

长江中下游成矿带及典型矿集区深部结构探测 ——SinoProbe-03 年度进展综述

吕庆田¹⁾, 史大年¹⁾, 汤井田²⁾, 吴明安³⁾, 常印佛⁴⁾, SinoProbe-03-CJ项目组

1) 中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

2) 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083;

3) 安徽省地质调查院, 安徽合肥 230001;

4) 安徽省国土资源厅, 安徽合肥 230088

摘要: 大陆现今的地壳结构和物质组成是地壳经历了复杂的动力学演化过程形成的“产品”, 保留着演化过程中重大地质事件留下的痕迹, 使用现代地球物理探测技术对这个“产品”进行成像, 不仅可以了解现今的构造和物质状态, 还可以推演过去曾经发生的动力学过程。长江中下游成矿带是我国重要的铁、铜多金属资源基地, 其形成的深部动力学过程一直是矿床学家关注、争论的焦点。2010年 SinoProbe-03 项目在长江中下游成矿带完成了 300 km 的宽频地震探测, 在庐枞矿集区完成了 5 条剖面累计 250 km 的反射地震、MT 和地球化学剖面测量, 经初步处理分析, 取得了一系列重要发现, 包括成矿带上地幔存在低速体, 地幔各向异性呈小尺度变化特征, Moho 面存在局部隆起, 岩石圈底部界面模糊, 地壳呈双层结构, 上地壳厚度明显大于下地壳, 并且经历了早期强烈挤压、后期伸展的变形过程等。这些新发现支持软流圈上隆、岩石圈减薄, 富集地幔熔融、下地壳增厚、拆沉的深部动力学模式, 并可解释成矿带普遍发育的白垩纪埃达克岩(adakite)、橄榄玄粗岩(shoshonite)的成因和长江中下游巨型成矿带的形成。

关键词: 宽频地震; 反射地震; 大地电磁; 层析成像; 各向异性; 接收函数; 地壳结构

中图分类号: P542.1; P61 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2011.03.01

Probing on Deep Structure of Middle and Lower Reaches of the Yangtze Metallogenic Belt and Typical Ore Concentration Area: A Review of Annual Progress of SinoProbe-03

LÜ Qing-tian¹⁾, SHI Da-nian¹⁾, TANG Jing-tian²⁾, WU Ming-an³⁾, CHANG Yin-fo⁴⁾,
SinoProbe-03-CJ Team

1) *MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;*

2) *School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha, Hunan 410083;*

3) *Geological Survey of Anhui Province, Hefei, Anhui 230001;*

4) *Department of land and Resources of Anhui Provinces, Hefei, Anhui 230088*

Abstract: The present crustal structure and composition are "products" of complex geodynamic processes through geological time, which maintains the relics and fabrics formed during the major geological movement. The image of the "products" based on modern geophysical technology can help not only comprehend the current state of the

本文由国家科技专项“深部矿产资源立体探测技术与试验”(编号: SinoProbe-03)、国家自然科学基金重点基金项目(编号: 40930418)联合资助。获中国地质科学院 2010 年度十大科技进展第五名。

收稿日期: 2011-04-20; 改回日期: 2011-04-22。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 吕庆田, 男, 1964 年生。研究员, 博士生导师。主要从事深部探测和金属矿勘查技术方法研究。E-mail: lqt@cags.ac.cn。SinoProbe-03-CJ 项目组成员还有: 薛爱民, 张贵宾, 张中杰, 孟小红, 韩立国, 李桐林, 邓居智, 严加永, 江国明, 肖晓, 李兵, 杜建国, 周涛发, 徐文艺, 孟祥金, 徐晓春等。

structure and material, but also deduce the geodynamic events occurred in the geological time. The middle and lower reaches of Yangtze River metallogenic belt is an important iron, copper and polymetallic base in China, whose deep dynamic processes have constituted the debate focus among researchers. In 2010, a broadband seismic detection about 300km long has been performed in this belt by SinoProbe-03 project, and five seismic reflection, MT and geochemical profiles totally 250km long have been completed over Lujiang-Zongyang ore concentration area. A couple of significant discoveries were made on the basis of preliminary processing and analysis, such as the existence of low-velocity bodies in the upper mantle of the metallogenic belt, short-distance variations of upper mantle anisotropy, local Moho uplift, blur interface between lithosphere and asthenosphere, double-layer crustal structure with thicker upper crust than lower crust. The reflection pattern of crust indicates that it has experienced early compression and later extensional deformation. These discoveries support the dynamic model of asthenosphere uplift, lithospheric thinning, melting of enriched mantle and lower crust thickening and delamination. With these discovers, the extensive development of Cretaceous adakite, shoshonite in metallogenic belt and the causes for the formation of the giant Yangtze River metallogenic belt can also be explained.

Key words: Broadband Seismics; Reflection Seismics; Magnetotelluric; Tomography; Anisotropy; Receiver function; Crustal structure

长江中下游成矿带是我国东部重要的 Cu、Fe、Au、S 多金属资源基地, 由 7 个大型矿集区、200 多个大中型矿床组成, 从北东到南西依次为宁镇矿集区、宁芜矿集区、铜陵繁昌矿集区、庐枞矿集区、贵池矿集区、九瑞矿集区和鄂东南矿集区(图 1), 区域上呈狭窄的带状分布(Pan et al., 1999)。为什么在此狭窄的空间内发生了如此大规模的巨量金属富集? 长期以来一直是矿床学家的难解之谜。探测成矿带所根植的深部地壳结构, 分析控制区域成矿作用的动力学演化过程对理解成矿带的成因机制、预测新的矿集区至关重要。

地壳深部结构和物质组成保留着其形成和动力学演化过程中重大地质事件留下的痕迹, 比如造山、伸展、拆沉、底侵等, 使用现代地球物理技术对地壳结构进行精细成像, 可以推演过去曾经发生的重大地质事件, 从而可以了解巨量金属富集的深部奥秘。在国家“深部矿产资源立体探测技术与实验(SinoProbe-03)”专项项目支持下, 2010 年在长江中下游成矿带部署了 300 km 的宽频地震探测, 在庐枞矿集区开展了 5 条地震反射、MT 和钻孔地球化学测量工作(吕庆田等, 2011), 经数据处理, 取得了初步成果。该成果被评为 2010 年中国地质科学院年度 10 大进展之一, 应《地球学报》的邀请, 本文介绍项目 2010 年的主要工作, 并对取得的初步成果进行综合分析, 提出了关于成矿带深部构造背景和变形历史的初步认识。需要特别指出的是, 由于项目数据量巨大, 无论是远震地震层析成像, 还是反射地震处理结果都是非常初步的, 尤其是宽频地震层析成像、接收函数成像和各向异性参数计算结果, 还有待使用更多的地震数据提高反演的分辨率, 确

认成像的可靠性。

1 区域构造地质背景

长江中下游成矿带(又称中下扬子)构造上位于大别-苏鲁超高压(UHP)变质带的前陆。北西以襄樊-广济深断裂、郟庐左旋走滑断裂为界, 南东以阳新-常州断裂为界, 总体上呈北西狭窄、北东宽阔的“V”字型地带(常印佛等, 1991), 并呈北东—南西向狭窄的负地形, 又称为下扬子拗陷。长江中下游成矿带属于扬子陆块北东缘的一部分, 而扬子陆块本身又由两个前寒武纪陆核组成: 即太古(?)—古元古(约

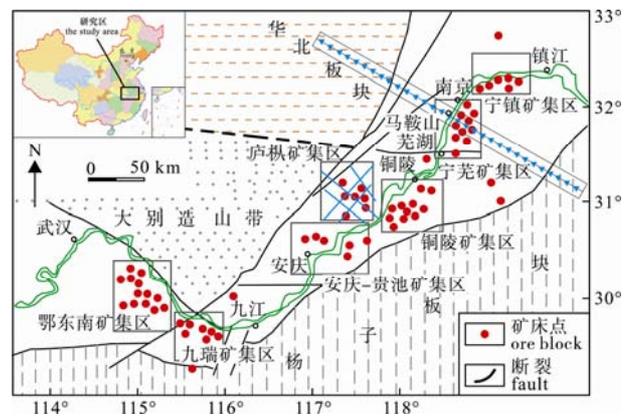


图 1 长江中下游成矿带主要矿集区、矿床分布及地震剖面位置示意图(据 Pan et al., 1999; 周涛发, 2008 改绘)

Fig. 1 Sketch map showing the distribution of major ore Concentration areas, deposits and the location of seismic profiles over the middle and lower reaches of the Yangtze River (after Pan et al., 1999; ZHOU Tao-fa, 2008)

蓝色三角形代表宽频台站位置, 蓝色线条表示庐枞矿集区反射地震、MT 和钻孔地球化学剖面位置

The blue triangles denote the locations of broadband station, Blue lines indicate the locations of seismic reflection, MT and borehole geochemical profiles over Luzong ore Concentration area

1800 Ma)的扬子陆块和古元古-中元古的华夏陆块,二者在晚中元古-早新元古时期(晋宁运动)碰撞拼贴在一起(Li, 1998),后期又经历了陆内裂谷和造山运动。震旦纪之后形成了统一盖层,震旦系-志留系为稳定的陆表海碳酸盐岩→碎屑岩相沉积,加里东运动隆起成陆,缺失下-中泥盆统;海西期沉积了上泥盆统-下三叠统的碎屑岩、碳酸盐岩和海陆交互含煤系建造,其间剧烈的升降运动形成了多个平行不整合面,造成下石炭统部分地层缺失,而在上石炭统底部形成块状硫化物层,在二叠系形成孤峰和大隆组深水硅质岩。中三叠世受印支运动影响,构成扬子板块与华北板块碰撞的前陆带(董树文, 1991),主要为局限海含膏盐碳酸盐岩沉积,之后开始大规模褶皱隆升,至中侏罗世发育陆相盆地沉积。上侏罗统-下白垩统为燕山期大规模构造-岩浆活动形成的一套钙碱性-碱性火山岩、火山碎屑岩建造,指示本区进入陆内伸展构造环境。伴随燕山期强烈的构造-岩浆-成矿活动,形成长江中下游成矿带现今的主体面貌,其成矿作用呈现“层控”和“多位一体”的规律(常印佛等, 1991; 周涛发, 2008)。

在区域布伽重力异常图上,成矿带对应“鼻”状正异常带,很多专家认为该正异常由地幔隆起引起(唐永成等, 1986),也可能由于地壳密度较大别或江南隆起高所致,因为大别和南东测的江南隆起由大面积低密度花岗岩分布。对应地表郟庐断裂和阳新-常州断裂的位置,重力异常呈现密集梯度带,对应地壳厚度的陡变带,或密度变化带。经过高通滤波后的局部重力异常呈现北东走向、高低相间分布的异常特征(吕庆田等, 2004),从地表地质可以推测,这些高、低异常分别对应上地壳的局部隆起(古生代-中生代沉积地层)和中新生代的断陷盆地。

成矿带的岩浆活动集中出现在 145 ~ 120 Ma,是伸展构造背景的产物。根据岩浆岩的岩石学、元素和同位素地球化学,可以将其划分为高钾(富碱)钙碱性系列和橄榄安粗岩系列(毛建人等, 1997)。很多学者研究认为(王强等, 2001, 2003; Xu et al., 2002),岩浆岩具有幔源特征,为富集地幔的玄武岩浆底侵到地壳底部,发生熔融后经分离结晶形成的。岩浆岩的空间分布在区域航磁异常图上十分清楚(吕庆田等, 2004),主要分布在两个带上,即怀宁-枞阳-庐江东,铜陵-繁昌-马鞍山-南京。磁异常轴向一般呈北东走向,与火山岩、中酸性侵入岩分布范围基本吻合。南京—镇江一线出现近东西向的线性负异常,并且平行近东西走向的山脉,是区分长

江中下游南北之间的重要构造分界线。郟庐断裂两侧磁异常存在重大差异,西侧磁线性构造呈北西走向,东侧磁线性构造呈北东走向。反应出郟庐断裂东、西两侧的构造变形是在两种构造体制下形成的。

关于长江中下游岩浆岩带形成的构造背景有很多模型,并且存在较大争议。Lapierre 等(1997)认为晚侏罗-早白垩纪该地区属于安第斯型的板块边缘,发育陆源岩浆弧,岩浆活动与古太平洋板块西向俯冲有关,晚白垩纪以后古太平洋板块停止俯冲,该地区转为伸展环境,形成 NE 向的断陷盆地,并伴随有大陆拉斑玄武岩和碱性流纹岩的喷出; Zhou and Li(2000)提出在 180 ~ 80 Ma 之间,由于古太平洋板块俯冲角度从低角度向中等角度的变化,华南大陆岩浆活动从远离俯冲边界近 1000 km 的内陆逐渐向大洋方向退缩,退缩过程中由于不同倾角的地幔楔熔融和底侵作用,导致中下地壳熔融形成了华南大规模酸性岩浆活动,形成了与之相关的矿床; Li 等(2007)尝试使用平板俯冲、板片拆沉和折退(roll-back)来解释中国东部近千公里宽的岩浆岩带及其时空分布规律。还有学者认为,长江中下游成矿带的岩浆活动与古太平洋板块的俯冲没有关系,而与大陆岩石圈的拆沉、软流圈物质上隆有关(张旗等, 2001)。董树文等提出晚侏罗纪东亚板块汇聚构造造成岩石圈加厚,早白垩纪垮塌伸展引发岩浆火山作用,伴有大规模成矿作用(董树文等, 2007)。

2 数据采集与处理

2.1 成矿带宽频地震数据采集与处理

按照项目的总体设计(吕庆田等, 2011),在长江中下游成矿带部署了一条跨越不同构造单元的综合探测剖面,剖面北西起自安徽定远,经马鞍山,南东到达江苏溧阳,计划长度 300 km。剖面穿过的构造单元主要有:华北地块(合肥盆地)、郟庐断裂带(TLF)、滁河断裂(CHF)、沿江拗陷带(成矿带)、茅山断裂(MSF)和扬子古陆(图 2)。沿剖面计划开展宽频地震、深地震反射、折射和 MT 探测。宽频地震台站部署从 2009 年 11 月开始,先期部署了 46 个台站,使用 Guralp 3ESPCD 型宽频地震仪,台站间距约为 5 km,剖面长度近 250 km。截止 2010 年 12 月,一共进行了 3 次台站查巡、取数和台站维护工作,最终使观测点数增加到 60 个,已经获得数据约 600 GB。

对所获得的天然地震数据进行了预处理,从连续记录的地震记录中筛选出信噪比较高的天然地震事件约 253 个。在此基础上初步开展了接收函数成

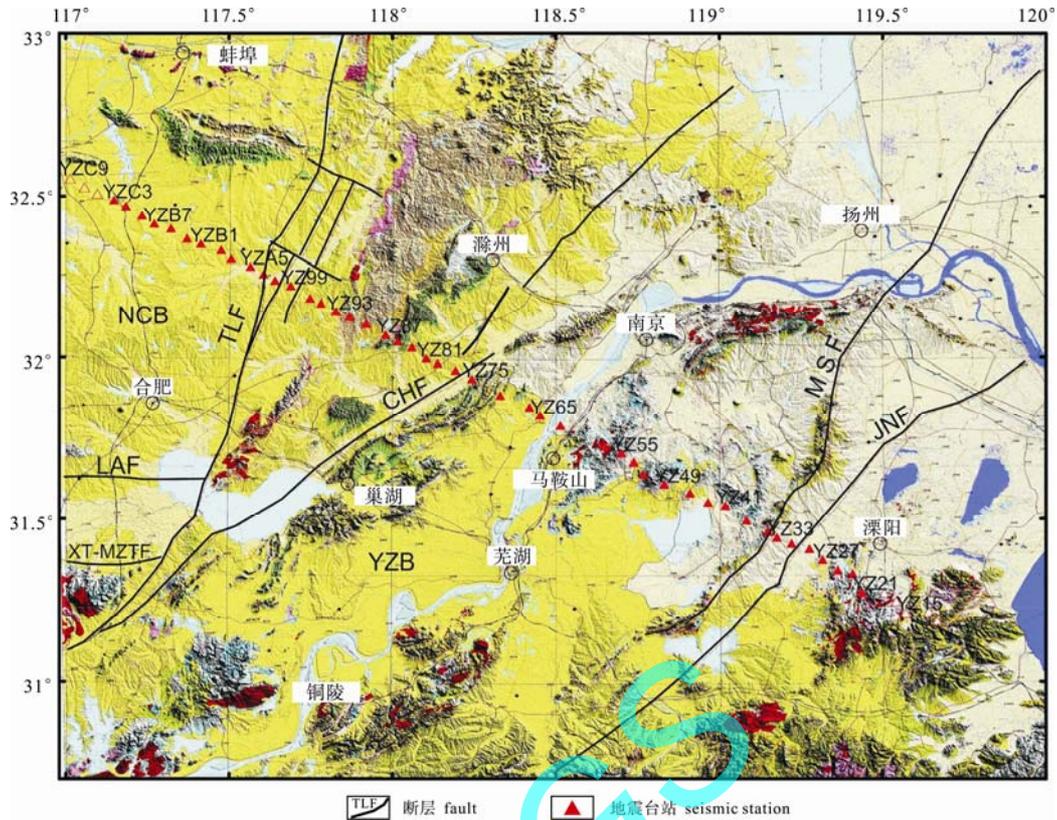


图 2 长江中下游成矿带宽频地震剖面位置及周边地质构造图

Fig. 2 The tectonic map of the middle and lower reaches of the Yangtze River with the locations of broadband stations
TLF-郟庐断裂; CHF-滁河断裂; MSF-茅山断裂; JNF-江南断裂; NCB-华北板块; YZB-扬子板块
TLF-Tanlu fault; CHF-Chuhe fault; MSF-Maoshan fault; JNF-Jiangnan fault; NCB-North China Block; YZB-Yangtze Block

像处理, 各向异性分析及参数计算和远震层析成像研究。初步获得了 300 km 地质廊带岩石圈和上地幔 (410 km 以上) 的主要速度界面结构图像, P 波速度结构和地壳及上地幔的各向异性参数(Jiang et al., 2010; Shi et al., 2010; 史大年等, 2011)。

天然地震接收函数成像研究: 根据所采集的数据进行天然地震接收函数成像研究, 目前已经初步完成了现有数据的接收函数成像处理, 研究结果已经初步给出了长江中下游成矿带地表至 410 km 深度上的主要速度界面结构图像(Shi et al., 2010; 史大年等, 2011)。

地震波各向异性研究: 在所采集的数据中观测到了很好的远震 SKS 和 SKKS 震相, 对这些震相进行了初步的横波分裂分析以测量研究区上地幔各向异性, 目前已经初步完成了现有震相的分析, 这些结果对研究该区的地壳和上地幔变形状态具有重要意义(Shi et al., 2010; 史大年等, 2011)。

地震层析成像研究: 利用已采集的数据进行了地震层析成像研究, 目前已经完成了已有数据的数

据处理和层析成像反演并给出了研究区地壳和上地幔速度结构的初步研究结果(Jiang et al., 2010)。

2.2 庐枞矿集区反射地震数据采集与处理

在庐枞矿集区部署了 5 条相互交叉的反射地震剖面, 其中北西-南东向剖面 3 条(Lz-1、Lz-2、Lz-3), 大致垂直火山岩走向; 北东-南西剖面 2 条(Lz-4、Lz-5), 基本与火山岩走向平行(图 3)。北西-南东向剖面穿过郟庐断裂、孔城凹陷、火山岩区和长江断裂带; 北东-南西剖面北起杨家桥基底隆起, 近乎平行穿过火山岩区, 向南终止于早侏罗统罗岭组分布区。5 条剖面满覆盖长度 250 km。野外地震反射数据采集由中石化西南石油局云南物探公司于 2009 年 11 月至 2010 年 1 月完成。使用法国生产的 SN428XL 数字地震仪, 观测系统采用 7190-10-20-10-7190(m), 接收道数 720 道, 炮点间距 80 m, 检波点距 20 m, 叠加次数 90; 震源为爆炸震源, 在试验的基础上确定的药量和井深参数为: 平原区井深 14~16 m, 16 m 为主, 药量 4~6 kg, 6 kg 为主; 山区井深 16~18 m, 高陡区 18 m 为主药量 8~10 kg,

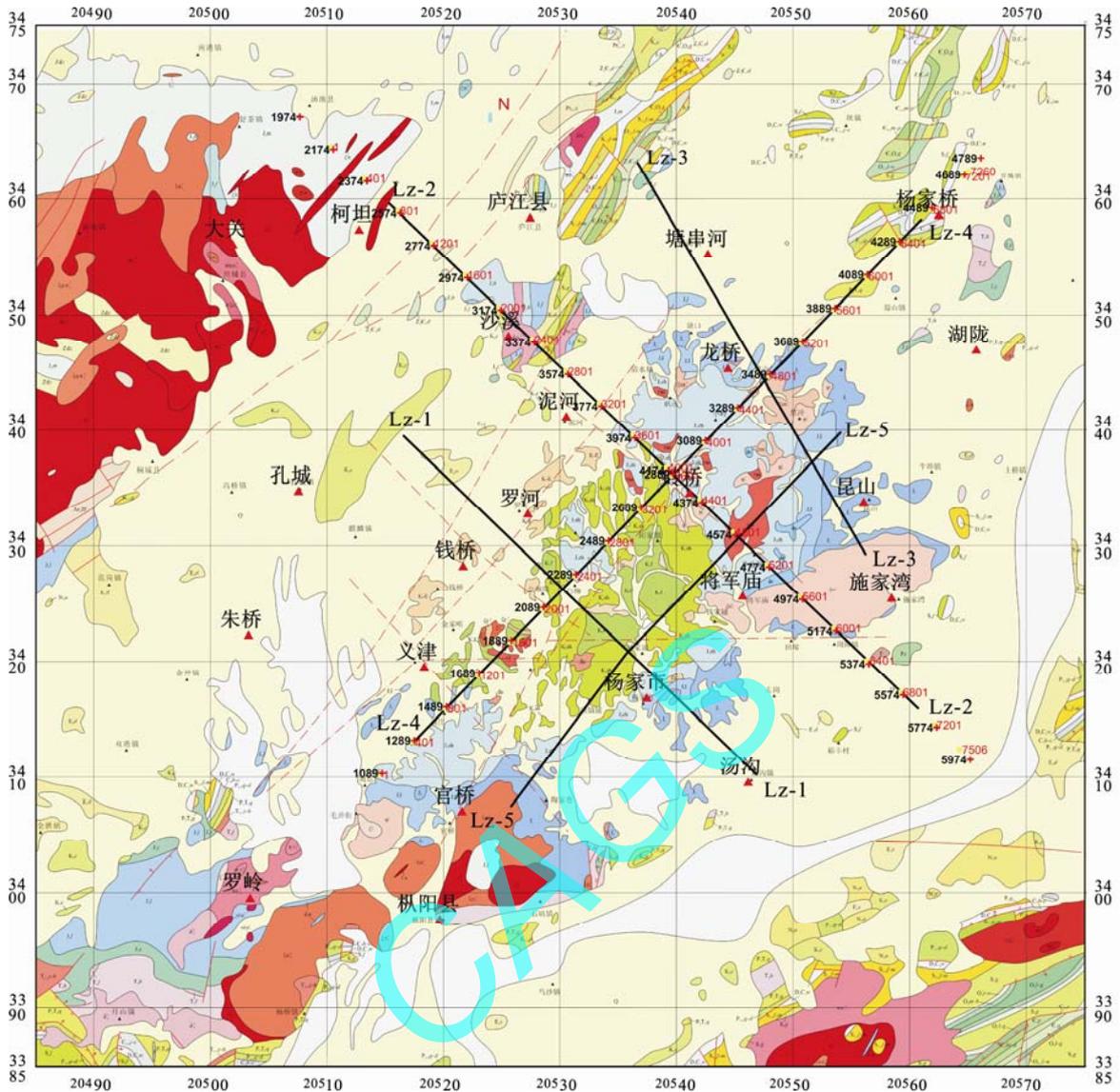


图 3 庐枞矿集区周边地质及反射地震、MT 剖面位置示意图

Fig. 3 Geological map of the Lujiang-Zongyang ore concentration area with the locations of seismic reflection and MT profiles

Lz-1 和 Lz-5 为地震反射剖面编号, 黄色圆点及红色编号对应图 7 横坐标, 红色十字及黑色编号对应图 8 横坐标

Lz-1 and Lz-5 denote the number of the seismic reflection profiles; The yellow round dots and red numbers correspond with abscissa in the Fig.7; the red crosses and black numbers correspond with abscissa in the Fig.8

高陡区增加到 12 ~ 14 kg; 使用 20DX-10 检波器, 12 个检波器组合, 记录长度 12 s, 采样间隔 2 ms。其中 LZ-2 线为宽线, 采用 1S2R 三线方式宽线施工(即单线激发、双线接收), 两条接收线距 40 m, 同一桩号错开 10 m, 激发线位于两条接收线中间。

使用 CGG、OMEGA、Promax 和部分自行开发的软件进行了处理。在对野外数据品质进行充分分析的基础上, 认为影响资料处理质量的主要问题有: 静校正问题、信噪比问题、频率问题、不同激发条件造成的采集资料振幅、相位不一致问题、低降速层造成的地震子波拉伸畸变、偏移方法及参数选择

等。针对上述处理关键问题, 处理中采用以下关键处理技术: (1)精细的叠前预处理, 包括废炮废道剔除, 严格的观测系统定义与线性动校正工作; (2)采用球面扩散补偿和地表一致性振幅补偿相结合的方法进行振幅补偿处理, 使横向和浅中深层能量变化合理, 真实反映地下岩性变化的特点; (3)使用层析静校正技术, 避免了岩石裸露区无法进行折射静校正的问题; (4)采用多反射界面剩余静校正与速度分析结合的技术, 提高成像质量; (5)使用叠前多域组合去噪技术, 有效压制各种干扰, 提高数据的信噪比。包括: 采用自适应面波衰减技术和区域滤波技

术对面波进行消除和衰减;在 T-X 域采用倾斜叠加的方法识别出线性干扰,并从原始数据中减去,实现线性干扰的滤除;对高能干扰采用分频压制技术,提高去噪的保真程度;(6)采用地表一致性反褶积及多道预测反褶积来展宽频带,提高波组特征;(7)通过制作高质量速度谱,利用多种辅助手段,如动校道集、常速扫描叠加剖面、变速扫描叠加段以及动态的叠加段等,识别速度,保证速度的准确拾取;(8)采用 DMO 处理技术为偏移提供高质量的叠加数据,同时通过 DMO 速度分析,为偏移提供消除地层倾角影响的初始速度场;(9)使用基于起伏地表的叠前时间偏移技术,提高成像精度。实际资料处理中,以处理地质效果为目标,采用边试验边处理的思路进行。最终确定的处理流程如图 4。

2.3 庐枞矿集区 MT 及地球化学数据采集与处理

沿 5 条地震剖面,一共完成了 523 个大地电磁测量点,其中检测点 10 个、实验点 13 个。使用 5 套加拿大凤凰公司的 V5-2000(配 MTC-50 磁探头,频率范围为 300~0.0005 Hz),和 1 套 V8 系统进行测量,点距 500 m,观测时间 24 小时。在测量前对 6 套仪器进行了一致性试验,从视电阻率和相位曲线

对比看,除个别高噪点出现波动外,整体形态一致,表明 6 套仪器一致性较好,所采集的数据可以进行统一处理和解释工作(肖晓等,2011)。依据《大地电磁测深技术规程(DZ/T 0173-1997)》中关于数据质量评价标准规定,对庐枞矿集区 MT 数据质量进行了评价,达到一类数据点 354 个,占整个数据的 71.6%,二类点 119 个,占 23.8%。对 MT 数据质量分析结果表明,矿山活动是最大的噪声源,其它还有工业电力线、发射塔、通讯光缆、铁路、高速公路等。数据处理的最大难点是去噪,为此,我们研究了噪声时频特征,划分了噪声类型,尝试了远参考、小波分析、最小二乘、自适应滤波、人机交互去噪等技术,最后提出了时间域形态滤波技术,并在 5 条 MT 剖面上应用,取得了较好效果。开展了非线性共轭梯度反演方法研究,获得了 5 条电阻率剖面反演初步结果(肖晓等,2011)。

在进行反射地震数据采集时,沿地震剖面炮点钻孔采集了 3579 个地球化学样品,采样位置一般在炮井最底部,取样介质以岩屑为主,部分炮点为泥沙。在实验室进行了样品处理,分析了 As、Sb、Hg、W、Mo、Cu、Pb、Zn、Ag、Au 10 个元素。为深入了解盆地与基底地球化学元素空间分布规律和深部成矿预测奠定了基础。

3 初步结果及其动力学与找矿勘查的意义

3.1 宽频地震处理结果及动力学意义

远震层析成像(Jiang et al., 2010)初步结果发现:沿成矿带地球物理综合剖面从北西的合肥盆地,过长江中下游成矿带到江南古陆,岩石圈(70~80 km±)P 波速度存在较大的变化,滁河断裂(CHF)至江南断裂(JNF)之间总体表现为高速,合肥盆地总体表现为低速特征,对应宁芜火山岩盆地和溧阳火山岩盆地为相对低速。在上地幔 200~100 km 深处(软流圈),大致以滁河断裂为界,西侧为高速异常,东侧为低速异常,而且低速异常中心位于 150 km 深;在上地幔 300~200 km 深处,同样以滁河断裂为界,西侧呈现低速异常,而东侧呈现高速异常。西侧的低速异常体与上地幔 200~100 km 深的低速异常体连接,形成上地幔“哑铃”型低速异常(图 5)。软流圈中出现低速异常通常解释为局部熔融造成的,而局部熔融状态的形成可能与岩石圈拆沉和伸展减压有关。

接收函数成像(Shi et al., 2010; 史大年等, 2011)结果发现:郟庐断裂以东 Moho 面明显抬升,抬升幅度大约在 3~5 km;岩石圈底界面(70~80 km±)不清晰,很有可能与软流圈中的局部熔融有关,熔融使

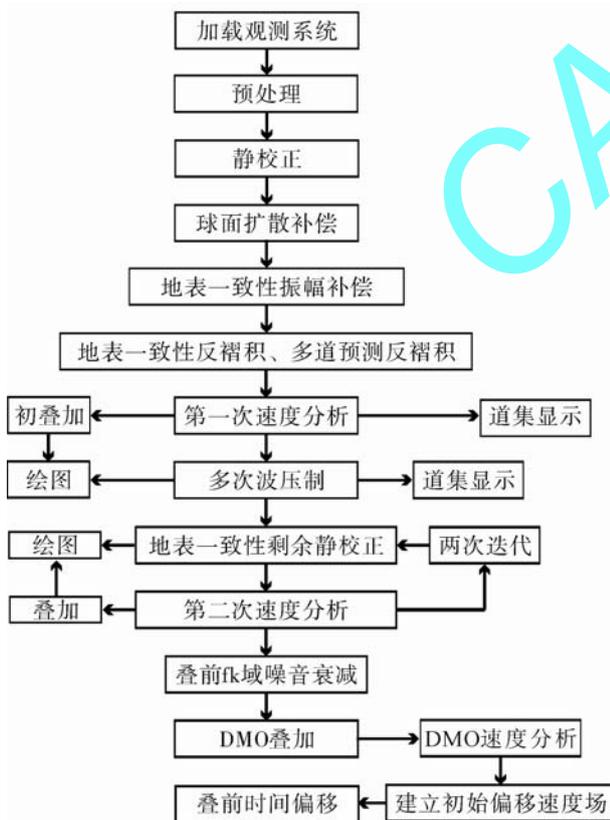


图 4 庐枞矿集区反射地震处理流程图
Fig. 4 The seismic data processing flow chart of Lujiang-Zongyang ore concentration area

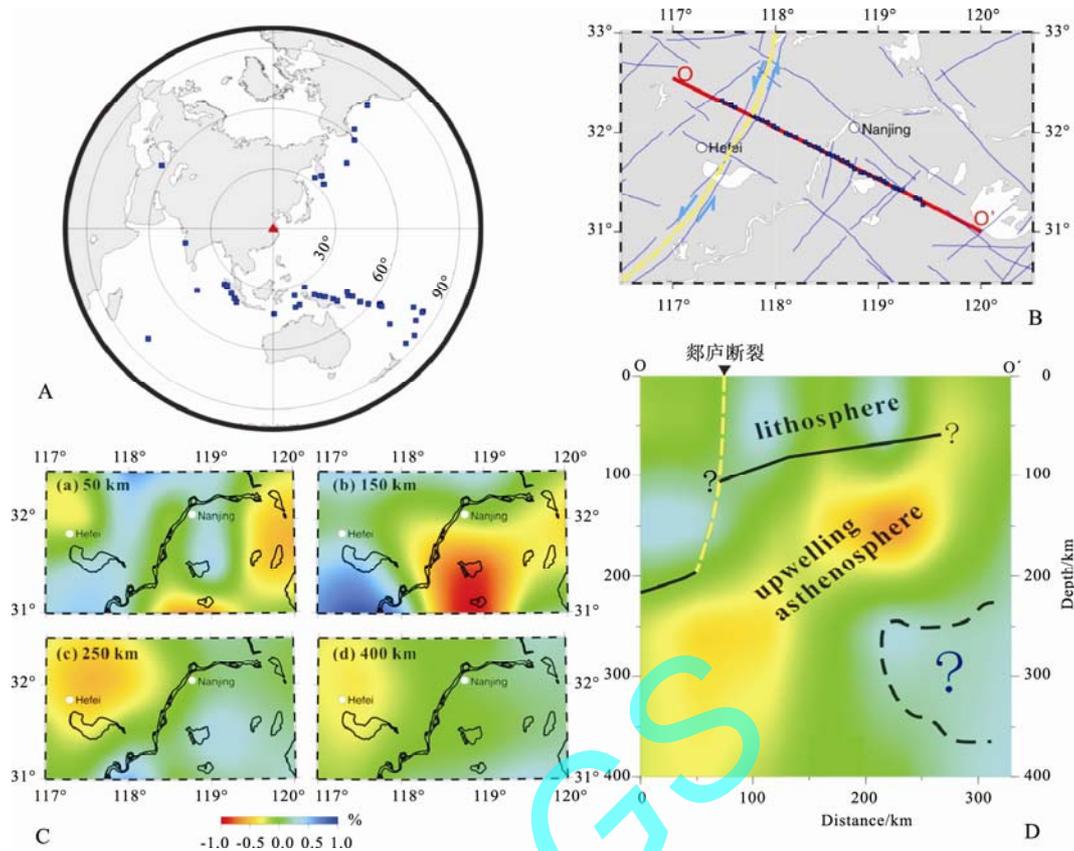


图5 长江中下游成矿带远震层析成像初步结果

Fig. 5 Preliminary results of teleseismic tomography crossing over the middle and lower reaches of Yangtze River

A-层析成像使用远震震中分布, 红三角代表台站中心位置;

B-宽频剖面位置及台站; C-层析成像不同深度水平切片; D-层析成像 P 波速度垂直剖面

A-Distribution of teleseismic events used in tomography, red triangle represents the center of stations;

B-Location of broadband stations and teleseismic profiles; C-Horizontal slices of the tomography with different depth;

D-Vertical cross sections of P-wave velocity images

岩石圈底部与软流圈物性或物质状态趋于均一; 410 km 界面清晰, 近似水平。壳内存在明显的转换界面, 在合肥盆地中下地壳存在南东倾的高速转换界面, 而在宁芜火山岩盆地附近中下地壳存在低速转换界面。这些速度转换界面要么解释为伸展构造体制下的壳内区域滑脱面, 要么为岩浆活动留下的残晶体(高速体)。

地震各向异性参数计算(Shi et al., 2010)结果呈现复杂的方位变化(图 6), 利用来自 E 和 SE 方向的地震(射线穿过扬子板块)计算得到的快波偏振方向总体呈 NE 方向, 平行地表构造线方向; 而利用来自 W 和 NW 方向的地震计算出的快波偏振方向呈复杂变化, 滁河断裂以西快波偏振方向呈 NW、NNW, 滁河断裂以东快波偏振方向变化不稳定, 具有小尺度变化的特征。这种特征指示华北板块上地幔和长江中下游成矿带具有多层、且流动变形方向不同的各向异性层; 快波偏振方向的短距离变化可以用上地

幔小尺度变形流动来解释(Helffrich et al., 1994), 与岩石圈复杂的拆沉过程有关。

上述地震层析成像、接收函数和各向异性结果所反映的深部过程可以用同样的地球动力学模型来解释, 该模型至少应包括: 下地壳和岩石圈拆沉、软流圈上隆和富集地幔熔融等过程, 这些过程也得到了岩石元素、同位素地球化学的佐证(王强等, 2001, 2003; Wang et al., 2006)。拆沉的岩石圈可能是古太平洋板块(Kula 或 Izanagi 板块)水平俯冲岩石圈的前缘(Li et al, 2007), 也可能是在古太平洋板块挤压下扬子板块增厚的岩石圈, 在古太平洋板块俯冲挤压减弱或停止俯冲后, 增厚的岩石圈在重力作用下垮塌, 区域构造体制由挤压转为伸展。

3.2 庐枞矿集区反射地震结果及动力学意义

5 条相互交叉的反射地震叠加剖面揭示庐枞矿集区地壳结构、深部过程和陆内变形特征, 揭示了早白垩纪以前的挤压变形和晚早白垩纪以后伸展变

形之间的相互关系。以垂直庐枞火山岩区走向的 Lz-2 剖面和平行火山岩区走向的 Lz-4 剖面为例(图 7), 可以清楚地看出地壳厚度在 30 km 上下变化, 在靠近庐枞断裂带附近 Moho 深度增加到 35 km, 在火山岩区地壳厚度减薄到 30 km。但在 NE-SW 方向(Lz-4 剖面), Moho 深度没有明显变化。从反射特征看, 可明显划分出上、下地壳, 上地壳厚度在 15 ~ 18 km, 下地壳厚度在 10 ~ 12 km。

上地壳(6 s TWT)除了近地表的一些“箕状”盆地反射外, 总体上呈现“波浪”状密集反射, “波峰”相对连续, “波谷”被高角度断裂断开, 使上地壳呈现断块结构(Lu et al., 2010)。上地壳的变形特征保留了从挤压造山到伸展的构造转换过程, 可以想象造山阶段形成的一系列紧密褶皱、膝折、断坡和逆冲, 在后期伸展构造作用下, 一些断层滑脱面重新活动, 形成区域滑脱构造。无论是剪切带、破碎带、层间滑脱带, 还是原始沉积地层之间的岩性变化带, 都可以形成地震反射, 上地壳的反射多数源自这些构造地质特征, 它们是挤压阶段形成的构造形迹。尤其引人瞩目的是过去认为的长江破碎带是一个很典型的逆冲断层(图 7a)CDP 6000-7201), 逆冲的滑脱底面很有可能是志留纪高家边组的页岩。下地壳反射明显减少, 除了对应火山岩区下地壳有稀疏的、向西倾斜的反射外, 几乎没有很强的反射, 下地壳的反射可能反应岩浆活动留下的痕迹。Moho 面反射明显, 在下地壳底部以一组相对连续、但有一定起伏的反射出现。下地壳以塑性变形为主, 后期伸展阶段可能破坏挤压造山阶段形成的构造(如, 厚皮构造形成的山根), 而形成新的塑性拉伸构造。在 Lz-3、Lz-4 叠加剖面的北西和北端, 剖面上出现一组向南倾斜的、延深到 9 ~ 12 km 深的高角度滑脱构造, 目前还不清楚它是南北挤压时期形成的逆冲构造, 还是伸展阶段新形成的滑脱构造。

如果将该地区的反射特征和美国典型“盆岭”(Basin and Range)地区(Allmendinger et al., 1983)做一个对比, 发现二者既有相同之处, 也有不同之处。地壳厚度几乎相同, 都在 30 km 左右; 美国盆岭地区上地壳存在垂直构造走向的、长达百余公里的低角度滑脱带, 可延伸到地壳 15 ~ 20 km 深; 而庐枞地区可能成为伸展构造标志的滑脱构造是平行区域构造方向的, 而且呈高角度; 下地壳的反射特征也有很大差别, 美国盆岭地区下地壳有密集的近水平反射, 而庐枞地区仅有稀疏的向西倾斜的反射。这种差异可能反映二者伸展作用的强度不同, 或下地壳岩浆活动的性质不同。

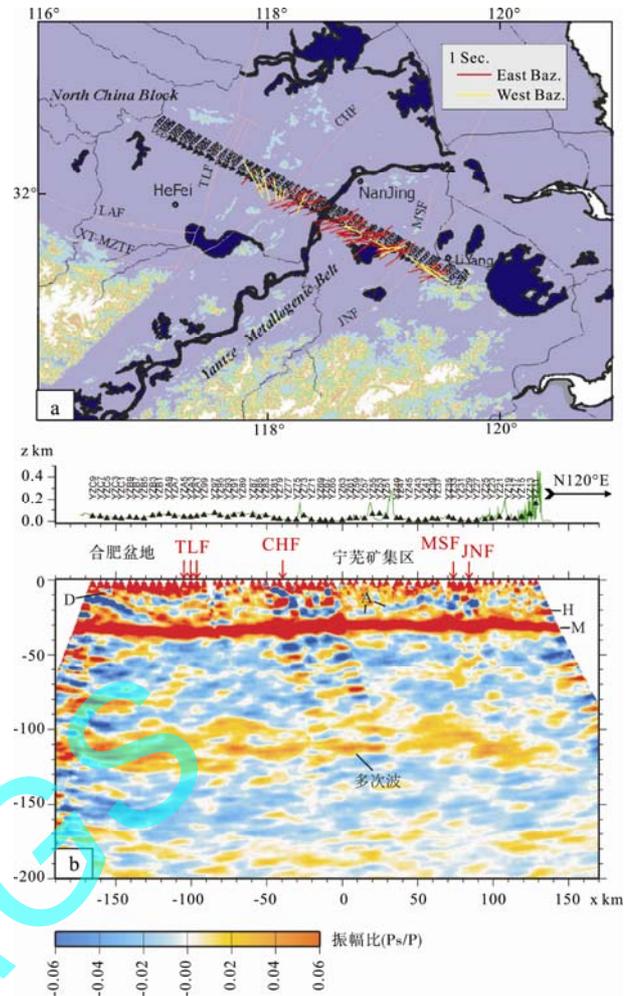


图 6 长江中下游地震各向异性计算初步结果(a, 红线: E、SE 方向地震各向异性快波偏振方向和快慢波时差; 黄线: W、NW 方向地震各向异性快波偏振方向和快慢波时差)和长江中下游地震接收函数成像初步结果(b)

Fig. 6 Preliminary results of seismic anisotropy crossing over the middle and lower reaches of Yangtze River(a, Red lines: fast wave directions and time delay between fast and slow waves using events coming from E and SE direction; Yellow lines: fast wave direction and time delay between fast and slow waves using events coming from W and NW direction) and preliminary results of Stacked receiver function image crossing over the middle and lower reaches of Yangtze River(b)

庐枞地区的地壳反射特征指示区域上至少存在 2 期重要构造变形事件, 早期(晚侏罗-早白垩纪早期)为北西向强烈挤压, 造成上地壳逆冲、褶皱和叠瓦, 晚期(晚早白垩至今)是区域伸展。伸展构造既有东西向, 又有南北向, 控制了成矿带北东向盆地的发育和南北向隆拗格局的形成。两期的构造背景形成了两种不同的岩浆系统(王强等, 2001, 2003; Wang et al., 2006)。反射地震结果支持前节提出的下地壳拆沉模型。在强烈挤压阶段, 上地壳强烈褶皱、逆冲, 下地壳塑性变形必然增厚, 当厚度超过 50 km, 地壳底部岩石将发生密度逆转(榴辉岩化), 重力不稳定

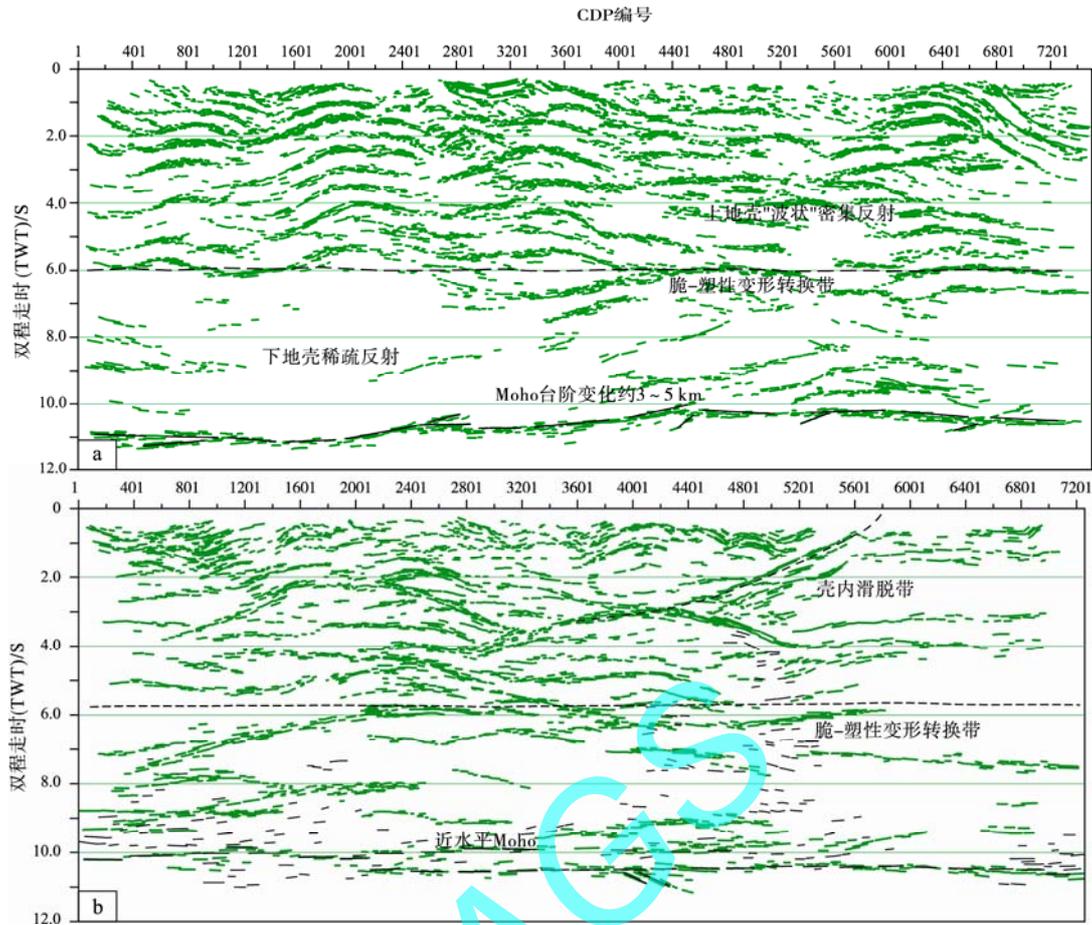


图7 庐枞矿集区 Lz-2、Lz-4 反射地震偏移剖面线条图

Fig. 7 Line drawings of migrated section of Lz-2 and Lz-4 profiles over Lujiang-Zongyang ore concentration area

可能导致下地壳和岩石圈拆沉(Kay et al, 1993)。

3.3 庐枞矿集区 MT 和地球化学测量结果及对深部找矿的意义

庐枞矿集区MT数据的反演采用中国石油大学戴世坤副教授提供的Geo_GMES反演软件,进行二维连续介质人机交互式反演(戴世坤等,1997)。在完成时间域信号的滤波去噪后,进行MT数据测深曲线的去除飞点、静校正、空间滤波等数据处理工作;为保证反演结果更加接近真实情况,在进行反演之前,根据数据质量评价的结果去掉了质量不合格的测深点(肖晓等,2011)。以Lz-2和Lz-4线为例来说明庐枞矿集区大地电磁测深双模联合反演的结果的地质及对深部找矿的意义。火山杂岩地区的电阻率实际测量研究表明(Katsube et al., 1994):致密岩石的电阻率一般在 $1 \times 10^4 \sim 7 \times 10^4 \Omega \cdot m$,一般情况下,电阻率与岩石的孔隙度成反比,孔隙度的增加会迅速降低岩石的电阻率,但极低电阻率并不完全都与高孔隙度有关,一些极低电阻率(几十 $\Omega \cdot m$)还可能与岩石含炭有关。纵观图8,可以看出电阻率的分布反映了岩性和构造(孔隙度)的综合影响。白垩纪沉积盆

地,如孔城红盆,长江破碎带以及火山岩区北侧的蜀山凹陷等都表现出低阻特征,大致以 $300 \Omega \cdot m$ 等值线勾画的沉积盆地形态基本反映沉积盆地的形态。我们注意到火山岩区周边的主要深大断裂,比如反射地震发现的沿江逆冲断裂(thrusting)、火山岩区北侧反射地震发现的壳内滑脱带以及邻庐断裂带等,都表现出很宽的低阻带,而且延深可达 $5 \sim 6 \text{ km}$;断裂带破碎充水可能是造成低阻的主要原因。在对应火山岩区,表层 1.0 km 内总体呈低阻特征,这与火山岩孔隙度大的特点相一致。以 $800 \Omega \cdot m$ 等值线所反映的低阻层厚度大致在 800 m 左右,我们认为很可能代表了火山岩层的平均厚度。如果确实这样,在庐枞火山岩区以下寻找“铜陵式”矿床还是很有希望的。MT剖面穿过的岩基,如将军庙-施家湾岩体、井边岩体等,都表现为极高阻特征,这与岩体致密、没有孔隙的特征相一致。Lz-4线穿过的小岭、浮山等低重力电阻率表现各异,小岭低重力异常深部表现为巨大的高阻体,很可能是深部正长岩基;而浮山火山机构虽然也是低阻,但可能由于破碎和充水的原因呈现近垂直的低阻异常。

沿地震剖面地球化学分析结果令人振奋,不仅在火山岩区发现了很多金属元素异常,而且在覆盖区也发现一批新的找矿线索(图9)。沿沙溪成矿带向南,在Lz-1线的白垩纪赤山组粉砂岩、钙质粉砂岩分布区发现很高的Cu、Zn、Pb、Ag、As、Hg异常组合,异常宽约3.5 km,如果砂岩深部存在岩体,是很有前景的找矿靶区。在距Lz-1线起点30~40 km前后的西牛山一带Cu、Zn、Pb含量较高,为双庙组火山岩地层分布区,火山口发育,极具找矿远景;沿Lz-2剖面在牛头山、石门庵、井边、黄梅尖一带Cu含量较高,牛头山Ag含量也偏高,可以作为下一步找矿的重点地区。沿Lz-4线的(图3、图9)小岭、大岭、岳山一带的Cu、Pb、Zn、Ag、Hg

含量较高,与已知矿的分布吻合,但在岳山的北东部还有一较宽的Cu、Pb、Zn、Ag异常带;另外在杨家楼一带具Ag、Cu及Pb、Zn异常,在牛安、陈家咀、浮山一带具Pb、Zn、Ag异常,对应的是火山岩、火山机构分布区,具有找矿潜力。

4 讨论与结论

综上所述,SinoProbe-03项目已经在长江中下游成矿带完成了300 km的宽频地震探测,在庐枞矿集区完成了5条满覆盖250 km的地震反射剖面,5条MT剖面500个观测点和沿地震剖面钻孔地球化学测量工作,取得的主要进展概括如下:

1)发现了长江中下游成矿带岩石圈拆沉的宽频

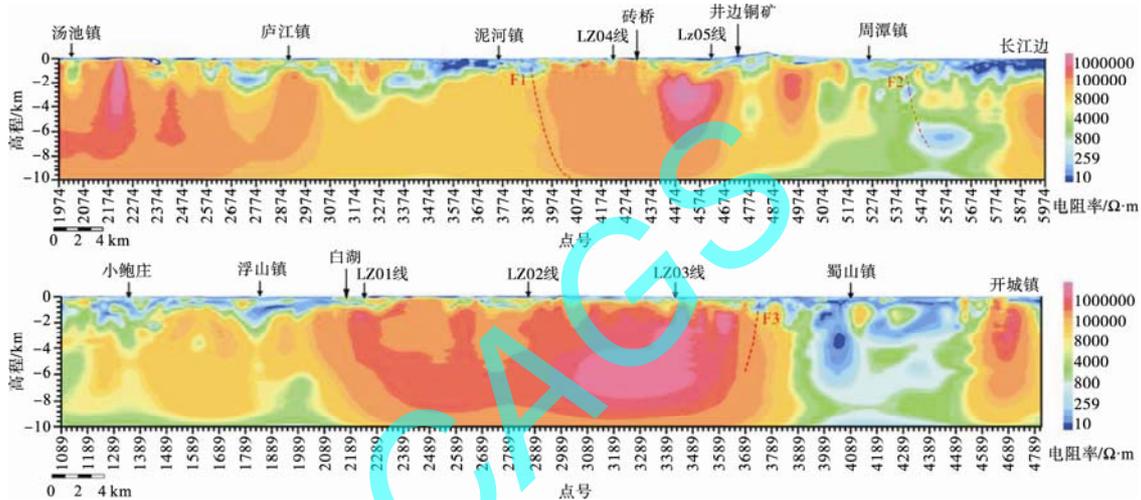


图8 庐枞矿集区Lz-2、Lz-4大地电磁测深二维反演结果

Fig. 8 2D magnetotelluric sounding inversion results of Lz-2 and Lz-4 profiles over Lujiang-Zongyang ore concentration area

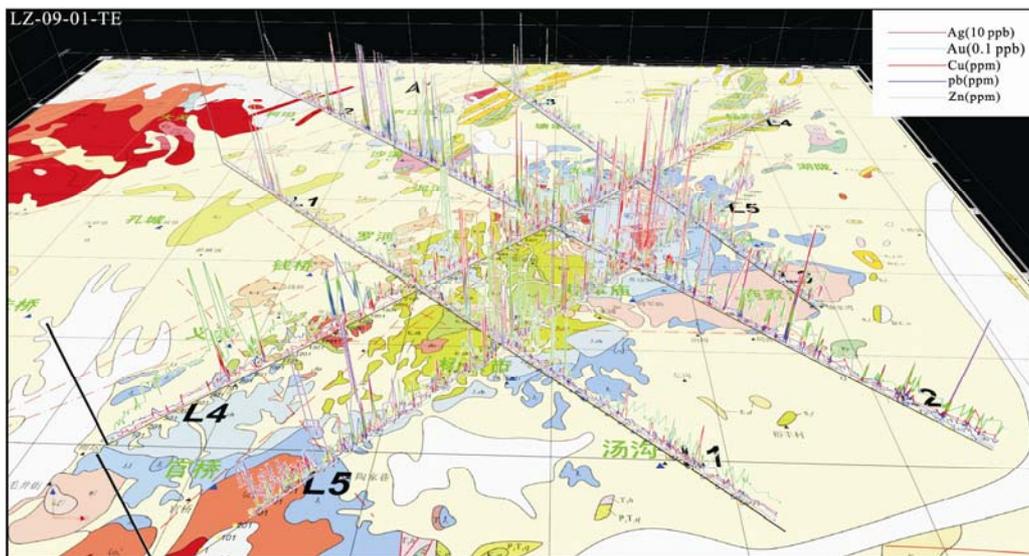


图9 反射地震钻孔地球化学测量剖面,显示沿剖面成矿元素的变化

Fig. 9 The seismic drill-hole geochemical profiles showing ore-elements variations along the profiles

地震证据, 包括上地幔“哑铃”型低速体, 各向异性快波偏振方向出现小尺度变化, 岩石圈底界面不清楚, Moho 界面抬升和地壳变薄等。为认识长江中下游成矿带构造背景和深部动力学模型提供了新的信息;

2) 发现庐枞矿集区地壳厚度在 30 km 左右, 对应火山岩区 Moho 存在 3~5 km 的抬升; 地壳呈双层地壳结构, 上地壳由褶皱、膝折、断坡和逆冲组成的断块结构, 下地壳以塑性伸展构造为主, 可能保留了岩浆活动留下的痕迹, 如岩浆结晶分异作用留下的残晶体。认为该地区至少发生两期构造变形, 早期(晚侏罗-早白垩纪早期)为北西向强烈挤压造山, 晚期(晚早白垩至今)区域伸展。伸展构造既有东西向, 又有南北向, 控制了成矿带北东向盆地的发育和南北向隆拗格局的形成, 两期的构造背景形成了两种不同的岩浆系统。提出了下地壳拆沉模型, 在强烈挤压阶段, 下地壳塑性变形增厚, 当厚度超过 50 km, 地壳底部岩石将发生密度逆转(榴辉岩化), 重力不稳定导致下地壳和岩石圈拆沉;

3) 获得了庐枞矿集区上地壳反射和电性 3D 结构框架。认为庐枞矿集区火山岩层厚度平均在 800 m 左右, 提出在火山岩区下面寻找“铜陵式”矿床的建议。在火山岩内部和周边覆盖区发现了一批地球化学异常, 指出了一批深部找矿靶区。

致谢: 感谢中石化西南石油局云南物探公司在极其艰苦的条件下, 完成了庐枞矿集区高质量的反射地震数据。感谢专项负责人董树文研究员、李廷栋院士, 项目专家委员会陈毓川、滕吉文院士, 黄宗理、肖庆辉、柴育成、邓军、王瑞江、王椿庸研究员等项目的一贯支持和鼓励。感谢财政部、国土资源部和国家自然科学基金委对项目的资助。

参考文献:

- 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 1991. 长江中下游铁铜成矿带[M]. 北京: 地质出版社: 1-379.
- 戴世坤, 徐世浙. 1997. MT 二维和三维连续介质快速反演[J]. 石油地球物理勘探, 32(3): 305-317.
- 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 杨振宇, 季强, 王涛, 胡建民, 陈宣华. 2007. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释[J]. 地质学报, 81(11): 1449-1461.
- 董树文. 1991. 长江中下游铁铜成矿带成因之构造分析[J]. 地球学报, 12(2): 43-46.
- 吕庆田, 常印佛, SinoProbe-03 项目组. 2011. 地壳结构与深部矿产源立体探测技术实验——SinoProbe-03 项目介绍[J]. 地球学报, 32(S1): 49-64.
- 吕庆田, 侯增谦, 杨竹森, 史大年. 2004. 长江中下游地区的底

侵作用及动力学演化模式——来自地球物理资料的约束[J]. 中国科学(D 辑), 34(9): 783-794.

- 毛建人, 陶奎元, 杨祝良, 朱云鹤, 薛怀民. 1997. 中国东南部中生代陆内岩浆作用的动力学背景[J]. 火山岩地质与矿产, 18(2): 95-104.
- 史大年, 吕庆田, 徐文艺, 严永永, 赵金花, 董树文, 常印佛. 2011. 长江中下游成矿带及邻区地壳结构——MASH 成矿过程的接收函数成像证据[J]. 地质学报, 待刊.
- 唐永成, 吴言昌, 储国正, 邢凤鸣, 王永敏, 曹奋扬, 常印佛. 1986. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质[M]. 北京: 地质出版社: 239-243.
- 王强, 赵振华, 熊小林, 许继锋. 2001. 底侵玄武质下地壳的熔融: 来自安徽沙溪 adakite 质富钠石英闪长玢岩的证据[J]. 地球化学, 30(4): 353-362.
- 王强, 赵振华, 许继锋, 熊小林, 包志伟. 2003. 安徽铜陵地区燕山期侵入岩的成因及其对深部动力学过程的制约[J]. 中国科学(D 辑), 33(4): 323-333.
- 肖晓, 汤井田, 周聪, 吕庆田. 2011. 庐枞矿集区大地电磁探测及电性结构初探[J]. 地质学报, 待刊.
- 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[J]. 岩石学报, 17: 236-244.
- 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): 1666-1678.

References:

- ALLMENDINGER R W, SHARP J W, TISH D V, SERPA L, BROWN L, KAUFMAN S, OLIVER J, SMITH R B. 1983. Cenozoic and Mesozoic structure of the eastern Basin and Range province, Utah, from COCORP seismic-reflection data[J]. *Geology*, 11: 532-536.
- CHANG Yin-fo, LIU Xiang-pei, WU Yan-chang. 1991. The Copper-iron belt of the middle-lower reaches of the Changjiang River[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-379(in Chinese).
- DAI Shi-kun, XU Shi-zhe. 1997. Rapid inversion of magnetotelluric data for 2-D and 3-D continuous media[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 32(3): 305-317(in Chinese with English abstract).
- DONG Shu-wen, ZHANG Yue-qiao, YANG Zhen-yu, JI Qiang, WANG Tao, HU Jian-min, CHEN Xuan-hua. 2007. Jurassic Tectonic Revolution in China and New Interpretation of the Yanshan Movement[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(11): 1449-1461(in Chinese with English abstract).
- DONG Shu-wen. 1991. Tectonic Analysis on Genesis of Metallogenetic Belt of Middle-lower Yangtze River[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 12(2): 43-56(in Chinese with English abstract).
- HELFFRICH G, SILVER P, GIVEN H. 1994. Shear-wave splitting variation over short spatial scales on continents[J]. *Geophys. J. Int.*, 119: 561-573.
- JIANG G, ZHANG G, LU Q, SHI D. 2010. Teleseismic tomography

- beneath the mid-lower Yangtze region in China[C]. Abstract T23B-2248, presented at 2010 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 13-17 Dec.
- KATSUBE T J, SALISBURY M. 1994. Implications of laboratory electrical measurements on interpretation of EM-surveys and origin of the Sudbury structure[J]. *Geophysical Research Letters*, 21(10): 947-950.
- KAY R W, KAY S M. 1993. Delamination and Delamination magmatism[J]. *Tectonophysics*, 219: 177-189.
- LAPIERRE H, JAHN B M, CHARVET J, YU Y W. 1997. Mesozoic felsic arc magmatism and continental olivine tholeiite in Zhejiang Province and their relationship with the tectonic activity in southeastern China[J]. *Tectonophysics*, 274: 321-338.
- LI Z X, 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(2): 179-182.
- LI Z X. 1998. Tectonic history of the major East Asia lithospheric blocks since the mid-Proterozoic—a synthesis. In *Mantle Dynamic and Plate Interaction in East Asia*[M]. Geodynamics 27, the American Geophysical Union: 221-243.
- LU Q, DONG S, WU M, SHI D, YAN J, CHANG Y. 2010. Crustal structure of volcanic terrane in the extensional tectonics, Eastern China, as revealed by seismic reflection profiling (Invited)[R]. abstract T11F-06, presented at 2010 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif. 13-17 Dec.
- LÜ Qing-tian, CHANG Yin-fo, SinoProbe-03 team. 2011. Crustal structure and three-dimension deep exploration for mineral resources: An introduction to SinoProbe-03 project[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 32(s1): 49-64(in Chinese with English abstract).
- LÜ Qing-tian, HOU Zeng-qian, YANG Zhu-sen, SHI Da-nian. 2004. The underplating and dynamic evolution model of the mid-lower Yangtze region- constraints from geophysical data[J]. *Science in China, Ser. D*, 34(9): 783-794(in Chinese with English abstract).
- MAO Jian-ren, TAO Kui-yuan, YANG Zhu-liang, ZHU Yun-he, XUE Huai-min. 1997. Mesozoic intracontinental magmatism geodynamics background Southeast China[J]. *Volcanology & Mineral Resources*, 18(2): 95-104(in Chinese with English abstract).
- PAN Y M, DONG P. 1999. The Lower Changjiang (Yangzi / Yangtze River)metallogenic belt, east central China: intrusion- and wall rock-hosted Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 15: 177-242.
- SHI D, LÜ Q, YAN J, XU W, ZHANG G, JIANG G, DONG S. 2010. Crustal and upper mantle structure beneath the mid-lower Yangtze metallogenic belt revealed by passive-source seismic array[C]. Abstract T11F-07, presented at 2010 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 13-17 Dec.
- SHI Da-nian, LÜ Qing-tian, XU Wen-yi, YAN Jia-yong, ZHAO Jin-hua, Dong Shu-wen, CHANG Yin-fo. 2011. Crustal structures beneath the mid-lower Yangtze Metallogenic belt and its adjacent regions in Eastern China- Evidences from P-wave receiver function imaging for a MASH metallizaion process[J]. *Acta Geologica Sinica*, in press(in Chinese with English abstract).
- TANG Yong-Cheng, WU Yan-Chang, CHU Guo-zheng, XING Feng-ming, WANG Yong-min, CAO Fen-yang, CHANG Yin-fo. 1998. Geology of Copper-Gold polymetallic deposits in the along-changjiang Area of Anhui province[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- WANG Q, WYMAN D A, XU J F, ZHAO Z H, JIAN P, XIONG X L, BAO Z W, LI C F, BAI Z H. 2006. Petrogenesis of cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui Province (eastern China): Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization[J]. *Lithos*, 89: 424-446.
- WANG Qiang, ZHAO Zhen-hua, XIONG Xiao-lin, XU Ji-feng. 2001. Melting of the underplated basaltic lower crust:Evidence from the Shaxi adakitic sodic quartz diorite-porphyrites, Anhui Province, China[J]. *Geochinica*, 30(4): 353-362(in Chinese with English abstract).
- WANG Qiang, ZHAO Zhen-hua, XU Ji-feng, XIONG Xiao-lin, BAO Zhi-wei. 2003. The causes of formation intrusive rocks in Yanshan period and their constraints to the deep dynamic process in Tongling area, Anhui Province[J]. *Science in China, Ser.D*, 33(4): 323-333(in Chinese with English abstract).
- XIAO Xiao, TANG Jing-tian, ZHOU Cong, LÜ Qing-tian. 2011. Magnetotelluric sounding and preliminary study of electrical structure in Lujiang-Zongyang ore concentrated Area[J]. *Acta Geologica Sinica*, in press(in Chinese with English abstract).
- XU J F, SHINJO R, DEFANT M J, WANG Q, RAPP R P. 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental crust[J]. *Geology*, 30: 1111-1114.
- ZHANG Qi, WANG Yan, QIAN Qing, YANG Jin-hui, WANG Yuan-Long; ZHAO Tai-ping, GUO Guang-jun. 2001. The characteristics and tectonic-metallogenic significances of the adakites in Yanshan period from eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17: 236-244(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Tao-fa, FAN Yu, YUAN Feng. 2008. Progress 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).
- ZHOU X M, LI W X. 2000. Origin of late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: implication for lithosphere subduction and underplating of mafic magma[J]. *Tectonophysics*, 326: 269-287.