

# 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\*

吕庆田<sup>1</sup> 董树文<sup>2</sup> 史大年<sup>1</sup> 汤井田<sup>3</sup> 江国明<sup>4</sup> 张永谦<sup>1</sup> 徐涛<sup>5</sup> SinoProbe-03-CJ 项目组\*\*

LÜ QingTian<sup>1</sup>, DONG ShuWen<sup>2</sup>, SHI DaNian<sup>1</sup>, TANG JingTian<sup>3</sup>, JIANG GuoMing<sup>4</sup>, ZHANG YongQian<sup>1</sup>, XU Tao<sup>5</sup> and SinoProbe-03-CJ Group\*\*

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. 中国地质科学院, 北京 100037

3. 中南大学地球科学与信息物理学院, 教育部有色金属成矿预测重点实验室, 长沙 410083

4. 中国地质大学地球物理与信息技术学院, 北京 100083

5. 中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

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

2. *Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*

3. *Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education, School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China*

4. *School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*

5. *State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

2013-11-25 收稿, 2014-02-14 改回.

**Lü QT, Dong SW, Shi DN, Tang JT, Jiang GM, Zhang YQ, Xu T and SinoProbe-03-CJ Group. 2014. Lithosphere architecture and geodynamic model of Middle and Lower Reaches of Yangtze Metallogenic Belt: A review from SinoProbe. *Acta Petrologica Sinica*, 30(4):889–906**

**Abstract** The lithosphere structure and deep processes are keys to understanding the formation of ore-district and metallogenic province. Lithosphere-scale process could create big footprints or signatures which can be observed by geophysics methods. To better understand the deep dynamic of the major metallogenic province, the authors has conducted an integrated deep exploration across Middle and Lower Reaches of Yangtze Metallogenic Belt (YMB) in eastern China, these included broadband seismic, deep reflection seismic, wide-angle reflection seismic and magnetotelluric sounding. The findings based on the data processing and inversion of these integrated geophysical exploration include: (1) Lower velocity body at the top of upper mantle and a SW dipping high velocity body with center depth at 300km, were imaged by teleseismic tomography beneath YMB; (2) S-wave receive function evidence the thinning of the lithosphere beneath the YMB to 50~70km; and SKS, SKKS shear wave splitting results show NE parallel fast-wave polarization direction which parallel with the regional tectonic lineament; (3) The reflection seismic data reveals strong NW-SE upper crustal contraction deformation, characterized as tight fold, thrust fault and nappe. The “crocodile” reflection structures are found beneath the Ningwu volcanic basin, Changjiang deep fault and Tan-Lu fault, indicating the decoupled deformation process of the upper and lower crust. Overall, the seismic data show evidence for an introcontinental orogen with lower crust and upper mantle subduction and imbrication; (4) Refraction seismic and MT data provide velocity and resistivity distribution across the YMB, and show a general agreement with the tectonic units. Based on the results of the integrated geophysical exploration, combining with the recent geochemistry results, a geodynamic model is proposed for the YMB. The model suggests that Middle and Later Jurassic introcontinental subduction, lithosphere delamination, mantle-derived magmatic underplating and MASH process are responsible for the formation of this world-class metallogenic belt.

\* 本文受国家“深部探测技术与实验研究”专项课题(SinoProbe-03-02)和国家自然科学基金重点项目(40930418)联合资助。

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:常印佛,吴明安,杜建国,周涛发,张忠杰,徐晓春,张贵宾,孟小红,李桐林,邓居智,韩立国,徐文艺,孟祥金,严加永,肖晓,薛爱民,李兵等

**Key words** Middle and Lower Yangtze Metallogenic Belt; Teleseismic tomography; Deep reflection seismic; Intro-continental subduction; Lithosphere delamination; Geodynamic model

**摘要** 岩石圈结构和深部过程对理解成矿带和大型矿集区的形成十分重要。岩石圈尺度的地球动力学过程将在地壳中留下各种结构的或物质的“痕迹”，这些“痕迹”可以通过地球物理的手段去探测。为深入理解长江中下游成矿带形成的深部动力学过程，作者在国家深部探测专项(SinoProbe)和国家自然科学基金重点项目支持下，在长江中下游成矿带开展了综合地球物理探测。方法包括宽频地震、深地震反射、广角反射/折射和大地电磁测深。数据处理和反演结果取得一系列新发现：(1)成矿带上地幔顶部存在低速体，在中心深度300km处有一向SW倾斜的高速体；(2)S波接收函数证实成矿带岩石圈较薄，只有50~70km；横波分裂结果显示，成矿带上地幔各向异性方向和强度与邻区有较大区别，显示平行成矿带(NE-SW向)的上地幔变形和流动；(3)深反射地震揭示成矿带上地壳曾发生强烈挤压变形，以紧闭褶皱、逆冲和推覆为特征；在宁芜火山岩盆地、长江断裂带和郟庐断裂之下出现“鳄鱼嘴”构造，指示上下地壳在挤压变形过程中解耦；深反射地震证实发生过陆内俯冲和叠瓦，并认为是岩石圈增厚和折沉的主导机制；(4)广角反射和大地电磁反演给出了跨成矿带地壳剖面的速度和电性结构，速度和电阻率分布总体上与构造单元相吻合。本文分析和解释了这些发现的地质意义，并结合近年在长江中下游地区的地球化学研究进展，提出了成矿带地球动力学模型。该模型认为：中、晚侏罗世陆内俯冲、岩石圈折沉、幔源岩浆底侵和MASH过程造就了长江中下游世界级成矿带的形成。

**关键词** 长江中下游成矿带；远震层析成像；深反射地震；陆内俯冲；岩石圈折沉；地球动力学模型

**中图法分类号** P541; P631

## 1 引言

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，素有东部“工业走廊”之称。成矿带由7个大型矿集区、约200多个大中型矿床组成(Pan and Dong, 1999; 常印佛等, 1991)，从北东到南西依次为宁镇、宁芜、铜陵-繁昌、庐枞、贵池、九瑞和鄂东南矿集区(图1)，区域上呈狭窄的带状分布。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？深部发生了什么地球动力学过程？长期以来一直是矿床地质学家试图回答的科学问题。地壳结构与物质组成是地球动力学演化过程的“档案馆”，记录着构造-岩浆事件、变质过程和成矿作用留下的各种信息(Hawkesworth *et al.*, 2013)。探测成矿带所根植的岩石圈结构和物质组成，对理解控制成矿的深部因素和预测新的矿集区至关重要。在国家“深部探测技术与实验(SinoProbe)”科技专项和国家自然科学基金重点项目支持下，启动了“深部矿产资源立体探测技术与实验(SinoProbe-03)”子项目，项目在长江中下游和南岭成矿带及铜陵、庐枞和于都-赣县矿集区部署了系统的深部探测研究工作(吕庆田等, 2011)，包括以下三个层次和内容。

**岩石圈结构探测。**主要目标是查明成矿带形成的深部构造背景、动力学过程和矿集区形成的深部控制因素，预测未发现的矿集区。研究思路选择跨过成矿带关键地段的地质廊带，在廊带内实施宽频地震、大地电磁、深地震反射、折射等地球物理探测，结合区域构造演化、岩浆岩和成矿规律认识，综合分析成矿带形成的深部构造背景，认识控制成矿带矿集区形成的动力学要素。

**典型矿集区3D结构探测。**主要目标是揭示矿集区3D结构及主要控矿地质体(构造、地层和岩体)的深部延伸；建

立矿集区区域成矿模式，为深部找矿勘查提供深部信息。研究思路以穿过矿集区关键成矿单元的若干地质剖面为主要探测对象，实施以反射地震、大地电磁、重磁2D反演为主的综合探测和解释，建立矿集区骨架剖面的2D地质-地球物理模型。用此骨架剖面为约束，利用区域重、磁位场三维反演技术(Lü *et al.*, 2013a)，构建矿集区三维地质-地球物理模型，并在关键地区实施钻探验证，验证模型的可靠性。

**典型矿床(田)的深部探测。**通过在典型深部矿床上多种地球物理方法的探测试验，研究方法的应用效果，总结有效的方法技术组合，为深部找矿勘查提供技术支撑。

项目自2009年启动以来，在长江中下游成矿带及典型矿集区完成了大量综合地球物理探测研究工作，取得了一系列新的发现和认识。本文重点对成矿带岩石圈结构探测取得的成果进行综述。包括覆盖整个成矿带的宽频地震探测、近300km的深地震反射剖面、400km的折射地震剖面 and 大地电磁探测剖面。在综合分析上述综合探测结果的基础上，提出了陆内成矿带形成的地球动力学模型。

## 2 区域地质背景

长江中下游成矿带(又称中下扬子成矿带)构造上位于大别-苏鲁造山带(超高压变质带,UHP)的前陆。北西以襄樊-广济深断裂、郟庐左旋走滑断裂为界，南东以江南断裂(又称阳新-常州断裂)为界，总体上呈南西狭窄、北东宽阔的“V”字型地带(图1;常印佛等, 1991)。长江中下游成矿带属于华南板块东缘的一部分，华南板块由两个前寒武陆核组成：即太古(?)-古元古(约1800Ma)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(刘宝珺和许效松, 1994; Li, 1998)，后期又经历了陆

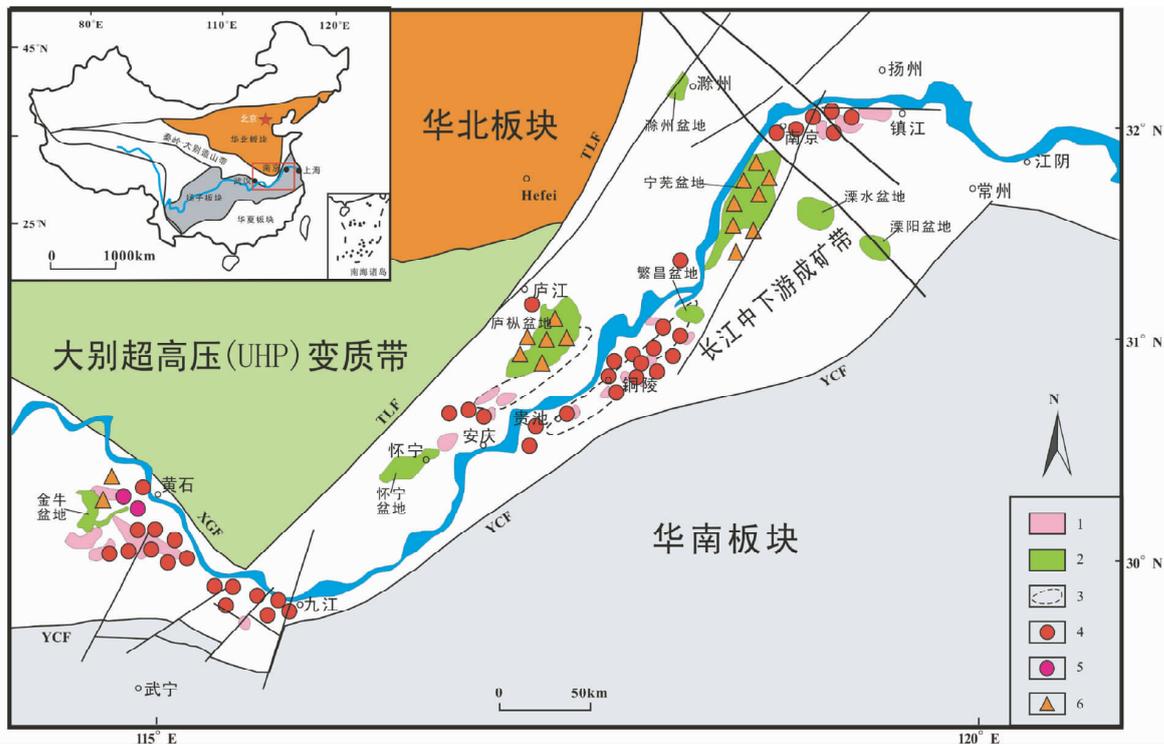


图1 长江中下游成矿带及邻区构造格架及主要矿集区位置示意图(据 Pan and Dong, 1999; Mao *et al.*, 2011 改绘)

1-晚侏罗-早白垩世花岗岩(156~137Ma); 2-白垩纪火山岩和次火山岩(<135Ma); 3-A型花岗岩带; 4-斑岩-矽卡岩-层状复合型Cu-Au-Mo矿床(>135Ma); 5-矽卡岩型Fe-Cu矿床(>135Ma); 6-玢岩型Fe矿床(<135Ma). XGF-襄樊-广济断裂; TLF-郟庐断裂; YCF-阳新-常州断裂. 左上角插图显示长江中下游成矿带位置

Fig. 1 Geological subdivision of Middle and Lower Reaches of Yangtze Metallogenic Belt and neighboring area showing the location of the major ore-districts (modified after Pan and Dong, 1999; Mao *et al.*, 2011)

1-Late Jurassic-Early Cretaceous granite (156~137Ma); 2-Cretaceous volcanic and subvolcanic (<135Ma); 3-A-type granites; 4-porphyry-skarn-stratabound complex Cu-Au-Mo deposits (>135Ma); 5-skarn Fe-Cu deposit (>135Ma); 6-porphyry-type Fe deposits (<135Ma). XGF-Xiangfan-Guangji fault; TLF-Tancheng-Lujiang fault; YCF-Yangxin-Changzhou fault. Insert map shows the location of the Middle and Lower Yangtze River metallogenic belt

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。加里东运动使区域隆升成陆,缺失下、中泥盆统;海西期又开始接受沉积,形成了上泥盆统-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。在不整合面附近形成区域重要的控矿层,如中石炭统底部形成的块状硫化物矿源层(徐文艺等,2004),二叠系孤峰和大隆组深水硅质岩层等。

中三叠世受印支运动影响(华南板块与华北板块碰撞),区域构造发生重大变化,区域沉积环境从海洋逐渐转向大陆环境。中三叠统下部普遍出现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碎屑岩沉积(常印佛等,1996)。

中晚侏罗世-早白垩世,区域构造体制发生了重大转变,由近东西向的陆陆碰撞构造体制转换为北东向的俯冲构造体制(张岳桥等,2009;徐先兵等,2009)。受古太平洋板块的NW向低角度俯冲的远程挤压应力影响,研究区及整个华南

板块发生上千千米的陆内造山运动。伴随强烈的陆内造山过程及随后的伸展作用,形成了长江中下游成矿带“隆”、“拗”相间的构造格局,发生了丰富多彩的成岩、成矿作用。隆起区(如,铜陵、宁镇、贵池等矿集区)发育一套高钾钙碱性岩石系列,形成了以矽卡岩-斑岩型铜、铁、金矿床为主的成矿系统;拗陷区(如,宁芜、庐枞等矿集区)发育了一套橄欖安粗岩岩石系列,形成了以“玢岩”铁、硫矿床为主的成矿系统(常印佛等,1991;唐永成等,1998;周涛发等,2008)。近年的地球化学研究表明,很多与成矿关系密切的岩石具有埃达克(Adakite)质岩石的特点(Xu *et al.*, 2002; 王强等,2003; Wang *et al.*, 2006)。

### 3 数据采集及处理

#### 3.1 剖面部署

按照深部矿产资源立体探测技术与实验(SinoProbe-03)项目的总体设计(吕庆田等,2011),成矿带层次的岩石圈结

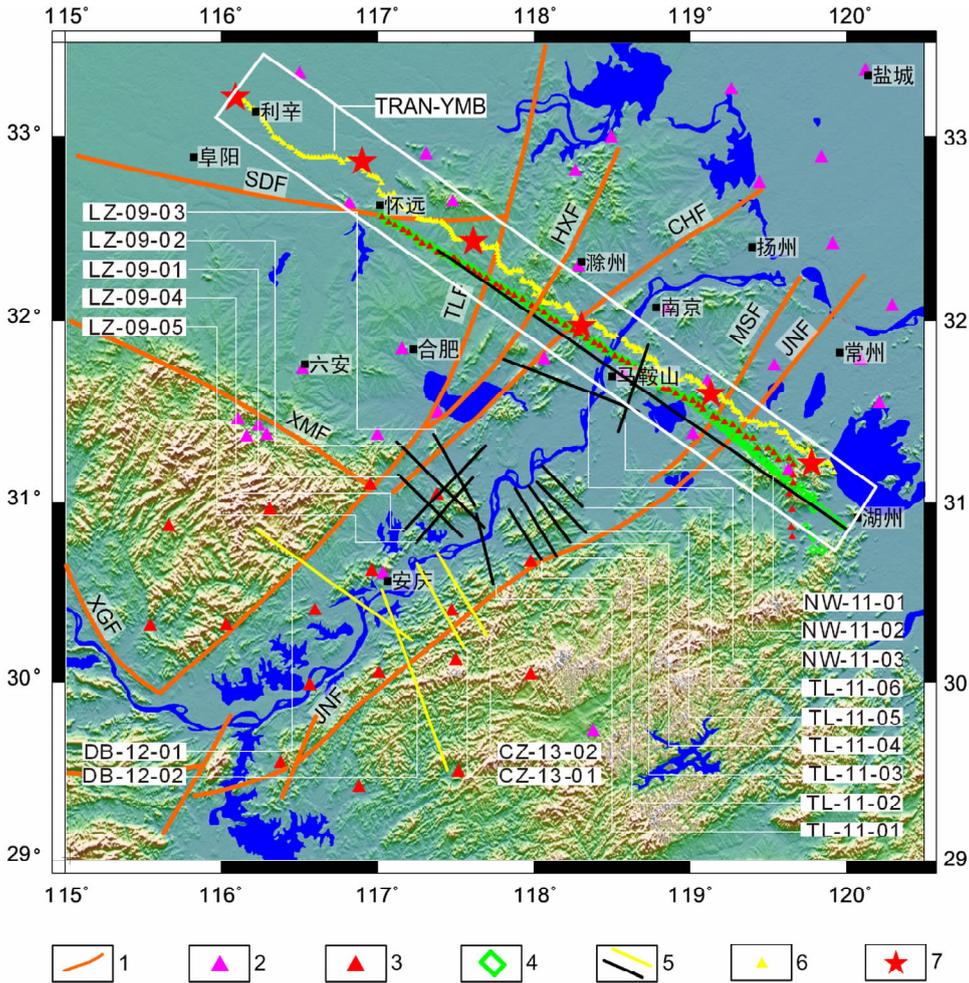


图2 长江中下游成矿带及典型矿集区深部探测剖面位置及部署示意图

1-主要断裂;2-固定地震台站;3-流动地震台站;4-MT测深点;5-反射地震剖面,黄色为非SinoProbe剖面;6-广角反射接收点;7-广角反射激发点。TLF-郟庐断裂;XHF-响水-淮阴断裂;CHF-滁河断裂;MSF-茅山断裂;JNF-江南断裂;SDF-寿县-定远断裂;XMF-晓天-磨子潭断裂;XGF-襄樊-广济断裂

Fig. 2 Map showing the layout and location of deep exploration profiles in Middle and Lower Reaches of Yangtze Metallogenic Belt and major ore-districts

1-major faults; 2-permanent seismic stations; 3-portable broad-band seismic stations; 4-MT sounding points; 5-reflection seismic profile, yellow are non-SinoProbe profiles; 6-wide-angle stations; 7-wide-angle shot points. TLF-Tan-Lu fault; XHF-Xiangshui-Huaiyin fault; CHF-Chehe fault; MSF-Maoshan fault; JNF-Jiangnan fault; SDF-Shouxian-Dingyuan fault; XMF-Xiaotian-Mozitan fault; XGF-Xiangfan-Guangji fault

构与物质探测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地球物理探测廊带(TRAN-YMB,图2)。廊带北西起自安徽省利辛县境内,经马鞍山,南东到达浙江湖州境内,全长约450km(各种方法探测剖面长度略有区别见图2)。廊带完整地跨过了华北板块、长江中下游成矿带,进入华南板块内部。自北西向南东,廊带依次穿过5个二级构造单元,即合肥盆地、张八岭隆起、滁全拗陷、沿江拗陷和皖南-苏南拗陷(朱光等,1999)。构造单元之间分别以郟庐断裂、淮阴-响水断裂、滁河断裂和江南断裂分割(图2)。在廊带内分别开展了宽频地震观测(Shi *et al.*, 2013; Jiang *et al.*, 2013; 江国明等,2014),深地震反射剖面(Lü *et al.*, 2014),广角反射剖面(徐涛等,2014)和MT剖面探测(强建科等,

2014)。

## 3.2 数据采集与处理

### 3.2.1 宽频地震

宽频地震数据由两部分构成,一部分来自本项目部署的流动地震台站,另一部分来自成矿带周边省份的固定地震台站,由国家测震台网数据备份中心提供。数据时间自2007年9月至2011年4月,有效固定台站共计46个,台站间隔约50km(图2)。项目部署的流动台站(Guralp 3ESPCD)观测包括两个阶段(图2):第一阶段自2009年11月至2011年8月,台站集中部署在安徽定远到浙江湖州一线的区域综合地

球物理探测廊带内 (TRAN-YMB), 有效台站共计 47 个, 台站间隔约 5km; 第二阶段自 2012 年 6 月至 2013 年 6 月, 台站部署在成矿带中段大别山至江南古陆之间, 有效台站共 20 个, 台站间隔约 50km。

利用上述数据开展了 3 个方面的数据处理和研究: 远震层析成像, P-和 S-波接收函数和 SKS、SKKS 各向异性参数计算。远震层析成像使用 Zhao *et al.* (1994) 提出的方法, 在数据中优选出震级大于 5.5、震中距在  $30^\circ \sim 90^\circ$  的 678 个远震事件, 提取了 17118 条有效 P-波相对走时残差数据 (精度达到 0.01 ~ 0.02 秒) 参与层析反演, 获得了成矿带深至上地幔 (400km) 的 P 波速度图像 (Jiang *et al.*, 2013; 江国明等, 2014)。

使用共转换点偏移 (CCP) P-和 S-波接收函数 (RF) 技术 (Kind *et al.*, 2002) 获得地壳和上地幔的结构。该技术通过探测来自壳内速度界面、Moho 和岩石圈与软流圈界面 (LAB) 的 P-S 或 S-P 转换波对界面进行成像。在接收函数计算中采用了时间域反褶积方法 (Liguria and Ammon, 1999), 选取适当高斯滤波因子以保留一些地壳内的高频信号 (P-波到 2Hz, S-波到 1Hz)。最终选取了信噪比较高的 142 个地震事件中的 4851 个远震 P-波接收函数, 205 个 S 波接收函数参加了叠加成像 (史大年等, 2012; Shi *et al.*, 2013)。

在所采集的数据中观测到了很好的远震 SKS 和 SKKS 震相, 作者使用“互相关函数”法 (Silver and Chan, 1991; Vinnik *et al.*, 1989) 对这些震相进行各向异性参数计算 (Shi *et al.*, 2013)。计算结果获得了沿跨越成矿带综合地球物理探测廊带 (TRAN-YMB) 及周边的各向异性参数, 对研究该区地壳和上地幔变形及动力学研究提供了新的信息。

### 3.2.2 反射地震

反射地震数据采集由中石化西南石油局云南物探公司分别于 2009 年 11 月至 2010 年 1 月和 2010 年 12 月至 2011 年 6 月完成, 使用法国生产的 SN428XL 数字地震仪。按照采集参数的不同, 反射地震剖面探测分为深地震反射和高分辨率反射。前者主要用于跨越成矿带的区域地球物理探测廊带 (TRAN-YMB) 的数据采集; 后者主要用于矿集区的数据采集。二者的主要区别在于激发和接收参数的不同, 如激发井深、药量和接收检波器间距 (详见表 1)。

数据处理使用 CGG、OMEGA、Promax 和部分自行开发的软件进行。在对野外数据质量进行分析的基础上, 认为影响资料处理质量的主要问题有: 静校正、信噪比低、频率问题、不同激发条件造成的资料振幅、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等;

(2) 采用球面扩散补偿和地表一致性振幅补偿相结合进行振幅补偿处理, 使横向和浅中深层能量变化合理, 真实反

表 1 长江中下游成矿带及典型矿集区反射地震数据采集参数一览表

Table 1 Seismic acquisition parameters of reflection seismic for the Middle and Lower Reaches of Yangtze Metallogenic Belt and ore-district

采集参数	深地震反射	高分辨率反射
使用地区	区域地球物理剖面	庐枞、铜陵和宁芜矿集区
有效道数	720	720
最大偏移距	1440m	7190m
炮点距	240m	80m
覆盖次数	60	90
检波点距	40m	20m
炮线与接收线	1Sx1R (激发与接收同线)	1Sx1R (激发与接收同线)*
记录长度	24s	16s
采样率	2ms	2ms
震源类型	爆炸震源	爆炸震源
检波器类型	20DX-10	20DX-10
检波组合	12 个组合, 组内距 1m	12 个组合, 组内距 1m
激发井深	24 ~ 30m	18 ~ 22m
激发药量	20 ~ 30kg	8 ~ 14kg

注: \* 庐枞 LZ-09-02 线与铜陵 TL-11-01 线采用宽线接收, 中间炮线, 两侧检波线, 炮线位于两检波线之间

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相结合技术, 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拓展频带宽度, 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, 如动校正集、常速扫描叠加剖面、变速扫描叠加段以及动态叠加段等, 识别速度, 保证准确拾取速度;

(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见 Lü *et al.* (2013b)。

### 3.2.3 折射地震

折射地震剖面大致沿安徽利辛到江苏宜兴一线, 位于反

射地震剖面北侧。数据采集于 2011 年 9 月 ~ 10 月完成,沿剖面设计 6 个人工源激发点(平均激发药量 2.2t TNT),炮点间距 60 ~ 90km;采取多井组合激发方式。沿剖面布设 250 台便携式三分量数字地震仪进行数据采集,台站间距 1.5 ~ 2.0km,剖面总长约 450km,记录来自地壳和上地幔顶部不同深度、不同属性的深层地震波信息。在正确识别各种来自壳内和 Moho 界面反射震相的基础上,使用射线追踪法(Zelt and Smith, 1992; Xu *et al.*, 2006, 2010)模拟多震相走时曲线,获得地壳和上地幔顶部速度模型(徐涛等, 2014)。

### 3.2.4 大地电磁

MT 数据采集使用加拿大凤凰公司的 V5-2000 大地电磁仪,其频率范围为 320 ~ 0.00055Hz,扩展频率达到 0.0001Hz,全频段 40 个频点,扩展后为 44 个频点。每个测点测量 2 个相互正交的水平电场分量( $E_x, E_y$ )和 3 个相互正交的磁场分量( $H_x, H_y, H_z$ )。根据野外 168 小时连续观测试验,区域地质廊带(TRAN-YMB)的 MT 数据采集时间 24 小时即可满足探测深度要求。

数据处理流程主要包括:(1)扫描时间序列,根据电磁干扰程度选择合适的时间段参与 Robust 阻抗估计;(2)对部分干扰大的测点在时间域进行形态滤波,压制噪声;(3)检查功率谱,选择受噪声影响较小的功率谱参与阻抗估计;(4)剔除突变的阻抗飞点;(5)维性分析与 Rhoplus 曲线平滑。数据分析和处理细节见 Tang (2013)、汤井田等(2014)、肖晓等(2011, 2014)和强建科等(2014)。

## 4 深部探测结果及地质解释

### 4.1 宽频地震探测结果

#### 4.1.1 上地幔及岩石圈结构

远震层析成像结果(江国明等, 2014)显示从地壳到上地幔(400km),成矿带呈现“三明治”结构,即 0 ~ 50km 深度表现为高速异常,100 ~ 200km 深度表现为低速异常,而 200 ~ 400km 深度又表现为高速异常(所有速度异常都是相对 IASP91 速度模型。Kennett and Engdahl, 1991)。在三维空间展布上,上地幔的低速体和高速体,基本上平行于成矿带走向方向(NE-SW),而且南部较深、北部较浅,总体向南西倾斜。根据第一层高速异常的分布,大致推测长江中下游成矿带岩石圈厚度在 60 ~ 70km,与该剖面的接收函数结果非常一致(Shi *et al.*, 2013)。上地幔的速度异常通常由温度和物质组成的变化引起,高速异常对应着“冷的”、坚硬的物质(比如俯冲的板块或岩石圈),而低速异常则对应着“热的”、较软的物质(比如,软流圈热物质)。研究区的“三明治”结构或可解释为俯冲的古老洋壳残余,或拆沉的岩石圈根部。大区域层析成像研究发现(Li and van der Hilst, 2010),太平洋板块俯冲的“残余”洋壳堆积在 410 ~ 660km 的地幔过渡带,深度上大于成矿带中心位于 300km 的高速体。因此,推测该深度的高速体不可能是俯冲的洋壳堆积,更可能是增厚

的岩石圈(下地壳)拆沉,并下沉到该深度的残留体。这与长江中下游成矿带的岩浆岩普遍具有与埃达克(adakite)岩石类似的地球化学特征(王强等, 2001; 许继锋等, 2001; Xu *et al.*, 2002)相吻合,它们来自增厚的岩石圈(下地壳)拆沉、熔融的结果。按照这种解释,位于 100 ~ 200km 之间的低速体应该是上升的软流圈物质,它们替代了拆沉的岩石圈。

P-波和 S-波接收函数成像给出了成矿带壳-幔界面(Moho)、岩石圈和软流圈边界清晰的图像(Shi *et al.*, 2013)。S 波接收函数可以避免地壳内的多次波干扰,因此,更适合用于研究上地幔结构。研究区已有的 S 波接收函数结果已经显示沿郟庐断裂带岩石圈厚度在 60 ~ 70km,存在一个区域软流圈隆起带(Chen *et al.*, 2006; Sodoudi *et al.*, 2006)。本研究获得的 S-波接收函数进一步证实了在长江中下游成矿带存在软流圈隆起,LAB 深度在 50 ~ 70km 之间,在宁芜矿集区的最浅处只有 50km(图 3c)。

沿剖面 Moho 界面在 29 ~ 35km 之间变化,对应宁芜火山岩盆地最浅,沿剖面向东南逐渐加深到约 33km,向北西逐渐加深到郟庐断裂下的 35km,郟庐断裂以西的合肥盆地 Moho 又逐渐变浅(32km)。对应成矿带的 Moho 形态总体上表现为上凸的“弧形”,凸起的顶点位于宁芜盆地之下(图 3)。其它方法,如利用网格搜索法获得的 Moho 深度(Shi *et al.*, 2013)和区域重力异常反演的 Moho 深度(严加永等, 2011)都指示宁芜火山岩盆地之下 Moho 隆起的存在。从以上分析可以看到,岩石圈的减薄、软流圈的隆起和地壳的减薄等事件都集中发生在长江中下游成矿带之下,反映出这些事件深部过程之间的有机联系。

沿剖面地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,根据油气勘探揭示的盆地结构(赵宗举等, 2001),高速转换界面可以解释为伸展构造体制下的壳内区域滑脱面。宁芜火山岩盆地中下地壳具有异常速度结构,仔细分析来自不同方位的远震接收函数,发现壳内界面(22km 附近)转换波的极性和振幅随震源方向的变化而变化,当震源方位平行于成矿带走向时(NE-SW),成矿带下地壳表现为高速特征,但当震源方位垂直于成矿带走向时(大致平行剖面方向),下地壳呈现低速特征。这种特征反映出下地壳物质具有明显的地震各向异性。进一步的理论模拟表明(Shi *et al.*, 2013),下地壳的各向异性层厚度 10km,速度各向异性约 5%,快波速度轴向南西 225°,倾角 11°。中下地壳的各向异性不太可能为定向分布的裂隙引起,因为下地壳的压力足以使任何裂隙闭合。最可能的成因是岩浆活动(底侵作用)和构造作用使下地壳岩浆过程(MASH-melting-assimilation-storage-homegenization)发生流动变形所致。流动变形可以使矿物(角闪石、橄榄石等)晶体沿流动方向排列,从而产生速度各向异性(Zhang and Karato, 1995)。

#### 4.1.2 上地幔各向异性与变形

图 4 显示研究区 SKS 和 SKKS 横波分裂各向异性参数

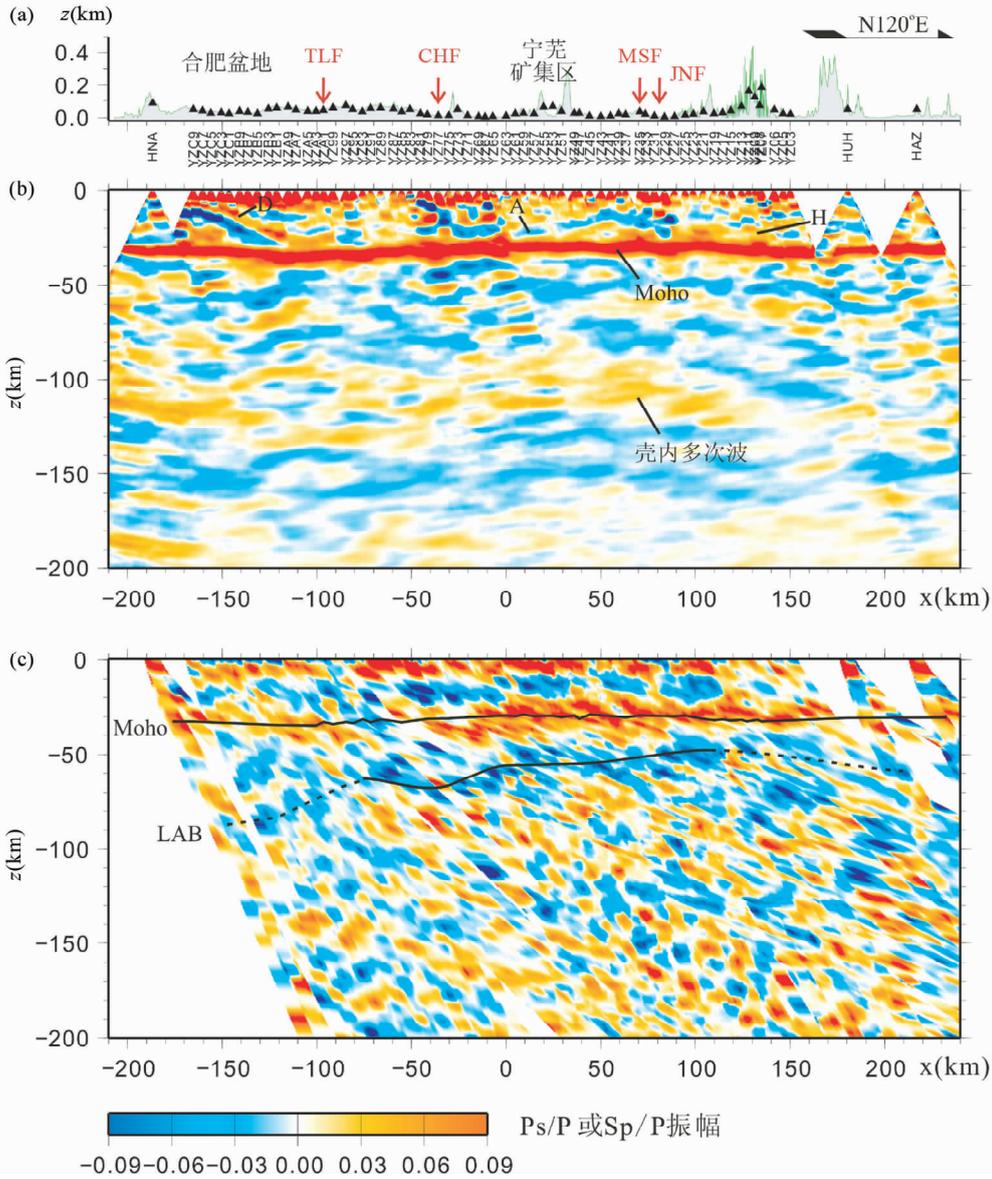


图3 沿地质廊带 P-和 S-波接收函数图像,显示地壳和上地幔结构(据 Shi *et al.* , 2013)

(a)-地形及宽频台站位置;(b)-P 波接收函数剖面;(c)-S 波接收函数剖面. A, H 和 D 分别指示成矿带下地壳低速转换界面和各向异性层,扬子下地壳的高速界面和合肥盆地深部东南倾斜的构造;LAB-岩石圈-软流圈界面. 断裂符号意义同图 2

Fig.3 Seismic images of the crustal and upper mantle structures along the main seismic profile (after Shi *et al.* , 2013)

(a)-topography and station positions along the profile; (b)-P-wave receiver function cross-section; (c)-S-wave receiver function cross-section. A, H and D indicate the converted phases for the relatively low velocity and anisotropic layer in the lower crust of the YMB, the high-velocity layer in the lower crust of the YC and the south-dipping structure beneath the Hefei Basin respectively. LAB-the lithosphere-asthenosphere boundary. For the fault abbreviations see Fig. 2

计算结果。从图 4 可以看出,快波偏振方向沿剖面有较大的变化,且规律性明显。华北地台内部可观测到的快波偏振方向总体呈 NW-SE 方向,几乎平行剖面方向;快慢波时差约 0.8s。位于大别东北、靠近郯庐断裂的台站 SCH 显示不同的快波偏振方向(NE-SW 向),可能受郯庐断裂或板块边界的影响。沿剖面到滁河断裂,可以看到快波偏振方向呈顺时针逐渐旋转,直到大致平行断裂带。长江中下游成矿带内(滁

河断裂到江南断裂之间)大多数的台站快波的偏振方向在 N45° ~ 65°E 之间,大致平行构造线方向。江南断裂以东,快波方向从近似平行构造线方向又变为 WNW - ESE。

快波偏振方向沿剖面变化的另一个显著特征是随震源方位的变化(图 4)。比如,对大多数来自南东 134°方向的地震,江南断裂附近台站的快波偏振方向一致呈 N65° ~ 85°E;但对来自北西 317°方向的地震,快波偏振方向呈 N120° ~

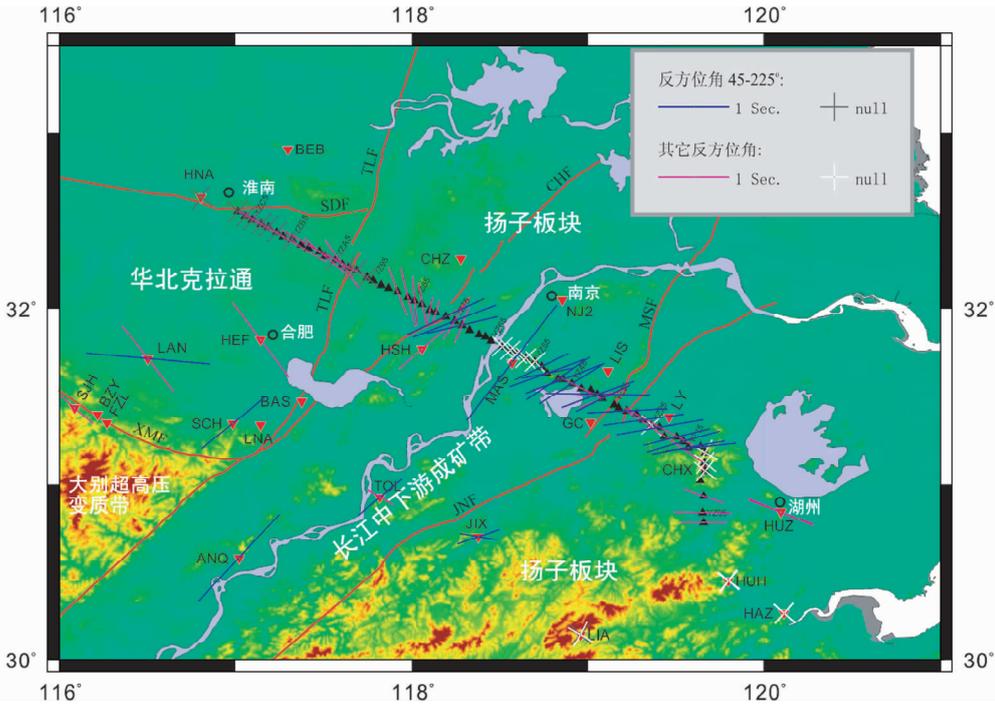


图4 长江中下游成矿带及邻区横波各向异性参数计算结果(据 Shi *et al.*, 2013)

线段表示可靠计算结果,线段长短表示快慢波时差,线段方向表示快波偏振方向;十字符号表示不可靠计算结果或没有横波分裂,其中径向或切向平行反方位角方向.不同颜色的线段表示不同方位射线的计算结果;图中断裂符号意义同图2

Fig. 4 Shear-wave splitting results of SKS and SKKS in the Middle and Lower Reaches of YMB region (after Shi *et al.*, 2013)

Bars represent the well constrained splitting results with their orientation parallel to the fast polarization direction ( $\alpha$ ) and length proportional to splitting time ( $\delta t$ ); Crosses represent unconstrained or null results with one leg parallel to the back-azimuth. Different colors are used to distinguish the results of different (southeast and northwest) incoming waves. For the fault abbreviations see Fig. 2

130°E.这种特征表明,研究区的各向异性并非单一均匀各向异性层,可能具有多层、且流动变形方向不同.由于地壳各向异性层的贡献通常在0.1s (Barruol and Mainprice, 1993),显然观测到的0.8s以上的快慢波时差应该主体由上地幔各向异性层引起.下地壳各向异性的方向(Shi *et al.*, 2013)与上地幔方向基本一致的特征,说明了下地壳与上地幔变形的本质联系.

虽然很多台站没有观测到各向异性,但并不能说明真实没有各向异性.一种解释是,当震源方位平行或垂直各向异性主轴方向时,通常观测不到;另一种解释是,横波穿过了相邻的两层各向异性层,其强度近似,但各向异性方向近似垂直,结果使产生的快慢波延迟相互抵消.无论哪种解释,都反映出研究区上地幔各向异性存在短距离、复杂的变化,这和造山带上地幔小尺度流动变形的动力学特征(Helffrich *et al.*, 1994)相吻合.

总体上,华北克拉通、成矿带和扬子克拉通分别具有NW-SE, NE-SW和WNW-ESE的快波偏振方向,区域上形成各向异性的“三明治”结构.表明在总体NW-SE挤压下,长江中下游成矿带上地幔由于受到华北克拉通的阻挡,在板块边界发生了切向(垂直挤压应力方向)流动变形,而上地壳仍然发生NW-SE向的褶皱或冲断变形.这种解释与层析成像

发现的上地幔NE-SW走向的低速体十分吻合.我们还注意到在成矿带中央的MAS、ANQ台站上具有最大的快慢波延迟,这与上地幔低速体的空间位置十分吻合,很有可能该低速体的NE-SW向的流动变形是产生上地幔各向异性的机制.

## 4.2 反射地震探测结果

### 4.2.1 地壳结构与变形

上地壳(0~4s TWT) 上地壳变形与地表构造单元对应完好,不同的构造单元具有不同的反射特征,反映出构造变形和物质组成上的区域变化.以郟庐断裂为界,东西差异十分明显,合肥盆地反射近水平,靠近郟庐断裂带附近略有抬升,并有错断.盆地沉积层与基底反射清晰可辨,前者由几组强波组构成,后者存在明显的错断,成层性变差(图5c).郟庐断裂以东,上地壳呈现密集的倾斜反射,CDP点2201到3401,反射同相轴向SE倾斜;而CDP3401到5001之间反射同相轴一致向NW倾斜,反映出两个块体构造变形与反射成因的差异.CDP点2201到3401对应张八岭隆起,它由晚元古界和太古界结晶基底组成.张八岭隆起地表存在数条近直立的基底韧性剪切带(Zhu *et al.*, 2005),由于韧性剪切带是很好的地震反射体(Jones and Nur, 1984),可以推

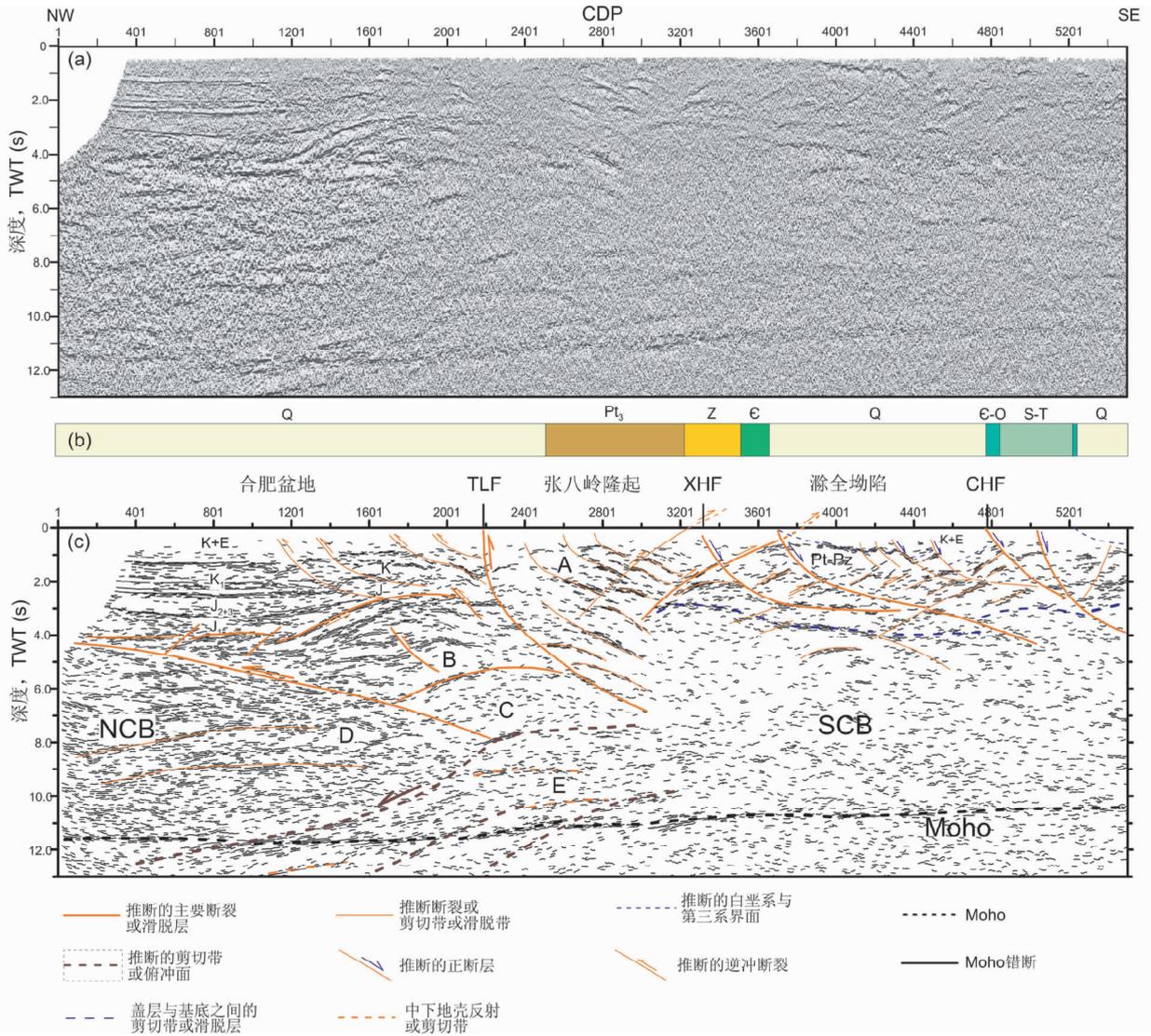


图5 CDP 1至5000段叠前时间偏移地震剖面(a)、地表地质(b)及地质解释(c)(据 Lü *et al.*, 2014)

Pt-Pz-元古界-古生界地层; J<sub>1</sub>-下侏罗防虎山组; J<sub>2+3</sub>-中上侏罗圆筒山组周公山组; K<sub>1</sub>-下白垩统; K+E-白垩系及第三系地层, 其底边界的推断参考了区域重力资料; TLF-郟庐断裂; XHF-响水-淮阴断裂; CHF-滁河断裂; NCB-华北板块; SCB-华南板块; A、B、C、D和E表示壳内相对完整的块体或岩片

Fig. 5 Raw (a) and interpreted migrated seismic segment (c) from CDP 1 to 5000 for the deep seismic reflection profile with surface geology (b) (after Lü *et al.*, 2014)

Pt-Pz-Proterozoic-Paleozoic strata; J<sub>1</sub>-Lower Jurassic Fanghushan Formation; J<sub>2+3</sub>-Middle-Upper Jurassic Yuantongshan Formation and Zhongongshan Formation; K<sub>1</sub>-Lower Cretaceous; K+E-Cretaceous and Tertiary strata, the bottom boundary of which is deduced by reference to the regional gravity data; TLF-Tan-Lu fault; XHF-Xiangshui-Huaiyin fault; CHF-Chuhe fault; NCB-North China block; SCB-South China block; The letters A, B, C, D and E indicate comparatively complete blocks or flakes

测张八岭隆起内部一系列 SE 倾斜的反射为这些韧性剪切带的深部延伸(Lü *et al.*, 2014)。这些基底韧性剪切带的存在及其空间延伸也反映了张八岭块体压扭挤出的动力学过程(图 5c)。CDP 3401 到 5001 对应滁全拗陷, 浅地表呈现一个非对称伸展盆地形态, 盆地底部反射清晰, 并受控于系列 SE 倾斜的正断层。盆地下方出现一系列近似平行的、倾向 NW 的反射同相轴, 并有规律地被切断。根据拗陷两侧出露的老

地层及其变形特征, 这些 NW 倾斜的密集反射反映出盖层曾经历了强烈挤压变形, 形成紧闭褶皱、冲断和叠瓦的构造样式。在后期伸展过程中, 被区域拆离断层切断。

滁河断裂往东, NW 倾斜的密集反射逐渐演变不连续“弧”形反射, 之间存在明显的错断, 显得较为凌乱。这种特征或可解释为盖层的箱式褶皱和冲断褶皱, 后期伸展过程中被拉开。根据反射同相轴之间的关系, 在沿江拗陷和宁芜火

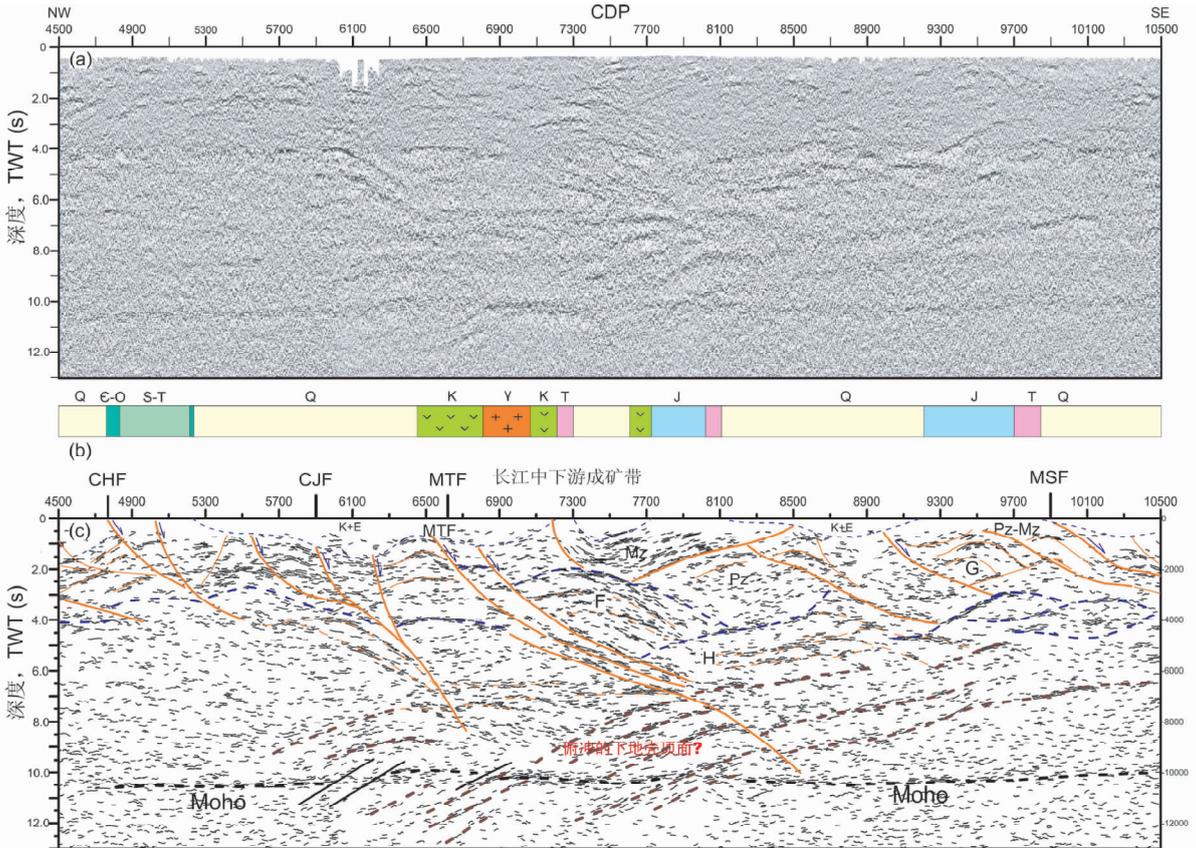


图6 CDP 5000至10000段叠前时间偏移地震剖面(a)、地表地质(b)及地质解释(c)(据 Lü *et al.*, 2014)

Pt-Pz-元古界-古生界地层; Pz-古生界地层; Mz-中生界地层; K+E-白垩系和第三系地层; CHF-滁河断裂; CJF-长江深断裂; MTF-主逆冲断裂; MSF-茅山断裂; F、G和H表示壳内相对完整的块体或岩片; 地质解释图例同图5

Fig. 6 Raw (a) and interpreted migrated seismic segment (c) from CDP 5000 to 10000 for the deep seismic reflection profile with surface geology (b) (after Lü *et al.*, 2014)

Pt-Pz-Proterozoic-Paleozoic strata; Pz-Paleozoic strata; Mz-Mesozoic strata; K+E-Cretaceous and Tertiary strata; CHF-Chuhe fault; CJF-Changjiang deep fault; MTF-Main thrust fault; MSF-Maoshan fault; The letters F, G and H indicate comparatively complete blocks or flakes. The legend for geological interpretation is same as Fig. 5

山岩盆地之下可以识别出几组 SE 倾斜的拆离断层(图 6, CJF、MTF)。作者认为这几组拆离断层控制了沿江拗陷和宁芜火山岩盆地的形成,并分别称之为长江深断裂带(CJF)和主拆离断裂带(MTF)。这些拆离断裂带在挤压期或是系列逆冲断裂,伸展期反转为拆离断层。宁芜火山岩盆地以东,一直到剖面尾端,上地壳表现为大尺度“波浪”式褶皱,比如 CDP 点 7100~8500 之间的不对称“波谷”式反射,宽约 28km; CDP 点 9000~10100 之间的“波峰”式反射,宽约 22km(图 6, G);在“波谷”和“波峰”之间不乏较陡的冲断和推覆构造;又如,CDP 点 11100~13500 之间的巨型“波浪”褶皱,巨型褶皱的背斜从 CDP 点 11100 到 12000,向斜从 CDP 点 11700 到 13500,“波长”超过 30km(图 7)。从 1:50 万地质图上分析(国土资源部中国地质调查局,1999<sup>①</sup>),该巨型褶皱向南西方向一直延伸到安徽的宁国。这种反射特征或反映出盖层变形以大尺度、块体整体变形为特征,形成了地壳尺度的褶皱、冲断和叠瓦,与长江以北的小尺度紧闭褶皱、冲

断和叠瓦形成鲜明对比。

中、下地壳(4~10s, TWT) 中下地壳可以分为特征迥异的四段,郟庐断裂以西段,郟庐断裂至长江深断裂段,长江深断裂至江南断裂段和江南断裂以东段。郟庐断裂以西,合肥盆地中、下地壳表现为缓倾斜、密集反射,倾斜方向多变;内部可以识别出倾向不同的剪切带,反映出在挤压变形过程中的岩片拆离、叠置过程。中下地壳这种密集反射特征或是古老克拉通的典型特征(Allmendinger *et al.*, 1987),记录了早期克拉通形成时壳幔物质的多次交换过程。

郟庐断裂至长江深断裂之间的中、下地壳总体反射稀疏,存在零星水平或缓倾斜反射,靠近 Moho 附近反射增加,向西接近郟庐反射逐渐增多,并倾向 NW。长江深断裂至江南断裂段,中、下地壳显示出与长江以西的巨大差异,总体呈

① 国土资源部中国地质调查局. 1999. 中华人民共和国 1:50 万数字地质图数据库

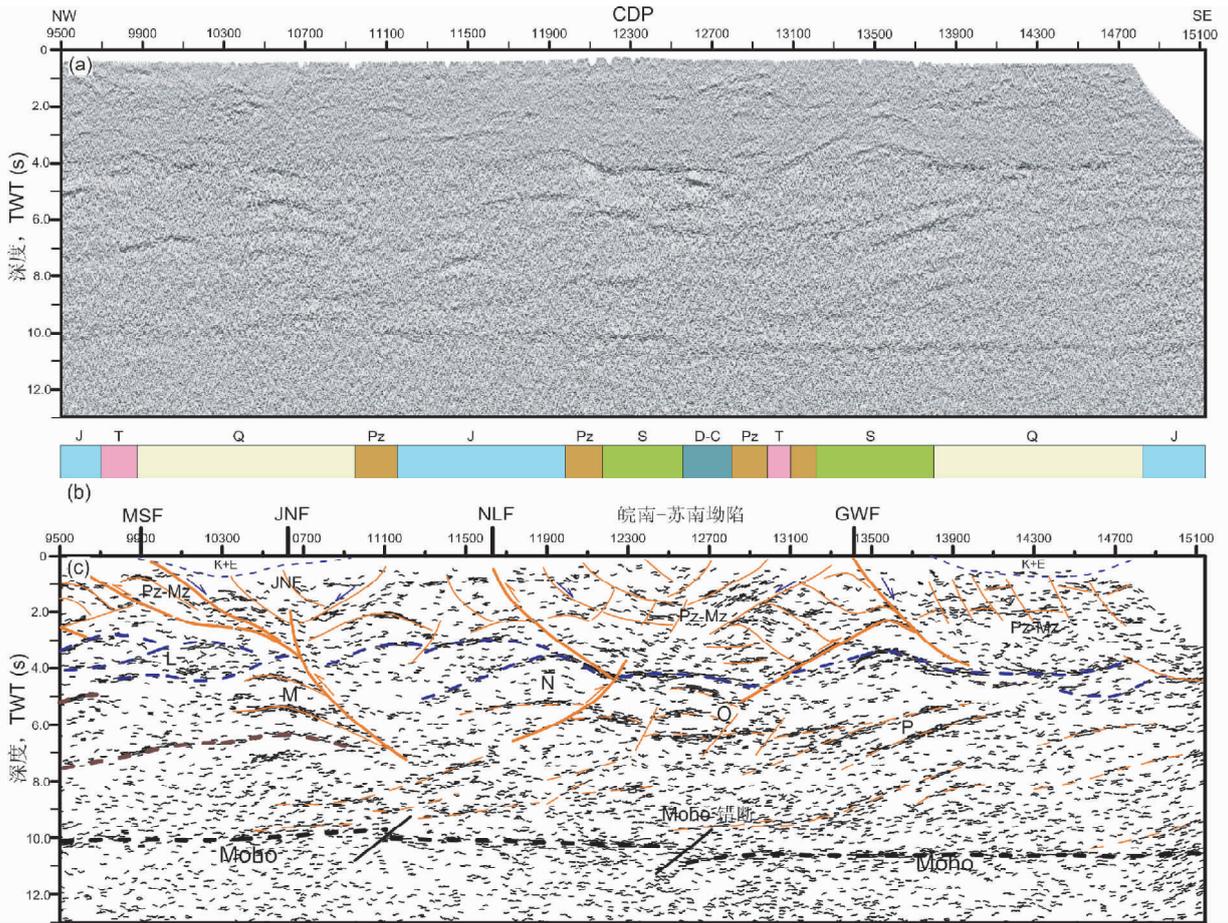


图7 CDP 10000 至 15000 段叠前时间偏移地震剖面(a)、地表地质(b)及地质解释(c)(据 Lü *et al.*, 2014)

Pz-Mz-古生界-中生界地层;K + E-白垩系和第三系地层;MSF-茅山断裂;JNF-江南断裂;NLF-宁国-溧阳断裂;GWF-广德-无锡断裂;L、M、N、O和P表示壳内相对完整的块体或岩片;地质解释图例同图5

Fig.7 Raw (a) and interpreted migrated seismic segment (c) from CDP 10000 to 15000 for the deep seismic reflection profile with surface geology (b) (after Lü *et al.*, 2014)

Pz-Mz-Paleozoic-Mesozoic strata; K + E-Cretaceous and Tertiary strata; MSF-Maoshan fault; JNF-Jiangnan fault; NLF-Ningguo-Liyang; GWF-Guangde-Wuxi fault; The letters L, M, N, O and P indicate comparatively complete blocks or flakes. The legend for geological interpretation is same as Fig. 5

现密集、长距离连续的反射特征。中地壳还出现“岩片”整体被挤出和叠置的构造现象,比如图6中的F块体沿MTF被向上挤出,H块体插入其下(图6)。下地壳(7.0~10.5s, TWT)出现多组NW倾斜的强反射。从茅山断裂开始,这些强反射从中地壳一直延伸到宁芜盆地的上地幔(图6),并导致宁芜火山岩盆地和长江深断裂带之下Moho面多处错断。

江南断裂以东段,中地壳(4.0~7.0s, TWT)反射密集,且振幅强,最显著的特征是多处出现叠置的反射同相轴(图7),比如图7中L、M、N、O、P等位置。作者将其解释为结晶基底岩片的逆冲、叠瓦,甚至双重构造(Duplex)。中地壳这些反射与上地壳反射空间上不连续。上地壳反射多终止在盖层与基底之间的滑脱面上(图7),反映出地壳在挤压变形过程中,上、中地壳是解耦的(Decoupling),虽同步挤压,但不同步变形。下地壳(7.0~10.5s, TWT)大致以江南断裂为界,

东南段出现系列NW倾斜的反射,并在CDP点12500附近造成Moho错断。这种特征类似剖面中段宁芜火山岩盆地的情形,或许是下地壳俯冲的残留痕迹,或代表陆内俯冲的早期阶段。

整个剖面的Moho面呈上凸的“弧形”,深度在30~34.5km之间变化。最浅处在宁芜火山岩盆地和江南断裂之下,最深处在合肥盆地。Moho面多处存在错断,最明显的错断出现在郟庐断裂、宁芜火山岩盆地、江南断裂带和皖南-苏南拗陷内部(CDP点12500),表明块体边界和壳幔交换强烈地区均会出现Moho的错断。

#### 4.2.2 “鳄鱼嘴”构造与陆内俯冲

深地震反射剖面呈现的最显著、最重要的特征是,在宁芜火山岩盆地、沿江拗陷(长江深断裂)和郟庐断裂之下出现“鳄鱼嘴”反射结构形态,即中上地壳反射向上逆冲(现今表

现为拆离正断层),下地壳反射向下俯冲(图6),中间形成壳内楔状体。为叙述方便,作者将宁芜之下的逆冲断裂带命名为主逆冲断裂带(MTF),长江之下的逆冲断裂由于它与传统的长江深断裂带吻合,本文也称之为长江深断裂带。二者都由若干条逆冲断裂组成,形成具有一定宽度的逆冲带。仔细观察,可以看到下地壳(7.0~10.5s,TWT)出现的多组NW倾斜的强反射,从茅山断裂开始,由中地壳一直延伸到宁芜盆地的上地幔(图6),并导致宁芜火山岩盆地和长江深断裂带之下Moho面多处错断。这种特征还出现在郟庐断裂之下,但没有宁芜盆地之下典型。

20世纪70年代,Oxburgh(1972)在研究东阿尔卑斯时已经注意到这种构造形态,被撕裂的岩石圈上地壳远距离推覆,形成异地地体(称为“岩片”,flakes);与之相应的下地壳和岩石圈地幔沉入到地幔中。Li(1994)在研究华南与华北碰撞构造时提出了类似的模式,他认为华南板块上、下地壳在两板块碰撞过程中拆离,上地壳逆冲在华北板块上,向北推覆了400多千米,而下地壳在南京(东西向)附近俯冲到华北的地幔中。大陆地壳和岩石圈地幔俯冲下沉到另一大陆之下的现象,在碰撞板块边界时有发生,如比利牛斯(Roure *et al.*, 1989)、喜马拉雅(Zhao *et al.*, 1993)。Doin and Herry(2001)对大陆俯冲过程及榴辉岩的作用进行了物理模拟,结果表明壳内薄弱带(weak zones)的存在与否对地壳变形的方式影响巨大。如果壳内解耦带存在,地壳处于不稳定状态。在汇聚挤压应力作用下,相对刚性的岩石圈地幔沿着地壳内低粘性通道向下俯冲,并形成造山楔状体,其宽度和几何形态取决于壳内解耦强度和大陆地壳物质组成。

深地震反射剖面揭示出两个重要事实:(1)长江深断裂以东,中上地壳与下地壳变形完全解耦。中、下地壳出现拆离的深度位于约21km(TWT 7.0s),这一深度位于中国东部现今地震震源深度底界(19.0km)之下约2.0km(张国民等, 2002),处于地壳内部刚性强度最小的深度,物质处于塑性流动状态(存在壳内薄弱带)。(2)NW向倾斜的下地壳反射一致延伸到上地幔(Lü *et al.*, 2014),最深处到45km(15s,TWT)。基于上述事实 and 陆内俯冲的物理模拟结果(Doin and Herry, 2001),作者认为在长江中下游成矿带以及郟庐断裂之下曾发生了陆内俯冲作用,俯冲发生在陆内不同块体之间,俯冲作用导致相对刚性的下地壳物质沉入上地幔。俯冲的下地壳基性物质到达一定深度(>40km)将发生榴辉岩化,由于榴辉岩的密度反转,形成负向重力,将进一步拖曳俯冲的大陆岩石圈。本文提出的陆内俯冲在时间和空间上与Li(1994)所指的地壳拆离与俯冲完全不同。时间上,本文提出的陆内俯冲发生在中、晚侏罗世,受古太平洋板块NW向挤压的影响,是华南板块内部块体之间产生的陆内俯冲;空间上,陆内俯冲沿长江中下游成矿带主带分布,有可能向南一直延伸到华南板块内部。

#### 4.3 折射地震探测结果

宽角反射/折射地震剖面显示沿剖面的宏观速度变化和

地壳厚度变化(徐涛等,2014)。上地壳速度总体上与沉积盆地和隆起相吻合,比如郟庐断裂西侧的合肥盆地,受盆地巨厚沉积的影响,整个盆地显示出低速特征;滁河断裂以东的沿江拗陷、宁芜火山岩盆地和皖南-苏南拗陷都表现为低速体特征。张八岭隆起、沿江拗陷东侧(接近江南断裂)表现为高速特征,与这两个地区结晶基底出露较浅相吻合。几条主要块体边界断裂附近都呈现低速特征,比如郟庐、滁河、江南断裂。郟庐断裂附近的低速主要出现在其西侧,滁河和江南断裂附近的低速体出现在其东侧,而且低速体一直延伸到中地壳。重力模拟结果(张永谦等2014)也进一步证实了这些断裂附近低密度、低速体的存在。由于横向上低密度体的密度变化并不大( $<0.05\text{g/cm}^3$ ),很难解释。几种可能的解释包括:盖层增厚、断裂带附近岩石破碎、裂隙发育,或物质的横向不均匀等因素引起。

折射Moho的平均深度总体上与反射Moho一致,并在30~35km之间变化。除了宁芜火山岩盆地外,沿剖面折射Moho的起伏变化与反射Moho基本一致,比如郟庐断裂下方反射和折射Moho都变深;江南断裂下反射和折射Moho都抬升等。明显不一致的地方在宁芜火山岩盆地之下,反射Moho是抬升,而折射Moho则是下降(变深)。仔细分析两种方法获得的Moho其地质意义有所不同,折射Moho以速度突变为划分标准,与传统的岩性Moho(超基性与中酸性/基性界面)基本吻合,而反射Moho的成因复杂,结构多变(Hammer and Clowes, 1997; Cook, 2002; Eaton, 2005)。如果将反射Moho看做是多次基性岩浆底侵的最低面,可以很好解释折射与反射Moho出现的“矛盾”。正如上节所述,宁芜火山岩盆地之下发生了陆内俯冲,下地壳和岩石圈地幔在此下沉,后期的基性岩浆底侵位较高,造成反射Moho抬升。这一推测也可解释宁芜火山岩盆地上地幔顶部速度偏低的事实。

#### 4.4 大地电磁探测结果

采用二维连续介质人机交互式反演方法(戴世坤和徐世浙,1997)获得整条剖面300km的视电阻率的变化(强建科等,2014)。由于地下电阻对少量相互连通的良好导体十分敏感(Jones, 2013),比如地下卤水、熔融体、导电层(沉积层),造成对电阻率剖面的地质解释十分困难。上地壳电阻率的高低变化分别与老地层、岩浆岩和沉积盆地对应,之间以近似垂直的低速体分割,总体上与地表构造划分相吻合。火山岩盆地与沉积盆地在电性特征上差距较大,可能与沉积盆地富含水或卤水有关;断裂通常以低阻为特征,主要原因也是富含相互连通的裂隙水。大陆岩石圈的一般电性模型(Jones, 2013)呈现“高、低、高”的“三明治结构”,下地壳通常表现为低阻或良导特征,而且还与地壳年龄有关,越老的下地壳电阻率越低,其成因一直是学界争论的问题。对比长江中下游全地壳的视电阻率剖面,若不考虑横向的对比,总体上符合上地壳电阻率大于下地壳的一般规律。横向上大

致以郟庐断裂为界,东西电阻率呈现较大的变化,合肥盆地(华北)中下地壳为极低电阻率,这或与华北古老克拉通下地壳富含 Fe、Na 和水的热动力作用有关(Yang, 2011);郟庐断裂以东的长江中下游地区相对于合肥盆地下地壳呈现高阻特征,而江南古陆下地壳又变为低阻。这或与不同构造单元下地壳的物质组成和热动力条件有关。电性 Moho (eMoho) 鉴于 MT 方法的分辨率和“死频带”(0.1 ~ 10s)问题,在世界各地极少可以直接观测到(Jones, 2013),同样仅依据 MT 反演结果在我们的剖面很难直接找出 eMoho 的位置。

## 5 成矿带深部动力学模型

长江中下游及邻区具有亚洲东部最为独特的构造、岩浆和成矿“奇观”,比如,规模巨大的大别-苏鲁超高压变质带(Xu *et al.*, 1992),长达数千千米的郟庐断裂突然中止于大别山南侧,并使大别-苏鲁超高压变质带平移 500 多千米(Okay and Sengor, 1992; Okay *et al.*, 1993),NE 向区域构造与近 E-W 向造山带斜交,广泛而强烈的岩浆作用和大规模成矿作用(Pan and Dong, 1999; 常印佛等, 1991)等。空间上形成由郟庐断裂连接南北两侧超高压变质带、中间为长江中下游成矿带的反“L”形状。长期以来,研究区独特的地质现象引起了国内外学者的浓厚兴趣,开展了大量研究。一些学者针对大别-苏鲁 UHP 的形成及区域构造格局,提出了“大陆挤入(Indenter Model)”模式(Yin and Nie, 1993),碰撞后陆内转换断层模式(Okay *et al.*, 1993),同碰撞转换断层模式(Zhu *et al.*, 2009),地壳拆离模式(Li, 1994)以及古太平洋斜向俯冲的左行平移模式(Xu *et al.*, 1987; Xu and Zhu, 1994)等。

有些学者则更加关注成岩、成矿的深部过程。一些学者认为古太平洋板块俯冲角度的变化和地幔楔的熔融及玄武岩浆的底侵是华南近千千米岩浆活动的成因(Jahn *et al.*, 1990; Zhou and Li, 2000);也有学者则用平板俯冲、板片折沉和折退(roll-back)机制来解释华南复杂的构造-岩浆时空分布(Li and Li, 2007);另外一些学者认为古太平洋板块和伊泽奈崎(Izanagi)板块之间的洋脊俯冲在长江中下游之下,并用洋脊附近洋壳的熔融、“板片窗”等认识来解释成矿带岩浆岩带的分布和 adakite 质岩石的成因(Ling *et al.*, 2009; 孙卫东等, 2010)。与俯冲观点不同,还有些学者认为中生代大规模岩浆活动和成矿作用源于中国东部岩石圈的拆沉和软流圈的上隆(邓晋福等, 1994; 邓晋福和吴宗絮, 2001),与古太平洋板块俯冲无关,大规模岩浆活动或源于超级地幔柱的作用(张旗等, 2001, 2009)。

本文综合地球物理探测结果对区域构造模式和成岩、成矿的深部动力学提供新的约束:(1)接收函数结果显示长江中下游现今的岩石圈较薄(50 ~ 70km),成矿带对应软流圈上隆带;(2)远震层析成像结果证实了长江中下游地区岩石圈已拆沉,拆沉的岩石圈呈长方体大致平行成矿带方向分

布,并向 SW 倾斜;(3)上地幔各向异性结果显示,成矿带上地幔变形明显不同于华北和扬子内部,沿成矿带方向(NE-SW)存在软流圈物质的流动变形;(4)深地震反射数据证实,在成矿带主带的宁芜火山岩盆地及长江之下存在陆内俯冲,陆内俯冲或是岩石圈拆沉前增厚的主要机制。

上述地球物理探测结果对成矿带动力学模型提供了有力的约束,结合近年岩石地球化学的结果,作者提出针对长江中下游成矿带的地球动力学模型。该模型认为:中、晚三叠世华南板块(SCB)与华北板块(NCB)的碰撞(印支期造山),在研究区并没有产生强烈的变形和岩浆活动。郟庐断裂表现为同碰撞造山的陆内转换断裂(Zhu *et al.*, 2009),大别和苏鲁 UHP 分别在郟庐断裂南北两侧同时形成,期间研究区或发生了逆时针旋转(Gilder *et al.*, 1999)。印支期造山运动或只在大别和苏鲁的前陆有限范围造成近 E-W 向褶皱和冲断。中侏罗世开始,区域构造体制逐渐从特提斯构造域向滨太平洋构造域转换(张岳桥等, 2009, 2012),并逐渐受控于古太平洋板块向华南大陆之下低角度 NW 向俯冲的远程应力体系,在研究区及整个华南地区产生了强烈的陆内造山(燕山运动)。由于受华北板块和大别地块的阻挡,长江中下游地区地壳发生强烈变形,上下地壳拆离,上地壳发生紧闭褶皱、冲断或推覆,下地壳和岩石圈地幔发生陆内俯冲,并使岩石圈增厚(>100km),形成了晚中生代沿江陆内造山带(图 8)。从晚侏罗或早白垩世开始,随着古太平洋板块俯冲应力减弱(或因角度变陡),增厚的岩石圈因下地壳物质发生榴辉岩化使密度反转处于重力不稳定状态,继而发生拆沉。

岩石圈拆沉将导致软流圈物质上隆,替代拆沉岩石圈所占的空间,并导致区域造山带隆升和应力场变化、以及大规模幔源岩浆活动(Kay and Kay, 1993)。增厚的古老下地壳在地幔中熔融,或早期底侵在下地壳的幔源物质再熔融,将产生具有 Adakite 性质的岩浆,这种岩浆通常容易富集成矿物质,易于成矿(侯增谦等, 2007; Wang *et al.*, 2007; Ling *et al.*, 2009)。长江中下游很多成矿岩体具有很强的 Adakite 质岩亲和性,或是由于大量增厚的下地壳物质再熔融的结果(Wang *et al.*, 2007)。总之,燕山期的陆内俯冲、岩石圈拆沉、熔融和底侵作用,是造成长江中下游晚侏罗和早白垩大规模成岩和成矿作用的主导机制。

随着早白垩纪岩石圈的拆沉,区域构造体制逐渐转为伸展环境,长江中下游“造山带”开始垮塌,上地壳出现断陷盆地,盆地内出现巨厚的白垩纪红层沉积;岩浆活动逐渐减弱,但局部盆地出现玄武岩喷溢。经历了白垩纪、第三纪的演化,长江中下游地区最终形成现在的“隆”“拗”相间的构造格局,地壳逐渐趋于稳定。

## 6 结论

在深部探测(SinoProbe)专项的支持下,作者在长江中下

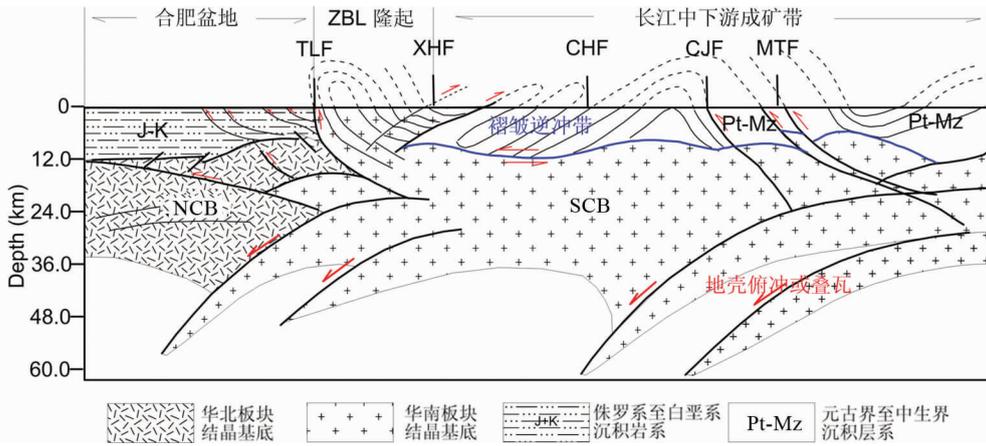


图 8 中、晚侏罗世长江中下游地区陆内造山动力学模式示意图(据 Lü *et al.*, 2014)

模型指示上地壳发生广泛的褶皱、冲断和推覆,下地壳和岩石圈地幔发生陆内俯冲。TLF-郟庐断裂;XHF-响水-淮阴断裂;CHF-滁河断裂;CJF-长江深断裂;MTF-主逆冲断裂;NCB-华北板块;SCB-华南板块

Fig. 8 A geodynamic model of the Middle and Lower Reaches of Yangtze Metallogenic Belt showing the Middle-Late Jurassic intracontinental orogen (after Lü *et al.*, 2014)

The model predicts that the extensive folding, thrusting and nappe were occurred in the upper crust, and the underthrusting was happened in the lower crust and uppermost mantle. TLF-Tanlu fault; XHF-Xiangshui-Huaiyin fault; CHF-Chuhe fault; CJF-Changjiang deep fault; MTF-Main thrust fault; NCB-North China Block; SCB-South China Block

游成矿带及邻区开展了宽频地震观测,并在跨越成矿带的地质廊带(TRAN-YMB)内完成了近 300km 的深地震反射剖面、450km 的广角反射/折射剖面和 71 个 MT 测深点。经数据处理和分析,取得一些新的证据和认识。

(1) 发现了长江中下游成矿带岩石圈拆沉的远震层析成像证据。包括空间上沿成矿带分布的上地幔顶部的低速体和中心在 300km 的高速体。作者认为高速体是该地区已经拆沉的岩石圈物质残留,低速体代表上隆的软流圈物质。该结果与 S-波接收函数发现的岩石圈厚度较薄(50~70km),且呈上凸“弧形”的结果相吻合;

(2) 发现了华北、长江中下游和扬子地幔各向异性具有横向“三明治”结构。横波各向异性结果显示,成矿带的各向异性与华北和扬子几乎垂直,反映出在长江中下游陆内造山阶段,受华北克拉通的阻挡,沿成矿带上地幔发生了 NE-SW 向的流动变形。该结果与层析成像发现的上地幔呈 NE-SW 延伸的低速体相吻合,指示此低速体或为上地幔各向异性层;

(3) 发现陆内俯冲的反射地震证据。深地震反射结果表明,长江中下游成矿带地壳曾发生强烈挤压变形,从郟庐断裂到扬子板块内部变形逐渐减弱,并在宁芜火山岩盆地、长江深断裂带等地方出现上、下地壳拆离的“鳄鱼嘴”构造。指示下地壳和岩石圈地幔在中、晚侏罗世陆内造山阶段发生了陆内俯冲或叠瓦,作者认为这或是岩石圈增厚的主要机制;

(4) 发现宁芜火山岩盆地之下折射 Moho 与反射 Moho 深度不一致,进一步证实了陆内俯冲的存在。折射地震和 MT 给出了跨越长江中下游成矿带地壳和岩石圈上地幔的速度和电性剖面,发现在宁芜火山岩盆 Moho 较深,且上地幔顶

部速度较低,进一步证实了陆内俯冲的存在。速度和电性剖面还提供了地壳物质、热和断裂(含水性)的空间结构;

(5) 提出了长江中下游成矿带成矿地球动力学模型。该模型认为发生在研究区的印支造山和燕山造山运动是两次独立的造山过程。印支造山在长江中下游地区并没有产生强烈的地壳变形,郟庐断裂仅为同造山时期的转换断层,大别和苏鲁造山带分别在郟庐断裂的南北两侧同期形成。因古太平洋板块 NW 向低角度俯冲远程效应引起的燕山期造山运动,是决定研究区构造格局、并产生强烈岩浆活动的根源。燕山运动是一期快速造山过程,不仅造成长江中下游成矿带强烈的地壳变形,同时还发生了陆内俯冲或叠瓦,使岩石圈增厚。增厚的岩石圈在随后的区域应力减弱和自身不稳定性的双重因素作用下,发生拆沉和软流圈的上隆。拆沉岩石圈的熔融(包含下地壳的熔融)、底侵和软流圈上隆的热流作用,导致长江中下游地区大规模的岩浆作用和成矿作用。

**致谢** 感谢国土资源部科技司、中国地质调查局科外部、中国地质科学院的有关领导和专项首席科学家董树文研究员对本研究的大力支持;数据采集得到了安徽省国土资源厅、安徽省地矿局、安徽省地调院、江苏省国土厅及沿线各级政府的大力支持和协助;吉林大学的董世学教授和一些研究生参与了野外采集质量监控工作;北京派特森科技发展有限公司的薛爱民、李兵高工参与了数据处理,对他们的支持和辛勤工作表示感谢和致敬;还要感谢滕吉文院士、于晟研究员、王椿庸研究员、刘启元研究员、高锐研究员等,他们参与数据质量采集的质量检查和验收,对项目取得高质量的

数据起到了重要作用。

项目执行期间,我的好朋友、老同学张忠杰研究员英年早逝,万分悲痛。谨以此文表达对忠杰的怀念。

## References

- Allmendinger RW, Nelson KD, Potter CJ, Barazang M, Brown LD and Oliver JE. 1987. Deep seismic reflection characteristics of the continental crust. *Geology*, 15(4): 304–310
- Barruol G and Mainprice D. 1993. A quantitative evaluation of the contribution of crustal rocks to the shear wave splitting of teleseismic SKS waves. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 78(3–4): 281–300
- Chang YF, Liu XP and Wu YC. 1991. The Copper-iron Belt of the Middle and Lower Reaches of the Changjiang River. Beijing: Geological Publishing House, 1–239 (in Chinese with English abstract)
- Chang YF, Dong SW and Huang DZ. 1996. On tectonics of “polybasement with one cover” in Middle-Lower Yangtze Craton, China. *Volcanology & Mineral Resources*, 17(S1): 1–15 (in Chinese with English abstract)
- Chen L, Zheng TY and Xu WW. 2006. A thinned lithospheric image of the Tanlu Fault Zone, eastern China: Constructed from wave equation based receiver function migration. *Journal of Geophysical Research*, 111: B09312, DOI: 10.1029/2005JB003974
- Cook FA. 2002. Fine structure of the continental reflection Moho. *GSA Bulletin*, 114(1): 64–79
- Dai SK and Xu SZ. 1997. Rapid inversion of magnetotelluric data for 2-D and 3-D continuous media. *Oil Geophysical Prospecting*, 32(3): 305–317 (in Chinese with English abstract)
- Deng JF, Mo XX, Zhao HL, Luo ZH and Du YS. 1994. Lithosphere root/de-rooting and activation of the east China continent. *Geoscience*, 8(3): 349–356 (in Chinese)
- Deng JF and Wu ZX. 2001. Lithospheric thinning event in the Lower Yangtze craton and Cu-Fe metallogenic belt in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River. *Anhui Geology*, 11(2): 86–91 (in Chinese with English abstract)
- Doin MP and Henry P. 2001. Subduction initiation and continental crust recycling: The roles of rheology and eclogitization. *Tectonophysics*, 342(1–2): 163–191
- Eaton DW. 2005. Multi-genetic origin of the continental Moho: Insights from LITHOPROBE. *Terra Nova*, 18(1): 34–43
- Gilder AA, Leloup PH, Courtillot V, Chen Y, Coe RS, Zhao XX, Xiao WJ, Halim N, Cogné JP and Zhu R. 1999. Tectonic evolution of the Tancheng-Lujiang (Tan-Lu) fault via Middle Triassic to Early Cenozoic paleomagnetic data. *Journal of Geophysical Research*, 104(B7): 15365–15390
- Hammer PTC and Clowes RM. 1997. Moho reflectivity patterns: A comparison of Canadian LITHOPROBE transects. *Tectonophysics*, 269(3–4): 179–198
- Hawkesworth C, Cawood P and Dhuime B. 2013. Continental growth and the crustal record. *Tectonophysics*, 609: 651–660, doi: 10.1016/j.tecto.2013.08.013
- Helfrich G, Silver P and Given H. 1994. Shear-wave splitting variation over short spatial scales on continents. *Geophys. J. Int.*, 119(2): 561–573
- Hou ZQ, Pan XF, Yang ZM and Qu XM. 2007. Porphyry Cu-(Mo-Au) deposits not related to oceanic-slab subduction: Examples from Chinese porphyry deposits in continental settings. *Geoscience*, 21(2): 332–351 (in Chinese with English abstract)
- Jahn BM, Zhou XH and Li JL. 1990. Formation and tectonic evolution of southeastern China and Taiwan: Isotopic and geochemical constraints. *Tectonophysics*, 183(1–4): 145–160
- Jiang GM, Zhang GB, Lü QT, Shi DN and Xu Y. 2013. 3-D velocity model beneath the Middle-Lower Yangtze River and its implication to the deep geodynamics. *Tectonophysics*, 606: 36–48
- Jiang GM, Zhang GB, Lü QT, Shi DN and Xu R. 2014. Deep geodynamics of mineralization beneath the Middle-Lower Reaches of Yangtze River: Evidence from teleseismic tomography. *Acta Petrologica Sinica*, 30(4): 907–917 (in Chinese with English abstract)
- Jones AG. 2013. Imaging and observing the electrical Moho. *Tectonophysics*, 609: 423–436
- Jones TD and Nur A. 1984. The nature of seismic reflections from deep crustal fault zones. *J. Geophys. Res.*, 89(B5): 3153–3171
- Kay RW and Kay SM. 1993. Delamination and delamination magmatism. *Tectonophysics*, 219(1–3): 177–189
- Kennett B and Engdahl E. 1991. Traveltimes for global earthquake location and phase identification. *Geophysical Journal International*, 105(2): 429–465
- Kind R, Yuan X, Saul J, Nelson D, Sobolev SV, Mechie J, Zhao W, Kosarev G, Ni J, Achauer U and Jiang M. 2002. Seismic images of crust and upper mantle beneath Tibet: Evidence for Eurasian plate subduction. *Science*, 298(5596): 1219–1221
- Li C and Van der Hilst RD. 2010. Structure of the upper mantle and transition zone beneath Southeast Asia from traveltimes tomography. *Journal of Geophysical Research*, 115(B7): B07308, doi: 10.1029/2009JB006882
- Li ZX. 1994. Collision between the north and south China blocks: A crustal-detachment model for suturing in the region east of the Tanlu fault. *Geology*, 22(8): 739–742
- Li ZX. 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*. *Geodynamics 27*, the American Geophysical Union: 221–243
- Li ZX and Li XH. 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model. *Geology*, 35(2): 179–182
- Liguria JP and Ammon CJ. 1999. Iterative deconvolution and receiver-function estimation. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(5): 1395–1400
- Ling MX, Wang FY, Ding X, Hu YH, Zhou JB, Zartman RE, Yang XY and Sun WD. 2009. Cretaceous ridge subduction along the Lower Yangtze River Belt, eastern China. *Economic Geology*, 104(4): 303–321
- Liu BJ and Xu XS. 1994. Atlas of Lithofacies and Paleogeography in South China (Sinian to Triassic). Beijing: Science Press, 1–188 (in Chinese with English abstract)
- Lü QT, Chang YF, SinoProbe Team for Mineral Resource. 2011. Crustal structure and three-dimensional deep exploration technology for mineral resources: An introduction to SinoProbe-03 Project. *Acta Geoscientia Sinica*, 32(Suppl. 1): 49–64
- Lü QT, Qi G and Yan JY. 2013a. 3D geological model of Shizishan ore field constrained by gravity and magnetic interactive modeling: A case history. *Geophysics*, 78(1): B25–B35
- Lü QT, Yan JY, Shi DN, Dong SW, Tang JT, Wu MA and Chang YF. 2013b. Reflection seismic imaging of the Lujiang-Zongyang volcanic area: An insight into the crustal structure and geodynamics of an ore district. *Tectonophysics*, 606: 60–78
- Lü QT, Shi DN, Liu ZD, Zhang YQ, Dong SW and Zhao JH. 2014. Crustal structure and geodynamic of the Middle and Lower Reaches of Yangtze metallogenic belt and neighboring areas: Insights from deep seismic reflection profiling. *Tectonophysics*, submitted
- Mao JW, Xie GQ, Duan C, Pirajno F, Ishiyama D and Chen YC. 2011. A tectono-genetic model for porphyry-skarn-stratabound Cu-Au-Mo-Fe and magnetite-apatite deposits along the Middle-Lower Yangtze River Valley, eastern China. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 294–314
- Okay AI and Sengor AMC. 1992. Evidence for intracontinental thrust-related exhumation of the ultra-high-pressure rocks in China. *Geology*, 20(5): 411–414

- Okay AI, Sengor AMC and Satir M. 1993. Tectonics of an ultrahigh-pressure metamorphic terrane: Dabieshan/Tongbaishan orogen. *Tectonics*, 12(6): 1320–1334
- Oxburgh ER. 1972. Flake tectonics and continental collision. *Nature*, 230(5369): 202–204
- Pan YM and 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. *Ore Geology Reviews*, 15(4): 177–242
- Qiang JK, Wang XY, Tang JT, Pan W and Zhang QJ. 2014. The geological structure along Huainan-Liyang magnetotelluric profile: Constraints from MT data. *Acta Petrologica Sinica*, 30(4): 957–965 (in Chinese with English abstract)
- Roure F, Choukroune P, Berastegui X, Munoz JA, Villien A, Matheron P, Bareyt M, Seguret M, Camara P and Deramond J. 1989. ECORS deep seismic data and balanced cross sections: Geometric constraints on the evolution of the Pyrenees. *Tectonics*, 8(1): 41–50
- Shi DN, Lü QT, Xu WY, Yan JY, Zhao JH, Dong SW and Chang YF. 2012. Crustal structures beneath the Mid-Lower Yangtze metallogenic belt and its adjacent regions in eastern China: Evidence from P-wave receiver function imaging for a MASH metallization process? *Acta Geologica Sinica*, 86(3): 389–399 (in Chinese with English abstract)
- Shi DN, Lü QT, Xü WY, Yan JY, Zhao JH, Dong SW and Chang YF. 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. *Tectonophysics*, 606: 48–60
- Silver PG and Chan WW. 1991. Shear wave splitting and subcontinental mantle deformation. *Journal of Geophysical Research*, 96(B10): 16429–16454
- Soudou F, Yuan X, Liu Q, Kind R and Chen J. 2006. Lithospheric thickness beneath the Dabie Shan, central eastern China from S receiver functions. *Geophysical Journal International*, 166(3): 1363–1367
- Sun WD, Ling MX, Yang XY, Fan WM, Ding X and Liang HY. 2010. Ridge subduction and porphyry copper gold mineralization: An overview. *Sci. China (Earth Sci.)*, 53(4): 475–484
- Tang JT, Zhou C, Wang X, Xiao X and Lü QT. 2013. Deep electrical structure and geological significance of Tongling ore district. *Tectonophysics*, 606: 79–96
- Tang JT, Zhou C, Ren ZY, Wang XY, Xiao X and Lü QT. 2014. Deep 3D electrical structure in Tongling ore district. *Acta Geologica Sinica*, 88(4): 598–611 (in Chinese with English abstract)
- Tang YC, Wu YC, Chu GZ, Xing FM, Wang YM, Cao FY and Chang YF. 1986. *Geology of Copper-Gold Polymetallic Deposits in the along-Changjiang Area of Anhui Province*. Beijing: Geological Publishing House, 1–243 (in Chinese with English abstract)
- Vinnik LP, Farra V and Romanowicz B. 1989. Azimuthal anisotropy in the earth from observations of SKS at GEOSCOPE and NARS broadband stations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 79(5): 1542–1558
- Wang Q, Zhao ZH, Xiong XL and Xu JF. 2001. Melting of the underplated basaltic lower crust: Evidence from the Shaxi adakitic sodic quartz diorite-porphyrates, Anhui Province, China. *Geochimica*, 30(4): 353–362 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Xu JF, Zhao ZH, Xiong XL and Bao ZW. 2003. Causes of Yanshan intrusive rocks in Tongling, Anhui Province and its constraints on geodynamic processes. *Science in China (Series D)*, 33(4): 324–334 (in Chinese)
- Wang Q, Wyman DA, Xu JF, Zhao ZH, Jian P, Xiong XL, Bao ZW, Li CF and Bai ZH. 2006. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui Province (eastern China): Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization. *Lithos*, 89(3–4): 424–446
- Wang Q, Wyman DA, Xu JF, Zhao ZH, Jian P and Zi F. 2007. Partial melting of thickened or delaminated lower crust in the middle of eastern China: Implications for Cu-Au mineralization. *Journal of Geology*, 115(2): 149–161
- Xiao X, Tang JT, Zhou C and Lü QT. 2011. Magnetotelluric sounding in the Lujiang-Zongyang ore district and preliminary study of electrical structure. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 873–886 (in Chinese with English abstract)
- Xiao X, Wang XY, Tang JT, Zhou C, Wang YQ, Chen XB and Lü QT. 2014. Conductivity structure of the Lujiang-Zongyang ore concentrated area, Anhui Province: Constraints from magnetotelluric data. *Acta Geologica Sinica*, 88(4): 478–495 (in Chinese with English abstract)
- Xu JF, Wang Q, Xu YG, Zhao ZH and Xiong XL. 2001. Geochemistry of Anjishan intermediate-acid intrusive rocks in Ningzhen area: Constraint to origin of the magma with HREE and Y depletion. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 576–584 (in Chinese with English abstract)
- Xu JF, Shinjo R, Defant MJ, Wang Q and Rapp RP. 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental crust? *Geology*, 30(12): 1111–1114
- Xu JW, Zhu G, Tong WX, Cui KR and Liu Q. 1987. Formation and evolution of the Tancheng-Lujiang wrench fault system: A major shear system to the northwest of the Pacific Ocean. *Tectonophysics*, 134: 273–310
- Xu JW and Zhu G. 1994. Tectonic models of the Tan-Lu fault zone, eastern China. *International Geology Review*, 36(8): 771–784
- Xu ST, Su W, Liu YC *et al.* 1992. Diamond from the Dabie Shan metamorphic rocks and its implication for tectonic setting. *Science*, 256(5053): 80–82
- Xu T, Xu GM, Gao EG, Li YC, Jiang XY and Luo KY. 2006. Block modeling and segmentally iterative ray tracing in complex 3D media. *Geophysics*, 71(3): T41–T51
- Xu T, Zhang ZJ, Gao EG, Xu GM and Sun L. 2010. Segmentally iterative ray tracing in complex 2D and 3D heterogeneous block models. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 100(2): 841–850
- Xu T, Zhang ZJ, Tian XB, Liu BF, Bai ZM, Lü QT and Teng JW. 2014. Crustal structure beneath the Middle-Lower Yangtze metallogenic belt and its surrounding areas: Constraints from active source seismic experiment along the Lixin to Yixing profile in East China. *Acta Petrologica Sinica*, 30(4): 918–930 (in Chinese with English abstract)
- Xu WY, Yang ZS, Meng YF, Zeng PS, Shi DN, Tian SH and Li HY. 2004. Genetic model and dynamic migration of ore-forming fluids in Carboniferous exhalation-sedimentary massive sulfide deposits of Tongling district, Anhui Province. *Mineral Deposits*, 23(3): 353–364 (in Chinese with English abstract)
- Xu XB, Zhang YQ, Jia D, Shu LS and Wang RR. 2009. Early Mesozoic geotectonic processes in South China. *Geology in China*, 36(3): 573–593 (in Chinese with English abstract)
- Yan JY, Lü QT, Meng GX, Zhao JH, Deng Z and Liu Y. 2011. Tectonic framework research of the Lower and Middle Yangtze metallogenic belt based on gravity and magnetic multi-scale edge detection. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 900–914 (in Chinese with English abstract)
- Yang XZ. 2011. Origin of high electrical conductivity in the lower continental crust: A review. *Surveys in Geophysics*, 32(6): 875–903
- Yin A and Nie SY. 1993. An indentation model for the North and South China collision and the development of the Tan-Lu and Honam fault systems, eastern Asia. *Tectonics*, 12(4): 801–813
- Zelt CA and Smith RB. 1992. Seismic traveltimes inversion for 2-D crustal velocity structure. *Geophys. J. Int.*, 108(1): 16–34
- Zhang GM, Wang SY, Li L, Zhang XD, Ma HS. 2002. Focal depth research of earthquakes in mainland China: Implication for tectonics. *Chinese Science Bulletin*, 47(12): 969–974
- Zhang Q, Qian Q, Wang EQ, Wang Y, Zhao TP, Hao J and Guo GJ. 2001. An East China Plateau in Mid-Late Yanshanian Period: Implication from adakites. *Chinese J. Geol.*, 36(2): 248–255 (in Chinese)

- Zhang Q, Jin WJ, Li CD and Wang YL. 2009. Yanshanian large-scale magmatism and lithosphere thinning in eastern China: Relation to large igneous province. *Earth Science Frontiers*, 16(2): 21–51 (in Chinese with English abstract)
- Zhang SQ and Karato SI. 1995. Lattice preferred orientation of olivine aggregates deformed in simple shear. *Nature*, 375(6534): 774–777
- Zhang YQ, Xu XB, Jia D and Shu LS. 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. *Earth Science Frontiers*, 16(1): 234–247 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YQ, Dong SW, Li JH, Cui JJ, Shi W, Su JB and LiY. 2012. The new progress in the study of Mesozoic tectonics of South China. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(3): 257–279 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YQ, Lü QT, Teng JW, Wang QS and Xu T. 2014. Discussion on the crustal density structure and deep mineralization background in the Middle-Lower Yangtze metallogenic belt and its surrounding areas: Constraints from the gravity inversion. *Acta Petrologica Sinica*, 30(4): 931–940 (in Chinese with English abstract)
- Zhao W, Nelson KD, Che J, Guo J, Lu D, Wu C, Liu X, Brown LD, Hauck ML, Klempner S and Makovsky Y. 1993. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath southern Tibet. *Nature*, 366(6455): 557–559
- Zhao ZJ, Li DC, Zhu Y, Zhou JG and Feng JL. 2001. The structure evolution and the petroleum system in Hefei basin. *Petroleum Exploration and Development*, 28(4): 8–13 (in Chinese with English abstract)
- Zhou TF, Fan Y, Yuang F. 2008. Progress on petrogenesis metallogeny study of the mineralization belt of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River area. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1665–1678 (in Chinese with English abstract)
- Zhou XM and Li WX. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. *Tectonophysics*, 326(3–4): 269–287
- Zhu G, Xu JW, Liu GS, Li SY and Yu PY. 1999. Tectonic pattern and dynamic mechanism of the foreland deformation in the Lower Yangtze region. *Regional Geology of China*, 18(1): 73–79 (in Chinese with English abstract)
- Zhu G, Wang Y, Liu GS, Niu ML, Xie CL and Li C. 2005.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of strike-slip motion on the Tan-Lu fault zone, East China. *Journal of Structural Geology*, 27(8): 1379–1398
- Zhu G, Liu GS, Niu ML, Xie CL, Wang YS and Xiang BW. 2009. Syn-collisional transform faulting of the Tan-Lu fault zone, East China. *Int. J. Earth Sci. (Geol Rundsch)*, 98(1): 135–155
- 附中文参考文献**
- 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 1991. 长江中下游铁铜成矿带. 北京: 地质出版社, 1–239
- 常印佛, 董树文, 黄德志. 1996. 论中-下扬子“一盖多底”格局与演化. *火山地质与矿产*, 17(S1): 1–15
- 戴世坤, 徐世浙. 1997. MT二维和三维连续介质快速反演. *石油地球物理勘探*, 32(3): 305–317
- 邓晋福, 莫宣学, 赵海玲, 罗照华, 杜杨松. 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. *现代地质*, 8(3): 349–356
- 邓晋福, 吴宗絮. 2001. 下扬子克拉通岩石圈减薄时间与长江中下游Cu-Fe成矿带. *安徽地质*, 11(2): 86–91
- 侯增谦, 潘小菲, 杨志明, 曲晓明. 2007. 初论大陆环境斑岩铜矿. *现代地质*, 21(2): 332–351
- 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
- 吕庆田, 常印佛, SinoProbe-03项目组. 2011. 地壳结构与深部矿产资源立体探测技术实验-SinoProbe-03项目介绍. *地球学报*, 32(增刊1): 49–64
- 刘宝珺, 许效松. 1994. 中国南方岩相古地理图集(震旦纪-三叠纪). 北京: 科学出版社, 1–188
- 强建科, 王显莹, 汤井田, 潘伟, 张钱江. 2014. 淮南-溧阳大地电磁剖面与地质结构分析. *岩石学报*, 30(4): 957–965
- 史大年, 吕庆田, 徐文艺, 严加永, 赵金花, 董树文, 常印佛. 2012. 长江中下游成矿带及邻区地壳结构——MASH成矿过程的P波接收函数成像证据. *地质学报*, 86(3): 389–399
- 孙卫东, 凌明星, 杨晓勇, 范蔚茗, 丁兴, 梁华英. 2010. 洋脊俯冲与斑岩铜金矿成矿. *中国科学(地球科学)*, 40(2): 127–137
- 汤井田, 周聪, 任政勇, 王显莹, 肖晓, 吕庆田. 2014. 铜陵矿集区大地电磁三维反演. *地质学报*, 88(4): 598–611
- 唐永成, 吴言昌, 储国正, 邢凤鸣, 王永敏, 曹奋扬, 常印佛. 1998. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质. 北京: 地质出版社, 1–243
- 王强, 赵振华, 熊小林, 许继峰. 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. *地球化学*, 30(4): 353–362
- 王强, 许继峰, 赵振华, 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. *中国科学(D辑)*, 33(4): 324–334
- 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. *地质学报*, 85(5): 873–886
- 肖晓, 王显莹, 汤井田, 周聪, 王永清, 陈向斌, 吕庆田. 2014. 庐枞矿集区大地电磁探测与电性结构分析. *地质学报*, 88(4): 478–495
- 许继峰, 王强, 徐义刚, 赵振华, 熊小林. 2001. 宁镇地区中生代安基山中酸性侵入岩的地球化学: 亏损重稀土和钇的岩浆产生的限制. *岩石学报*, 17(4): 576–584
- 徐涛, 张忠杰, 田小波, 刘宝峰, 白志明, 吕庆田, 滕吉文. 2014. 长江中下游成矿带及邻区地壳速度结构: 来自利辛-宜兴宽角地震资料的约束. *岩石学报*, 30(4): 918–930
- 徐文艺, 杨竹森, 蒙义峰, 曾普胜, 史大年, 田世洪, 李红阳. 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. *矿床地质*, 23(3): 353–364
- 徐先兵, 张岳桥, 贾东, 舒良树, 王瑞瑞. 2009. 华南早中生代大地构造过程. *中国地质*, 36(3): 573–593
- 严加永, 吕庆田, 孟贵祥, 赵金花, 邓震, 刘彦. 2011. 基于重磁多尺度边缘检测的长江中下游成矿带构造格架研究. *地质学报*, 85(5): 900–914
- 张国民, 汪素云, 李丽, 张晓东, 马宏生. 2002. 中国大陆地震震源深度及其构造意义. *科学通报*, 47(9): 663–668
- 张旗, 钱青, 王二七, 王焰, 赵太平, 郝杰, 郭光军. 2001. 燕山中晚期的“中国东部高原”: 埃达克岩的启示. *地质科学*, 36(2): 248–255
- 张旗, 金惟俊, 李承东, 王元龙. 2009. 中国东部燕山期大规模岩浆

- 活动与岩石圈减薄:与大火成岩省的关系. 地学前缘, 16(2): 21-51
- 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
- 张岳桥, 董树文, 李建华, 崔建军, 施炜, 苏金宝, 李勇. 2012. 华南中生代大地构造研究新进展. 地球学报, 33(3): 257-279
- 张永谦, 吕庆田, 滕吉文, 王谦身, 徐涛. 2014. 长江中下游及邻区的地壳密度结构与深部成矿背景探讨——来自重力学的约束. 岩石学报, 30(4): 931-940
- 赵宗举, 李大成, 朱琰, 周进高, 冯加良. 2001. 合肥盆地构造演化及油气系统分析. 石油勘探与开发, 28(4): 8-13
- 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. 岩石学报, 24(8): 1666-1678
- 朱光, 徐嘉炜, 刘国生, 李双应, 虞培玉. 1999. 下扬子地区前陆变形构造格局及其动力学机制. 中国区域地质, 18(1): 73-79