

doi: 10.12029/gc20190404

张永谦,徐晓,严加永,徐志伍,赵金花. 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.

Zhang Yongqian, Xu Yao, Yan Jiayong, Xu Zhiwu, Zhao Jinhua. 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).

## 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

张永谦<sup>1,2,3</sup>, 徐晓<sup>1,2</sup>, 严加永<sup>1,2,3</sup>, 徐志伍<sup>1,2</sup>, 赵金花<sup>1,2,3</sup>

(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, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037)

**摘要:**华南大陆主要由扬子与华夏两大古陆块拼合而成,复杂的构造演化过程使得该区不仅具有多样的几何结构与变形特征,也发育成为中国南部重要的多金属成矿区域,其中包括长江中下游、钦州—杭州、武夷山、南岭、等多个重要成矿带。针对华南东南部及位于该区内的长江中下游、武夷山和南岭成矿带的深部结构与成矿背景,本文利用国家地震台网在该区固定地震台站的远震事件记录信息,通过对各个台站的远震接收函数开展  $H-\kappa$  扫描研究,获得了各台站下方的地壳厚度和波速比。对地壳厚度和波速比的相关性与地壳流变学构造模式进行了对比分析,研究结果显示,华南东南部的 Moho 面起伏整体较为平缓,自东向西逐渐增厚,波速比分布与成矿带和构造格局有明显相关性,在扬子与华夏块体之间的华南陆内复合造山区呈现明显的低波速比特征;结合该区已有的地质构造等研究分析,认为华南地区地壳减薄与燕山期的强烈岩浆活动和成矿过程密切相关,太平洋板块俯冲以及岩石圈和地下壳拆沉所造成的上地幔热物质扰动上涌或是该区矿产资源集中爆发的驱动力源;本研究所得地壳厚度与波速比分布特征与重力学多尺度边缘检测所刻画的构造界限一致性较好,支持其对扬子与华夏块体南界的划分方案。

**关键词:**华南;钦杭结合带;接收函数;地壳厚度;成矿作用;深地资源工程

中图分类号:P631.4 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2019)04-0723-14

### Crustal thickness, properties and its relations to mineralization in the southeastern part of South China: Constraint from the teleseismic receiver functions

ZHANG Yongqian<sup>1,2,3</sup>, XU Yao<sup>1,2</sup>, YAN Jiayong<sup>1,2,3</sup>, XU Zhiwu<sup>1,2</sup>, ZHAO Jinhua<sup>1,2,3</sup>

(1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037, China; 2. China Deep Exploration Center–SinoProbe Center, China Geological Survey & Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037, China; 3. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing, 100037, China)

收稿日期:2019-03-15; 改回日期:2019-07-13

基金项目:中国地质调查局项目“钦杭结合带及邻区深部地质调查”(DD20160082)和“武陵山—江南造山带中段深部地质调查”(DD20190012)、中国地质科学院基本业务费项目“基于宽频地震数据的钦杭—武夷山成矿带 2D 壳幔结构研究”(K1609)、国家自然科学基金项目“宁芜火山岩快速喷发轨迹的地球物理示踪与成矿启示”(41574082)联合资助。

作者简介:张永谦,男,1983年生,副研究员,主要从事深部地球物理探测研究;E-mail: zyq\_imr@163.com。

**Abstract:** South China is tectonically composed of the Yangtze block and Cathysian block, with very complicated architecture and deformation characteristics as well as various mineral deposits. In the past years, various geoscience studies focused on the metallogenic process and geodynamics has been conducted in the fields of petrology, chronology, mineral deposits, geochemistry and geophysics in this area. As the architecture and properties of the deep crust resulted from the tectonic evolution process and geodynamics, they would contain key information for understanding the formation of large metallogenic belt and ore concentration area. With the aim of studying the deep crustal structure and metallogenic background, the authors calculated the crustal thickness and  $V_p/V_s$  ratio with the method of  $H-\kappa$  scanning of P-wave teleseismic receiver functions using the seismic data provided by China Earthquake Network Center. The results reveal that the crustal thickness in the study region varies slightly and gets deeper from east to west, and the distribution of  $V_p/V_s$  ratio is correlated well with the tectonics and metallogenic belts. Combined with the existent geological studies, the authors hold that the crustal thinning in this region was related to the strong magmatism and metallogenic process in the Yanshanian period, and the upwelling of hot materials from the upper mantle was probably the driving force for the eruption of mineral resources in this region. On the other hand, the distribution of crustal thickness and  $V_p/V_s$  ratio is correlated well with the tectonic boundaries estimated from the edge detection of gravity data.

**Key words:** South China; Qinzhou–Hangzhou belt; receiver functions; crustal thickness; mineralization; deep resources engineering

**About the first author:** ZHANG Yongqian, male, born in 1983, associate professor, mainly engages in probing into the lithospheric structure using geophysical methods; E-mail: zyq\_imr@163.com.

**Fund support:** Supported by China Geological Survey Program (No. DD20160082, DD20190012), Chinese Academy of Geological Sciences (No. K1609) and NSFC (No. 41574082).

## 1 引 言

华南大陆主要由扬子—华夏两块体拼合而成,其结合带大致西南起自钦州湾,向东北经过湘中、赣中至杭州湾,总体呈北东向反S状弧形展布,长约2000 km,宽70~130 km。扬子—华夏的交界部位又称钦杭结合带或钦杭成矿带。就整体构造特征与演化历史而言,已有研究认为,钦杭结合带北段弋阳至绍兴一线,两板块间的界线比较清楚,主要的拼合地质标志有蛇绿混杂岩、岛弧岩浆岩等,板块碰撞对接的高峰期发生在中新元古代时期(1000~900 Ma)(水涛,1987;杨明桂等,1997;潘桂堂等,2009;中国地质调查局,2010;舒良树,2012;周永章等,2015)。在新元古代早期(900~800 Ma),伴随着古华南海的闭合,华夏与扬子板块碰撞对接,成为Rodinia超大陆的一部分,但聚合不久,于晋宁运动时期(820 Ma左右),发生洋壳消减、弧陆碰撞所形成的结合带,受成冰纪Rodinia超大陆裂解事件的影响,钦杭结合带在此成为裂谷或海槽(舒良树,2012;周永章等,2015),扬子、华夏板块相互作用形成了具有北东向反S弧形为综合特征的华夏构造体系域。与北段相比,对南段的地质演化则存在较大的争论,包括南段是否存在真正的洋壳,与中、北段是否具有一致的演化历史等(水涛,1987;杨明桂

等,1997;肖庆辉等,2005;徐德明等,2012;周永章等,2015),这对整个结合带的范围、性质和演化,仍存在分歧,因而也影响到对钦杭成矿带形成的整体地质背景的认识。

从成矿的角度来看,钦杭结合带及其邻域是华南地区最为重要的Cu–Au–Pb–Zn–Ag多金属成矿带,分布着一大批特大型金铅锌钽铀矿床(杨明桂等,2009),也有大批钨锡多金属矿产,构成了世界上最大的钨锡成矿带(毛景文,2007)。钦杭成矿带的绝大多数矿床形成于燕山运动时期中晚侏罗世至白垩纪(杨明桂等,1997;徐磊等,2012;吕劲松等,2017)。毛景文(2011)将钦杭带及旁侧矿床归纳为两个主成矿系列,即新元古代海底喷流沉积型铜锌矿床成矿系列和燕山期与花岗岩有关的钨锡铜铅锌多金属成矿系列,而后者则可进一步分为3个亚系列。周永章等(2012,2015)根据对该区成矿规律与优势矿种的区域分布等特征的研究,将钦杭成矿带分为三段,即北段(南岭以北的绍兴—江山—萍乡一带)、中段(南岭带)和南段(南岭以南的云开—十万大山一带)。总体上,北段的优势矿种为铜、铁和贵金属,代表性矿床包括江西德兴铜矿、江西冷水坑斑岩型铅锌银矿、银山金铜铅锌矿、金山金矿等;中段南岭成矿带是世界著名的花岗岩省和重要的钨锡多金属矿原产地;南段的优势矿种则主

要包括金银及多金属等,主要的矿产分布在云开地区、大瑶山地区和十万大山地区,新近发现若干较为典型的斑岩型铜钼矿床等(周永章等,2012,2015)。

近几十年来,学者们在华南地区开展了大量的深部结构探测工作(Zhang et al., 2005; Huang and Zhao, 2006; Zhao et al., 2007,2013; 熊小松等,2009; 黄晖等,2010,2013; 邓阳凡等,2011; 刘国兴等,2012; He et al., 2013; Jiang et al., 2013; Lü et al., 2013, 2015; Shi et al., 2013; Song et al., 2017; 马学英,2017; 赵延娜等,2017; 宋鹏汉,2018; 韩如冰等,2019)。在

关键构造与成矿带地域获得了更多的深部结构与物性信息对理解华南地区的深部构造与动力学过程和成矿背景起到了积极的促进作用。自2016年以来,中国地质调查局地质调查项目新设“深部地质调查工程”中设置了“钦杭结合带及邻区深部地质调查”二级项目,并开展了一些针对性的地球物理探测研究工作。本文以钦杭成矿带及其邻域的长江中下游、武夷山、南岭成矿带为研究主体,针对其边界位置、地壳厚度、波速比特征等开展一些宽频带地震接收函数研究工作(图1),希望能对后续深入研究该区的深部结构与成矿过程提供一些深部要素的约束。

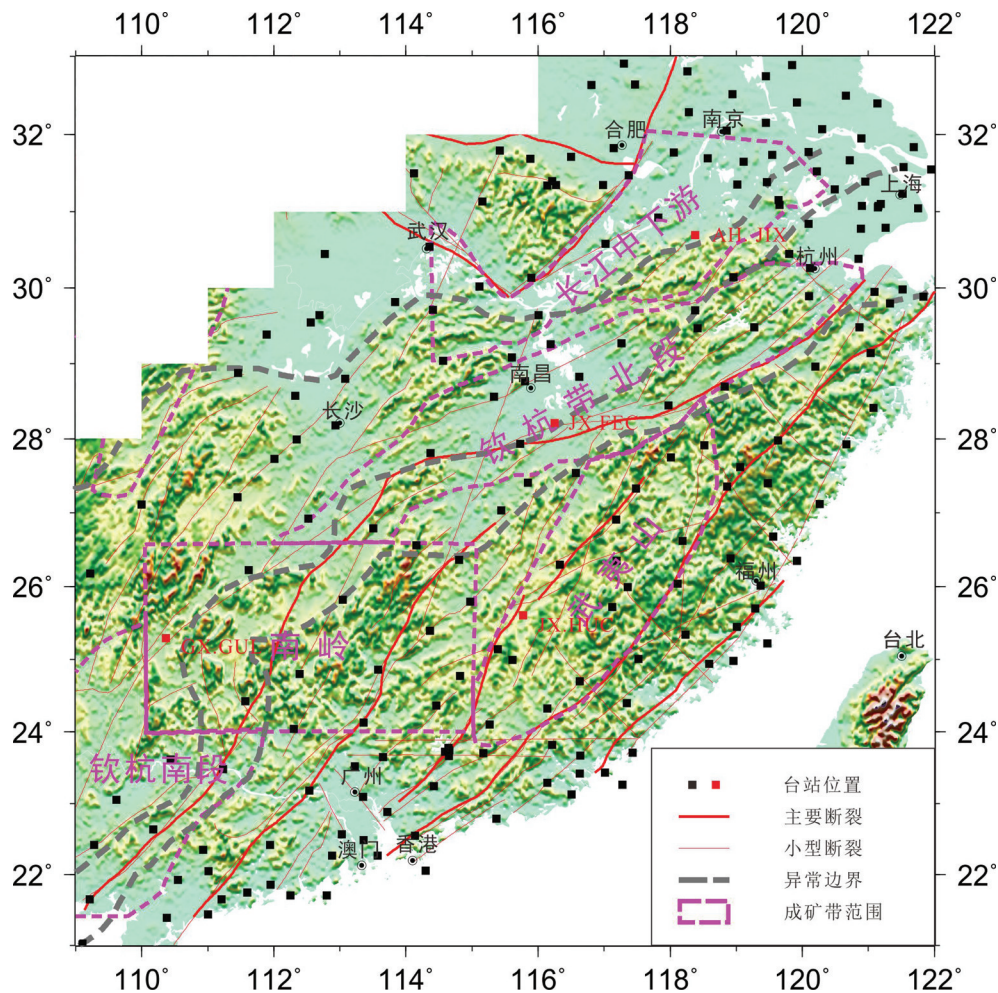


图1 研究区大地构造和成矿带分布与宽频地震台站位置图

黑色方块为本研究所用的固定地震台站位置,红色方块为本文中所举例的4个典型台站位置,灰色粗虚线为由重力边缘检测所获得的异常边界(严加永等,2019),黄色线条为研究区主要的断裂系,蓝色细线为研究区其他小型断裂(李春麟,私人通讯),紫色虚线框为研究区的主要成矿带位置边界示意图及名称

Fig.1 Tectonic units, main metallogenic belts and broadband seismic stations in the study region

In this figure, the black rectangles are the seismic stations, red rectangles are the 4 representative stations listed in Figs. 3 and 4, gray dotted thick lines are the boundaries depicted by gravity edge detection method (after Yan et al., 2019), yellow lines are the main faults and light blue thin lines (personally from Li Chunlin) are the small faults in this region, the dotted purple areas are the boundaries of the main metallogenic belts

## 2 数据与方法

### 2.1 接收函数提取

天然地震远震体波的波形数据中包含了关于震源时间函数、源区介质结构、上地幔传播路径以及接收区介质结构等丰富的信息。当远震体波入射到台站下方时,可将其近似视为为平面波入射,同时会在每个速度界面产生透射和强弱不等的转换波以及各个界面之间的多次反射震相。当震中距在 $30^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 的远震P波到达台站时,其突出的特点表现为水平相速度较大且基本保持不变,可近似为陡角度入射的平面波。当远震平面波在接收介质中传播时,会形成Pp透射波和Ps转换波,构成地表观测到的原生波和转换波,这两种震相又进一步在地表与速度界面之间产生PpPp、PpPs、PpSs、PsPs以及PsSs等震相,形成一组与速度界面直接相关的转换波及多次反射波序列。天然地震接收函数成像(Receiver Function Profiling, RF)就是利用天然地震信号穿过地下界面所产生的转换波来对地下介质结构进行成像的一种方法。该方法在“等效震源”假设的前提下(Langston, 1979)利用宽频带地震记录中的垂向分量来近似代替变化复杂的震源子波波形,通过与地震记录中的水平分量进行反褶积运算来消除震源影响,从远震三分量波形记录中分离出转换波信息,得到仅与台站下方介质结构有关时间序列,从而获得接收介质结构方面的信息(Langston, 1979)。自20世纪80年代以来,天然地震接收函数成像为利用远震体波波形数据研究地壳上地幔速度结构提供了一条行之有效的技术途径。天然地震接收函数方法在本研究中,我们采用了时间域反褶积方法(Ammon, 1991)来提取接收函数。在计算出各个台站所记录到的远震事件接收函数之后,将其与理论接收函数进行比对,删除质量较差的结果,并对保留较好的结果进行叠加以便进行后续分析。图2所示为本研究区3个典型台站的接收函数提取结果。

### 2.2 地壳厚度及泊松比估计的 $H-\kappa$ 扫描方法

作为强烈的全球性速度间断面(Dziewonski and Anderson, 1991; Kennett and Engdahl, 1991), Moho面的深度是描述区域地壳结构和地质构造环境的一个重要参数,表征地震波、介质化学成分和

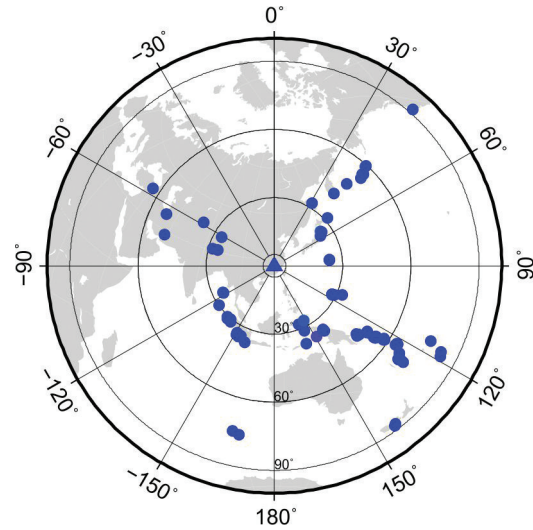


图2 本研究所用到的远震事件位置分布  
Fig. 2 Distribution of the teleseismic events used in this research

岩石性质的变化。其横向起伏对地震波的传播也具有很强的控制作用,对地震发生时地表设施的破坏具有一定的影响,因此研究Moho面形态和结构在地球动力学研究和地震动力学研究中有着非常重要的意义,并始终是地球深部地球物理探测最重要的探测目标之一。

接收函数是研究Moho面深度的一种简易高效的方法。Moho面的Ps转换震相和多次震相一般也是接收函数最初20~30 s中最清晰的震相。根据地壳平均速度和公式1可以简单地估计Moho面的埋深(刘启元等, 1996)。

Zhu和Kanamori(2000a, 2000b)的研究结果表明,相对于地壳平均速度,由Ps转换波到时估计得到的地壳厚度对P波和S波的波速比更加敏感,因此按照一般地壳平均速度估计,波速比值(对于正常的地壳介质,波速比变化范围一般在1.6~1.9之间)的0.1的变化会造成地壳厚度估计的约4 km的变化。而当近地表沉积盖层很厚时,地表松散低速介质会造成Moho面转换震相到时明显延迟,在正常地壳波速比情况下,这种估计误差可能会达到20%。因此Zhu和Kanamori(2000a, 2000b)指出,当同时考虑Moho面Ps转换波和多次波时,可以在假定地壳平均波速的情况下同时得到地壳厚度和地壳平均泊松比的估计。令 $\kappa$ 为P波和S波波速的波

速比,则地壳厚度  $H$  可表示为:

$$H = \frac{t_{Ps}}{\sqrt{\frac{1}{V_s^2} - P^2} - \sqrt{\frac{1}{\kappa^2 V_s^2} - P^2}}$$

$$H = \frac{t_{ppPs}}{\sqrt{\frac{1}{V_s^2} - P^2} - \sqrt{\frac{1}{\kappa^2 V_s^2} - P^2}}$$

$$H = \frac{t_{PsPs+PsPs}}{2\sqrt{\frac{1}{V_s^2} - P^2}} \quad (1)$$

其中泊松比  $\sigma$  与  $\kappa$  的关系式可表示为:

$$\sigma = \frac{1}{2} \frac{\kappa^2 - 2}{\kappa^2 - 1} \quad (2)$$

利用公式 1 和 2 就可建立地壳厚度和泊松比与接收函数 Moho 界面转换震相相对到时  $t_{Ps}$ ,  $t_{ppPs}$ ,  $t_{PsPs+PsPs}$  之间的关系。

事实上,从接收函数中直接拾取转换震相和多次震相的到时是比较困难的。为了快速获得地壳厚度和 Ps 波速度比, Zhu 和 Kanamori (2000) 提出了一种通过  $H-\kappa$  域网格搜索和叠加的方法,如公式 3 所示:

$$s(H, \kappa) = \omega_1 r(t_{Ps}) + \omega_2 r(t_{ppPs}) - \omega_3 r(t_{PsPs+PsPs}) \quad (3)$$

式中,  $\omega_i$  是针对 Ps、PpPs 和 PsPs+PpPs 的权重系数,且  $\sum \omega_i = 1$ 。当所有 3 个震相一致相交时,  $H-\kappa$  域的函数  $s(H, \kappa)$  取最大值,这个最大值及其对应的  $H$  和  $\kappa$  可以通过网格搜索法得到。

### 2.3 本研究所用数据

本研究所用数据为中国地震局国家地震台网的固定台站数据(郑秀芬, 2009), 根据本项目的研究目的和工作区域,我们选取了位于钦杭结合带及相邻地域的固定地震台站共计 200 个(图 1), 记录时间为 2010—2011 年。所用到的地震事件为全球范围内震中距为 30~90 度范围内且震级大于 5.0 级的地震事件。其中部分事件在本区的记录质量相对较差,经对上述所有地震事件的波形和计算所得的接收函数结果进行挑选后,最终实际用到的地震事件共 10389 条。图 2 为最终选取的地震事件分布图,从图中可以看出远震事件的分布相对比较均匀。

## 3 接收函数研究结果与讨论

### 3.1 接收函数提取与质量控制

为了提取到可靠的接收函数并获得可靠的地壳厚度与波速比信息,采用如下的数据处理与质量

控制流程:(1)根据台站和地震事件位置,挑选出震中距在 30°~90°范围,且震级大于 Ms 5.0 级的地震事件;(2)以 IASP91 模型为基础计算事件到台站的初至 P 波到时,并进行波形截取,截取长度为相对于初至 P 波到时的 -20~80 s 范围;(3)对波形进行常规预处理(去均值、去线性趋势、加尖灭等)和带通滤波,滤波范围为 0.03~5 Hz;(4)进行原始记录分量的坐标系旋转,使波形记录由原始的 Z、N、E 坐标系旋转到 Z、R、T 坐标系;(5)时间域反褶积方法提取接收函数,其中高斯系数选取为 2.5,大约对应 1 Hz 的截止频率;(6)针对单个台站,对所有接收函数做动校正(参考慢度 0.057 s/km)消除不同震中距、方位角的影响后,将其中波形明显畸变的、或 Ps 震相到时与其他结果差异较大的接收函数进行剔除,经过甄选之后得到可信度较高的接收函数,其中图 3 所示为 4 个典型台站的接收函数波形及其方位角分布以及单台叠加后的接收函数示意;(7)地壳厚度和波速比的接收函数  $H-\kappa$  扫描,其中针对 Ps、PpPs 和 PsPs+PpPs 三个震相的权重系数分别取为 0.7, 0.2, 0.1。图 4 所示为 4 个典型台站的  $H-\kappa$  扫描结果。

### 3.2 研究区的地壳厚度

由  $H-\kappa$  扫描所得到的研究区地壳厚度和波速比分布如图 5 和图 6 所示。整体而言,研究区的地壳厚度变化相对较小,在 28~35 km 范围内变化,西北部的部分台站可达 40 km 以上,在研究区东南部的大部分区域,地壳厚度一般不超过 33 km,但在华夏块体东北端地壳厚度略增,可达 35 km 左右。

从块体构造角度来看,大致以钦杭结合带为界,其北西侧的扬子块体地壳在整体上较厚,一般均在 35 km 以上,在局地甚至可达 40 km。尽管如此,在扬子块体东段的长江中下游地域, Moho 界面埋深却相对较浅,在 28~33 km 范围内变化。在钦杭结合带南东侧的华夏块体内部, Moho 界面埋深则相对较浅,地壳厚度较薄,整体变化范围在 28~33 km 范围内,但在东南沿海一带则更薄,而大约可以东经 118° E 为界,在华夏块体的东部地壳厚度相对西部则明显偏厚,可达到 35 km 左右。在钦杭结合带内部,则对应着扬子块体与华夏块体的结合部位,其地壳厚度也呈现出一个变化的梯度带范围特征。

从成矿带划分的角度来看,位于本研究区的钦杭成矿带、武夷成矿带、南岭成矿带和长江中下

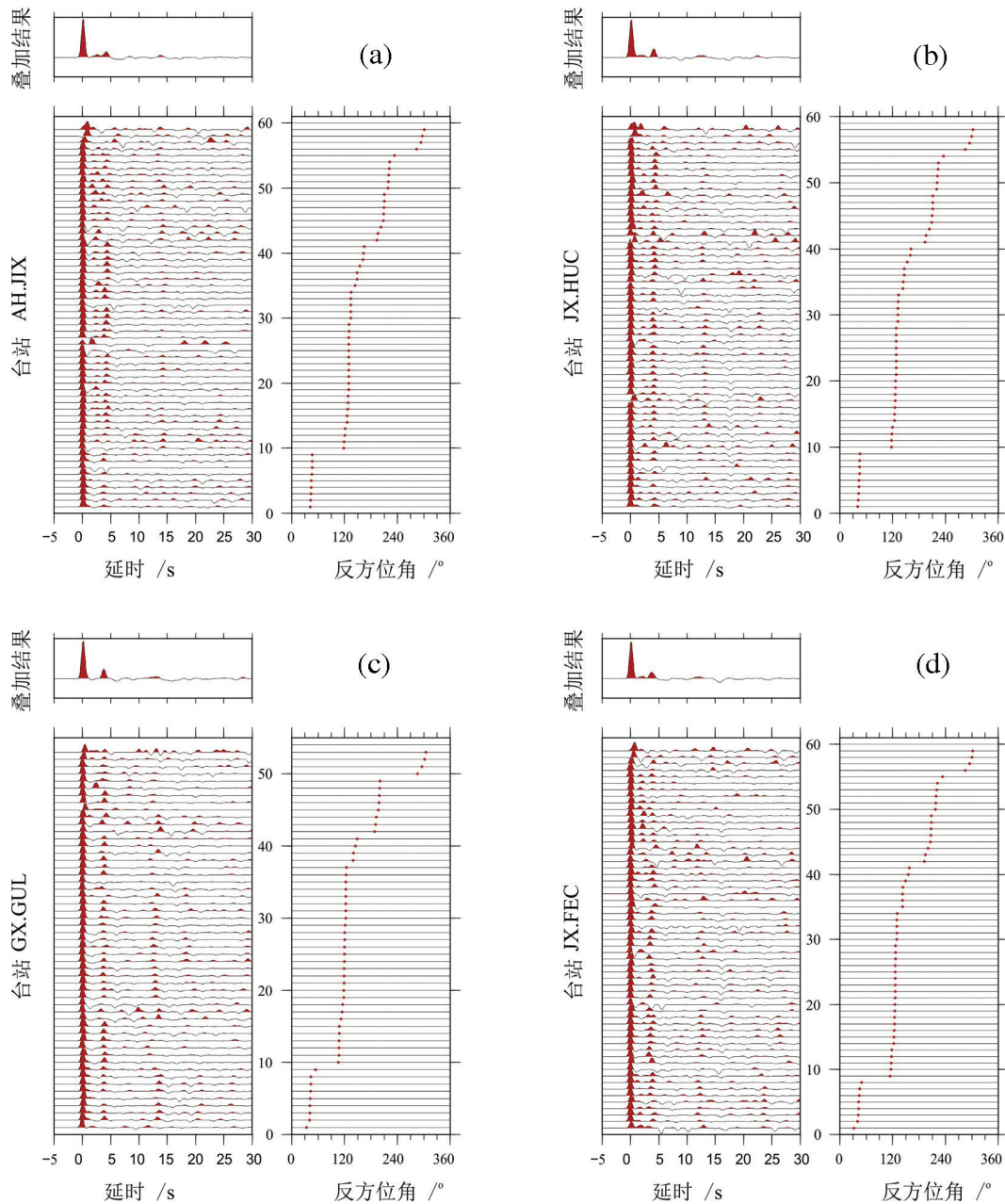


图3 四个典型台站的接收函数提取与叠加结果

a—长江中下游成矿带内AH.JIX台站；b—武夷成矿带内JX.HUC台站；c—南岭成矿带内GX.GUL台站；d—钦杭成矿带东段JX.FEC台站；每幅子图中，左下为所用到的原始接收函数波形，右图为每条接收函数响应的反方位角，左上为动校正叠加后的接收函数

Fig. 3 The P-wave receiver functions of four representative seismic stations

a—AH.JIX station in the MLYMB; b—JX.HUC station in the WY belt; c—GX.GUL station in the NL belt; d—JX.FEC station in the east segment of the QH belt; and in each panel, the lower left plot shows the original receiver functions, the lower right plot indicates the back-azimuth of each receiver function, and the upper left plot shows the stacked sum of all the receiver functions after move-out correction

游成矿带的地壳厚度各有不同,且在不同成矿带的内部亦存在差异性的变化特征。自北而南,在长江中下游成矿带内部,地壳厚度西厚东薄,且在长江断裂带附近明显上隆,这种“幔隆”特征在前人的诸多探测中也被证实(史大年等,2012;Lü et al., 2013;

Shi et al., 2013);在武夷成矿带的地壳厚度在30~33 km范围内平缓波动,考虑到本研究所得到的地壳厚度误差在1~2 km范围内,且研究区较广,基本可认为武夷成矿带的Moho界面展布比较平缓;在南岭成矿带地域,地壳厚度也呈现出西厚东薄的特征,

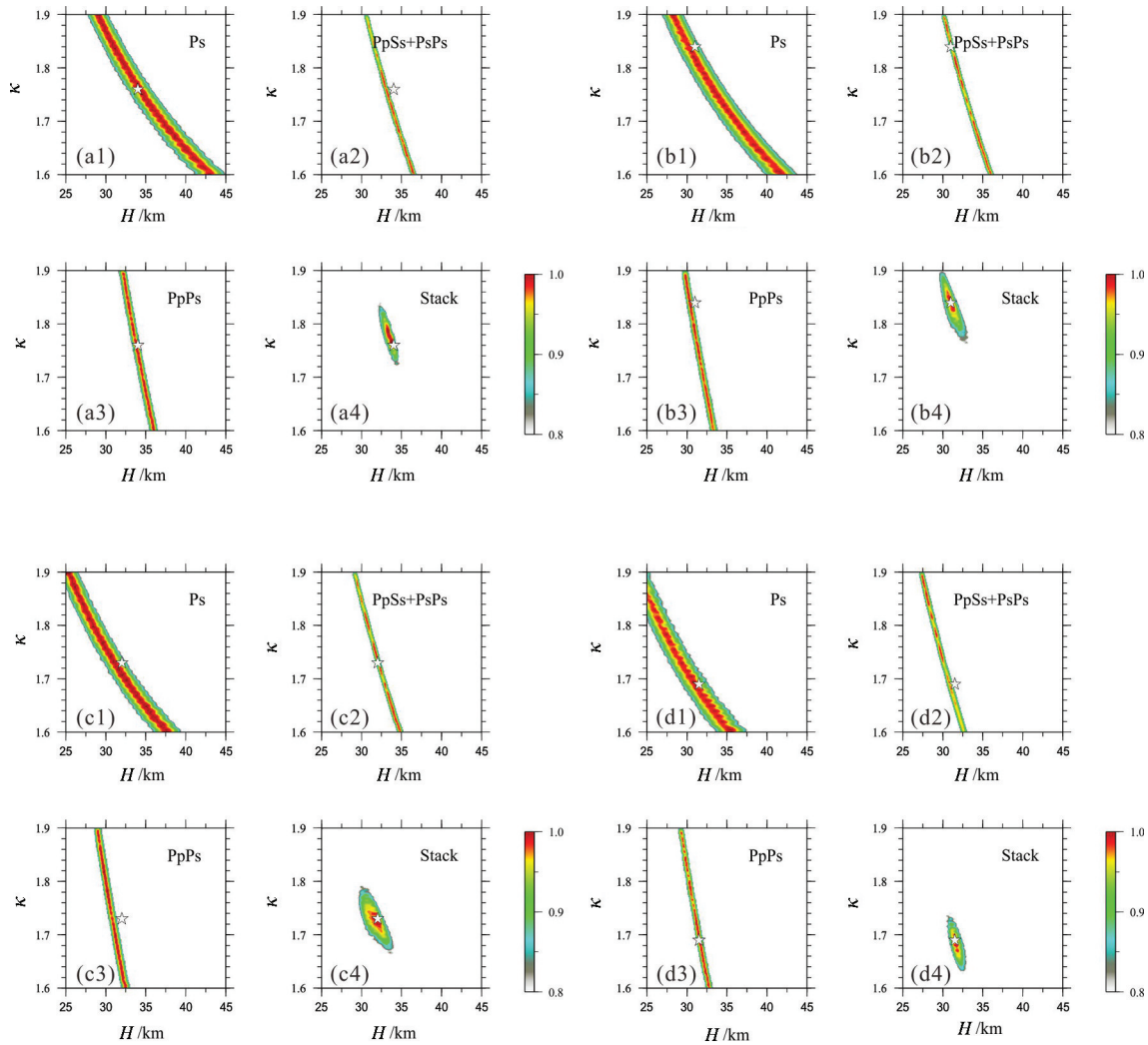


图4 四个典型台站的 $H-\kappa$ 扫描结果

a—长江中下游成矿带内AH.JIX 台站;b—武夷成矿带内JX.HUC 台站;c—南岭成矿带内GX.GUL 台站;d—钦杭成矿带东段JX.FEC 台站;a1、b1、c1、d1 为对Ps 震相扫描得到的结果,a2、b2、c2、d2 为对PpSs 和PsPs 震相扫描得到的结果,a3、b3、c3、d3 为对PpPs 震相扫描得到的结果,a4、b4、c4、d4 为上述三个震相叠加扫描得到的结果

Fig. 4 The crustal thickness and  $Vp/Vs$  estimates of four representative seismic stations

a— AH.JIX station in the MLYMB;b—JX.HUC station in the WY belt;c— GX.GUL station in the NL belt;d—JX.FEC station in the east segment of QH belt; in each panel, the plots 1, 2, 3 and 4 are the  $H-\kappa$  searching results for the wave phase Ps, PsSs+PsPs, PpPs and the stacked wave of all the three phases

大致以江绍断裂带的南段为界,其北西侧的地壳厚度多大于 30 km, 而南东侧的地壳厚度则在 30 km 以浅;由于钦杭成矿带分布较长,且位于扬子块体与华夏块体的结合部位,其地壳厚度的变化则相对较为复杂,整体而言在 118°E 以西的钦杭成矿带,其东段、中段、南段的地壳厚度均不超过 33 km,且西北边界附近较厚而东南边界附近较薄;而在 118°E 以东的钦杭结合带东段部位,其地壳厚度则在 33~37 km 范围变化,呈现出相对较厚的地壳特征。

### 3.3 研究区的波速比分布

相对于本研究区地壳厚度变化相对较小的特征来看,研究区的波速比分布变化则较为显著,且规律性更为明显。波速比变化范围为 1.65~1.85,大致以钦杭结合带为界,其西北侧地域的波速比相对较低,而东南侧华夏块体内的波速比值整体相对较高,且呈现错综交替分布的特征。

从块体构造的角度来看,研究区波速比的分布特征从整体上可分为 3 个主要部分,即研究区北西

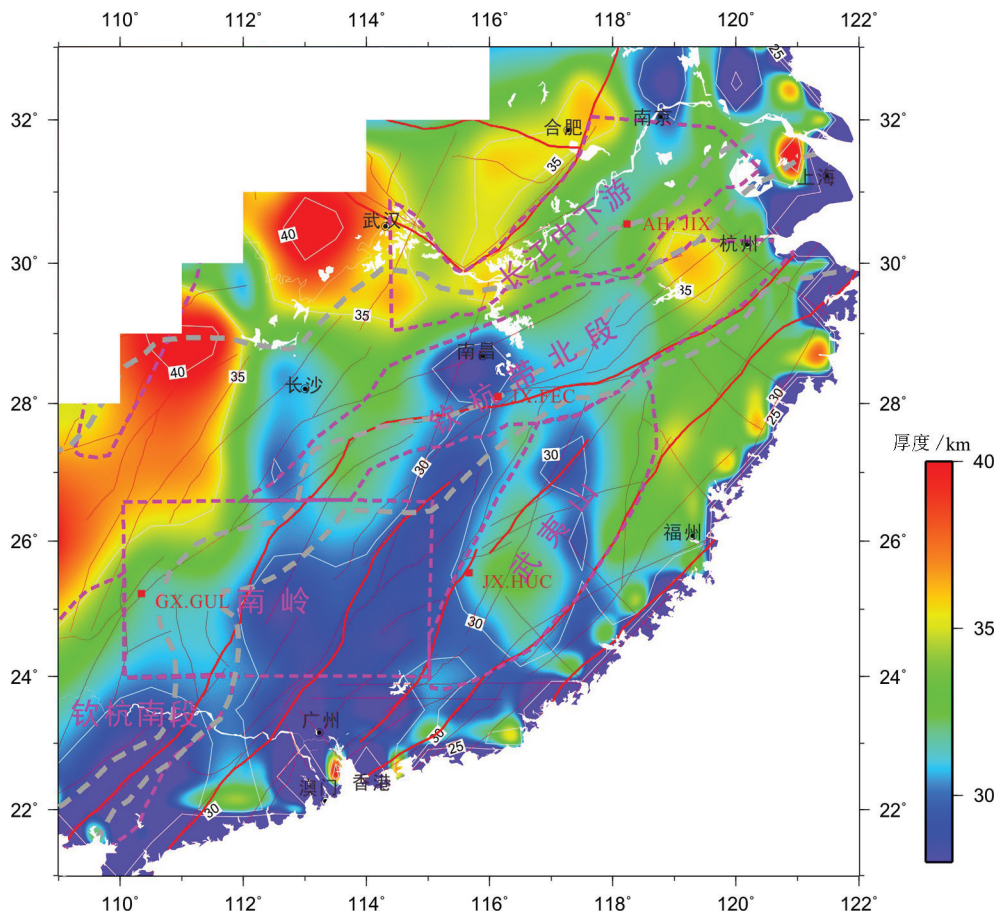


图5 研究区地壳厚度分布图(图中要素含义与图1相同)

Fig.5 The crustal thickness in the study region estimated from  $H-\kappa$  stacking (all the elements in this diagram are the same as those in Fig. 1)

侧的扬子块体,南东侧的华夏块体和位于之间的结合带部位。其中扬子块体和华夏块体的波速比相对均较高,而结合带部位则呈现出显著的低波速比特征。在扬子块体地域,波速比值整体大于1.75,部分地域可达1.80以上;在华夏块体内部的波速比分布则变化较为明显,呈现出高低交错分布的特征,但整体上以高波速比特征为主,平均值在1.75左右,在东南沿海和主要断裂带地域则可高达1.85以上,仅在华夏块体的最南端有明显的低波速比分布;在扬子和华夏块体的结合带部位,波速比呈现明显的低值分布特征,多在1.70以下,且该低波速比区域的分布自南西向北东呈现出狭长的“楔状”形态。

从成矿带划分的角度来看,波速比的分布在不同成矿带亦呈现出不同的特征。在长江中下游成矿带内部,波速比分布呈现出西低东高的特征,西部鄂东南矿集区附近的波速比大约为1.70,而东部宁镇

矿集区附近的波速比可达1.80左右;在武夷成矿带,其波速比分布呈现高低交错分布的特征,在整体上的变化范围为1.68~1.81,北段的波速比比南段的略高;在南岭成矿带,其西部波速比最低,中部最高,东部偏低;钦杭成矿带尽管延伸很长,但相对于其地壳厚度的变化而言其波速比的分布特征则比较均一,整体上波速比值在1.72以下,仅在118.5°E附近存在一小段相对较高的波速比,从形态上来看,该低波速比区域的南界与钦杭成矿带的南界对应较好,但北界的延伸范围要明显宽于成矿带的界限范围。

### 3.4 地壳厚度与波速比的关系

地壳厚度与泊松比(波速比)之间的相关性可能和大陆地壳形成与演化的过程密切相关(嵇少丞等, 2009; 马学英, 2016)。如果大陆地壳由单一岩性组成,那么无论构造运动造成地壳增厚还是减薄作用均不会引起地壳波速比大小的变化。如果大



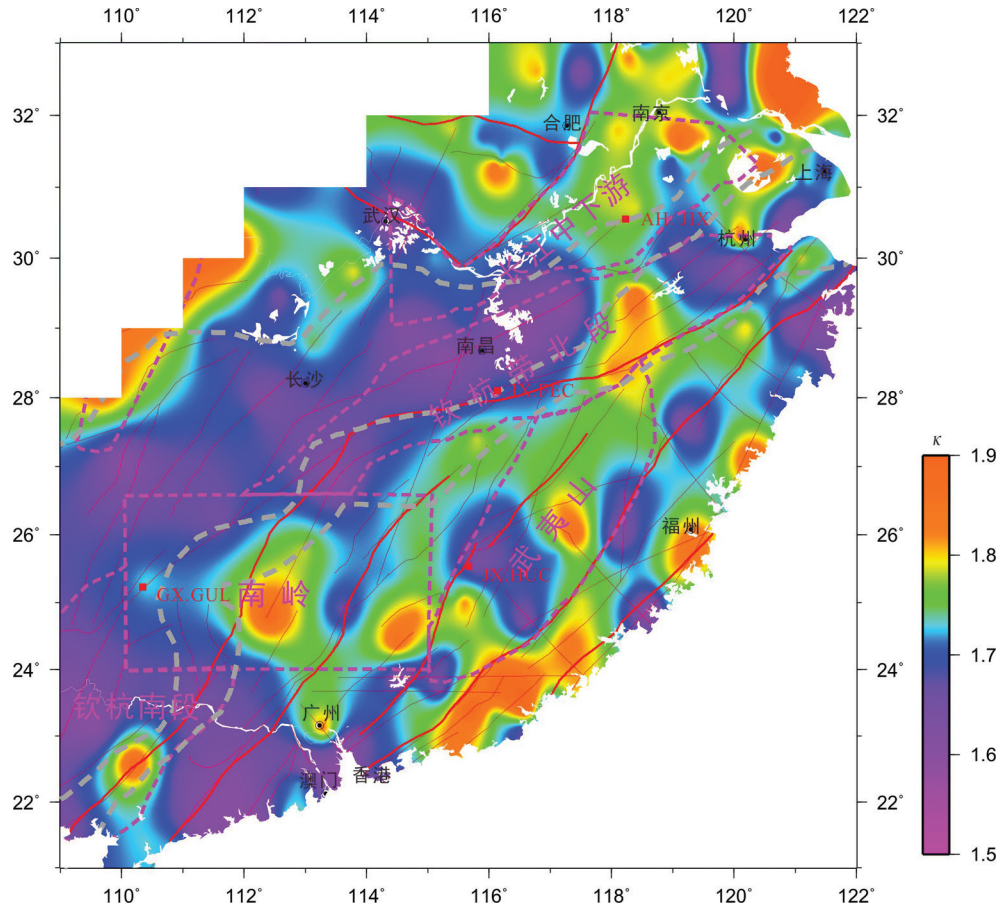


图6 研究区地壳波速比分布图(图中要素含义与图1相同)

Fig.6 The  $V_p/V_s$  ratio distribution in the study region estimated from H- $\kappa$  stacking (all the elements in this diagram are the same as those in Fig. 1)

陆地壳组分在水平方向上存在强烈的各向异性或不均一性,则会造成地壳厚度与波速比之间极其复杂的关系。如果大陆地壳由一系列不同岩性的水平层沿垂向叠合而成,由于岩性差异,不同的水平层则应具有不同的流变学强度,在经历大陆碰撞引起的挤压缩短(增厚)或区域拉伸引起的拉张伸展(减薄)的构造运动过程中,弱岩层产生的应变效果必然大于强岩层。例如,在构造挤压环境中,处于相同温压条件下的长英质岩石比铁镁质岩石更容易形成推覆构造或褶皱,从而造成地壳波速比随地壳厚度增大而降低。此外,拆沉作用会造成下地壳部分基性岩石厚度的减薄,也会引起地壳泊松比的降低。基性或超基性岩浆从上地幔向上运移到壳幔界面时,会形成岩浆底侵,继续向上运移则会形成壳内的镁铁质岩侵入,使得地壳泊松比升高(嵇少丞等, 2009)。从本研究区的波速比与地壳厚度分布关系(图7)来看,本区内四个成矿带中长江中

下游成矿带、南岭成矿带、武夷成矿带的波速比和地壳厚度均呈现正相关的分布特征,根据嵇少丞等(2009)对波速比和地壳厚度相关性的流变学构造分析,这种特征暗示在这3个成矿带内部的整体动力流变学特征并非以对称或非对称的区域拉伸为主,而更可能是大陆碰撞伴随榴辉岩化及下地壳拆沉、基性岩浆底侵作用或上地幔物质上涌造成地壳拉伸的伸展分区构造特征等为主。而对于钦杭成矿带而言,由于其处于扬子与华夏块体接触耦合带部位,且延伸范围极长,其波速比与地壳厚度的关系也极为复杂,难以形成较为收敛的回归曲线。从这个意义上来讲,钦杭成矿带的不同部位、地段的深层动力学过程与成矿背景和成矿专属性均存在差异,并非是在一个统一的成矿动力学背景下所形成。

### 3.5 深部构造与成矿含义

已有地球化学及岩石学研究表明,华南广泛出露了具有规律时空分布特征的中生代花岗岩和岩

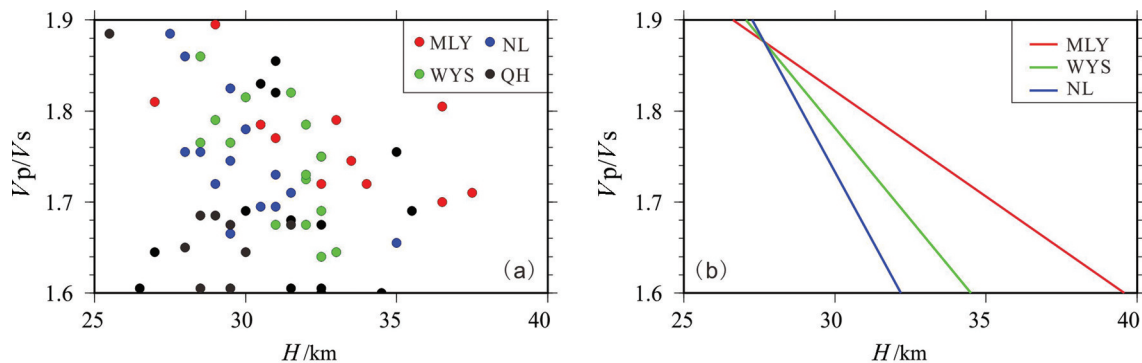


图7 研究区地壳厚度与波速比的相关关系

a—4个成矿带内相关台站的 $H-k$ 扫描结果;b—a中所示台站 $H-k$ 相关结果的一阶回归曲线;MLY—长江中下游成矿带;NL—南岭成矿带;WYS—武夷成矿带;QH—钦杭成矿带

Fig.7 Correlation between crustal thickness and the  $V_p/V_s$  ratio for different blocks in the study region

The left panel is the  $H-k$  distribution, and the red, blue, green and black dots show the results for the MLYMB, NL, WYS and QH belts, respectively; the right diagram is the best-fitting curve of the results in the left panel, and the colors are the same for the results of different metallogenic belts in the left panel

浆岩 (Zhou and Li, 2000; Zhou et al., 2006; Shu et al., 2009; Li et al., 2012), 且在华南块体的内部, 扬子块体和华夏块体间在白垩纪的岩浆活动强度也存在明显差异 (Li et al., 2012), 这些差异反映了毗邻块体经历了不同的深部动力学过程, 也暗示华南块体在中生代时期曾经历了多期次的岩浆作用。

Moho 界面作为地壳与岩石圈地幔之间的一级间断面, 其性质、形态、以及上下物性特征均是大陆地壳的演化历史和深层动力学过程在结构和形态上的直接体现。从本研究结果来看, 研究区地壳厚度的变化主要存在于该区 2 个主要构造块体——扬子块体和华夏块体之间, 反映地壳厚度主要受控于区域构造作用和动力学过程; 而在钦杭结合带及其相邻的其他 3 个重要成矿带 (长江中下游成矿带、南岭成矿带、武夷成矿带) 的地壳厚度均整体较薄, 但在不同成矿带的内部亦呈现出相对薄厚的变化。从深部成矿背景的角度来看, 研究区东北部的长江中下游成矿带和钦杭成矿带东段的矿产资源主要为以亲地幔的成矿元素 (如铁、铜多金属矿等) 为主, 而在一定作用机制下的地壳减薄可引起新生和地幔热物质上涌, 已有深部探测 (Lü et al., 2013, 2015; Shi et al., 2013; 徐涛等, 2014; 张永谦等, 2014) 将在长江中下游地区出现的这种地壳减薄和幔隆特征归结于 MASH 成矿过程 (Hildreth et al., 1988; Richard, 2003) 的影响, 而该区诸多中酸性侵入岩具有与埃达克 (adakite) 岩石类似的地球化学特

征, 也直接指示了存在强力的壳幔相互作用 (王强等, 2001, 2002; 许继峰等, 2001; Xu et al., 2002)。同时该区广泛分布的伸展性断层为热物质上涌提供了通道, 这种来自深部对流地幔热物质向陆壳的注入, 为浅部铁铜多金属成矿提供了直接驱动力 (邓晋福, 2001; 黄荣, 2014)。而在南岭成矿带, 钨锡的成矿高峰期在 160~150 Ma, 而且锡在燕山晚期还有另一个成矿高峰期, 这些成矿期在地学年龄上看, 对应了太平洋板块在晚中生代对欧亚大陆的低角度俯冲所形成的花岗岩活跃期 (毛景文等, 2007; 华仁民等, 2010; 黄荣, 2014)。

波速比是与泊松比直接相关的一个重要物性参数 (公式 2), 与地球内部物质的组成有着直接的关系, 在解释物质构成和状态方面具有重要意义 (Christensen, 1996)。一般情况下, 较高的泊松比预示该区可能存在熔融状态, 而较低的泊松比则表明该地区为固相。在物性方面, 对于地壳物质, 泊松比在 0.26~0.28 对应岩石组成为中性组份, 小于 0.26 为长英质, 大于 0.28 为铁镁值。此外, 高泊松比也可能是地壳岩石破裂而富含流体或熔融与部分熔融产生。一般认为地幔物质的侵入是地壳增生的重要途径, 由于地幔物质富含铁镁, 因此这个过程往往伴随着泊松比的增大。较小的泊松比则反映了相对致密的物质组分, 往往和地壳运动后期的改造密切相关。本研究区泊松比的分布与大地构造有明显的相关关系, 即在扬子块体和华夏块体的波

速比相对均较高,而结合带部位则呈现出显著的低波速比特征,且异常高波速比的分布与区域大型断裂带的展布明显相关。Wan et al.(2012)将波速比异常高与断裂带展布的相关原因归结于构造断裂-圈层滑脱与洋陆过渡性岩石圈的存在,并认为在中国东部的深大断裂为岩浆上侵或喷出提供了通道,使得更多基性岩浆物质上侵到壳内并在断裂带附近富集。早燕山期(180~142 Ma)形成的大量过铝质花岗岩(石英含量高)也是低波速比的重要贡献,而晚燕山期(142~67 Ma)形成的高钾钙碱性花岗岩则会造成波速比升高(Zhou et al., 2006, 2012)。而地壳泊松比从内陆到沿海增加趋势与华南地区中生代以来的地壳演化过程有关(从内陆到沿海,岩浆活动时代依次从老到新),显著高波速比则可能是深部的铁镁质岩浆的底侵作用的结果(Zhou et al., 2006, 2012;叶卓,2013)。

本研究区波速比和地壳厚度值的相关分布特征表明在长江中下游成矿带、南岭成矿带、武夷成矿带内部的整体动力流变学特征或为大陆碰撞伴随榴辉岩化及下地壳拆沉、基性岩浆底侵作用或上地幔物质上涌造成地壳拉伸的伸展分区构造特征等为主。而对于钦杭成矿带的波速比与地壳厚度的复杂关系则暗示其不同部位、地段的深层动力学过程与成矿背景和成矿专属性均存在差异,并非是在一个统一的成矿动力学背景下所形成。针对华南地区构造块体的边界问题,由于本文所用数据均为国家地震台网固定台站数据,台站密度较稀疏(台站间距在几十至上百千米),难以据此明确厘定扬子块体与华夏块体的界限。但由面积性重力多尺度边缘检测方法所刻画的构造界限(图1,图5,图6中灰色粗线)与本文所得地壳厚度和波速比结果在分布特征上具有良好一致性,本文研究结果可对重力学多尺度边界识别的块体界限提供进一步的支撑。

## 4 结 论

本文针对华南东南部主要成矿带地域的深部结构与物性变化,利用国家地震台网记录到的远震地震事件,开展了远震P波接收函数提取与 $H-\kappa$ 扫描研究,获得了研究区的地壳厚度与波速比分布特征。研究结果表明:

(1)华夏块体的地壳厚度(28~35 km)在整体上

薄于扬子块体(33~40 km),且在东段地域存在局部地壳增厚特征,钦杭成矿带不同分段的地壳厚度与属性各异,表明该成矿带并非是在一个统一的成矿动力学背景下所形成。

(2)研究区波速比分布特征与构造格局明显相关,在扬子与华夏块体之间的华南陆内复合造山区呈现明显的低波速比特征。

(3)华南地区地壳减薄与燕山期的强烈岩浆活动和成矿过程密切相关,太平洋板块俯冲以及岩石圈和下地壳拆沉所造成的上地幔热物质扰动上涌或是该区矿产资源集中爆发的驱动力源。

(4)本研究所得地壳厚度与波速比分布特征与重力学多尺度边缘检测所刻画的构造界限一致性较好,支持其对扬子与华夏块体南界的划分方案。

**致谢:** 本文所用数据由中国地震局地球物理研究所国家测震台网数据备份中心(郑秀芬等,2009)提供,文中图件由通用制图软件GMT(Wessel and Smith, 1998)绘制。

## 参考文献

- Christensen N I. 1996. Poisson's ratio and crustal seismology[J]. *Journal of Geophysical Research*, 101(B2): 3139-3156.
- Deng Jinfu, Wu Zongxu. 2001. Lithospheric thinning event 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).
- Deng Yangfan, Li Shoulin, 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: 2200, 1-7. doi: 10.1038/srep02200.
- Hildreth W, Moorbath S. 1988. Crustal contributions to arc magmatism in the Andes of central Chile[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 98: 455-489.
- Hua Renmin, Li Guanglai, Zhang Wenlan, Hu Dongquan. 2010. A tentative discussion on differences between large-scale tungsten and tin mineralizations in South China [J]. *Mineral Deposits*, 29(1):

- 9–23(in Chinese with English abstract).
- 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 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 Jinli, Zhao Dapeng. 2006. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions[J]. *Journal of Geophysical Research—Solid Earth*, 111(B9):1–21 .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 (in Chinese with English abstract).
- 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.
- 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 Geological Sinica*, 83(3): 324–329(in Chinese with English abstract).
- 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.
- Langston C A. 1979. Structure under Mount Rainier, Washington, Inferred from teleseismic body waves[J]. *Journal of Geophysical Research*, 84: 4749–4762.
- Li X H, Li Z X, He B, Li W X. 2012. The Early Permian active continental margin and crustal growth of the Cathaysia block: Insitu U–Pb, Lu–Hf and O isotope analyses of detrital zircons[J]. *Chemical Geology*, 328: 195–207.
- 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 Qiyuan, Kind Rainer, Li Shuncheng. 1996. Maximal likelihood estimation and nonlinear inversion of the complex receiver function spectrum ratio[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 39(4): 500–511 (in Chinese with English abstract).
- Lü Qingtian, Liu Zhendong, Yan Jiayong, Tang Jingtian, Wu Mingan, Xiao Xiao. 2015. Crustal-scale structure and deformation of Lu-Zong ore district: Joint interpretation from integrated geophysical data[J]. *Interpretation*, SL39–SL61.
- Lü Qingtian, Shi Danian, Liu Zhendong, Zhang Yongqian, Dong Shuwen, Zhao Jinhua. 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 .
- Lü Qingtian, Yan Jiayong, Shi Danian, Dong Shuwen, Tang Jingtian, Wu Mingan, Chang Yinfo. 2013. Reflection seismic imaging of the Lujiang–Zongyang volcanic basin, Yangtze Metallogenic Belt: An insight into the crustal structure and geodynamics of an ore district[J]. *Tectonophysics*, 606:60–77 .
- 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).
- Ma Xueying. 2017. Physical Structure and Dynamics of Crust and Upper Mantle in Yangtze Craton and Adjacent Areas from Teleseismic P Receiver Function [D]. University of Chinese Academy of Sciences, Ph. D. thesis. (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Guo Chunli, Chen Yuchuan. 2007. Large-scale tungsten–tin mineralization in the Nanling region, South China: Metallogenic ages and corresponding geodynamic processes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2329–2338(in Chinese with English abstract).
- Pan Guitang, Xiao Qinghui, Lu Songnian, Deng Jinfu, Feng Yimin, Zhang Kexin, Zhang Zhiyong, Wang Fangguo, Xing Guangfu, Hao Guojie, Feng Yanfang. 2009. Subdivision of tectonic units in China[J]. *Geology in China*, 36(1): 1–28(in Chinese with English abstract).
- Qin Xiaofeng, Pan Yunming, Xiabin, Li Rongsen, Zhou Fusheng, Hu Guiang, Lu Guobin. 2007. Geochemical characteristics and tectonic signification of metabasic volcanic rocks in tectonic belt of northern margin of Yunkai block, southeastern Guangxi [J]. *Geochimica*, 36(3): 311–322(in Chinese with English abstract).
- Richards J P. 2003. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu–(Mo–Au) deposit formation[J]. *Economic Geology*, 98: 1515–1533
- Shi Danian, Lü Qingtian, Xu Wenyi, Yan Jiayong, Zhao Jinhua, Dong Shuwen, Chang Yinfo, SinoProbe–03–02 team. 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 Wenyi, Yan Jiayong, Zhao Jinhua, Dong Shuwen, Chang Yinfo. 2012. Crustal structures beneath the Middle-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).
- Shu L S, Zhou X M, Deng P, Wang B, Jiang S Y, Yu J H, Zhao X X. 2009. Mesozoic tectonic evolution of the Southeast China block:

- New insights from basin analysis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(3): 376–391.
- 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).
- Shui Tao. 1987. The framework of the basement tectonics of the southeast of China mainland [J]. *Science in China: Series B*, 4 : 414–422(in Chinese with English abstract).
- Song Penghan, 2018. Crust and upper mantle structure beneath the South China and Qinling Orogen and its continental dynamic Implications [D]. University of Chinese Academy of Sciences, Ph. D. thesis. (in Chinese with English abstract).
- Song Penghan, Zhang Xuemei, Teng Jiwen, Liu Youshan. 2017. Moho imaging based on receiver function analysis with teleseismic wavefield reconstruction: Application to South China[J]. *Tectonophysics*, 718:118–131.
- Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin, Xu Jifeng, 2001. Melting of the underplated basaltic lower crust : Evidence from the Shaxi adakitic sodic quartz diorite– porphyrites, Anhui Province, China[J]. *Geochemistry*, 30(4): 353–362(in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Xu Jifeng, Li Xianhua, Xiong Xiaolin, Bao Zhiwei, Liu Yimao, 2002. The Yanshanian adakite–like rocks and mineralization in the east of Yangtze block[J]. *Science in China (Series D)*, 32(supp.):127–136 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Qinghui, Qiu Ruizhao, Deng Jinfu, Li Tingdong, Mo Xuanxue, Hong Dawei, Lu Xinxiang, Wang Tao, Wu Fuyuan, Xie Caifu. 2005. Granitoids and continental crustal growth modes in China[J]. *Geology in China*, 32(3): 343–352(in Chinese with English abstract).
- 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 Deming, Lin Zhiyong, Long Wenguo, Zhang Kun, Wang Lei, Zhou Dai, Huang Hao. 2012. Research history and current situation of Qinzhou– Hangzhou metallogenic belt, South China[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 28(4): 277–289(in Chinese with English abstract).
- Xu Jifeng, Shinjo R, Defant M J, Wang Qiang, Rapp R P. 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: Patrial melting of delaminated lower continental crust? [J]. *Geology*, 30: 1111–1114.
- 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 Tao, Zhang Zhongjie, Tian Xiaobo, Liu Baofeng, Bai Zhiming, Lü Qingtian, Teng Jiwen. 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(3): 918–930 (in Chinese with English abstract).
- Xu Yao, Lü 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 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).
- Yang Mingguai, Huang Shuibao, Lou Fasheng, Tang Weixin, Mao Subin. 2009. Lithospheric structure and large–scale metallogenic process in Southeast China continental area [J]. *Geology in China*, 36(3): 528–543 (in Chinese with English abstract).
- Yang Mingguai, 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).
- Zhang Yongqian, Lü Qingtian, Teng Jiwen, Wang Qianshen, Xu Tao, 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).
- 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 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(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 X M, Sun T, Shen W Z, Shu L S, Niu Y L. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution[J]. *Episodes*, 29(1): 26–33.
- Zhou XM, Li W X. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas[J]. *Tectonophysics*, 326 (3/4): 269–287.
- Zhu L P, Kanamor H. 2000a. Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions[J]. *J. Geophys. Res.*

- 105:2969–2980.
- Zhu L P, Kanamor H. 2000b. Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions[J]. *J. Geophys. Res.*, 105:2969–2980.
- ### 附中文参考文献
- 邓晋福, 吴宗絮. 2001. 下扬子克拉通岩石圈减薄时间域长江中下游 Cu-Fe 成矿带[J]. *安徽地质*, 11(2): 86–91.
- 邓阳凡, 李守林, 范蔚茗, 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. doi:10.11998/SeisDmc/SN, http://www.seisdmc.ac.cn.
- 华仁民, 李光来, 张文兰等. 2010. 华南钨和锡大规模成矿作用的差异及其原因初探[J]. *矿床地质*, 29(1): 9–23.
- 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.
- 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震学研究[D]. 中国地质大学, 博士学位论文.
- 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): 324–329.
- 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.
- 刘启元, Kind R, 李顺成. 1996. 接收函数复谱比的最大或然性估计及非线性反演[J]. *地球物理学报*, 39(4): 500–511.
- 吕劲松, 张雪辉, 孙建东, 张勇, 武斌, 骆学全. 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.
- 马学英. 2017. 扬子克拉通及邻域远震接收函数与壳幔结构及动力学响应[D]. 中国科学院大学, 博士学位论文.
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 陈毓川. 2007. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用: 成矿时限及地球动力学背景[J]. *岩石学报*, 23(10): 2329–2338.
- 潘桂堂, 肖庆辉, 陆松年, 邓晋福, 冯益民, 张克信, 张智勇, 王方国, 邢光福, 郝国杰, 冯艳芳. 2009. 中国大地构造单元划分[J]. *中国地质*, 36(1): 1–28.
- 覃小锋, 潘元明, 夏斌, 李容森, 周府生, 胡贵昂, 陆国斌. 2007. 云开地块北缘构造带中变质基性火山岩的地球化学特征及其大地构造意义[J]. *地球化学*, 36(3): 311–322.
- 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? [J]. *地质学报*, 86(3): 389–399.
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征[J]. *地质通报*, 31(7): 1035–1053.
- 水涛. 1987. 中国东南大陆基底构造格局[J]. *中国科学: B 辑*, 4: 414–422.
- 宋鹏汉. 2018. 华南与秦岭地区壳幔结构与大陆动力学[D]. 中国科学院大学, 博士学位论文.
- 覃小锋, 潘云明, 夏斌, 李容森, 周府生, 胡贵昂, 陆国斌. 2007. 云开地块北缘构造带中变质基性火山岩的地球化学特征及其大地构造意义[J]. *地球化学*, 36(3): 311–322.
- 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[J]. *地球化学*, 30(4): 353–362.
- 王强, 赵振华, 许继峰, 李献华, 熊小林, 包志伟, 刘义茂. 2002. 扬子地块东部燕山期埃达克质 (adakite-like) 岩与成矿[J]. *中国科学(D 辑)*, 32(增刊): 127–136.
- 肖庆辉, 邱瑞照, 邓晋福, 李廷栋, 莫宣学, 洪大卫, 卢欣祥, 王涛, 吴福元, 谢才富. 2005. 中国花岗岩与大陆地壳生长方式初步研究[J]. *中国地质*, 32(3): 343–352.
- 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.
- 徐德明, 蔺志永, 龙文国等, 张鲲, 王磊, 周岱, 黄皓. 2012. 钦杭成矿带的研究历史和现状[J]. *华南地质与矿产*, 28(4): 277–289.
- 徐磊, 李三忠, 刘鑫, 索艳慧, 吴奇, 王鹏程. 2012. 华南钦杭结合带东段成矿特征与构造背景[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 32(5): 57–66.
- 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[J]. *岩石学报*, 30(4): 918–930.
- 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.
- 杨明桂, 黄水保, 楼法生, 唐维新, 毛素斌. 2009. 中国东南陆区岩石圈结构与大规模成矿作用[J]. *中国地质*, 36(3): 528–543.
- 杨明桂, 梅勇文. 1997. 钦杭古板块结合带与成矿带的主要特征[J]. *华南地质与矿产*, 13(3): 52–59.
- 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[J]. *岩石学报*, 30(4): 931–940.
- 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.
- 中国地质调查局. 2010. 钦杭成矿带重要矿产勘查部署方案[R]. 北京: 中国地质调查局, 1–276.
- 周涛发, 范裕, 袁锋. 2008. 长江中下游成矿带成岩成矿作用研究进展[J]. *岩石学报*, 2324(8): 1665–1678.