

doi: 10.12029/gc20190411

张昆, 吕庆田, 严加永, 赵金花. 2019. 安徽庐江—枞阳矿集区典型铜、铁矿床三维电性结构特征[J]. 中国地质, 46(4): 807–817.
Zhang Kun, Lü Qingtian, Yan Jiayong, Zhao Jinhua. 2019. The three-dimensional electrical characteristics of the typical iron and copper deposits in the Lujiang–Zongyang ore concentration area[J]. Geology in China, 46(4): 807–817(in Chinese with English abstract).

安徽庐江—枞阳矿集区典型铜、铁矿床 三维电性结构特征

张昆^{1,2}, 吕庆田^{1,2}, 严加永^{1,2}, 赵金花^{1,2}

(1. 中国地质科学院, 北京 100037; 2. 中国地质调查局—中国地质科学院地球深部探测中心, 北京 100037)

摘要:“玢岩型”铁矿和斑岩型铜矿是庐江—枞阳矿集区两个主要矿床类型, 以往研究主要集中在矿床学、岩石学、年代学和地球化学等方面, 地球物理工作开展相对较少。随着找矿深度不断加大, 地球物理的作用越来越大。为建立典型矿床地球物理探测的解释“标尺”, 笔者选择泥河铁矿和沙溪铜矿为研究对象, 开展三维音频大地电磁测深工作, 获得了典型铜、铁矿床及围岩的三维电性结构模型。结果显示, 玢岩(泥河)铁矿电性主体表现为层状结构, 由浅至深主要为低阻的沉积层、高阻火山岩、相对低阻的蚀变带以及相对高阻的次火山岩, 赋存于次火山岩体顶部穹隆状的磁铁矿主要表现为高阻特征。斑岩(沙溪)铜矿电性主体表现为块状(或纵向带状)结构, 浅表为低阻沉积盖层, 深部主要为相对高阻的沉积地层和高阻斑岩体, 赋存于岩体内或围岩接触带的矿体则为中等电阻特征。为便于模型的实用, 笔者将两类矿床的复杂电性模型转化为简化的概念电性模型, 为寻找类似矿床提供快速对比“标尺”。

关键词: 庐江—枞阳矿集区; 泥河铁矿; 沙溪铜矿; 音频大地电磁测深; 三维反演; 电性结构; 深部资源工程
中图分类号: P631.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2019)04-0807-11

The three-dimensional electrical characteristics of the typical iron and copper deposits in the Lujiang–Zongyang ore concentration area

ZHANG Kun^{1,2}, LÜ Qingtian^{1,2}, YAN Jiayong^{1,2}, ZHAO Jinhua^{1,2}

(1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. SinoProbe Center, Chinese Academy of Geological Sciences and China Geological Survey, Beijing 100037, China)

Abstract: The porphyrite iron and porphyry copper ore deposits are the major deposit categories in the Lujiang–Zongyang ore concentration area. However, previous researches were mostly focused on mineralogy, petrology, geochronology and geochemistry, but paid less attention to geophysics. As the exploration depth is increasing, geophysical methods become more important. In order to develop the interpretation ‘scaleplate’ of the geophysical exploration for typical deposits, the authors took the Nihe iron and

收稿日期: 2019-02-19; 改回日期: 2019-05-20

基金项目: 中国地质调查局“深部地质调查工程”(DD20160082, DD20190012)与“十三五”国家重点研发计划“华南陆内成矿系统的深部过程与物质响应”(2016YFC0600201)联合资助。

作者简介: 张昆, 男, 1983, 博士, 副研究员, 主要从事深部地球探测研究; E-mail: zhangkun1010@163.com。

通讯作者: 严加永, 男, 1976, 博士, 教授级高工, 主要从事深部地球探测研究; E-mail: yanjiy1010@163.com。

Shaxi copper ore deposits as the research subjects, and obtained the three-dimensional electrical models of the orebodies and the surrounding rocks through the audio-magnetotelluric sounding. The results indicate that the major structure of the porphyrite (Nihe) iron deposit is composed of several layers including low resistivity sedimentary rocks, high resistivity volcanic rocks, relatively low resistivity alteration zone and relatively high resistivity intrusive of subvolcanic rocks from shallow place to the depth. In addition, the magnetite body, which exists as a dome on the top of the mass, presents the characteristics of high resistivity. For the porphyry (Shaxi) copper deposit, the major electrical characteristics are the massive (or longitudinal belt) structures composed of the shallow sedimentary rocks with low resistivity, the deep sedimentary rocks with relatively high resistivity, and the porphyry mass with high resistivity. In addition, the orebodies, which exist in the mass or the contact zone between the mass and surrounding rocks, present electrical characteristics of medium resistivity. The orebodies hosted in the mass (or in the contact zone with surrounding rocks) present medium-resistivity. For the practicability of the models, the authors converted the inversion results with complex electrical structures into two facilitate models, which would be used as the comparative 'scaleplate' for the discovery of the similar deposits.

Key words: Lujiang-Zongyang ore concentration area; Nihe iron deposit; Shaxi copper deposit; audio-magnetotellurics; three-dimensional inversion; electrical structure; deep resources engineering

About the first author: ZHANG Kun, male, born in 1983, doctor, associate researcher, majors in geophysics, deep exploration of the earth; E-mail: zhangkun1010@163.com.

About the corresponding author: YAN Jiayong, male, born in 1976, doctor, senior engineer, majors in geophysics, deep exploration of the earth; E-mail: yanjy@163.com.

Fund support: Supported jointly by National Key Research and Development Program (No. 2016YFC0600201), China Geological Survey project (No. DD20160082, No. DD20190012).

1 引 言

长江中下游地区是中国东部重要的成矿带之一,晚中生代发生了陆内大规模成岩成矿作用(赵文津,2008),形成了与高钾钙碱性岩浆岩有关的矽卡岩-斑岩成矿系统和与橄榄安粗岩有关的陆相火山岩铁(硫)成矿系统。前者主要分布于带内“断隆区”及“断凹区”的边缘(周涛发等,2008),形成矽卡岩型或矽卡岩-斑岩型多金属矿床,代表性矿床有:庐—枞矿集区的沙溪斑岩铜矿、铜陵矿集区的铜官山矽卡岩铜、铁矿床等;后者主要分布于带内的“断凹区”,代表性矿床有:庐—枞矿集区的泥河、罗河等“玢岩型”铁矿等(周涛发等,2017)。老一辈矿床学家自20世纪50—60年代,就对这两类矿床进行了系统的成矿学研究,分别建立了具有“多层楼”特点的“层控矽卡岩”模式(常印佛等,1983;刘湘培等,1988;翟裕生等,1992)和“玢岩”铁矿模式(宁芜研究项目编写小组,1978;程裕淇等,1979),对指导矿产勘查发挥了重要作用。

随着找矿勘查逐步走向深部,地球物理探测的作用越来越重要,但由于地球物理反演和地质解释的双重多解性,往往造成对地下物性成像结果认识上的偏差。研究已知典型矿床的地球物理响应对

指导深部和外围找矿勘查具有重要的实用价值。利用已知矿床的钻孔、物性和地质结构的约束,可以获得更加可靠的地球物理反演结果,有利于从更大的范围、完整地了解成矿系统“末端”的地球物理特征,建立特定矿床类型的解释“标尺”,为深部和外围找矿勘查提供解释依据。

相对于丰富的岩石学、地质年代学、矿床学研究成果,庐—枞矿集区典型矿床的地球物理探测研究开展较少。在SinoProbe-03项目资助下,笔者在庐—枞矿集区相继开展了多个典型矿床的重、磁、电探测和三维反演解释工作。张昆等(2014)对比了不同电磁测深方法在泥河铁矿上的探测结果,发现在人文和工业干扰严重的研究区,AMT反演结果在刻画矿床三维结构方面要优于CSANT、TEM和SIP;Chen et al.(2012)利用沙溪斑岩铜矿区的AMT数据,建立了基于Bostick一维反演的二维电性结构模型,有效刻画出志留系砂岩和石英闪长斑岩的空间分布;严加永等(2014)分析了沙溪铜矿区的密度和磁性特征,利用岩性识别技术,获得了含矿石英闪长玢岩、黑云母二长岩、石英闪长斑岩和闪长岩的空间分布,为矿区深部和外围找矿提供了重要信息。为进一步研究庐—枞矿集区两类典型矿床的电性特征,本文利用三维反演技术(张昆等,2013;

Zhang et al., 2014, 2017), 重新对泥河铁矿和沙溪铜矿的音频大地电磁测深(AMT)数据进行了三维反演, 获得了两个矿床的电性模型, 为该地区类似矿床的电磁法勘探提供案例参考。

2 地质背景

庐江—枞阳矿集区位于长江中下游成矿带的中部, 西侧为大别超高压变质带, 东与铜陵矿集区“隔江相望”。构造上, 庐—枞矿集区经历了前震旦纪变质基底形成、震旦—早三叠世海相沉积、中晚三叠世—白垩纪陆相碎屑和火山岩沉积等发展演化(常印佛等, 1991)。中生代岩浆作用强烈, 并伴

随铜铁金成矿作用(周涛发等, 2008a)。其中泥河铁矿(图1, 图2a)主要与闪长玢岩(次火山岩)有关, 岩体形成于132 Ma左右(覃永军等, 2010), 矿体赋存于岩体顶部, 而闪长玢岩侵入于上覆砖桥组火山岩内, 形成穹隆(吴明安等, 2011)。其他上覆围岩由老到新分别为: 下白垩统双庙组火山岩和熔岩, 杨湾组砂砾岩, 呈倾斜半环状分布。矿区构造发育, 以浅层陡倾断裂为主, 走向主要为北东、南北和北西方向(赵文广等, 2011)。

沙溪斑岩铜矿及周边(图1, 图2b)地区出露地层主要有第四系、侏罗系、志留系和早白垩世陆相火山岩。第四纪砂砾岩层、粉质黏土等广泛分布于

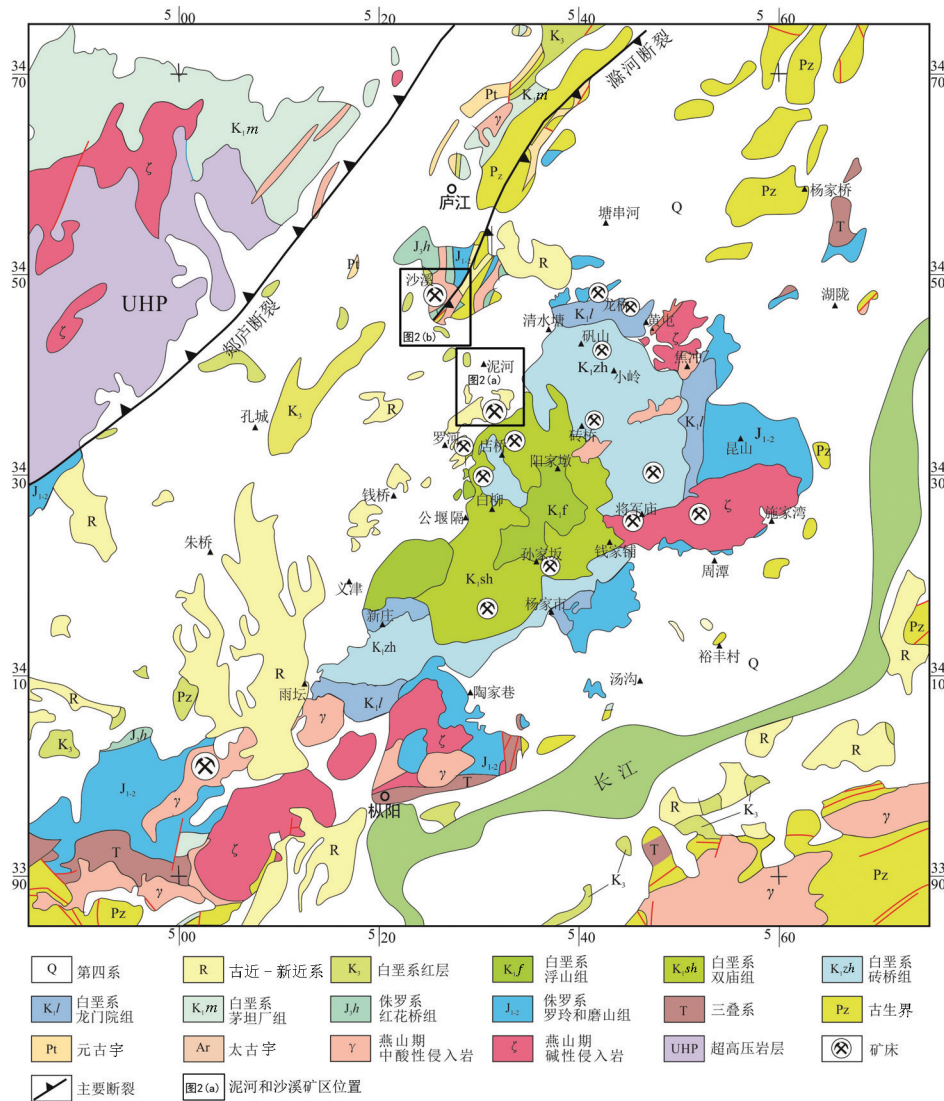


图1 庐枞矿集区地质及矿产分布图(据Lü et al., 2015修改)

Fig.1 Geological and metallogenic map of the Lu-Zong ore concentration area (after Lü et al., 2015)

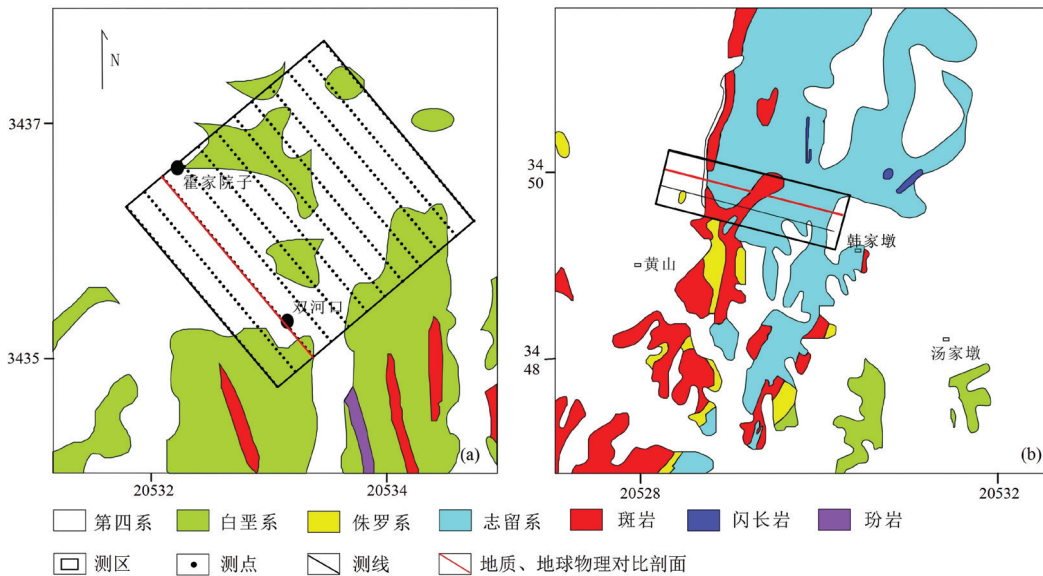


图2 泥河“玢岩”铁矿(a)和沙溪斑岩铜矿区(b)地质和AMT测线示意图(据吕庆田等,2013)

Fig.2 Geological map and AMT survey lines of Nihe (a) and Shaxi (b) deposit (after Lü et al., 2013)

沟谷坡地。早白垩世陆相火山岩主要为毛坦厂组(K_1m)火山岩,以安山质及粗安质火山岩夹凝灰质砂岩为主;侏罗纪地层主要为罗岭组(J_2l)和磨山组(J_1m),砂岩,分布于矿区西部及东侧,厚度可达几百米。志留纪地层主要为坟头组(S_2f)和高家边组(S_1g),泥质粉砂岩、粉砂岩和砂页岩(任启江等,1991)。区内构造主要表现为褶皱和断裂两种类型,其中背斜褶皱为北北东走向,轴面向南东陡立倾斜;断裂以东西、北西和北北东走向为主,北北东走向断裂最发育,表现为压扭性结构面(邱检生等,1991a,1991b)。矿区岩浆活动强烈,矿体主要与闪长斑岩有关,分布于岩体与围岩接触带的岩体一侧,岩体形成于135 Ma左右(吕庆田等,2013)。

3 AMT数据处理和分析

3.1 数据采集与处理

笔者使用美国Geometrics生产的EH-4连续电导率成像系统开展AMT数据采集工作,测线分布如图2,采集点距50 m,线距100 m,观测地表两个相互正交的水平电场分量(E_x 、 E_y)和两个正交的磁场水平分量(H_x 、 H_y)。为获得较高质量的电性信息,高、中、低三频段数据独立观测叠加15次以上,采集时间超过15 min。基于数据采集系统配套的处理软件,经过快速傅里叶变换和平稳估计,笔者得到了阻抗(按标量方式计算: $Z_{xy}=E_x/H_y$; $Z_{yx}=E_y/H_x$)、视电阻率($\rho=$

$|Z|/(\omega\mu)$)和阻抗相位($\text{atan}(Z_{\text{ima}}/Z_{\text{real}})$)数据,其频率范围为10~100000 Hz。此外,使用笔者自行(张昆,2012)开发的去噪软件,对数据进行频点筛选,获得相对平滑的视电阻率(阻抗相位)-频率曲线。该软件设计了可控阈值,基于一维反演过程删除不能被拟合(拟合差大于阈值)的数据,最终保留能够被一维反演拟合的数据。该方法选用的一维反演方法为马奎特法,目标函数及其梯度计算均使用原始数据和数据误差,保障了数据处理的客观性。依据陈乐寿和王光铎(1990)给出的趋肤深度表达式,AMT数据探测深度基本大于1 km,其中用于计算探测深度的平均视电阻率大于100 $\Omega \cdot \text{m}$ 、最低频率为12.6 Hz。

3.2 数据分析

为保障数据质量,笔者对自动去噪(删除不连续频点数据的过程)后的数据进行了人工编辑,删除视电阻率和阻抗相位-频率曲线中的不连续点,或添加误删的有效数据。此外,为简洁模型设计,提高计算效率和精度,对数据进行了方向旋转(旋转后 X 方向为垂直测线方向, Y 方向为测线方向)。因此,用于反演的数据均旋转至测线方向,典型数据曲线如图3所示。由于自动去噪和人工编辑均针对单一数据源(不同分量的视电阻率和阻抗相位),因此保留数据中同时包含视电阻率和阻抗相位的分量数据用于反演计算。

反演数据包括阻抗的 XY 和 YX 分量(图4和图5

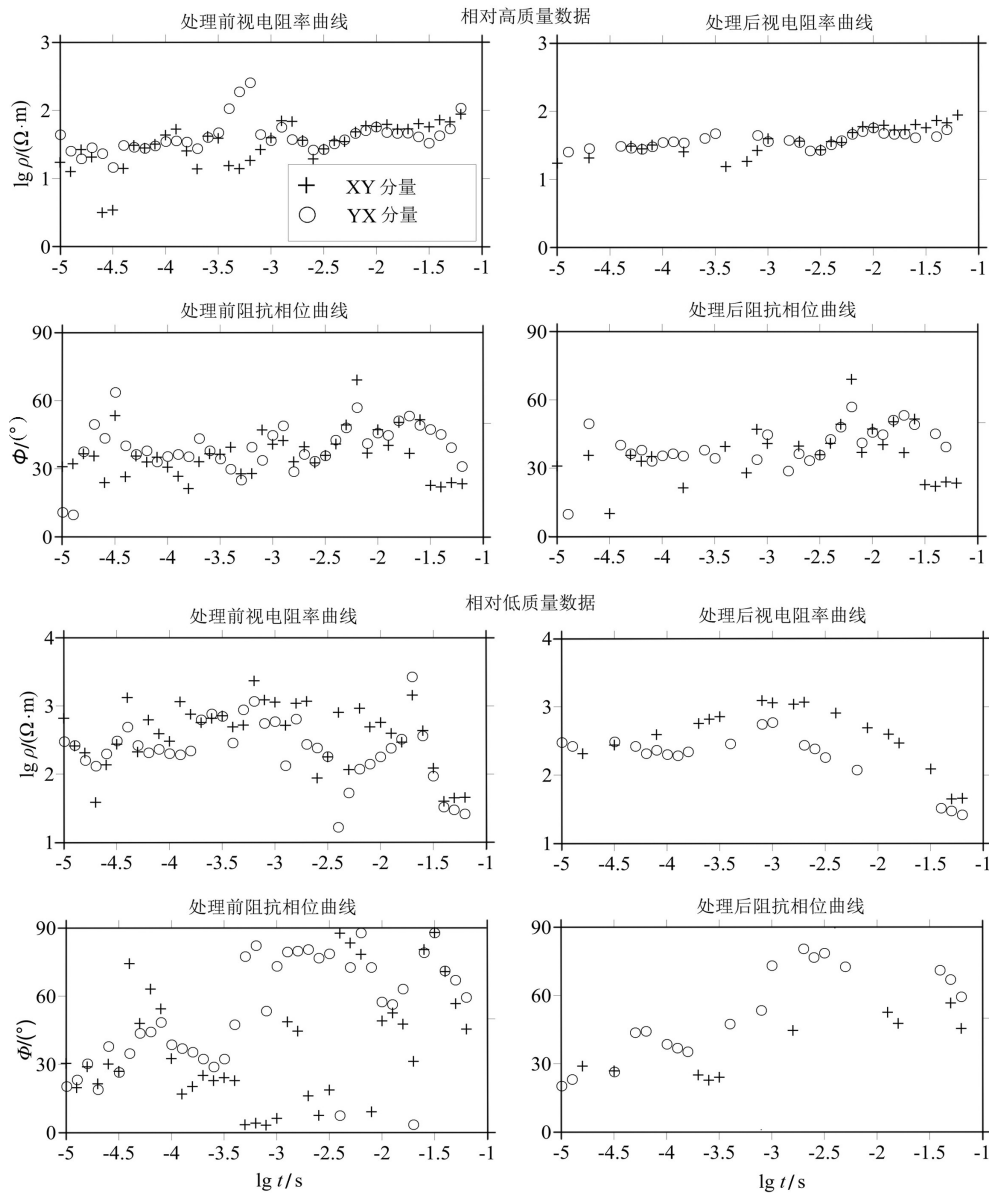


图3 典型矿床AMT数据处理前后对比示例

Fig.3 The comparison of typical ore deposits before and after AMT data processing

为YX分量视电阻率和阻抗相位示意图)。由视电阻率数据可见,泥河铁矿矿区(图4a)主要包括由高频到低频呈低角度西倾层状分布的3个电性层(低阻-高阻-低阻),由西向东低阻盖层逐渐减薄,高层层逐渐增厚。沙溪矿区视电阻率切片(图5a)主要包括两个电性层和一个电性体。高频数据(浅表 $n \times 10$ m以浅)为低阻层分布,视电阻率低于 $20 \Omega \cdot m$,南向北逐渐减薄;中低频数据(1 km以浅)为高阻层分布,视电阻率普遍大于 $100 \Omega \cdot m$,由南向北逐渐增厚(顶深减小)。低阻异常体位于测区中南部的中频

区域,视电阻率小于 $100 \Omega \cdot m$ 。阻抗相位(图4c,图5c)的变化特征与视电阻率相似。

4 反演和模型分析

4.1 三维反演

采用基于大地电磁场非线性共轭梯度三维反演方法(张昆等,2013;Zhang et al., 2014)和笔者研发的全空间反演软件(Zhang et al., 2017)开展电性模型反演计算。泥河铁矿区参与反演的数据抽希为1/4(Y方向点距100 m,X方向点距200 m),沙溪铜矿区参与

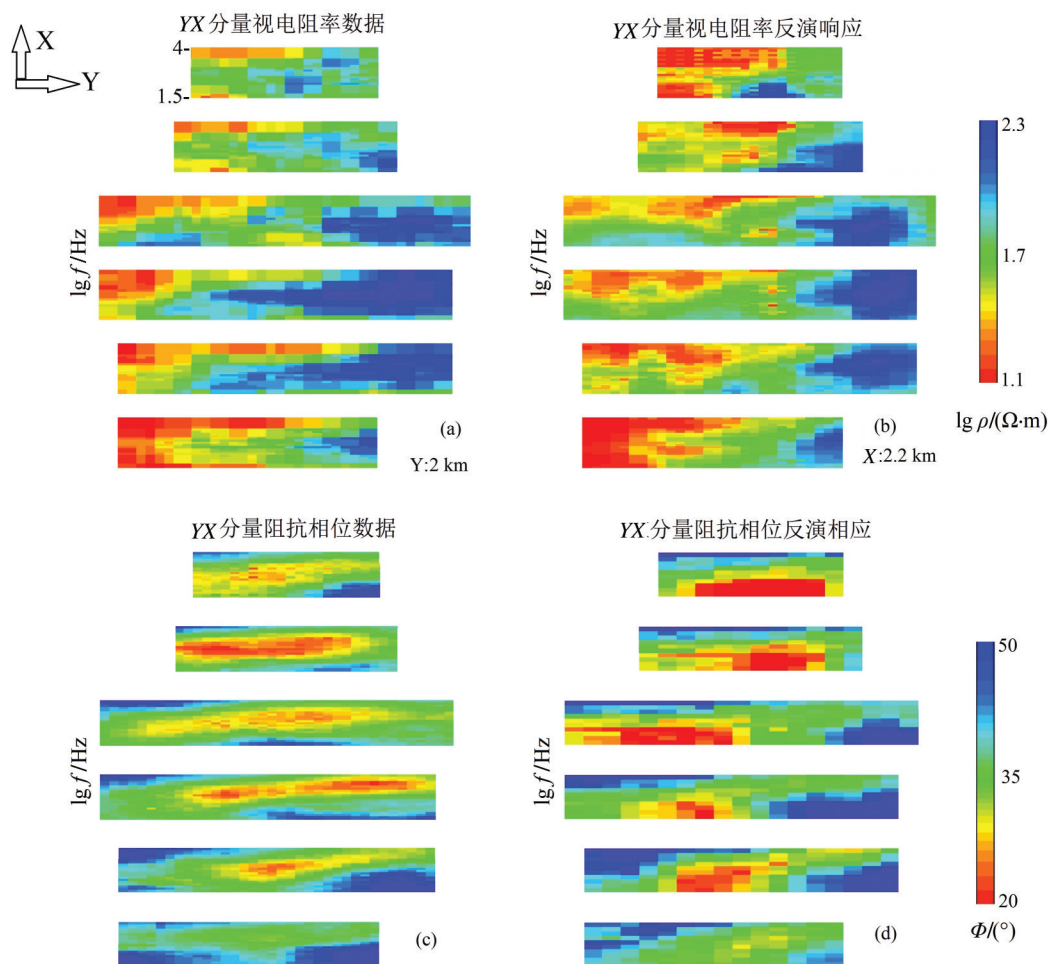


图4 泥河矿区数据和反演模型响应。

a—YX分量视电阻率数据;b—YX分量视电阻率模型响应;c—YX分量阻抗相位数据;d—YX分量阻抗相位模型响应

Fig.4 Data and inversion responses of Nihe deposit

a—Apparent resistivity data of YX component; b—Apparent resistivity responses of YX component; c— Impedance phase data of YX component; d—Impedance phase response of YX component

反演的数据抽希为1/2(Y方向点距100 m,X方向点距100 m)。反演计算拟合阻抗的XY和YX分量数据,数据误差为阻抗数值的5%。初始模型范围为20 km(X)×20 km(Y)×15 km(Z),其中泥河矿区中心区域范围:2.2 km(X)×2 km(Y)×1 km(Z),沙溪矿区中心区域范围:0.6 km(X)×2 km(Y)×1 km(Z),中心区横向单元网格长度约0.05 km,初始模型电阻率选择100 Ω·m。数据处理后,100000~10 Hz范围内的2~14个频点数据用于反演计算。

针对不同的反演参数、模型设计和静位移校正方法,开展了反演试验。正则化因子试验值为0.1、0.3、1、3、10,模型设计试验主要包括纵向网格厚度(地形精细程度)和背景电阻率值,静位移校正试验

测试了曲线平移、中值滤波(程少华,2012)和Zhang et al.(2016)提出的零成本方法,即基于数据自动判断是否存在静位移,并通过设计初始模型的方式,在反演过程实现静位移校正。通过数据拟合差、以往研究成果等对比分析,最终反演使用精细模型、零成本静位移校正方法以及相对中等的正则化因子(1)。最终使用的反演模型,其数据拟合差(模型响应与数据的差异,DF)分别为3.8(泥河矿区)和4.9(沙溪矿区),模型粗糙度(最终模型与初始模型的差异,MR)分别为2.2和1.7(图6)。

反演模型响应(图4b、d,图5b、d)与数据基本一致,但在泥河矿区中部中频区域、沙溪矿区东北部和中部中频区域表现出一定的差异。受矿区强噪声干

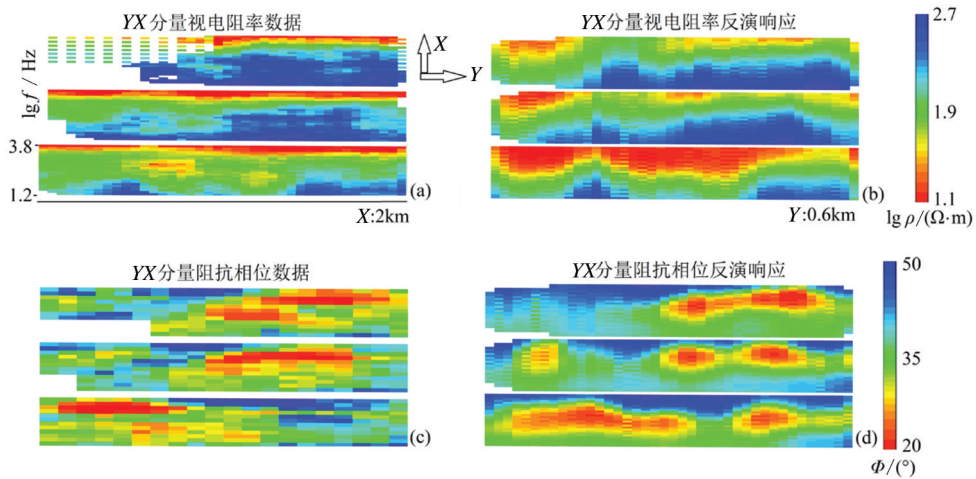


图5 沙溪矿区数据和反演模型响应

a—YX分量视电阻率数据;b—YX分量视电阻率模型响应;c—YX分量阻抗相位数据;d—YX分量阻抗相位模型响应

Fig.5 Data and inversion responses of Shaxi deposit

a—Apparent resistivity data of YX component; b—Apparent resistivity responses of YX component; c—Impedance phase data of YX component; d—Impedance phase response of YX component

扰,矿区中频数据质量相对较差,剩余数据相对较少,从而导致反演模型响应与测量数据的差异。

4.2 反演结果的地质解释

(1) 泥河矿区

泥河矿区电性结构大致以垂直测线方向1.5 km(总长2.2 km)为界,分为西南和东北两部分(图7a)。南西部由浅至深电阻率主要呈现出“低-高-低-高”变化的4组缓倾电性层(图7c),倾向北西。结合钻孔以及地质剖面信息(吴明安等2011;赵文广等,2011;张昆等,2014;图7d),浅表低阻层解释为第四系沉积和杨湾组砂岩地层,浅表纵向低阻体解释为断裂带,下伏高阻层解释为双庙组火山沉积层,火山岩下伏中低阻层解释为受蚀变作用影响的

沉积地层(以砂岩、石英岩为主)。深部高阻层解释为侵入地层的闪长玢岩岩体,矿体赋存于上侵穹隆内,而区内岩体上侵形成的穹隆可分为东、西两组(图7a、b),西部范围相对较小,仅在垂直测线方向0.9 km处有较为清晰的高阻响应,东部穹隆分布较为广泛,走向表现为南北—北北东方向。矿区东北部的闪长玢岩岩体分布范围相对较大,顶深较浅,在中部地区与上覆双庙组火山岩高阻层相连(难以区分,图7b)。

(2) 沙溪矿区

沙溪矿区电性结构大致以测线方向0.5~0.8 km(总长2 km)以西的低阻体为界,分为西北和东南两部分(图8a)。西北部主要表现为陡倾的、低阻带

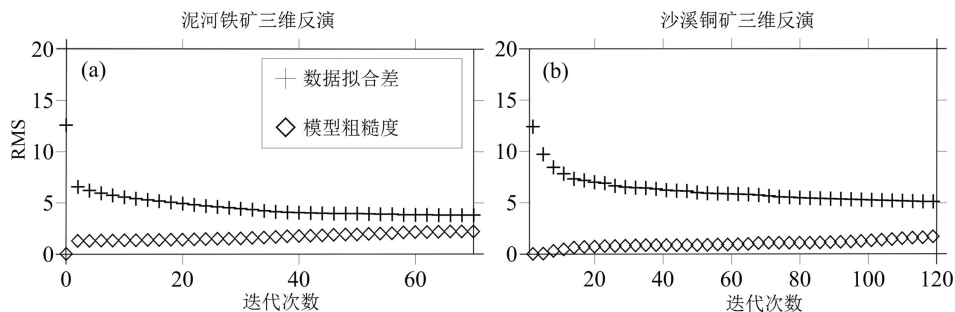


图6 数据拟合差与模型粗糙度

a—泥河矿区均方根误差;b—沙溪矿区均方根误差

Fig.6 RMS for data fitness and model roughness

a—RMS of Nihe mining area; b—RMS of Shaxi mining area

状特征,仅在测区西北角存在浅部、小范围高阻体(图8b),倾向北西。结合钻孔以及地质剖面信息(吕庆田等,2013;图7d),笔者将陡倾低阻带及上覆中等电阻层,解释为白垩系砂岩和志留系泥岩地层,浅部高阻体很可能是侵入地层内的斑岩岩枝的电性响应。在测区中部以及东南部,电性结构主要包括两个较大范围的高阻体和一个低阻盖层。东南部高阻体于700~800 m深度收敛,很可能是侵入的斑岩岩体。中部高阻体垂向延伸大于800 m,并且电阻率值随深度表现出浅高、深低的变化特征(图8c),结合地质剖面(图8d),笔者推测浅部高阻特征为斑岩体的电性反应,而深部的中阻电性体为蚀变带以及铜矿体的电性反应。而且西北侧中—高阻层为志留纪泥岩地层的电性反应。

4.3 典型矿床的电性概念模型

对比图7c和图7d,总体上电性结构,即电阻率的高、中、低及形态,分别与泥河矿区的沉积地层、浅表断裂带、深部侵入岩、蚀变带的深度和分布范围相一致,较好地反映了玢岩铁矿的地质结构。并揭示出一些细节上的岩性和构造变化,如砂岩(含

水)沉积地层、浅色蚀变带、浅部断裂(含水)构造表现为低阻异常(低阻层或低阻带),而火山岩地层、侵入岩体表现为高阻异常,深色蚀变带表现为中等电阻率,(磁铁)矿体表现为高阻异常。

为便于应用,在综合考虑地质模型的基础上,笔者将相对复杂的“玢岩型”铁矿的电性结构模型,简化为简单的概念电性模型(图9),便于快速对比分析(含矿)岩体与围岩的电性差异。该模型显示赋矿的闪长玢岩岩体具有中高电阻率特征,能够通过电性差异与上覆蚀变带区分开来,与成矿作用密切相关的火山岩表现为高阻、层状特征,与高阻侵入岩一并成为磁铁铁矿的找矿标志。

对比图8c和图8d,总体上,沙溪矿区的三维电性结构与矿床的沉积地层、深部侵入岩以及矿体的深度和分布特征基本一致,较好地反映了矿床不同地质体(介质)的地质结构差异。各地质单元的电性特征宏观表现为:砂岩地层表现为低阻异常(低阻层或低阻带),而斑岩岩体表现为高阻异常,含矿化砂岩和含矿岩体表现为中等电阻率。

同样,笔者将相对复杂的斑岩铜矿的电性结构

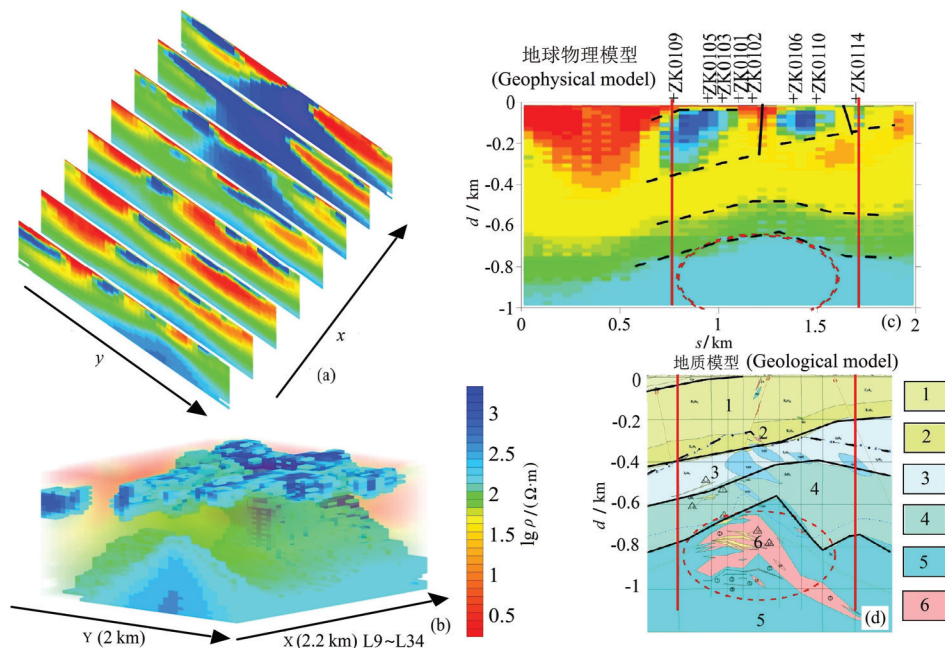


图7 泥河矿区AMT数据三维反演结果及剖面对比(据张昆等,2014)

a—测线方向剖面切片;b—高阻异常体分布示意图;c—矿区中心测线电性模型切片;d—矿区中心测线地质剖面;
1—双庙组上段;2—双庙组下段;3—砖桥组上段;4—砖桥组下段;5—岩体;6—磁铁矿

Fig.7 3-D inversion model of Nihe mining area using AMT data and comparison with geological model (after Zhang et al., 2014)
a—Model slices in line direction; b—High resistivity anomaly map; c—Geophysics model slice of center line; d—Geological profile of center line;
1—Upper Shuangmiao Group; 2—Lower Shuangmiao Group; 3—Upper Zhuanqiao Group; 4—Lower Zhuanqiao Group; 5—Intrusions; 6—Magnetite

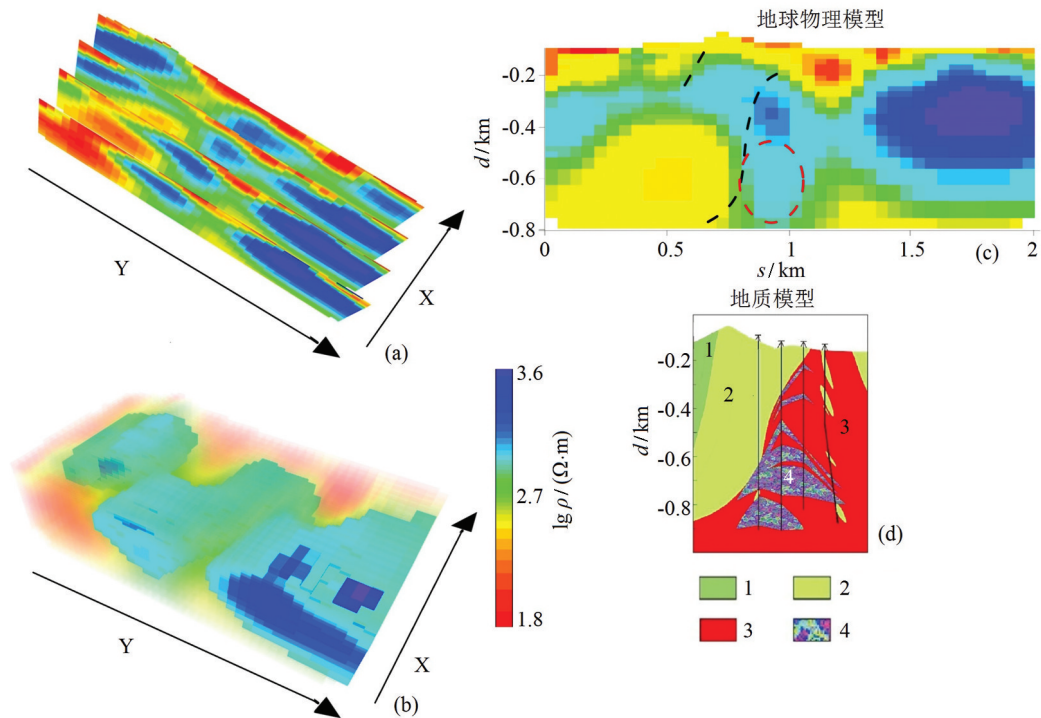


图8 沙溪矿区AMT数据三维反演结果及剖面对比
 a—测线方向剖面切片;b—高阻异常体分布示意图;c—矿区北部测线电性模型切片;d—矿区北部测线地质剖面(据吕庆田等,2013);
 1—侏罗系砂岩;2—志留系泥岩、砂岩;3—闪长斑岩;4—铜矿体

Fig.8 3-D inversion model of Shaxi mining area using AMT data and comparison with geological model
 a—Model slices in line direction; b—High resistivity anomaly map; c—Geophysics model slice of northern line;d—Geological profile of northern line
 (after Lü et al., 2013); 1—Jurassic sandstone; 2—Silurian mudstone and sandstone; 3—Diorite porphyry; 4—Copper orebody

模型简化为易于使用的电性概念模型(图10),便于快速判断地下电性结构是否可能成矿。该模型显示赋矿的斑岩岩体具有中-高电阻率特征,能够通过电性差异与电阻率相对较低的围岩区分开来,铜矿体(含矿岩体)的电阻率相对较低,与高阻斑岩岩体一并成为斑岩铜矿的找矿标志。

庐—枞矿集区典型“玢岩型”铁矿与斑岩型铜矿的电性结构具有明显差异。铁矿床电性结构以层状电性结构(缓倾地层)、深部高阻体(低侵位岩体)岩体与围岩顶界接触带赋矿(穹隆赋矿);而铜矿床电性结构以陡立电性界面(陡倾地层)、浅部/地表高阻体(高侵位岩体)和高阻体内部或一侧存在中阻异常体(两侧接触带赋矿)为特征。

5 结论

基于庐—枞矿集区典型矿床类型的三维音频大地电磁测深数据,笔者获得了典型矿床的三维电

性结构模型。泥河“玢岩型”铁矿的实际电性模型主要包括4个缓倾电性层和1个深部高阻体。缓倾斜电性层,由浅至深依次解释为低阻砂岩地层、高阻火山岩地层、低阻砂岩地层及浅色蚀变带、中阻深色蚀变带,深部高阻体为闪长玢岩岩体,其中岩体上侵的穹隆为赋矿部位。

沙溪斑岩型铜矿的实际电性模型主要包括北东走向的1个低阻带和3个高阻体。分别解释为:西北侧浅部高阻体为斑岩岩枝,东南部高阻体为斑岩岩体,而中部高阻体为含矿的斑岩岩体,其西北侧为中低阻砂岩、泥岩地层。

基于典型矿床的实际电性结构模型,综合考虑矿床地质模型,笔者给出了简化的“玢岩型”铁矿和斑岩型铜矿的电性结构概念模型。前者以层状电性结构、深部高阻体,以及高阻的岩体与围岩接触带为主要特征;后者以陡立电性界面(陡倾地层)、浅部/地表高阻体和高阻体内部(或一侧)存在中阻

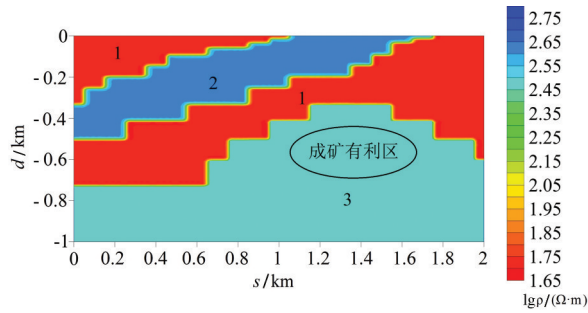


图9 泥河玢岩铁矿的电性概念模型

1—砂岩、蚀变带;2—火山岩;3—玢岩岩体

Fig.9 Conceptual electrical model of Nihe porphyrite iron deposit
1—Sandstone, alteration zone; 2—Volcanic rock; 3—Porphyrite

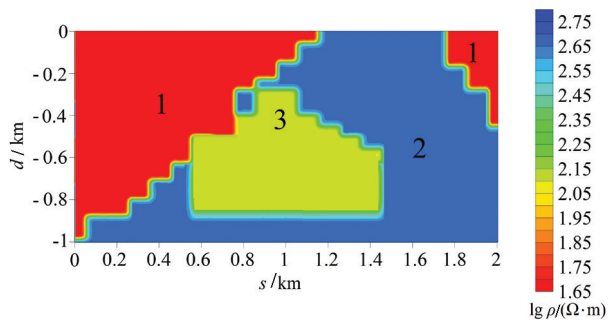


图10 沙溪斑岩铜矿的电性概念模型

1—砂岩、泥岩;2—斑岩岩体;3—矿体、蚀变带

Fig.10 Conceptual electrical model of Shaxi porphyry copper deposit

1—Sandstones and mudstones; 2—Porphyry rocks; 3—Orebody and alteration zone

异常体为主要特征。

致谢:感谢野外工作人员对本文的支持和帮助,感谢专家和编辑对本文的帮助,感谢中国地震局地质研究所博士后阮帅对本文的帮助。

References

- Chang Yinbo, Liu Xuegui. 1983. On strata-bound skarn deposit-taking deposits in the Lower Yangtze Depression in Anhui Province as examples[J]. *Mineral Deposits*, (1):11–20 (in Chinese).
- Chang Yinbo, Liu Xiangpei, Wu Yanchang. 1991. Copper-iron Ore Deposits in Middle to Lower Reaches of Yangtze River Belt[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–379 (in Chinese).
- Chen Leshou, Wang Guange. 1990. Magnetotelluric Method[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–180 (in Chinese).
- Chen X B, Lü Q T, Yan J Y. 2012. 3d electrical structure of porphyry copper deposit: a case study of Shaxi copper deposit[J]. *Applied*

Geophysics, 9(3): 270–278.

- Cheng Yuqi, Chen Yuchuan, Zhao Yiming. 1979. Preliminary discussion on metallogenic series of ore deposits[J]. *Journal of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 1 (1) : 32–58 (in Chinese).
- Cheng Shaohua. 2012. Contrastive Analysis of Different Static Shift Correction Methods in Magnetotelluric (MT) [D]. Xi'an: Chang'an University, (in Chinese with English abstract).
- Lü Qingtian, Wu Ming'an. 2013. Stereo Exploration Technology and Demonstration of Deep Metallogenic Prognosis in Luzong Ore District[R]. China Geology Survey Project (in Chinese with English abstract).
- Lü Qingtian, Wu Ming'an, Tang Jingtian, Zhou Taofa. 2017. Three-Dimensional Exploration and Deep Metallogenic Prognosis in Luzong Ore District, Anhui Province[M]. Beijing: Science Press, 256–330 (in Chinese).
- Ningwu Research Project Team. 1978. Porphyrite Iron Ore of Ningwu[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–190 (in Chinese).
- Mao J W, Wang Y T, Lehmann B, Yu J J, Du A D, Mei Y X, Li Y F, Zhang W S, Stein H J, Zhou T F. 2006. Molybdenite Re–Os and albite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Cu–Au–Mo and magnetite porphyry systems in the Changjiang valley and metallogenic implications[J]. *Ore Geol. Rev.*, 29: 307–324.
- Qin Yongjun, Zeng Jiannian, Zeng Yong, Ma Zhendong, Chen Jinhua, Jin Xi. 2010. Zircon LA–ICP–MS U–Pb dating of ore-bearing pyroxene–trachyandesite porphyry and its geological significance in Luohe–Nihe iron ore field in Luzong basin, southern Anhui, China[J]. *Geological Bulletin of China*. 29(6):851–862 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Jiansheng, Ren Qijiang. 1991a. Spatial distribution pattern of ore-bearing fissures of the Shaxi porphyry copper (gold) deposit, Anhui and its metallogeny[J]. *Journal of Guilin College of Geology*, 11 (4):369–376 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Jiansheng, Ren Qijiang, Xu Zhaowen, Zhang Chongze. 1991b. An investigation on geological–geochemical characteristics of altered rocks in Shaxi porphyry copper (gold) deposit, Anhui Province[J]. *Journal of Nanjing University*, 27(2):344–358 (in Chinese with English abstract).
- Ren Qijiang, Qiu Jiansheng, Xu Zhaowen, Zhang Chongze, Fang Changquan, Yang Rongyong. 1991. Formation conditions of the mineralized stock in the Shaxi porphyry copper (gold) deposit, Anhui Province[J]. *Mineral Deposits*, 10(3): 232–241 (in Chinese with English abstract).
- Wu Mingan, Wang Qingsong, Zheng Guangwen, Cai Xiaobin, Yang Shixue, Di Qinsong. 2011. Discovery of the Nihe iron deposit in Lujiang, Anhui, and its exploration significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 802–809 (in Chinese with English abstract).
- Xu Wenyi, Xu Zhaowen, Gu Lianxing, Ren Qijiang, Fu Bin, Niu

- Cuihui. 1999. Heat evolution from intrusion to mineralization in Shaxi porphyry copper(gold) deposits, Anhui Province[J]. Geological Review, 45(4):361–366 (in Chinese with English abstract).
- Yan Jiayong, Lü Qingtian, Wu Mingan, Chen Xiangbin, Zhang Kun, Qi Guang. 2014. Projecting Indicator of Anhui Shaxi porphyry copper deposit based on regional gravity and magnetic 3D inversion[J]. Acta Geologica Sinica, 88(4), 507–518.
- Zhang K, Wei W B, Lü Q T. 2014. Four changes for efficiency and practicality on previous 3D MT NLCG inversion algorithm[J]. Acta Geodaetica et Geophysica, 49: 551–563.
- Zhang Kun. 2012. Objective Function Fitting Denoising Software For Magnetotelluric Data[P]. Intellectual Property Office of the People's Republic of China. 2012SR109144 (in Chinese).
- Zhang K, Yan J Y, Lü Q T, Wei W B, Wang H F, Zhang Y W. 2016. Correction of magnetotelluric static shift by analysis of 3D forward modeling and measured test data[J]. Explor. Geophys., 47: 100–107.
- Zhang K, Yan J Y, Lü Q T, Zhao J H, Hu H. 2017. Three-dimensional nonlinear conjugate gradient parallel inversion with full information of marine magnetotellurics[J]. Journal of Applied Geophysics, 139: 144–157.
- Zhang Kun, Dong Hao, Yan, Jiayong, Lü Qingtian, Wei Wenbo, He Yuxian. 2013. A NLCG inversion method of magnetotellurics with parallel structure[J]. Chinese J. Geophys, 56(11): 3922–3931 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Kun, Yan Jiayong, Lü Qingtian, Chen Xiangbin. 2015. The electromagnetic exploration experimentation of Nihe porphyry iron ore in Anhui[J]. Acta Geologica Sinica, 88(4), 496–506 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Yusheng, Yao Shuzhen, Lin Xinduo. 1992. Metallogenic Regularity Of Iron, Copper and Gold in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–210 (in Chinese).
- Zhao Wenjin. 2008. Ore prospects and ore exploration methods for metal deposits in the middle and lower Yangtze River valley[J]. Geology in China, 35(5): 771–802 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Wenguang, Wu Mingan, Zhang Yiyong, Wang Keyou, Fan Yu, Wang Longyun, Wei Guohui, Che Yingdan. 2011. Geological characteristics and genesis of the Nihe Fe–S deposit, Lujiang Country, Anhui Province[J]. Acta Geologica Sinica, 85(5): 789–801.
- Zhou Taofa, Fan Yu, Yuan Feng. 2008. Advances on petrogenesis and metallogeny study of the mineralization belt of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River area[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(8):1665–1678 (in Chinese with English abstract).
- 扬子拗陷中一些矿床为例[J]. 矿床地质, 1(1): 11–20.
- 常印佛, 刘相培, 吴昌言. 1991. 长江中下游地区铜铁成矿带[M]. 北京: 地质出版社, 1–379.
- 陈乐寿和王光镔. 1990. 大地电磁测深法[M]. 北京: 地质出版社, 1–180.
- 程裕淇, 陈毓川, 赵一鸣. 1979. 初论矿床的成矿系列问题[J]. 中国地质科学院院报, 1(1): 32–58.
- 程少华. 2012. 大地电磁静态效应校正方法对比研究[D] 西安: 长安大学.
- 吕庆田, 吴明安, 项目研究小组成员. 2013. 庐枞矿集区立体探测技术与深部成矿预测示范[R]. 中国地质调查项目.
- 吕庆田, 吴明安, 汤井田, 周涛发. 2017. 安徽庐枞矿集区三维探测与深部成矿预测[M]. 北京: 科学出版社, 256–330.
- 宁芜研究项目编写组. 1978. 宁芜玢岩铁矿[M]. 北京: 地质出版社.
- 覃永军, 曾键年, 曾勇, 马振东, 陈津华, 金希. 2010. 安徽南部庐枞盆地罗河—泥河铁矿田含矿辉石粗安岩玢岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地质通报, 29(6): 851–862.
- 邱检生, 任启江. 1991a. 安徽沙溪斑岩铜(金)矿床含矿裂隙的空间分布特征及矿床成因[J]. 桂林冶金地质学院学报, 11(4): 369–376.
- 邱检生, 任启江, 徐兆文, 张重泽. 1991b. 安徽沙溪斑岩铜(金)矿床蚀变岩地质地球化学特征研究[J]. 南京大学学报, 27(2): 344–358.
- 任启江, 邱检生, 徐兆文, 张重泽, 方长泉, 杨荣勇. 1991. 安徽沙溪斑岩铜(金)矿床矿化小岩体的形成条件[J]. 矿床地质, 10(3): 232–241.
- 吴明安, 汪青松, 郑光文, 蔡晓兵, 杨世学, 狄勤松. 2011. 安徽庐江泥河铁矿的发现及意义[J]. 地质学报, 85(5): 802–809.
- 徐文艺, 徐兆文, 顾连兴, 任启江, 傅斌, 牛翠祎. 1999. 安徽沙溪斑岩铜(金)矿床成岩成矿热历史探讨[J]. 地质论评, 45(4): 361–366.
- 严加永, 吕庆田, 吴明安, 陈向斌, 张昆, 祁光. 2014. 安徽沙溪铜矿区域重磁三维反演与找矿启示[J]. 地质学报, 88(4): 507–518.
- 张昆. 2012. 大地电磁场目标函数拟合去噪软件[P]. 中华人民共和国知识产权局: 2012SR109144.
- 张昆, 董浩, 严加永, 吕庆田, 魏文博, 何钰娴. 2013. 一种并行的大地电磁场非线性共轭梯度三维反演方法[J]. 地球物理学报, 56(11): 3922–3931
- 张昆, 严加永, 吕庆田, 陈向斌. 2014. 安徽泥河玢岩铁矿电磁法探测试验[J]. 地质学报, 88(4): 496–506.
- 翟裕生, 姚书振, 林新多. 1992. 长江中下游地区铁铜(金)成矿规律[M]. 北京: 地质出版社, 1–210.
- 赵文津. 2008. 长江中下游金属矿找矿前景与找矿方法[J]. 中国地质, 35(5): 771–802.
- 赵文广, 吴明安, 张宜勇, 王克友, 范裕, 汪龙云, 魏国辉, 车英丹. 2011. 安徽省庐江县泥河铁硫矿床地质特征及成因初步分析[J]. 地质学报, 85(5): 789–801.
- 周涛发, 范裕, 袁峰. 2008. 长江中下游成矿带成岩成矿作用研究进展[J]. 岩石学报, 24(8): 1665–1678.

附中文参考文献

常印佛, 刘学圭. 1983. 关于层控式砂卡岩型矿床——以安徽省内下