4): 339-345. (in Chinese with English abstract)
- DAI C G, CHEN J S, LU D B, et al., 2010. Wuling orogeny in eastern Guizhou and its adjacent regions and its geological significance [J]. Journal of Geomechanics, 16 (1): 78-84. (in Chinese with English abstract)
- DE GROOT-HEDLIN C, CONSTABLE S C, 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data [J]. Geophysics, 55 (12): 1613-1624.
- DI Q Y, ZHU R X, XUE G Q, et al., 2019. New development of the Electromagnetic (EM) methods for deep exploration [J]. Chinese Journal of Geophysics, 62 (6): 2128-2138. (in Chinese with English abstract)

- HAN Q, HU X Y, CHENG Z P, et al., 2015. A study of twodimensional MT inversion with steep topography using the adaptive unstructured finite element method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 58 (12): 4675-4684. (in Chinese with English abstract)
- HE M X, PEI F G, FANG H, et al., 2017. The application of audio frequency magnetotelluric sounding to the investigation of gas hydrate in the Hala Lake depression of the Qilian Mountain [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 41 (6): 1167-1174. (in Chinese with English abstract)
- HE S, YANG B N, LI H L, et al., 2019. Identification of IV Graben tectonics of southeast Chongqing by AMT method and its significance [J]. Geological Science and Technology Information, 38 (1): 270-276. (in Chinese with English abstract)
- JIRACEK G R, 1990. Near-surface and topographic distortions in electromagnetic induction [J]. Surveys in Geophysics, 11 (2): 163-203.
- KANG M, HU X Y, KANG J, et al., 2017. Compared of magnetotelluric 2D inversion methods [J]. Progress in Geophysics, 32 (2): 476-486. (in Chinese with English abstract)
- LI J M, 2004. Technical guide for induced polarization method [M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)
- LI J W, ZHAO X F, DENG X D, et al., 2019. An overview of the advance on the study of China's ore deposits during the last seventy years in China [J]. Scientia Sinica (Terrae), 49 (11): 1720-1771. (in Chinese with English abstract)
- LI X, 2014. Experience and enlightenment of great prospecting achievements in Tongren Songtao manganese ore exploration area, Guizhou [J]. Mineral Deposits, 33 (S1): 893-894. (in Chinese with English abstract)
- LI Z, WU Z H, WANG J M, et al., 2021. Using EH4 audiomagnetotelluric sounder to detect the gigantic Qiaojia paleo-landslide and its structural characteristics [J]. Journal of Geomechanics, 27 (2): 317-325. (in Chinese with English abstract)
- LIU X C, 2019. Finite-element simulations of structure-fluid coupling: a case study in vein-type tungsten deposits [J]. Journal of Geomechanics, 25 (S1): 163-169. (in Chinese with English abstract)
- MI H Z, 2019. Research status and development thinking of underground geophysical exploration techniques for metal deposits [J]. Mineral exploration, 10 (3): 601-605. (in Chinese with English abstract)
- QIN Y, AN Z Z, WANG J W, et al., 2013. The discovery and geological characteristics of the super-large sized Daotuo manganese deposit in Songtao, Guizhou [J]. Mineral Exploration, 4 (4): 345-355. (in Chinese with English abstract)
- RODI W, MACKIE R L, 2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion [J]. Geophysics, 66 (1): 174-187.
- SMITH J T, BOOKER J R, 1991. Rapid inversion of two- and threedimensional magnetotelluric data [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 96 (B3): 3905-3922.
- XIONG G C, 1994. Development of magnetic exploration searching for

metallic ore deposits in China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 37 (S1): 437-443. (in Chinese with English abstract)

- XUE G Q, 2004. On surveying depth by transient electromagnetic sounding method [J]. Oil Geophysical Prospecting, 39 (5): 575-578. (in Chinese with English abstract)
- YAN S, SHI X X, CHEN M S, 2009. The probing depth of transient electromagnetic field method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 52 (6): 1583-1591. (in Chinese with English abstract)
- YANG B N, HU X Y, ZHOU Q, et al., 2018. An audio-frequency magnetotellurics method study on the exploration technology of ancient natural gas seepage sedimentary-type manganese deposit of Nanhua period in South China [J]. Acta Geologica Sinica, 35 (4): 369-375. (in Chinese with English abstract)
- YANG S T, TU F F, 2017. A major breakthrough has been made in manganese ore prospecting in China [J]. Management and Research on Scientific & Technological Achievements (7): 74-75. (in Chinese)
- YANG Y R, ZHANG Y P, MIAO Y S, et al., 2012. Relationship between prospecting line length and measured depth in high-density electric method [J]. Coal Geology of China, 24 (6): 63-67. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG C H, 1985. The problem of magnetic prospecting [M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)
- ZHANG S, ZHOU Q, ZHANG P Y, et al., 2018. Geological characteristics and prospecting practice of Pujue super-large manganese deposit in Songtao, Guizhou [J]. Guizhou Geology, 35 (4): 304-313. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU Q, 1985. A simple inversion of 1D magnetotelluric sounding curve: Bostick inversion method and its application [J]. Oil Geophysical Prospecting, 20 (1): 80-88. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU Q, DU Y S, QIN Y, 2013. Ancient natural gas seepage sedimentary-type manganese metallogenic system and ore-forming model: A case study of 'Datangpo type' manganese deposits formed in rift basin of Nanhua period along Guizhou-Hunan-Chongqing border area [J]. Mineral Deposits, 32 (3): 457-466. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU Q, DU Y S, YUAN L J, et al., 2016a. Prediction of geologic exploration in Songtao manganese national fully equipped exploration district in Tongren, Guizhou [J]. Guizhou Geology, 33 (4): 237-244. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU Q, DU Y S, YUAN L J, et al., 2016b. The structure of the Wuling rift basin and its control on the manganese deposit during the Nanhua period in Guizhou-Hunan-Chongqing border area, South China [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 41 (2): 177-188. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU Q, DU Y S, YUAN L J, et al., 2017. Exploration models of ancient natural gas seep sedimentary-type manganese ore deposit: A case study of the Nanhua period "Datangpo" type manganese ore in the conjunction area of Guizhou, Hunan and Chongqing [J]. Acta Geologica Sinica, 91 (10): 2285-2298. (in Chinese with English abstract)

ZHOU Q, DU Y S, 2019. Ancient natural gas seepage sedimentary-type manganese deposit in South China [M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)

附中文参考文献

- 戴传固,张慧,黄清华,2008. 黔东地区典型构造样式特征及其地 质意义 [J]. 地质力学学报,14 (4):339-345.
- 戴传固,陈建书,卢定彪,等,2010. 黔东及邻区武陵运动及其地质 意义 [J]. 地质力学学报,16 (1):78-84.
- 底青云,朱日祥,薛国强,等,2019. 我国深地资源电磁探测新技术 研究进展 [J]. 地球物理学报,62 (6):2128-2138.
- 韩骑, 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.
- 何梅兴,裴发根,方慧,等,2017. 音频大地电磁测深在祁连山哈拉 湖坳陷天然气水合物调查中的应用 [J]. 物探与化探,41 (6): 1167-1174.
- 何帅,杨炳南,李核良,等,2019. 音频大地电磁法对渝东南Ⅳ级地 堑构造的识别及意义 [J]. 地质科技情报,38 (1):270-276.
- 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,32 (2):476-486.
- 李金铭,2004. 激发极化法方法技术指南 [M]. 北京: 地质出版社.
- 李建威,赵新福,邓晓东,等,2019.新中国成立以来中国矿床学研 究若干重要进展 [J].中国科学:地球科学,49 (11): 1720-1771.
- 李啸, 2014. 贵州铜仁松桃锰矿整装勘查区找矿重大成果的经验与 启示 [J]. 矿床地质, 33 (S1): 893-894.
- 李忠,吴中海,汪金明,等,2021.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,27 (2):317-325.
- 刘向冲,2019. 构造-流体耦合有限元模拟: 以石英脉型钨矿为例 [J]. 地质力学学报,25 (S1):163-169.
- 米宏泽,2019.金属矿地下地球物理勘查技术的研究现状与发展思考 [J].矿产勘查,10 (3):601-605.

覃英,安正泽,王佳武,等,2013.贵州松桃锰矿整装勘查区道坨隐

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 可扫码直接下载文章电子版,也有可能听到作者的 语音介绍及更多文章相关资讯 伏超大型锰矿床的发现及地质特征 [J]. 矿产勘查, 4 (4): 345-355.

- 熊光楚,1994. 金属矿区磁法勘探的进展与展望 [J]. 地球物理学报,37 (S1):437-443.
- 薛国强,2004. 论瞬变电磁测深法的探测深度 [J]. 石油地球物理勘探,39 (5):575-578.
- 闫述,石显新,陈明生,2009. 瞬变电磁法的探测深度问题 [J].地球物理学报,52 (6):1583-1591.
- 杨炳南, 胡祥云, 周琦, 等, 2018. 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, 35 (4): 369-375.
- 杨胜堂,涂飞飞,2017. 我国锰矿找矿获得重大突破 [J]. 科技成 果管理与研究 (7):74-75.
- 杨玉蕊,张义平,缪玉松,等,2012. 高密度电法中勘探线长度与测 深关系浅析 [J]. 中国煤炭地质,24 (6):63-67.
- 张传华, 1985. 磁法勘探问题 [M]. 北京: 地质出版社.
- 张遂,周琦,张平壹,等,2018.贵州松桃普觉超大型锰矿床主要特征与找矿实践 [J].贵州地质,35 (4):304-313.
- 周虬,1985. 一种简易的一维大地电磁测深反演方法: 博斯蒂克法 反演及其应用 [J]. 石油地球物理勘探,20 (1):80-88.
- 周琦,杜远生,覃英,2013. 古天然气渗漏沉积型锰矿床成矿系统 与成矿模式:以黔湘渝毗邻区南华纪"大塘坡式"锰矿为例 [J]. 矿床地质,32 (3):457-466.
- 周琦,杜远生,袁良军,等,2016a.贵州铜仁松桃锰矿国家整装勘 查区地质找矿主要进展及潜力预测 [J].贵州地质,33 (4): 237-244.
- 周琦, 杜远生, 袁良军, 等, 2016b. 黔湘渝毗邻区南华纪武陵裂谷 盆地结构及其对锰矿的控制作用 [J]. 地球科学, 41 (2): 177-188.
- 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.
- 周琦, 杜远生, 2019. 华南古天然气渗漏沉积型锰矿 [M]. 北京: 科学出版社.

