

# 湘西北民乐毗邻区深部电性结构及其地质意义

曹创华<sup>1,3,4)</sup>, 邹光均<sup>1)</sup>, 彭杰<sup>1)</sup>, 楼法生<sup>3)</sup>, 邓居智<sup>4)</sup>, 孟德保<sup>1)</sup>,  
康方平<sup>1)</sup>, 文春华<sup>1)</sup>, 李坤鹏<sup>2)</sup>, 韩中骥<sup>1)</sup>

1)湖南省地质调查院, 湖南长沙 410116; 2)湖南省地球物理地球化学勘查院, 湖南长沙 410116;  
3)江西省地质调查研究院, 江西南昌 330030; 4)东华理工大学地球物理与测控技术学院, 江西南昌 330013

**摘要:** 为揭示湘西北民乐毗邻区南华纪大塘坡组含锰沉积地层结构, 深化对地堑-地垒成锰地质空间的认识, 实现地球物理深地探测技术对南华纪沉积型锰矿床的找矿指导, 对区内经过民乐锰矿的大地电磁测深剖面进行了处理和解释, 结合地质信息反演了南华纪古盆地地层构造格局。首先通过频率域大地电磁探测数据进行了阻抗张量和相位张量分解分析, 揭示了湘西北民乐地区在高频区(大于0.01 Hz)主要呈现二维构造特征; 其次利用 Swift 分解和相位张量分解结果对剖面所有测点数据进行了电性主轴分析, 判断了剖面主要构造走向总体上呈北偏东 37°, 计算了 TE、TM 两个极化方向的卡尼亚视电阻率和相位; 最后针对 TE、TM 两个模式利用 Occam 反演方法分别进行了单独和联合反演, 得到了民乐地区深部电性分布并进行了地质解释。研究结果表明: 湘西北民乐地区由浅至深电性结构比较简单, 地层由新到老分层性较好, 大体可分为高台组白云岩中阻层、清虚洞组灰岩高阻层、石牌组—牛蹄塘组低阻层、留茶坡组—陡山沱组较高阻层、南沱组—大塘坡组低阻层、古城组和富禄组中阻层 6 层; 大地电磁反演电阻率模型等值线图上的“凹中凹”地层结构是圈定成矿靶区的主要地球物理标志; 民乐—花垣一带为古天然气渗漏口的过渡相和边缘相, 含锰地层具有越往东北向埋深越浅、厚度也越来越薄的特点。

**关键词:** 湘西北地区; 大地电磁测深; 南华纪; 沉积盆地; 锰矿

中图分类号: P631.3 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2020.021301

## Deep Electrical Structure in the Neighboring Areas of Minle in Northwestern Hunan Province

CAO Chuang-hua<sup>1,3,4)</sup>, ZOU Guang-jun<sup>1)</sup>, PENG Jie<sup>1)</sup>, LOU Fa-sheng<sup>3)</sup>, DENG Ju-zhi<sup>4)</sup>,  
MENG De-bao<sup>1)</sup>, KANG Fang-ping<sup>1)</sup>, WEN Chun-hua<sup>1)</sup>, LI Kun-peng<sup>2)</sup>, HAN Zhong-ji<sup>1)</sup>

1) Hunan Institute of Geological Survey, Changsha, Hunan 410116;

2) Hunan Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Changsha, Hunan 410116;

3) Geological Survey of Jiangxi Province, Nanchang, Jiangxi 330030;

4) School of Geophysics and Measurement-control Technology, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013

**Abstract:** In order to reveal the manganese-bearing sedimentary stratigraphic structure of the Datangpo Formation of Nanhua Period in the neighboring areas of Minle in northwestern Hunan Province, deepen the understanding of the geological space for horst-graben manganese mineralization, and realize the geophysical deep-exploration technology for the Nanhua sedimentary manganese deposit, the authors, according to the prospecting guidance, processed and explained the magnetotelluric sounding profile passing through the Minle manganese deposit in the study area, and inferred the stratigraphic structure of the Nanhua Jigu Basin in combination with geological information. Firstly, the impedance tensor and phase tensor decomposition analysis

本文由国家重点研发计划“深地资源勘查开采”重点专项课题(编号: 2017YFC0601506)、湖南省自然科学基金“基于中心阻抗响应的大地电磁反演及应用研究”(编号: 2020JJ3136)和中国地质调查局“湖南花垣—凤凰地区铅锌矿整装勘查区矿产调查与找矿预测”(编号: 121201004000172201-22)联合资助。

收稿日期: 2019-11-08; 改回日期: 2020-01-03; 网络首发日期: 2020-02-14。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 曹创华, 男, 1985年生。博士后, 高级工程师, 工程硕士导师。长期从事矿产与城市地球物理探测技术研究。

通讯地址: 410116, 湖南省长沙市万家丽南路 898 号湖南地质大厦。E-mail: culbert@csu.edu.cn。

was carried out by the frequency domain magnetotelluric detection data, which reveals that the Minle area in northwestern Hunan mainly exhibits two-dimensional structural features in the high frequency region (greater than 0.01 Hz); secondly, the authors used Swift decomposition and phase tensor to investigate the decomposition results of the electric spindle analysis of all the survey data of the section. It is judged that the main structural trend of the section was generally 37° eastward; in addition, the apparent resistivity and phase of the two polarization directions of TE and TM were calculated. Finally, for the TE and TM modes, the Occam inversion method was used to perform separate and joint inversion, and the deep electrical distribution of the Minle area was obtained and geological interpretation was carried out. The results show that the shallow to deep electrical structure of Minle area in northwestern Hunan is relatively simple, and the strata are well stratified from new to old. The strata can be roughly divided into six layers, i.e., the middle layer of the Gaotai Formation dolomite and the high-resistance layer of the Qingxudong Group limestone, Shijia Formation–Niuhutang Formation low resistance layer, Liuchapo Formation–Doushantuo Formation higher resistance layer, Nantun Formation–Datangpo Formation low resistance layer, Gucheng Formation and Fulu Formation middle resistance layer. Magnetotelluric inversion shows that the “concave-concave” stratigraphic structure on the contour map of the resistivity model is the main geophysical marker for the ore-forming target area, that the Minle–Huayu area is the transitional phase and the marginal facies of the paleo-natural gas seepage, and that the manganese-bearing strata have the feature that the shallower the depth, the thinner the thickness northeastward.

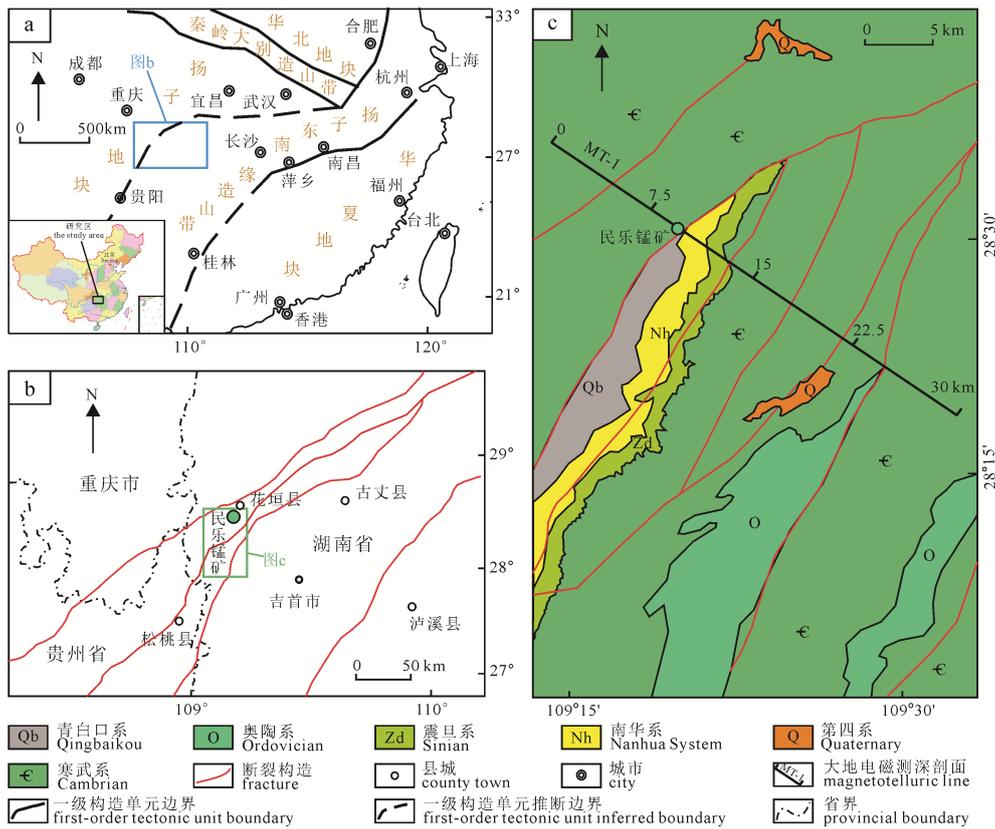
**Key words:** northwestern Hunan Province; magnetotelluric sounding; Nanhua Period; sedimentary basin; manganese ore

湘西北位于扬子板块东南缘,属湘西—鄂西成矿带南段,大地构造位置处于羌塘—扬子—华南板块之扬子陆块南部雪峰构造带北西缘及湘北断褶带南西角(图 1)。地层分区上隶属于扬子区和江南区的过渡地带。作为我国重要的成矿带之一,湘西北矿集区产出多个大中型矿床,如茶田汞矿、民乐锰矿、李梅铅锌矿、大脑坡铅锌矿等(湖南省地质调查院, 2017)。自从黔东南实现锰矿找矿突破以来(贵州省地质学会, 2013; 汪朝霞等, 2014),因湘黔渝结合部位具有沉积型锰矿成矿环境的相似性,湘西北、渝东南毗邻区的地质构造格局和深部成锰空间研究变为热点,是进一步探寻我国南华纪“大塘坡式”沉积型锰矿的重要潜在区(周琦等, 2013; 杜远生等, 2015)。

大地电磁测深(Magnetotelluric, 简称 MT)是以天然电磁场为场源来研究地球内部电性结构的一种重要的地球物理手段,其利用电磁感应原理,通过高频率信号探测浅部,低频率信号探测深部来实现地层结构的探测(柳建新等, 2012),作为深地探测主要手段,大地电磁探测技术和音频大地探测技术在深部探查领域得到广泛的实践。在实际应用中依据探测频率的不同大地电磁法探测具体分大地电磁法(频率范围一般在 0.001 ~ 360 Hz 之间)和音频大地电磁法(频率范围一般在 0.1 ~ 50 kHz 之间)(雷达等, 2017),两种探测方法野外施工基本相同,只是磁感应探头有所区别。随着各类项目的实施(国土资源部, 2017),技术逐渐成熟,并取得了大量成果。2008—2012 年,以董树文研究员为首席科学家牵头完成了我国历史上实施的规模最大的地球深部探测计划

(董树文等, 2012, 2013),主要用于探测大尺度小比例尺的地表下百公里的探测,完成了我国大地电磁阵列观测,为深地探测积累了大量数据;同时针对长江中下游庐枞矿集区等地展开了地表下 10 km 以浅的立体探测和成矿预测(吕庆田等, 2014; 肖晓等, 2014; 汤井田等, 2014)。华南大足—泉州大地电磁测深剖面视电阻率断面揭示了扬子板块东南缘分别出现了 3 个垂向低阻带,与华南南华纪沉积型锰矿的聚集区分别对应(朱介寿等, 2005; Zhang et al., 2015),为研究区深度—200 km 以浅地层结构解释提供了地球物理依据;研究区及外围的大比例尺电磁探测工作主要以近年来贵州省地质矿产勘查开发局为首在黔东南地区完成的多条音频大地电磁剖面为主,取得了贵州省松桃县李家湾、溪口—小茶园等地区地表下 2 km 以浅的电性分布特征,并对贵州铜仁松桃锰矿整装勘查区进行了地球物理找矿模型总结,认为区域内北东向次级断陷(地堑)盆地中心为地球物理异常判别的标志(杨炳南等, 2015, 2018; 何帅等, 2019)。

湘西北和黔东南地区探测目标地层南华系大塘坡组上部都是震旦系、寒武系和少部分奥陶系地层,但黔东南地区缺失寒武系牛蹄塘组炭质地层(杨炳南等, 2015),而湘东北存在且厚度达数百米且电阻率很低(刘敏等, 2018),相应的其深部的大塘坡组地层埋深相对更深,增加了探测的难度,经过分析和试验(曹创华等, 2018),本次利用大地电磁法进行探测,拟探测 5 km 以浅的电性结构分布,实现对区内南华纪沉积盆地特征的研究分析,以期对区内沉积型锰矿的远景预测提供一定的依据。



a—structural map of South China; b—structural map of fault structure in the neighboring area of northwestern Hunan; c—geological structure and magnetotelluric layout of the study area.

图 1 研究区大地构造位置及大地电磁剖面布置图

Fig. 1 Geotectonic location and magnetotelluric sounding profile layout in the study area

### 1 湘西北民乐毗邻区地质背景

区域内主要有青白口系、南华系、震旦系、寒武系、奥陶系、第四系等，其中又以寒武系发育最为完整，分布最广泛。无岩浆岩和深变质岩，地质构造以断裂为主，褶皱简单(湖南省地质调查院，2017)。

#### 1.1 地层

##### (1)青白口系

主要分布在民乐地区中西部民乐镇对门河—两河乡一带。划分为板溪群马底驿组、通塔湾组、五强溪组、多益塘组。

##### (2)南华系

主要分布于摩天岭背斜东翼青白口系外围，总体呈北东向展布，为一套浅海砂泥质碎屑岩与冰碛含砾岩系变质而成的浅变质碎屑岩，与下伏地层板溪群呈假整合或小角度不整合接触。自下而上可划分为下统富禄组、中统古城组、大塘坡组、上统南沱组。

##### (3)震旦系

整合于南华系之上。分布位置与南华系大致相近。总体呈北北东向展布，为一套浅海炭泥质、碳

酸盐沉积。在民乐地区自下而上分为陡山沱组、灯影组。

##### (4)寒武系

是研究区内出露最广的地层，整合覆盖于震旦系灯影组之上。岩石以碳酸盐岩台地沉积岩为主，出露地层有牛蹄塘组(上、下段)、石碑组、清虚洞组(上、中、下段)、高台组、娄山关组。

##### (5)奥陶系

主要分布于花垣县中北部及南东角。从老至新划分为桐梓坡组、红花园组、大湾组、牯牛潭组、宝塔组、龙马溪组共六组。

##### (6)第四系

主要为桔子洲组，漫滩堆积的略显二元结构特征，其下部为砾石层、砾石成分杂，多以石英砂岩、粉砂岩、灰岩及云岩为主，次为硅质岩，结构松散，排列具有一定的方向性；上部为漫滩相黄灰色粉砂、粉砂质黏土。

#### 1.2 构造

区域处于扬子陆块南部湘北断褶带与雪峰构造带北西缘过渡区，在漫长的地质历史发展时期中，区内主要经历了武陵运动、雪峰运动、加里东运动、海西—印支运动、燕山运动及喜山运动等多期次构

造运动的作用。区内断裂较多,由西北向东南依次如下(图 1c):

#### (1)小木村—石家寨断裂(F1)

呈先逆后正特征,构造线走向 NE40°—60°,断裂破碎带宽 20~60 m 不等,长度大于 17 km。岩石破碎,劈理、节理及方解石脉发育。带内为断层角砾岩,含量 50%~60%,角砾大小一般为 0.2~3 cm,次圆状-次棱角状,其长轴略具平行定向分布,填隙物为碎粒,胶结物为钙质和铁泥质。

#### (2)水田坝—高家湾断裂(F2)

亦呈先逆后正特征,构造线走向近 SN 向—NE50°,断裂破碎带宽 10~50 m 不等,长度大于 40 km。见断层角砾岩和透镜化,片理化,劈理发育,发育方解石脉细,局部见片理化断层泥,次级小断层发育。构造变形特征明显,中段在和尚岩见宽约 33 m 的破碎带,可分为 5 个带:碎裂岩岩带、细角砾岩带、粗角砾岩带、片理化带、褶曲带。为花垣—慈利—临湘韧性推覆剪切带在研究区的南边界断裂之一。

#### (3)水田坝—当路坪断裂(F3)

经过民乐锰矿,为一逆断层,构造线走向 NE50°—60°,断裂破碎带宽 10~55 m 不等,长度大于 42 km。断层角砾岩和透镜化,片理化,劈理发育,发育方解石脉细、小的牵引褶皱。局部碎裂岩片理化,并见剪切带,带中的见面状构造-流劈理。次级小断层发育。该断裂带是一条控岩控相的同沉积断裂。

#### (4)四龙山—竹子村断裂(F4)

为一逆断层,构造线走向 NE34°—40°,断裂破碎带宽 3~20 m 不等,长度大于 26 km。岩石破碎,劈理及方解石脉发育、片理化,见硅化构造透镜体,断层旁发育牵引小褶皱,见有次级破裂面。地层缺失。地貌上呈线状负地形。

#### (5)各腾村—雅桥乡断裂(F5)

为一逆断层,切割地层地表为寒武系,构造线走向 NE22°—40°,断裂破碎带宽 3~30 m 不等,长度约 28 km。岩石破碎、小褶皱发育,岩石弱大理岩化、小方解石脉,劈理较岩发育。破碎带内充填构造角砾岩,角砾含量 50%~60%,角砾大小多为 1~5 cm,次棱角状,胶结物为重结晶白云石和方解石。局部带内见一组 3 条断裂面,产状 300°~320°∠70°~75°,断裂面上有 5~15 cm 的重结晶断层泥。

#### (6)吉卫—盘石断裂(F6)

为一逆断层,切割地层地表为寒武系,构造线走向 NE30°—40°,断裂破碎带宽 2~15 m 不等,长度大于 21.5 km。发育构造角砾、牵引小褶皱。在吉卫北破碎带内方解石脉发育、岩石弱大理岩化、

劈理发育。见宽 2 m 的角砾岩,角砾呈次棱角状,成分为白云岩,角砾大小一般 0.5 cm×2 cm~2 cm×4 cm,最大达 5 cm×8 cm,紫红色铁质、钙质胶结。劈理产状: 300°∠82°。见矿物生长线理,倾伏: 60°∠5°。两侧地层产状凌乱。

#### (7)麻栗场—地所坪断裂(F7)

为一逆断层,切割地层地表有寒武系、奥陶系,构造线走向 NE10°—40°左右,断裂破碎带宽 20~200 m 不等,长度大于 54 km。岩石较为破碎、弱大理岩化、劈理发育,方解石脉、见擦痕和阶步、透镜体,局部见碎裂岩片理化,发育有牵引小褶皱。破碎带内由断层角砾岩、小透镜体、岩粉和断层泥组成。角砾岩呈次棱角-次圆状;透镜体大小一般 1 cm×5 cm~3 cm×10cm,最大达 5 cm×20 cm,其长轴一平行断层走向。

#### (8)禾库镇—硝洞断裂(F8)

为一逆断层,切割地层地表有寒武系、奥陶系和志留系,构造线走向 NE20°—40°,断裂破碎带宽 5~30 m 不等,长度大于 30.5 km。破碎带内岩石破碎、弱大理岩化,见有断层角砾、擦痕及阶步、方解石脉发育,并见牵引小褶皱。擦痕产状: 115°∠75°。断层角砾呈棱角至次棱角状。钙质胶结良好,致密坚硬,具有一定的硅化作用,显示压扭性特征;碎裂岩则多为方解石脉贯入胶结。该断裂带为一条控岩控相控矿的同沉积断裂。

## 2 大地电磁工作

### 2.1 测线布置及野外数据采集

湘西北民乐毗邻区 MT 数据采集剖面如上图 1 所示,据以往地质调查资料,测线以基本垂直于花垣—民乐断弯褶皱带和麻栗场断裂。布设了 1 条大地电磁剖面(曹创华等, 2018),测线命名为 MT-1,剖面整体上呈 NW—SE 走向,物探设计点距为 200 m,实际探测时根据实测场地有所偏移,但均符合最新的相关规范和技术要求,剖面长 30 km,测线的小号点从西北开始记为 0 km,依次向东南边逐点进行野外探测采集数据。

本次 MT-1 线的大地电磁数据采集工作由湖南省地质调查院和湖南省地球物理地球化学勘查院于 2018 年 6—7 月完成;工作中采用加拿大凤凰公司生产的最新 V8 系列大地电磁仪,野外数据采集过程当中采用张量布极的方式,个别测点因地形原因进行了偏移处理,90%的测点采用“十”字形,部分地形较差的地方采用“丁”字型布极,观测时 4 个不极化电极组成的 Ex、Ey 两个正交电场水平分量和 Hx、Hy 两个磁场水平分量,其中两个方向的不极化电极的距离为 50 m;本项目探测目标深度在

地表下 5 km 左右, 经过前期试验, 实测单测点观测时间在 5 小时以上, 采集频率为 0.000 55 ~ 320 Hz; 原始时间序列经过快速傅里叶变换由时间域转化到频率域, 利用传统成熟的 Robust 估计、阻抗张量分解(陈乐寿和王光锷, 1990)等处理技术, 利用电性主轴玫瑰图分析确定了地下构造电性主轴方向。后期对跳变点进行了删除, 反演时选取了 0.01~320 Hz 中高频数据进行了处理。

### 2.2 维性分析

大地电磁数据需要进行维性分析和构造走向分析, 其中维数判别确定了要以一维、二维还是三维方式进行反演。目前, 实测地层结构维性的判别主要方法有三类: 一是基于阻抗张量分解的方法, 如 Swift 分解、Bahr 分解和 Groom-Bailey 分解(Bahr, 1991; 柳建新等, 2012); 二是基于相位张量的分解方法, 如相位张量倾角因子; 三是近年来发展的新技术(陈小斌等, 2014, 2019), 如五参数优化法等。本文中尝试用 Swift 分解、Bahr 分解、Groom-Bailey 分解和相位张量的分解方法进行处理, 图 2 为 4 种方法处理后的二维偏离度沿剖面方向分布的伪彩图, 上述处理结果分别对应图 2a 至图 2d(图中纵轴  $f$  均表示为频率, 单位为 Hz,  $\lg(f)$  表示频率取以 10 为底的对数), 据图可知, 不论哪种方法, 其 90% 以上的测点在大于 0.01 Hz 以上的频段二维偏离度都小于 0.3, 即充分说明在此区域基本垂直主要构造方向所测剖面沿电性方向具有一维和二维特征, 综合来看选用二维反演较为合适。

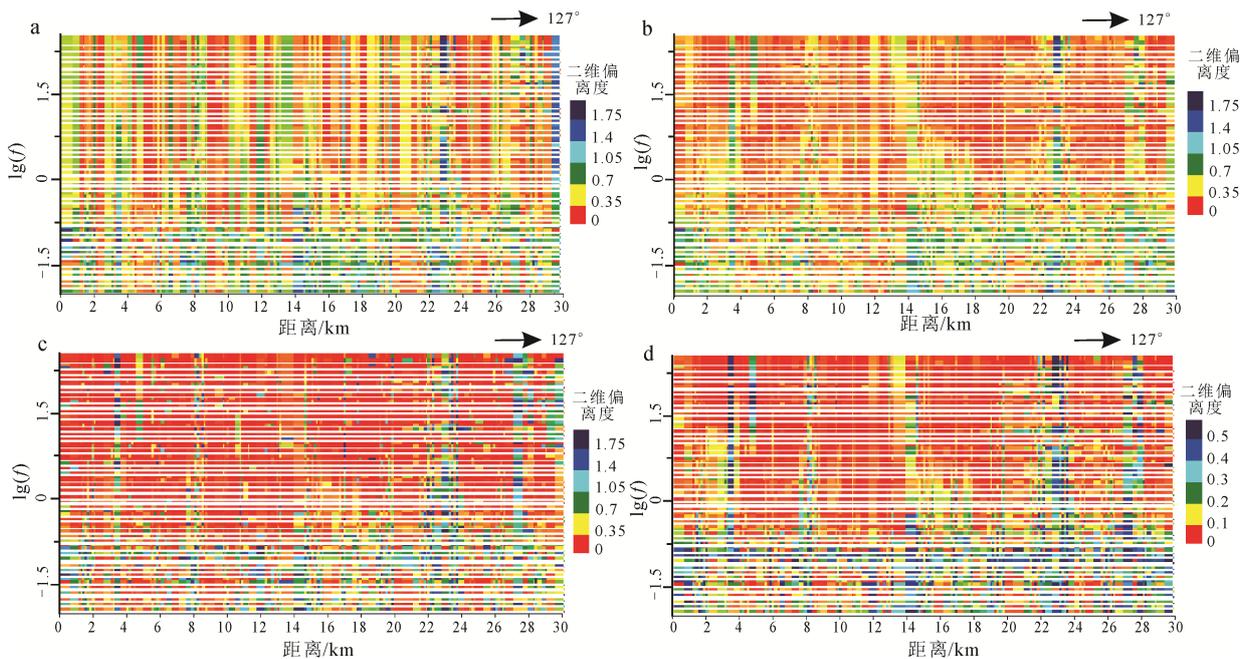
### 2.3 构造走向分析

因地表覆盖等因素, 野外实测时每个大地电磁测深点得到的阻抗张量数据与地下构造存在一定的偏角, 且经过构造的测点所测的数据反映的构造可能随着频率的降低构造方向也会发生变化, 目前较为普遍的做法是将 MT 阻抗张量数据经过玫瑰图统计分析投影到一起, 选择其概率最大的方向为电性主轴方向, 即沿着构造走向和倾向分解为两个垂直的 TE 及 TM 模式, 把实测的  $\rho_{xy}$ ,  $\rho_{yx}$ ,  $\varphi_{xy}$  和  $\varphi_{yx}$  分别变换为  $\rho_{TE}$ ,  $\rho_{TM}$ ,  $\varphi_{TE}$  和  $\varphi_{TM}$ , 即最优地表现出实际地层结构响应信息, 减少后期反演解释的误差。

本次对采集的野外探测数据处理时选择的频率范围为 0.01~320 Hz, 所有测点的阻抗张量信息利用 Swift 分解和相位张量分解方法进行了多方法讨论(图 3), 可以看出: Swift 分解很清楚地反映了剖面电性主轴方向, 相位张量分解方法也有一定的指示, 针对本次探测深度相对不深, 并结合湘西北民乐毗邻区地质背景分析(图 1), 确定研究区主要构造的走向为 NNE-SSW 向(北偏东 37°)。可以认为此次剖面不用经过电性主轴旋转分解就可以利用实测响应数据进行处理以及后续反演解释。

### 2.4 研究区地球物理特征分析

区域重磁地球物理特征上展示: 研究区位于大兴安岭—太行山—武陵山巨型重力梯度带的南段, 该带呈北东至北北东向展布, 是雪峰弧在湘西弧形构造带(武陵弧)在区内的直接反映; 研究区处于弱磁场中, 地层一般无磁性。全区磁场梯度不大,



a—MT-1 线 Swift 张量分解; b—MT-1 线 Bahr 张量分解; c—MT-1 线 Groom-Bailey 张量分解; d—MT-1 线相位张量分解。  
a—MT-1 line Swift skewness; b—MT-1 line Bahr skewness; c—MT-1 line GB skewness; d—MT-1 line phase skewness.

图 2 MT-1 线二维偏离度伪彩图

Fig. 2 Two-dimensional deviation degree pseudo color map of MT-1 line

强度仅为+20 ~ -20 nT。反映了本区地层岩石的变质程度低且大部分基本无变质的特点(谭仕敏和谢福和, 2018)。

研究区本次以大地电磁法为手段进行深地探测, 其物性衡量参数为电阻率。研究区内电性参数研究成果较多, 其中以贵州省地矿局在李家湾矿区(杨炳南等, 2015)和民乐地区大脑坡测井资料(刘敏, 2018)最具参考价值。经过梳理地层由新到老呈如下特征: 近地表第四系黏土的视电阻率为 2~115.42  $\Omega\cdot\text{m}$ ; 寒武系高台组、清虚洞组白云岩、细晶藻灰岩、砂屑灰岩视电阻率值为 2000~4579.28  $\Omega\cdot\text{m}$ ; 寒武系石牌组、牛蹄塘组(碳质)页岩视电阻率为 1~24.24  $\Omega\cdot\text{m}$ ; 震旦系茶留坡组、灯影组硅质岩、白云岩电阻率 2508.71~4050.97  $\Omega\cdot\text{m}$ ; 而目标层南华系南沱组、大塘坡组 623~1500.73  $\Omega\cdot\text{m}$ , 其中块状锰矿石视电阻率为 22.66  $\Omega\cdot\text{m}$ ; 基底岩性古城组和青白口系地层视电阻率为 2248.09~2707.68  $\Omega\cdot\text{m}$ , 表现为较高阻特征。

综合分析, 将本区地层与岩体自上而下共划分 6 个电性层: ①高台组白云岩, 中阻层; ②清虚洞组灰岩, 高阻层; ③石牌组—牛蹄塘组, 低阻层; ④留茶坡组—陡山沱组, 高阻层; ⑤南沱组—大塘坡组, 低阻层; ⑥古城组, 中阻层。但在湘黔地区湖南境内寒武系石牌组、牛蹄塘组厚度达五六百米, 而寒武系留茶坡组—陡山沱组仅不到百米, 从大地电磁信号响应的精度来看, 作者认为可将此地区探测地球物理模型垂向上简化为: 地表低阻层(第四系); 近地表寒武系灰岩高阻层; 深部寒武系石牌组—陡山沱组、震旦系茶留坡组—灯影组、南华系南沱组—大塘坡组可归到一层, 呈中低阻特征; 底部古城组和青白口系呈相对高阻特征。区内具有使用深部地球物理

探测方法进行电性信息探测的前提条件。

### 3 MT 数据反演

#### 3.1 反演方法技术

本文大地电磁测深实测数据利用二维正则化反演, 常见的有 OCCAM 反演、REBOCC 反演和 NLCCG 反演等方法(柳建新等, 2012)。本文中利用 OCCAM 反演针对  $\rho_{TE}$ 、 $\rho_{TM}$  两个方向单独进行反演, 然后再进行联合反演进行综合解释。其反演原理如下:

OCCAM 二维反演算法是 deGroot-Hedin and Constable (1990)由 OCCAM 一维反演方法扩展而来的。为了有效地抑制反演迭代过程中产生的冗余构造, 并提高解的稳定性, 在目标函数中引入了模型粗糙度, 并将模型粗糙度( $R_1$ )定义为:

$$R_1 = \|\partial_y m\|^2 + \|\partial_z m\|^2 \quad (1)$$

式中  $\partial_y$  是模型参数沿横向的粗糙度矩阵;  $\partial_z$  是模型参数沿纵向(即深度方向)的粗糙度矩阵。反演计算的目标函数变为:

$$U = \|\partial_y m\|^2 + \|\partial_z m\|^2 + \mu^{-1} \left\{ \|Wd - WF(m)\|^2 - X_*^2 \right\} \quad (2)$$

式中  $\mu^{-1}$  为正则化因子, 或正则化参数。

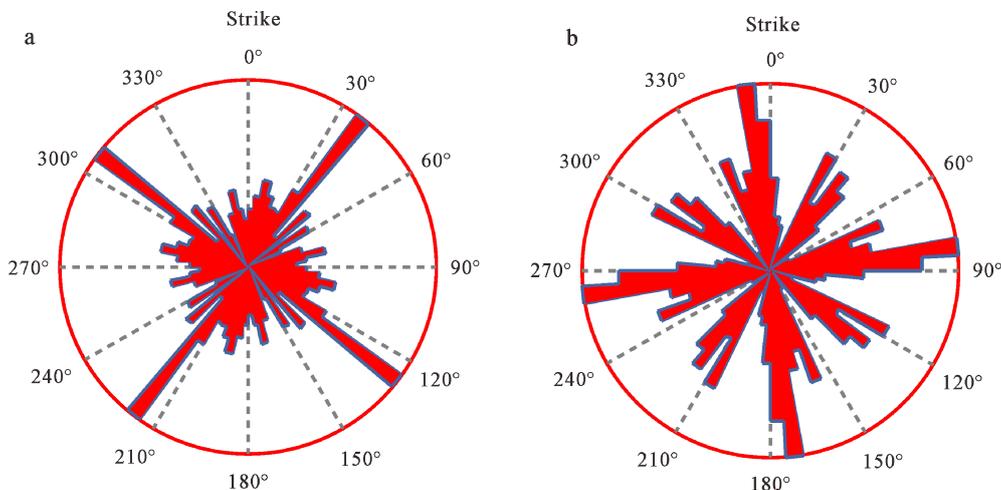
将非线性函数  $F(m)$  进行线性化处理, 则有:

$$U = \|\partial_y m_{i+1}\|^2 + \|\partial_z m_{i+1}\|^2 + \mu^{-1} \left\{ \|W\hat{d}_i - WJ_i m_{i+1}\|^2 - X_*^2 \right\} \quad (3)$$

使  $\frac{\partial U}{\partial m_{i+1}} = 0$  即可, 通过求解方程组得到模型的一般解为:

$$m_{i+1} = \left[ \mu(\partial_y^T \partial_y + \partial_z^T \partial_z) + (WJ_i)^T WJ_i \right]^{-1} (WJ_i)^T W\hat{d}_i \quad (4)$$

OCCAM 二维反演中的正演模拟方法为有限单元法, 在反演计算中, 每一次迭代都将求解模型



a—Swift 法玫瑰图; b—相位阻抗法玫瑰图。

a—rose diagram of Swift method; b—rose diagram of phase impedance method.

图 3 MT-1 线 0.01~320 Hz 电性主轴分析玫瑰图

Fig. 3 Electric spindle analysis rose diagram of MT-1 line during 0.01 to 320 Hz

参数的偏导数矩阵( $N \times M$ ), 因此, 反演过程会随着测点数的增加以及网格剖分的加密而导致计算时间变长。

### 3.2 电性结构模型分析

MT-1 线剖面经过反演, 其结果如图 4 所示, 其中图 4a 为 TE 极化模式反演电阻率模型结果, 图 4b 为 TM 极化模式反演电阻率模型结果, 图 4c 为 TE、TM 极化模式联合反演电阻率模型结果。据图 1 可知, 民乐锰矿在剖面线里程 9 km 附近, 对应的深部地层应为南华系大塘坡组地层, 依据 2.4 小节研究区岩石物性特征分析应为低阻, 图 4a 为 TE 极化模式反演电阻率模型较好的反映了低阻异常体的形态, 而 TM 极化模式反演电阻率模型效果较差, 侧面证实对于低阻探测对象 TE 极化模式的反演电阻率比 TM 极化模式显得更为敏感; 但结合区域地质信息, 在里程 10~30 km 深部存在地堑盆地, 此种情况下 TM 极化模式反演电阻率模型反映的比 TE 极化模式反演电阻率模型好一些。为了兼顾两种极化模式反演的优势, 本文利用联合两种极化模式的数据同时进行反演, 得到了如图 4c 的成果, 其电阻率模型反映的信息较为丰富, 左部 3 km 之前呈相对低阻, 电阻率在 100  $\Omega \cdot m$  以下, 里程 6~30 km 为一地堑盆地, 但相比图 4a 在剖面线里程 9 km 民乐锰矿附近出现了“凹中凹”的次级地堑特征, 与此类似 14 km、17 km 处推断为储锰空间, 结合地质资料进一步判别。

## 4 地质解释

本次剖面解释分为三个层次, 一是利用反演最终确定的电阻率等值线断面按照剖面电性结构总体具有“横向分块, 纵向分层”的特点, 从研究西北部向东南部进行区块解释; 二是结合地表地质填图进行垂向地层和构造的划分; 三是恢复了经历了拉伸背景条件下的南华纪时期原型盆地模型。

MT-1 线剖面总长 30 km, 点距 200 m, 由西北到东南向跨越了潮水村、杨西塘、卡子村、响水村、吉卫镇和大龙洞等地, 经过了上文中的 F1 至 F7 构造。据图 5a, 大地电磁反演断面在测点 3 km 之前为一个低阻横向地块, 推断其浅部是含有碳质等较为丰富的灰岩, 深部由于大地电磁静态效应引起老地层的电阻率也有所降低; 在其后电阻率具有层状分层、浅层高阻、中部低阻和深部较高组的特点, 在卡子村、磨子村、大老排村、吉卫镇等地垂向局部呈现出低阻, 均小于 100  $\Omega \cdot m$  且附近电阻率等值线较为密集, 推断其为区内断层的地表出露点。

图 5b 中, 推断了在杨西塘倾向西北部的大断裂小木村—石家寨断裂(F1), 延伸至青白口纪老地层深部达 3 km 以上; 在杨西塘东南部附近推断了

倾向东南的水田坝—高家湾断裂(F2), 产状相对较缓延伸也较浅; 在卡子村附近推断为水田坝—当路坪断裂(F3), 是一个浅部产状较陡深部逐渐变缓的断裂, 是区内较大的推覆断裂, 青白口系地层沿断裂右部受力出露于地面, 亦是区内小地堑—地垒的分界断裂; 在磨子村、大老排村、吉卫镇对应的四龙山—竹子村断裂(F4)、各腾村—雅桥乡断裂(F5)和吉卫—盘石断裂(F6)均为寒武系岩内断裂, 延伸至探测目的层(南华系大塘坡组等)后延伸至深部特征不明显, 是明显的地垒区; 在吉卫镇东南部约 3 km 处推断为麻栗场—地所坪断裂(F7), 延伸较深, 倾向东南, 产状较陡且变化不大, 是地堑区的边界断裂。

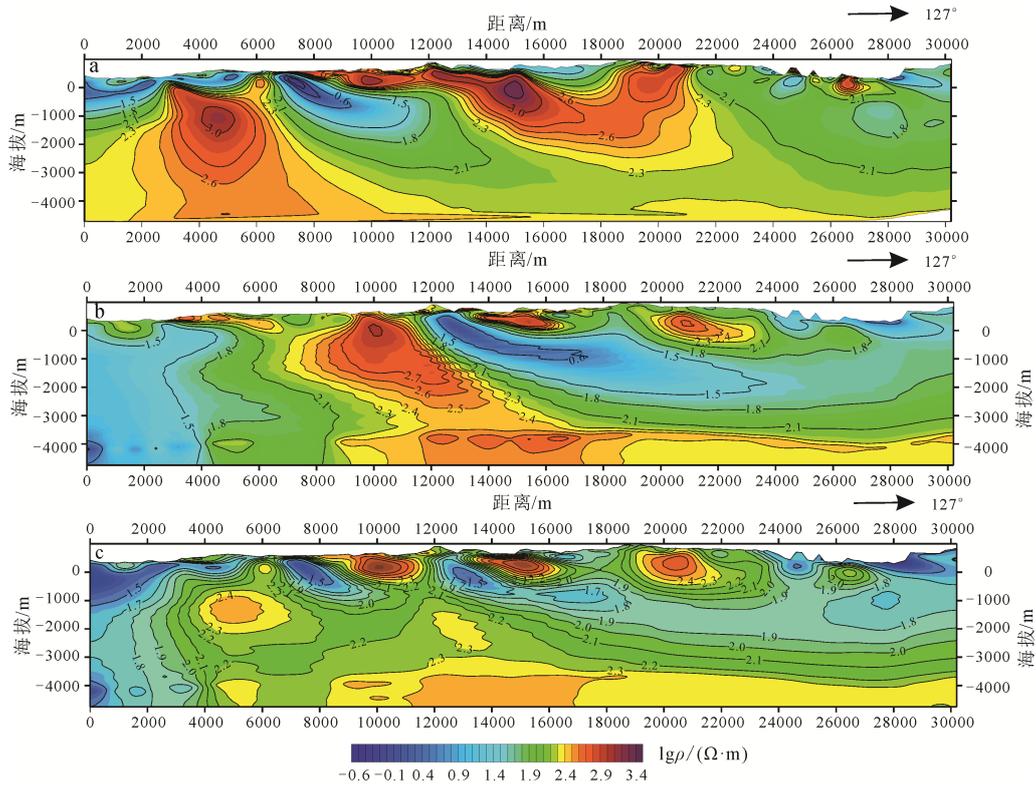
图 5c 为依据剖面所处地理位置和地质构造运动史等信息对南华系时期的盆地进行了反演恢复形成的地层构架模型。在南华纪时期, 位于扬子陆缘东南部的湘西北民乐地区被古华南海洋覆盖(图中灰蓝色), 深部的地层呈层状分布特征, 分别为顶部的南华系地层和深部的青白口系地层, 被水田坝高家湾断裂(F2)、水田坝—当路坪断裂(F3)、吉卫—盘石断裂(F6)和麻栗场—地所坪断裂(F7)这四个倾向东南的深部逆断裂推覆, 形成了潮水村—杨西塘地垒区、卡子村—磨子村地堑区、磨子村—吉卫镇地垒区和大龙洞地堑区。潜在的含锰地层异常靶区应分布在卡子村—磨子村地堑区和大龙洞地堑区一带。

## 5 讨论

湘西北民乐毗邻区大地电磁反演电阻率模型在南华系时期呈现出明显的层状分布特征; 在古华南海洋底部为南华系, 且西北部较薄, 而东南部较厚, 呈现出海拔越高越薄, 海拔越低越厚的特点, 地堑—地垒是在一系列倾向东南的逆断裂推覆作用下形成的, 且现今的凹陷电阻率状态并非真正的地堑, 同理现今的凸起电阻率状态并非真正的地垒, 需要利用各种地质地球物理信息进行古盆地反演恢复。

依据大地电磁探测结果, 本地区的赋矿地层为南华系大塘坡组, 成矿构造是同沉积断裂形成的次级凹陷, 在湖南境内地球物理探测标志是以寒武系牛蹄塘组碳质岩系为目标地层上部的厚大低阻和其下部的青白口系相对高阻为标志层。

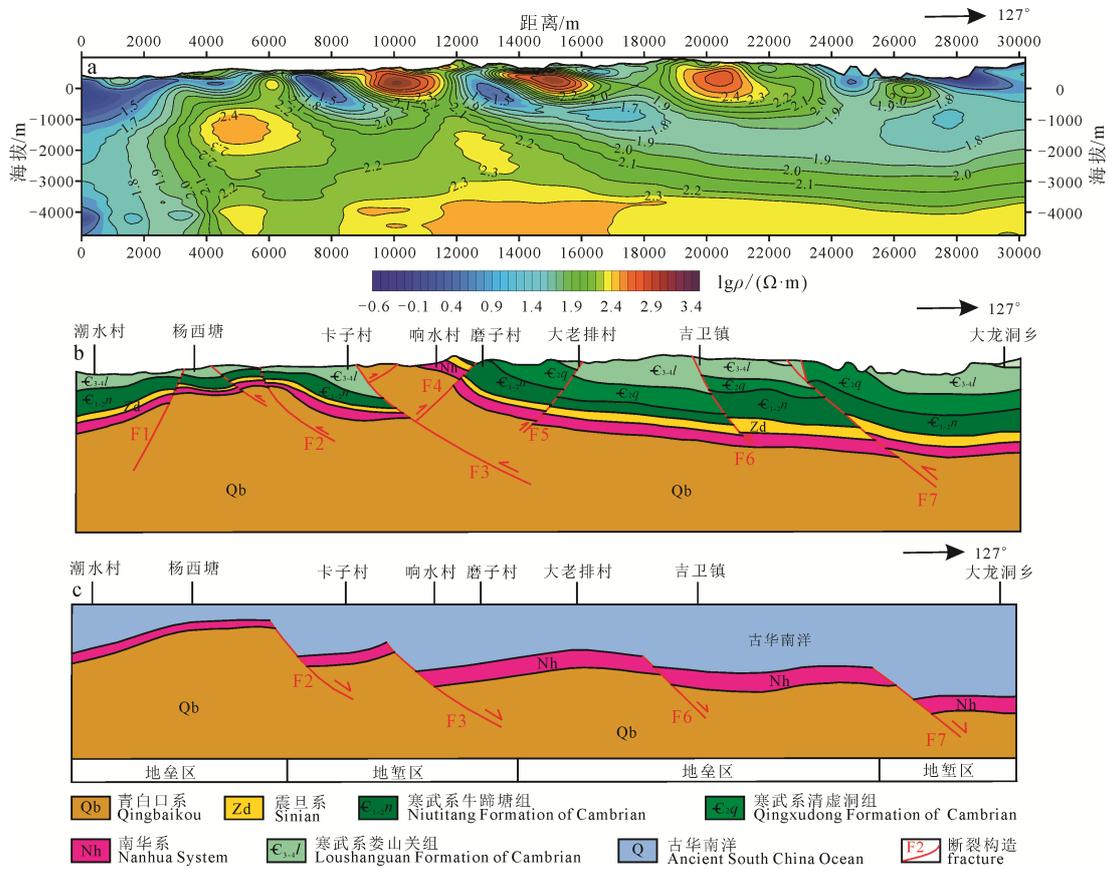
综合已有地质和地球物理成果(湖南省地质调查院, 2017; 曹创华等, 2018), 推断湘西北民乐毗邻区锰矿成矿模式如图 6, 重庆秀山县为江南古陆隆起带, 其东南边缘是古海湾, 本区内的松桃—花垣为武陵次级裂谷盆地, 且沿西北向盆地逐渐闭合, 南华系大塘坡组目标地层逐渐变浅变薄, 成矿的



a—TE 模式反演结果; b—TM 模式反演结果; c—联合模式反演结果。  
 a—TE mode inversion results; b—TM mode inversion results; c—joint mode inversion results.

图 4 MT-1 线反演结果等值线图

Fig. 4 Electric spindle analysis rose diagram of MT-1 line



a—反演电阻率模型结果; b—地层-构造解释图; c—推断南华纪时期原型盆地模型。

a—inversion of resistivity model results; b—stratigraphic-structural interpretation map; c—inference of prototype model of the Nanhua period.

图 5 MT-1 线反演及解释结果

Fig. 5 Inversion and interpretation results of MT-1 profile

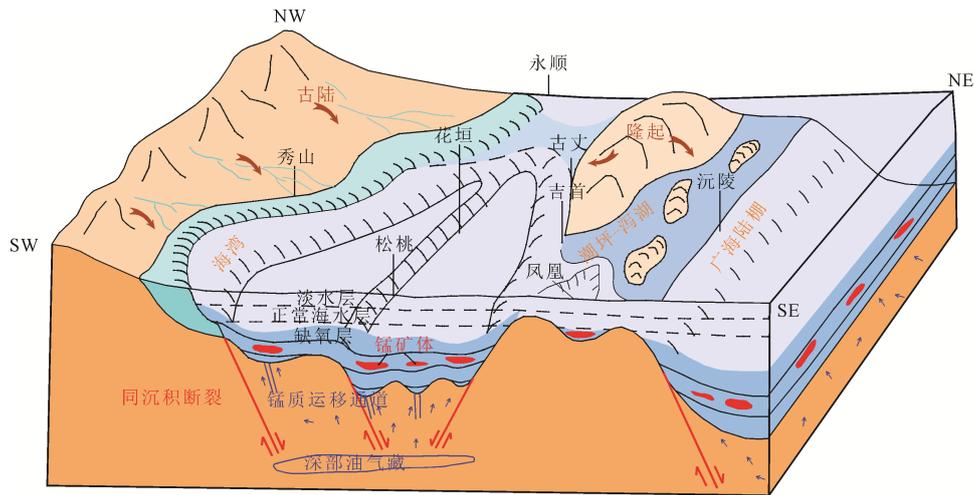


图 6 湘西北民乐毗邻区锰矿成矿模式示意图(邹光均等, 2020)

Fig. 6 Schematic diagram of metallogenetic model of manganese ore deposit in the neighboring area of Minle in northwestern Hunan Province(after ZOU et al., 2020)

规模可能越来越小, 品味也有可能越来越低(这一论证从民乐锰矿的深度、矿体厚度与松桃众多矿区比较可知)。沿古丈—吉首—凤凰—沅陵—溆浦存在锦屏—怀化隆起带, 其深部为伍家湾古岛和武陵古岛, 是区域上的一级地垒。沿凤凰—沅陵的东南部湖南黔阳一带也有南华系大塘坡组岩系出露, 是另一个锰矿集区—黔阳成锰盆地, 即图 6 中的广海陆棚区域。按照周琦等(2013)对此地区成锰模型, 结合上文中大地电磁测深结果, 我们认为在民乐—花垣向东北方向一带为古天然气渗漏口的过渡相和边缘相。

区内经历了武陵运动(黄建中等, 2020; 隗含涛等, 2020), 随着罗迪尼亚超级大陆的裂解, 在元古代开启了扬子地块新一轮的构造沉积旋回(王剑等, 2006); 在扬子陆块上形成了广泛的伸展环境。第一次裂解活动发生于板溪期, 初始形成武陵次级裂谷和雪峰次级裂谷的雏形; 之后发生雪峰运动, 致使扬子陆块东南缘抬升(杜远生等, 2015)。第二次裂解活动发生于南华纪, 自西向东依次为武陵次级裂谷松桃—民乐成锰盆地、锦屏—怀化地垒、雪峰次级裂谷黔阳成锰盆地, 同时受地质构造运动的影响两个成锰盆地形成一系列呈北东东向平行展布的次级地堑和地垒构造, 在小地堑区内受次级-次次级同沉积断裂的效应, 为锰矿的聚集提供了优良空间, 即图 5 中呈现出“凹中凹”特征的反演电阻率等值线异常区。

## 6 结论

(1)地处华夏板块和扬子板块聚集过程中受复杂的湘西北地区, 在大塘坡时期形成地堑地垒构造, 依据经过民乐锰矿已知矿床的 MT-1 剖面, 由已知到未知厘定了反演电阻率等值线呈“凹中凹”

形态为此区域寻找沉积型锰矿的典型地球物理标志。

(2)此区内的布格重力异常以负值为主, 且磁异常平缓且变化范围较小, 侧面证实深部的沉积型锰矿的产状应较为平缓, 与大地电磁测深推断的同沉积断裂及成矿远景区具有一致性。

(3)与黔东南地区的锰矿床有所区别, 湖南境内的南华系大塘坡组目标地层上部存在达几百米后的寒武系石牌组、牛蹄塘组(碳质)页岩是低阻电磁信号屏蔽层, 且其电阻率是留茶坡组—陡山沱组电阻率的 0.25 倍左右, 对采集的响应数据进行反演后整体上呈一个厚大的低阻, 是大地电磁资料解释时典型低阻标志地层。

(4)本区内的松桃—花垣为武陵期次级裂谷盆地, 且沿西北向盆地逐渐闭合, 南华系大塘坡组目标地层逐渐变浅变薄, 为古天然气渗漏口的过渡相和边缘相。

## Acknowledgements:

This study was supported by National Key Research & Development Program of China (No. 2017YFC0601506), Natural Science Foundation of Hunan Province (No. 2020JJ3136), and China Geological Survey (No. 121201004000172201-22).

## 参考文献:

- 曹创华, 孟德保, 黄革非. 2018. 湘黔地区锰矿资源深部预测示范大地电磁测深实施方案[R]. 长沙: 湖南省地质调查院.
- 陈乐寿, 王光镔. 1990. 大地电磁测深法[M]. 北京: 地质出版社.
- 陈小斌, 蔡军涛, 王立凤, 叶涛. 2014. 大地电磁资料精细处理和二维反演解释技术研究(四)-阻抗张量分解的多测点-多频点统计成像分析[J]. 地球物理学报, 57(6): 1946-1957.
- 陈小斌, 叶涛, 蔡军涛, 王立凤. 2019. 大地电磁资料精细处理和二维反演解释技术研究(七)-云南盈江-龙陵地震区深部

- 电性结构及孕震环境[J]. 地球物理学报, 62(4): 1377-1393.
- 董树文, 李廷栋, 陈宣华, 魏文博, 高锐, 吕庆田, 杨经绥, 王学求, 陈群策, 石耀霖, 黄大年, 周琦. 2012. 我国深部探测技术与实验研究进展综述[J]. 地球物理学报, 55(12): 3884-3901.
- 董树文, 李廷栋, 高锐, 吕庆田, 魏文博, 杨经绥, 王学求, 陈群策, 石耀霖, 黄大年, 陈宣华, 周琦. 2013. 我国深部探测技术与实验研究与国际同步[J]. 地球学报, 34(01): 7-23.
- 杜远生, 周琦, 余文超, 王萍, 袁良军, 齐靓, 郭华, 徐源. 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.
- 贵州省地质学会. 2013. 成矿理论与深部找矿的重大突破: 《贵州省黔东锰矿富集区深部大型-超大型锰矿找矿与成矿模式研究》获 2012 年度全国十大地质科技进展[J]. 贵州地质, (2): 161.
- 国土资源部. 2017. 国土资源部“深地探测”计划稳步推进[EB/OL]. [2017-05-08]. [http://www.gov.cn/xinwen/2017-05/08/content\\_5191584.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2017-05/08/content_5191584.htm).
- 何帅, 杨炳南, 李核良, 潘文, 凌云, 李杰, 张德实. 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(01): 270-276.
- 湖南省地质调查院. 2017. 湖南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 黄建中, 孙骥, 周超, 陆文, 肖荣, 郭爱民, 黄革非, 谭仕敏, 隗含涛. 2020. 江南造山带(湖南段)金矿成矿规律与资源潜力[J]. 地球学报, 41(2): 230-252.
- 雷达, 谭捍东, 林昌洪, 张强, 王刚, 朱威, 姚大为. 2017. 天然场音频大地电磁法技术规程(DZ-T 0305-2017)[S]. 北京: 中华人民共和国国土资源部: 1-22.
- 刘敏, 周耀质, 金尚刚, 胡清乐. 2018. 湖南省花垣县大脑坡铅锌矿区 ZK5139 孔物探测井报告[R]. 黄石: 湖北省地质局第一地质大队.
- 柳建新, 童孝忠, 郭荣文, 李爱勇, 杨生. 2012. 大地电磁测深法勘探: 资料处理、反演与解释[M]. 北京: 科学出版社.
- 吕庆田, 刘振东, 汤井田, 吴明安, 严加永, 肖晓. 2014. 庐枞矿集区上地壳结构与变形: 综合地球物理探测结果[J]. 地质学报, 88(04): 447-465.
- 谭仕敏, 谢福和. 2018. 湖南花垣-凤凰地区铅锌矿整装勘查区矿产调查与找矿预测设计[R]. 长沙: 湖南省地质调查院.
- 汤井田, 周聪, 任政勇, 王显莹, 肖晓, 吕庆田. 2014. 安徽铜陵矿集区大地电磁数据三维反演及其构造格局[J]. 地质学报, 88(04): 598-611.
- 汪朝霞, 黎健, 王琴, 曹菲. 2014. 找矿突破的“铜仁模式”——贵州铜仁锰矿整装勘查纪实(上)[EB/OL]. [2014-05-19]. [http://www.cgs.gov.cn/xwl/cgkx/201603/t20160309\\_283831.html](http://www.cgs.gov.cn/xwl/cgkx/201603/t20160309_283831.html).
- 王剑, 曾昭光, 陈文西, 汪正江, 熊国庆, 王雪华. 2006. 华南新元古代裂谷系沉积超覆作用及其开启年龄新证据[J]. 沉积与特提斯地质, 26(4): 1-7.
- 隗含涛, 邵拥军, 汪程, 刘清泉, 刘忠法, 肖克炎. 2020. 湘东北金鸡金矿床岩体成岩机制[J]. 地球学报, 41(2): 253-266.
- 肖晓, 王显莹, 汤井田, 周聪, 王永清, 陈向斌, 吕庆田. 2014. 安徽庐枞矿集区大地电磁探测与电性结构分析[J]. 地质学报, 88(04): 478-495.
- 杨炳南, 胡祥云, 周琦, 沈小庆, 何帅, 谢小峰, 王家俊. 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(04): 369-375.
- 杨炳南, 周琦, 杜远生, 胡祥云, 谢小峰, 沈小庆, 朱大伟, 王家俊. 2015. 音频大地电磁法对深部隐伏构造的识别与应用: 以贵州省松桃县李家湾锰矿为例[J]. 地质科技情报, 34(06): 26-32.
- 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(03): 457-466.
- 朱介寿, 蔡学林, 曹家敏, 高德章, 赵凤清, 杜杨松, 汪洋. 2005. 中国华南及东海地区岩石圈三维结构及演化[M]. 北京: 地质出版社.
- 邹光均, 黄建中, 凌跃新, 谭仕敏, 曹创华, 黄革非, 文春华. 2020. 湘黔渝毗邻区南华纪岩相古地理及沉积盆地演化[J]. 地球学报, 41(2): 207-218.

## References:

- BAHR K. 1991. Geological noise in magnetotelluric data: a classification of distortion types[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 66: 24-38.
- CAO Chuang-hua, MENG De-bao, HUANG Ge-fei. 2018. Implementation of Demonstration of Magnetotelluric Sounding in Deep Prediction of Manganese Resources in Xiangyu Region[R]. Changsha: Hunan Institute of Geological Survey(in Chinese).
- CHEN Le-shou, WANG Guang-e. 1990. Magnetotelluric sounding method[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- CHEN Xiao-bin, CAI Jun-tao, WANG Li-feng, YE Tao. 2014. Research on fine processing of magnetotelluric data and two-dimensional inversion interpretation technology (IV)-Multiple measurement points of impedance tensor decomposition-multi-frequency point statistical imaging analysis[J]. Chinese Journal of Geophysics, 57(6): 1946-1957(in Chinese with English abstract).
- CHEN Xiao-bin, YE Tao, CAI Jun-tao, WANG Li-feng. 2019. Research on fine processing of magnetotelluric data and two-dimensional inversion interpretation technology (VII)-Deep electrical structure and seismogenic environment in Yunnan Yingjiang-Longling earthquake zone[J]. Chinese Journal of Geophysics, 62(4): 1377-1393(in Chinese with English abstract).
- DEGROOT-HEDLIN C, CONSTABLE S C. 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data[J]. Geophysics, 55(12): 1613-1624.
- DONG Shu-wen, LI Ting-dong, CHEN Xuan-hua, WEI Wen-bo, GAO Rui, LÜ Qing-tian, YANG Jing-lei, WANG Qiu-xue, CHEN Qun-ce, SHI Yao-lin, HUANG Da-nian. 2012. Review of the progress of deep detection technology and experimental research in China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 55(12): 3884-3901(in Chinese with English abstract).
- DONG Shu-wen, LI Ting-dong, GAO Rui, LÜ Qing-tian, WEI Wen-bo, YANG Jing-lei, WANG Qiu-xue, CHEN Qun-ce, SHI Yao-lin, HUANG Da-nian, CHEN Xuan-hua, ZHOU Qi. 2013. The deep detection technology and experimental research and international synchronization in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 34(01): 7-23(in Chinese with English abstract).
- DU Yuan-sheng, ZHOU Qi, YU Wen-chao, WANG Ping, YUAN Liang, QI Jing, GUO Hua, XU Yuan. 2015. Rodinia supercontinental pyrolysis, Sturtian glacial events and large-scale manganese mineralization in the southeastern margin of the Yangtze block[J]. Geological Science and Technology Infor-

- mation, 34(6): 1-7(in Chinese with English abstract).
- Guizhou Geological Society. 2013. Metallogenic Theory and Deep Exploration of Deep Prospecting: "Study on the prospecting and metallogenic model of deep large-super large manganese deposits in the enrichment area of Mindong manganese deposit in Guizhou Province"[J]. *Guizhou Geology*, (2): 161(in Chinese).
- Ministry of Land and Resources. 2017. The Ministry of Land and Resources "Deep Exploration" plan is steadily advancing[EB/OL]. [2017-05-08] [http://www.gov.cn/xinwen/2017-05/08/content\\_5191584.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2017-05/08/content_5191584.htm).
- HE Shuai, YANG Bing-nan, LI He-liang, PAN Wen, LING Yun, LI Jie, ZHANG De-shi. 2019. Identification and Significance of Audio Magnetotelluric Method to Grade IV Mantle Structure in Southeastern Guizhou[J]. *Geological Science and Technology Information*, 38(01): 270-276(in Chinese with English abstract).
- HUANG Jian-zhong, SUN Ji, ZHOU Chao, LU Wen, XIAO Rong, GUO Ai-min, HUANG Ge-fei, TAN Shi-min, WEI Han-tao. 2020. Metallogenic Regularity and Resource Potential of Gold Deposits of Hunan Area in the Jiangnan Orogenic Belt, South China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 41(2): 230-252(in Chinese with English abstract).
- Geological Survey of Hunan Provenience. 2017. *Regional Geology of Hunan Province*[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- ZHANG L T, JIN S, WEI Wen-bo, YE Gao-feng, JING Jian-en, DONG Hao, XIE Cheng-liang. 2015. Lithospheric electrical structure of South China imaged by magnetotelluric data and its tectonic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 98: 178-187.
- LEI Da, TAN Han-dong, LIN Cang-hong, ZHANG Qiang, WANG Gang, ZHU Wei, YAO Da-wei. 2017. Technical Specifications for Natural Field Audio Magnetotelluric Method (DZ/T 0305-2017)[S]. Beijing: Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China: 1-22(in Chinese).
- LIU Min, ZHOU Yao-zhi, JIN Shang-gang, HU Qing-le. 2018. Report on the detection well of ZK5139 pores in the lead-zinc mine area of the brain slope[R]. Huangshi: The First Geological Team of Hubei Geological Bureau(in Chinese).
- LIU Jian-xin, TONG Xiao-zhong, GUO Rong-wen, LI Ai-yong, YANG Sheng. 2012. *Exploration of Magnetotelluric Sounding: Data Processing, Inversion and Interpretation*[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- LÜ Qing-tian, LIU Zhen-dong, TANG Jing-tian, WU Ming-an, YAN Jia-yong, XIAO xiao. 2014. SinoProbe-03-CJ project group. 2014.Upper crust structure and deformation in the antimony ore concentration area: comprehensive geophysical exploration results[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(04): 447-465(in Chinese with English abstract).
- TAN Shi-min, XIE Fu-he. 2018. Mineral Investigation and Prospecting Design of the Completed Exploration Area of the Lead-Zinc Mine in Huayuan-Phoenix Area, Hunan Province[R]. Changsha: Hunan Institute of Geological Survey(in Chinese).
- TANG Jing-tian, ZHOU Cong, WANG Xian-ying, XIAO Xiao, LÜ Qing-tian. 2013. Deep electrical structure and geological significance of Tongling ore district[J]. *Tectonophysics*, 606: 78-96.
- TANG Jing-tian, ZHOU Cong, REN Zheng-yong, WANG Xian-ying, XIAO Xiao, LÜ Qing-tian. 2014. Three-dimensional inversion of magnetotelluric data and its tectonic pattern in Tongling ore district, Anhui Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(04): 598-611(in Chinese with English abstract).
- WANG Chao-xia, LI Jian, WANG Qin, CAO Fei. 2014. "Tongren Model" for Prospecting Breakthroughs-Guizhou Tongren Manganese Mine Installation Survey (Part1) [EB/OL]. [2014-05-19] [http://www.gov.cn/xinwen/2017-05/08/content\\_5191584.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2017-05/08/content_5191584.htm) (in Chinese).
- WANG Jian, ZENG Zhao-guang, CHEN Wen-xi, WANG Zheng-jiang, XIONG Guo-qing, WANG Xue-hua. 2006. New evidence of sedimentary overburden and its age of the Neoproterozoic rift system in South China[J]. *Sedimentary and Tethys Geology*, 26(4): 1-7(in Chinese with English abstract).
- WEI Han-tao, SHAO Yong-jun, WANG Cheng, LIU Qing-quan, LIU Zhong-fa, XIAO Ke-yan. 2020. Petrogenesis of the Granitoids in the Jinji Au Deposit, Northeastern Hunan Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 41(2): 253-266(in Chinese with English abstract).
- XIAO Xiao, WANG Xian-ying, TANG Jing-tian, ZHOU Cong, WANG Yong-qing, CHEN Xiang-bin, LÜ Qing-tian. 2014. Analysis of Electromagnetic Detection and Electrical Structure of the Antimony Ore Area in Anhui Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(04): 478-495(in Chinese with English abstract).
- YANG Bing-nan, ZHOU Qi, DU Yuan-sheng, HU Xiang-yun, XIE Xiao-feng, SHEN Xiao-qing, ZHU Da-wei, WANG Jia-jun. 2015. Identification and application of deep earth concealed structure by audio magnetotelluric method: A case study of Lijiawan manganese ore in Songtao County, Guizhou Province[J]. *Geological Science and Technology Information*, 34(06): 26-32(in Chinese).
- YANG Bing-nan, HU Xiang-yun, ZHOU Qi, SHEN Xiao-qing, HE Shuai, XIE Xiao-feng, WANG Jia-jun. 2018. Study on AMT Exploration Techniques of Leakage Deposited Manganese Ore in South China[J]. *Guizhou Geology*, 35(04): 369-375(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Qi, DU Yuan-sheng, QIAN Ying. 2013. Metallogenic system and metallogenic model of paleo-natural gas leakage sedimentary manganese deposits: A case study of the Nanhua "Datangpo" manganese deposit in the adjacent area of Xiao-xiang-yu[J]. *Mineral Geology*, 32(03): 457-466(in Chinese with English abstract).
- ZHU Jie-shou, CAI Xue-lin, CAO Jia-min, GAO De-zhang, ZHAO Feng-qing, DU Yang-Song, WANG Yang. 2005. Three-dimensional structure and evolution of lithosphere in South China and East China Sea[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- ZOU Guang-jun, HUANG Jian-zhong, LING Yue-xin, TAN Shi-min, CAO Chuang-hua, HUANG Ge-fei, WEN Chun-hua. 2020. Lithofacies palaeogeography and sedimentary evolution of the Nanhua Period in Hunan-Guizhou-Chongqin Border Area, South China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 41(2): 207-218(in Chinese with English abstract).