

# 华南陆块东北部构造特征、成矿作用与动力学机制

——来自大地电磁测深的认识

董基恩<sup>1,2)</sup>, 叶高峰<sup>1)</sup>, 魏文博<sup>1)</sup>, 金胜<sup>1)</sup>, 李玉龙<sup>2)</sup>, 董小军<sup>2)</sup>, 魏有宁<sup>2)</sup>

1) 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 北京, 100083; 2) 青海省地质调查局, 西宁, 810000

**内容提要:** 通常认为, 华南陆块在新元古代由扬子克拉通和华夏地块沿江南造山带碰撞拼合而成, 之后经历了陆内造山、洋壳俯冲等多期岩浆—构造活动。但因华南陆块所处的特殊地质构造环境, 就目前华南陆块各块体之间的接触关系、江南造山带深部构造特征及区域动力学意义等诸多地质问题争议颇多。本文依托地质调查项目和“深部探测技术与实验研究(SinoProbe)”项目完成的8d和12g两条大地电磁测深剖面, 经过精细的数据处理, 使用非线性共轭梯度(NLCG)算法对TE+TM模式数据联合反演得到华南陆块东北部岩石圈尺度的二维电性剖面, 并用ModEM三维反演代码对全阻抗张量数据反演获得了三维电性模型。对研究区内扬子地块东部、江南造山带以及华夏地块进行电性结构研究, 发现研究区内的江南造山带西南段存在扬子地块和华夏地块碰撞镶嵌的构造表现, 扬子地块已越过江南造山带, 在江山—绍兴断裂位置与华夏地块挤压, 形成江绍断裂等逆冲型深大断裂, 从电性结构推测其现今仍然为活动断裂, 但东北段块体之间的接触关系被上侵的地幔物质破坏, 江绍、赣东北等断裂的深部结构已被剧烈改造, 推测这种深部成矿热物质上涌是形成赣东北以金银矿种为主的岩浆热液型矿床的深部动力原因; 研究区东部华夏地块电性特征为高阻的上地壳以及被岩浆底侵而破坏的中下地壳, 发育其中的屯溪—鹰潭—安远和上虞—大浦—政和断裂切割深度超过了50 km, 为深大断裂构造。结合前人地表侵入岩填图结果, 认为由于中生代以来古太平洋板块向欧亚大陆的俯冲, 华南陆块东部上地壳被严重破坏, 从电性特征推断可能发生过大面积的板片重融, 华夏地块东北部地壳相较于西南部厚度明显更小、后期改造严重, 受到的太平洋板块俯冲导致的热扰动更剧烈。

**关键词:** 大地电磁测深; 华南陆块; 江南造山带; 接触关系; 地幔物质上涌

华南陆块是由扬子地块和华夏地块两个一级构造单元组成, 中间沿江南造山带拼接在一起(舒良树, 2012)。自显生宙加里东运动以来, 在各类地球动力学背景下的不同地质作用和构造演化造就了华南当前复杂的地质环境属性和特殊的地貌风格以及资源分布情况, 所以近半个世纪以来一直备受地质工作者的关注, 是全球性的研究热点。古生代晚期至中生代早期, 华南陆块与北侧的华北地块碰撞挤压, 形成秦岭—大别造山带; 中生代以来, 华南陆块受到东侧太平洋板块向西的俯冲挤压, 爆发了多期次的岩浆活动(毛景文等, 2004); 而其西南, 中、新生代受到印支陆块的东北向的挤压, 通过龙门山构造带与青藏地块相连。虽经过几代人的努力, 其地

表地质调查以及实际踏勘等工作比较充分, 但由于深部资料的缺乏, 使得目前对华南陆块的研究在华南陆内造山机制、华南岩石圈壳幔结构以及地球深部动力学等方面争论众多。所以在华南地区开展系统、密集的岩石圈尺度的地球物理勘探也是适应当前科研要求的重要手段。

大地电磁测深是目前主要的地球深部探测方法之一, 是从导电性的角度研究地壳和上地幔结构不可缺少的方法(魏文博, 2002; 魏文博等, 2003)。所以针对华南大陆复杂的地质环境和深部构造, 在华南地区开展大地电磁测深工作, 获得华南地壳的电性模型, 这将对华南地区壳/幔结构及其动力学背景研究提供更具有说服力的资料, 并且对于探讨地质

注: 本文为国家重点研发计划项目(编号: 2017YFC0601406)、“深部探测技术与实验研究(SinoProbe)”项目和地质调查项目(编号: DD20160082 和 DD20190012)的成果。

收稿日期: 2021-09-18; 改回日期: 2022-01-26; 网络首发: 2022-02-20; 责任编辑: 刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.02.021

作者简介: 董基恩, 男, 1992年生, 硕士研究生, 地球探测与信息技术专业; Email: dongjien@outlook.com。通讯作者: 叶高峰, 男, 1977年生, 博士、教授, 长期从事地电学与电法勘探的教学与研究; Email: yg@cugb.edu.cn。



规律、解析矿产成因、评估地质环境和地质灾害形成机制,以及研究大陆演化的动力学过程等都具有重要的意义(刘国兴等,2012)。

本文利用两条穿越华南陆块东北部地区的大地电磁(MT)剖面,获得了华南陆块东北部地区岩石圈尺度的二维及三维电阻率模型,对研究区内扬子地块、华夏地块及江南造山带的电性特征进行了地球物理解释,并根据电性特征就研究区内扬子克拉通和华夏地块接触关系、赣东北成矿带深部成矿机制及地球动力学意义等问题进行了讨论。

## 1 地质背景

华南陆块在西太平洋板块西向俯冲与印度洋板块北向差异运动的夹持等长期复杂的板块构造作用下,形成了目前独特的大陆构造。现今华南整体陆壳基本由扬子与华夏两个地块和其上的显生宙盖层构成,两地块之间的中间融合带就是所谓“江南造山带”。扬子地块是指华南大陆中具有前南华纪基底的扬子古微板块和华夏古微板块的西部的统称,地球化学测年研究发现扬子地块深部可能普遍存在一个新太古代结晶基底,并有古元古代岩浆活动遗迹,而且扬子地块中发现的非常古老的地质体崆岭杂岩是形成于 2.90~2.95 Ga (Qiu Yumin et al., 2000; Zhang Shaobing and Zheng Yongfei, 2013),说明扬子广泛残存的是早前寒武纪结晶基底,现已基本完成相对稳定克拉通陆块的演化。重磁研究发现扬子地块主要为正磁异常以及负的布格重力异常(张季生和洪大卫,2002)。结合重磁电震地球物理方法研究成果,扬子陆块总体呈现高速高密度高阻中高温的地球物理特性。

自从 Grabau (1924) 提出“华夏古陆”的认识以来,华夏地块是否真的存在,争议巨大。但是后来在浙南—闽北地区开展的早元古代同位素年代学研究使得“华夏古陆”又被重新提出(于津海等,2006)。所以目前对于华夏地块的分布以及规模还是存在不同认识(李献华,1998; 邓平等,2002; 舒良树,2006)。目前大家所公认的华夏地块位于中国的东南部,是华南大陆的组成部分,呈北东向分布。华夏地块主要由各个时代变质岩及中生代花岗岩为主的岩浆岩组成,其火成岩主要是在加里东以后形成的,但是在闽北、浙南等地区有古元古代和新元古代变质火成岩分布(甘晓春等,1993; 甘晓春等,1995; 李献华,1998)。于津海等(2006)认为华夏地块目前的岩石主要是在新元古代形成,其中包含古老的

“华夏古陆”,但被后期的构造热事件强烈改造。航磁研究发现华夏板块以负磁异常为主,间有局部正异常,这与酸性岩浆活动有关,呈现相对年轻的地壳属性(童迎世和童琼,2012)。饶家荣等(2012)结合各类地球物理资料认为华夏陆块为造山带岩石圈,总体呈低速低密度低阻高温经强烈改造的相对活动型(热)陆块。

江南造山带的地质研究工作历史悠久。李四光、黄汲清等老一批地质学家在上世纪初期先后到南岭地区进行过地质矿产研究工作,初步确定了研究区内分布的矿产种类和特点以及附近主要的构造轮廓。20世纪80年代初,水涛(1987)对江山—绍兴断裂带及其两侧开展了长期的野外地质调查,认为扬子古陆与华夏古陆之间曾为浩海分隔并发生过碰撞,由此提出两个块体碰撞对接的构想。随后杨明桂和梅文勇(1997)在该区域进行了比较系统的地质构造及成矿作用研究,确认了钦州湾至杭州湾为扬子与华夏这两个古板块的缝合带,称为钦杭结合带(江南造山带)。总的来说结合带南起自广西钦洲湾,经湘东和赣中,往北东延伸至浙江杭州湾,总体呈 NE 向反 S 状弧形展布,全长约 2000 km,宽 100~300 km(徐德明等,2013),考虑到该结合带也是最重要的构造岩浆成矿带,并正式命名为“钦杭成矿带”。钦杭成矿带也具有分段性,北段的赣东北成矿带的优势矿种为铜、铁和贵金属,西南段的南岭成矿带是重要的钨锡多金属产地(毛景文等,2004)。

针对华南陆块特殊的地质背景及构造环境,一大批地球物理工作者就江南造山带边界问题、华南陆块东部岩石圈减薄等地质焦点问题,开展了一系列地球物理工作,并取得一些重要的成果。在地震研究方面,Zhang Zhongjie 等(2013)通过清远连县—惠东港口地震剖面,建立了华南地壳上地幔 P 波速度结构模型,发现 P 波速度在上地壳横向变化大,下地壳横向变化小,并认为吴川—四会断裂是扬子与华夏的地壳分界线。江国明等(2014)通过长江中下游地区速度异常分析,得到上地幔“两高夹一低”的速度异常体,认为高速体代表拆沉的岩石圈,低速为上涌的软流圈物质,说明该地区可能发生拆沉。Dong Shuwen 等(2020)通过华南深反射地震剖面认为华夏东部发生了明显的岩浆底侵作用以及软流圈上涌,底侵为地壳增加了大量的幔源物质,弥补了地壳减薄的影响。在大地电磁测深研究方面,刘国兴等(2012)通过华南沿海地区 MT 剖面认为该

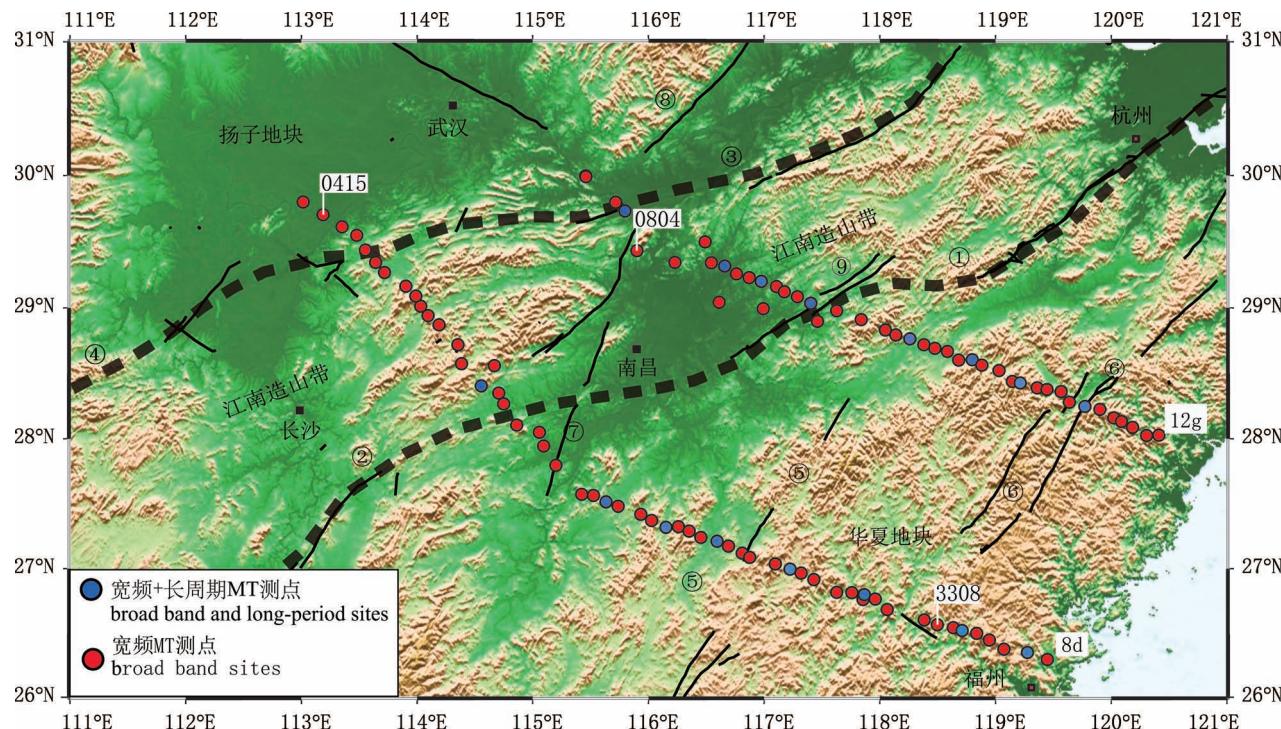


图 1 华南陆块东北部主要构造及 MT 测点分布简图

Fig. 1 Location of MT stations with geological division of the survey area

- ① 绍兴—江山断裂; ② 郴州—临武断裂; ③ 九江—石台断裂; ④ 吉首断裂; ⑤ 屯溪—鹰潭—安远断裂;  
⑥ 上虞—政和—大浦断裂; ⑦ 赣江断裂; ⑧ 鄱庐断裂; ⑨ 赣东北断裂

- ① Shaoxing—Jiangshan fault; ② Chenzhou—Linwu fault; ③ Jiujiang—Shitai fault; ④ Jishou fault; ⑤ Tunxi—Yingtan—Anyuan fault;  
⑥ Shangyu—Zhenghe—Dapu fault; ⑦ Ganjiang fault; ⑧ Tanlu fault; ⑨ Northeastern Jiangxi fault

地区深部地壳总体上呈东薄西厚的特征, 西段岩石圈增厚可能由于陆内造山作用, 中段岩石圈减薄可能由于软流圈物质上涌, 东段岩石圈的增厚可能是太平洋俯冲导致洋壳残留物叠置形成双层岩石圈, 而太平洋俯冲导致的深部热扰动作用可能引起大规模软流圈上涌。韩松(2017)通过进荣—柘贤的 MT 剖面研究, 认为华夏沿海地区并非为岩石圈的大范围减薄, 而是以局部软流圈上涌为途径来影响和改造上覆岩石圈结构。Hu Haoyuan 等(2020)通过大地电磁测深建立了华南东部岩石圈 3-D 电性结构模型, 认为赣东北成矿带从地幔延伸至地壳的低电阻率异常为成矿物质的岩浆通道, 而南岭成矿带地幔和地壳的低电阻率异常通过较小的低电阻率通道连接, 可能是软流圈物质上升的通道, 并且上升的软流圈物质被高电阻率的下地壳阻塞, 地幔上升流的热量和成矿元素可能触发了上地壳的部分熔融。在综合地球物理探测方面, 严加永等(2019)使用大尺度卫星重磁资料, 结合区域电性和地震资料的综合研究, 认为钦杭结合带是江南造山带的南部边界, 结合带南界为宁波—金华—上饶南—赣州北—郴州—北

海东, 北界为上海—湖州—鹰潭—临川—萍乡—衡阳—永州—桂林—梧州—钦州。

## 2 大地电磁数据采集及处理分析

### 2.1 数据采集与处理

研究区 MT 数据由中国地质大学(北京)和吉林大学分别采集于 2016 年和 2010~2012 年。主要由穿过江南造山带的短剖面及东南沿海地区的剖面组成的阵列。此次研究中, 8d 和 12g 剖面分别选取大地电磁测深点 55 个和 43 个(图 1 红色和蓝色圆点)。野外数据采集时, 取北方向为  $x$  轴正方向, 东方向为  $y$  轴正方向, 垂直向下为  $z$  轴正方向。在所有测点使用加拿大凤凰公司生产的 MTU-5A 仪器进行了宽频大地电磁测深观测, 在采集时间大于 40 h 的情况下可以采集到频率  $320 \sim 0.0002$  Hz 范围内的电磁场信号, 根据趋肤深度的表达式, 本区域宽频仪器的最大勘探深度通常在 70 km 左右。为了采集更长周期的大地电磁信号以获得研究区岩石圈尺度的电性结构特征, 根据宽频数据质量及研究需求在其中 16 个测点进行了长周期观测(图 1 蓝色圆

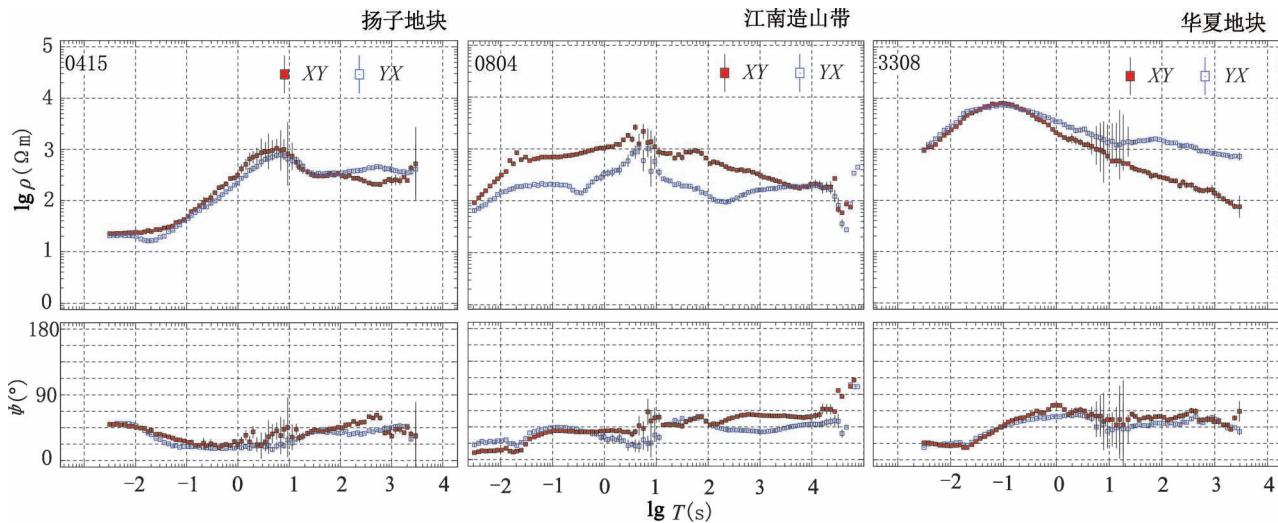


图 2 华南陆块主要构造单元典型测点的视电阻率和相位曲线图

Fig. 2 Apparent resistivity and phase curves of three typical stations in main geological blocks of the South China Block)

点),采集仪器为乌克兰科学院空间研究所研制的 Lemi-417m,每个测点的采集时间在 7 d 以上。

野外采集得到测点电磁场时间序列后,使用 SSMT2000 软件对宽频数据进行处理,并进行精细的功率谱密度挑选。针对华南多丘陵、多雨、干扰源丰富等特点,2016 年进行宽频数据采集时,在湖南汉寿县以及湖北孝感市布设两台远参考站,后期处理中以远参考点磁道为参考道以及各个点互参考技术(Gamble et al., 1979)优化数据质量,对于 2010~2012 年 SinoProbe 专项东南沿海 MT 数据采用点间互参考进行重处理,使得数据质量得到了很大改善。由于采集时间长,宽频数据的最长周期达到 10000 s。长周期数据处理采用 Varentsov 教授的代码(Varentsov et al., 2003),处理得到阻抗张量,并选取 100 s 至 1000 s 之间某个频点将宽频数据和长周期数据进行拼接,这样可以得到该测点完整的测深曲线,经拼接后数据质量好的点其最长周期可达到 40000 s 左右(图 2 中间幅)。华南经济发达,矿产资源丰富,因此人文噪音较强。在天然场的“死频带”10~0.1 Hz 通常数据质量较差,某些测点即便进行了远参考处理还未能有效改善“死频带”数据质量,对这些受明显干扰的频点进行了删除,未参与二维、三维反演。

在不同的地质体内其测深曲线具有不同特征,对图 1 中所示的 0415、0804 和 3308 MT 测点绘制了测深曲线图(图 2)。扬子地块内测点(0415)的测深曲线表现为低阻—高阻—低阻—较高阻的曲线变

化特征,表明扬子地块的基底可能为高阻;位于江南造山带内的测点(0804),XY 和 YX 模式视电阻率曲线变化具有明显差异形态,为地质构造复杂情况下的大地电磁测深视电阻率曲线;华夏地块内的测点(3308)曲线类型可以看出华夏地块上地壳为稳定高阻特征,中下地壳电阻率明显降低。

## 2.2 维性、构造走向分析

在开展反演工作之前需进行数据的维性分析,主要是进行二维偏离度分析。本文选择了受电磁场畸变效应较小的 Bahr 二维偏离度对 8d、12g 剖面进行维性分析(Bahr, 1988)。当二维偏离度值小于 0.3 时可以认为剖面满足二维假设,当二维偏离度值大于 0.3 时,说明地下介质存在三维效应。如图 3 所示,位于西南的 8d 剖面二维性优于 12g 剖面,说明研究区内的江南造山带由西南向东北方向其地下构造逐渐复杂,逐渐趋于三维特性。在 8d 剖面中仅在东南沿海地区深部存在小范围的三维性特征,近似满足二维假设。而 12g 剖面二维性较差,在华夏地块内部存在比较明显的三维属性,因此在后期反演中也进行了三维反演,旨在进行二、三维模型对比研究,获得尽可能接近实际情况的电阻率模型。

相位张量分析具有不受局部电场畸变影响的优点(Caldwell et al., 2004),也被用于判断维性和构造走向。如图 4 所示,对 0.1 s、10 s、100 s 和 1000 s 的 4 个周期进行了相位张量分析,并绘制了各周期的相位张量椭圆。可以看出,研究区域内绝大部分测点反映浅部信息的高频率(0.1 s)的二维偏离角

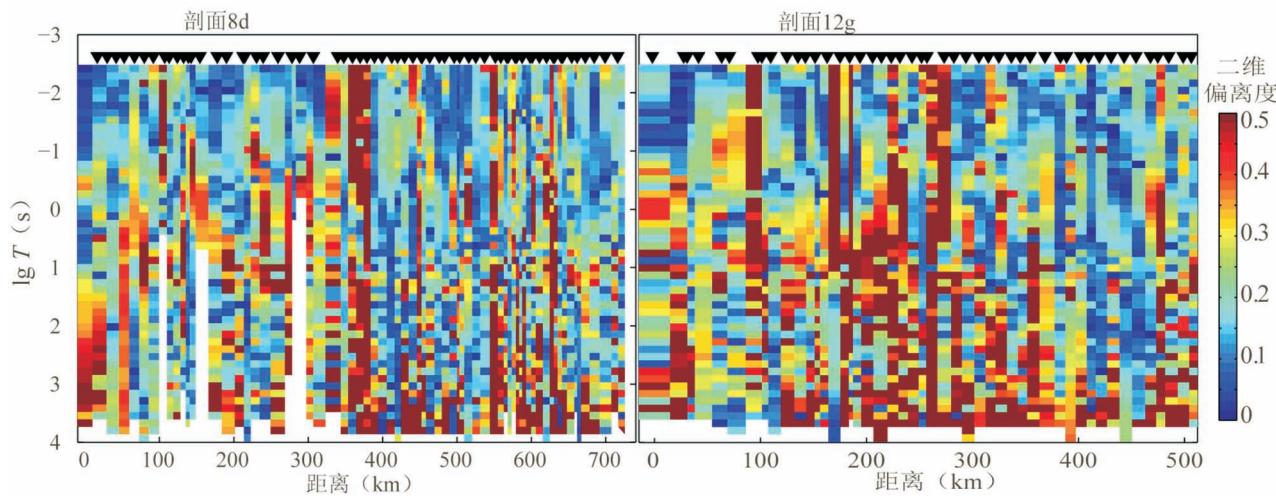


图3 华南8d、12g剖面Bahr二维偏离度拟断面图

Fig. 3 Pseudo-sections of Bahr skew of profile 8d and 12g in the northeastern South China Block

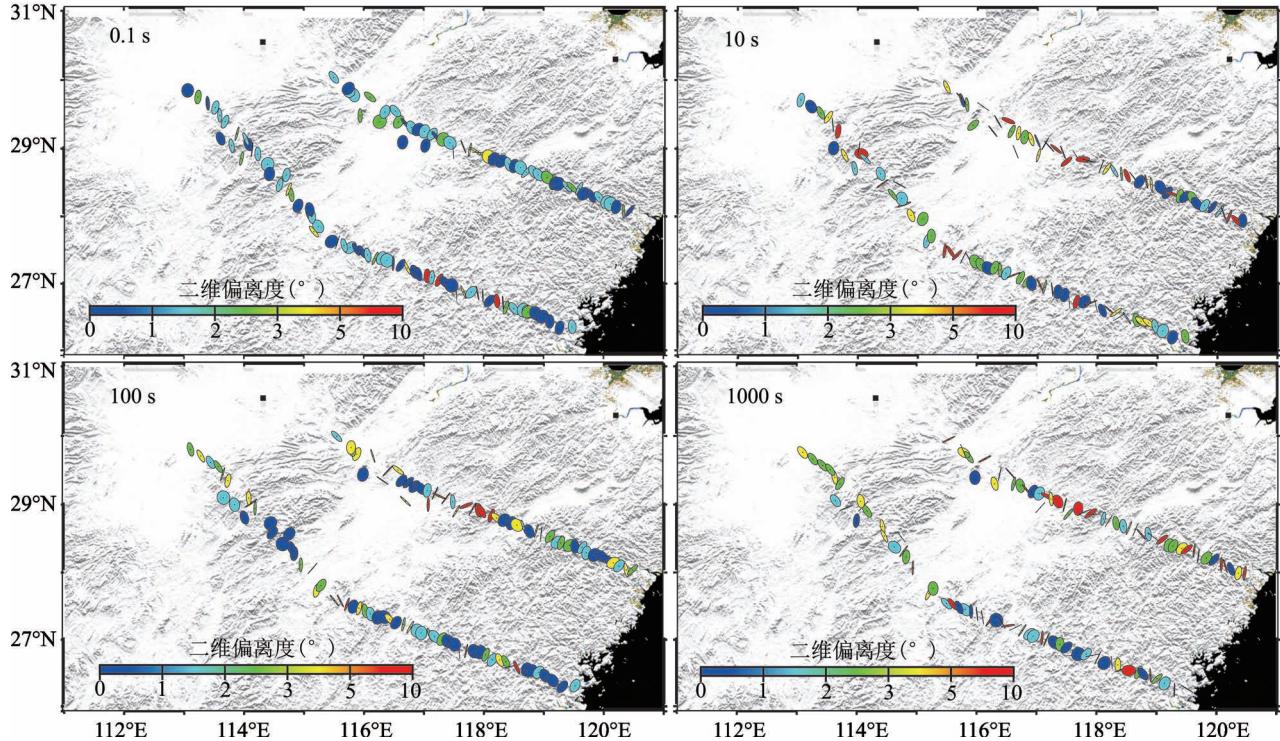


图4 华南陆块东北部四个周期的相位张量分析图

Fig. 4 The phase tensor analysis results at four periods in the northeastern South China Block

$\beta$ 都小于3°,说明MT数据在高频段的二维性较好(Booker, 2014),部分椭圆接近退化为圆,反映了这些块体的浅表沉积层具有较好的一维特性,少数几个 $\beta>5^\circ$ 的孤立测点,可能因为数据质量较差所导致的。但在中频段(10 s和100 s),研究区域内部分MT测点数据表现出了一定的三维特性( $\beta>3^\circ$ ),位于块体边界带或者深大断裂带附近大部分测点的 $\beta>5^\circ$ 的情况,体现出研究区深部的构造情况复杂的

特征,存在三维效应,这与Bahr二维偏离度的分析结果基本一致。

在维性分析结果确认可以进行二维反演后,需分析剖面所在区域的构造走向,只有将MT数据旋转至构造走向方向上,才能将MT数据分解为两组相互独立的极化模式:TE和TM模式。从相位张量分析获得的椭圆结合区域地质资料可知,研究区构造走向主要为北东向。为了确定具体的构造走向

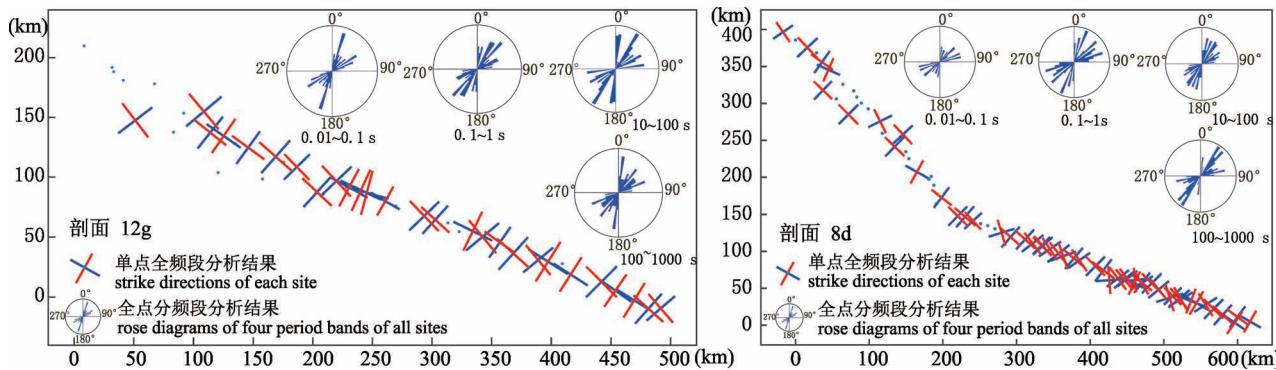


图 5 华南陆块东北部 8d 和 12g 剖面测点构造走向分析统计玫瑰图

Fig. 5 The analysis of statistical roses of profiles 8d and 12g in the northeastern South China Block

角,对 MT 数据进行了阻抗张量分解。G—B 分解是目前 MT 张量畸变校正应用最为广泛的方法之一,该方法将张量阻抗分解为一个区域二维张量阻抗和一个局部畸变矩阵,获得两个相互正交的电性主轴角,据此所确定的构造走向角有 90° 的不确定性(Groom and Bailey, 1989),需要结合磁感应矢量分析或区域构造图才能确定。图 5 为单点全频段张量阻抗分解结果和多点分频段(0.01~0.1 s, 0.1~1 s, 10~100 s 和 100~1000 s)张量阻抗分解结果图,结果显示研究区有较明显的电性主轴方向,结合区域构造走向,可以确定剖面 8d 的优势主轴方向为 NE35°,12g 的优势主轴方向为 NE40°,因此将 8d 和 12g 剖面中的所有数据分别旋转至 NE35° 和 NE40° 坐标系下进行二维反演研究。

### 3 反演

#### 3.1 二维反演

此次二维反演采用多模式,多参数相结合的思路进行多次二维反演试算,为了让更多的数据参与反演并约束地电模型,此次反演使用以非线性共轭梯度(NLCG)为计算内核的 WinGLink 软件(Rodi and Mackie, 2001),采用 TM+TE 联合反演模式,初始模型为 100 Ω·m 的均匀半空间,TM 模式相位误差基数 5%,TM 模式视电阻率误差基数 10%,考虑到 TE 模式受三维畸变效应的影响比较严重,而且在后期的反演中发现 TE 模式参与反演的模型容易出现大面积的高阻异常,并且数据难以拟合,因此将 TE 模式视电阻率误差基数增大至 50%,相位误差基数设置为 10%,采用不同的正则化因子  $\tau$  值进行多次反演,找到模型光滑度和均方根(Root Mean Square,简称 RMS)误差的最佳平衡。最终选择  $\tau=$

10 的正则化因子,经过 200 次迭代,得到 8d 剖面 RMS 误差为 2.38,12g 剖面 RMS 误差为 2.37。图 6 为反演剖面 TE 和 TM 模式实测数据视电阻率与相位以及最终二维模型响应数据视电阻率与相位拟断面图,对比可以看出 TM 模式的实测数据和响应数据拟合良好,TE 模式视电阻率稍有差别,是视电阻率误差基数设置较大导致的,但是总体来说拟合情况也较好,证明最终反演模型是可靠的。

#### 3.2 三维反演

由于当下计算机技术的发展已经能够满足大地电磁三维反演的硬件需求,大地电磁测深三维反演技术已经日渐成熟,当下主流的三维反演计算代码为基于数据空间的 OCCAM 算法的 WS3DINVMT 反演程序(Siripunvaraporn et al., 2005)以及基于非线性共轭梯度算法的 ModEM(Kelbert et al., 2014)。

本次三维反演根据点距及数据质量对测点进行了挑选和抽稀。反演频率范围为 100~0.0001 Hz,每个量级使用 5 个频点,总计使用 67 个测点、30 个频点的全阻抗数据进行 ModEM 三维反演,阻抗对角元素( $xx$  和  $yy$ )和非对角元素( $xy$  和  $yx$ )误差基数分别设为  $10\% \cdot \sqrt{|z_{xy} \cdot z_{yx}|}$  和  $5\% \cdot \sqrt{|z_{xy} \cdot z_{yx}|}$ ,初始模型为 100 Ω·m 的均匀半空间。研究区内, $x$  和  $y$  方向均以 10 km 进行均匀网格剖分,为了逼近无穷远的边界条件,4 个水平方向以 1.5 倍为步长递增,各附加 12 个网格; $z$  方向首层 100 m,用 1.1 倍步长递增, $Z$  方向剖分深度为 1500 km。反演中初始的拉格朗日算子  $\lambda$  的初始值设置为 100,以 10 倍为步长更新  $\lambda$  值,搜索步长为 5,经过 400 次迭代计算得到了研究区三维电阻率模型,最终 RMS 误差为 2.3795,  $\lambda$  的最终值为 0.0001。如图 7 所示为各个点 RMS 误差,可以看出大部分点测点的 RMS 误

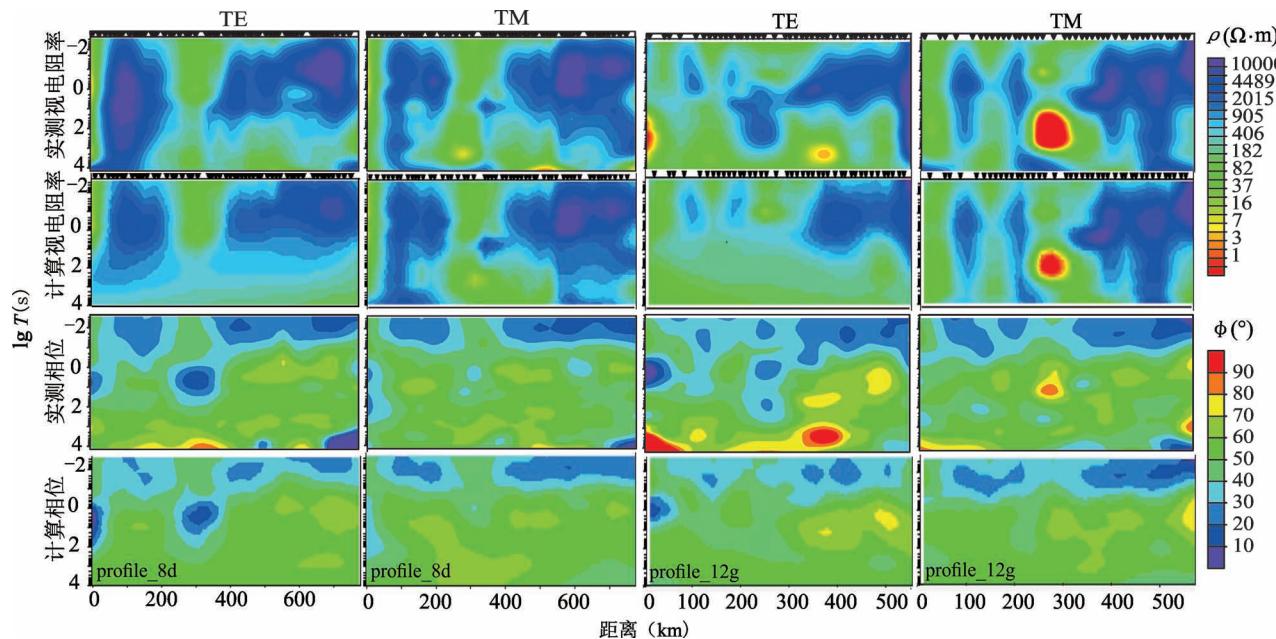


图6 华南陆块东北部 TM 和 TE 模式视电阻率与相位实测数据和模型响应拟断面图

Fig. 6 The pseudo-sections of observed and calculated apparent resistivity and phases of TM and TE modes data in the northeastern South China Block

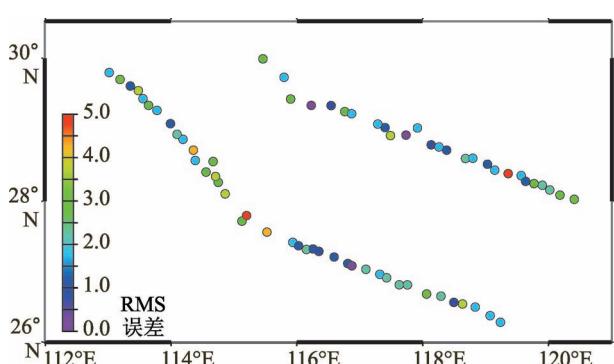


图7 华南东部大地电磁测深三维反演各测点拟合误差分布图

Fig. 7 Distribution of RMS misfits of three-dimensional MT inversion of eastern South China Block

差在3以下,说明实测数据与模型响应拟合较好,模型可靠。

#### 4 研究区电性结构特征

对二维及三维反演获得的电阻率模型的对比发现,12g剖面二维和三维反演的结果较为一致;虽然8g剖面两者之间差别较大,但大的结构是一致的。通常而言,三维反演会获得较为光滑的模型,对边界的分辨能力不如二维反演,因此对边界的解释以二维反演为主。结合前人研究成果(舒良树等,2004;

舒良树,2006;张岳桥等,2009;张国伟等,2013;Zhang Letian et al., 2015; He Chuansong and Santosh, 2016),最终得到如图8及图9所示华南陆块东北部地质—地球物理解释模型。其中8d剖面横跨扬子地块、江南造山带及华夏地块构造单元,并经过了九江—石台断裂、江山—绍兴断裂、赣江断裂带、屯溪—鹰潭—安远断裂以及上虞—政和一大浦断裂等大型断裂构造,剖面总长约800 km。综述8d剖面电性特征可概括为高阻的地壳被具有明显的电性梯度带特征的分界断裂所切割,为明显的“横向分块”的特征,而被切割的上地壳内部为较稳定高阻响应,电阻率最高达到10000 Ω·m,为较稳定的微陆块。由于剖面位于扬子地块的测点较少,剖面西段主要反映了扬子地块与江南造山带接触部位的电性特征,表现为中上地壳的高阻块体明显被挤压破坏(如图8中R1所示),可以发现向下延伸的裂隙式低阻异常切割了高阻的上地壳,该区域为江南造山带西边界断裂九江—石台断裂的电性特征,该断裂为高角度东倾逆冲断裂,切割深度达到了50 km左右,断裂与两侧电性差异较大。在九江—石台断裂与江山—绍兴断裂之间为江南造山带,带内电性特征较复杂,主要表现为被挤压破坏的高阻上地壳,而中下地壳中存在一高阻体(如图8中R2所示),深度大于100 km,推测该高阻体应为扬子地块

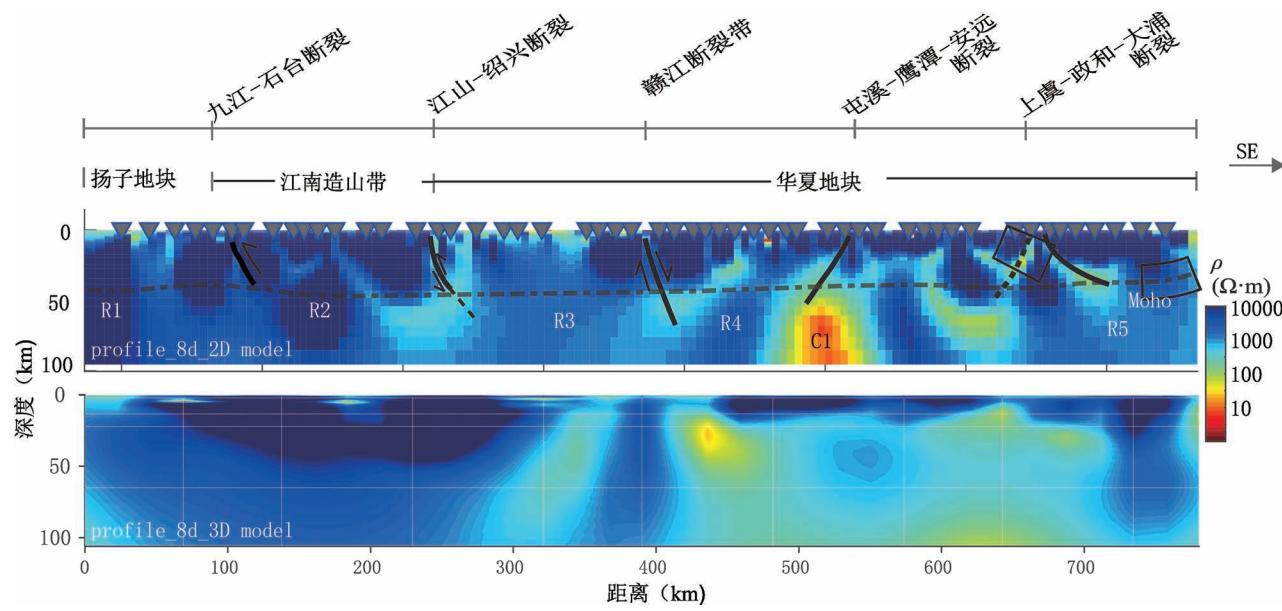


图 8 华南陆块东北部 8d 剖面电性结构模型及构造解释图

Fig. 8 Resistivity models from 2-D and 3-D inversions of the 8d profile in the northeastern South China Block and its geological interpretation

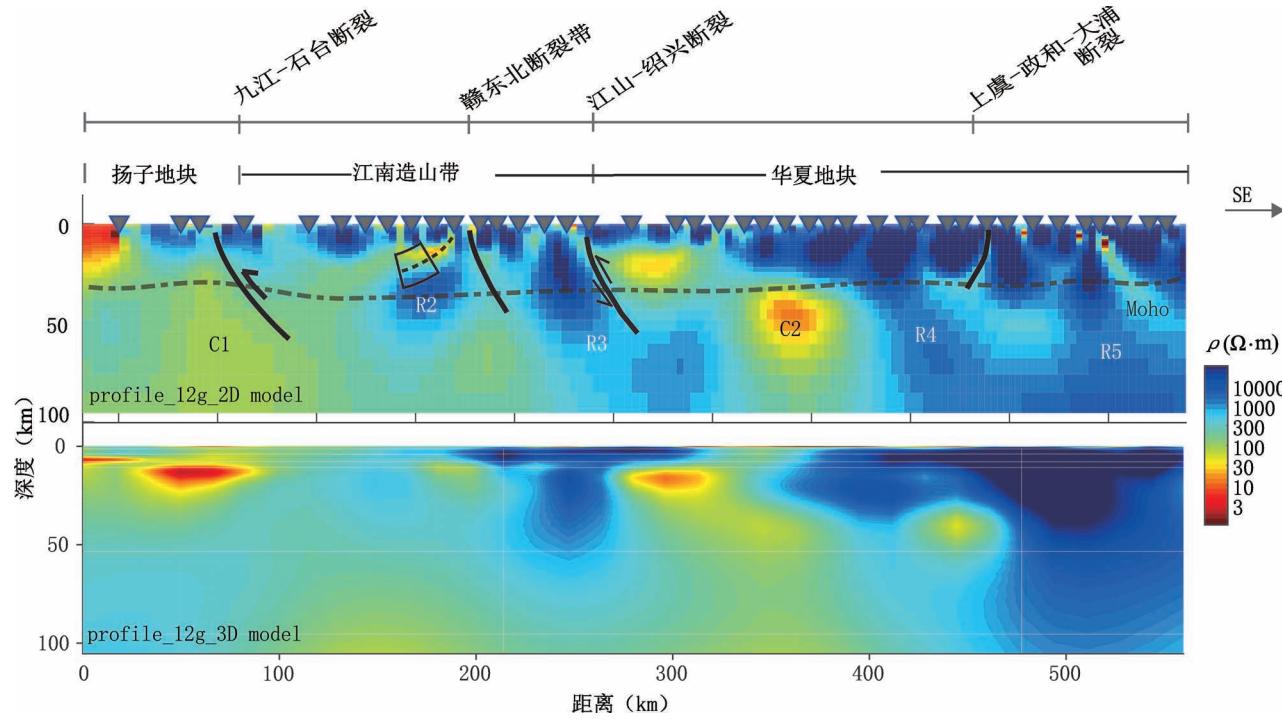


图 9 华南陆块东北部 12g 剖面电性结构模型及构造解释图

Fig. 9 Resistivity models from 2-D and 3-D inversions of the 12g profile in the northeastern South China Block and its geological interpretation

结晶基底,该基底已经越过江南造山带,在江绍断裂附近与华夏地块碰撞挤压,形成了江南造山带东边界断裂江山—绍兴断裂,模型反映该处下地壳电阻率明显减小,这样的电性转换特征也说明了该处地壳及深部结晶基底已经被破坏,为典型的造山型地

壳类型。江山—绍兴断裂表现为深大断裂构造特征,该断裂角度较缓,向东南倾斜并延伸至钦杭构造带深部,切割深度达到了近 100 km,为一逆冲断裂(余心起等,2005; Zhang Letian et al., 2015),野外地质调查也认为江绍断裂带应是一条岩石圈断裂

(杨明桂等,2009)。在断裂浅部存在深度约为几千米的层状低阻异常,实地地质调查研究认为可能是古生代沉积地层(余心起等,2005),并且以角度不整合覆盖于结晶基底之上(舒良树等,2004)。电性模型中华夏地块为普遍的高阻异常(如图8中R3、R4、R5所示),但是被8d剖面主要经过的赣江断裂带、屯溪—鹰潭—安远断裂及上虞—大浦—政和等断裂切割,各个被切割开的高阻块体内部并没有遭受到破坏,为稳定的高阻特性,电阻率值达到了 $10000\Omega\cdot m$ 。剖面中赣江断裂带规模较小,只发育在上地壳,切割深度50 km左右,前人综合研究结果已揭示该断裂为东倾正断层性质(梁兴和吴根耀,2006);屯溪—鹰潭—安远断裂发育在华夏地块内部,该断裂电性特征较复杂,在浅层断裂角度较缓,而深部倾斜角度较大,并变为西倾断裂,该断裂深部有热物质活动并上涌;上虞—大浦—政和断裂的电性特征显示为上地壳断裂,断裂仅仅切穿上地壳,这个与Zhang Letian等(2015)研究相符,同时前人的电阻率模型推测上虞—大浦—政和断裂可能在深部存在一个西倾的隐伏断裂(韩松,2017),这与本次研究结果相符合。本研究区莫霍面埋深根据前人的研究(熊小松等,2009; Zhou Longquan et al., 2012)在电性剖面中标出,模型指示莫霍面深度与高阻上地壳底界面基本相符。

12g剖面位于研究区最北边,横跨扬子地块、江南造山带及华夏地块三大地质构造单元,经过了九江—石台断裂、江山—绍兴断裂、赣东北断裂系及上虞—政和—大浦断裂等大型构造断裂,剖面总长度约580 km。通过12g与8d剖面的对比研究发现江南造山带往东北,在较短距离内电性结构发生了剧烈变化,我们认为这种短距离的电性结构突变指示了华南陆块已经历多期次构造改造,深部构造复杂多变的特征。

在12g剖面中已没有如8d剖面中那样高阻的扬子地块(如图8中R1所示),而江南造山带内仍存在规模很小的高阻块体R2(如图9中R2所示),相比于8d剖面R2(如图8中R2所示),其带内发育的高阻体R2规模明显减小,深部延伸深度约50 km,而且高阻体为东南倾斜的特征,与此同时,该处发育的江山—绍兴断裂切割深度达50 km,为逆冲断裂构造。江南造山带及赣东北断裂带中下地壳主要为低阻异常,其低阻物质甚至已经上侵至上地壳,我们推测后期地幔物质上涌破坏了上地壳原有的高阻属性,使得上地壳发生较大规模的热物质底侵改

造作用,而且越靠近江南造山带内底侵改造作用越明显,这说明挤压碰撞而导致的深部热扰动主要集中在结合带内。华夏地块整体表现为稳定的高阻块体特征,高阻体延伸深度达到了100 km,局部发育了上涌的低阻异常(如图9中C2所示),在三维模型中具有更明显的地幔物质上涌特征,但是总体来看东南部的华夏地块为较稳定的块体。上虞—政和—大浦断裂依旧是两条倾向不一致的断裂组成,并没有切穿上地壳,只是发育在上地壳的小型断裂。通过两条剖面对比发现屯溪—鹰潭—安远断裂只发育在北纬 $29^{\circ}$ 以南,在12g剖面中没有发现该断裂。

## 5 研究区构造涵义讨论

### 5.1 扬子、华夏地块接触关系

扬子和华夏地块接触关系的研究是目前华南大陆地质研究的主要争论所在。截止目前,前人已经从地质、地球物理、地球化学等各个方面开展相关研究,并取得一些重要认识。地质研究认为现今组成华南大陆的扬子地块和华夏地块在中、新元古代并不是统一的块体,而是由多个微陆块体拼合而成,主要为前寒武纪的陆壳块体,而且分布范围较大(王鸿祯和莫宣学,1996;舒良树,2006;于津海等,2006),指示板块拼接的赣东北蛇绿混杂岩带是华南陆块中唯一能确定的蛇绿混杂岩带,主要年代为距今900 Ma左右(张旗等,2001; Wang Yuejun et al., 2013b),并在武夷山地区普遍存在距今约900 Ma年的碎屑锆石(Wang Pengcheng et al., 2012; Wang Yuejun et al., 2012, 2013a),综上研究认为当时依然独立的扬子和华夏古板块在距今约900 Ma年时完成内部拼合,形成各自统一的地块(张国伟等,2013)。后期的研究发现存在于华南大陆中板溪群组的同位素化学测年及分布于雪峰山、九岭等地区的新生代超基性花岗岩锆石U-Pb定年距今约850~820 Ma(张国伟等,2013),并结合区域角度不整合等构造表现认为在850~820 Ma(晋宁期)之前形成完整的扬子古陆和华夏古陆碰撞拼合,并形成新元古代的江南造山带,标志着华南大陆统一基底的形成。但需要指出的是目前分布于赣东北蛇绿混杂岩带是扬子和华夏两个微陆块在新元古代的缝合线。再后来,在Rodinia超大陆裂解的构造条件影响下,华南大陆从南华纪开始进入拉张裂谷环境,形成了政和—大浦断裂及岩浆活动(舒良树,2012),最终成为陆内海盆所分割的陆内两个地块(张国伟等,2013)。根据沉积古地理环境研究以及江南造

山带周缘的碎屑锆石研究 (Wang Yuejun et al., 2013b), 认为在早古生代华夏地块与扬子地块之间并没有洋壳存在, 对于“古华南洋”还待商榷, 而且此时发生的面状分布的岩浆活动主要是由变质岩陆壳深融而成, 缺少新生的幔源物质 (王德滋和沈渭洲, 2003; 舒良树, 2012; Wang Yuejun et al., 2013a), 所以华南在早古生代经历的造山作用是没有洋壳参与的陆内造山作用。根据板溪群岩石属性及岩浆侵入的研究 (李献华, 2000; Xu Yigang et al., 2001; Shu Liangshu, 2006), 印支期华南大陆也发生了板块内相互作用的陆内造山作用。从中生代侏罗纪晚期开始, 华南大陆开始受到西太平洋板块的俯冲, 从而引发强烈的火山—岩浆侵入活动, 目前华南大陆东部主要分布的花岗岩大部分形成于新生代, 由于挤压而在扬子地块中形成走滑兼逆冲推覆构造 (舒良树, 2012; 张国伟等, 2013)。综上所述, 目前的研究认为扬子地块和华夏地块的接触关系经历了碰撞拼合—拉张伸展—多期陆内碰撞造山的三大构造过程。

本次通过 8d、12g 二维地电模型对扬子地块、江

南造山带以及华夏地块这三大地质构造单元接触关系的研究中发现, 各地质块体具有明显“横向分块”特征, 在江南造山带北段靠近长沙附近, 扬子地块与江南造山带都表现为高阻特征, 特别是扬子地块从上地壳至上地幔都为稳定的高阻异常 (如图 10 8d 剖面中 R1 所示), 而且江南造山带的中下地壳也为高阻特征 (如图 10 8d 剖面中 R2 所示), 我们推测高阻体 R1 及 R2 应为扬子前寒武纪结晶基底, 高阻的扬子结晶基底已经越过江南造山带西界到达江山—绍兴断裂附近, 与华夏地块挤压碰撞形成了江山—绍兴深大断裂, 地质调查认为江山—绍兴断裂为逆冲推覆构造 (张国伟等, 2013; 舒良树, 2012), 在电性模型中也得到了同样的结论。但江南造山带西边界断裂九江—石台断裂为小型断裂特征, 并没有明显切穿地壳, 据此推断扬子地块与华夏地块碰撞融合主要发生在江山—绍兴断裂附近。电性模型显示 8d 剖面经过的江南造山带中没有发现明显的岩浆上涌的通道, 上地壳未被后期的岩浆活动大范围的改造, 这也与 Zhao Guochun (2015) 对花岗岩的时空分布研究结果对应较一致。

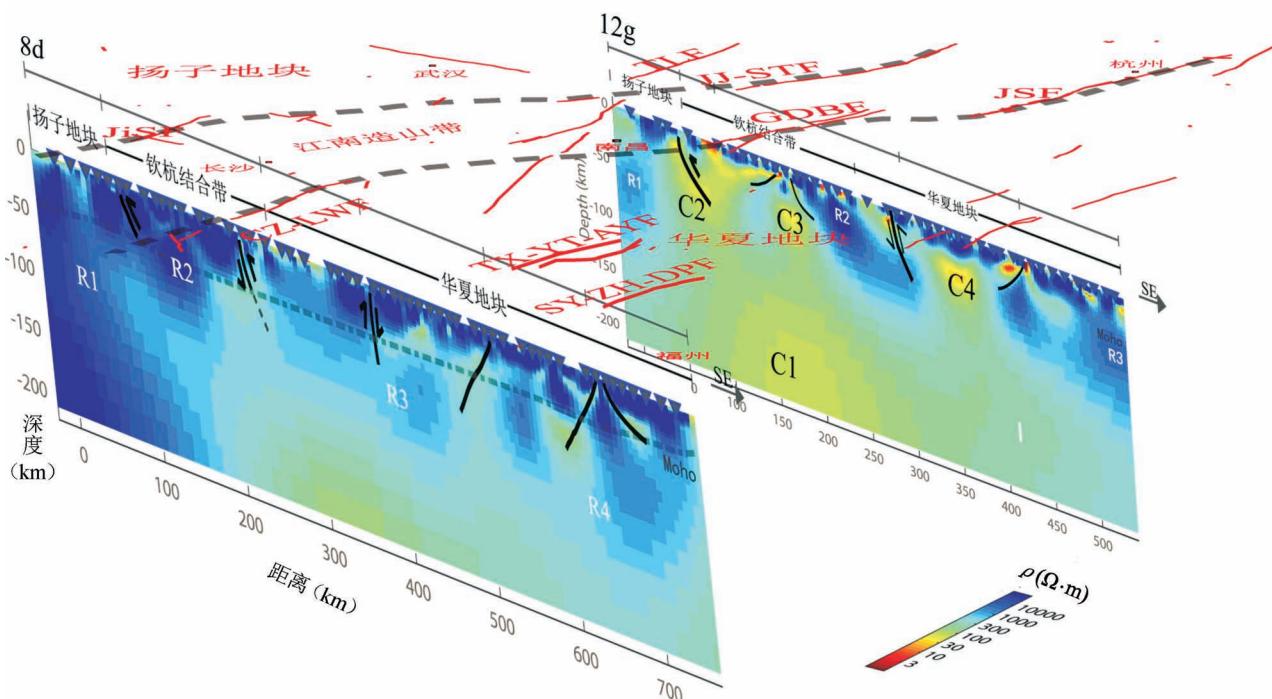


图 10 华南陆块东北部扬子地块与华夏地块接触关系的电性特征解释图

Fig. 10 Interpretation of electrical characteristics of the contact relationship between the Yangtze Block and the Cathaysia Block in the northeastern South China Block

JSF: 江绍断裂; GDBF: 篓东北断裂; JJ—STF: 九江—石台断裂; TLF: 郴庐断裂; JiSF: 吉首断裂; ZC—LWF: 郴州—临武断裂; TX—YT—AYF: 屯溪—鹰潭—安远断裂; SY—ZH—DPF: 上虞—政和—大浦断裂

JSF: Jiangshan—Shaoxing fault; GDBF: Northeast Jiangxi fault; JJ—STF: Jiujiang—Shitai fault; TLF: Tancheng—Lujiang fault; JiSF: Jishou fault; ZC—LWF: Chenzhou—Linwu fault; TX—YT—AYF: Tunxi—Yingtan—Anyuan fault; SY—ZH—DPF: Shangyu—Zhenghe—Dapu fault

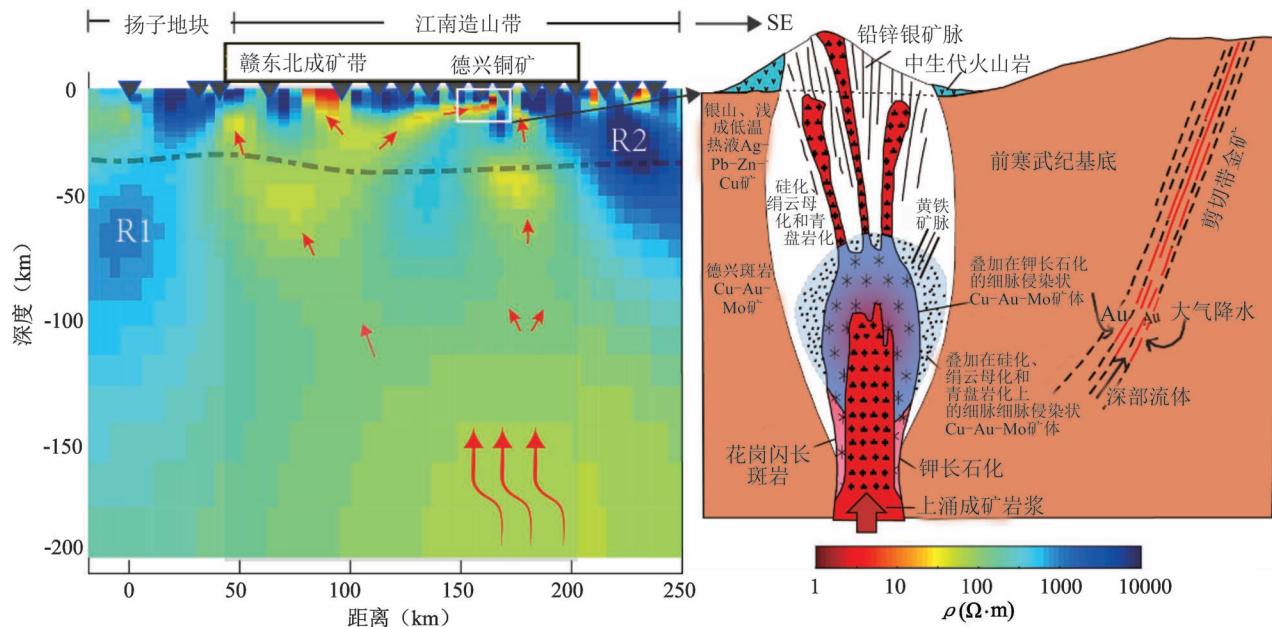


图 11 赣东北成矿带深部机制解释模型及德兴铜矿成矿模式简图(右图据毛景文等, 2009 修改)

Fig. 11 Interpretation model of deep mechanism of the Northeast Jiangxi Metallogenic Belt and the Metallogenic model of Dexing copper deposit (the right figure modified from Mao Jingwen et al., 2009&)

沿结合带往东北, 在研究区结合带的北段部位展布的 12g 剖面中, 扬子地块与华夏地块接触部位发现由上地幔延伸而上形成较大面积的低阻异常(如图 10 12g 剖面中 C1、C2、C3 所示), 该区域的扬子地块、江南造山带以及华夏地块地壳都被地幔上侵物质严重破坏, 特别是扬子地块和江南造山带破坏更是严重, 已经无法确认九江—石台、赣东北等断裂深部延伸情况, 只能在浅部看到断裂分布。在该区域由于深部热物质的上涌底侵而改造了扬子地块和华夏地块固有的块体接触关系, 因为当下的 MT 测深研究是对现有的构造情况的一种电性反映, 但是可以说明结合带的东北段部位受到的深部热扰动比西南段剧烈, 目前研究认为造成这种差异是因为在 146~130 Ma, 太平洋板块沿着平行于中国大陆边缘方向向西南俯冲, 首先改变了华南陆块东北部地壳厚度及结构(Li Xianhua et al., 2013; Zhang Yuzhi et al., 2013)。

综上所述, 在研究区西南部江南造山带内, 扬子地块与华夏地块存在较明显的块体碰撞挤压作用, 且这样的挤压作用主要集中在江山—绍兴断裂附近, 也是形成该断裂的主要深部原因, 而往东北, 特别是靠近赣东北断裂带附近存在明显的深部热物质上涌特征, 主要为低阻异常, 已改造扬子地块与华夏地块碰撞接触关系, 我们推测太平洋板块的俯冲对

研究区华南陆块东北部的影响较西南部剧烈。

## 5.2 赣东北成矿带深部机制讨论

江南造山带经历了多期构造造山成矿作用, 在晋宁期等早期形成的大多数矿床已经被破坏改造, 目前主要的矿床形成于中生代, 在印支期进一步矿化富集, 而在燕山期由于太平洋板块的俯冲导致大量花岗岩集中爆发侵入, 形成大规模矿床(毛景文等, 2004; Zhou Xinmin et al., 2006; Li Xianghua et al., 2007; 毛景文等, 2011)。本文涉及的赣东北成矿带现存的矿床主要分布于扬子、华夏两个古地块拼合处, 该矿带形成与燕山期酸性火山侵入岩有关的铜、铅锌、金、银等矿床, 主要受赣东北等 NNE 向断裂控制(徐磊等, 2012)。

为了进一步研究赣东北成矿带深部机制关系, 将穿过赣东北成矿带的 12g 剖面进行了深度为 200 km 的深部成矿机制研究(如图 11 所示)。陈毓川等(2014)认为赣东北断裂带与地幔沟通, 部分幔源物质参与了该成矿带的成矿成岩, 且成矿作用受断裂控制。虽然该矿带形成于燕山期, 但成矿系统是在深部过程驱动下形成的、具有自组织的能量及物质迁移汇聚系统, 系统在形成和演化过程中, 在岩石圈不同尺度上留下“痕迹”, 这种“痕迹”可以通过地球物理方法进行探测(吕庆田等, 2020)。电性模型中发现赣东北成矿带深部存在明显的岩浆热液底侵

现象,指示深部成矿物质从地幔上涌(如图 11 红色箭头所示),目前成矿研究认为赣东北成矿带成矿花岗岩为 I 型花岗岩,即幔源物质参与成矿,在 175 Ma 左右,由于伊泽奈奇板块向西北俯冲,使得江南造山带成为活动大陆边缘导致俯冲板块重熔,形成高钾钙碱质岩浆(毛景文等,2011),我们结合电性特征推测幔源成矿物质在上侵过程中由于赣东北等断裂的存在使得成矿岩浆中加入了较少地壳物质后形成德兴、银山、水平等铜矿,该上侵通道已经破坏或撕裂了赣东北成矿带高阻的上地壳,部分存在的上地壳厚度已经不足 10 km,该通道中因超壳断裂存在,使得地壳物质参与的比重应该很小,形成的与地幔相通的高钾钙碱质岩浆为赣东北成矿带提供幔源成矿元素,并且成矿岩浆继续沿着因赣东北断裂形成的冲断层、层间滑脱及次级断裂网络等上侵,最终富集成铜、锌、金等矿床,吕庆田等(2019)通过对长江中下游成矿带成矿系统的探测同样发现成矿带普遍存在壳内巨型逆冲断裂系统等岩浆/流体从深部迁移的主要“通道”;而陆内造山期形成的断裂网络和岩体接触带等成为成矿系统“末端”矿质沉淀的“场所”。可以说发育在赣东北成矿带中下地壳的低阻物质区是导致赣东北成矿的深部原因,这也与研究区天然地震研究结果一致(He Chuansong and Santosh, 2016)。

### 5.3 地球动力学意义

由华夏地块和扬子地块在元古代碰撞拼合而成了华南陆块,在古生代受到华北板块的挤压,自中生代以来受到了太平洋板块向西的俯冲影响,但是新生代构造叠加使得中生代太平洋板块俯冲的地质迹象被破坏,所以对华南中生代构造演化争议最多(毛建仁等,2014)。所以当下华南地区的构造模式是在多期构造活动下的总体反映,本文对地球动力学意义的讨论将以华南陆块东北部现今电性模型特征为基础,对华南现今构造特征影响最大、但争议最多的中生代岩浆活动做出对电性约束,讨论其地球动力学内容。

目前研究认为中生代以来的太平洋板块向欧亚大陆的俯冲导致了华夏地块从东南沿海到雪峰山近东西向的岩浆活动(Zhou Xinmin et al., 2006; Li Xianghua et al., 2007; 刘凯等,2016; 夏炎等,2016),并提出了多种俯冲模式假设。在研究区二维电性模型中华夏地块浅地表至 10 km 深度主要为高阻响应,推测这是研究区密集分布火成岩及华夏地块残存上地壳的电阻率特征响应。在实地地质调查中可

能无法完全正确圈定花岗岩范围,但是从地表至地下 10 km 的电性特征来看华南陆块东部大部分范围都被侵入岩占据,这也说明华南陆块东部上地壳破坏严重,可能发生过大面积的板片重融。

通过 8d 和 12g 剖面对比发现华夏地块东北部地壳厚度明显小于其西南部,说明华夏地块东北部较西南部受到了更大的深部热扰动。目前的地球动力学研究认为在 146~130 Ma, 太平洋板块沿着平行于中国大陆边缘方向向西南俯冲,首先改变了华南陆块东北部地壳厚度及结构,俯冲洋壳熔融在长江中下游形成早期的矿化和埃达克岩侵入(Li Xianhua et al., 2013; Zhang Guowei et al., 2013),我们的模型支持这个观点,电性模型指示研究区东北部地壳相较于西南部厚度明显更小、受到的热扰动更剧烈、时间更久。在 130 Ma 左右继续俯冲,并于华南陆块东南部下方形成板片窗,导致软流圈广泛上涌使得大陆岩石圈逐渐变薄,地壳的大规模熔融使得华南形成早白垩世长英质钾质火山岩(Zhao Liang et al., 2016)。印支期以来华南大陆从古亚洲洋域到太平洋域的转变,使其大地构造格局由东西向为主转变为北东向为主的构造体系(Wang Yuejun et al., 2013a; 毛建仁等,2013),在 120 Ma 左右,华南陆块前后受到太平洋板块俯冲发生 80°偏转转向西北的正向俯冲体系(Sun Weidong et al., 2007; 毛建仁等,2014; Zhao Liang et al., 2016)的强烈作用,而后俯冲的大洋板片在重力作用下逐步后撤,导致华南陆块东部出现拉张裂谷环境,我们的电性模型被屯溪—鹰潭—安远和上虞—大浦—政和等断裂切割的高阻微地块分散拼接特征支持这样的观点,裂谷环境使得华南陆块中出现了零星 A 型花岗岩类,而且这些 A 型花岗岩类分布特征显示出由内陆向沿海、由南向北逐渐年轻化趋势(夏炎等,2016)。所以华夏地块沿海火成岩带中向洋、向东北大致体现出年轻化趋势说明了太平洋板块先俯冲后再后撤,后撤过程中弧后伸展作用控制了华南陆块东部岩浆活动内陆向沿海迁移的过程(Zhou Xinmin et al., 2006; He Zhenyu and Xu Xisheng, 2012; Liu Lei et al., 2012, 2014; 夏炎等,2016),而且不同纬度板片后撤的时间也不同,在侏罗至白垩纪大致表现为南早北晚的非同步后撤(Liu Lei et al., 2016),这也是导致华南陆块中形成在侏罗至白垩纪形成大规模岩浆热液型矿床的主要深部动力学原因。

## 6 结论

本文通过华南陆块东北部大地电磁测深研究,

得出了华南陆块东北部岩石圈尺度的二维及三维电阻率模型,通过地电模型的地质—地球物理研究,就研究区华南陆块各块体之间的接触关系、江南造山带深部构造特征及区域动力学意义等地质问题进行了讨论,得出以下结论:

(1) 研究区西南段靠近长沙附近,在江南造山带内存在扬子地块与华夏地块碰撞挤压构造,高阻的扬子结晶基底已经越过江南造山带到达江山—绍兴断裂附近,与华夏地块挤压碰撞形成了江山—绍兴逆冲推覆深大断裂构造,而研究区东北段赣东北断裂附近,存在明显的深部物质上涌和底侵作用,已改造扬子与华夏地块原有接触关系。

(2) 赣东北成矿带深部存在明显的岩浆热液上涌现象,幔源成矿物质在上侵过程中由于赣东北等断裂的存在使得成矿岩浆上侵过程中混入少量分布于赣东北断裂两侧的地壳物质,形成的与地幔相通的高钾钙碱质岩浆为赣东北成矿带提供幔源成矿元素,最终富集成铜、锌、金等矿床,中下地壳的低阻异常区是导致成矿的深部物源。

(3) 华夏地块东北部地壳厚度明显小于其西南部,说明华夏地块东北部较西南部受到了更大深部热扰动,认为在 146~130 Ma, 太平洋板块沿着平行于中国大陆边缘方向向西南俯冲,首先改变了华南陆块东北部地壳厚度及结构,在 120 Ma 左右,太平洋板块俯冲发生 80°偏转转向西北的正向俯冲体系后,而后俯冲的大洋板片在重力作用下逐步后撤,我们的电性模型高阻微地块的分散拼接特征支持这样的观点。后撤形成的裂谷环境使得华南陆块中出现了由内陆向沿海、由南向北逐渐年轻化零星 A 型花岗岩类,大洋板块南早北晚的非同步后撤使得华南陆块在侏罗至白垩纪形成大规模岩浆热液型矿床的主要深部动力学原因。

## 参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

- 陈毓川, 王登红, 徐志刚, 黄凡. 2014. 华南区域成矿和中生代岩浆成矿规律概要. 大地构造与成矿学, 38(2): 219~229.
- 邓平, 舒良树, 肖旦红. 2002. 中国东南部晚中生代火成岩的基底探讨. 高校地质学报, 8(2): 169~179.
- 甘晓春, 李惠民, 孙大中, 金文山, 赵凤清. 1995. 浙西南早元古代花岗质岩石的年代. 岩石矿物学杂志, 14(1): 1~8.
- 甘晓春, 李惠民, 孙大中. 1993. 闽北前寒武纪基底的地质年代学研究. 福建地质, 12(1): 17~32.
- 韩松. 2017. 华南岩石圈三维电性结构及构造意义. 博士论文, 吉林大学.

- 江国明, 张贵宾, 吕庆田, 史大年, 徐晓. 2014. 长江中下游地区成矿深部动力学机制: 远震层析成像证据. 岩石学报, 30(4): 907~917.
- 李献华. 1998. 华南晋宁期造山运动——地质年代学和地球化学制约. 地球物理学报, 41(S1): 184~194.
- 李献华. 2000. 赣东北蛇绿混杂岩带中硅质岩的地球化学特征及构造意义. 中国科学: D 辑, 30(3): 284~290.
- 梁兴, 吴根耀. 2006. 赣江断裂带中生代的演化及其地球动力学背景. 地质科学, 41(1): 64~80.
- 刘国兴, 韩凯, 韩江涛. 2012. 华南东南沿海地区岩石圈电性结构. 吉林大学学报: 地球科学版, 42(2): 536~544.
- 刘凯, 厉子龙, 徐维光, 叶海敏, 赵希林, 胡逸州, 周静, 毛建仁. 2016. 华南中生代岩浆岩时空分布和迁移与古太平洋板块俯冲过程. 矿物岩石地球化学通报, 35(6): 1141~1155.
- 吕庆田, 孟贵祥, 严加永, 张昆, 龚雪婧, 高风霞. 2020. 长江中下游成矿带铁铜成矿系统结构的地球物理探测: 综合分析. 地学前缘, 27(2): 232~253.
- 吕庆田, 孟贵祥, 严加永, 张昆, 赵金花, 龚雪婧. 2019. 成矿系统的多尺度探测: 概念与进展——以长江中下游成矿带为例. 中国地质, 46(4): 673~689.
- 毛建仁, 厉子龙, 叶海敏. 2014. 华南中生代构造—岩浆活动研究: 现状与前景. 中国科学: 地球科学, 44(12): 2593~2617.
- 毛建仁, 叶海敏, 厉子龙, 刘凯, 邱瑞昭, 胡逸州, 赵希林, 周静. 2013. 钦杭结合带(东段)晚中生代挤压—伸展构造的岩浆活动与成矿记录. 矿物学报, 33(S2): 30~31.
- 毛景文, 陈懋弘, 袁顺达, 郭春丽. 2011. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律. 地质学报, 85(5): 636~658.
- 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 张长青, 梅燕雄. 2004. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展. 地学前缘, 11(1): 45~55.
- 饶家荣, 肖海云, 刘耀荣, 柏道远, 邓延林. 2012. 扬子、华夏古板块会聚带在湖南的位置. 地球物理学报, 55(2): 484~502.
- 舒良树, 周新民, 邓平, 余心起, 王彬, 祖辅平. 2004. 中国东南部中, 新生代盆地特征与构造演化. 地质通报, 23(9): 876~884.
- 舒良树. 2006. 华南前泥盆纪构造演化: 从华夏地块到加里东期造山带. 高校地质学报, 12(4): 418~431.
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征. 地质通报, 31(7): 1035~1053.
- 水涛. 1987. 中国东南大陆基底构造格局. 中国科学(B辑), 4(4): 414~422.
- 童迎世, 童琼. 2012. 湖南深部地球物理场特征与地震的关系. 高原地震, 24(1): 1~10.
- 王德滋, 沈渭洲. 2003. 中国东南部花岗岩成因与地壳演化. 地学前缘, 10(3): 209~220.
- 王鸿祯, 莫宣学. 1996. 中国地质构造述要. 中国地质, 23(8): 4~9.
- 魏文博, 金胜, 叶高峰, 王林飞, 谭捍东, 邓明, 方慧. 2003. 大陆岩石圈导电性的研究方法. 地学前缘, 10(1): 15~23.
- 魏文博. 2002. 我国大地电磁测深新进展及展望. 地球物理学进展, 17(2): 245~254.
- 夏炎, 刘磊, 徐夕生. 2016. 中国东南部晚中生代 A 型花岗岩类与古太平洋板块俯冲—后撤. 矿物岩石地球化学通报, 35(6): 1109~1119.
- 熊小松, 高锐, 李秋生, 卢占武, 王海燕, 李文辉, 管烨. 2009. 深地震探测揭示的华南地区莫霍面深度. 地球学报, 30(6): 774~786.
- 徐德明, 蔺志永, 龙文国, 张鲲, 王磊, 周岱, 黄皓. 2013. 钦杭成矿带的研究历史和现状. 华南地质与矿产, 28(4): 277~289.

- 徐磊, 李三忠, 刘鑫, 索艳慧, 吴奇, 王鹏程. 2012. 华南钦杭结合带东段成矿特征与构造背景. *海洋地质与第四纪地质*, 32(5): 57~66.
- 严加永, 吕庆田, 罗凡, 陈安国, 叶高峰, 张永谦, 张昆, 赵金花, 张冲, 刘振东. 2019. 钦杭何在? 来自综合地球物理探测的认识. *中国地质*, 46(4): 690~703.
- 杨明桂, 黄水保, 楼法生, 唐维新, 毛素斌. 2009. 中国东南陆区岩石圈结构与大规模成矿作用. *中国地质*, 36(3): 528~543.
- 杨明桂, 梅勇文. 1997. 钦—杭古板块结合带与成矿带的主要特征. *华南地质与矿产*, 13(3): 52~59.
- 于津海, 魏震洋, 王丽娟, 舒良树, 孙涛. 2006. 华夏地块: 一个由古老物质组成的年轻陆块. *高校地质学报*, 12(4): 440~447.
- 余心起, 舒良树, 颜铁增, 祖辅平. 2005. 赣杭构造带红层盆地原型及其沉积作用. *沉积学报*, 23(1): 12~20.
- 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. *中国科学: 地球科学*, 43(10): 1553~1582.
- 张季生, 洪大卫. 2002. 划分华南不同块体的地球物理根据及与地球化学分区特征的对比研究. *地球学报*, 23(2): 147~152.
- 张旗, 王焰, 钱青, 杨进辉, 王元龙, 赵太平, 郭光军. 2001. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造—成矿意义. *岩石学报*, 17(2): 236~244.
- 张岳桥, 徐先兵, 贾东, 舒良树. 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. *地学前缘*, 16(1): 234~247.
- Bahr K. 1988. Interpretation of the magnetotelluric impedance tensor: regional induction and local telluric distortion. *J. Geophys.*, 62: 119~127.
- Booker J R. 2014. The magnetotelluric phase tensor: a critical review. *Surveys in Geophysics*, 35: 7~40.
- Caldwell T G, Bibby H M, Brown C. 2004. The magnetotelluric phase tensor. *Geophysical Journal International*, 158: 457~469.
- Chen Yuchuan, Wang Denghong, Xu Zhigang, Huang Fan. 2014&. Outline of regional metallogeny of ore deposits associated with the Mesozoic magmatism in South China. *Geotectonica et Metallogenica*, 38(2): 219~229.
- Deng Ping, Shu Liangshu, Xiao Danhong. 2002&. A study on the tectonic basement of late Mesozoic igneous rocks in southeastern China. *Geological Journal of China Universities*, 8(2): 169~179.
- Dong Shuwen, Li Jianhua, Cawood P A, Gao Rui, Zhang Yueqiao, Xin Yujia. 2020. Mantle influx compensates crustal thinning beneath the Cathaysia Block, South China: Evidence from SINOPROBE reflection profiling. *Earth and Planetary Science Letters*, 544(4): 116360. DOI: 10.1016/j.epsl.2020.116360
- Gamble T D, Gouba W M, Clarke J. 1979. Magnetotellurics with a remote magnetic reference. *Geophysics*, 44: 53~68.
- Gan Xiaochun, Li Huimin, Sun Dazhong. 1993&. Geochronological study on the Precambrian metamorphic basement in northern Fujian. *Geology of Fujian*, 12(1): 17~32.
- Grabau A W. 1924. Migration of geosynclines. *Acta Geologica Sinica*, 3(3): 207~349.
- Groom R W, Bailey R C. 1989. Decomposition of magnetotelluric impedance tensors in the presence of local three-dimensional galvanic distortion. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94: 1913~1925.
- He Chuansong, Santosh M. 2016. Crustal evolution and metallogeny in relation to mantle dynamics: A perspective from P-wave tomography of the South China Block. *Lithos*, 263: 3~14.
- He Zhenyu, Xu Xisheng. 2012. Petrogenesis of the Late Yanshanian mantle-derived intrusions in southeastern China: Response to the geodynamics of paleo-Pacific plate subduction. *Chemical Geology*, 328: 208~221.
- Hu Haoyuan, Ye Gaofeng, Dong Ji'en, Wei Wenbo, Jin Sheng. 2020. 3-D lithospheric conductivity structures in the Cathaysia Block and the Jiangnan suture zone: implications for origins of metallogenic belts. *Journal of Applied Geophysics*, 177.
- Jiang Guoming, Zhang Guibin, Liu Qingtian, Shi Danian, Xu Yao. 2014&. Deep geodynamics of mineralization beneath the middle-lower reaches of Yangtze River: Evidence from teleseismic tomography. *Acta Petrologica Sinica*, 30(4): 907~917.
- Kelbert A, Meqbel N, Egbert G D, Tandon K. 2014. ModEM: A modular system for inversion of electromagnetic geophysical data. *Computers & Geosciences*, 66: 40~53.
- Li Xianhua, Li Zhengxiang, Li Wuxian, Liu Ying, Yuan Chao, Wei Gangjian, Qi Chuanshi. 2007. U-Pb zircon, geochemical and Sr—Nd—Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I- and A-type granites from central Guangdong, SE China: a major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab? *Lithos*, 96: 186~204.
- Li Xianhua, Li Zhengxiang, Li Wuxian, Wang Xuance, Gao Yuya. 2013. Revisiting the “C-type adakites” of the Lower Yangtze River Belt, central eastern China: In-situ zircon Hf—O isotope and geochemical constraints. *Chemical Geology*, 345: 1~15.
- Li Xianhua. 1998&. The Jinning orogeny in Southeast China: Geochronological and geochemical constraints. *Chinese Journal of Geophys.*, 41(S1): 184~194.
- Li Xianhua. 2000#. Geochemical characteristics and tectonic significance of siliceous rocks in the ophiolite melange belt of Northeast Jiangxi. *Science in China (Series D)*, 30(3): 284~290.
- Liang Xing, Wu Genyao. 2006&. Mesozoic evolution of the Ganjiang fault zone and related geodynamic settings. *Chinese Journal of Geology*, 41(1): 64~80.
- Liu Guoxing, Han Kai, Han Jiangtao. 2012&. Lithosphere electrical structure in southeast coastal region, South China. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(2): 536~544.
- Liu Kai, Li Zilong, Xu Weiguang, Ye Haimin, Zhao Xilin, Hu Yizhou, Zhou Jing, Mao Jianren. 2016&. The spatial—temporal distributions and migrations of mesozoic magma in South China and subduction process of the Paleo-Pacific plate. *Bulletin of Mineralogy, Petrology, and Geochemistry*, 35(6): 1141~1157.
- Liu Lei, Xu Xisheng, Xia Yan. 2014. Cretaceous Pacific plate movement beneath SE China: Evidence from episodic volcanism and related intrusions. *Tectonophysics*, 614: 170~184.
- Liu Lei, Xu Xisheng, Xia Yan. 2016. Asynchronizing paleo-Pacific slab rollback beneath SE China: Insights from the episodic Late Mesozoic volcanism. *Gondwana Research*, 37: 397~407.
- Liu Lei, Xu Xisheng, Zou Haibo. 2012. Episodic eruptions of the Late Mesozoic volcanic sequences in southeastern Zhejiang, SE China: Petrogenesis and implications for the geodynamics of paleo-Pacific subduction. *Lithos*, 154: 166~180.
- Lü Qingtian, Meng Guixiang, Yan Jiayong, Zhang Kun, Gong Xuejing, Gao Fengxia. 2020&. The geophysical exploration of Mesozoic iron—copper mineral system in the middle and lower reaches of the Yangtze River metallogenic belt: A synthesis. *Earth Science Frontiers*, 27(2): 232.
- Lü Qingtian, Meng Guixiang, Yan Jiayong, Zhang Kun, Zhao Jinhua,

- Gong Xuejing. 2019&. Multi-scale exploration of mineral system: Concept and progress—A case study in the middle and lower reaches of the Yangtze River metallogenic belt. *Geology in China*, 46(4): 673~689.
- Mao JianRen, Li ZiLong, Ye HaiMin. 2014&. Mesozoic tectono-magmatic activities in South China: Retrospect and prospect. *Science China (Earth Sciences)*, 44(12): 2593~2617.
- Mao Jianren, Ye Haimin, Li Zilong, Liu Kai, Qiu Ruizhao, Hu Yizhou, Zhao Xilin, Zhou Jing. 2013&. The magmatic activity and metallogenic records of late Mesozoic compressional and elongation of the Chin—Hang-zone (eastern segment). *Acta Mineralogica Sinica*, 33(S2): 30~31.
- Mao Jingwen, Chen Maohong, Yuan Shunda. 2011&. Geological characteristics of the Qinhang (or Shihang) metallogenic belt in South China and spatial—temporal distribution regularity of mineral deposits. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 636~658.
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Li Xiaofeng, Zhang Changqing, Mei Yanxiong&. 2004. Mesozoic large scale mineralization and multiple lithospheric extension in South China. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 45~55.
- Qiu Yumin, Gao Shan, McNaughton N J, Groves D I, Ling Wenli. 2000. First evidence of > 3.2 Ga continental crust in the Yangtze craton of south China and its implications for Archean crustal evolution and Phanerozoic tectonics. *Geology*, 28: 11~14.
- Rao Jiarong, Xiao Haiyun, Liu Yaorong, Bai Daoyuan, Deng Yanlin. 2012&. Location of the Yangtze—Cathaysia plate convergence zone in Hunan. *Chinese Journal of Geophysics—Chinese Edition*, 55(2): 484~502.
- Rodi W, Mackie R L. 2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion. *Geophysics*, 66: 174~187.
- Shu Liangshu. 2006&. Predevonian tectonic evolution of South China: from Cathaysian block to Caledonian Period folded orogenic belt. *Geological Journal of China Universities*, 12(4): 418~431. Shu Liangshu. 2006. Predevonian tectonic evolution of South China: from Cathaysian block to Caledonian Period folded orogenic belt. *Geological Journal of China Universities*, 12: 418~431.
- Shu Liangshu. 2012&. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block. *Geological Bulletin of China*, 31(7): 1035~1053.
- Shu Liangshu, Zhou Xinmin, Deng Ping, Yu Xinqi, Wang Bin, Zu Fuping. 2004&. Geological features and tectonic evolution of Meso—Cenozoic basins in southeastern China. *Regional Geology of China*, 23(Suppl. 2): 876~884.
- Shui Tao. 1987 #. Tectonic framework of continental basement of Southeast China. *Science China (Series B)*, 4(4): 414~422.
- Siripunvaraporn W, Egbert G, Lenbury Y, Uyeshima M. 2005. Three-dimensional magnetotelluric inversion: data-space method. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 150: 3~14.
- Sun Weidong, Ding Xing, Hu Yanhua, Li Xianhua. 2007. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific. *Earth and Planetary Science Letters*, 262: 533~542.
- Tong Yingshi, Tong Qiong. 2012&. Relationship between deep geophysical field features and earthquakes in Hunan province. *Plateau Earthquake Research*, 24(1): 1~10.
- Varentsov I M, Sokolova E Y, Martanus E, Nalivaiko K. 2003. System of electromagnetic field transfer operators for the BEAR array of simultaneous soundings: methods and results. *Izvestiya Physics of the Solid Earth*, 39: 118~148.
- Wang Dezi, Shen Weizhou. 2003&. Genesis of granitoids and crustal evolution in southeast China. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 209~220.
- Wang Hongzhen, Mo Xuanxue. 1996 #. The geological structure of China. *Geology in China*, 23(8): 4~9.
- Wang Pengcheng, Li Sanzhong, Liu Xin, Yu Shan, Suo Yanhui, Xue Youchen, An Huiting. 2012. Yanshanian fold—thrust tectonics and dynamics in the Middle—Lower Yangtze River area, China. *Acta Petrologica Sinica*, 28: 3418~3430.
- Wang Yuejun, Fan Weiming, Zhang Guowei, Zhang Yanhua. 2013a. Phanerozoic tectonics of the South China Block: Key observations and controversies. *Gondwana Research*, 23: 1273~1305.
- Wang Yuejun, Wu Chunming, Zhang Aimei, Fan Weiming, Zhang Yanhua, Zhang Yuzhi, Peng Touping, Yin Changqin. 2012. Kwangssian and Indosian reworking of the eastern South China Block: Constraints on zircon U-Pb geochronology and metamorphism of amphibolites and granulites. *Lithos*, 150: 227~242.
- Wang Yuejun, Zhang Aimei, Cawood P A, Fan Weiming, Xu Jifeng, Zhang Guowei, Zhang Yuzhi. 2013b. Geochronological, geochemical and Nd—Hf—Os isotopic fingerprinting of an early Neoproterozoic arc—back-arc system in South China and its accretionary assembly along the margin of Rodinia. *Precambrian Research*, 231: 343~371.
- Wei Wenbo, Jin Sheng, Ye Gaofeng, Wang Linfei, Tan Handong, Deng Ming, Fang Hui. 2003&. Methods to study electrical conductivity of continental lithosphere. *Earth Science Frontiers*, 10(1): 15~24.
- Wei Wenbo. 2002&. New advance and prospect of magnetotelluric sounding (MT) in China. *Progress in Geophysics*, 17(2): 245~254.
- Xia Yan, Liu Lei, Xu Xisheng. 2016&. Late Mesozoic A-type granitoids in SE China and Paleo-Pacific plate subduction and slab rollback. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35(6): 1109~1119.
- Xiong Xiaosong, Gao Rui, Li Qiusheng, Lu Zhanwu, Wang Haiyan, Li Wenhui, Guan Ye. 2009&. The moho depth of South China revealed by seismic probing. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(6): 774~786.
- Xu Deming, Lin Zhiyong, Long Wenguo, Zhang Kun, Wang Lei, Zhou Dai, Huang Hao. 2012&. Research history and current situation of Qinzhou—Hangzhou metallogenic belt, South China. *Geology and Mineral Resources of South China*, 28(4): 277~289.
- Xu Lei, Li Sanzhong, Liu Xin, Suo Yanhui, Wu Qi, Wang Pengcheng. 2012&. Tectonic settings and metallogenesis of the eastern segment of the Qin—Hang belt, South China. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 32(5): 57~66.
- Xu Yigang, Chung Sunlin, Jahn B-M, Wu Genyao. 2001. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian—Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China. *Lithos*, 58: 145~168.
- Yan Jiayong, Lü Qingtian, Luo Fan, Chen Anguo, Ye Gaofeng, Zhang Yongqian, Zhang Kun, Zhao Jinhua, Zhang Chong, Liu Zhendong, Liu Yan. 2019&. Where is Qinzhou—Hangzhou juncture belt? Evidence from integrated geophysical exploration. *Geology in China*, 46(4): 690~703.
- Yang Minggui, Huang Shuibao, Lou Fasheng, Tang Wenxin, Mao Subin. 2009&. Lithospheric structure and large-scale metallogenic process in Southeast China continental area. *Geology in China*, 36

- (3) : 528~543.
- Yang Minggui, Mei Yongweng. 1997&. Characteristics of geology and metallization in the Qinzhou—Hangzhou paleoplute juncture. *Geology and Mineral Resources of South China*, 13(3) : 52~59.
- Yu Jinhai, Wei Zhenyang, Wang Lijuan, Shu Liangshu, Sun Tao. 2006&. Cathaysia block: A young continent comprising ancient materials. *Geological Journal of China Universities*, 12(4) : 440~447.
- Yu Xinqi, Shu Liangshu, Yan Tiezeng, Zu Fuping. 2005&. Prototype and sedimentation of red basins along the Ganhong tectonic belt. *Acta Sedimentologica Sinica*, 23(1) : 12~20.
- Zhang Guowei, Guo Ailin, Wang Yuejun, Li Sanzhong, Dong Yunpeng, Liu Shaofeng, He Dengfa. 2013. Tectonics of South China Continent and its implications. *Science China*, 56 : 1804~1828.
- Zhang Guowei, Guo Anlin, Wang Yuejun, Li Sanzhong, Dong Yunpeng, Liu Shaofeng, He Dengfa. 2013&. Tectonics of South China continent and its implications. *Science China*, 56 (11) : 1804 ~ 1828.
- Zhang Jisheng, Hong Dawei. 2002&. The division of South China continent into different blocks based on geophysical evidence and comparison of geochemical features in different regions. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(2) : 147~152.
- Zhang Letian, Jin Sheng, Wei Wenbo, Ye Gaofeng, Jing Jian'en, Dong Hao, Xie Chengliang. 2015. Lithospheric electrical structure of South China imaged by magnetotelluric data and its tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 98 : 178~187.
- Zhang Qi, Wang Yan, Qian Qing, Yang Jinhui, Wang Yuanlong, Zhao Taiping, Guo Guangjun. 2001&. The characteristics and tectonic—metallogenic significances of the adakites in Yanshan period from eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2) : 236~244.
- Zhang Shaobing, Zheng Yongfei. 2013. Formation and evolution of Precambrian continental lithosphere in South China. *Gondwana Research*, 23 : 1241~1260.
- Zhang Yueqiao, Xu Xianbing, Jia Dong, Shu Liangshu. 2009&. Deformation record of the change from Indosian collisionrelated tectonic system to Yanshanian subduction- related tectonic system in South China during the Early Mesozoic. *Earth Science Frontiers*, 16 (1) : 234~247.
- Zhang Yuzhi, Wang Yuejun, Geng Hongyan, Zhang Yanhua, Fan Weiming, Zhong Hong. 2013. Early Neoproterozoic (~850 Ma) back-arc basin in the Central Jiangnan orogen ( Eastern South China) : Geochronological and petrogenetic constraints from metabasalts. *Precambrian Research*, 231 : 325~342.
- Zhang Zhongjie, Xu Tao, Zhao Bing, Badal J. 2013. Systematic variations in seismic velocity and reflection in the crust of Cathaysia: new constraints on intraplate orogeny in the South China continent. *Gondwana Research*, 24 : 902~917.
- Zhao Guochun. 2015. Jiangnan orogen in South China: Developing from divergent double subduction. *Gondwana Research*, 27 : 1173 ~ 1180.
- Zhao Liang, Guo Feng, Fan Weiming, Zhang Qingwen, Wu Yangming, Li Jingyan, Yan Wen. 2016. Early Cretaceous potassic volcanic rocks in the Jiangnan orogenic belt, East China: Crustal melting in response to subduction of the Pacific—Izanagi ridge? *Chemical Geology*, 437 : 30~43.
- Zhou Longquan, Xie Jiayi, Shen Weisen, Zheng Yong, Yang Yingjie, Shi Haixia, Ritzwoller M H. 2012. The structure of the crust and uppermost mantle beneath South China from ambient noise and earthquake tomography. *Geophysical Journal International*, 189 : 1565~1583.
- Zhou Xinmin, Sun Tao, Shen Weizhou, Shu Liangshu, Niu Yaoling. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: a response to tectonic evolution. *Episodes*, 29 : 26.

## Structural characteristics, mineralization and dynamic mechanism of the northeast South China Block: Understanding from magnetotelluric data

DONG Ji' en<sup>1, 2)</sup>, YE Gaofeng<sup>1)</sup>, WEI Wenbo<sup>1)</sup>, JIN Sheng<sup>1)</sup>, LI Yulong<sup>2)</sup>,  
DONG Xiaojun<sup>2)</sup>, WEI Youning<sup>2)</sup>

1) School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing, 100083;

2) Geological Survey of Qinghai, Xining, 810000

**Objectives:** It is generally believed that the South China Block was formed by the collision of the Yangtze Craton and the Cathaysia Block along the Jiangnan Orogenic Belt in the Proterozoic, and then experienced multiple periods of complex magmatic—tectonic geological activities such as intracontinental orogeny and oceanic subduction. However, the geological features of the South China Block have not been well-explored so far due to the complex structurally geological environment, especially the spatial contact relationships of multiple blocks, deep mineralization characteristics, and regional geological dynamics.

**Methods:** In our work, we performed 2D and 3D magnetotelluric inversions using the two MT profiles (i. e., 8d and 12g) collected from the programs of the crustal electrical structure of the Jiangnan Orogenic Belt and its adjacent areas, and SinoProbe project. Through the fine analysis and processing of the magnetotelluric sounding data, the lithospheric-scale 2-D MT profiles of the vicinity of the northeastern South China block were inverted using the TE- and TM- mode data with NonLinear Conjugate Gradient (NLCG) algorithm integrated in the

WinGLink software. Besides, a 3-D electrical model of the study area is obtained from the inversion result of full-impedance tensor data using the ModEM inversion program, which is also based on the NLCG algorithm.

**Results:** According to the electrical structures of the eastern Yangtze Block, the northeastern section of the Jiangnan Orogenic Belt and the Cathaysia Block in the study area, we noticed the mosaic structure caused by the collision of the Yangtze Block and the Cathaysia Block in the southwest section of the Jiangnan Orogenic Belt. The Yangtze Block crossed the Jiangnan Orogenic Belt and squeezed the Cathaysia Block at the location of the Jiangshao fault, which results in deep thrusting faults (e.g., Jiangshao fault). Although Jiangshao fault is an active fault, the contact relationship of the blocks was renewed by the invading mantle material in the northeast. The deep structures of faults, such as the Jiangshao and the Northeast Jiangxi, have been drastically modified. We propose that the upwelling of deep thermal materials is the primary reason for the deep dynamics of magmatic hydrothermal deposits, like gold and silver. According to the electrical characteristics, the Cathaysia Block is characterized by the high-resistivity upper crust and magma intruded middle and lower crust. The Tunxi—Yingtan—Anyuan and the Shangyu—Dapu—Zhenghe faults in the Cathaysia Block are deep and large faults, extended a depth of more than 50 km.

**Conclusions:** Due to the subduction and retreat of the Paleo-Pacific Plate since the Mesozoic, the upper crust of the eastern South China Block was seriously damaged according to the result of surface intrusive rock mapping. Our resistivity models illustrate the existence of slab remelting in a large area. Also, the northeastern crust of the research area is thinned compared with the southwestern one, indicating it was modified severely by thermal disturbance caused by the subduction of the Paleo-Pacific Plate and post-modification.

**Keywords:** magnetotellurics; South China block; Jiangnan Orogenic belt; contact relationship; asthenospheric upwelling

**Acknowledgements:** This study is jointly funded by National Key R & D Plan (No. 2017YFC0601406), project SINOPROBE on sub-project SINOPROBE-01, and China Geological Survey (Nos. DD20160082 and DD20190012)

**First author:** DONG Ji'en, male, born in 1992, master's degree in geophysics at China University of Geosciences, Beijing; Email: dongji'en@outlook.com

**Corresponding author:** YE Gaofeng, male, born in 1977, professor, engaged in teaching and research of electric exploration and geoelectric methods; Email: ygf@cugb.edu.cn

**Manuscript received on:** 2021-09-18; **Accepted on:** 2022-01-26; **Network published on:** 2022-02-20

**Doi:** 10. 16509/j. georeview. 2022. 02. 021

**Edited by:** LIU Zhiqiang