

doi: 10.12029/gc20190408

仇根根, 方慧, 吕琴音, 彭炎. 2019. 武夷山北段及相邻区深部电性构造与成矿分析: 基于三维大地电磁探测结果[J]. 中国地质, 46(4): 775-785.

Qiu Gengen, Fang Hui, Lü Qinyin, Peng Yan. 2019. Deep electrical structures and metallogenic analysis in the north section of Wuyishan Mountains and its adjacent areas: Based on three-dimensional magnetotelluric sounding results[J]. Geology in China, 46(4): 775-785(in Chinese with English abstract).

武夷山北段及相邻区深部电性构造与成矿分析: 基于三维大地电磁探测结果

仇根根, 方慧, 吕琴音, 彭炎

(中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要:华南地区经历了多期构造-岩浆-成矿作用, 矿产资源丰富, 存在多个成矿聚集区, 是国家经济发展的重要矿产基地。本文使用华南地区采集的区域大地电磁阵列观测数据, 利用 WSINV3DMT 三维反演程序科学构建了武夷山北段及相邻区三维电性结构模型。结果显示, 沿闽西北断裂、政和-一大浦断裂等断裂带下方, 深部表现为明显的低阻异常带, 可能是古微陆块拼合线或深大断裂的反映, 对上覆浅层断裂构造具有明显的控制作用。武夷地区已探明的主要内生金属矿床中, 绝大部分矿床点位于这些低阻异常带、深部软流体边缘位置上方, 同时又主要分布于 ΔT 化极磁异常梯度带之上, 具有明显的分布规律性, 结合上述规律和特征, 可在武夷地区初步圈定找矿有利方向。

关键词:武夷山北段; 大地电磁; 深部构造; 找矿远景区; 深部资源工程

中图分类号: P631.3²⁵ 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2019) 04-0775-11

Deep electrical structures and metallogenic analysis in the north section of Wuyishan Mountains and its adjacent areas: Based on three-dimensional magnetotelluric sounding results

QIU Gengen, FANG Hui, LÜ Qinyin, PENG Yan

(Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, Hebei, China)

Abstract: South China has experienced the evolution of multiple stages of tectonic-magma-mineralization. It is rich in mineral resources and has multiple mineralization concentration areas, which constitute an important base for national economic development. In this paper, the three-dimensional electrical structure model of the northern part of Wuyi Mountain and adjacent areas is constructed by using the regional magnetotelluric array observation data acquired in south China and the three-dimensional inversion program of WSINV3DMT. The electrical characteristics of the model show that the deep electrical characteristics along the lower part of the fault zone exhibit obvious low resistivity anomalous zones. The low resistivity anomalous zones may be the response of deep and large faults or the assembling boundary of paleo-micro-continental blocks, which have obviously controlled

收稿日期: 2019-05-11; 改回日期: 2019-07-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41574068)、国家重点研发计划项目(2016YFC0600201)、中国地质调查局项目(121201108000160913、12120114005801、DD20160082、DD20190032)和地科院基本科研项目(AS2016J12)联合资助。

作者简介: 仇根根, 男, 1984年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事大地电磁法方法技术研究与应用; E-mail: qiugengen@igge.cn。

the shallow fault structure. It is found that most of the major endogenous metal deposits in Wuyi area are located above the low resistivity anomaly zone and the edge of deep soft fluids. They have obvious distribution regularity. At the same time, they are mainly distributed in the gradient zone of ΔT polarized magnetic anomaly. Combined with the above distribution rules and characteristics, the favorable areas for prospecting can be preliminarily delineated in Wuyi area.

Key words: north section of Wuyi Mountain; magnetotelluric; deep structures; prospecting area; deep resources engineering

About the first author: QIU Gengen, male, born in 1984, master, senior engineer, mainly engaged in the research and application of magnetotelluric method; E-mail: qiugengen@igge.cn.

Fund support: Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.41574068), the National Key R&D project (2016YFC0600201), China Geological Survey project (No.121201108000160913, No.12120114005801, No.DD20160082, No.DD20190032), and Basic Scientific Research project of CAGS(No.AS2016J12).

1 引 言

随着地表及浅表地质调查程度逐年提高和现代地球科学研究的逐步发展,找矿重点工作逐渐由地表、浅表层向隐伏(半隐伏)矿床的研究和深部大型、超大型矿床及矿集区的探寻方向转变。华南地区经历了多期构造-岩浆-成矿作用的演化,矿产丰富,矿种多样,储量巨大,存在多个成矿聚集区,是中国经济发展的重要基地(舒良树,2012;张国伟,2013),其中燕山期是华南地区最重要的成矿时期,成矿作用与花岗质侵入岩密切相关(吕庆田,2015a;邢光福,2017)。

武夷山成矿带处于闽赣两省连接部位,是中国东部重要的构造-岩浆-成矿带(陈毓川,1999;余忠珍,2008)。区内已发现众多贵金属、多金属矿床,其中大型矿床4处,中小型矿床30多处,矿(化)点二百余处。武夷山成矿带中与岩浆活动有密切成因联系的矿床主要有以下几种成因类型:①火山-次火山热液型,该类型在时间上与成因上与燕山晚期火山作用有关,成矿物质主要来源于中酸性岩浆;②斑岩型,该类型与燕山期中酸性侵入作用有关,成矿物质主要来源于中酸性岩浆;③火山沉积变质-热液改造型(含铜黄铁矿型),该类型与中元古界、上古生界海相火山沉积建造有关,成矿物质来自于地层和岩浆热液;④接触交代型,该类型与燕山晚期中酸性侵入接触交代作用有关,成矿物质主要来源于中酸性岩浆;⑤岩浆热液型,该类型与燕山期酸性-中酸性岩浆侵入作用有关,成矿物质主要来自深部岩浆(毛建仁,2010)。

通常控制成矿的地质因素主要有3种,即:岩浆因素、构造因素和岩性因素,其中构造因素与矿床的

形成有着密切的联系。华南矿床的形成在很大程度上受着构造作用的制约,构造不仅为成矿流体的运移提供了通道,也为成矿物质提供了沉淀富集的场所(陈科,2011)。钦杭成矿带内多金属矿床大多沿深大断裂带分布。燕山期是华东地区最重要的铜多金属成矿期之一,主要的成矿岩体以及矿床集中在钦杭成矿带内,包括一系列小岩株及斑岩体,大多沿深大断裂展布,如铜厂、银山等成矿岩体皆沿赣东北深大断裂带侵位;枫林、永平、铜山等岩体位于萍乡—广丰深大断裂带南侧;村前、塔前等岩体侵位于宜丰—景德镇深大断裂带之中,构成钦杭成矿带东段极具特色的斑岩-矽卡岩型铜多金属成矿带,使上述深大断裂带成为钦杭成矿带东段寻找隐伏花岗岩体和相关铜多金属矿床的最有利地区(邢光福,2017)。武夷山成矿带与钦杭成矿带相邻,所处的构造位置、岩浆活动以及区域地层有很多可比之处。因此,在矿产勘查过程中查明构造与成矿的关系,对圈定矿产远景地区和矿床评价具有重要的意义。

大地电磁测深法作为一种深部地球物理勘探方法,具有探测深度大、对低电阻率反应灵敏、不受高阻层屏蔽影响等特点,被广泛用于研究地壳和上地幔的结构(刘国栋,1994;魏文博,2002;金胜,2010)。近年来,三维反演技术随着算法的更新和计算硬件的提升应用案例逐渐增多,并且取得较好的应用效果(张昆,2013;仇根根,2014,2018;Zhang,2014,2019)。本文使用华南地区所采集的区域大地电磁阵列观测数据,利用WSINV3DMT三维反演程序(Siripunvaraporn,2004,2005,2009)科学构建了武夷山及周边地区岩石圈深度范围内三维电性模型,从已知成矿带、矿集区认识出发,分析已发现的主要内生金属矿床与深部低阻体、深部构造及 ΔT 化极磁异常的空间耦合关系,

总结已发现金属矿床点与深部地球物理场的耦合关系及分布规律与特点,既而分析其它可能赋存金属矿床的有利地带。

2 大地电磁数据采集与资料处理

调查区主要位于闽北、赣中、赣东、浙西南地区,利用V5-2000宽频大地电磁测深仪以20~30 km点距进行阵列式区域大地电磁测量。工作区内累计完成宽频MT测深点160个,完成测量面积约10万km²。野外数据采集测点观测时间长度24~30 h,观测频段范围为320 Hz~3000 s。野外数据采集完成后对数据作初步处理,即对其开展了频谱分析、计算功率谱、Robust处理方法、用最小二乘原理估算阻抗张量元素,最后求得视电阻率 ρ_{xy} 与 ρ_{yx} 和阻抗相位 φ_{xy} 与 φ_{yx} 。华南地区经济条件发达,部分地区电磁干扰严重,强电磁干扰区远参考处理技术具有较好的应用效果(陈高,2001;仇根根,2014;陈勇雄,2015),为了进一步压制噪声干扰,在工作区外围100 km远布设磁道远参考站,采用磁道远参考技术进一步提高数据质量。MT实测点位见图1所示,远参考处理技术应用效果见图2所示。

大地电磁法因采集信号较弱的天然电磁场信号易受到电磁干扰的影响,针对华南地区的强电磁干扰带来的影响,初步形成一套野外数据采集与资料处理及干扰频点人机交互编辑方法,流程如下:首先,在干扰区外围设置远参考站,采用磁道远参考处理技术或参考直接使用远参考磁道数据得到初步数据处理结果,部分受磁干扰影响较大的测点通常能取得较大改善;其次,结合层状介质电阻率与相位互算技术,对测点的干扰段频点按照曲线原形态方式进行人机交互编辑,注意不能严格按照理论计算结果进行人为校正;最后,根据测点自身处理结果、远参考处理结果、直接使用远参考磁道数据处理结果、人机交互编辑处理结果,综合得出该测点较为准确的大地电磁测深曲线(可以根据情况将不同处理结果间不同频段数据进行拼接),使得最终数据处理结果达到在电磁干扰区满足宏观电性结构勘探要求。

3 三维模型构建数值模拟

本文采用基于改进OCCAM算法的

WSINV3DMT三维反演程序进行三维反演建模,为了验证所构建的三维电性结构模型的准确性与合理性,开展了复杂电阻率渐变和复杂电阻率突变三维电性结构模型数值模拟工作,通过对比分析反演结果与原始模型的拟合程度来验证分析三维反演过程中使用的反演参数和所得三维反演结果的合理性。

3.1 复杂电阻率渐变三维电性结构模型

华南地区电性结构特征在横向和纵向方向上均具有较强的突变性。依华南某一实测工区区域大地电磁测量数据通过三维反演计算构建了复杂电阻率渐变三维电性结构模型Model01(图3,图4),模型最低电阻率值为 $1 \Omega \cdot m$,最高电阻率值为 $8.16 \times 10^6 \Omega \cdot m$,模型中包含的构造样式复杂多样,存在地壳和上地幔低阻异常体或低阻层,高、低电阻率之间采用渐变过渡形式,模型复杂程度较为接近实际地质环境。地面设计区域MT观测点114个,测点间距20~40 km不等,离散分布在工作区内。正、反演计算使用频点个数21个,均匀分布在320 Hz~5000 s对数域频段上。模型单元剖分在横向方向上测点区域范围之内以10 km均匀网格进行剖分,测点区域之外经过2个均匀网格之后再以1.6倍步长往外递增;模型单元纵向剖分首层厚度50 m,之后以1.1倍步长递增,直到深度超过120 km。按照这种剖分规则最终将模型离散化为 $39 \times 47 \times 58$ 三维网格,模型尺度最终达到 $1110 \text{ km} \times 1190 \text{ km} \times 126 \text{ km}$ 。三维反演计算时采用 $100 \Omega \cdot m$ 均匀半空间作为初始模型,选用非对角线阻抗张量模式进行WSINV3DMT三维正、反演计算。

对模型Model01进行三维正演计算,得到模型三维正演响应数据。图5为某观测点的三维正演响应曲线,其曲线形态与野外测量数据形态较为相似,两支曲线在高频段相邻,在中、低频段曲线相互分离,表明该地区浅地表地质信息分布相对均匀,而深部地质结构具有较强的二维、三维特性。将正演计算结果不添加任何噪声进行OCCAM三维反演计算,以排除干扰噪声给反演结果带来的影响。模型剖分方式与原始模型相同,以 $100 \Omega \cdot m$ 均匀半空间作为三维反演初始模型,其他门槛误差、正则化因子等参数采用三维反演程序默认值,最后得到如图6所示沿X方向数值模拟结果对比分析图,结果

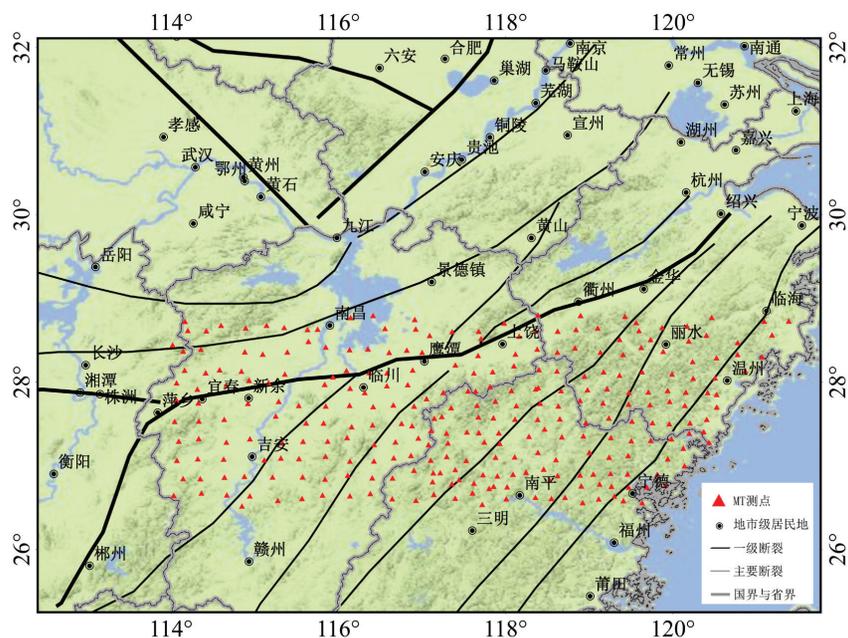


图1 大地电磁测深点位与主要断裂分布

Fig.1 Distribution of magnetotelluric sounding stations and main fractures

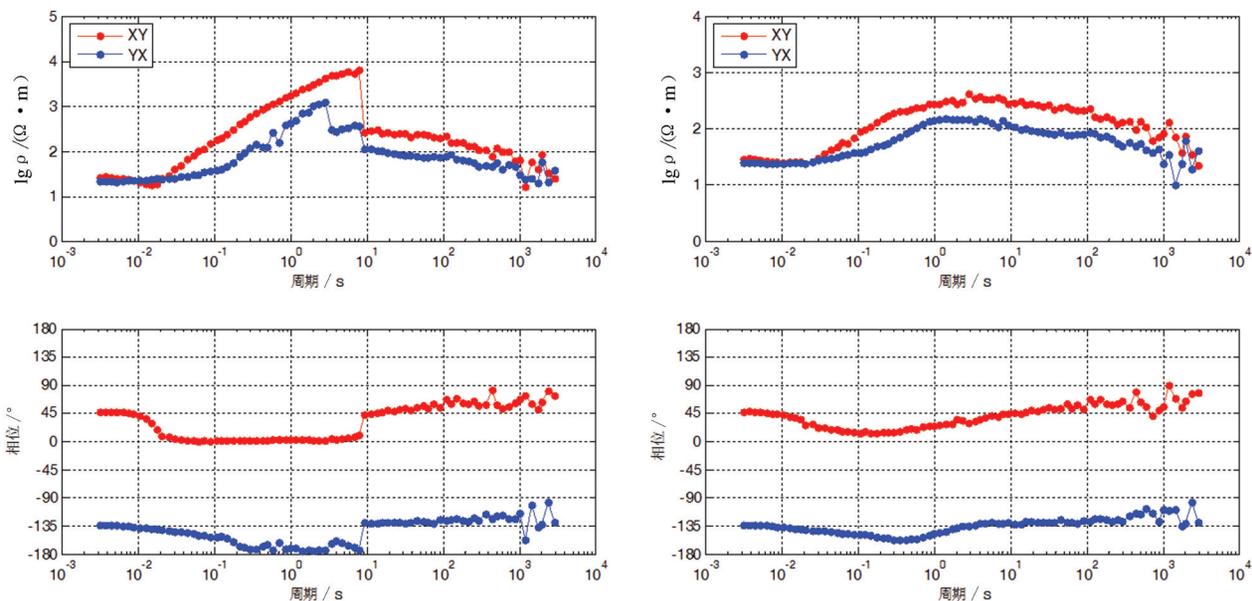


图2 远参考处理前后效果对比

Fig.2 Comparison before and after remote reference processing

显示,对该复杂电阻率渐变的三维电性结构模型而言,所采用反演技术方法和反演参数可以较好重建出原始模型的结构形态,其模型深部构造样式,局部低阻、高阻异常体的空间位置对应关系,反演结果中与原始模型基本相同,且电阻率值与

原始模型也较为接近,反演结果中假异常较少,表明所采用的OCCAM三维反演技术方法和反演参数设置较为合理,从反演结果中深部拟合情况可以看出,该模型反演结果中有效勘探深度达100 km以上。

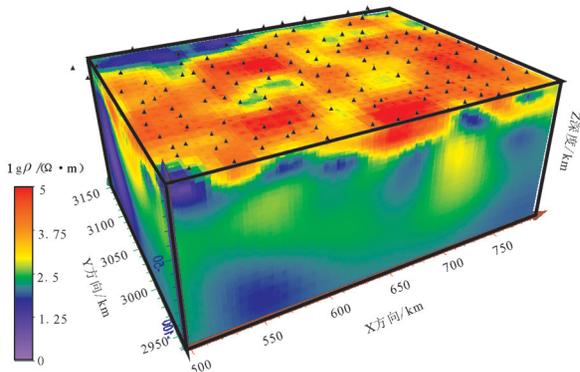


图3 复杂三维电性结构模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of complex three-dimensional electrical structure model

3.2 复杂电阻率突变三维电性结构模型

实际地质环境中除了包含上述电阻率渐变的地质模型之外,还很有可能包含电阻率突变的地质体单元,如构造断裂带两侧截然不同的地质体或不同的地质单元体经过走滑运动之后变成了相邻接触关系,其电性特征很可能具有突变性。为了了解区域大地电磁法对复杂电阻率突变地质模型的重建效果,对上述复杂电阻率渐变模型电阻率值进行了适当修改,将模型值修改为电阻率突变色块模型 Model02,图7为跨越模型中央沿 $X=0$ 方向的电性剖面。采用与上述模型相同的数值模拟方法进行三维正、反演计算。

对 Model02 复杂电阻率突变三维电性结构模型进行三维正演计算以后,将正演计算结果不添加任何噪声进行 OCCAM 三维反演计算,模型剖分方式与原始模型相同,以 $100 \Omega \cdot m$ 均匀半空间作为初始模型,其他门槛误差、正则化因子等参数采用三

维反演程序默认值,最后得到如图8所示沿 X 方向数值模拟结果对比分析图。结果显示,对该复杂电阻率突变的三维电性结构模型而言,所采用反演技术方法和反演参数同样可以较好重建出原始模型的结构形态,其模型深部构造样式,局部低阻、高阻异常体的空间位置对应关系,在其有效勘探范围之内反演结果与原始模型基本一致。从不同剖面反演结果综合对比来看,当埋藏深度小于 50 km 时,基本可以较为准确地圈定出异常体的结构形态和构造样式;当埋藏深度介于 $50 \sim 100 \text{ km}$ 时,反演结果可以较好地重建复杂电性突变模型的宏观电性结构特征,部分地区依然可以较为准确地构建出原始模型的结构形态。随着埋藏深度的继续增加,受最低频点勘探深度的限制和反演结果多解性影响,假异常逐渐增多。从该电性突变模型的数值模拟结果可以看出,在最低频点有效勘探范围之内,采用大地电磁 OCCAM 三维反演计算同样可以较好地重建原始复杂电阻率突变模型的结构形态,与电阻率渐变模型相比,其反演结果准确度在深部有所降低,但对浅部三维电性结构信息依然反应较为准确。

3.3 武夷北段及相邻区 3D 电性结构模型科学构建

上述数值模拟结果表明,复杂电阻率渐变模型的反演效果要优于复杂电阻率突变模型的反演效果。考虑到实际地质条件中既包含电阻率渐变过渡单元,又包含电阻率突变地质体单元,文中所采用的 OCCAM 三维反演技术方法和反演参数得出反演结果的准确性应介于上述两种模型效果之间,即反演结果综合可信勘探深度在 $70 \sim 100 \text{ km}$ 。三维反演过程中对干扰频点的控制与校正是得到准确反演结果的基本前提,是数据输入模块最为关键的步

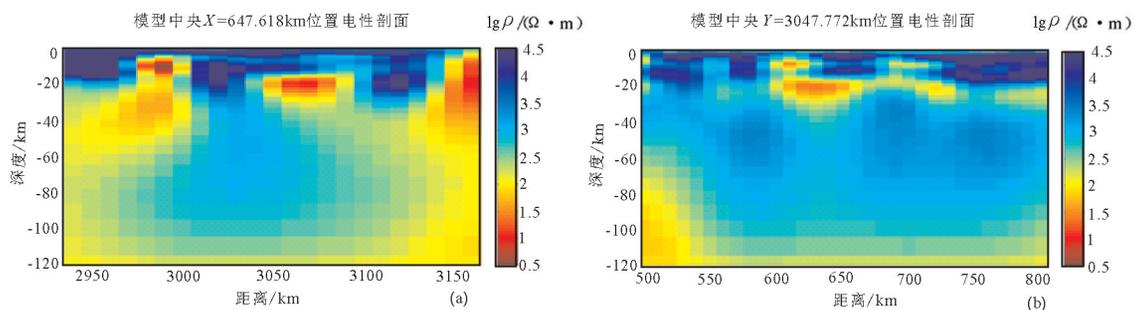


图4 Model01 复杂电阻率渐变三维电性结构模型剖面(a,模型中央X方向电性剖面;b,模型中央Y方向电性剖面)

Fig.4 Model 01-profile of Complex 3-D electrical structure model with resistivity gradient change (a, Electricity structure profile in X direction of the center; b, Electricity structure profile in Y direction of the center)

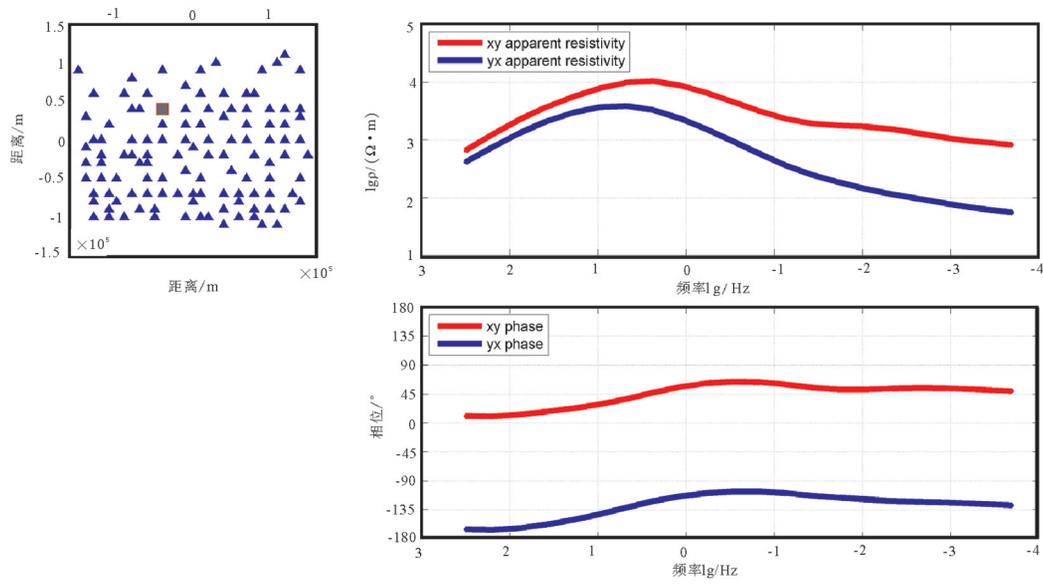


图5 某中间测点MT三维正演响应曲线
Fig.5 MT 3-D forward response curve of one station

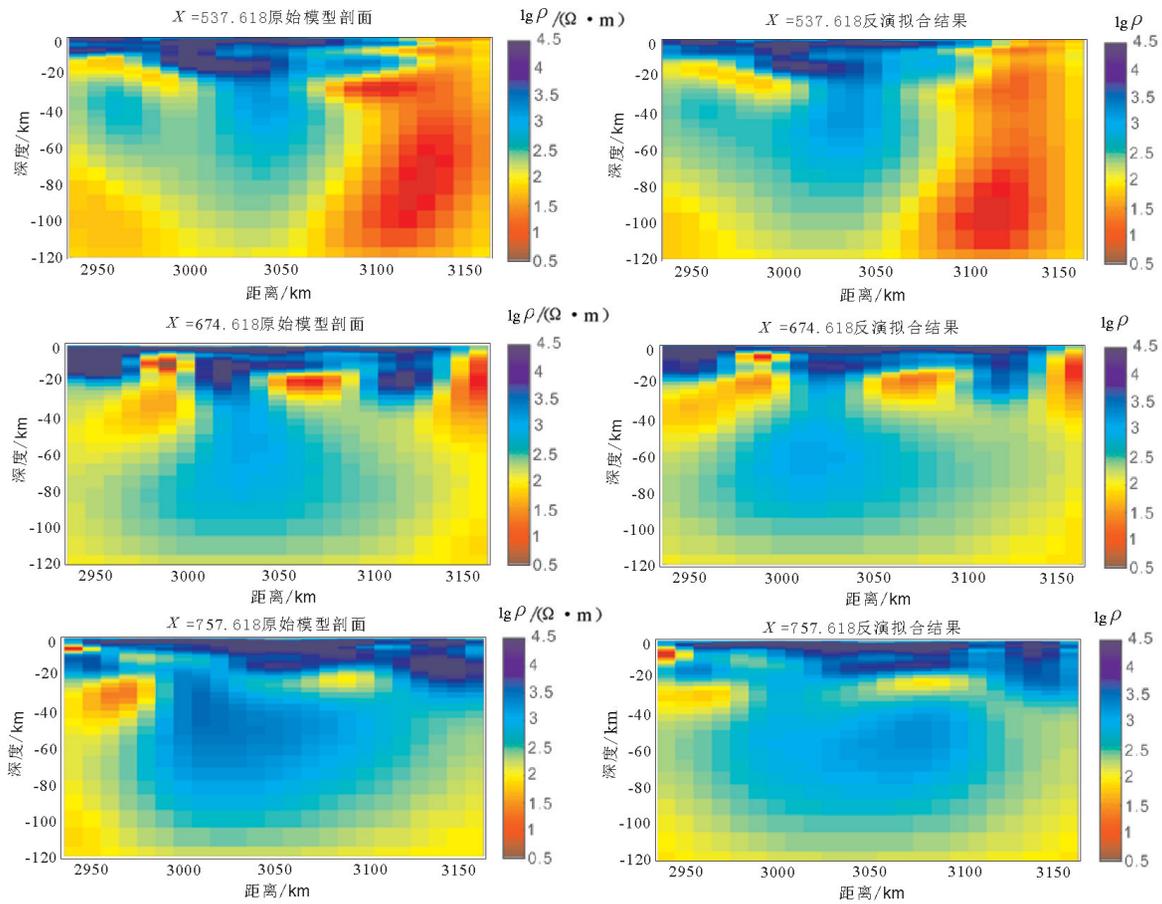


图6 复杂电阻率渐变三维模型沿X方向数值模拟结果(左侧为原始模型;右侧为反演结果)
Fig.6 Numerical simulation results in X direction of complex 3-D electrical structure model with resistivity gradient change
(The left is the original model, and the right is the inversion result.)

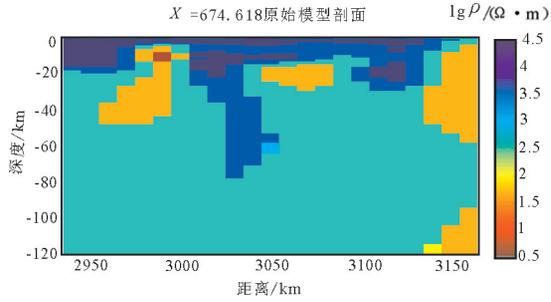


图7 Model02复杂电阻率突变三维电性结构模型剖面
Fig.7 Model 02-profile of complex 3-D electrical structure model with resistivity abrupt change

骤,华南地区电磁干扰普遍较强(严良俊,1998;徐志敏,2014),大部分测点的在部分频段间均存在畸变点,尤其是在中频段0 Hz位置 and 低频段2000 s以

下,在开展三维反演计算以前,必须对这些干扰点进行校正,同时对工区内含有静态效应的测点应进行静态位移校正(吴炳良,2005;陈广涛,2015)。

数据预处理完之后即可进行大地电磁三维反演计算,上述理论模型数值模拟结果表明,在点距为20~30 km条件下,利用320 Hz~5000 s频段观测数据,采用21个或21个以上观测频点,使用基于改进OCCAM三维反演算法的WSINV3DMT程序可以构建出较为准确的探测深度达70~100 km范围内的三维电性结构模型,70~100 km可信探测深度基本可以较好控制地壳内的三维电性结构特征。文章利用武夷山及周缘区域MT测量数据初步构建出岩石圈深度范围内三维电性结构模型(图9),反演结果模型RMS拟合误差为3.76,模型电性特征与区域地质、断裂构造吻合度高(图10深部电性结构特

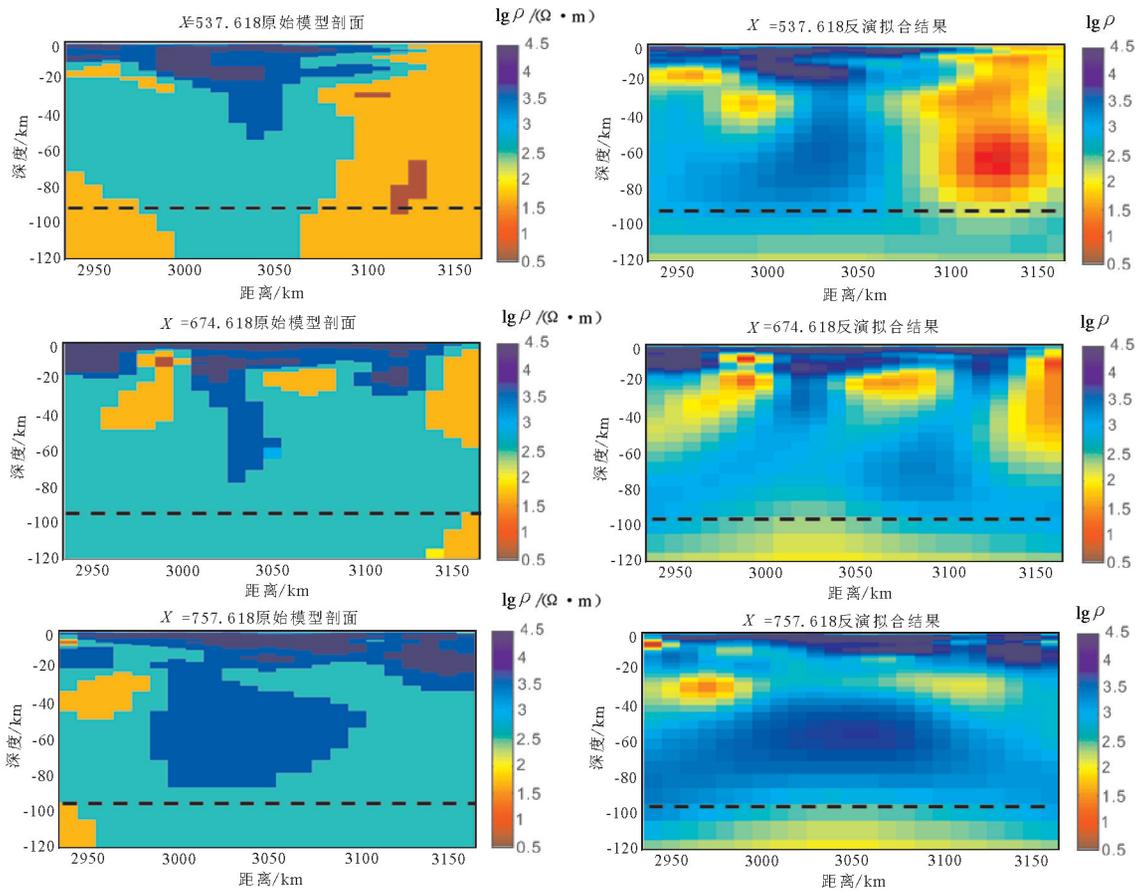


图8 视电阻率突变复杂三维模型沿X方向上反演结果对比(左侧为原始模型;右侧为反演结果;图中虚线位置为估算的有效勘探深度)

Fig.8 Comparison of inversion results in X-direction of complex 3-D electrical structure model with resistivity abrupt change (The left is the original model; the right is the inversion result; the dotted line position in the map is the estimated effective exploration depth)

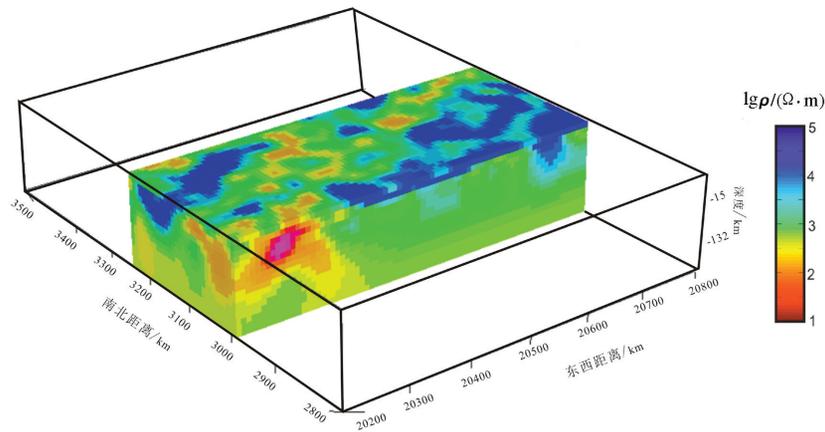


图9 武夷山北段及相邻区三维电性结构模型

Fig.9 Three-dimensional electrical structure model in northern Wuyi and adjacent areas

征与断裂位置高度吻合),反演结果可信。

4 深部构造特征与成矿关系分析

4.1 已知矿集区地球物理属性分析

华南中元古代时期主导构造格局是多块体分离,不仅扬子与华夏分属不同块体,而且它们自身也非统一地体。据现有研究,华夏和扬子当时各自的内部也存在不同性质的微陆块或微板块(张国伟,2013)。统一的华南大陆形成以后,各微陆块或微板块拼合起来共同经历后续构造运动。在后续构造运动中,微板块碰撞拼合边界、裂解带便成为相对薄弱区,易形成含矿流体的运移通道与矿产资源富集区,这些薄弱区在电性特征上通常表现为低阻异常,因此根据低阻异常可以初步圈定找矿远景区。图10为15 km深度平面电性特征,15 km深度电性特征通常能较好地反映深大断裂的位置分布情况。平面电性特征显示沿地表断裂带位置下方电性特征主要表现为北东、北西向交叉网络状条带低阻异常,低阻异常带是深大断裂的表现特征,同时也可能反应新元古代时期古微板块相互之间碰撞拼合界线,这些表现为低阻异常特征的深大断裂或微板块碰撞拼合界线上覆断裂系构造的发育具有明显的控制作用,为深部含矿流体向上运移提供良好的运移通道,同时易在上方浅部容矿构造区富集成矿。从图9已发现的主要内生金属矿藏和低阻异常的耦合关系可以看出,武夷山北段及相邻区主要内生金属矿藏主要分布在低阻体或低阻带周缘梯度带之上或者附近区域,即主要赋存在深大断

裂或微板块碰撞拼合界线上方及周边地区,具有较为明显的分布规律性。

武夷山成矿带中以铌钽、锡、金、银、多金属矿床成矿系列为主,矿石具有较强的磁性,强磁异常成为找矿的有效标志之一。图11为工作区 ΔT 化极磁异常与主要内生金属矿产资源分布耦合关系图(郭良辉,2011),可以看出,绝大部分矿藏点位具有位于 ΔT 化极磁异常高值区边缘和变化梯度带之上的趋势,少数点位于化极磁异常峰值之上。例如宜春—新余、鹰潭—上饶地区,矿藏点主要位于 ΔT 化极磁异常高值区边缘和变化梯度带之上。

4.2 找矿远景区初步预测

在武夷—云开成矿带,形成了与印支—燕山期混合花岗岩、花岗岩有关的铌钽、锡、金、银、多金属矿床成矿系列(简称武夷矿床成矿系列),其成矿构造背景为华南造山带中的构造变质带,成矿与印支期变质花岗岩、燕山期花岗岩有关,有少量地幔物质参与成岩成矿(陈毓川,2012)。上述已发现主要内生金属矿床的地球物理属性分析表明,绝大部分矿床点位分布与低阻异常带、深部软流体有关,表明武夷成矿带主要内生金属矿藏点分布受深大断裂控制明显,同时又主要位于 ΔT 化极磁异常高值区边缘和变化梯度带之上。因此,根据深部低阻异常带、 ΔT 磁异常可以初步圈出找矿远景区。

圈定找矿远景区流程如下:基于构造控矿理论,结合武夷山北段三维电性结构特征,利用15 km深度平面电性特征分布,15 km深度电性特征通常能较好地反映深大断裂的位置分布情况,结合已发

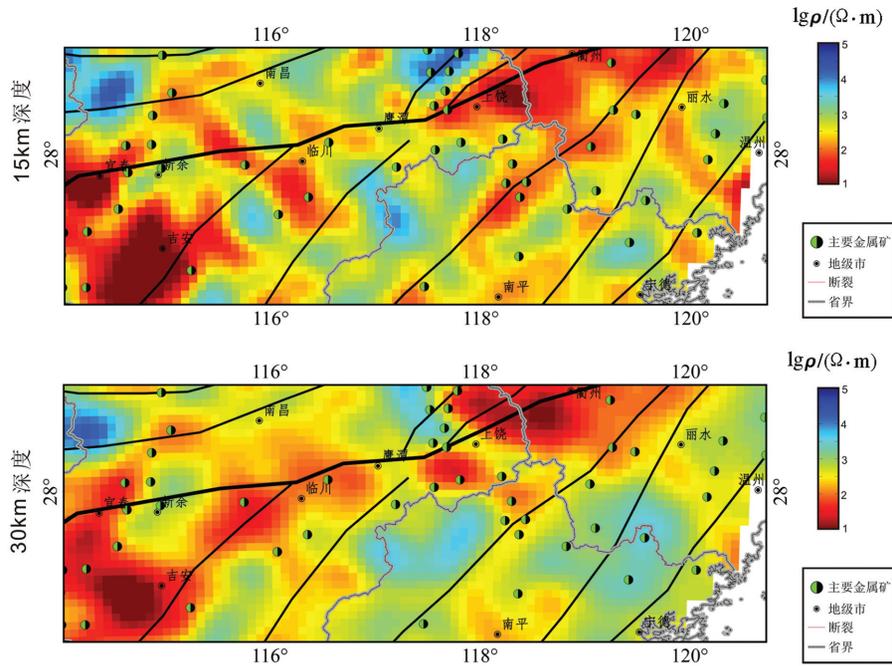


图10 15 km、30 km 深度平面电性特征与主要内生金属矿床分布

Fig.10 Planar electricity characteristics at 15 km and 30 km depth and distribution of major endogenous metal mineral resources

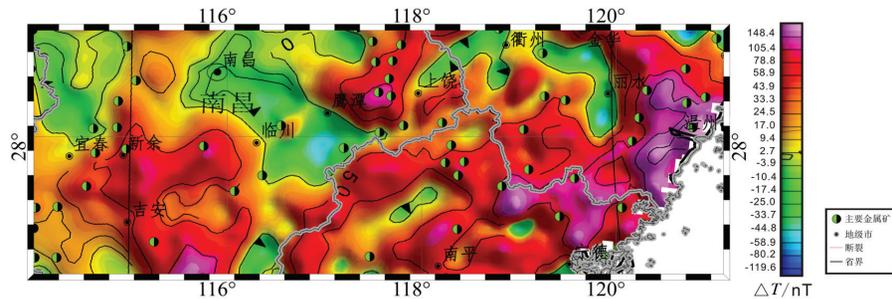


图11 调查区 ΔT 化极磁异常与主要内生金属矿产资源点位分布

Fig.11 Polar magnetic anomaly of ΔT and distribution of major endogenous metal mineral resources

现的主要内生金属矿床的分布特点与低阻异常带的空间耦合关系,在低阻异常带周缘梯度带上初步圈定有利区,将初步圈定的找矿有利区投影至 ΔT 化极磁异常图上,利用主要内生金属矿床与 ΔT 化极磁异常的空间耦合关系,在初步圈定的找矿有利区上进一步缩小找矿有利区,最终圈定找矿远景区7处:宜春远景区、吉安远景区、临川远景区、鹰潭—上饶—衢州远景区、建阳远景区,南平远景区和丽水—温州远景区(图12)。

5 结论

(1)三维电磁探测技术可行、优势明显。利用

区域大地电磁测深法构建壳-幔三维结构电磁参数模型可以为认识地下深大断裂空间展布、三维结构等方面提供丰富信息。

(2)华南主要内生金属矿藏的分布特征具有较为明显的分布规律性,下覆低阻异常带可能是深大断裂或微板块碰撞拼合边界的反应,对上覆断裂系和容矿构造控制作用明显,沿低阻异常带上方易形成含矿流体的运移通道与矿产资源富集区。

(3)分析了武夷山北段及相邻区已知主要内生金属矿藏与深部软流体(低阻体)的空间耦合关系,从三维电性结构角度出发,利用深部低阻异常体、低阻异常带及其变化梯度带,结合 ΔT 化极磁异常

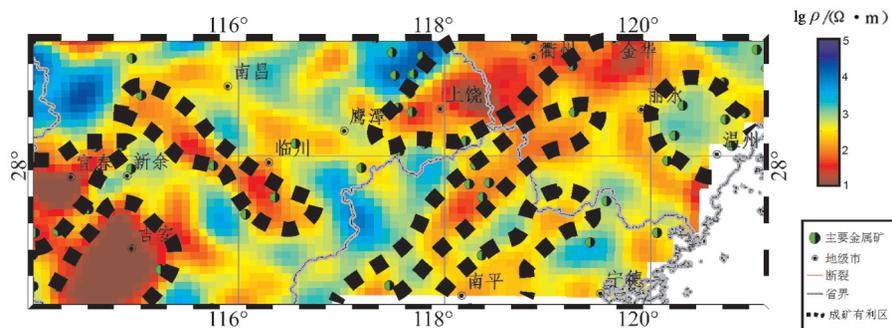


图 12 武夷山北段及相邻区找矿远景区初步预测

Fig.12 Preliminary prediction of mineralization favorable areas in north Wuyi and its adjacent areas

变化梯度带,在武夷山北段及相邻区初步圈定成矿有利区7处:宜春远景区、吉安远景区、临川远景区、鹰潭—上饶—衢州远景区、建阳远景区,南平远景区和丽水—温州远景区。

References

- Chen Yuchuan. 1999. Prospect Evaluation of Mineral Resources in Major Metallogenic Belts of China [M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Chen Gao, Jin Zhufa, Ma Yongsheng, Su Zhuliu, Wang Yinhu, Wang Wei. 2001. Remote reference technique in magnetotelluric sounding and its application [J]. GPP, 40(3): 112–117(in Chinese with English abstract).
- Chen Ke. 2011. The relationship between structure and mineralization[J]. Western Prospecting Engineering, 23(4): 109–110(in Chinese with English abstract).
- Chen Yongxiong, Xu Zhimin, Xin Huicui. 2015. A Study on remote reference de-noising technique in magnetotelluric sounding of strong noise [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 12 (1): 59–67(in Chinese with English abstract).
- Chen Guangtao. 2015. Study on static displacement correction of the earth [J]. Science and Technology and Innovation, (17): 82(in Chinese with English abstract).
- Guo Lianghui, Meng Xiaohong, Shi Lei. 2011. Magnetic reduction to the pole in the South China Sea and its tectonic Implications[C]// The International Symposium on Deep Exploration into the Lithosphere.
- Jin Sheng, Zhang Letian, Wei Wenbo, Ye Gaofeng, Liu Guoxin, Deng Min, Jing Jianen. 2010. Magnetotelluric method for deep detection of Chinese continent [J]. Acta Geologica Sinica, 84(6): 808–817(in Chinese with English abstract).
- Liu Guodong. 1994. Development of magnetotelluric sounding in China [J]. Acta Geophysica Sinica, (S1): 301–310(in Chinese with English abstract).
- Lü Q T, Shi D N, Liu Z D. 2015a. Crustal structure and geodynamics of the middle and lower reaches of Yangtze metallogenic belt and neighboring areas: Insights from deep seismic reflection profiling[J]. Journal of Asian Earth Science, 114:704–716.
- Mao Jianren, Zhao Xilin, Ye Haimin, Hu Qin, Liu Kai, Yang Fang. 2010. Tectonomagmatic mineralization and evolution in Wuyishan metallogenic belt [J]. Shanghai Geology, 31(S1): 140–144(in Chinese with English abstract).
- Mao Jianren, Ye Haimin, Zhao Xilin, Hu Qin, Liu Kai, Yang Fang. 2010. Tectonomagmatic mineralization and evolution in Wuyishan metallogenic belt [J]. Mineral Deposits, 29(S1): 18–19(in Chinese with English abstract).
- Qiu Gengen, Fang Hui, Zhong Qing, Pei Fagen, Zhang Xiaobo, Li Xiaochang, Yuan Yongzhen, Lu Jinqi, Liu Changwang, Gao Baotun, He Meixin, Bai Dawei, Li Li, Zhao Ziyang. 2014. Study for MT 3D inversion in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River important mineralization zones and its adjacent area [J]. Progress in Geophysics, 29 (6): 2730–2737(in Chinese with English abstract).
- Qiu Gengen, Zhang Xiaobo, Bai Dawei, Pei Fagen. 2014. Effectiveness analysis of MT remote reference technique in suppressing noise [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 11 (3): 305–310(in Chinese with English abstract).
- Qiu Gengen, Peng Yan, Lu Qinyin. 2018. Analysis for model spatial resolution in MT 3D inversion [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 15 (5): 616–624(in Chinese with English abstract).
- Siripunvaraporn W, Uyeshima M, Egbert G. 2004. Three-dimensional inversion for Network-Magnetotelluric data[J]. Earth Planets and Space, 56(9): 893–902.
- Siripunvaraporn W, Egbert G, Lenbury Y, Uyeshima M. 2005. Three-dimensional magnetotelluric inversion: data-space method[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 150(1): 3–14.
- Siripunvaraporn W, Egbert G. 2009. WSINV3DMT: Vertical magnetic field transfer function inversion and parallel implementation[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 173(3): 317–329.
- Shu Liangshu. 2012. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block[J]. Geological Bulletin of China, 31

- (7):1035–1053(in Chinese with English abstract).
- Wei Wenbo. 2002. New advance and prospect of magnetotelluric sounding (MT) in China[J]. Progress of Geophysics, (2): 245–254 (in Chinese with English abstract).
- Wu Binliang, Shao Min. 2005. 3-D static shift displacement correction of magnetotelluric sounding data and its application[J]. Progress in Exploration Geophysics, (3): 219–222,10(in Chinese with English abstract).
- Xu Zhimin, Xin Huicui, Lu Fujun. 2014. Ore cluster area of Luzong magnetotelluric (MT) method of remote reference research [J]. Progress in Geophysics, 29 (4): 1822–1830(in Chinese with English abstract).
- Xing Guangfu, Hong Wentao, Zhang Xuehui, Zhao Xilin, Ban Yizhong, Xiao Fan. 2017. Yanshanian granitic magmatism and their mineralizations in East China[J]. Acta Petrologica Sinica, 33 (5):1571–1590(in Chinese with English abstract).
- Xu Zhimin, Xin Huicui, Tan Xinpin, Xu Zhangjian. 2018. An analysis of the experimental results of MT remote reference technology in strong electromagnetic interference region [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 42(3): 560–568(in Chinese with English abstract).
- Yan Liangjun, Hu Wenbao, Chen Qinli, Zhang Xiang, Hu Jiahua. 1998. Application of remote reference MT to noisy area [J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, (4): 36–40(in Chinese with English abstract).
- Yu Zhongzhen, Cao Shenghua, Luo Xiaohong. 2008. Evaluation and prospective of reserves of copper polymetallic mineral resources in Wuyishan Mountain metallogenic belt, Jiangxi Province[J]. Resources Survey and Environment, 29 (4): 270–278(in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Guo Anlin, Wang Yuejun, Li Sanzhong, Dong Yunpeng, Liu Shaofeng, He Defa, Chen Shunyou, Lu Rukui, Yao Anpin. 2013. Structures and problems of South China Continent [J]. Chinese Science: Geosciences, 10 :1553–1582(in Chinese with English abstract).
- Zhang K, Wei W B, Lü Q T. 2014. Four changes for efficiency and practicality on previous 3D MT NLCG inversion algorithm[J]. Acta Geod Geophys, 49: 551–563.
- Zhang K, Lü Q T, Yan J Y, Hu H, Fu G M, Luo F. 2019. The three-dimensional electrical structure and metallogenic prospect of the Ning (Nanjing)–Wu (Wuhu) basin and the southern adjacent area in eastern China[J]. Journal of Asian Earth Sciences. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2019.01.032>.
- 附中文参考文献**
- 陈毓川.1999. 中国主要成矿带矿产资源远景评价[M].北京:地质出版社.
- 陈高,金祖发,马永生,苏朱刘,王寅虎,王巍. 2001. 大地电磁测深远参考技术及应用效果[J]. 石油物探, (3):112–117.
- 陈科. 2011. 构造与成矿之间的关系[J]. 西部探矿工程, 23(04):109–110.
- 陈勇雄,徐志敏,辛会翠. 2015. 强噪声的大地电磁远参考去噪研究[J]. 工程地球物理学报, 12(1):59–67.
- 陈广涛. 2015. 大地电磁静态位移校正研究[J]. 科技与创新, (17):82.
- 郭良辉,孟小红,石蕾. 2011. 南海磁极还原及其构造意义[C]//年岩石圈深部勘探国际研讨会.北京.
- 金胜,张乐天,魏文博,叶高峰,刘国兴,邓明,景建恩. 2010. 中国大陆深探测的大地电磁测深研究[J]. 地质学报, 84(6):808–817.
- 刘国栋. 1994. 我国大地电磁测深的发展[J]. 地球物理学报, (S1): 301–310.
- 毛建仁,赵希林,叶海敏,胡青,刘凯,杨芳. 2010. 武夷山成矿带构造—岩浆—成矿作用与演化[J]. 上海地质, 31(S1):140–144.
- 毛建仁,叶海敏,赵希林,胡青,刘凯,杨芳. 2010. 武夷山成矿带构造—岩浆—成矿作用与演化[J]. 矿床地质, 29(S1):18–19.
- 仇根根,方慧,钟清,裴发根,张小博,李晓昌,袁永真,卢景奇,刘畅往,高宝屯,何梅兴,白大为,李立,赵子言. 2014. 长江中下游重要成矿区带及邻区大地电磁测深三维反演研究[J]. 地球物理学进展, 29 (6):2730–2737.
- 仇根根,张小博,白大为,裴发根. 2014. 大地电磁法远参考处理技术压制噪声干扰的应用效果分析[J]. 工程地球物理学报, 11(3):305–310.
- 仇根根,彭炎,吕琴音. 2018. 大地电磁法三维反演计算模型分辨率分析[J]. 工程地球物理学报, 15(5):616–624.
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报, 31(7):1035–1053.
- 魏文博. 2002. 我国大地电磁测深新进展及展望[J]. 地球物理学进展, (2):245–254.
- 吴炳良,邵敏. 2005. 大地电磁三维静态位移校正方法及其应用效果[J]. 勘探地球物理进展, (3):219–222+10.
- 徐志敏,辛会翠,吕扶君. 2014. 庐枞矿集区大地电磁法的远参考效果研究[J]. 地球物理学进展, 29(4):1822–1830.
- 邢光福,洪文涛,张雪辉,赵希林,班宜忠,肖凡. 2017. 华东地区燕山期花岗岩岩浆与成矿作用关系研究[J]. 岩石学报, 33(5):1571–1590.
- 徐志敏,辛会翠,谭新平,徐张建. 2018. 强电磁干扰区大地电磁远参考技术试验效果分析[J]. 物探与化探, 42(3):560–568.
- 严良俊,胡文宝,陈清礼,张翔,胡家华. 1998. 远参考MT方法及其在南方强干扰地区的应用[J]. 江汉石油学院学报, (4):36–40.
- 余忠珍,曹圣华,罗小洪. 2008. 江西武夷成矿带铜多金属矿产资源远景评价与展望[J]. 资源调查与环境, 29(4):270–278.
- 张国伟,郭安林,王岳军,李三忠,董云鹏,刘少峰,何登发,程顺有,鲁如魁,姚安平. 2013. 中国华南大陆构造与问题[J]. 中国科学:地球科学, 10:1553–1582.