

doi: 10.12029/gc20190405

徐晓, 张永谦, 严加永, 徐志伍, 陈昌昕. 2019. 华南东南部上地幔远震 P 波速度结构及意义[J]. 中国地质, 46(4): 737–749.

Xu Yao, Zhang Yongqian, Yan Jiayong, Xu Zhiwu, Chen Changxin. 2019. Teleseismic P-wave velocity structure of upper mantle beneath the southeastern part of South China and its implications[J]. *Geology in China*, 46(4): 737–749(in Chinese with English abstract).

华南东南部上地幔远震 P 波速度结构及意义

徐晓^{1,2,3}, 张永谦^{1,2,3}, 严加永^{1,2,3}, 徐志伍^{1,2}, 陈昌昕^{1,2}

(1. 中国地质科学院, 北京 100037; 2. 中国地质调查局-中国地质科学院地球深部探测中心, 北京 100037;
3. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要:本研究利用 114 个固定台站记录的 121 个远震事件, 以钦杭结合带为中心, 采用天然地震层析成像构建了华南东南部上地幔 P 波速度结构模型。研究表明: (1) 钦杭结合带、武夷成矿带以及南岭成矿带的深部结构存在着差异, 说明 3 个成矿带经历了不同的构造演化过程; (2) 江绍断裂的上地幔中存在着低速异常, 推测该低速异常为从地幔过渡带或者下地幔上涌的热物质, 与钦杭结合带和武夷成矿带的成矿作用有着密切的关系; (3) 下扬子地区上地幔底部的高速异常可能为拆沉的岩石圈, 而华夏板块上地幔顶部的高速异常则有待进一步研究。本研究的结果为认识华南东南部的深部结构提供了新的证据。

关键词: 华南东南部; 钦杭结合带; 天然地震层析成像; 上地幔速度结构; 速度异常; 深部资源工程
中图分类号: P631.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2019)04-0737-13

Teleseismic P-wave velocity structure of upper mantle beneath the southeastern part of South China and its implications

XU Yao^{1,2,3}, ZHANG Yongqian^{1,2,3}, YAN Jiayong^{1,2,3}, XU Zhiwu^{1,2}, CHEN Changxin^{1,2}

(1. *Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*; 2. *SinoProbe Center, Chinese Academy of Geological Sciences and China Geological Survey, Beijing 100037, China*; 3. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*)

Abstract: This paper determined a P-wave velocity structure of upper mantle beneath the southeastern part of South China, with the emphasis placed on the Qinhang Joint Belt, by using 121 teleseismic events received by 114 permanent seismic stations. The results show that: (1) the deep structures of the Qinhang Joint Belt, the Wuyi Metallogenic Belt and the Nanling Metallogenic Belt are different, suggesting that the tectonic processes of the three metallogenic belts are also different; (2) there exists a low velocity anomaly in the upper mantle beneath the Jiangshao Fault, suggesting that the upwelling of thermal flow probably originated from mantle transition zone or lower mantle, and might have been closely related to the mineralization in the Qinhang Joint Belt and the Wuyi Metallogenic Belt; (3) the high velocity anomaly at the bottom of the upper mantle beneath the Yangtze Block is probably the

收稿日期: 2019-04-28; 改回日期: 2019-07-15

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20160082, DD20190012)、国家重点研发计划(2016YFC0600201)、国家自然科学基金(41574082)中国地质科学院基本科研业务费(K1609)联合资助。

作者简介: 徐晓, 男, 1989 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事天然地震层析成像研究工作; E-mail: 873973573@qq.com。

detached lithosphere; however, the high velocity anomaly beneath the Cathaysia Block should be further studied. These results provide new evidence for understanding deep structure about the southeastern part South China.

Key words: the southeastern part of South China; Qinhang Joint Belt; seismic tomography; velocity structure of upper mantle; velocity anomaly; deep resources engineering

About the first author: XU Yao, male, born in 1989, doctor, assistant researcher, majors in seismic tomography. E-mail: 873973573@qq.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Projects (No. DD20160082, DD20190012), National Key R&D Program of China (No. 2016YFC0600201), National Science Foundation (No. 41574082) and basic research fees of the Chinese Academy of Geological Sciences (No. K1609).

1 引言

华南东南部地处欧亚板块、太平洋板块以及菲律宾板块相互作用的最前端,包括了钦杭结合带(钦州湾—杭州湾,又称钦杭成矿带)和武夷山成矿带等著名成矿带(图1)。在历史上,华南东南部经

历了印支期、燕山期和喜马拉雅期复杂、强烈的陆内构造与板块构造等不同性质构造的复合叠加再造,并伴有较强的岩浆侵入活动,出现板块俯冲、岛弧形成和大陆增生等地球动力学特征(舒良树等, 2012; 张岳桥等, 2012; 张国伟等, 2013)。

钦杭结合带是华南东南部最重要的成矿带之一,

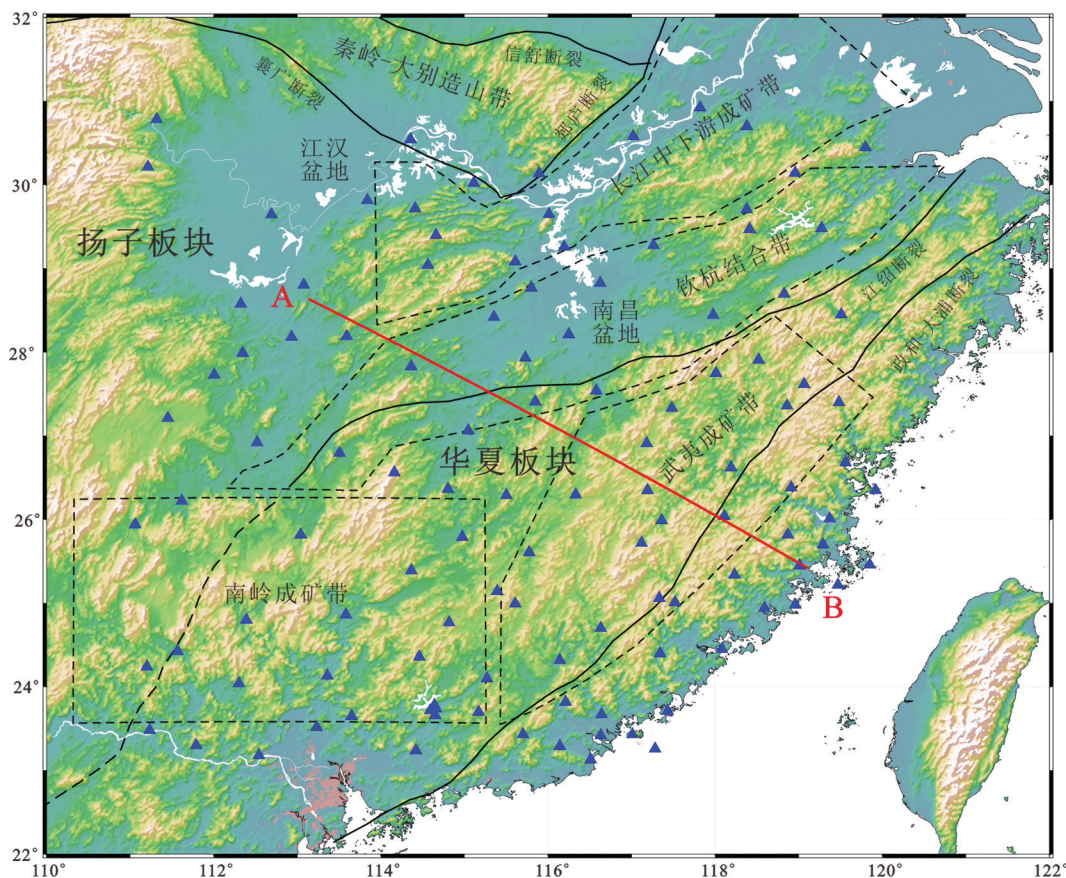


图1 研究区域和台站分布示意图
蓝色三角形代表本研究用到的固定台站,红色直线代表剖面位置

Fig.1 Distribution of the stations in the study area

The blue triangles represent the permanent stations used in this study, the red line represents the profile

位于扬子板块与华夏板块的碰撞结合部,长约2000 km,总体呈NE向反S状弧形展布,为两个板块在新元古代发生碰撞拼接并逐渐演化而成(图1)(杨明桂和梅勇文,1997;徐磊等,2012;吕劲松等,2017;周永章等,2017),带内多金属矿产资源储量极为丰富,发育了铜、锡、钨、铀、金、铅锌等一系列大型、超大型金属矿床组合,具有矿床规模大、矿化分布密集、矿床类型齐全、伴生组分多样等特点,且绝大部分矿床与燕山期中酸性岩浆有密切的联系(徐磊等,2012;吕劲松等,2017;倪培和王国光,2017;周永章等,2017)。因此对钦杭结合带的研究有助于深入理解华南东南部的构造背景和成矿规律。

迄今为止,对钦杭结合带的研究已经持续了三十多年,并且取得了大量的成果。学者们的研究表明,钦杭结合带共经历了晋宁运动、加里东运动、印支运动以及燕山运动等多期构造运动。特别是在燕山期,受太平洋、古亚洲洋以及特提斯洋构造域的共同作用,钦杭结合带发生强烈挤压,爆发了大规模的花岗岩浆活动和成矿作用,现今钦杭结合带内的大部分矿床为燕山期形成(杨明桂和梅勇文,1997;徐磊等,2012;吕劲松等,2017)。然而在对钦杭结合带一些基础问题的认识上,例如钦杭结合带的边界、区域成矿规律、构造演化的具体模式以及壳幔相互作用的机制等,学者们之间尚未达成共识(邓晋福等,2008;周永章等,2017),而这些问题则是揭开华南东南部物质组成及其响应的地质过程与演化的关键。

深部结构探测是解决这些问题的一种有效手段,通过对关键结合带和成矿带的深部结构进行探测,不仅可得到来自深部的直接证据与关键信息,而且还有助于深化对成矿系统和大型矿床的发育机制以及其背后所隐藏的深部动力学背景的认识(Richards,2003;胡瑞忠等,2004;侯增谦等,2007;周涛发等,2008)。近些年来,学者们在钦杭结合带乃至华南东南部均开展了大量的深部结构探测工作。深地震反射、宽角地震反射/折射、 $H-\kappa$ 叠加以及S波接收函数的研究结果均表明,以江绍断裂和雪峰山为界,华南东南部(钦杭结合带及邻区)的深部结构存在着明显的横向差异:扬子板块的地壳和岩石圈不仅比华夏板块的要厚,而且地壳和上地幔顶部的P波速度也相对较高。且地壳和岩石圈这种

自西北向东南逐渐变薄的特征,不仅存在于板块之间,在板块内部也比较明显(Zhang et al.,2005;熊小松等,2009;黄晖等,2010;邓阳凡等,2011;刘国兴等,2012;He et al.,2013;叶卓等,2013;于大勇等,2016;赵廷娜等,2017;张耀阳等,2018;韩如冰等,2019)。SKS分裂的结果同样表明,以江绍断裂为界,扬子板块和华夏板块上地幔各向异性方向和强度也存在着明显的差异,暗示着钦杭结合带的两侧可能经历了不同的构造演化过程(Zhao et al.,2007,2013;黄晖,2013;Huang et al.,2013;于大勇等,2016;Li et al.,2018)。

天然地震层析成像在刻画地球精细三维速度结构方面具有的优势,其中体波层析成像特别适合研究地幔的速度结构。从大尺度体波层析成像结果来看,华南东南部的上地幔在整体上表现为大范围的低速特征(Li et al.,2006;Huang and Zhao,2006;郑洪伟等,2012;Zhao et al.,2012)。然而,小尺度的体波层析成像结果则表明,华南东南部上地幔的速度结构还是存在着比较强烈的不均匀性(Huang et al.,2010;Zheng et al.,2013;Jiang et al.,2015;王晓冉等,2018;张昌榕等,2018)。但是这些层析成像结果,要么研究区域更集中于华夏板块(Huang et al.,2010;Zheng et al.,2013),要么更集中于扬子板块甚至华北板块(Jiang et al.,2015;张昌榕等,2018),要么只采用了流动台站的数据,且研究深度仍略显不足(王晓冉等,2018)。基于以上原因,本研究拟采用固定台站记录到的远震体波数据,以钦杭结合带为中心,构建华南东南部上地幔P波速度结构模型,为进一步认识华南东南部的深部结构和深部过程提供新证据。

2 方法和数据

本研究的研究区域位于 $N22^{\circ}\sim N32^{\circ}$ 、 $E110^{\circ}\sim E122^{\circ}$ (图1),以钦杭结合带为中心,囊括了其周缘的几个重要成矿带和构造单元。层析成像方法采用Zhao et al.(1992,1994)的TOMOG3D,这种方法以体波的走时信息作为原始数据参与反演,不仅在理论上比较成熟,而且计算速度较快,特别适合研究地球的深部速度结构(Huang and Zhao,2006;Jiang et al.,2009,2013,2015;郑洪伟等,2012;Zheng et al.,2013;徐晓等,2014,2015;王建等,2018;张昌

榕等,2018),其原理如下所述:

设 T_{ij}^{obs} , T_{ij}^{cal} 分别为第 i 个台站接收到的第 j 个地震事件的实际走时和理论走时,则走时方程为:

$$T_{ij}^{obs} = T_{ij}^{cal} + \left(\frac{\partial T}{\partial \varphi}\right) \Delta \varphi_j + \left(\frac{\partial T}{\partial \lambda}\right)_{ij} + \left(\frac{\partial T}{\partial h}\right) \Delta h_j + \delta T_{0j} + \sum_k \frac{\partial T}{\partial V_k} (1) \Delta V_k + E_{ij}$$

其中, $\varphi_j, \lambda_j, h_j$ 和 T_{0j} 分别代表第 j 个近震事件的纬度、经度、深度和发震时刻, V_k 是第 k 个网格节点的速度, Δ 代表相应的参数校正项, E_{ij} 为高次误差项。截去高次误差项,公式(1)就变成一个线性问题的方程组,然后以走时残差(实际走时和理论走时之间的差)作为原始数据,对震源参数(包括地震事件发震的坐标和地震时间)和速度参数进行反演。由于本研究采用远震数据进行成像,不需要考虑射线在整个传播过程中的路径以及震源参数,只需要考虑射线在研究区域内的路径即可。因此还需要对走时残差做进一步的处理,求取相对走时残差 r_{ij} :

$$r_{ij} = t_{ij} - \bar{t}_j \tag{2}$$

其中:

$$t_{ij} = T_{ij}^{obs} - T_{ij}^{cal} \tag{3}$$

$$\bar{t}_j = \frac{1}{m_j} \sum_{i=1}^{m_j} t_{ij} \tag{4}$$

m_j 为第 j 个地震事件的可观测的到时数目。通过求取相对走时残差,不仅可以避免射线在下地幔底部受到的强烈横向不均匀性的影响,同时还可以消除震源位置、发震时刻以及研究区域以外的射线路径等因素引起的走时误差。

TOMOG3D 采用了 LSQR 进行反演 (Paige and Saunders, 1982a, 1982b), 该方法属于一种共轭梯度法, 通过多次迭代而求得最佳的结果: 在建立初始模型并得到参数扰动值后, 利用该扰动值对初始模型进行修改, 并进行下一次计算。通过不断地迭代, 解也不断收敛, 当解的收敛已经变得非常缓慢时, 迭代结束, 最后一次迭代得到的解也就是最终的反演结果。

本研究所用到的远震波形数据全部来自中国地震局地球物理研究所国家测震台网数据备份中心(国家测震台网数据备份中心, 2007; 郑秀芬等, 2010), 数据的记录时间为 2015.01—2015.06。为了得到高质量的数据进行反演, 本研究采用以下流程

进行数据处理:(1)挑选出震中距位于 $30^\circ \sim 90^\circ$ 、且震级不小于 5.5 级的远震事件;(2)结合台站位置, 利用 IASP91 速度模型 (Kennett and Engdahl, 1991) 计算理论走时, 并以到时为参考时刻将波形截取出来, 截取范围为到前 200 s 至到后 800 s;(3)对所有波形数据进行去均值、去趋势以及带通滤波, 其中滤波的截止频率大部分选择 0.05~1 Hz, 小部分选择 0.02~0.5 Hz, 然后拾取实际到时, 在这一步中, 剔除信噪比较差的波形数据;(4)求取相对走时残差, 并将相对走时残差的绝对值控制在 2.0 s 以内, 剔除绝对值大于 2.0 s 的数据。在数据处理过程中, 本研究还遵循一个原则, 即确保每个台站至少记录到不少于 10 个远震事件, 同时每个远震事件至少被 10 个台站记录到。如果有台站或远震事件不满足这一原则, 则将该台站或远震事件删去。最终, 本研究共保留了 114 个有效台站以及 121 个有效远震事件(图 1, 图 2), 并从中挑选出 8385 条高质量的远震 P 波波形数据, 其中大部分相对走时残差的绝对值都在 1.5 s 以内(图 3)。由图 2 中还可以看出, 位于研究区域南面的远震事件相对较多, 且大部分远震事件的震源深度都在 100 km 以内。

3 检测板测试

模型的剖分是进行层析成像的关键, 并对最终的成像结果有着较大的影响。模型的剖分主要是

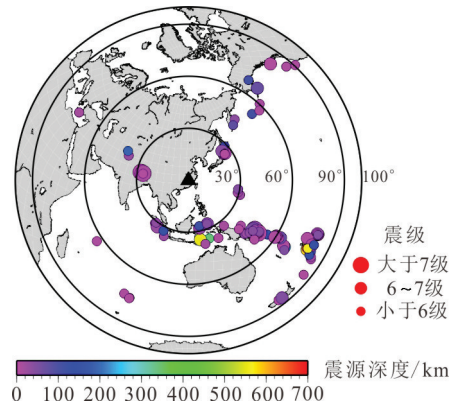


图2 远震事件分布图
 黑色三角形代表研究区域, 圆圈代表远震事件震中, 不同颜色表示震源深度不同
 Fig. 2 Distribution of the teleseismic events
 The black triangle represents the study area, the circles represent the epicenters of teleseismic events, different colors indicate different focal depths

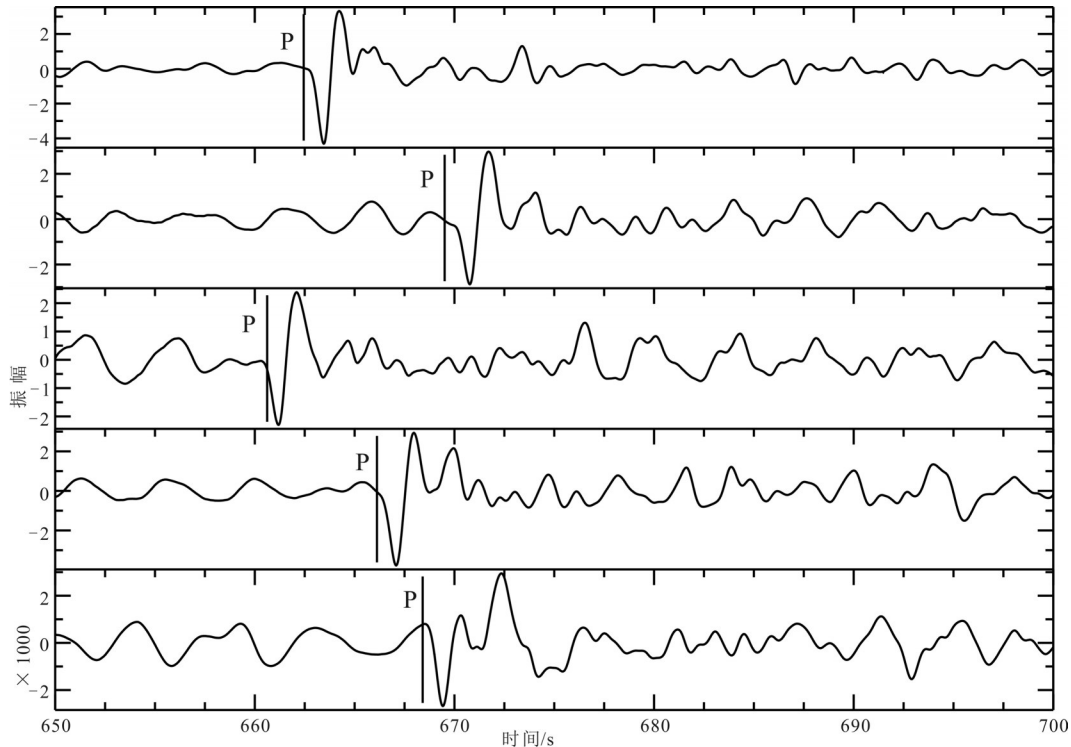


图3 地震波形示例

图中P为用IASP91模型计算的理论到时,远震事件发生时间为2007-01-28T02:43:19.60,震中位于-21.0°N、178.36°E,震源深度485.0 km,震级6.2级

Fig. 3 Sample waveforms

P is the theoretical arrival time calculated by IASP91 model, the origin time of the event is 2007-01-28T02:43:19.60, located in -21°N, 178.36°E, the focal depth is 485.0 km and the magnitude is 6.2

根据地震射线的分布情况而定:若地震射线分布比较均匀且交叉程度较好,则可以将模型剖分得较为精细,反之,则应该适当减少剖分的精度。目前大部分的体波走时层析成像方法都是将模型沿着经、纬度以及深度剖分为网格。与一些层析成像方法不同,TOMOG3D将初始的速度值赋予网格的节点而非其本身,这样空间中任意一点的速度均可以通过周围8个节点的速度线性插值得出,保证了速度在模型中的连续性,减少了人为因素的影响。

检测板测试是进行模型剖分和判断最终层析成像结果是否可靠的一种有效方法,其大致步骤为:(1)在网格模型中,利用地震事件和台站的实际位置计算“理论走时”;(2)对相邻的网格节点赋予正负相间的速度扰动,再在该速度扰动模型中进行正演,并加入随机误差模拟噪音,计算“实际走时”;(3)利用“实际走时”和“理论走时”的残差进行反演,并将反演结果与第(2)步建立的扰动模型进行对比。如果射线在研究区域的下方形成了很好的

覆盖,并且模型剖分的比较合理,则设置的正负相间的速度扰动模型就能够被很好的还原出来,进而也就兼顾了最终层析成像结果的可信度和分辨率。图4为本研究选取的网格剖分模型的检测板测试结果,其中经纬度方向的网格间距为1°,速度扰动为 $\pm 3\%$,随机误差的标准差为0.1 s。由图4可以看出,10 km水平切片的检测板的效果相对其他水平切片较差,主要是因为远震射线在浅部已经呈近似垂直传播,交叉程度较差,因此不能很好地分辨速度结构。但是随着深度的加深,检测板结果逐渐得到改善,从50 km水平切片开始,除了一些边缘地带,设置的速度扰动基本可以被较好的还原出来,保证了最终层析成像结果的可靠性。

4 结果和讨论

在反演过程中,为了平衡走时残差均方根和模型方差之间的关系,需要选取合适的阻尼因子。经过反复测试,选取15.0作为阻尼因子参与反演(图

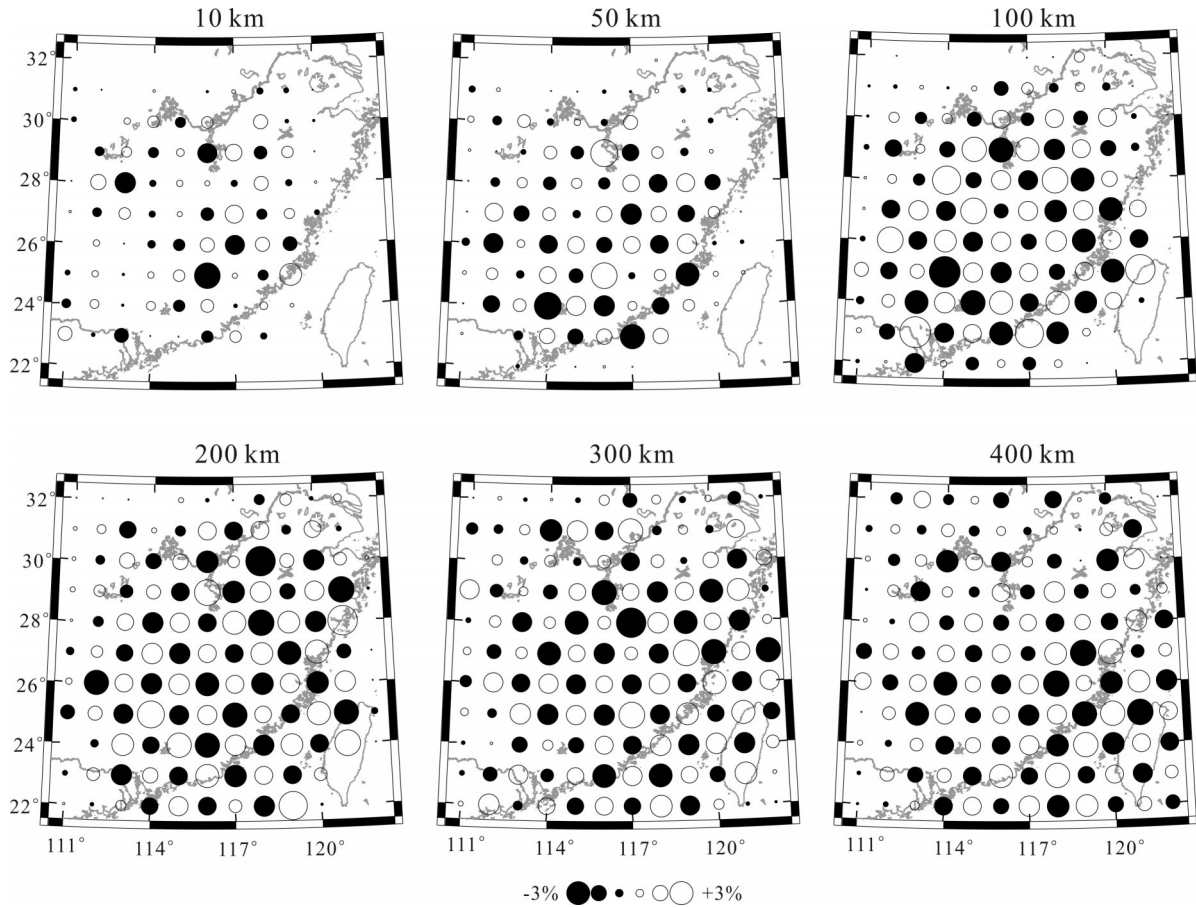


图4 检测板测试结果
Fig. 4 Result of checkerboard test

5)。图6为6个水平切片的层析成像结果,不难发现,华南东南部上地幔的速度结构在不同的深度都具有强烈的横向差异。

10~100 km 水平切片的速度结构特征比较类似。10 km 水平切片的检测板效果虽然相对较差,但是还是能够发现一些比较明显的速度异常,部分速度异常与地表的一些构造单元存在着较好的对应关系:江汉盆地表现为明显的低速异常,反映出该盆地较厚的沉积层覆盖或者张性特征(黄荣, 2014);武夷成矿带表现为高速异常,反映出成矿带大范围的隆起特征或者无沉积层覆盖(刘建华等, 1995),这些特征也在前人的结果中有着较好的体现(Huang et al., 2010; Zheng et al., 2013; 黄荣, 2014)。一个与地表的构造单元对应不一致的地方是南岭成矿带,该成矿带位于大范围的隆起区,但是却表现为大面积的低速异常而不是高速异常。随着深度的加深,南岭成矿带的低速异常更加明

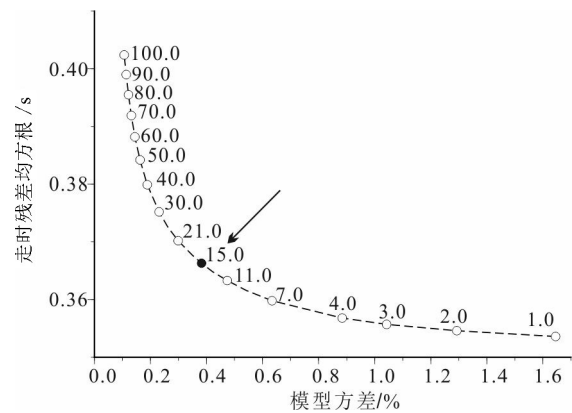


图5 走时残差均方根与模型方差折衷图
Fig. 5 Trade-off curve between travel-time residuals and velocity model lengths

显;大别造山带也逐渐表现为明显的高速异常;位于郯庐断裂和江绍断裂中间的扬子板块在整体上以高速异常为主;武夷成矿带的高速异常在50 km

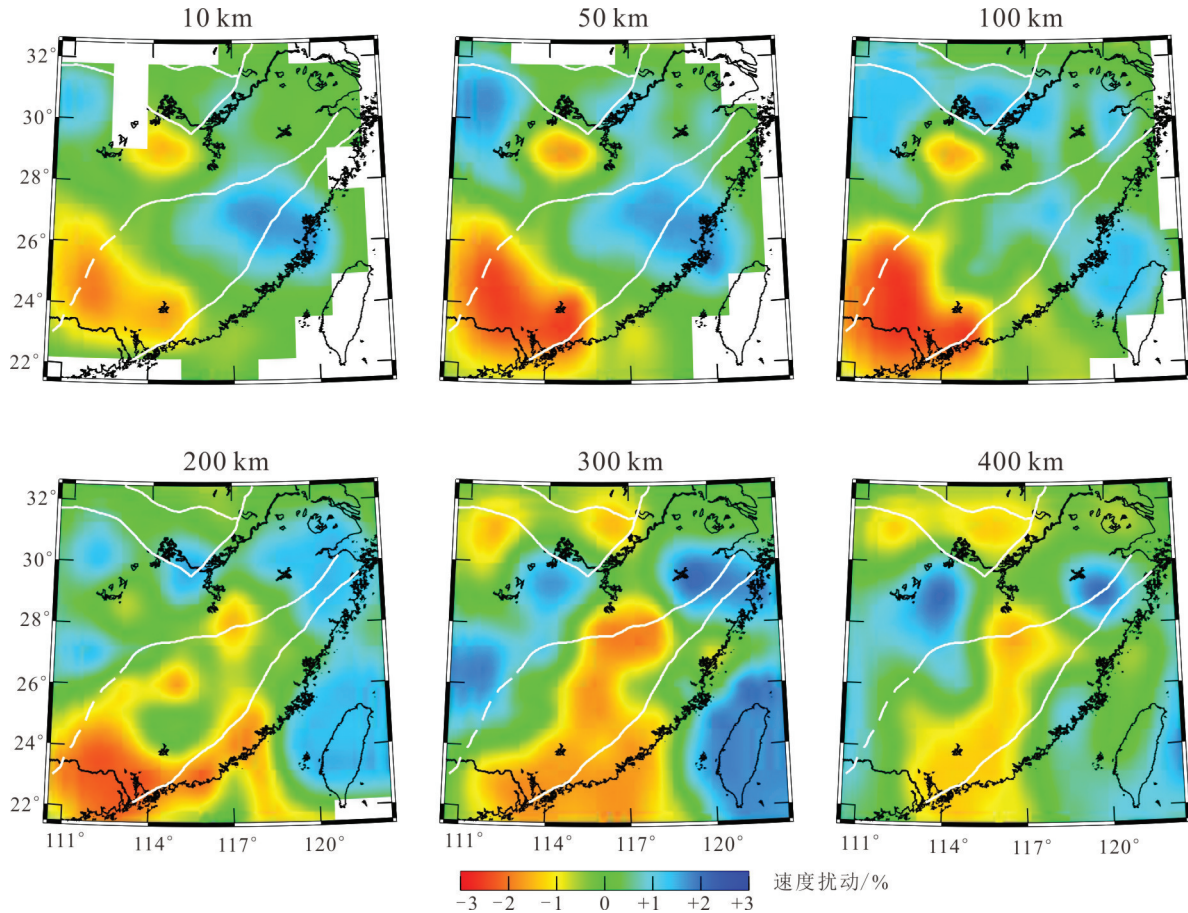


图6 层析成像水平切片结果

Fig.6 Results of the tomographic inversion at different depths

比较明显,但在100 km仅存在微弱的残余,高速异常更加向沿海集中。200~400 km水平切片的速度结构特征则比较类似,其中300 km水平切片的速度结构最为清晰。在这一深度范围,扬子板块和华夏板块表现为明显不同的速度结构特征,虽然南昌盆地下方地幔300 km深度表现为低速异常,但扬子板块在整体上仍以高速异常为主;而华夏板块除了在东北缘表现为高速异常,在整体上以低速异常为主,该低速异常从南岭成矿带一直延伸到南昌盆地,表现为NNE走向。

纵观6个水平切片的层析成像结果,南岭成矿带自浅到深均表现为大范围的低速异常,钦杭结合带和武夷成矿带大致表现为100 km以浅以高速异常为主,200 km以深以低速异常为主的特征(图6)。为了更好地显示华南东南部的深部结构特征,我们从层析成像结果中截取了1条垂直剖面AB,剖面位置如图1所示。该剖面为NW走向,主体位于

华夏板块,从下扬子地区出发,横跨了钦杭结合带和武夷成矿带,截止于东南沿海。

图7为沿剖面AB的层析成像结果。由图中可看出,大致以江绍断裂为界,剖面两侧的深部速度结构存在着明显的差异:西北侧(下)扬子板块的高速异常位于上地幔底部,该高速异常主体位于300~400 km的深度,并覆盖了钦杭结合带部分地区,虽然该异常位于层析成像相对较差的区域,但结合Jiang et al. (2015) CC'剖面的结果和张昌榕等(2018)BB'剖面的结果,该高速异常应该是可信的;东南侧的华夏板块的高速异常则位于地壳和上地幔顶部,该高速异常厚度约100 km,从沿海一直向内陆延伸,覆盖了武夷成矿带。除了这两个高速异常,剖面下方还存在着一个比较明显的低速异常,该低速异常位于江绍断裂下方200~400 km的深度,两侧分别为钦杭结合带和武夷成矿带。

结合平面和剖面的结果不难看出(图6,图7),

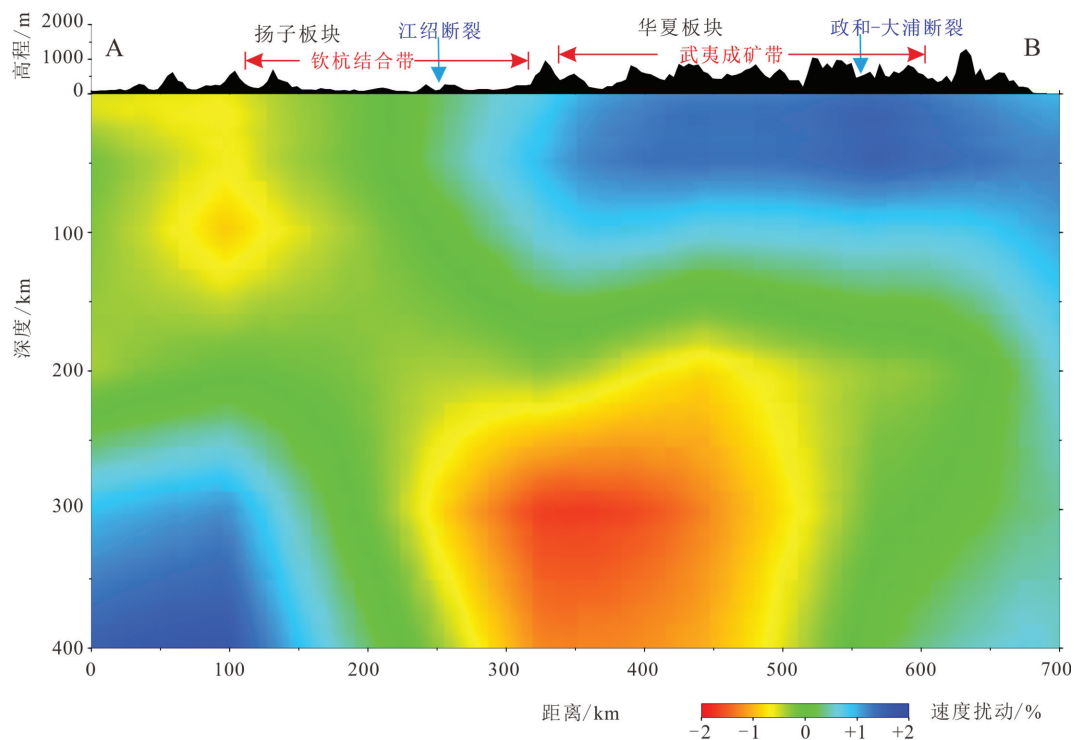


图7 剖面AB层析成像结果

Fig.7 Inversion result along the profile AB

钦杭结合带、武夷成矿带和南岭成矿带的深部速度结构具有明显的差异,说明这3个成矿带在历史上经历的深部构造演化过程也不同。虽然3个成矿带自燕山期以来,受太平洋、古亚洲洋以及特提斯洋构造域的共同作用,但仍有其各自的特点。以南岭成矿带为例,该成矿带自浅到深均表现为低速异常,说明成矿带下方存在着一个(或几个)大尺度的低速体,该低速体对南岭成矿带深部结构的影响甚至导致浅部的速度结构与地表的构造单元并不对应。这一深部结构与钦杭结合带和武夷成矿带并不相同,说明南岭成矿带经历了与钦杭结合带和武夷成矿带不同深部过程,从而导致了该低速体的形成。从成矿带的位置讨论,钦杭结合带位于扬子板块与华夏板块碰撞结合的部位,因此相比之下,其构造演化过程更容易受扬子板块、华夏板块以及华北板块相互作用以及太平洋板块俯冲的影响;武夷成矿带主体位于华夏板块东南端,因此其构造演化过程可能受太平洋板块和菲律宾板块的影响更多一些,特别是40 Ma以来菲律宾板块的持续扩张,势必会对武夷成矿带的演化过程产生越来越大的影响。

在剖面的层析成像结果中,江绍断裂下方存在

着一个十分明显的低速异常(图7)。前人在研究长江中下游成矿带的深部结构时,在上地幔中同样发现了一个沿着成矿带走向且从南(西)到北(东)逐渐变浅的低速异常(Ouyang et al., 2014; Jiang et al., 2015),并将该低速异常解释为中生代时期上涌的热物质。热物质的上涌可能与岩石圈的拆沉或者古太平洋的俯冲和部分熔融有关,并直接导致长江中下游成矿带爆发了大规模的岩浆活动和成矿作用。与长江中下游成矿带类似,钦杭结合带和武夷成矿带在中生代期间也爆发了大规模的岩浆活动和成矿作用。岩石学和同位素定年的研究也表明,钦杭结合带和武夷成矿带地表出露大量中生代花岗岩,且幔源物质和能量通过不同方式参与了这些花岗岩的形成(阳杰华等, 2017),说明地幔热物质曾沿着断裂等通道上升到地表并成岩成矿。虽然受限于模型深度,本研究无法对图7中的低速异常向下进行追溯,但是结合Huang et al. (2010)和Zheng et al. (2013)的研究结果,该低速异常可能源自地幔过渡带甚至下地幔,因此本研究将该低速异常解释为从地幔过渡带或者下地幔上涌的热物质,且热物质的上涌同样对钦杭结合带和武夷成矿带

的成矿作用产生了重要的影响。关于热物质的来源和上涌的机制仍需要深入研究,部分学者认为可能与板块的深俯冲有关(Huang et al., 2010)。

目前,学者们的研究表明包括下扬子地区在内的中国东部地区岩石圈在中生代时期发生过大规模减薄(邓晋福等,1994;徐义刚,1999;周新华,2006;张旗等,2009;薛怀民等,2009,2010),而关于岩石圈减薄的深部机制,学者们之间的认识还不统一:一些学者认为岩石圈的减薄机制属于一种“突发式”的拆沉减薄(薛怀民等,2009,2010),还有一些学者认为岩石圈的减薄机制属于一种“渐进式”的热侵蚀减薄(徐义刚,1999;周新华,2006)。在本研究的层析成像结果中,下扬子地区的上地幔底部存在着一个显著的高速异常(图7),结合岩石圈减薄这一背景,该高速异常可能为拆沉并下沉到此处的岩石圈,说明下扬子地区岩石圈的减薄机制可能为“突发式”的拆沉减薄,这一认识与前人的一些研究结果也比较吻合(Huang et al., 2010; Jiang et al., 2013, 2015; 张昌榕等, 2018)。例如, Jiang et al. (2015)的层析成像结果在同样的位置发现了一个高速体H4,并将其解释为下扬子地区拆沉并下沉至此的岩石圈。

除了下扬子上地幔底部的高速异常,华夏板块的地壳和上地幔顶部也存在着一个高速异常(图7)。该高速异常在前人的一些结果中也有体现(Huang et al., 2010; Zheng et al., 2013),但相比之下,本研究得到的高速异常向内陆延伸的更多。该高速异常的上地壳部分如前所述,反映的是武夷成矿带大范围的隆起特征或者无沉积层覆盖。而对于下地

壳,特别是上地幔顶部的高速异常,结合华南中生代花岗岩分布简图(阳杰华等,2017),该高速异常所对应的地表大规模出露侏罗纪和白垩纪花岗岩,且这些花岗岩的形成与幔源物质有关, Huang et al. (2010)推测上地幔顶部的高速异常为中生代时期的火成岩冷却形成。还有一种可能的解释是该高速异常为现存的岩石圈。接收函数的研究结果表明(于大勇等,2016;张耀阳等,2018),华南地区岩石圈存在着自西北向东南逐渐减薄的特征,虽然在图7中没有看到这种逐渐变薄的趋势,但是由于本研究构建的模型的分辨率,特别是浅部的分辨率仍较低,还无法对该高速异常的结构进行精细刻画,因此并不能否认这种解释。综上,本研究认为该高速异常可能反映了冷却后的火成岩,或者可能直接反映了该地区现存的岩石圈,建议在该地区布设一定数量的流动台站,对该高速异常结构进行深入研究。

基于以上讨论和分析,结合前人的结果,本研究认为,受板块的俯冲或其他因素的影响,地幔过渡带甚至下地幔的热物质发生上涌,一直上涌到华南东南部的上地幔,并对钦杭结合带和武夷成矿带的成矿作用产生了重要的影响;同时,受热物质上涌和板块运动等因素的影响,下扬子地区岩石圈发生了拆沉。此外,本研究在华夏板块的上地幔顶部发现了一个显著的高速异常,但关于该高速异常还有待于进一步的研究(图8)。

5 结论

本研究利用固定台站的数据,以钦杭结合带为

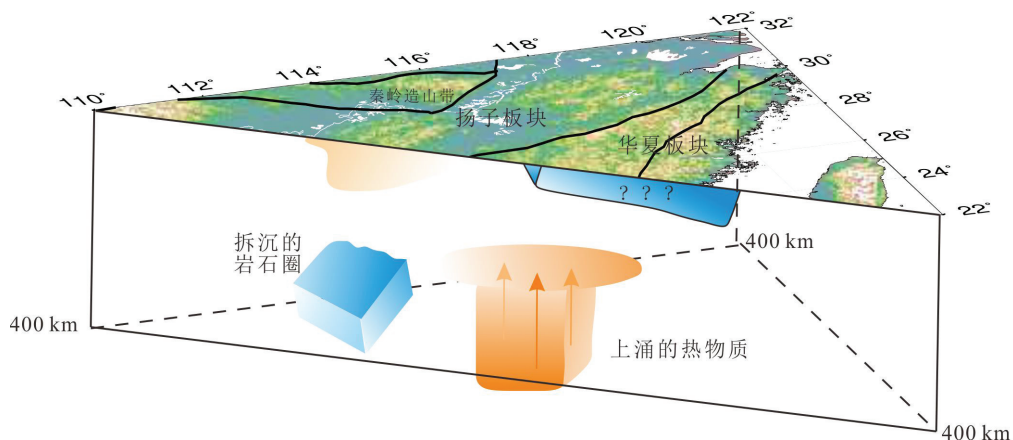


图8 深部模式示意图

Fig.8 Schematic model of deep structure

中心,构建了华南东南部上地幔P波速度结构模型,取得了以下发现和认识。

(1) 钦杭结合带、武夷成矿带以及南岭成矿带的深部结构存在着明显的差异,说明3个成矿带经历了不同的深部过程。

(2) 江绍断裂的上地幔中存在着一个比较明显的低速异常,该低速异常可能为从地幔过渡带或者下地幔上涌的热物质,且对钦杭结合带和武夷成矿带的成矿作用产生了重要的影响。

(3) 下扬子地区的地幔底部存在着一个明显的高速异常,为拆沉后下沉到该深度的岩石圈,本研究的结果支持了下扬子地区岩石圈的减薄机制为一种“突发式”的拆沉减薄。

(4) 华夏板块的上地幔顶部同样存在着一个高速异常,与前人的结果也比较一致。但关于该高速异常还有待于进一步研究,可能为冷却的火成岩,也有可能为现存的岩石圈。

由于数据的限制,本研究构建的模型的横向分辨率并不是很高,浅部的结果也有待于进一步改善。在后期的研究中,需要收集更多的数据参与反演,并对造成华南东南部速度结构的深部动力学过程进行深入讨论。同时,本研究建议沿着剖面布设高密度流动台站,精细刻画剖面的速度结构特征,对上地幔顶部的高速异常进行更好的约束。

致谢:感谢中国地震局地球物理研究所国家测震台网数据备份中心 (doi:10.11998/SeisDmc/SN, <http://www.seisdmc.ac.cn/>) 为本研究提供地震波形数据;感谢日本东北大学赵大鹏教授提供的层析成像程序;感谢 Wessel 和 Smith 提供的 GMT 绘图软件 (Wessel and Smith, 1998)。

参考文献

Data Management Centre of China National Seismic Network. 2007. Waveform data of China National Seismic Network[bd/OL]. doi: 10.11998/SeisDmc/SN, <http://www.seisdmc.ac.cn/>(in Chinese).

Deng Jinfu, Mo Xuanxue, Zhao Hailing, Luo Zhaohua, Du Yangsong. 1994. Lithosphere root/de-rooting and activation of the East China continent[J]. *Geoscience*, 8(3): 349–356(in Chinese with English abstract).

Deng Jinfu, Teng Jiwen, Peng Cong, Hong Dawei, Qiu Ruizhao. 2008. Characteristics of the Geophysical Fields, Deep Geology and Mineralizing Processes in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–221 (in Chinese).

Deng Yangfan, Li Shouguo, Fan Weiming, Liu Jia. 2011. Crustal structure beneath South China revealed by deep seismic soundings and its dynamics implications[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(10): 2560–2574 (in Chinese with English abstract).

Han Rubing, Li Qiusheng, Xu Yixian, Zhang Hongshuang, Chen Chen, Lang Chao, Wu Qingyu, Wang Xiaoran. 2019. Deep structure background and Poisson's ratio beneath the intersection zone of Nanling and Wuyi [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 62(7): 2477–2489(in Chinese with English abstract).

He Chuansong, Dong Shuwen, Santosh M, Chen Xuanhua. 2013. Seismic Evidence for a Geosuture between the Yangtze and Cathaysia Blocks, South China[J]. *Scientific Reports*, 3(1).doi: 10.1038/srep02200.

Hou Zengqian, Pan Xiaofei, Yang Zhiming, Qu Xiaoming. 2007. Porphyry Cu–(Mo– Au) deposits no related to ocean– slab subduction: Examples from Chinese porphyry deposits in continental settings[J]. *Geosciences*, 21(2): 332– 351 (in Chinese with English abstract).

Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Su Wenchao, Peng Jiantang, Li Chaoyang. 2004. The relationship between uranium metallogensis and crustal extension during the Cretaceous–Tertiary in South China[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 153– 160 (in Chinese with English abstract).

Huang Hui, Mi Ning, Xu Mingjie, Wang Liangshu, Li Hua, Yu Dayong. 2010. S– wave velocity structures of the crust and uppermost mantle, and Poisson's ratios in Fujian Province[J]. *Geological Journal of China Universities*, 16(4): 465– 474 (in Chinese with English abstract).

Huang Hui. 2013. The Crustal and Upper Mantle Structure and Anisotropy beneath the Lower Yangtze Craton and its Adjacent Regions[D]. Nanjing: Nanjing University, 1–88(in Chinese).

Huang Hui, Huang Zhouchuan, Wang Pan, Mi Ning, Li Hua, Yu Dayong, Xu Mingjie, Wang Liangshu. 2013. Distinct lateral variations of upper mantle anisotropy beneath Eastern China revealed by shear– wave splitting[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14(6): 1842–1855.

Huang Jinli, Zhao Dapeng. 2006. High–resolution mantle tomography of China and surrounding regions[J]. *Journal of Geophysical Research–Solid Earth*, 111(B9).doi: 10.1029/2005JB004066.

Huang Rong. 2014. Seismic Study of Crust and Upper Mantle Structure and Tectonics in Middle–to–Lower Yangtze Craton and its Adjacent Regions[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 1–60 (in Chinese).

Huang Zhouchuan, Wang Liangshu, Zhao Dapeng, Xu Mingjie, Mi Ning, Yu Dayong, Li Hua, Li Cheng. 2010. Upper mantle structure and dynamics beneath Southeast China[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 182(3/4): 161–169.

Jiang Guoming, Zhao Dapeng, Zhang Guibin. 2009. Seismic tomography of the Pacific slab edge under Kamchatka[J].

- Tectonophysics, 465: 190–203.
- Jiang Guoming, Zhang Guibin, Lü Qingtian, Shi Danian, Xu Yao. 2013. 3-D velocity model beneath the Middle–Lower Yangtze River and its implication to the deep geodynamics[J]. Tectonophysics, 606: 36–47.
- Jiang Guoming, Zhang Guibin, Zhao Dapeng, Lü Qingtian, Li Hongyi, Li Xinfu. 2015. Mantle dynamics and Cretaceous magmatism in East–Central China: Insight from teleseismic tomograms[J]. Tectonophysics, 664: 256–268.
- Kennett B L N, Engdahl E R. 1991. Traveltimes for global earthquake location and phase identification[J]. Geophysical Journal International, 105(4): 429–465.
- Li Hongyi, Song Xiaodong, Lü Qingtian, Yang Xiaoyu, Deng Yangfan, Ouyang Longbin, Li Jiapeng, Li Xinfu, Jiang Guoming. 2018. Seismic imaging of lithosphere structure and upper mantle deformation beneath East–Central China and their tectonic implications[J]. Journal of Geophysical Research–Solid Earth, 123(4): 2856–2870.
- Li Chang, van der Hilst Robert D, Toksöz M Nafi. 2006. Constraining P–wave velocity variations in the upper mantle beneath Southeast Asia[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 154(2): 180–195.
- Liu Guoxing, Han Kai, Han Jiangtao. 2012. Lithosphere Electrical Structure in Southeast Coastal Region, South China[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 42(2): 536–644(in Chinese with English abstract).
- Liu Jianhua, Liu Futian, Sun Ruomei, Wu Hua, Wu Dan. 1995. Seismic tomography beneath the Qinling–Dabie orogenic belts and both the northern and southern fringes[J]. Chinese Journal of Geophysics, 38(1): 46–54(in Chinese with English abstract).
- Lü Jinsong, Zhang Xuehui, Sun Jiandong, Zhang Yong, Wu Bin, Luo Xuequan. 2017. Spatiotemporal evolution and metallogenic regularity of felsic rocks in the Yanshanian of the eastern segment Qinhang metallogenic belt, South China[J]. Acta Petrologica Sinica, 33(11): 3635–3658 (in Chinese with English abstract).
- Ni Pei, Wang Guoguang. 2017. Multiple episodes of Cu–Au mineralization in the northeastern section of the Qin–Hang metallogenic belt induced by reworking of continental crust[J]. Acta Petrologica Sinica, 33(11): 3373–3394 (in Chinese with English abstract).
- Ouyang Longbin, Li Hongyi, Lü Qintian, Yang Yingjie, Li Xinfu, Jiang Guoming, Zhang Guibin, Shi Danian, Zhen Dan, Sun Sanjian, Tan Jin, Zhou Ming. 2014. Crustal and uppermost mantle velocity structure and its relationship with the formation of ore districts in the Middle–Lower Yangtze River region[J]. Earth and Planetary Science Letters, 408: 378–389.
- Paige Christopher C, Saunders Michael A. 1982a. LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares[J]. ACM Transactions on Mathematical Software(TOMS), 8(1): 43–71.
- Paige Christopher C, Saunders Michael A. 1982b. Algorithm 583: LSQR: Sparse linear equations and least squares problems[J]. ACM Transactions on Mathematical Software(TOMS), 8(2): 195–209.
- Richards J P. 2003. Tectono–magmatic precursors for porphyry Cu–(Mo–Au) deposit formation[J]. Economic Geology, 98(8): 1515–1533.
- Shu Liangshu. 2012. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block[J]. Geological Bulletin of China, 31(7): 1035–1053(in Chinese with English abstract).
- Wang Jian, Xiao Zhuowei, Zhao Dapeng, Yao Zhenxing. 2018. Seismic velocity structure, V_p/V_s ratio and anisotropy beneath Northeast Japan: implications for water migration in subduction zones[J]. Chinese Journal of Geophysics, 61(3): 832–845(in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaoran, Li Qiusheng, Zhang Hongsuang, Kuoche Hao. 2018. Study of P–wave velocity structure in upper mantle in eastern South China[J]. Global Geology, 37(2): 620–626 (in Chinese with English abstract).
- Wessel Paul, Smith Walter H F. 1998. New, improved version of generic mapping tools released[J]. Eos, Transactions, American Geophysical Union, 79(47): 579–579.
- Xiong Xiaosong, Gao Rui, Li Qiusheng, Lu Zhanwu, Wang Haiyan, Li Wenhui, Guan Ye. 2009. The Moho depth of South China revealed by seismic probing[J]. Acta Geoscientica Sinica, 30(6): 774–786 (in Chinese with English abstract).
- Xu Lei, Li Sanzhong, Liu Xin, Suo Yanhui, Wu Qi, Wang Pengcheng. 2012. Tectonic settings and metallogenism of the eastern segment of the Qin–Hang belt, South China[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 32(5): 57–66(in Chinese with English abstract).
- Xu Yao, Zhang Guibin, Jiang Guoming, Suo Kui, Yao Yongbo. 2014. 3–D velocity structure and the deep mechanism of the origin of volcanoes in Northeast China[J]. Earth Science Frontiers, 21(4): 255–265(in Chinese with English abstract).
- Xu Yao, Lv Qingtian, Zhang Guibin, Jiang Guoming, Zhang Changrong, Wu Qiang. 2015. S–wave velocity structure beneath the Middle–Lower Yangtze River Metallogenic Belt and the constraints on the deep dynamic processes[J]. Chinese Journal of Geophysics, 58(12): 4373–4387 (in Chinese with English abstract).
- Xu Yigang. 1999. Roles of thermo–mechanic and chemical erosion in continental lithospheric thinning[J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 18(1): 1–5(in Chinese with English abstract).
- Xue Huaimin, Wang Yinggeng, Ma Fang, Wang Cheng, Wang Deen, Zuo Yanlong. 2009. The Huangshan A–type granites with tetrad REE: constraints on Mesozoic lithospheric thinning of the southeastern Yangtze craton?[J]. Acta Geologica Sinica, 83(2): 247–259(in Chinese with English abstract).
- Xue Huaimin, Dong Shuwen, Ma Fang. 2010. Geochemistry of

- shoshonitic volcanic rocks in the Luzong Basin, Anhui Province (Eastern China): Constraints on Cretaceous lithospheric thinning of the Lower Yangtze Region[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(5): 664–680(in Chinese with English abstract).
- Yang Jiehu, Liu Liang, Liu Jia. 2017. Current progresses and prospect for genesis of extensive Mesozoic granitoid and granitoid-related multi-metal mineralization in Southern China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 37(6): 791–800(in Chinese with English abstract).
- Yang Minggui, Mei Yongwen. 1997. Characteristics of geology and metallogenesis in the Qinzhou–Hangzhou paleoplate juncture[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 13(3): 52–59 (in Chinese with English abstract).
- Ye Zhuo, Li Qiusheng, Gao Rui, Guan Ye, He Rizheng, Wang Haiyan, Lu Zhanwu, Xiong Xiaosong, Li Wenhui. 2013. Seismic receiver functions revealing crust and upper mantle structure beneath the continental margin of southeastern China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(9): 2947–2958(in Chinese with English abstract).
- Yu Dayong, Mi Ning, Huang Hui, Huang Zhouchuan, Li Hua, Wang Liangshu, Xu Mingjie. 2016. Crust and upper mantle structure and geodynamics beneath Southeast China revealed by broadband seismic observation data[J]. *Chinese Journal of Geology*, 51(1): 99–115(in Chinese with English abstract).
- Zhang Changrong, Zhang Guibin, Jiang Guoming, Lv Qingtian, Xu Yao. 2018. Study on Poisson's ratio structure beneath the lower Yangtze block and its surrounding region and constraints on the deep dynamic process[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(11): 4418–4435 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Guo Anlin, Wang Yuejun, Li Sanzhong, Dong Yunpeng, Liu Shaofeng, He Dengfa, Cheng Shunyou, Lu Rukui, Yao Anping. 2013. Tectonics of South China continent and its implications[J]. *Science China: Earth Science*, 43(10): 1553–1582 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Jin Weijun, Li Chendong, Wang Yuanlong. 2009. Yanshanian large-scale magmatism and lithosphere thinning in Eastern China: Relation to large igneous province[J]. *Earth Science Frontiers*, 16(2): 21–51(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yaoyang, Chen Ling, Ai Yinshuang, Jiang Mingming, Xu Weiwei, Shen Zhongyin. 2018. Lithospheric structure of the South China Block from S– receiver function[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(1): 138–149 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Li Jianhua, Cui Jianjun, Shi Wei, Su Jinbao, Li Yong. 2012. The new progress in the study of Mesozoic tectonics of South China[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 33(3): 257–279(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhongjie, Badal José, Li Yingkang, Li Yingkang, Chen Yun, Yang Liqiang, Teng Jiwen. 2005. Crust– upper mantle seismic velocity structure across Southeastern China[J]. *Tectonophysics*, 395(1/2): 137–157.
- Zhao Dapeng, Hasegawa Akira, Horiuchi Shigeki. 1992. Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*(1978–2012), 97(B13): 19909–19928.
- Zhao Dapeng, Hasegawa Akira, Kanamori Hiroo. 1994. Deep structure of Japan subduction zone as derived from local, regional, and teleseismic events[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012), 99(B11): 22313–22329.
- Zhao Liang, Zheng Tianyu, Chen Ling, Tang Qunshu. 2007. Shear wave splitting in eastern and central China: Implications for upper mantle deformation beneath continental margin[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 162(1/2): 73–84.
- Zhao Liang, Allen Richard M, Zheng Tianyu, Zhu Rixiang. 2012. High-resolution body wave tomography models of the upper mantle beneath Eastern China and the adjacent areas[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(6): 1525–2027.
- Zhao Liang, Zheng Tianyu, Lu Gang. 2013. Distinct upper mantle deformation of cratons in response to subduction: Constraints from SKS wave splitting measurements in Eastern China[J]. *Gondwana Research*, 23(1): 39–53.
- Zhao Yanna, Duan Yonghong, Weiyunhao, Zou Changqiao, Lin Jiyan, Qiu Yong. 2017. Crustal thickness and Poisson's ratio in Jiangxi and Fujian Province in eastern areas of South China[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 37(3):261–266(in Chinese with English abstract).
- Zheng Hongwei, Geng Shufang, Yang Gui, Liu Shucong. 2012. Deep structure beneath Eastern China from teleseismic P– wave tomography[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(7): 1069–1077(in Chinese with English abstract).
- Zheng Hongwei, Gao Rui, Li Tingdong, Li Qiusheng, He Rizheng. 2013. Collisional tectonics between the Eurasian and Philippine Sea plates from tomography evidences in Southeast China[J]. *Tectonophysics*, 606: 14–23.
- Zheng Xiufen, Ouyang Biao, Zhang Dongning, Yao Zhixiang, Liang Jianhong, Zheng Jie. 2009. Technical system construction of Data Backup Centre for China Seismograph Network and the data support to researches on the Wenchuan earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(5):1412–1417. doi:10.3969/j.issn.0001–5733.2009.05.031 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Taofa, Fan Yu, Yuan Feng. 2008. Advances on petrogenesis and metallogeny study of the mineralization belt of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(8):1665–1678(in Chinese with English abstract).
- Zhou Xinhua. 2006. Major transformation of subcontinental lithosphere beneath eastern China in the Cenozoic– Mesozoic: review and prospect[J]. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 50–64(in Chinese with English abstract).
- Zhou Yongzhang, Li Xingyuan, Zhen Yi, Shen Wenjie, He Junguo, Yu Pengpeng, Niu Jia, Zeng Changyu. 2017. Geological settings and metallogenesis of Qinzhou Bay–Hangzhou Bay orogenic juncture

belt, South China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(3): 667–681 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 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[J]. *现代地质*, 8(3): 349–356.
- 邓晋福, 滕吉文, 彭聪, 洪大卫, 邱瑞照. 2008. 中国地球物理场特征及深部地质与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1–221.
- 邓阳凡, 李守林, 范蔚若, 刘佳. 2011. 深地震测深揭示的华南地区地壳结构及其动力学意义[J]. *地球物理学报*, 54(10): 2560–2574.
- 国家测震台网数据备份中心. 2007. 国家测震台网地震波形数据[BD/OL]. doi:10.11998/SeisDmc/SN, http://www.seisdmc.ac.cn.
- 韩如冰, 李秋生, 徐义贤, 张洪双, 陈昊, 郎超, 吴庆宇, 王晓冉. 2019. 南岭—武夷交汇区的深部背景及地壳泊松比[J]. *地球物理学报*, 62(7): 2477–2489.
- 侯增谦, 潘小菲, 杨志明, 曲晓明. 2007. 初论大陆环境斑岩铜矿成因[J]. *现代地质*, 21(2): 332–351.
- 胡瑞忠, 毕献武, 苏文超, 彭建堂, 李朝阳. 2004. 华南白垩—第三纪地壳拉张与钨成矿的关系[J]. *地学前缘*, 11(1): 153–160.
- 黄晖, 米宁, 徐鸣洁, 王良书, 李华, 于大勇. 2010. 福建地区地壳上地幔S波速度结构与泊松比[J]. *高校地质学报*, 16(4): 465–474.
- 黄晖. 2013. 下扬子及邻区的地壳上地幔结构与各向异性[D]. 南京: 南京大学, 1–88.
- 黄荣. 2014. 中下扬子板块及周边地区地壳上地幔结构和构造的地质学研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 1–60.
- 刘国兴, 韩凯, 韩江涛. 2012. 华南东南沿海地区岩石圈电性结构[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 42(2): 536–644.
- 刘建华, 刘福田, 孙若味, 吴华, 吴丹. 1995. 秦岭—大别造山带及其南北缘地震层析成像[J]. *地球物理学报*, 38(1): 46–54.
- 吕劲松, 张雪辉, 孙建东, 张勇, 武彬, 骆雪全. 2017. 钦杭成矿带东段燕山期中酸性岩浆活动时空演化与成矿规律[J]. *岩石学报*, 33(11): 3635–3658.
- 倪培, 王国光. 2017. 大陆再造与钦杭带北东段多期铜金成矿作用[J]. *岩石学报*, 33(11): 3373–3394.
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征[J]. *地质通报*, 31(7): 1035–1053.
- 王建, 肖卓伟, 赵大鹏, 姚振兴. 2018. 东北日本地震波速度、 V_p/V_s 和各向异性结构: 对俯冲带水迁移过程的探讨[J]. *地球物理学报*, 61(3): 832–845.
- 王晓冉, 李秋生, 张洪双, 郭陈灏. 2018. 华南东部地区上地幔P波速度结构研究[J]. *世界地质*, 37(2): 620–626.
- 熊小松, 高锐, 李秋生, 卢占武, 王海燕, 李文辉, 管焯. 2009. 深地震探测揭示的华南地区莫霍面深度[J]. *地球学报*, 30(6): 774–786.
- 徐磊, 李三忠, 刘鑫, 索艳慧, 吴奇, 王鹏程. 2012. 华南钦杭结合带东段成矿特征与构造背景[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 32(5): 57–66.
- 徐晓, 张贵宾, 江国明, 索奎, 姚永波. 2014. 中国东北地区三维速度结构与火山起源的深部机制[J]. *地学前缘*, 21(4): 255–265.
- 徐晓, 吕庆田, 张贵宾, 江国明, 张昌榕, 单希鹏, 吴强. 2015. 长江中下游成矿带三维S波速度结构及对深部过程的约束[J]. *地球物理学报*, 58(12): 4373–4387.
- 徐义刚. 1999. 岩石圈的热—机械侵蚀和化学侵蚀与岩石圈减薄[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 18(1): 1–5.
- 薛怀民, 汪应庚, 马芳, 汪诚, 王德恩, 左延龙. 2009. 高度演化的黄山A型花岗岩: 对扬子克拉通东南部中生代岩石圈减薄的约束[J]. *地质学报*, 83(2): 247–259.
- 薛怀民, 董树文, 马芳. 2010. 安徽庐枞火山岩盆地橄辉玄武岩系的地球化学特征及其对下扬子地区晚中生代岩石圈减薄机制的约束[J]. *地质学报*, 84(5): 664–680.
- 杨明桂, 梅勇文. 1997. 钦—杭古板块结合带与成矿带的主要特征[J]. *华南地质与矿产*, 13(3): 52–59.
- 阳杰华, 刘亮, 刘佳. 2017. 华南中生代大花岗岩省成岩成矿作用研究进展与展望[J]. *矿物学报*, 37(6): 791–800.
- 叶卓, 李秋生, 高锐, 管焯, 贺日政, 王海燕, 卢占武, 熊小松, 李文辉. 2013. 中国大陆东南缘地震接收函数与地壳和上地幔结构[J]. *地球物理学报*, 56(9): 2947–2958.
- 于大勇, 米宁, 黄晖, 黄周传, 李华, 王良书, 徐鸣洁. 2016. 华南壳幔结构与动力学的宽频地震观测研究[J]. *地质科学*, 51(1): 99–115.
- 张昌榕, 张贵宾, 江国明, 吕庆田, 徐晓. 2018. 下扬子及周边地区深部泊松比结构及深部动力过程约束研究[J]. *地球物理学报*, 61(11): 4418–4435.
- 张国伟, 郭安林, 王岳军, 李三忠, 董云鹏, 刘少峰, 何登发, 程顺有, 鲁如魁, 姚安平. 2013. 中国华南大陆构造与问题[J]. *中国科学: 地球科学*, 43(10): 1553–1582.
- 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[J]. *地学前缘*, 16(2): 21–51.
- 张耀阳, 陈凌, 艾印双, 姜明明, 许卫卫, 申中寅. 2018. 利用S波接收函数研究华南块体的岩石圈结构[J]. *地球物理学报*, 61(1): 138–149.
- 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[J]. *地球学报*, 33(3): 257–279.
- 赵延娜, 段永红, 魏云浩, 邹长桥, 林吉焱, 邱勇. 2017. 华南大陆东部赣闽地区地壳厚度与泊松比研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 37(3): 261–266.
- 郑洪伟, 耿树方, 杨贵, 刘淑聪. 2012. 中国东部地区深部结构的层析成像[J]. *地质通报*, 31(7): 1069–1077.
- 郑秀芬, 欧阳飏, 张东宁, 姚志祥, 梁建宏, 郑洁. 2009. “国家测震台网数据备份中心”技术系统建设及其对汶川大地震研究的数据支撑[J]. *地球物理学报*, 52(5): 1412–1417. doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.031.
- 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): 1665–1678.
- 周新华. 2006. 中国东部中、新生代岩石圈转型与减薄研究若干问题[J]. *地学前缘*, 13(2): 50–64.
- 周永章, 李兴远, 郑义, 沈文杰, 何俊国, 虞鹏鹏, 牛佳, 曾长育. 2017. 钦杭结合带成矿地质背景及成矿规律[J]. *岩石学报*, 33(3): 667–681.