

doi: 10.12029/gc20190410

王刚, 方慧, 仇根根, 黄继民. 2019. 安庆—贵池矿集区及邻区深部电性结构研究[J]. 中国地质, 46(4): 795–806.

Wang Gang, Fang Hui, Qiu Gengen, Huang Jimin. 2019. The deep electrical structure across Anqing–Guichi ore concentration area[J]. Geology in China, 46(4): 795–806(in Chinese with English abstract).

## 安庆—贵池矿集区及邻区深部电性结构研究

王刚<sup>1</sup>, 方慧<sup>1</sup>, 仇根根<sup>1</sup>, 黄继民<sup>2</sup>

(1. 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; 2. 武警黄金第三支队, 黑龙江 哈尔滨 150006)

**摘要:** 长江中下游地区经历了多期次的地质构造演化具有丰富的矿产资源, 对重要矿集区及其邻区的深部电性结构进行研究具有重要意义。通过对穿过安庆—贵池矿集区的一条宽频带大地电磁测深长剖面数据进行分频段以及分区反演, 构建了覆盖大别造山带至下扬子地块东缘的二维电性结构模型。发现矿集区的深部电性结构与邻区的构造单元具有显著差异, 大别造山带和江南隆起带与浙赣凹陷之间的地壳整体表现为高阻特征, 而下扬子拗陷和江南隆起带之间存在岩石圈上地幔尺度的高导电异常体并且与地壳浅部的高导体相连。安庆—贵池矿集区的成矿机制主要为燕山期陆内俯冲以及早白垩时期的伸展作用, 矿集区下地壳加厚、拆沉和上地壳丰富的断裂系统起到了重要的控矿作用。

**关键词:** 长江中下游成矿带; 安庆—贵池矿集区; 大地电磁测深; 壳幔电性结构

**中图分类号:** P631.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2019) 04-0795-12

## The deep electrical structure across Anqing–Guichi ore concentration area

WANG Gang<sup>1</sup>, FANG Hui<sup>1</sup>, QIU Gengen<sup>1</sup>, HUANG Jimin<sup>2</sup>

(1. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, Hebei, China; 2. No.3 Gold Geological Party, CAPF, Harbin 150006, Heilongjiang, China)

**Abstract:** The middle and lower reaches of the Yangtze River have experienced multiple stages of geological evolution and are rich in mineral resources. In this paper, a two-dimensional electrical structure model covering the Dabie orogenic belt and the Lower Yangtze block was constructed by inverting a long magnetotelluric profile passing through the Anqing–Guichi ore concentration area by sub-band and sub-segment inversion scheme. According to the obtained electrical structure, the lithospheric structure beneath the ore concentration area is significantly different from that of the adjacent areas. Both the crusts under Dabie orogenic belt and between Jiangnan uplift belt and Zhegan depression are characterized by high resistivity, while the lithospheric upper mantle between Lower Yangtze depression and Jiangnan uplift belt is electrically conductive with a deep conductor extending upward to the conductors in the upper crust. The metallogenic mechanism of Anqing–Guichi ore concentration area was mainly the Yanshanian

收稿日期: 2019-03-18; 改回日期: 2019-06-11

**基金项目:** 国家自然科学基金项目“江南造山带东段岩石圈三维电性结构研究”(41574068)、国家重点研发计划项目“华南北段地壳三维电性结构探测研究”(2016YFC0600201)、中国地质调查局地质调查项目“钦杭结合带及邻区深部地质调查”(121201108000160913, DD201682, DD20190012)“武夷山成矿带区域大地电磁测深”(12120114005801)、中国地质科学院基本科研业务费项目“江南造山带东段岩石圈结构的震学成像研究”(AS2017J05)联合资助。

**作者简介:** 王刚, 男, 1990年生, 博士, 工程师, 主要从事电磁法研究; E-mail: wanggang01@igge.cn。

intra-continental subduction and the early Cretaceous extension deformation. The thickening and sinking of the lower crust and the abundant fault system in the upper crust underneath the ore concentration area may have played an important role in mineralization.

**Keywords:** middle and lower reaches of the Yangtze River; Anqing-Guichi ore concentration area; magnetotelluric; electric structure

**About the first author:** WANG Gang, male, born in 1990, doctor, engages in research on tectonics and geophysical exploration; E-mail: wanggang01@igge.cn.

**Fund support:** National Natural Science Foundation (No. 41574068); National Key Research and Development Program (No. 2016YFC0600201), Geological Survey Project (No. 121201108000160913, DD201682, DD20190012, 12120114005801), Basic Scientific Research Project of Chinese Academy of Geological Sciences (No. AS2017J05).

## 1 引 言

长江中下游多金属成矿带(图1)是中国大规模成岩成矿作用的代表区域,从晚中元古代华南板块的形成到晚中生代广泛的伸展作用和岩浆活动,长江中下游地区经历了多期次构造演化(Li and Li, 2007; Wang et al., 2007; 舒良树, 2012; Zhao and Cawood, 2012; 张国伟等, 2013; Charvet, 2013; 吕庆田等, 2014; Yao et al., 2016; Lin et al., 2018),在如此狭窄的空间内从西到东分布着鄂东南、九瑞、安庆—贵池、庐枞、铜陵、宁芜以及宁镇共7个大型矿集区。虽然国内外学者对该区的成岩成矿作用,特别是与长江中下游成矿带密切相关的燕山期构造—岩浆活动进行了大量工作,但是对成矿的深部机制依然存有广泛争议。有些观点认为是古太平洋板块的俯冲(Zhou and Li, 2000; Li and Li, 2007);有的观点支持印支期碰撞造山后的伸展和崩塌作用(王国灿等, 1998; 许长海等, 2001);有的认为与洋脊俯冲有关(Ling et al., 2009);还有的认为与岩石圈拆沉和软流圈物质上涌有关(Deng et al., 1994; Zhang et al., 2009; Zhang, 2013)。岩石圈的结构和物质组成记录着地球动力学演化过程留下的信息,为了探索长江中下游成矿带的深部结构和物质状态,不同学者在长江中下游地区取得了大量的地震、电磁和重磁成果(Chen et al., 2012; 史大年等, 2012; 祁光等, 2012, 2014; Lü et al., 2013; Tang et al., 2013; 胡英才等, 2014; Ouyang et al., 2014; 肖晓等, 2014; 汤井田等, 2014; 严加永等, 2014a; 严加永等, 2014b; Jiang et al., 2015; Lü et al., 2015; 吕庆田等, 2015a; 王显莹等, 2015; 严加永等, 2015; 张明辉等, 2015),这对认识中国东部的陆内成矿规律具有重要科学意

义。然而目前的研究大多局限在矿集区或矿床内部(Chen et al., 2012; Tang et al., 2013; 肖晓等, 2014; ; 严加永等, 2014b; 吕庆田等, 2015a; 邵陆森等, 2015; 严加永等, 2015),得到的典型矿集区三维结构模型和区域成矿模式缺乏来自一级大地构造单元深部信息的约束。“廊带”式的综合探测长剖面只有北带穿过了宁芜矿集区,南带未经过重要的矿集区(史大年等, 2012; 王显莹等, 2015; 张明辉等, 2015; Lü et al., 2015; 吕庆田等, 2015a),长江中下游成矿带的各矿集区虽然同处于相似的大地构造背景,但相互之间的成矿作用可能存在差异。区域性的地震和重磁探测结果分辨率较低(Ouyang et al., 2014; Jiang et al., 2015; Guo and Gao, 2018; Li et al., 2018),不能对成岩成矿作用进行精细约束。因此,对该区域成矿作用的深部机制研究需要综合深部的大尺度探测结果和浅部的精细结构。相对于长江中下游成矿带的其他矿集区,对安庆—贵池矿集区的深部地球物理探测工作总体较少。大地电磁测深法(MT)具有探测深度范围大、不受高阻层屏蔽并且对高导体反应灵敏的特点,是研究地球深部结构和物质状态的有效方法。本文选取一段从大别造山带穿过安庆—贵池矿集区到达扬子板块东缘的大地电磁测深剖面,通过分频段、分区段的二维反演策略得到安庆—贵池矿集区及邻区的深部电性结构模型,由深及浅分析安庆—贵池矿集区的成矿深部机制。

## 2 地质与地球物理背景

### 2.1 地质构造背景

长江中下游成矿带位于华南板块的东北缘,华南板块由太古宙—新元古代的扬子板块和古元古

一新元古代的华夏板块在新元古代拼接形成(Shu and Charvet, 1996; Wang et al., 2004; Zheng and Zhang, 2007; Li et al., 2009; Shu, 2012; Zhao and Cawood, 2012; Zhang et al., 2013; Yao et al., 2016; Zhao, 2016)。新元古代末期华南板块发生了伸展裂谷事件形成了南华裂谷盆地(Shu, 2012; Zhao and Cawood, 2012; Zhang et al., 2013),该裂谷随后被早古生代的武夷—云开陆内造山运动闭合(Faure et al., 2009; Shu et al., 2014)。早中生代华南与华北板块沿着秦岭—大别造山带碰撞拼合,雪峰山—九岭陆内造山运动标志着华南板块最终格架的形成(Chu and Lin, 2014; Song et al., 2015)。华南板块自形成以来发生的多期剧烈升降运动在长江中下游成矿带地区形成了多个平行不整合的重要控矿层(徐文艺等, 2004; 吕庆田等, 2014),如加里东运动的隆升造成中、下泥盆统缺失,海西期的沉积形成了上泥盆统一下三叠统碎屑岩,印支期区域沉积环境从海洋到大陆的重大变化(常印佛等, 1996)。安庆—贵池矿集区内除侏罗纪地层外其他地层均有出露,中生代后期区域构造环境从挤压到伸展的转换导致了广泛的岩浆活动(Li and Li, 2007),形成了长江中下游地区隆拗相间的构造格局(吕庆田等, 2014; 张岳桥等, 2009),区域构造主体走向约为北东向。矿集区内的中生代侵入岩发育,分布有大型花岗岩岩基和大量与成矿作用关系密切的小型岩株(绍陆森等, 2015)。

## 2.2 地球物理背景

长江中下游成矿带的区域地球物理探测结果

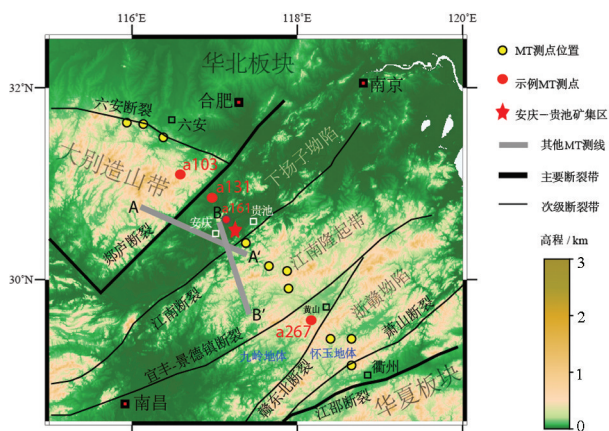


图1 地质构造图和测点分布(背景图通过GMT绘制)  
Fig.1 The geological structure and distribution of MT sites  
(background plotted by GMT)

表明该区域的岩石圈速度结构明显有别于两侧的华北板块和扬子板块。远震层析成像和背景噪声成像发现长江中下游成矿带下方100~200 km深度存在明显的低速体(Ouyang et al., 2014; Jiang et al., 2015)。接收函数研究表明该区域的Moho具有明显的幔隆特征,并且下地壳和上地幔表现出各向异性(Shi et al., 2013)。深反射地震观测结果发现该区域的地壳结构呈现出拆离模式,上地壳主要是大量的褶皱和逆冲推覆构造,而下地壳主要为俯冲构造(Lü et al., 2015; 吕庆田等, 2015b)。穿过长江中下游成矿带的大地电磁测深研究发现,矿集区的下地壳存在明显的高导电异常体,郟庐断裂和江南断裂等巨型断裂对区域成矿作用产生了重要的影响(王显莹等, 2015)。在安庆—贵池矿集区,反射地震和大地电磁测深研究结果表明矿集区内的上、中地壳以及中、下地壳之间存在滑脱面(绍陆森等, 2015)。

## 3 数据及分析

### 3.1 数据采集与分析

为了探测长江中下游成矿带的深部结构和物质组成,分析深层动力过程与成矿作用之间的关系,“重要成矿区带地球物理深部探测研究与示范”项目在2008—2010年采集的大地电磁测深数据基本均匀覆盖了长江中下游成矿带及其邻区。本文依托该项目选取一条穿过安庆—贵池矿集区的大地电磁测深剖面,北起六安断裂向南依次穿过大别造山带、郟庐断裂、江南断裂,直到扬子板块的南缘江绍断裂带,剖面长度约为380 km,共有17个测点。远参考处理后得到MT阻抗张量信息,得到的视电阻率和相位曲线较为连续,大部分测点的有效周期范围在0.003~3000 s,只有个别测点的数据存在较大干扰。本文在数据分析和反演前已经删除了数据质量较差的测点和频点,实际用于反演的测点为14个。由研究区域典型测点的视电阻率和相位曲线形态可以发现长江中下游地区的地下电阻率明显低于两侧地块的电阻率(图2)。

### 3.2 维性分析

本文选择受畸变效应影响较小的Bahr二维偏离度(Bahr, 1991)对MT数据进行维性分析(图3),一般认为二维偏离度的值为0时MT数据符合理想的

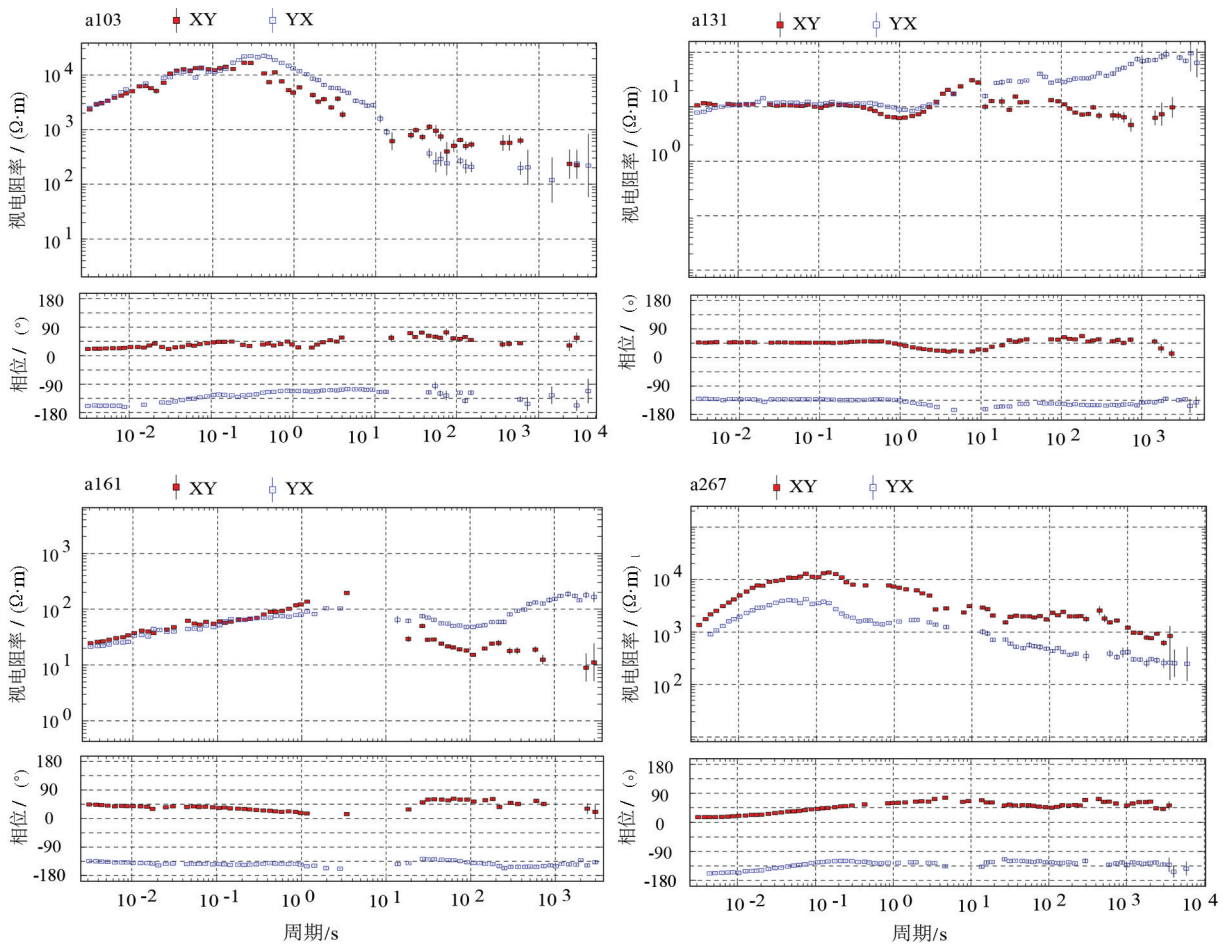


图2 典型测点的视电阻率和相位曲线(点位见图1)

Fig. 2 Typical curves of apparent resistivity and phase (The sites are marked as a103, a131, a161 and a267 respectively in Fig. 1)

二维性;当二维偏离度小于0.3时MT数据近似符合二维情况;二维偏离度越大MT数据的三维性越强(张乐天等, 2012)。从二维偏离度的分布中可以发现,研究区域的MT数据整体上符合二维性特征,只有部分测点的数据在1 s或3000 s出现较强的三维性。

### 3.3 电性主轴分析

对于理想的二维地质构造,当选取的坐标系X轴方向与构造走向方向一致时,MT数据可以被分解成相互独立的TE模式和TM模式。然而,实际采集数据的过程中很难完全沿着区域构造走向方向进行,所以进行二维反演之前必须对数据进行区域构造走向分析,然后将MT阻抗张量数据旋转至构造走向(陈小斌等, 2008)。本文对MT数据的电性主轴分析采用了多点、多频段的阻抗张量GB分解(Groom and Bailey, 1989; McNeice and Jones,

2001)。在电性主轴分析中,考虑到对整条剖面全部数据进行统计得到的单一玫瑰图会忽视不同频段范围和不同区块内部结构的差异,本文以江南断裂为界将剖面分为西北侧和东南侧两段,分别进行了全部剖面数据的统计分析(图4a),分区块的统计分析(图4b,4c)以及分频段和分区块的统计分析(图5)。从分区块的统计分析可以发现,剖面西北侧和东南侧的电性主轴方位存在较大差别(图4),如果只分析全部剖面数据的电性主轴方位,将会得到不可靠的结果。结合地表的地质构造特征,从分频段+分区块的统计分析可以发现剖面西北侧数据的电性主轴方位角在频段0.1~3000 s内为NE10°~NE30°,剖面东南侧数据电性主轴方位角在频段0.1~1 s内为约NE5°,在频段1~3000 s内为NE75°。研究区域地质构造较为复杂,为了得到研究区域较为准确的电性主轴方位角,本文将采用分频段+分

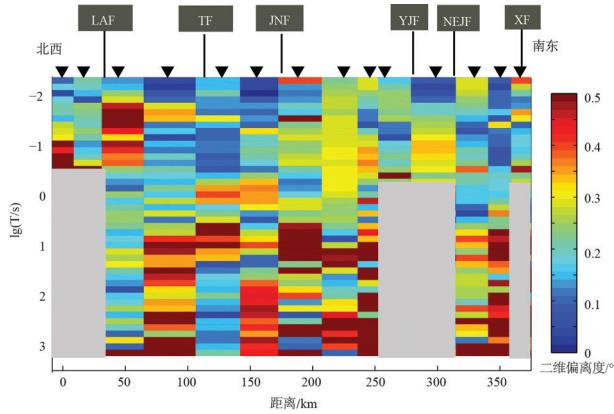


图3 沿剖面的Bahr二维偏离度分布图  
(图中阴影区域表示该频段范围的数据较差而不适于维性分析;  
LAF—六安断裂;TF—庐庐断裂;JNF—江南断裂;YJF—宜丰—景  
德镇断裂;NEJF—赣东北断裂;XF—萧山断裂;JSF—江绍断裂)  
Fig.3 Bahr skew along the profile  
(The shadow area denotes that those frequency points have been  
removed. LAF—Liu'an fault; TF—Tanlu fault; JNF—Jiangnan fault;  
YJF—Yifeng—Jingdezhen fault; NEJF—Northeastern Jiangxi fault;  
XF—Xiaoshan fault; JSF—Jiangshao fault)

区段的统计结果。确定研究区域的电性主轴方位角还需要考虑与测线展布方位之间的角度,为了保证所选极化模式的正确性,选取的主轴方位角与测线展布方位的夹角应大于 $45^\circ$ (郭春玲等, 2018), 本文的测线展布方位角为 $NE120^\circ$ , 考虑到旋转角度小于 $30^\circ$ 对反演结果的影响不大(陈小斌等, 2008), 将

剖面西北侧数据的主轴方位角设定为 $NE25^\circ$ , 东南侧数据的主轴方位角在频段 $0.1\sim 1\text{ s}$ 内设定为 $NE25^\circ$ , 在频段 $1\sim 3000\text{ s}$ 内设定为 $NE75^\circ$ 。

## 4 反演

### 4.1 数据反演

在理想二维情况下,  $TE+TM$ 联合反演的模式能够得到最佳的反演结果。然而 $TE$ 模式数据对地下介质的二维性要求较为严格, 只有高导异常体的走向、倾向长度比达到 $10:1$ 或高阻体的走向、倾向长度比达到 $3:1$ 时,  $TE$ 模式的电阻率和相位数据才能用来进行二维反演(蔡军涛等, 2010)。由于两种极化模式中的相位数据受到的畸变影响较小, 在数据编辑的过程中将重点放在对相位的编辑上, 即将视电阻率的误差设置为较大的值(蔡军涛等, 2010)。本文选择采用非线性共轭梯度反演方法进行数据反演(Rodi and Mackie, 2001), 其反演主要依靠 $TM$ 模式的数据, 将 $TM$ 模式的视电阻率误差设为 $15\%$ , 相位误差设为 $10\%$ ;  $TE$ 模式的视电阻率误差设为 $100\%$ , 相位误差设为 $80\%$ 。正则化因子 $\tau$ 设为 $7$ , 反演过程采用的数据频段范围是 $0.01\sim 3000\text{ s}$ , 每个级数内有 $6$ 个频点, 初始模型设为 $100\ \Omega\cdot\text{m}$ 的均匀半空间, 模型的网格剖分在水平方向上保证了相邻测点之间的至少有 $1\sim 2$ 个网格, 网格大小约为 $10\text{ km}$ 。

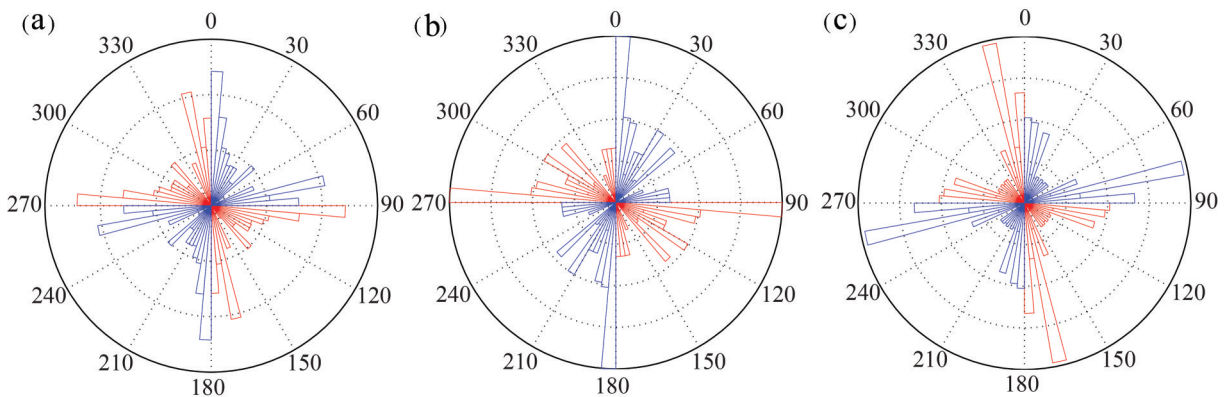


图4 全剖面与分区段电性主轴分析结果的差异  
a—全剖面数据在 $0.1\sim 3000\text{ s}$ 频段的统计结果; b—江南断裂西北侧数据在 $0.1\sim 3000\text{ s}$ 频段的统计结果;  
c—江南断裂东南侧数据在 $0.1\sim 3000\text{ s}$ 频段的统计结果

Fig.4 The difference of strike analysis results between the whole profile and subsections  
a—The whole MT profile in  $0.1\sim 3000\text{ s}$ , b—MT sites on the northwestern side of Jiangnan fault in  $0.1\sim 3000\text{ s}$ ,  
c—MT sites on the southeastern side of Jiangnan fault in  $0.1\sim 3000\text{ s}$

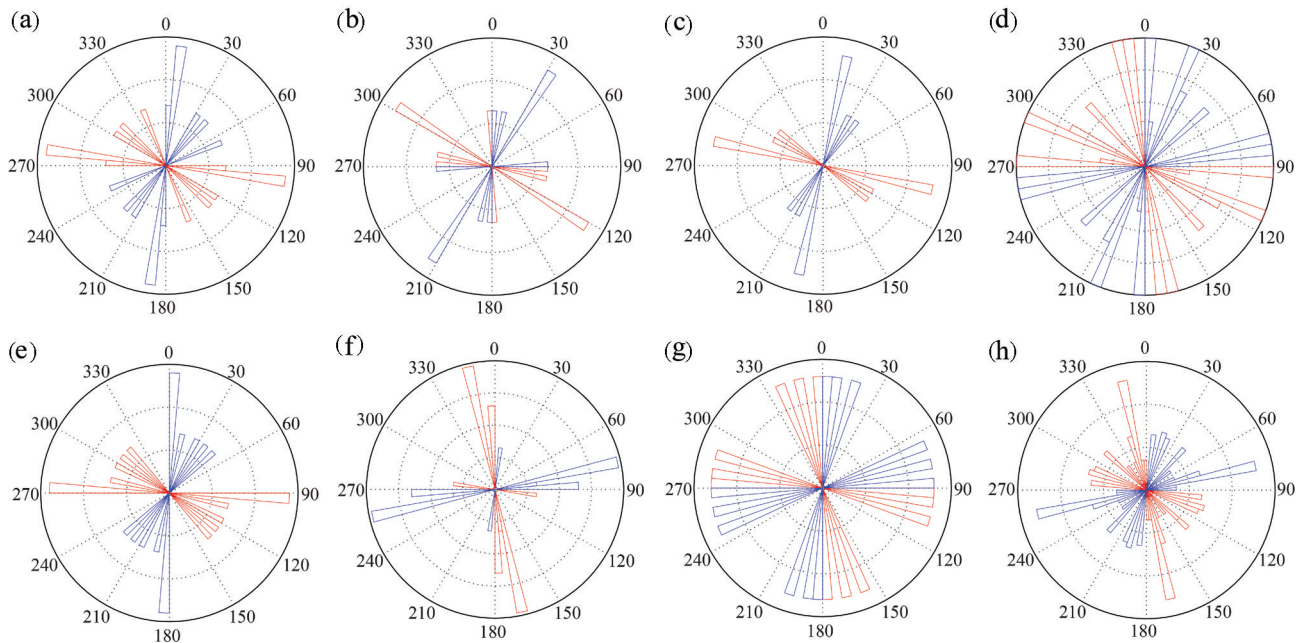


图5 江南断裂西北侧(a~d)和东南侧(e~h)数据分别在0.1~1 s、1~10 s、10~100 s、100~3000s频段的统计结果  
 Fig.5 Strike analysis results for MT sites on the northwestern side of Jiangnan fault (a~d) and the southeastern side of Jiangnan fault (e~h) in 0.1~1 s, 1~10 s, 10~100 s, 100~3000 s, respectively

根据上述的电性主轴分析结果,考虑到研究区域经历了多期次的构造岩浆活动,不同构造单元之间以及不同频段之间的区域电性主轴方向不一致。面对这样的情况,相关学者提出了分频段、分区段反演的策略,即在分频段反演中先做低频段数据的反演,在分区段的反演中先做二维性不显著一侧的反演,该反演策略通过理论和实践测试表现出较好的效果(郭春玲等,2018)。为了对比分区段反演和分频段+分区段反演的效果,在分区段反演中首先对西北侧数据在0.1~3000 s频段内以NE25°为主轴方位角进行反演,同时将东南侧数据的误差设置为100%使该段数据不参与反演,以此反演结果(图6a)作为初始模型对东南侧数据在0.1~3000 s频段内以NE75°为主轴方位角进行反演,同时将西北侧数据的误差设置为100%使其不参与反演,最终得到分区段反演的电性结构模型(图6b);在分频段+分区段反演中首先对西北侧数据在1~3000 s频段内以NE25°为主轴方位角进行反演,同时将东南侧数据的数据误差设置为100%使得该段数据不参与反演,以此反演结果(图6c)作为初始模型对东南侧数据在1~3000 s频段内以NE75°为主轴方位角进行反

演,同时将西北侧数据的误差设置为100%使其不参与反演,将本轮反演结果(图6d)作为初始模型,继续对全剖面数据在0.1~1 s频段内以NE25°为主轴方位角进行反演得到最终的反演结果(图6e),最终反演结果的拟合差为2.2。

#### 4.2 反演结果

分区段反演结果中,先进行剖面西北侧数据的反演再进行剖面东南侧数据的反演后,郟庐断裂西北侧的电性结构消失(图6a,6b),而分频段+分区段的最终反演结果(图6e)与各流程得到的反演结果(图6a~6d)在整体上相似,共得到了5个高导体C1~C5和4个高阻体R1~R4,并且浅部的电性结构呈现的更精细。存在差别的地方是剖面东南部测点a267下方的高阻体R4在深度方向分布范围较大,高导体C5在深度方向和水平方向的分布范围较大,高导体C2的下方出现了高导体C6。a103号测点附近数据可用于反演的最长周期达到了3000 s左右(图2),根据平面波场在均匀各向同性介质中的穿透深度表达式,天然场源信号的穿透深度随周期和电阻率的增大而增大,a103号测点下方的浅部地壳具有高阻特征并且厚度较大,所以MT数据能够

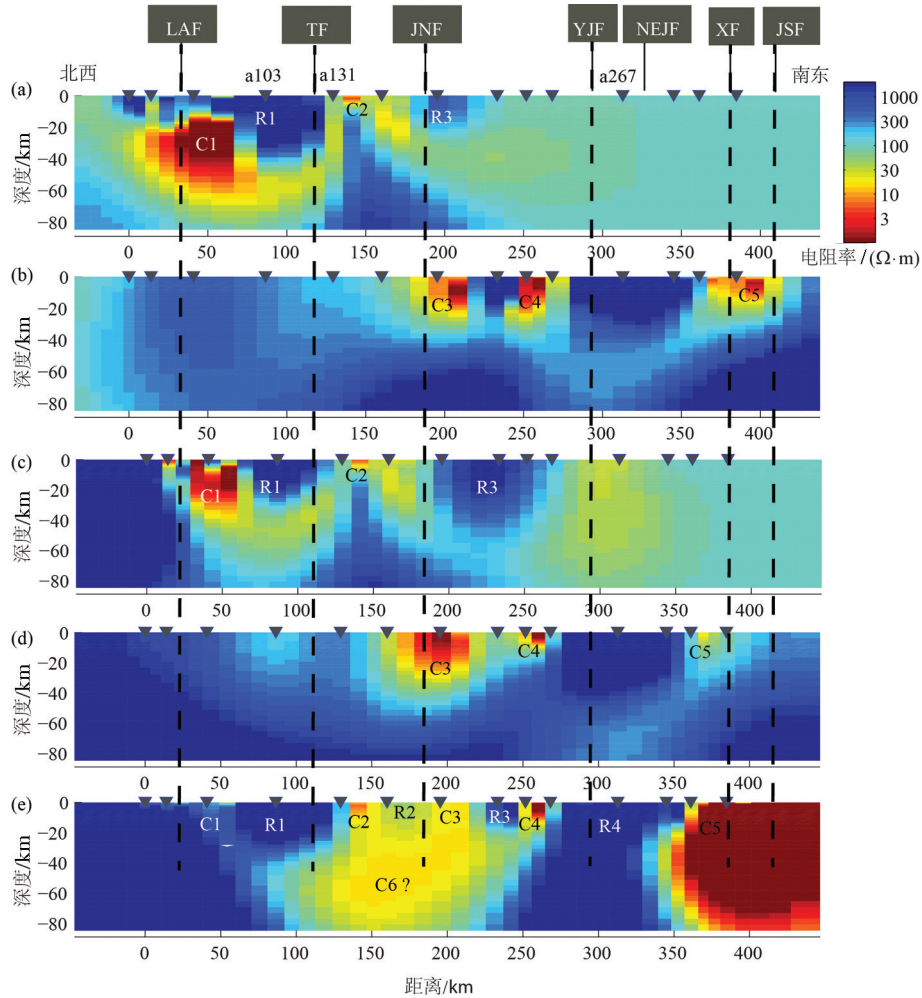


图6 不同反演策略的结果

LAF—六安断裂; TF—庐庐断裂; JNF—江南断裂; YJF—宜丰—景德镇断裂; NEJF—赣东北断裂; XF—萧山断裂; JSF—江绍断裂

Fig.6 Inversion results of different strategies

LAF—Liu'an fault; TF—Tanlu fault; JNF—Jiangnan fault; YJF—Yifeng—Jingdezhen fault; NEJF—Northeastern Jiangxi fault; XF—Xiaoshan fault; JSF—Jiangshao fault

探测到较深的地壳结构,即导体C1在水平方向和深度方向的分布范围是可靠的。然而,高导体C5附近数据可用于反演的最长周期仅为10 s,并且高导体位于剖面的边界,缺乏数据约束,所以结合电性结构模型(图6b,6d)和其他地球物理观测结果(王显莹等,2015)对高导体C5在水平方向和深度方向的范围进行了约束(图7)。高导体C6上方a131号测点附近的数据可用于反演的最长周期均达到3000 s左右,结合其他地球物理研究结果(吕庆田等,2015b;王显莹等,2015)高导体C6的底部深度至少达到了50 km。高阻体R4上方a267测点附近数据可用于反演的最长周期也都达到了3000 s左右,这些数据能够有效约束高阻体R4的深度。通过与该

区临近的其他MT剖面(王显莹等,2015)反演结果进行对比,发现大部分的电性结构都是一致的。存在差异的地方是,本文的反演结果中高导体C2的下方并没有出现明显的高阻体(图7),这可能是由于两条剖面的布设方位角不同或者是选取的区域电性主轴方位角不同导致的。

电性结构模型从北向南可以被庐庐断裂带、宜丰—景德镇断裂和赣东北断裂带划分为四段,即地壳电性结构整体为高阻的大别造山带,高导电的下扬子拗陷和江南隆起带北部,高阻的江南隆起带南部和浙赣拗陷北部,以及高导电的浙赣拗陷南部。在深度方向上,大别造山带、江南隆起带南部和浙赣拗陷北部的地下结构可以分为地壳和上地幔两

个部分,而下扬子拗陷和江南隆起带的地下结构比较特殊,可以分为中上地壳、下地壳和上地幔三个部分。这与反射地震观测结果(Lü et al., 2015; 吕庆田等, 2015b)是一致的,即长江中下游成矿带及其邻区的地壳可以分为逆冲推腹构造密集分布的上地壳,中、下地壳则存在深达Moho面的俯冲构造(图7)。中、下地壳之间脆性到韧性的转换界面约为21 km,对应于地壳内部刚性强度最小并且物质处于塑性流动状态的深度(吕庆田等, 2015)。考虑到长江中下游成矿带及其邻区的地壳结构较为复杂,如江南断裂带在上地壳倾向南东,而下地壳深度的俯冲构造是倾向北西的,所以本文依据电性结构模型只画出了断裂带的中下地壳深度范围。首先,大别造山带北部的六安断裂下方存在一个电性梯度带向下延伸至超过40 km的深度(图7),与六安断裂实际的南西倾向一致。六安断裂带呈现为连接地壳浅部高导体C1与深部高导体C6的通道。高导体C1的分布范围较为狭窄,浅表的高电导区域可能为六安断裂附近地槽中分布的沉积层。分布在大别造山带内的高阻体R1厚度约为30 km,郟庐断裂带深部的电性梯度带倾向北东,向下延伸超过40 km。在下扬子拗陷和江南隆起带内部,高导体C2、C3和C4分别被高阻体R2、R3隔开,高阻体厚度为10~15 km。江南断裂的上地壳电性梯度带位于高阻体R2与高导体C3之间,而中下地壳深度的电性梯度带向下延伸到C6的位置。下地壳和岩石圈上地幔深度的高导体C6顶界面深度为30 km左右,高导体C6向上与高导体C2、C3和C4存在相连的趋势。江南隆起带与浙赣拗陷之间的高阻体R4底界面深度约为30 km,高阻体R4两侧的电性梯度带分别对应于北西倾向的宜丰—景德镇断裂和南东倾向的赣东北断裂。沿剖面继续向东,浙赣拗陷南部萧山断裂带下方的电性梯度带倾向北西,向下延伸至30 km左右。

## 5 讨 论

### 5.1 壳幔电性结构特征

安庆—贵池矿集区及其邻区的电性结构横向分区、纵向分层的特征明显,特别是在下扬子拗陷和江南隆起带之间上地幔尺度的高导体C6呈现出与邻区明显的差异(图7)。反射地震观测结果表明高导体C6附近的上、中地壳变形特征主要为剧烈的

逆冲推覆构造,与下地壳大尺度的俯冲构造形成地壳拆离模式,这可能与燕山期的陆内造山挤压有关(吕庆田等, 2015b)。电性结构模型中的高导体C2和C3应为中、下地壳之间滑脱面产生的部分熔融体,在早白垩世的伸展变形阶段上地壳一系列逆冲断裂反转为正断层,其导电性被进一步增强,这与高导体C2和C3附近较弱的中地壳反射特征一致(吕庆田等, 2015b)。而将高导体C2与C3隔开的高阻体R2可能是由于前期挤压增厚的下地壳在伸展变形阶段发生拆沉,产生了强烈的岩浆活动,然后深部岩浆沿着断裂通道向上运移至地壳浅部冷凝形成岩浆房。研究表明安庆—贵池矿集区附近通过伸展作用形成的超壳正断层切穿了挤压造山阶段的中下地壳俯冲构造,这为岩浆向上运移提供了通道(Lü et al., 2015)。总体上,安庆—贵池矿集区及其邻区的Moho深度变化平缓,分布在30~34.5 km(吕庆田等, 2015b; 吴珊珊等, 2018),但在局部区域如江南断裂带下方仍有Moho错断。安庆—贵池矿集区下方的俯冲构造痕迹在Moho之上较为清晰(吕庆田等, 2014; 吕庆田等, 2015b),在穿过宁芜矿集区的反射地震长剖面中俯冲构造痕迹的最深处甚至穿过Moho达到了45 km。结合安庆—贵池矿集区附近的反射地震剖面和本文的电性结构模型,深部高导体C6通过Moho错断的位置向上与地壳浅部的一系列高导体C2、C3、C4相连,安庆—贵池矿集区下地壳在挤压造山阶段形成的俯冲痕迹已经被深部岩浆活动改造和破坏,而俯冲痕迹在Moho之上的部分仍然存在,深部岩浆可能沿着这些俯冲构造或者切穿这些俯冲构造的正断层向上运移。

燕山期陆内造山的影响范围不限于长江中下游成矿带内,在华南板块不同地体之间也发生了大范围的挤压变形,然而增厚下地壳拆沉只发生在长江中下游成矿带内而没有出现在邻区的其他位置,这需要进一步分析邻区其他构造单元的电性结构特征和地质成因。首先在安庆—贵池矿集区西侧的大别造山带内,高阻体R1被六安断裂和郟庐断裂夹持,表现出明显的“高阻山根”特征。二叠纪末华北板块向大别山刚性古地块俯冲,大别山南缘向南逆冲,这个构造演化过程可能是造成大别山造山带下方形成高阻山根的原因(董树文等, 2011)。东侧的高阻体R3则属于江南隆起带的高阻上地壳,被深



部岩浆向上运移形成的高导体C4侵蚀。江南隆起带与浙赣坳陷之间壳幔尺度的高阻体R4对应于赣东北断裂西北侧的九岭地体,其在水平方向和深度方向的分布范围与大别造山带相当,结合地球化学研究结果(Lin et al., 2018),高阻的九岭地体应该是从850 Ma前就已经存在的弧后系统。高导体C5所在的怀玉地体从469 Ma前,先后经历了武夷—云开造山、晚古生代裂谷事件和中生代江绍断裂带的走滑等多期次构造活动(Lin et al., 2018),区域内形成了丰富的断裂体系,中生代之后的伸展作用将前期断裂系统内填充了相互连通的导电物质从而使怀玉地体整体表现出高导电特征。通过对比可以发现,安庆—贵池矿集区处于大别造山带和九岭地体这两个高阻、刚性的古老地体之间,燕山期古太平洋板块挤压应力的远程效应在长江中下游成矿带及其邻区体现为,九岭地体及江南隆起带沿着北西方向挤推下扬子坳陷,而刚性的大别造山带对下扬子坳陷起到了阻挡的作用。反射地震研究发现下扬子坳陷靠近大别造山带的前缘区域,中下地壳存在南东倾向的俯冲构造(吕庆田等, 2015b),这与江南断裂附近北西倾向的中下地壳俯冲构造形成了对冲(图7),使安庆—贵池矿集区的下地壳相比于邻区明显增厚,从而在后期的伸展作用下发生拆沉

和强烈的岩浆活动。

## 5.2 成矿机制

安庆—贵池矿集区及其邻区电性结构模型中(图7),深部高导体C6向上与地壳浅部高导体相连的特征支持多期次MASH(熔融—同化—储存—均质化)或多层岩浆房系统的成矿模式(Lü et al., 2013)。高导体C6对应于地壳底部的岩浆累积,当温、压条件达到一定程度时地壳底部岩浆向上运移到脆性—韧性转换带进行新的MASH过程,然后岩浆继续上升到地壳浅部形成深成岩体储集成矿或喷出地表形成火成岩。电性结构模型中的高阻体R2对应于中上地壳形成的深成岩体和火成岩,其底界面深度对应于脆性—韧性转换带,这与反射地震结果发现的中下地壳反射体一致,代表岩浆固化形成的火成岩(Lü et al., 2013)。然而,在长江中下游成矿带如此狭窄的区域内,其南北两侧的岩浆岩带缺乏成矿作用。电性结构模型中的深部高导体C6位于安庆—贵池矿集区的正下方,这表明深部岩浆在向上运移到边缘区域的过程中需要经过更远的距离,富含成矿元素的岩浆逐渐因为更多壳源物质的加入而被稀释。另外,由于挤压变形产生的滑脱、推覆、俯冲构造以及伸展作用产生的正断层对矿床的局部化富集具有重要控制作用,成矿带南北

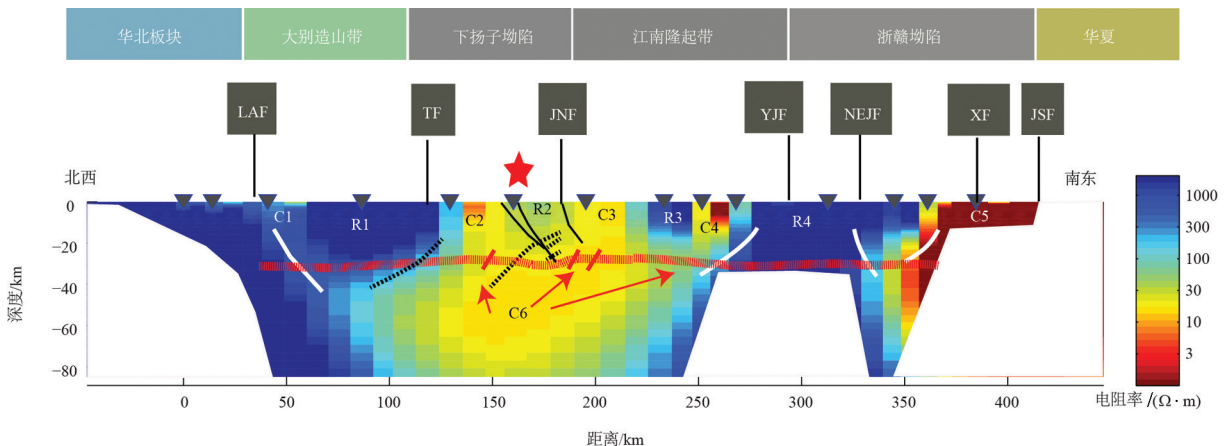


图7 综合解释图

(图中红色五角星位置为安庆—贵池矿集区;白色实线为依据电性结构模型画出的断裂;黑色实线、黑色虚线、红色曲线和红色短线分别为根据地震观测结果得到的逆冲断裂、俯冲断裂、Moho界面和Moho界面发生错断的位置。LAF—六安断裂;TF—庐庐断裂;JNF—江南断裂;YJF—宜丰—景德镇断裂;NEJF—赣东北断裂;XF—萧山断裂;JSF—江绍断裂)

Fig.7 Interpretation of results

(The red mark is Anqing-Guichi ore concentration area; white lines are faults based on this electrical result. The black lines; black dashed lines; red lines and red short lines are from the seismic results; denoting the thrust faults; underthrust faults; Moho boundary and the Moho offsets; respectively. LAF-Liu'an fault; TF-Tanlu fault; JNF-Jiangnan fault; YJF-Yifeng-Jingdezhen fault; NEJF-Northeastern Jiangxi fault; XF-Xiaoshan fault; JSF-Jiangshao fault)

两侧的边缘地区可能因为相对较弱的挤压、伸展变形而缺少岩浆向上运移的通道。

## 6 结 论

(1)本文以跨区域构造单元的尺度对长江中下游成矿带的安庆—贵池矿集区及其邻区进行大地电磁测深研究。面对各构造单元和各频段之间电性主轴方向不一致的问题,对大地电磁测深数据采用了分频段、分区的反演策略,取得了可靠的壳幔电性结构模型。

(2)安庆—贵池矿集区下方的壳幔电性结构与邻区的大别造山带和江南隆起带存在明显差异。安庆—贵池矿集区的成矿机制主要为燕山期陆内造山的地壳拆离和后期伸展作用阶段的增厚下地壳拆沉,成矿作用遵循多层次岩浆房系统模式。长江中下游成矿带内沿着北东方向延伸的断裂系统具有重要的控矿作用,应进一步加强与其他矿集区的对比研究。

**致谢:**感谢中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所能源与深地探测研究室组内成员的支持和帮助,同时感谢审稿专家的宝贵建议。

## References

- Bahr K. 1991. Geological noise in magnetotelluric data: A classification of distortion types [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 66(1): 24–38.
- Cai Juntao, Chen Xiaobin. 2010. Refined techniques for data processing and two-dimensional inversion in magnetotelluric II: Which data polarization mode should be used in 2D inversion [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 53(11): 2703–2714 (in Chinese with English abstract).
- Chang Yinbo, Dong Shuwen, Huang Dezhi. 1996. On tectonics of "poly-basement with one cover" in Middle-Lower Yangtze Craton, China [J]. *Volcanology and Mineral Resources*, 17: 1–15 (in Chinese with English abstract).
- Charvet J. 2013. The Neoproterozoic–Early Paleozoic tectonic evolution of the South China Block: An overview [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74: 198–209.
- Chen Xiaobin, Zhao Guoze, Ma Xiao. 2008. Preliminary discussion on selecting rotation angle direction in 2-D MT inversion [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 43: 113–118 (in Chinese with English abstract).
- Chen Xiangbin, Lü Qingtian, Yan Jiayong. 2012. 3D electrical structure of porphyry copper deposit: A case study of Shaxi copper deposit [J]. *Applied Geophysics*, 9: 270–278.
- Chu Y, Lin W. 2014. Phanerozoic polyorogenic deformation in southern Jiuling Massif, northern South China Block: Constraints from structural analysis and geochronology [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 86: 117–130.
- Deng Jinfu, Mo Xuanxue. 1994. Lithosphere root/de-rooting and activation of the East China continent [J]. *Geoscience*, 8: 349–356 (in Chinese with English abstract).
- Faure M, Shu L S, Wang B, Charvet J, Monie P. 2009. Intracontinental subduction: A possible mechanism for the early palaeozoic Orogen of SE China [J]. *Terra Nova*, 21: 360–368.
- Groom R W, Bailey R C. 1989. Decomposition of magnetotelluric impedance tensors in the presence of local three-dimensional galvanic distortion [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B2): 1913–1925.
- Guo Chunling, Chen Xiaobin. 2018. Refined processing and two-dimensional inversion of magnetotelluric data(VI): Two-dimensional magnetotelluric inversion based on the staggered model [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 61: 2548–2559 (in Chinese with English abstract).
- Guo Lianghui, Gao Rui. 2018. Potential-field evidence for the tectonic boundaries of the central and western Jiangnan belt in South China [J]. *Precambrian Research*, 309: 45–55.
- Hu Yingcai, Li Tonglin, Fan Cuisong. 2014. Experiment research of electromagnetic exploration method in Shujiadian copper deposit, Tongling, Anhui Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 4: 612–619 (in Chinese with English abstract).
- Jiang G M, Zhang G B, Zhao D P. 2015. Mantle dynamic and Cretaceous magmatism in East-central China: Insight from teleseismic tomograms [J]. *Tectonophysics*, 664: 256–268.
- Lü Qingtian, Dong Shuwen, Shi Danian, Tang Jingtian, Jiang Guoming, Zhang Yongqian, Xu Tao. 2014. Lithosphere architecture and geodynamic model of middle and lower reaches of Yangtze Metallogenic Belt: A review from SinoProbe [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30: 889–906 (in Chinese with English abstract).
- Lü Qingtian, Dong Shuwen, Tang Jingtian. 2015a. Multi-scale and integrated geophysical data revealing mineral systems and exploring for mineral deposits at depth: A synthesis from SinoProbe-03 [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 58: 4319–4343 (in Chinese with English abstract).
- Lü Qingtian, Liu Zhendong, Dong Shuwen. 2015b. The nature of Yangtze River deep fault zone: Evidence from deep seismic data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 58: 4344–4359 (in Chinese with English abstract).
- Lü Qingtian, Shi Danian, Liu Zhendong. 2015. Crustal structure and geodynamic of the middle and lower reaches of Yangtze metallogenic belt and neighboring areas: Insights from deep seismic reflection profiling [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 114: 704–716.
- Lü Qingtian, Yan Jiayong, Shi Danian. 2013. Reflection seismic

- imaging of the Lujiang–Zongyang volcanic area: An insight into the crustal structure and geodynamics of an ore district [J]. *Tectonophysics*, 606: 60–78.
- Li H, Song X, Lü Q T. 2018. Seismic Imaging of lithosphere structure and upper mantle deformation beneath East–Central China and their tectonic implications [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123: 2856–2870.
- Li X H, Li W X, Li Z X. 2009. Amalgamation between the Yangtze and Cathaysia blocks in South China: Constraints from SHRIMP U–Pb zircon ages, geochemistry and Nd–Hf isotopes of the Shuangxiwu volcanic rocks [J]. *Precambrian Research*, 174: 117–128.
- Li Z, Li X H. 2007. Formation of the 1300–km–wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat–slab subduction model [J]. *Geology*, 35: 179–182.
- Lin S F, Xing G F, Davis D W, Yin C Q, Wu M L, Jiang Y, Chen Z H. 2018. Appalachian–style multi–terrane Wilson cycle model for the assembly of South China [J]. *Geology*, 46: 319–322.
- Ling M X, Wang F Y, Ding X. 2009. Cretaceous ridge subduction along the lower Yangtze river belt, Eastern China [J]. *Econ. Geol.*, 104: 303–321.
- McNeice G W, Jones A G. 2001. Multisite, multifrequency tensor decomposition of magnetotelluric data [J]. *Geophysics*, 66 (1): 158–173.
- Ouyang L B, Li H Y, Lü Q T. 2014. Crustal and uppermost mantle velocity structure and its relationship with the formation of ore districts in the Middle–Lower Yangtze River region [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 408: 378–389.
- Qi Guang, Lü Qingtian, Yan Jiayong. 2014. 3D Geological modeling of Luzong ore district based on priori information constraint [J]. *Acta Geologica Sinica*, 4: 466–477 (in Chinese with English abstract).
- Qi Guang, Lü Qingtian, Yan Jiayong. 2012. Geologic constrained 3D gravity and magnetic modeling of Nihe deposit—A case study [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 12: 4194–4206 (in Chinese with English abstract).
- Rodi W, Mackie R L. 2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2–D magnetotelluric inversion [J]. *Geophysics*, 66(1): 174–187.
- Shao Lusen, Liu Zhendong, Lü Qingtian. 2015. Deep fine structure of Guichi Ore concentrated area: The understanding of the integrated geophysical detection results [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 58: 4490–4504 (in Chinese with English abstract).
- Shi D N, Lu Q T, Xu W Y. 2013. Crustal structure beneath the middle–lower Yangtze metallogenic belt in East China: Constraints from passive source seismic experiment on the Mesozoic intra–continental mineralization [J]. *Tectonophysics*, 606: 48–60.
- Shu L S. 2012. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block [J]. *Geological Bulletin of China*, 31: 1035–1053.
- Shu L S, Charvet J. 1996. Kinematics and geochronology of the Proterozoic Dongxiang–Shexian ductile shear zone: With HP metamorphism and ophiolitic melange (Jiangnan region, South China) [J]. *Tectonophysics*, 267: 291–302.
- Shu L S, Jahn B M, Charvet J. 2014. Early Paleozoic depositional environment and intraplate tectono–magmatism in the Cathaysia block (South China): Evidence from stratigraphic, structural, geochemical and geochronological investigations [J]. *Am. J. Sci.*, 314: 154–186.
- Song M, Shu L, Santosh M. 2015. Late Early Paleozoic and Early Mesozoic intracontinental orogeny in the South China Craton: Geochronological and geochemical evidence [J]. *Lithos*, 232: 360–374.
- Tang J T, Zhou C, Ren Z Y. 2014. Three dimensional magnetotelluric inversion and structural framework of Tongling ore district, Anhui [J]. *Acta Geologica Sinica*, 88: 598–611.
- Tang J T, Zhou C, Wang X. 2013. Deep electrical structure and geological significance of Tongling ore district [J]. *Tectonophysics*, 606: 78–96.
- Wang Guocan, Yang Weiran. 1998. Uplift evolution during Mesozoic–Cenozoic of the Dabie Orogenic Belt: Evidence from the tectono–chronology [J]. *Earth Science*, 5: 27–33 (in Chinese with English abstract).
- Wang X L, Zhou J C, Griffin W L. 2007. Detrital zircon geochronology of Precambrian basement sequences in the Jiangnan orogen: Dating the assembly of the Yangtze and Cathaysia blocks [J]. *Precambrian Research*, 159: 117–131.
- Wang X L, Zhou J C, Qiu J S, Gao J F. 2004. Geochemistry of the Meso–Neoproterozoic basic–acid rocks from Hunan Province, South China: Implications for the evolution of the western Jiangnan orogen [J]. *Precambrian Research*, 135: 79–103.
- Wu Shanshan, Jiang Mingming, He Yumei. 2018. NW–SE structural contrast of shear wave velocity and radial anisotropy beneath the Hefei–Jinhua seismic profile derived from ambient noise tomography [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 61: 584–592 (in Chinese with English abstract).
- Xu Changhai, Zhou Zuyi, Ma Cangqian. 2001. Doming–extension of 140–85 Ma in the Dabie Orogenic Belt: Constraint from geochronology [J]. *Science in China (Series D)*, 31: 925–937 (in Chinese with English abstract).
- Xu Wenyi, Yang Zhusen, Meng Yifeng. 2004. Genetic model and dynamic migration of ore–forming fluids in Carboniferous exhalation–sedimentary massive sulfide deposits of Tongling district, Anhui Province [J]. *Mineral Deposits*, 23: 353–364 (in Chinese with English abstract).
- Yan Jiayong, Lü Qingtian, Chen Xiangbin. 2014a. 3D lithologic mapping test based on 3D inversion of gravity and magnetic data: A case study in Lu–Zong ore concentration district, Anhui Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30: 1041–1053 (in Chinese with English abstract).

- Yan Jiayong, Lü Qingtian, Wu Mingan. 2014b. Prospecting Indicator of Anhui Shaxi porphyry copper deposit based on regional gravity and magnetic 3D inversion [J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(4): 507–518 (in Chinese with English abstract).
- Yan Jiayong, Lü Qingtian, Wu Mingan. 2015. Identification and extraction of geological structure information based on multi-scale edge detection of gravity and magnetic fields: An example of the Tongling ore concentration area [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 58: 4450–4464 (in Chinese with English abstract).
- Yao J, Shu L, Cawood P A, Cawood P A, Li J Y. 2016. Delineating and characterizing the boundary of the Cathaysia Block and the Jiangnan Orogenic Belt in South China [J]. *Precambrian Research*, 275: 265–277.
- Zhang Guowei, Guo Anlin, Wang Yuejun. 2013. Tectonics of South China continent and its implications [J]. *Science China: Earth Sciences*, 56: 1804–1828.
- Zhang Letian, Jin Sheng, Wen Wenbo, Ye Gaofeng, Duan Shuxin, Dong Hao, Zhang Fan, Xie Chengliang. 2012. Electrical structure of crust and upper mantle beneath the eastern margin of the Tibetan plateau and the Sichuan basin [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese with English abstract)*, 55(12): 4126–4137.
- Zhang Minghui, Xu Tao, Lü Qingtian. 2015. 3D Moho depth beneath the Middle–Lower Yangtze metallogenic belt and its surrounding areas: Insight from the wide angle seismic data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 58: 4360–4372 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiao, Xu Xianbing, Jia Dong. 2009. Deformation record of the change from Indosinian collision–related tectonic system to Yanshanian subduction–related tectonic system in South China during the Early Mesozoic [J]. *Earth Science Frontiers*, 16: 234–247 (in Chinese with English abstract).
- Zhao G C. 2016. Jiangnan Orogen in South China: developing from divergent double subduction [J]. *Gondwana Research*, 27: 1173–1180.
- Zhao G C, Cawood P A. 2012. Precambrian geology of China [J]. *Precambrian Research*, 13–54.
- Zheng Y F, Zhang S B. 2007. Formation and evolution of Precambrian continental crust in South China [J]. *Sci. Bull.*, 52: 1–12.
- Zhou X M, Li W X. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas [J]. *Tectonophysics*, 326: 269–287.
- 蔡军涛, 陈小斌. 2010. 大地电磁资料精细处理和二维反演解释技术研究(二)——反演数据极化模式选择 [J]. *地球物理学报* 53(11): 2703–2714.
- 常印佛, 董树文, 黄德志. 1996. 论中—下扬子“一盖多底”格局与演化 [J]. *火山地质与矿产*, 17: 1–15.
- 陈小斌, 赵国泽, 马霄. 2008. 关于MT二维反演中数据旋转方向的选择问题初探 [J]. *石油地球物理勘探*, 43: 113–118.
- 邓晋福, 莫宣学. 1994. 中国东部岩石圈根 / 去根作用与大陆“活化”——东亚型大陆动力学模式研究计划 [J]. *现代地质*, 3: 349–356.
- 郭春玲, 陈小斌. 2018. 大地电磁资料精细处理和二维反演解释技术研究(六)——交错模型的大地电磁二维反演 [J]. *地球物理学报*, 61: 2548–2559.
- 胡英才, 李桐林, 范翠松. 2014. 安徽铜陵舒家店铜矿的电磁法试验研究 [J]. *地质学报*, 88: 612–619.
- 吕庆田, 董树文, 史大年, 汤井田, 江国明, 张永谦, 徐涛. 2014. 长江中下游成矿带岩石圈结构与成矿动力学模型——深部探测(SinoProbe)综述 [J]. *岩石学报*, 30: 889–906.
- 吕庆田, 董树文, 汤井田. 2015a. 多尺度综合地球物理探测: 揭示成矿系统, 助力深部找矿——长江中下游深部探测(SinoProbe-03)进展 [J]. *地球物理学报*, 58: 4319–4343.
- 吕庆田, 刘振东, 董树文. 2015b. “长江深断裂带”的构造性质: 深地震反射证据 [J]. *地球物理学报*, 58: 4344–4359.
- 祁光, 吕庆田, 严加永. 2014. 基于先验信息约束的三维地质建模: 以庐枞矿集区为例 [J]. *地质学报*, 88: 466–477.
- 祁光, 吕庆田, 严加永. 2012. 先验地质信息约束下的三维重磁反演建模研究——以安徽泥河铁矿为例 [J]. *地球物理学报*, 55: 4194–4260.
- 邵陆森, 刘振东, 吕庆田. 2015. 安徽贵池矿集区深部精细结构——来自综合地球物理探测结果的认识 [J]. *地球物理学报*, 58: 4490–4504.
- 王国灿, 杨巍然. 1998. 大别造山带中新代隆升作用的时空格局——构造年代学证据 [J]. *地球科学*, 23: 461–467.
- 吴珊珊, 姜明明, 何玉梅. 2018. 利用背景噪声成像研究合肥—金华剖面地壳速度结构及径向各向异性的东西差异 [J]. *地球物理学报*, 61: 584–592.
- 许长海, 周祖翼, 马昌前. 2001. 大别造山带140–85Ma热隆伸展作用—年代学约束 [J]. *中国科学(D辑)*, 31: 925–937.
- 徐文艺, 杨竹森, 蒙义峰. 2004. 安徽铜陵矿集区块状硫化物矿床的成因模型与成矿流体动力学迁移 [J]. *矿床地质*, 23: 353–364.
- 严加永, 吕庆田, 陈向斌. 2014a. 基于重磁反演的三维岩性填图试验——以安徽庐枞矿集区为例 [J]. *岩石学报*, 30: 1041–1053.
- 严加永, 吕庆田, 吴明安. 2014b. 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.
- 严加永, 吕庆田, 陈明春. 2015. 基于重磁场多尺度边缘检测的地质构造信息识别与提取——以铜陵矿集区为例 [J]. *地球物理学报*, 58: 4450–4464.
- 张国伟, 郭安林, 王岳军. 2013. 中国华南大陆构造与问题 [J]. *中国科学: 地球科学*, 43: 1553–1582.
- 张乐天, 金胜, 魏文博, 叶高峰, 段书新, 董浩, 张帆, 谢成良. 2012. 青藏高原东缘及四川盆地的壳幔导电性结构研究 [J]. *地球物理学报*, 55(12): 4126–4137.
- 张明辉, 徐涛, 吕庆田. 2015. 长江中下游成矿带及邻区三维Moho面结构: 来自人工源宽角地震资料的约束 [J]. *地球物理学报*, 58: 4360–4372.
- 张岳桥, 徐先兵, 贾东. 2009. 华南早中生代从印支期碰撞构造体系向燕山期俯冲构造体系转换的形变记录 [J]. *地学前缘*, 16: 234–247.

## 附中文参考文献