

长江中下游铜陵矿集区深部地壳结构

——来自宽频地震 P 波接收函数成像的证据

赵荣涛¹⁾, 刘沙沙²⁾, 杨 艳¹⁾, 黄 什²⁾, 郑 凯²⁾, 史大年¹⁾

1)中国地质科学院, 北京 100037; 2)安徽省地质矿产勘查局 321 地质队, 安徽铜陵 244033

摘要: 铜陵矿集区位于长江中下游成矿带中部, 自中生代以来经历了大规模构造变形和岩浆活动。矿集区地壳结构对于认识华南—华北板块的碰撞过程, 以及长江中下游成矿带乃至整个华南中生代成矿的动力学过程都具有重要意义。本文利用 26 个宽频地震台站记录的 49 个远震事件, 通过 P 波接收函数成像方法获取了长江中下游成矿带铜陵矿集区的地壳结构。结果显示, 地壳浅部存在一个深度 2~3 km 的速度不连续界面, 可能是浅部盖层与基底之间的分界面。在铜陵南部的蛤蟆岭地区, 该界面向永村桥背斜两翼有加深趋势。铜陵地区 Moho 面深度约为 29~32 km, 横向略有变化, 且有一定厚度, 表明 Moho 面可能是速度逐渐增加的“过渡带”。地壳平均纵横波速比约为 1.79, 相对较高, 说明该地区地壳基性成分较高。该区较薄的地壳厚度和较高的波速比, 表明铜陵地区经历过地壳减薄和底侵过程。我们认为长江中下游中生代大规模岩浆作用可能与上地幔物质上涌并底侵到下地壳的过程有关。

关键词: 铜陵矿集区; 地壳结构; P 波接收函数; 波速比; 底侵作用

中图分类号: P631 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2023.121202

Deep Crustal Structure of the Tongling Ore Concentration Area in the Middle-lower Reaches of the Yangtze River: Evidence from Teleseismic P-wave Receiver Functions

ZHAO Rongtao¹⁾, LIU Shasha²⁾, YANG Yan¹⁾, HUANG Shi²⁾, ZHENG Kai²⁾, SHI Danian¹⁾

1) Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;
2) Anhui Geological and Mineral Exploration Bureau 321 Geological Team, Tongling, Anhui 244033

Abstract: The Tongling Ore Concentration Area, located in the central part of the mineralization belt in the middle and lower reaches of the Yangtze River, has experienced large-scale tectonic deformation and magmatic activity since the Mesozoic. Its crustal structure is of great significance in understanding the collision process of the South-North China blocks as well as the dynamics of Mesozoic mineralization in the middle and lower reaches of the Yangtze River and throughout South China. In this study, the crustal structure of the Tongling Ore Concentration Area in the middle and lower reaches of the Yangtze River was investigated using P-wave receiver function imaging of 49 teleseismic events recorded at 26 broadband seismic stations. The results showed that a velocity discontinuity with a depth of approximately 2~3 km exists in the shallow part of the crust, which may be the interface between the basement and overlying strata. In the Hamaling area of southern Tongling, it deepens towards the two flanks of the Yongcunqiao Anticline. The Moho depths in Tongling and its surrounding areas are about 29~32 km with weak lateral variation and certain thickness, which indicates that the Moho beneath Tongling is probably a “transition zone” but not a “sharp interface.” The average V_p/V_s ratio was approximately 1.79, which is higher than normal and suggests a more mafic crust in the region. The lower crustal thickness and higher wave velocity ratio in this region suggest that the Tongling Area may have experienced crustal thinning

本文由中国地质调查局地质调查项目“地质调查科技创新发展与新技术推广研究”(编号: DD20221829)、“羌塘盆地油气资源调查评价与战略选区”(编号: DD20233002)和“全国油气重点调查区战略性矿产调查评价”(编号: DD20233001)联合资助。

收稿日期: 2023-10-28; 改回日期: 2023-12-12; 网络首发日期: 2023-12-14。责任编辑: 同立娟。

第一作者简介: 赵荣涛, 男, 1990 年生。博士, 助理研究员。主要从事深部地球物理探测研究。E-mail: rongtaozhao@126.com。

and basaltic underplating. Our results suggest that large-scale magmatism in the middle-lower reaches of the Yangtze River during the Mesozoic was likely associated with magmatic emplacement at the base of the crust in Tongling.

Key words: Tongling ore concentration area; crustal structure; P-wave receiver function; velocity ratio; underplating

铜陵位于长江中下游多金属成矿带中部，有中国铜都的美誉。矿床类型以矽卡岩-斑岩型为主，是我国著名的铜、铁、金等多金属矿集区。长江中下游是一个陆内成矿带，不同于碰撞造山成矿带和大陆边缘成矿带，也不同于典型的裂谷成矿带，具有自己的鲜明特色(吕庆田等, 2015)。长江中下游成矿带综合探测工作已开展了数十年，积累了丰富的研究成果(常印佛等, 1991; 翟裕生等, 1992; 刘文灿等, 1996; 吕庆田等, 2004; Shi et al., 2013; Lü et al., 2015; Wu et al., 2015; Jiang et al., 2021)。前人研究表明，长江中下游成矿过程与中生代的岩浆作用密切相关，然而带内中生代成矿构造背景和动力学过程仍然是一个长期争论的科学问题。目前已提出的成矿模式可大致概括为大陆伸展模式、平板俯冲模式、拆沉模式、洋脊俯冲模式等。大陆伸展模型认为在古太平洋板块的远程应力作用下，华北-扬子板块的陆-陆碰撞和碰撞后的伸展，造成长江中下游地区中生代大规模岩浆活动和成矿作用(邓晋福等, 2001; Lü et al., 2015)。平板俯冲模式认为成矿带内中生代岩浆活动与古太平洋板块的俯冲有关(Chen et al., 1998; 陈斌等, 2006; Li et al., 2007)。拆沉模式认为下地壳和岩石圈地幔一起拆沉进入软流圈，导致软流圈地幔物质上涌，造成减压熔融，使得玄武岩浆底侵下地壳，从而引发大规模岩浆活动(Yin et al., 1993; Rudnick et al., 1995; 吴福元等, 2003; 史大年等, 2012)。洋脊俯冲模式则认为洋脊俯冲、洋壳熔融、“板片窗”等过程是成矿带内大规模岩浆岩产生的主要原因(Ling et al., 2009)。长江中下游地区深部成矿作用和动力学机制存在分歧的主要原因是关键地区的深部结构还不十分清楚。铜陵矿集区位于长江中下游成矿带中段(图 1)，可能位于上地幔物质上涌的中心位置(Shi et al., 2013)，其深部的壳幔结构对于揭示长江中下游成矿带和华南地区中生代的成矿过程具有重要意义。

近年来，在铜陵矿集区及周边开展了一系列地球物理深部探测，包括大地电磁测深(Tang et al., 2013)、主动源地震探测(吕庆田等, 2003, 2015)、层析成像(江国明等, 2014)、接收函数成像(Shi et al., 2013; 张永谦等, 2019)、重磁反演(Tang et al., 2013; 张永谦等, 2014; 兰学毅等, 2015; 严加永等, 2015)等。这些研究为深化铜陵矿集区的深部动力学过程

研究提供了大量的深部构造信息。比如，深地震反射剖面揭示铜陵隆起下的莫霍面具有弱反射特征(吕庆田等, 2003, 2004)。接收函数成像结果显示长江中下游成矿带下地壳存在强烈的各向异性，可能是中生代成矿作用期间，下地壳发生熔融、流动从而造成晶体重定向的结果(Shi et al., 2013)。层析成像结果显示长江中下游地区的岩石圈地幔具有类似两高一低的“三明治”结构(江国明等, 2014)。这些研究对深化铜陵矿集区深部结构的认识起到了重要作用，但多数研究尺度较大，尤其是被动源地震观测台站间距较大，分辨能力不足，且偏离了矿集区的中心位置。2022 年以来，中国地质调查局地质调查三级项目“地质调查科技创新发展与新技术推广研究”中设置“长江中下游铜陵矿集区深部结构及过程地质调查”课题，开展了铜陵矿集区深部结构和动力学过程的密集台阵研究，旨在揭示铜陵及周边地区更精细的深部地壳结构。本文利用该宽频地震台阵记录的远震数据，对铜陵及周边的地壳厚度和波速比特征开展了研究工作，为铜陵矿集区的深部结构和过程研究提供进一步约束。

1 地质构造背景

铜陵矿集区位于扬子板块北缘，长江中下游铜-铁-金多金属成矿带的中部，处于下扬子印支期北东向构造带东南部(图 1a)。在大地构造位置上，下扬子地区处于华北板块和扬子板块的结合部位，其构造演化受到两大板块发展和运动规律的制约(刘文灿等, 1996)。研究区从北向南可划分出 3 个次级构造单元，依次为繁昌火山岩盆地、铜陵隆起、宣南凹陷。它们之间的构造分界线依次为庐江—黄故闸—铜陵拆离断裂(LHTD)，丁桥—戴汇断裂(MTF)。宣南凹陷南侧临近扬子克拉通，二者以木镇断裂(MZF)为界(图 1b)。

铜陵矿集区褶皱构造十分发育，由若干背斜、向斜和复向斜组成，由北西到南东依次为：铜官山背斜(TGSA)、朱村向斜(ZCS)、永村桥—舒家店背斜(YSA)和凤凰山复向斜(FHSS)。区内主要有 4 大矿田，自西向东依次为铜官山、狮子山、新桥、凤凰山(图 1b)。区域地层由古生代—早中生代浅海-深海相砂岩、碳酸盐岩和早中生代—新生代陆相碎屑岩、火山沉积岩组成(翟裕生等, 1992; 刘文灿等, 1996)。

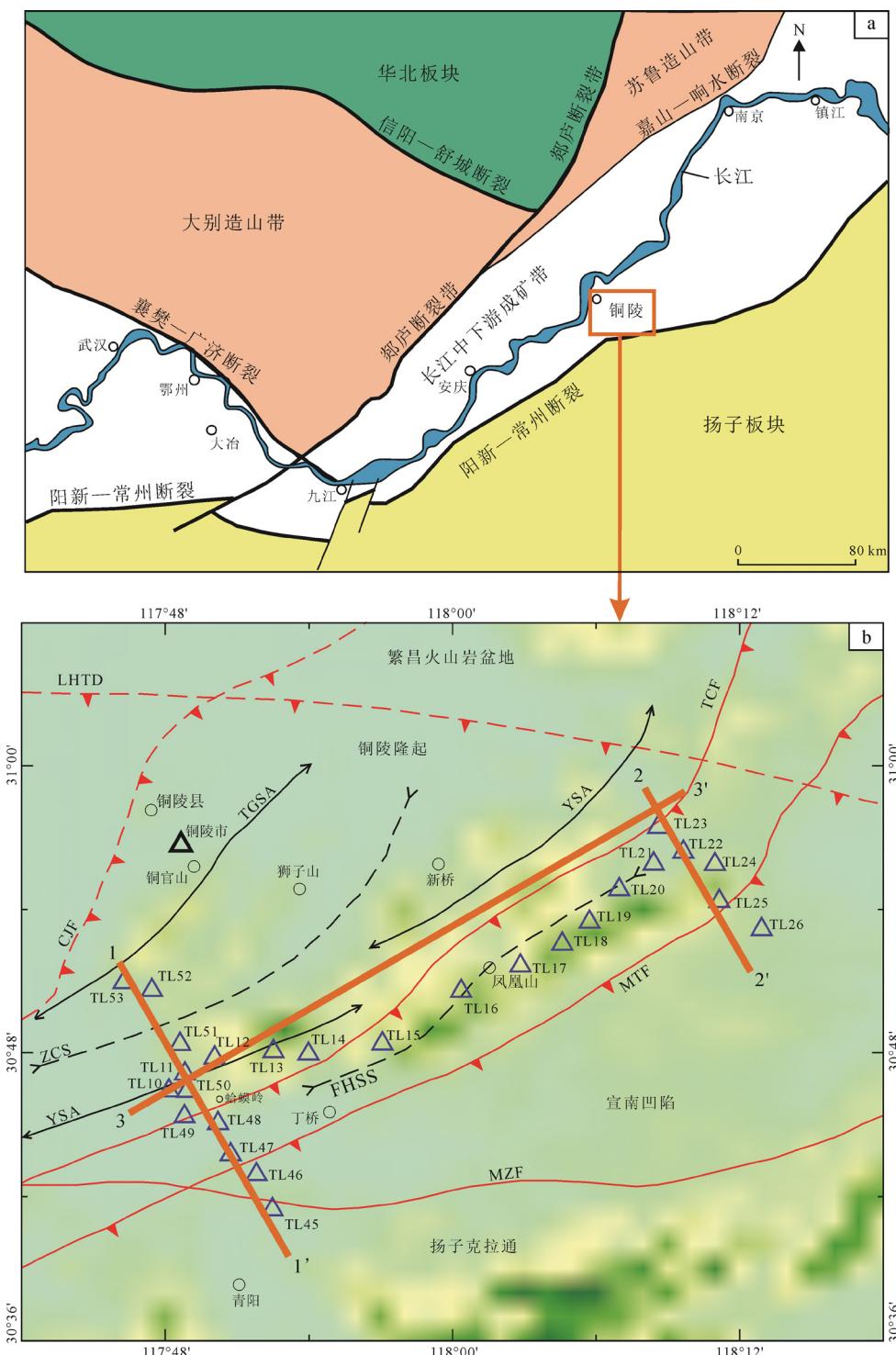


图 a 表示铜陵在长江中下游所处位置。图 b 蓝色三角代表矿集区台站分布，其中构造纲要图据吕庆田等(2015)修改。

断裂: CJF—长江深断裂带(推测); LHTD—庐江—黄故闸—铜陵拆离断裂(推测); MTF—主逆冲断裂(丁桥—戴汇断裂); MZF—木镇断裂; TCF—铜陵中央逆冲断裂。褶皱: FHSS—凤凰山复向斜; TGSA—铜官山背斜; YSA—永村桥—舒家店背斜; ZCS—朱村向斜; 1-1', 2-2', 3-3' 为 3 条剖面位置。

Fig. a is the location of Tongling in the middle-lower reaches of the Yangtze River. The blue triangles in Fig. b indicate the seismic stations in the Tongling Ore Concentration Area, where the simplified tectonic map is modified from LÜ et al. (2015).
 Fault: CJF—Changjiang Fault (inferred); LHTD—Lujiang—Huangguzha—Tongling detachment (inferred); MTF—main thrust fault (Dingqiao—Daihui Fault); MZF—Muzhen Fault; TCF—Tongling Central Reverse Fault. Fold: FHSS—Fenghuangshan syncline; TGSA—Tongguanshan anticline; YSA—Yongcunqiao—Shujiadian anticline; ZCS—Zhucun syncline; 1-1', 2-2', 3-3' are the positions of three profiles.

图 1 铜陵矿集区构造略图(据 Wu et al., 2015 修改)

Fig. 1 Tectonic sketch map of the Tongling Ore Concentration Area (modified from Wu et al., 2015)

在中生代扬子-华北板块相互碰撞的作用下，研究区发生了大规模的褶皱变形、断裂作用和岩浆活动(常

印佛等, 1991; Okay et al., 1993; 吴才来等, 2013)。岩浆活动开始于晚三叠世, 侏罗纪和白垩纪活动强烈。

矿集区内岩浆岩十分发育，广泛发育燕山期侵入岩，出露岩体共有 76 个，成岩年龄集中于 135~147 Ma(徐晓春等, 2012)。大多数岩体沿背斜和向斜褶皱轴侵入，侵入体岩性主要为辉石闪长岩、石英闪长岩和闪长岩。从宏观来看，岩体近似呈东西向串珠状分布，本区岩浆活动可能受东西向隐伏基底断裂带控制(刘文灿等, 1996; 毛景文等, 2006)。

2 数据和方法

本文采用“长江中下游铜陵矿集区深部结构及过程”地质调查项目于 2021 年 7 月—2022 年 7 月在安徽铜陵及周边安装的 26 个宽频地震台站记录的远震数据。为了尽可能覆盖整个铜陵地区，野外地震台站呈“工”字形分布(图 1b)。受野外地理条件的限制，市区无法布设地震台站，故台站基本分布于铜陵市东南部地区。地震台站采用 CMG-3ESPCD 型地震计和 REFTEK-130 数据采集器，采样率设置为 100 Hz。台站平均间距约为 3 km，局部由于地形和地理条件限制，间距可达 5 km。高程采用仪器记录高程的平均值。

在美国地质调查局官网(USGS, <http://www.usgs.gov/>)查询到地震台网工作期间记录的地震事件的震源参数，从中挑选信噪比较高，初动清晰的远震事件。本文挑选的地震事件震级不小于 5.5 级，震中距在 30°~90°之间。剔除异常数据后，最终手动提取了 49 个地震事件，共计 1 354 条接收函数(图 2)。

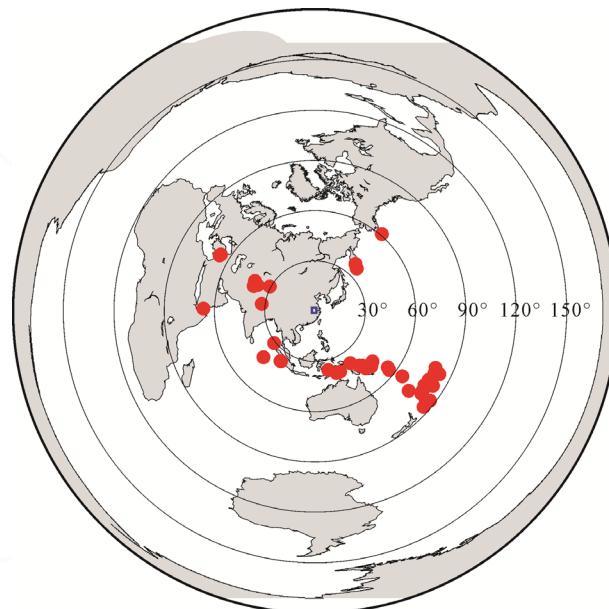


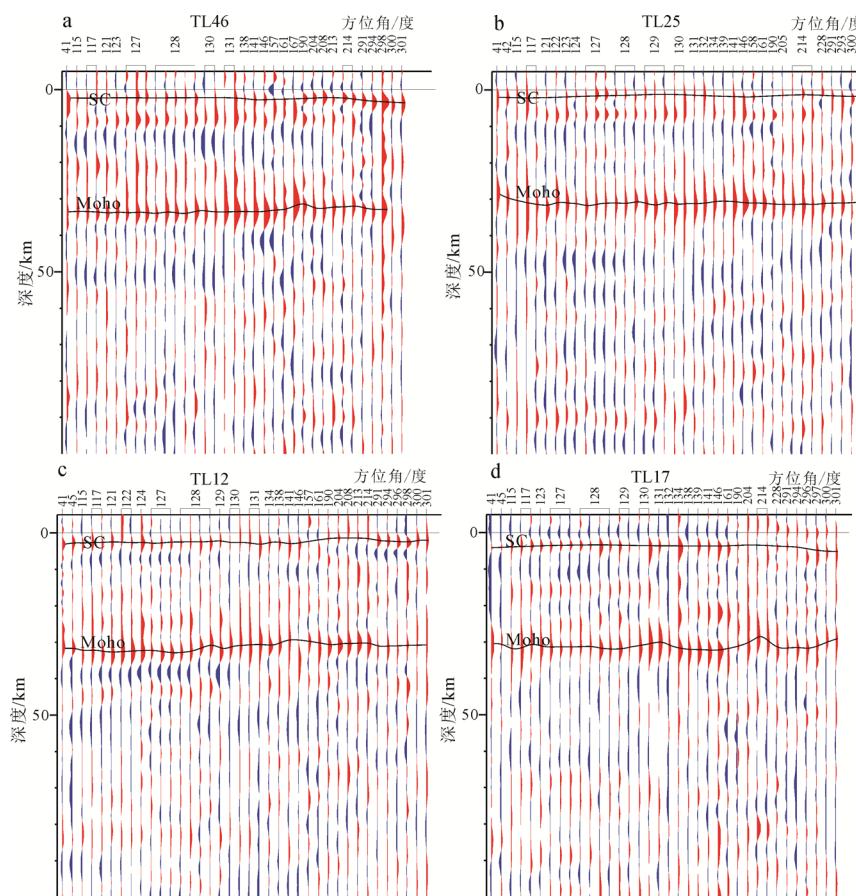
图 2 研究所用远震事件(红点)相对地震台网(蓝框)的分布图

Fig. 2 Distribution of the telesismic events (red solid circles) used in this study relative to the seismic newkwork (blue rectangle)

远震 P 波在穿过接收区下方波阻抗界面(或不连续界面)时会产生转换波，转换波中包含了台站下方地壳和上地幔结构信息，因而是研究台站下方壳幔结构的有效载体。远震接收函数方法是研究壳幔深部结构的一种成熟方法，在研究地壳和上地幔深部结构中得到广泛应用(Kind et al., 1988; Kumar et al., 2006; Zhao et al., 2011; Shi et al., 2013)。

远震 P 波接收函数提取包括三分量坐标旋转和分量间反褶积计算两步骤。本研究首先对三分量波形进行频率范围为 0.03~5 Hz 的滤波去除高频干扰。由于地表响应会产生很大的转换振幅，影响浅表界面的分辨。故分离转换震相时，采用了改进后的坐标系旋转分离方法(Reading et al., 2003)，从而突出近地表速度界面。研究中采用时间域反褶积方法(Langston, 1977)，高斯系数为 5.0。时深转换采用共转换点叠加成像方法(简称 CCP 叠加方法，Kosarev et al., 1999)，将接收函数按研究区参考速度模型(滕吉文等, 1985; 徐涛等, 2014)计算射线路径和三维空间的转换点位置，最后根据台站分布选择 3 条接收函数剖面(图 1b)，挑选剖面沿线地震台站的接收函数垂直投影到剖面上进行叠加，从而获得接收函数叠加成像剖面。最终选用的波速模型为：上地壳 $V_p=5.2 \text{ km/s}$, $V_s=2.89 \text{ km/s}$, 深度 10 km；下地壳 $V_p=6.20 \text{ km/s}$, $V_s=3.60 \text{ km/s}$, 深度 32 km；上地幔 $V_p=8.10 \text{ km/s}$, $V_s=4.47 \text{ km/s}$ 。研究证明，地下倾斜或垂直构造在与其垂直的成像剖面叠加时，成像效果更佳(Shi et al., 2004)。研究区区域构造走向大致为 NE60°，根据野外台站分布，剖面 1—1' 和 2—2' 方向选为 SE150°，3—3' 剖面方向与区域构造走向一致。图 3 显示了数据处理后获得的 4 个典型台站的深度域接收函数。4 个台站接收函数图像中同时可以看到莫霍面和浅部转换界面。在图 3a, b 中，“SC”下方 10 km 深度以上还可以看到另一个清晰转换震相，但并不是每个台站下方都存在(图 3c, d)，因此它们可能并不是区域的普遍性特征。

Moho 面作为全球性的速度不连续界面，其深度是描述区域地壳结构的重要参数，其形态和结构对开展地球动力学研究具有重要意义。前人研究显示，利用 Moho 面产生的 Ps 转换波和其 PpPs 和 PsPs+PpSs 多次波，假定地壳平均波速已知，可以通过网格搜索的方法得到地壳厚度 H 和纵横波波速比 k (Zhu et al., 2000)。在叠加图像上，三个震相的斜率不同，其交点对应的 H 、 k 值即为地壳的平均厚度和波速比，这种方法获得的结果受 3 种震相比重的影响较小。通常情况下，根据 3 个震相振幅强弱的差异，可以适当调整它们的相对比重，从

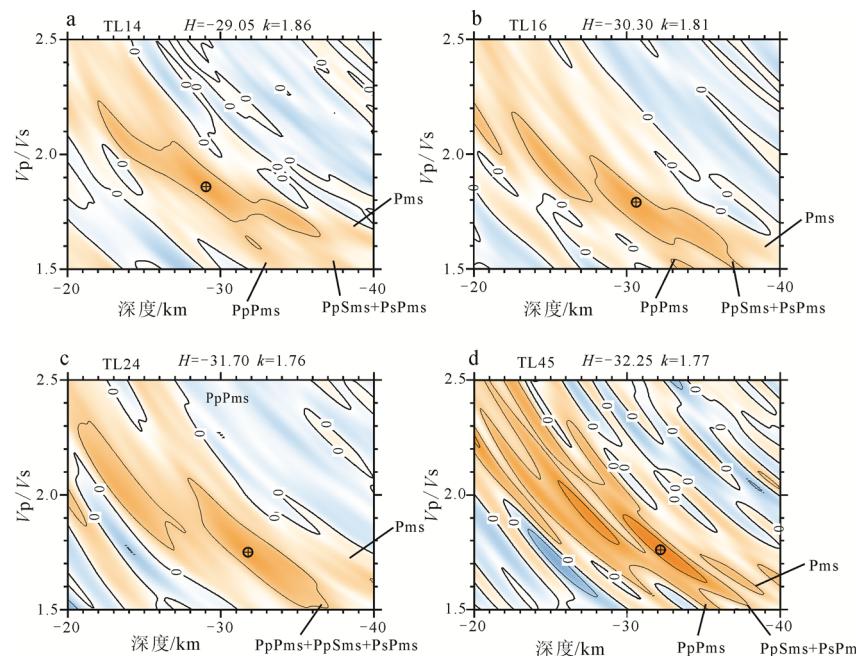


SC—浅部转换界面; Moho—莫霍面大致位置。

SC—the shallow conversion; Moho—the approximate position of Moho.

图 3 代表性台站 TL46(a, 剖面 1)、TL25(b, 剖面 2)、TL12(c, 剖面 3)和 TL17(d, 剖面 3)深度域接收函数波形

Fig. 3 Representative receiver function waveforms for stations TL46 (a, profile 1), TL25 (b, profile 2), TL12 (c, profile 3), and TL17 (d, profile 3) varying in depth domain



Pms—P 波在 Moho 面的转换波; PpPms, PpSms, PsPms—P 波在 Moho 面处的多次转换波。

图中颜色代表 Ps/P 振幅比, 橙色为正, 蓝色为负, 颜色越深, 绝对值越大。

Pms—the directly converted phase from the Moho; PpPms, PpSms, PsPms—multiply converted phases of the Pms.

The colors are the amplitude ratios of Ps/P, orange is positive and blue is negative. The darker the color, the greater the absolute value.

图 4 4 个代表性台站地壳厚度和纵横波速比扫描结果

Fig. 4 Estimates of the crustal thicknesses and V_p/V_s ratios for the four representative stations

而更清晰地显示多次地震相。图 4 展示了 4 个典型台站经过扫描后获得的地壳厚度和波速比 V_p/V_s 。

3 结果

3.1 莫霍面深度

图 5a 显示了沿剖面 1—1' 获得的 P 波接收函数

图像，清晰地显示了铜陵矿集区南部剖面下方的地壳结构。Moho 面作为全球分布的一级界面，在剖面上最为清晰，深度约为 28~32 km，较为连续。西北部相比东南部深度较浅。H-k 扫描叠加获得的平均地壳厚度(图 6a)显示 Moho 面深度位于 29~32 km 之间，与图 5a 的成像剖面结果基本一致。由于数据处

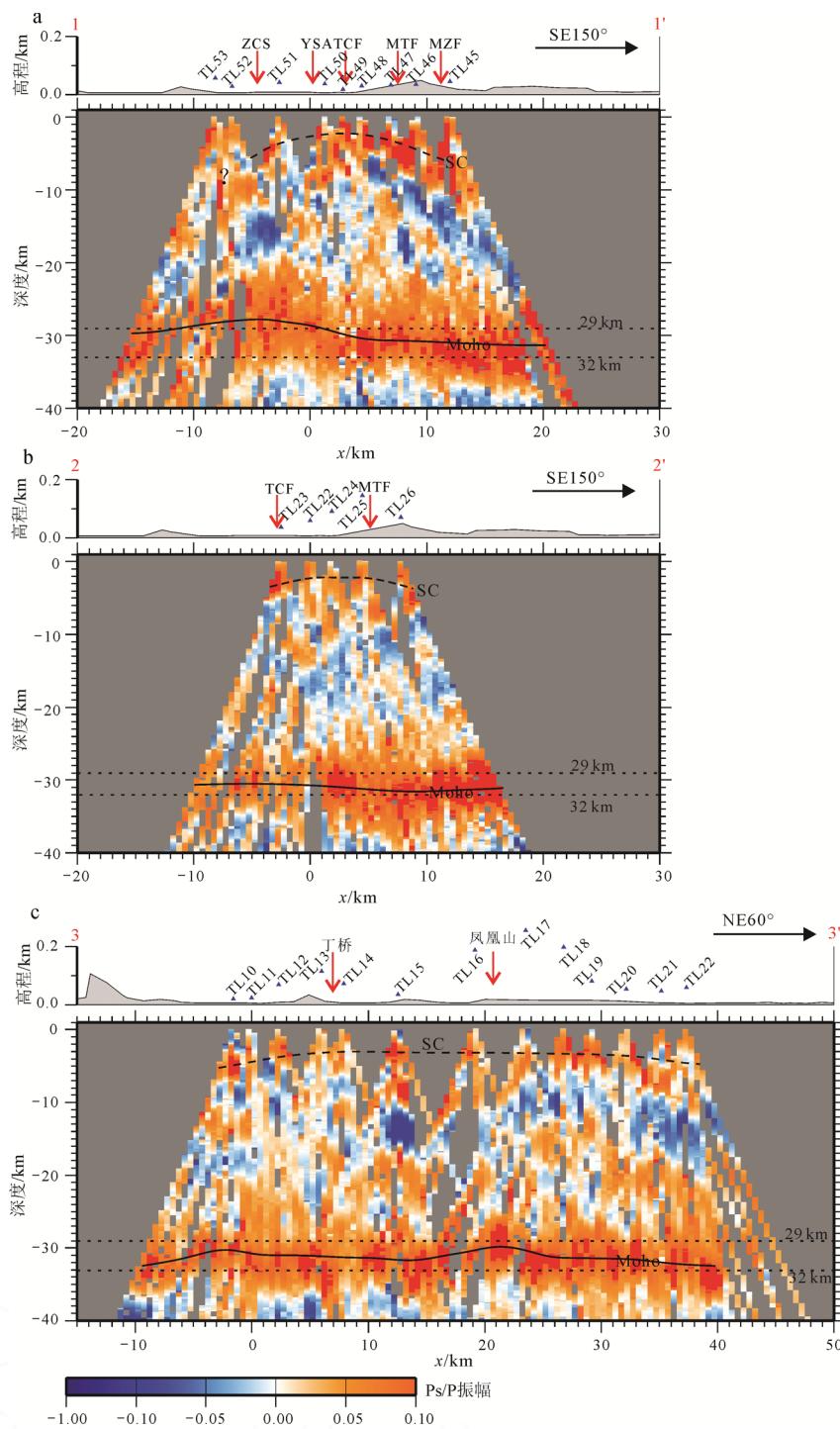
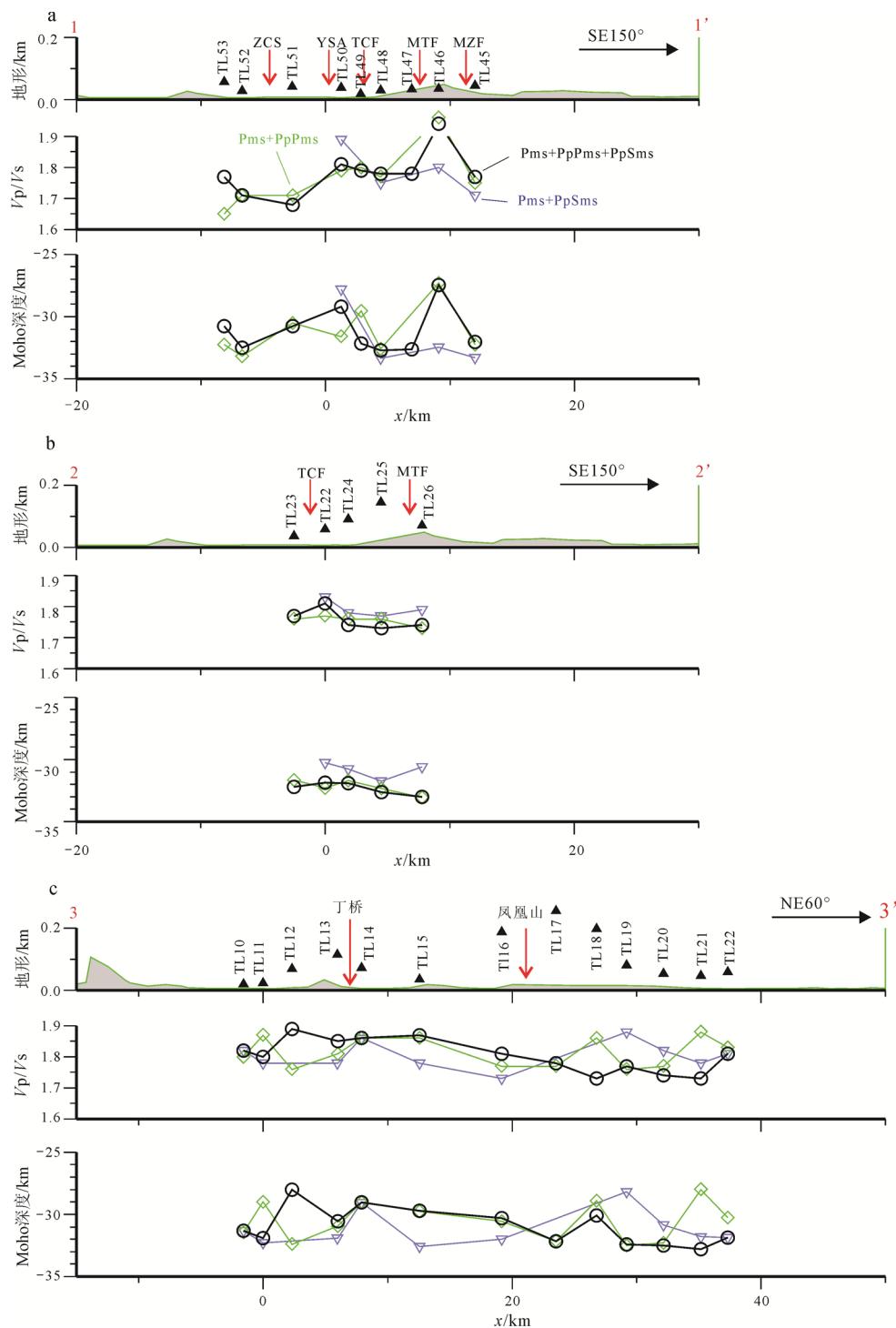


图 a, b, c 中的上图代表沿 3 条剖面的地形，台站与地表高度差是沿剖面投影造成的。a, b, c 中下图中的“SC”表示浅部转换界面，29 km 和 32 km 的黑色虚线用于对比，二者之间的黑色实线为 Moho 大致深度。断裂和褶皱名称同图 1。

The upper panels in a, b, and c are the topographies along the three profiles. The altitude difference between each station and the ground results from the projection along the profiles. The “SC” in the lower of a, b, and c are shallow converters. The dotted black lines marked “29 km” and “32 km” are used for comparison, and the solid black lines between them are the approximate depth of the Moho. The faults and folds are the same as those shown in Fig. 1.

图 5 沿剖面 1—1'、2—2'、3—3' 地壳结构的 P 波接收函数图像

Fig. 5 P-wave receiver-function images for the crustal structure along three profiles in Fig. 1



a, b, c 中上图为地形, 中图为波速比 V_p/V_s , 下图为 Moho 面深度。蓝色倒三角是 Pms+PpSms 叠加结果, 绿色菱形为 Pms+PpPms 震相叠加结果, 黑色圆圈为 3 个震相叠加结果。可以看出 3 种叠加方法获得结果差异不大, 因此文中讨论采用 3 个震相叠加的结果。

The upper panels in a, b, and c are the topographies along the profiles, the middle panels are the velocity ratios, and the lower panel is the depth of Moho. The inverted blue triangles are the crustal thicknesses and V_p/V_s ratios obtained by stacking Pms+PpSms, the green rectangles by Pms+PpPms, and the black circles by stacking all three Pms, PpPms, and PpSms phases. The difference obtained by the three stacking methods was relatively small. Therefore, the black circle results were adopted for discussion in this study.

图 6 沿剖面 1—1'、2—2'、3—3' 的 $H\text{-}k$ 叠加扫描结果

Fig. 6 Crustal thicknesses and V_p/V_s ratios estimated by $H\text{-}k$ stacking along three profiles

理时消除了地表响应, 因此, 除 Moho 界面外, 在剖面浅部还可以看到一个相对连续的正转换界面, 尽管不如莫霍面那么连续, 但还可以看出大致轮廓。该界面深度在剖面中部最浅, 约为 2~3 km, 向两侧逐渐加深, 与该剖面穿过地区地表的地形呈反

相关。

图 5b 为沿剖面 2—2' 的 P 波接收函数图像, 显示了研究区东北部的地壳结构, Moho 面同样十分清晰, 深度位于 32 km 上下, 与 $H\text{-}k$ 扫描获得的 Moho 面深度基本吻合。而地壳浅部的界面不如南

部清晰,且与地表地形相关性不大。向剖面两侧也没有加深的现象,深度基本在2~3 km之间,这可能与剖面长度较短有关。

剖面3—3'显示了大致沿区域构造走向穿过铜陵矿集区的地壳结构。可以看出沿走向方向上莫霍面深度变化不大,在29~32 km之间,在凤凰山附近深度略有抬升。 $H-k$ 扫描结果获得的剖面深度与叠加成像的结果也基本相同。 $H-k$ 获得的Moho深度得到的是平均深度,因此可以解释凤凰山地区下方Moho抬升在图6c中没有显示的原因。地表浅部正转换震相界面深度约为3 km,深度变化不大。

相比前人在长江中下游地区开展的大尺度研究结果,本文获得了铜陵矿集区这一小尺度区域范围内的地壳结构。成像结果还显示,铜陵壳幔过渡带具有一定厚度,且多个地震台站的单台接收函数显示莫霍面上方存在另外一个界面(图3c, d),这是铜陵地区Moho面的一个重要特征。从整个铜陵矿集区来看,Moho面介于29~32 km之间的深度与在该地区其它地球物理探测结果基本一致,包括深反射地震,宽频地震探测等(吕庆田等,2015;张耀阳等,2019;张永谦等,2019)。

3.2 波速比

图6显示了通过 $H-k$ 扫描叠加方法获得的莫霍面深度和 V_p/V_s 值。图中分别展示了利用Pms+PpPms+PsPs共3个震相(黑色圆圈),Pms+PpPms共2个震相(绿色矩形)和Pms+PpSms共2个震相(蓝色倒三角)叠加获得的结果。可以看出,3种叠加方法获得的结果相差不大。但3个震相叠加的结果更有代表性,故本文讨论采用此结果。整体来看,沿3条剖面的波速比值变化均不大。其中,在剖面1—1'上,TL46台站波速比值较高,达到了1.94。在永村桥—舒家店背斜东侧波速比均大于1.75,平均值为1.78,西侧3个台站的波速比平均值为1.72。但在永村桥—舒家店背斜西侧仅有3个台站,间距较小,数据较少,还不足以说明该背斜两侧地壳的波速比具有较大差异。整个1—1'剖面的波速比平均值为1.78。

剖面2—2'长度较短,波速比变化较小,平均值为1.76。剖面3—3'沿构造走向横跨整个铜陵矿集区,大部分台站下方地壳的波速比在1.75以上,波动也不大,平均值为1.80。整个铜陵地区地壳的波速比平均值为1.79。

4 讨论

接收函数叠加剖面显示的地壳浅部~3 km 上下的不连续界面(图5),可以与铜陵地区开展的深反射地震剖面对比,根据深度判断,可能是浅部盖层

与基底之间的滑脱层(吕庆田等,2015)。该界面深度沿NE-SW方向在整个矿集区内的深度变化不大,仅在铜陵南部地区的永村桥—舒家店背斜两侧深度有加深现象。南部剖面1—1'位于蛤蟆岭矿区,在该区域周边尚未发现工业规模的大型矿床,地质调查认为该区的含矿地层深度比北部较大(刘文灿等,1996;李忆南等,2022),本文结果显示的浅部基底界面向背斜两翼加深可能暗示该地区南北两侧浅部盖层厚度也较大,侧面支持矿区含矿层深度较大的观点。考虑到矿区的永村桥背斜构造,这可能是褶皱变形改造加厚的结果。这意味着在南部地区开展找矿工作可能具有较大难度,在当前的经济技术水平条件下,更多应向北部现有矿床外围开展找矿工作。

莫霍面是地壳和上地幔的分界,是地壳和上地幔发生相互作用和物质交换的场所,但研究显示在全球很多地区它并不是一个简单的“界面”。通过综合人工地震折射/反射、室内岩石物理实验和地球化学结果,研究认为中国东部许多地区的莫霍面更近似是一个壳幔过渡带结构(王椿镛等,1994;滕吉文,2006;孙伟家等,2018)。

穿过铜陵地区的深反射地震早期结果显示铜陵隆起下方莫霍面具有弱反射特征(吕庆田等,2003,2004),SinoProbe最新结果在铜陵隆起东部的宣南拗陷也未观测到明显的莫霍面反射(吕庆田等,2015),而本文利用天然地震接收函数结果却获得了铜陵地区清晰的莫霍面。原因可能是铜陵地区的莫霍面并不是一个速度截然变化的不连续面,而是一个速度向下逐渐增加的壳-幔过渡带,这种变化在世界其它地区也是常见的现象(Brun et al., 1992; Thybo et al., 2013)。矿集区29~32 km的Moho面深度,相比周边其它地区,相对较浅,可能与下扬子地区在燕山期大规模地壳和岩石圈减薄作用过程有关(邓晋福等,2001)。图5a中1—1'剖面西北侧相比东南侧较浅,剖面3—3'显示在凤凰山附近莫霍面深度也略有抬升。

本文接收函数叠加成像结果显示,铜陵壳幔过渡带具有一定厚度,且多个地震台站的单台接收函数莫霍面上方存在另外一个界面(图3c, d),根据波形振幅大致判断,它们并非浅部地壳的多次波,而可能是下地壳内的不连续界面。通过综合分析全球不同构造环境下的地震折射剖面和岩石实验结果,研究发现在下地壳存在两个明显的P波速度峰值(Holbrook et al., 1992),上层可能与下地壳长英质麻粒岩或麻粒岩相变质的沉积岩有关,下层可能是基性麻粒岩或榴辉岩的反映(吴福元,1998),可能是地幔物质侵入下地壳使其部分榴辉岩化的结果。

(Jamtveit et al., 2018; Shi et al., 2020)。穿过研究区北部安徽灵璧地区的地球物理综合大断面结果指出, 下扬子地区的莫霍面是一个过渡层(陈沪生等, 1988)。高分辨背景噪音成像结果得出长江中下游地区下地壳存在高速异常体, 在庐枞和铜陵矿集区较强(罗松等, 2019)。这些结果支持本文认为铜陵地区莫霍面为一定厚度壳幔过渡带的推测。在铜陵地区这可能与中生代长江中下游地区广泛的岩浆活动有关(常印佛等, 1991; 吴才来等, 2013), 本文获得的矿集区较高的波速比也支持这种推测。

前人研究表明, 大陆地壳形成和演化过程与地壳厚度和波速比之间存在密切关系(嵇少丞等, 2009; 王峻等, 2009)。拆沉作用和底侵作用会对泊松比(或波速比)产生不同的影响: 上地幔的基性或超基性岩浆底侵到下地壳时, 会使地壳内的铁镁质含量升高, 从而使得泊松比(波速比)升高; 相反, 拆沉作用会导致下地壳部分基性岩石含量的减少, 引起地壳泊松比(波速比)的降低。因此, 本研究发现的铜陵地区较高的波速比可能表明该区下地壳曾受到地幔上涌物质的底侵作用, 而非发生过拆沉。

长江中下游地区是我国著名的铜、铁等多金属成矿带, 铜陵更有“铜都”之称。Cu、Fe等亲地幔成矿元素在地壳浅部的聚集需要从地幔中萃取, 而岩石圈的减薄会造成软流圈物质进入原始的冷岩石圈, 这可能是燕山期大规模岩浆物质的主要来源(邓晋福等, 1999; 邓晋福等, 2001)。最新的深部探测结果(Shi et al., 2013; Lü et al., 2015)认为长江中下游地区的地壳减薄可能是MASH成矿过程的影响。本文研究结果证实该区地壳确实发生了减薄, 且平均波速比偏高, 据此推测壳幔之间可能发生了底侵作用。在矿集区附近发育的与埃达克岩石类似的中酸性侵入岩的地化特征, 也指示壳-幔相互作用的存在(王强等, 2001; Xu et al., 2014)。而更早地质历史时期矿集区是否经历过拆沉作用导致岩石圈减薄的过程, 可能还需要深部地幔速度结构的证据。

5 结论

在铜陵矿集区及周边部署的26个宽频地震台站记录了约一年的地震数据, 提取49个远震事件共计1354个接收函数, 通过接收函数CCP叠加成像和H-k扫描方法获得了铜陵地区的地壳结构和波速比, 研究结果表明:

(1)接收函数叠加剖面显示地壳浅部存在一个速度不连续界面, 深度约为3 km, 在铜陵南部的蛤蟆岭地区, 向永村桥背斜两翼有加深趋势。该界面可能是浅部盖层与基底之间的分界。界面在南部向两翼加深的现象预示在该地区找矿的难度较大。

(2)铜陵地区的莫霍面深度整体在29~32 km之间, 相比全球平均陆壳较浅。莫霍面深度横向变化不大, 有一定厚度, 表明铜陵地区莫霍面可能是波速逐渐增加的“过渡带”, 而非波速陡变“界面”。

(3)铜陵地区地壳整体波速比较高, 平均值为1.79。较薄的地壳厚度和较高的波速比, 表明铜陵地区经历过地壳减薄和底侵作用, 我们认为这可能与中生代期间长江中下游地区的大规模岩浆作用, 造成上地幔物质上涌底侵到铜陵下地壳有关。

致谢:感谢中国地质科学院冯梅研究员的悉心指导, 感谢两位匿名审稿专家提出的宝贵意见。

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (Nos. DD20221829, DD20233002, and DD20233001).

参考文献:

- 常印佛, 刘湘培, 吴言昌, 1991. 长江中下游铜铁成矿带[M]. 北京: 地质出版社.
- 陈斌, 刘超群, 田伟, 2006. 太行山中生代岩浆作用过程中的壳幔岩浆混合作用: 岩石学和地球化学证据[J]. 地学前缘, 13(2): 140-147.
- 陈沪生, 1988. 下扬子地区 HQ-13 线的综合地球物理调查及其地质意义[J]. 石油与天然气地质, 9(3): 211-222.
- 邓晋福, 莫宣学, 赵海玲, 等, 1999. 中国东部燕山期岩石圈-软流圈系统大灾变与成矿环境[J]. 矿床地质, 18(4): 309-315.
- 邓晋福, 吴宗絮, 2001. 下扬子克拉通岩石圈减薄事件与长江中下游 Cu-Fe 成矿带[J]. 安徽地质, 11(2): 86-91.
- 嵇少丞, 王茜, 杨文采, 2009. 华北克拉通泊松比与地壳厚度的关系及其大地构造意义[J]. 地质学报, 83(3): 324-330.
- 江国明, 张贵宾, 吕庆田, 等, 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[J]. 岩石学报, 30(4): 907-917.
- 兰学毅, 杜建国, 严加永, 等, 2015. 基于先验信息约束的重磁三维交互反演建模技术——以铜陵矿集区为例[J]. 地球物理学报, 58(12): 4436-4449.
- 李忆南, 王次松, 2022. 安徽铜陵西峰牌地区地质特征及找矿前景分析[J]. 安徽地质, 32(3): 197-201.
- 刘文灿, 高德臻, 储国正, 1996. 安徽铜陵地区构造变形分析及成矿预测[M]. 北京: 地质出版社.
- 罗松, 姚华建, 李秋生, 等, 2019. 长江中下游成矿带高分辨率地壳三维横波速度结构及其形成的深部动力学背景[J]. 中国科学: 地球科学, 49(9): 1394-1412.
- 吕庆田, 董树文, 汤井田, 等, 2015. 多尺度综合地球物理探测: 揭示成矿系统、助力深部找矿——长江中下游深部探测(SinoProbe-03)进展[J]. 地球物理学报, 58(12): 4319-4343.
- 吕庆田, 侯增谦, 杨竹森, 等, 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: 地球科学, 34(9): 783-794.

- 吕庆田, 侯增谦, 赵金花, 等, 2003. 深地震反射剖面揭示的铜陵矿集区复杂地壳结构形态[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 33(5): 442-449.
- 毛景文, 胡瑞忠, 陈毓川, 等, 2006. 大规模成矿作用与大型矿集区[M]. 北京: 地质出版社.
- 史大年, 吕庆田, 徐文艺, 等, 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[J]. 地质学报, 86(3): 389-399.
- 孙伟家, 符力耘, 魏伟, 等, 2018. 中国东部地区的壳-幔过渡带结构[J]. 地球物理学报, 61(3): 845-855.
- 滕吉文, 2006. 地球深部壳—幔边界的层束精细结构与物理属性研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 36(1): 1-23.
- 滕吉文, 孙克中, 熊绍柏, 等, 1985. 中国东部马鞍山-常熟-启东地带地壳与上地幔结构和速度分布的爆炸地震研究[J]. 地球物理学报, 28(2): 155-169.
- 王椿镛, 张先康, 吴庆举, 1994. 冀中拗陷内深地震反射剖面揭示的滑脱构造[J]. 科学通报, 39(7): 625-628.
- 王峻, 刘启元, 陈九辉, 等, 2009. 首都圈地区的地壳厚度及泊松比[J]. 地球物理学报, 52(1): 57-66.
- 王强, 赵振华, 熊小林, 等, 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.
- 吴才来, 董树文, 郭祥焱, 等, 2013. 中国铜陵中酸性侵入岩[M]. 北京: 地质出版社.
- 吴福元, 1998. 壳—幔物质交换的岩浆岩石学研究[J]. 地学前缘, 5(3): 95-103.
- 吴福元, 葛文春, 孙德有, 等, 2003. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题[J]. 地学前缘, 10(3): 51-60.
- 徐涛, 张忠杰, 田小波, 等, 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[J]. 岩石学报, 30(4): 918-930.
- 徐晓春, 白茹玉, 谢巧勤, 等, 2012. 安徽铜陵中生代侵入岩地质地球化学特征再认识及成因讨论[J]. 岩石学报, 28(10): 3139-3169.
- 严加永, 吕庆田, 陈明春, 等, 2015. 基于重磁场多尺度边缘检测的地质构造信息识别与提取——以铜陵矿集区为例[J]. 地球物理学报, 58(12): 4450-4464.
- 翟裕生, 姚书振, 林新多, 等, 1992. 长江中下游地区铁铜(金)成矿规律[M]. 北京: 地质出版社.
- 张耀阳, 方慧, 仇根根, 等, 2019. 利用 S 波接收函数研究下扬子及其邻区的岩石圈结构[J]. 中国地质, 46(4): 786-794.
- 张永谦, 吕庆田, 滕吉文, 等, 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[J]. 岩石学报, 30(4): 931-940.
- 张永谦, 徐峣, 严加永, 等, 2019. 华南东南部地壳厚度、属性及其与成矿的关系: 基于地震接收函数的约束[J]. 中国地质, 46(4): 723-736.
- 139-147.
- CHANG Yinfo, LIU Xiangpei, WU Yanchang, 1991. Cu-Fe metallogenic belt in the middle and lower reaches of Yangtze River[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- CHEN Bin, LIU Chaoqun, TIAN Wei, 2006. Magma-mixing between mantle- and crustal-derived melts in the process of Mesozoic magmatism, Taihangshan: constraints from petrology and geochemistry[J]. Earth Science Frontiers, 13(2): 140-147(in Chinese with English abstract).
- CHEN Husheng, 1988. Comprehensive geophysical survey of HQ-13 line in the lower Yangzi reaches and its geological significance[J]. Oil & Gas Geology, 9(3): 211-222(in Chinese with English abstract).
- CHEN Jiangfeng, JAHN B, 1998. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence[J]. Tectonophysics, 284: 101-133.
- DENG Jinfu, MO Xuanxue, ZHAO Hailing, et al., 1999. The Yanshanian lithosphere-asthenosphere catastrophe and metallogenic environment in east China[J]. Mineral Deposits, 18(4): 309-315(in Chinese with English abstract).
- DENG Jinfu, WU Zongxu, 2001. Lithospheric thinning event in the lower Yangtze craton and Cu-Fe metallogenic belt in the middle and lower Yangtze River reaches[J]. Geology of Anhui, 11(2): 86-91(in Chinese with English abstract).
- HOLBROOK W S, MOONEY W D, CHRISTENSEN N I, 1992. The seismic velocity of the deep continental crust[C]// FOUNTAIN D M, ARCUS R, KAY R W. Continental Lower Crust. New York: Elsevier: 1-43.
- JAMTVEIT B, BEN-ZION Y, RENARD F, et al., 2018. Earthquake-induced transformation of the lower crust[J]. Nature, 556: 487-491.
- JI Shaocheng, WANG Qian, YANG Wencai, 2009. Correlation between Crustal Thickness and Poisson's Ratio in the North China Craton and Its Implication for Lithospheric Thinning[J]. Acta Geologica Sinica, 83(3): 324-330(in Chinese with English abstract).
- JIANG Guoming, ZHANG Guibin, LÜ Qingtian, et al., 2014. Deep geodynamics of mineralization beneath the Middle-Lower Reaches of Yangtze River: Evidence from teleseismic tomography[J]. Acta Petrologica Sinica, 30(4): 907-917(in Chinese with English abstract).
- JIANG Guoming, ZHANG Guibin, ZHAO Dapeng, et al., 2021. Mantle flow and dynamics beneath central-east China: New insights from P-wave anisotropic tomography[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 126(5): 1-23.
- KIND R, VINNIK L P, 1988. The upper-mantle discontinuities underneath the GRF array from P-to-S converted phases[J]. Journal of Geophysics, 62: 138-147.
- KOSAREV G, KIND R, SOBOLEV S V, et al., 1999. Seismic Evidence for a Detached Indian Lithospheric Mantle Beneath Tibet[J]. Science, 283: 1306-1309.
- KUMAR P, YUAN Xiaohui, KIND R, et al., 2006. Imaging the

References:

- BRUN J P, GUTSCHER M A, DEKORP-ECORS T, 1992. Deep crustal structure of the Rhine Graben from DEKORP-ECORS seismic reflection data: A summary[J]. Tectonophysics, 208:

- colliding Indian and Asian lithospheric plates beneath Tibet[J]. *Journal of Geophysical Research*, 111(B6): 1-11.
- LAN Xueyi, DU Jianguo, YAN Jiayong, et al., 2015. 3D gravity and magnetic interactive inversion modeling based on prior information: A case study of the Tongling ore concentration area[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(12): 4436-4449(in Chinese with English abstract).
- LANGSTON C A, 1977. The effect of planar dipping structures on the source and receiver for constant ray parameter[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 67(4): 1029-1050.
- LI Yinan, WANG Cisong, 2022. Geological characteristics and mineral exploration potential analysis of the Xifengpai area in Tongling, Anhui[J]. *Geology of Anhui*, 32(3): 197-201(in Chinese with English abstract).
- LI Zhengxiang, LI Xianhua, 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.
- LING Mingxing, WANG Fangyue, DING Xing, et al., 2009. Cretaceous ridge subduction along the Lower Yangtze river belt, eastern China[J]. *Economic Geology*, 104: 303-321.
- LIU Wencan, GAO Dezhen, CHU Guozheng, 1996. Tectonic deformation analysis and metallogenic prediction in Tongling area, Anhui province[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- LUO Song, YAO Huajian, LI Qiusheng, et al., 2019. High-resolution 3D crustal S-wave velocity structure of the Middle-Lower Yangtze River Metallogenic Belt and implications for its deep geodynamic setting[J]. *Science China Earth Sciences*, 62: 1361-1378(in Chinese with English abstract).
- LÜ Qingtian, DONG Shuwen, TANG Jingtian, et al., 2015. Multi-scale and integrated geophysical data revealing mineral systems and exploring for mineral deposits at depth: A synthesis from SinoProbe-03[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(12): 4319-4343(in Chinese with English abstract).
- LÜ Qingtian, HOU Zengqian, YANG Zhusen, et al., 2004. Underplating and kinetic evolution pattern in the middle and lower reaches of the Yangtze River: constraints from geophysical data[J]. *Science in China Series D Earth Sciences*, 34(9): 783-794(in Chinese).
- LÜ Qingtian, HOU Zengqian, ZHAO Jinhua, et al., 2003. Structural morphology of the complex crust in the Tongling ore concentration area revealed by deep seismic reflection profiles[J]. *Science in China Series D Earth Sciences*, 33(5): 442-449(in Chinese).
- LÜ Qingtian, SHI Danian, LIU Zhendong, et al., 2015. Crustal structure and geodynamics of the Middle and Lower reaches of Yangtze metallogenic belt and neighboring areas: Insights from deep seismic reflection profiling[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 114: 704-716.
- MAO Jingwen, HU Ruizhong, CHEN Yuchuan, et al., 2006. Large-scale mineralization and large ore concentration[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- OKAY A I, SENGOR A M C, SATIR M, 1993. Tectonics of an ultrahigh-pressure metamorphic terrane: The Dabie Shan/Tongbai Shan Orogen, China[J]. *Tectonics*, 12(6): 1320-1334.
- READING A, KENNEDY B, SAMBRIDGE M, 2003. Improved inversion for seismic structure using transformed, S-wavevector receiver functions: Removing the effect of the free surface[J]. *Geophysical Research Letters*, 30(19): 1-4.
- RUDNICK R L, FOUNTAIN D M, 1995. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective[J]. *Reviews of Geophysics*, 33(3): 267-309.
- SHI Danian, LÜ Qingtian, XU Wenqi, et al., 2013. Crustal structure beneath the middle-lower Yangtze metallogenic belt in East China: Constraints from passive source seismic experiment on the Mesozoic intra-continental mineralization[J]. *Tectonophysics*, 606: 48-59.
- SHI Danian, LÜ Qingtian, XU Wenqi, et al., 2012. 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 Metallization Process?[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(3): 389-399(in Chinese with English abstract).
- SHI Danian, KLEMPERER S L, SHI Jianyu, et al., 2020. Localized foundering of Indian lower crust in the India-Tibet collision zone[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(40): 24742-24747.
- SHI Danian, ZHAO Wenjin, BROWN L, et al., 2004. Detection of southward intracontinental subduction of Tibetan lithosphere along the Bangong-Nujiang suture by P-to-S converted waves[J]. *Geology*, 32(3): 209-212.
- SUN Weijia, FU Liyun, WEI Wei, et al., 2018. The crust-mantle transition structures beneath eastern China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(3): 845-855(in Chinese with English abstract).
- TANG Jingtian, ZHOU Cong, WANG Xianying, et al., 2013. Deep electrical structure and geological significance of Tongling ore district[J]. *Tectonophysics*, 606: 78-96.
- TENG Jiwen, 2006. Research on Layer-Bundle Fine Structures and Physical Attributes of Crust-Mantle Boundary in Deep Earth[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 36(1): 1-23(in Chinese with English abstract).
- TENG Jiwen, SUN Kezhong, XIONG Shaobai, et al., 1985. Explosion seismological study for velocity distribution and structure of the crust and upper mantle from Maanshan to Qidong of the southern parts of China[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 28(2): 155-169(in Chinese with English abstract).
- THYBO H, ARTEMIEVA I M, 2013. Moho and magmatic underplating in continental lithosphere[J]. *Tectonophysics*, 609: 605-619.
- WANG Chunyong, ZHANG Xiankang, WU Qingju, 1994. Slippage tectonics revealed by deep seismic reflection profiles within

- the Jizhong argillic depression[J]. Chinese Science Bulletin, 39(7): 625-628(in Chinese).
- WANG Jun, LIU Qiyuan, CHEN Juhui, et al., 2009. The crustal thickness and Poisson's ratio beneath the Capital Circle Region[J]. Chinese Journal of Geophysics, 52(1): 57-66(in Chinese with English abstract).
- WANG Qiang, ZHAO Zhenhua, XIONG Xiaolin, et al., 2001. Melting of the underplated basaltic lower crust: Evidence from the Shaxi adakitic sodic quartz diorite-porphyrates, Anhui Province, China[J]. Geochimica, 30(4): 353-362(in Chinese with English abstract).
- WU Cailai, DONG Shuwen, GUO Xiangyan, et al., 2013. Medium-acid intrusive rocks from Tongling, China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- WU Cailai, DONG Shuwen, ROBINSON P T, et al., 2015. Petrogenesis of high-K, calc-alkaline and shoshonitic intrusive rocks in the Tongling area, Anhui Province (eastern China), and their tectonic implications[J]. Geological Society of America Bulletin, 126(1-2): 78-102.
- WU Fuyuan, 1998. The material exchange at the crust-mantle boundary: Evidence from igneous petrology[J]. Earth Science Frontiers, 5(3): 95-103(in Chinese with English abstract).
- WU Fuyuan, GE Wenchun, SUN Deyou, et al., 2003. Discussions on the lithospheric thinning in Eastern China[J]. Earth Science Frontiers, 10(3): 51-60(in Chinese with English abstract).
- XU Jifeng, SHINJO R, DEFANT M J, et al., 2014. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental crust?[J]. Geology, 30(12): 1111-1114.
- XU Tao, ZHANG Zhongjie, TIAN Xiaobo, et al., 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[J]. Acta Petrologica Sinica, 30(4): 918-930(in Chinese with English abstract).
- XU Xiaochun, BAI Ruyu, XIE Qiaoqin, et al., 2012. Re-understanding of the geological and geochemical characteristics of the Mesozoic intrusive rocks from Tongling area of Anhui Province, and discussions on their genesis[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(10): 3139-3169(in Chinese with English abstract).
- YAN Jiayong, LÜ Qingtian, CHEN Mingchun, et al., 2015. Identification and extraction of geological structure information based on multi-scale edge detection of gravity and magnetic fields: An example of the Tongling ore concentration area[J]. Chinese Journal of Geophysics, 58(12): 4450-4464(in Chinese with English abstract).
- YIN An, NIE Shangyou, 1993. An indentation model for the North and South China collision and the development of the Tan-Lu and Honam fault systems, eastern Asia[J]. Tectonics, 12(4): 801-813.
- ZHAI Yusheng, YAO Shuzhen, LIN Xinduo, et al., 1992. Iron-copper (gold) mineralization pattern in the middle and lower reaches of the Yangtze River[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- ZHANG Yaoyang, FANG Hui, QIU Gengen, et al., 2019. The lithospheric structure of the lower Yangtze Craton and its adjacent regions by S receiver function imaging[J]. Geology in China, 46(4): 786-794(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yongqian, LÜ Qingtian, TENG Jiwen, et al., 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[J]. Acta Petrologica Sinica, 30(4): 931-940(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yongqian, XU Yao, YAN Jiayong, et al., 2019. Crustal thickness, and its relations to mineralization in the southeastern part of South China: Constraint from the teleseismic receiver functions[J]. Geology in China, 46(4): 723-736(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Wenjin, KUMAR P, MECHIE J, et al., 2011. Tibetan plate overriding the Asian plate in central and northern Tibet[J]. Nature Geoscience, 4: 870-873.
- ZHU Lupei, KANAMORI H, 2000. Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions[J]. Journal of Geophysical Research, 105(B2): 2969-2980.