

# 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

杨炳南<sup>1,2</sup>, 胡祥云<sup>2</sup>, 周琦<sup>3</sup>, 沈小庆<sup>1</sup>, 何帅<sup>1,2</sup>, 谢小峰<sup>1,2</sup>, 王家俊<sup>1</sup>

(1. 贵州省地质矿产勘查开发局 103 地质大队, 贵州 铜仁 554300; 2. 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 湖北 武汉 430074; 3. 贵州省地质矿产勘查开发局, 贵州 贵阳 550004)

**[摘要]** 华南南华纪“大塘坡式”锰矿位于上扬子东缘国家重要成矿区带。近年来, 锰矿资源预测评价科技创新人才团队建立了锰矿内生外成裂谷盆地古天然气渗漏沉积成矿系统理论, 研发了该类型锰矿床深部隐伏锰矿找矿预测关键技术。通过贵州铜仁松桃锰矿国家整装勘查区实践检验, 新发现了 4 个世界级隐伏超大型锰矿床和一批大中型锰矿床, 实现我国锰矿地质找矿有史以来的最大突破, 改变了国家锰矿勘查开发格局。

本文介绍了项目团队研发的该类型锰矿床深部隐伏锰矿找矿预测关键技术组合中的音频大地电磁测量 (AMT) 勘查技术, 主要包括数据采集和预处理关键技术、最佳反演模式和参数优选关键技术及建立音频大地电磁测量地球物理找矿预测间接模型等方面, 以期能对华南其他地区的南华纪锰矿以及相似成矿地质背景条件下的其他时代锰矿找矿预测提供借鉴和参考。

**[关键词]** 古天然气渗漏沉积型锰矿床; 音频大地电磁法; 南华纪

**[中图分类号]** 618. 32; P631. 3<sup>+</sup>25 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1000-5943(2018)-04-0369-07

## 1 引言

近年来, 贵州省地质矿产勘查开发局 103 地质大队、中国地质大学(武汉)等单位联合组成的项目团队在贵州铜仁松桃锰矿国家整装勘查区及黔湘渝毗邻区, 通过长期产学研用联合攻关, 发现了古天然气渗漏沉积型锰矿床这一新的锰矿床类型(周琦等, 2016a; 2016b)。

项目团队系统梳理贵州铜仁锰矿国家整装勘查区及黔湘渝毗邻区十多年的地球物理勘查实例, 研究了多种物探工作方法, 包括重力、磁法、激电测深法、音频大地电磁法、可控源音频大地电磁法等。其中, 面积性高精度重磁工作一直尚未开展, 在厚覆盖层条件下含锰岩系的深部信息提取很难达到量化; 传统的激电测深法受制于人工源发射功率有限, 仅适合中浅部(700 米以浅)勘查, 在地形复杂的黔东地区, 大功率发射端野外布设

存在种种客观制约, 使得大功率激电测深法无法有效实施; 可控源音频大地电磁法由于多个电场共用一个磁场的粗放标量观测模式(张振宇等, 2017), 近区 45° 上升被误解为“高阻体”响应(Zhang et al., 2017), 且场源的“阴影效应”和“附加效应”加剧了这种误解的可能(Streich et al., 2011; 何继善等, 2018), 使得在该区实际勘探中效果有限; 地震勘探获取的叠前时间偏移地震剖面可以对地层展布、构造情况、断裂属性进行探测, 效果较好(吕庆田等, 2010), 受黔东地区地质条件复杂、地形起伏大、地震勘探经济成本高等条件制约, 该方法尚未开展。

基于上述地球物理勘探现状, 围绕服务国家“十三五”规划建设黔东地区大型锰矿资源基地的目标, 以古天然气渗漏沉积型锰矿为主要研究对象, 兼顾二叠纪黔中裂陷槽锰矿(汪洋等, 2018), 研究深部锰矿勘探的地球物理勘探新方法, 通过大量音频大地电磁法可行性实验和空白

**[收稿日期]** 2018-09-05 **[修回日期]** 2018-11-17

**[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), 贵州省地质物探开发应用工程技术研究中心(黔科合平台人才[2016]5401)及贵州省地质矿产勘查开发局地质科研项目(黔地矿科合[2016]07、黔地矿科合[2016]08)联合资助。

**[作者简介]** 杨炳南(1985—), 男, 研究生, 从事地球物理勘查与应用工作。E-mail: 648417001@qq.com

**[通讯作者简介]** 胡祥云(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电法勘探理论及应用研究。E-mail: xyhu@cug.edu.cn

区深部钻孔揭露实例效果剖析,证明音频大地电磁法在深部隐伏含锰地堑盆地的预测模型效果显著(杜远生等,2015;周琦等,2017),研发了一套适用于厚覆盖层条件下深部隐伏锰矿地球物理勘探的新技术-古天然气渗漏沉积型锰矿音频大地电磁勘查技术,为锰矿国家级整装勘查区找矿评价及相似地质背景下推广示范提供理论和实践依据。

## 2 应用可行性

### 2.1 方法原理

音频大地电磁法(Audio-frequency Magnetotellurics)基于电磁感应原理,在地面测量音频范围(0.1Hz-50kHz)相互正交的电场和磁场分量,计算视电阻率和阻抗相位,研究地下电阻率结构的一种被动源的频率域探测方法(Cagnaird, 1953;Chave and Jones, 2012;Pieter et al., 2014),英文简称AMT。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),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(Jones, 2006)。该方法以低成本、高效率的优势被广泛用在中深部固体矿产勘查及矿集区、矿床尺度的结构探测(Ren et al., 2014; Li et al., 2017)。

### 2.2 工作精度和方法技术有效性分析

#### (1)工作精度

工作精度根据电磁干扰情况分两档,在电磁干扰小的地区,视电阻率和相位的均方相对误差不大于7%;在电磁干扰很强的地区,视电阻率和相位的均方相对误差可适当放宽到15%。

#### (2)方法技术有效性分析

根据岩矿石电阻率参数,结合探测隐伏锰矿地表岩性揭露情况,建立研究区地电模型,进行一维正演计算(Pek et al., 2002;霍光谱等, 2011;杨炳南等, 2015),研究含锰岩系正演曲线特征,进行有效性分析;在隐伏锰矿勘查新区,

进行有效性试验和抗干扰方法实验,包括测量电极距的选择、截止低频、观测时间长度和观测时段(汤井田等,2017)。选取多个不同电极距,对比观测结果,确定电极距大小,原则上观测时间不低于1小时。

### 2.3 应用条件和范围

研究区锰矿成矿地质体(大塘坡组第一段)为黑色含锰岩系,主要为黑色碳质页岩,夹黑色碳质菱锰矿透镜体(周琦等,2013;张遂等,2015),针对华南南华纪古天然气渗漏沉积型锰矿,其应用条件为:一是含锰岩系与上覆、下伏地层岩性存在明显电性差异;二是含锰岩系信噪比满足观测数据质量要求;三是电磁噪声、人文干扰和地形地貌条件满足观测数据质量要求。应用范围为:探测隐伏成锰期断陷盆地基地起伏、埋深及接触关系,探测整体岩性组合的格架特征,研究局部构造形态、断裂性质及展布特征。

## 3 数据采集和处理

### 3.1 施工前设备准备

野外数据采集设备采用V8多功能电法工作站。测量电极采用不极化电极,电极电位差不超过2mv。仪器设备标定,相邻两次标定的视电阻率的相对误差应不大于2%。野外测量仪器应在开工和收工前进行平行测试,两道间测试结果相对误差应不大于2%。测量开工前与结束后进行多台仪器一致性对比试验,保证有80%以上的频点的测量结果均方相对误差不大于5%。

### 3.2 数据采集

#### (1)测网选择

测网根据地质任务和地形地貌合理选择,点线距应能良好反映目标地质体尺度。测点的平面点位误差在工作比例尺成果图上应不大于1mm。测线方向尽可能垂直于探测主要隐伏锰矿地质体的走向,兼顾垂直南华纪早期同沉积断层走向(周琦等,2017),测线尽可能与已有的地质勘查剖面重合。点线号按自西向东、自南向北增大的顺序编排。设计测点位置遇到陡崖、居民区、变电所及其他工业设施或障碍物时,可在1/2点距范围内或垂直测线方向1/2线距范围内将测点平移

到适合的地方以避免障碍,并记录实际点位坐标、高程。当平移无法避开障碍时,可舍去该测点。测网密度见表 1。

表 1 测网密度表  
Table 1 Survey of grid density

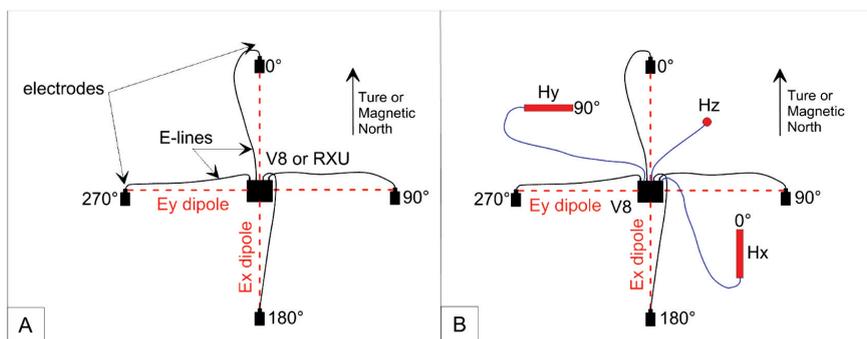
比例尺	线距(m)	点距(m)
1:100000	1000	500 ~ 1000
1:50000	500	250 ~ 500
1:25000	250	100 ~ 250
1:10000	100	40 ~ 100
1:5000	50	20 ~ 50
1:2000	20	10 ~ 20

(2)测点选择

尽量保证测点布置在地势开阔的地方,避开山沟、山坡等起伏地形。使测点尽量远离电磁干扰源,如高压线、电台和大型用电设施,一般要求为:离开大的工厂、矿山、电气铁路、电站 2 km 以上;离开广播电台、雷达站 1 km 以上;离开高压电力线 500 m 以上;离开繁忙公路 200 m 以上。

(3)测点布置和观测

野外施工测量  $E_x$ 、 $E_y$ 、 $H_x$ 、 $H_y$ 、 $H_z$  五个分量,采用张量观测方式(图 1)。 $E_x$ 、 $H_x$  方向要求沿正北方向布设, $E_y$ 、 $H_y$  要求沿正东向布设。布极采用森林罗盘仪测量角度,方位误差不应超过  $1^\circ$ ,同一测线保持  $E_x$  方向一致。



A—电道布置图;B—电道—磁道布置图

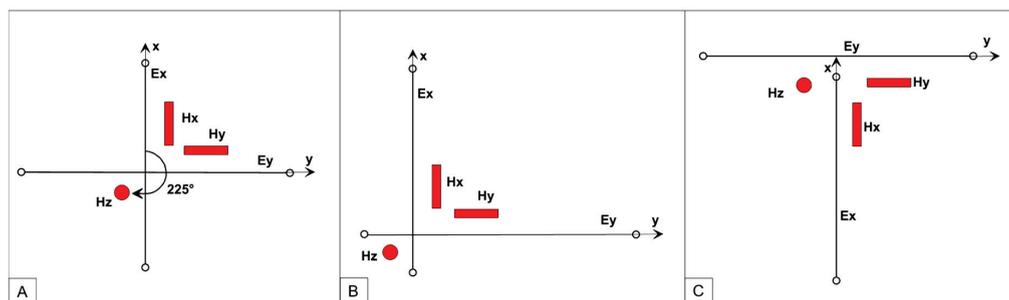
图 1 野外工作布置图

Fig. 1 Arrangement plan of field work

在布置水平和垂直磁棒时,水平磁棒应埋入地下至少 0.3 m,磁棒的方位误差小于  $1^\circ$ ,埋设前用水平尺量水平,保持水平倾斜小于  $1.5^\circ$ ;垂直磁棒垂直向下误差小于  $1^\circ$ 。测点的接地电阻小于 2 000 欧姆·米,通过加深电极坑、注盐水、用泥土包裹不极化电极等方式减小接地电阻。根据锰矿整装勘查区实地工作效果和实验,电极距设计为 50 m,可以有效的增强信号强度并减小静态

效应(韩松,2017)。有效观测记录频带为 10 400 ~ 0.35 赫兹。观测时间和有效叠加次数要根据实际情况确定,最低频点的叠加次数不能少于三次,并要保证所测曲线衔接良好,不出现脱节或跳越现象。

电极一般采用标准“十”字型布设,在地形不利、无法采用“十”字型布设时可调整为采用“L”型或“T”型方式布设(图 2)。



A—“十”字型布极示意图;B—“L”型布极示意图;C—“T”型布极示意图

图 2 野外观测装置图

Fig. 2 Observation layout of field work

### 3.3 数据处理

根据相邻相似的原则,首先进行数据的去噪和编辑,对于畸变偏离太大、明显不合格的频点予以删除,删除频点数在每个级次不应超过本级次的1/3频点,删掉的频点数不大于总频点数的15%,不能连续删掉三个频点,保留的频点在整条曲线上应均匀分布,分析不合格点产生的原因,并对后期反演剖面的可靠程度进行评价。

数据预处理工作主要包括:对时间域的地磁场记录进行频谱分析、计算主轴方位上阻抗张量元素及视电阻率相位信息、最佳主轴方向判断、远参考处理技术、功率谱挑选、极化方式判别(Gamble et al., 1979a, 1979b; Egbert et al., 1986)、静位移校正(Jiracek, 1990; Beamish et al., 1992; 龚玉蓉等, 2011)、地形校正(韩骑等, 2015)等。本文将静位移校正和地形校正归纳为:

(1)根据视电阻率曲线与已知资料结合进行静态效应综合分析,选择合适的静校正基准,选择相对稳定层位所在频段作为静校正基准;

(2)静校正前后应对比前后剖面的结果,选择空间滤波法、曲线平移法和小波变换法,分析静校正的合理性,以免校正过量问题;

(3)根据同一测线不同测点的实际高程,按一定比例对每一测点分割成不同网格,构成符合实际地形的网格模型,结合表层电阻率构成一个带地形的二维地电模型,再对该模型作二维正演、反演计算,达到间接消除地形影响的目的;

(4)相邻测点间的坡度大于 $10^\circ$ 时,两电极高差与极距之比大于20%的测点,采用合适的方法做地形校正,如比值法校正,或者选取带起伏地形反演的二维、三维软件进行反演以直接校正地形影响。

## 4 二维反演计算与地质解释

### 4.1 二维反演计算

当前,大地电磁二维反演技术较为成熟,主要有奥克姆 Occam( Constable et al., 1987; DeGroot et al., 1990)、简化基奥克姆 ReBocc( Siripunvaraporn et al., 2000)、快速松弛 RRI( Simith et al., 1991)、贝叶斯 Bayesian( Uchida et al., 1993)、非线性共

轭梯度( Nonlinear Conjugate Gradients ) NLCC( Rodi and Mackie., 2001)等算法。本文选用非线性共轭梯度算法进行二维反演,该算法是一种正则化因子取恒定值的反演算法,在模型空间沿共轭梯度方向搜索,使构建目标函数达到极小的最优化算法,不需要直接计算灵敏度矩阵,只需在每次迭代中计算灵敏度矩阵与某个向量的乘积,反演速度快,稳定性及模型分辨率较好(胡祥云等, 2017; 汤井田等, 2018)。我们采用 WingLink 软件平台进行二维反演,对比各种反演 TE、TM 及 TE&TM 后,选择 TM 模式。正则化因子  $Tua$  值为 3 的情况下,保证光滑度的同时,达到实测数据的最佳拟合。

### 4.2 地质解释

在整装勘查区已知矿体上运用音频大地电磁法对锰矿成矿地质体进行试验研究,利用研究区电性结构,评价了区内存在的构造和对含锰岩系的破坏程度,结合大塘坡组横向相对低阻和下伏板溪群相对高阻的延伸展布,相应识别了大塘坡组空间展布形态。根据钻孔、地质剖面、岩性资料以及电阻率等值线连续的原则,解释过程中以整装勘查区岩石露头 and 钻孔标本的电性测量数据为基础,对相关层位进行合并。以碳酸盐岩为主的下奥陶系桐梓组至下寒武清虚洞组地层岩石组合为相对高阻,以碎屑岩为主的下寒武杷榔组至南华系下统大塘坡组地层岩石组合为相对低阻,其中夹一套以硅质岩、冰碛砾岩为主的相对高阻夹层;以浅变质泥岩、板岩、砂岩为主的青白口系地层岩石组合为相对中低阻。

古天然气渗漏沉积成锰作用为主的地区同沉积断层电性特征明显:电阻率断面图上等值线密集梯度带,划分、追踪电性层时出现的明显错位、突变或缺失现象。根据 L30 剖面大塘坡组整体低阻电性突变至高阻的特征(图 3),推测在 238、514 点分别存在控制 IV 级李家湾-道坨断陷盆地的同沉积断层,断陷盆地中大塘坡组、南沱组乃至震旦-寒武纪下统等地层厚度较隆起区明显增厚,隆起区基底电阻率较凹陷区基底明显增大,断陷盆地区明显具有“高阻-低阻-高阻”三层电性结构,隆起区则呈“低阻-高阻”两层电性结构,隆起区背景电阻率通常是凹陷区背景电阻率 3-5 倍以上,为南华纪早期同沉积断层和 IV 级断陷盆地控制形成锰矿床提供了地球物理依据。结合物

性和钻孔约束资料,进行综合解译,建立了“大塘坡式锰矿”的 AMT 地球物理模型,含锰岩层电阻

率范围在 25~40 欧姆·米,属次低阻,厘定了含锰岩系的展布范围。

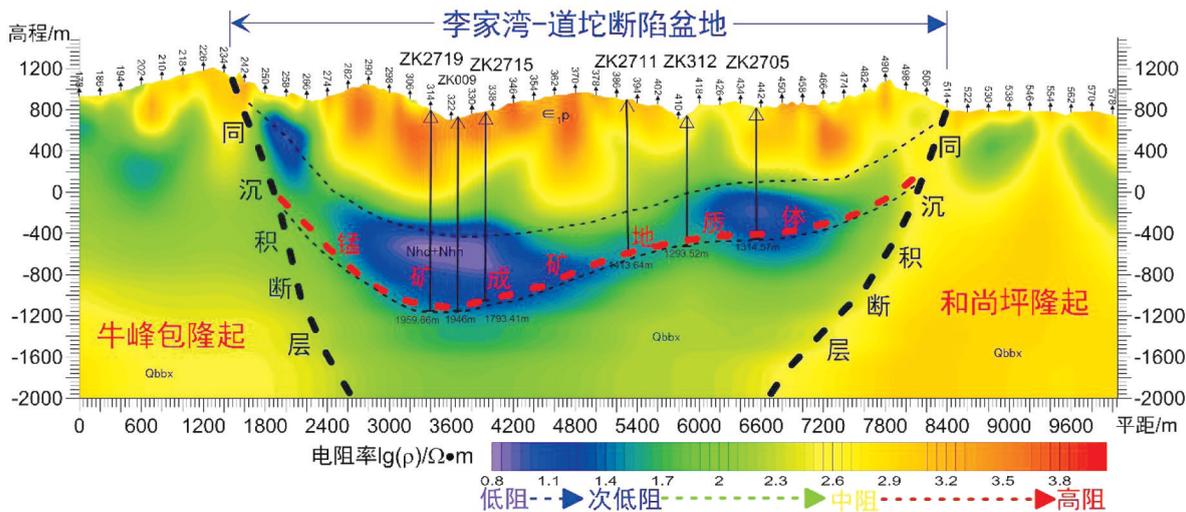


图 3 L30 线地球物理找矿模型图

Fig. 3 Geophysical prospecting models of line L30

## 5 结论

(1)野外数据采集和预处理关键技术:确定采集频带范围 0.35~10 400 赫兹,采集时间大于 60 分钟的关键野外数据采集技术,频谱分析、Robust 处理、远参考处理、人工筛选、静态效应校正等预处理关键技术;

(2)隐伏南华纪成锰期断陷盆地最佳反演参数和模式为正则化因子  $T_{ua}$  值为 3 的非线性共轭梯度 TM 模式;

(3)音频大地电磁地球物理找矿预测间接模型:隐伏的成锰期断陷盆地地区具有“高阻-低阻-高阻”三层电性结构,隆起区则呈“低阻-高阻”两层电性结构,隆起区背景电阻率通常是凹陷区背景电阻率 3~5 倍以上;含锰岩系电阻率范围在 25~40 欧姆·米,属次低阻;根据典型电性结构和含锰岩系电性差异,识别隐伏含锰岩系有无、厚度、埋深、产状和后生断裂构造等特征,进行间接找矿预测。

**致谢:**野外施工、后期数据处理得到中国地质大学深地资源与电磁探测课题组高凌峰博士的大力支持,在此致以诚挚的谢意。

### [参考文献]

Beamish D, Travassos J M. 1992. A study of static shift removal from

magnetotelluric data[J]. *Journal of Applied Geophysics*, (2): 157-178.

Cagniard, L. 1953. Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting[J]. *Geophysics*, 18: 605-635.

Chave, A. D, A. G. Jones. 2012. *The magnetotelluric method - Theory and practice* [M]. Cambridge University Press.

Constable S C, Parker R L, Constable C G. 1987. Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data[J]. *Geophysics*, 52(3): 289-300.

Degroot-Hedlin C, Constabel S. 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data [J]. *Geophysics*, 55(55): 1613-1624.

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成矿作用[J]. *地质科技情报*, 34(6): 1-7.

Egbert G D, Booker J R. 1986. Robust estimation of geomagnetic transfer functions[J]. *Geophys. J. R. Aster. Soc.*, 87: 173-194.

Gamble T D, Goubau W M, Clarke J. 1979a. Error analysis for remote reference magnetotellurics[J]. *Geophysics*, 44(5): 959-968.

Gamble T D, Goubau W M, Clarke J. 1979b. Magnetotellurics with a remote magnetic reference[J]. *Geophysics*, 44(1): 53-68.

龚玉蓉, 汤井田, 蔡剑华. 2011. 小波神经网络的大地电磁数据静态效应处理[J]. *物探化探计算技术*, 36(6): 558-591.

韩骑, 胡祥云, 程正璞, 杨炳南, 蔡建超, 韦伟. 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.

韩松. 2017. 华南岩石圈三维电性结构及构造意义[D]. 吉林大学.

何继善, 薛国强. 2018. 短偏移距电磁探测技术概述[J]. *地球物理学报*, 61(1): 1-8.

胡祥云, 毕奔腾, 刘国兴, 韩江涛, 蔡建超, 彭荣华, 徐珊. 2017. 华南南部吉安-福州剖面岩石圈电性结构研究[J]. *地球物理学*

报,60(7):2756-2766.

霍光谱,胡祥云,刘敏. 2011. 各向异性介质中大地电磁正演研究综述[J]. 地球物理学进展,26(6):1976-1982.

Jiracek G R. 1990. Near-surface and topographic distortions in electromagnetic induction [J]. *Surveys in Geophysics*, (2-3):163-203.

Jones A G. 2006. Electromagnetic interrogation of the anisotropic Earth: looking into the Earth with polarized spectacles [J]. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 158(2-4):281-291.

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.

吕庆田,韩立国,严加永. 2010. 庐枞矿集区火山气液型铁、硫矿床及控矿构造的反射地震成像[J]. 岩石学报,26(9):2598-2612.

Niblett E R, Sayn-Wittgenstein C. 1996. Variation of electrical conductivity with depth by the magnetotelluric method [J]. *Geophysics*, 25(5):998-1008.

Pek J, Santos F A M. 2002. Magnetotelluric impedances and parametric sensitivities for 1-D anisotropic layered media [J]. *Computers and Geosciences*, 28:939-950.

Pieter-Ewald Share, Alan G. Jones, Mark R. Muller, David T. Khoza, Marion P. Miensoopust, Susan J. Webb. 2014. An audio-magnetotelluric investigation of the Otjiwarongo and Katima Mulilo regions, Namibia[J]. *Geophysics*, 79(4):151-171.

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.

Siripunvaraporn W, Egbert G. 2000. An efficient data-subspace inversion method for 2-D magnetotelluric data [J]. *Geophysics*, 65(3):791.

Smith J T, Booker J R. 1991. Rapid inversion of two- and three-dimensional magnetotelluric data [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 96(96):3905-3922.

Streich R, Michael B. 2011. Electromagnetic fields generated by finite-length wire sources: comparison with point dipole solutions [J]. *Geophysical Prospecting*, 59(2):361-374.

汤井田,李广,肖晓. 2017. 基于压缩感知重构算法的大地电磁强干扰分离[J]. 地球物理学报,60(9):3642-3654.

汤井田,张林成,王显莹,仁政勇,周聪,赵文广,吴明安. 2018. 庐枞矿集区矾山-将军庙地区 AMT 三维反演及地质结构解释[J]. 地球物理学报,61(4):1576-1587.

Uchida T. 1993. Smooth 2-D inversion for magnetotelluric data based on statistical criterion ABIC [J]. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 45(9):841-848.

汪洋,刘志臣,陈登,钟月丽,秦先进. 2018. 贵州遵义二叠纪锰矿气液喷口群的发现及地质意义[J]. 贵州地质,35(2):81-87.

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(6):26-32.

ZHANG Heng, LI Tonglin. 2017. Research on modeling source effect of 3D CSAMT based on staggered-grid finite difference method [J]. *Global Geology*, 20(1):53-58.

张遂,周琦,张平壹,沈红钱,杜远生. 2015. 黔东南松桃西溪堡南华系大塘坡组超大型锰矿床地质特征及找矿预测[J]. 地质科技情报,34(6):8-16.

张振宇,王刚,胡祥云,李永博,王大勇,姚大为. 2017. 张量 CSAMT 方法及对比实验[J]. 石油地球物理勘探,52(4):869-874.

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,张遂,安正泽,潘文,杨炳南,谢小峰,余文超,尹森林,王萍,吕代和,徐源. 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,张遂,余文超,杨胜堂,刘雨. 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,张遂,杨炳南,潘文,余文超,王萍,徐源,齐靓,刘雨,覃永军,谢小峰. 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,2017,91(10):2285-2298.

## 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

YANG Bing-nan<sup>1,2</sup>, HU Xiang-yun<sup>2</sup>, ZHOU Qi<sup>3</sup>, SHEN Xiao-qing<sup>1</sup>, HE Shuai<sup>1,2</sup>,  
XIE Xiao-feng<sup>1,2</sup>, WANG Jia-jun<sup>1</sup>

(1. 103 Geological Party, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration & Development, Tongren 554300, Guizhou, China; 2. Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 3. Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Guiyang 550004, Guizhou, China)

[ **Abstract** ] The “Datangpo type” manganese deposit during the Nanhua period in south China is located in the southeast margin of Yangtze Block. In recent years, the theory of ancient natural gas seepage metallogenic of emerge inside and form outside manganese rift basin were found, the key technology for Prospecting and Prediction of buried manganese ore in the deep part of this type of manganese ore deposit was researched. Through the practice of Songtao manganese national fully equipped exploration district in Tongren, Guizhou, it has founded 4 hidden world-class supergiant and a series of large-medium sized manganese deposits, its the biggest breakthrough of manganese exploration in the country and changed the national manganese ore exploration and development pattern. In this paper, it introduces the technical guide for AMT exploration of the key technical combination of prospecting and prediction for the deep concealed manganese deposit by the project team, it mainly includes data collection and pretreatment, the best inversion model and parameter optimization, establishment of geophysical exploration mode for audio-frequency Magnetotellurics. It is expected to provide a reference for the prospecting and prediction of Nanhua period manganese deposit in other areas of south China and other times under similar metallogenic geological background.

[ **Key words** ] Ancient Natural Gas Seep Manganese Deposit; Audio-frequency Magnetotellurics; Nanhua Period

(上接第 356 页)

## Geological Characteristics and Exploration Potential Prediction of Liangfengao Manganese Deposit in Songtao County, Guizhou Province

Qin Ying<sup>1</sup>, HOU Bing-de<sup>2</sup>, FENG Kai-you<sup>2</sup>, QIN Yong-jun<sup>1</sup>, ZENG Jun-fang<sup>2</sup>

(1. Guizhou Academy of Geological Survey, Guiyang 550004, Guizhou, China; 2. 103 Geological Party, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Tongren 554300, Guizhou, China)

[ **Abstract** ] The Liangfengao Manganese deposit is the only low phosphorus ‘Datangpo’ type manganese deposit in Nanhua system of Guizhou, Hunan and Chongqing adjacent area, Its ore bearing strata is the black carbonaceous shale of the first member of the Datang formation in the Nanhua system, the surface exposed near 20 km. From SE to NW, the manganese-bearing rock series and the manganese orebody have the regulation of develop with nothing and become thicker, then became thinner, the long axis direction is NE 60° to 70°, the predicted basin length is 1 200 ~ 1 500 m, the width is 300 ~ 400 m, the central phase, transient phase and marginal phase can be divided. Among them, the length of central phase is 300 ~ 400 m, the width is 50 ~ 100 m, mainly is massive manganese ore. In the mining area, the thickest orebody is 2.20 m the average thickness is 1.14 m, the average grade is 17.29%, the manganese-bearing graben basin is small and the main body is eroded completely. In early Datangpo, Nanhua period, some special geologic body which formed by gravity flow or little ice Age in late Tiesiao ice Age and consist of terrestrial clast appeared in the lower manganese-bearing rock series of this rift basin, its source is Xiushan-Ganlong graben near the Liangfengao rift basin. Because the main body of central phase and transient phase of ancient natural gas seepage and eruption has been eroded completely, only part marginal phase left, the manganese exploration potential is low.

[ **Key words** ] Manganese deposit; Characteristics; Exploration potential; Liangfengao; Songtao Guizhou