

叶卓,李秋生,高锐等. 中国大陆东南缘地震接收函数与地壳和上地幔结构. 地球物理学报, 2013, 56(9):2947-2958, doi:10.6038/cjg20130909.

Ye Z, Li Q S, Gao R, et al. Seismic receiver functions revealing crust and upper mantle structure beneath the continental margin of southeastern China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56(9):2947-2958, doi:10.6038/cjg20130909.

中国大陆东南缘地震接收函数与地壳和上地幔结构

叶卓^{1,2}, 李秋生^{1,2*}, 高锐^{1,2}, 管焯^{1,2}, 贺日政^{1,2},
王海燕^{1,2}, 卢占武^{1,2}, 熊小松^{1,2}, 李文辉^{1,2}

1 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

2 中国地质科学院深部探测与地球动力学开放实验室, 北京 100037

摘要 从 2008—2011 年, 分别在中国大陆东南缘沿海和内陆两条 NE 向剖面上进行了宽频地震观测, 利用记录到的远震波形资料提取得到 1446 个远震 P 波接收函数, 用 $H-\kappa$ 叠加扫描和 CCP 偏移叠加方法研究了中国大陆东南缘地壳及上地幔过渡带的结构及其变化特征. 结合固定台网 25 个台站的 $H-\kappa$ 结果, 获得中国大陆东南缘(福建地区)地壳厚度从内陆到沿海逐渐减薄的图像; 地壳从闽西北山区的 33 km 减薄到厦门沿海一带的 29 km 以下, 平均地壳厚度为 31.3 km, 具有陆地向洋壳过渡的特征; 地壳泊松比从内陆到沿海显示出分带特征, 闽中西部内陆地区小于 0.26, 沿海地带高于 0.26, 且在断裂带的交汇区域表现为相对异常高值. 地壳上地幔顶部(0~200 km)的 CCP 偏移叠加成像结果显示闽江断裂等 NW 向断裂深切 Moho 界面, 在断裂两侧 Moho 面急剧抬升或下沉, 产状改变, 这些特征向内陆地区逐渐变得不明显. 闽江等 NW 向断裂对研究区地壳厚度、地震等有明显控制作用. 上地幔尺度(300~700 km)的 CCP 偏移叠加成像, 未见 410 km 和 660 km 速度间断面突变和起伏异常, 其绝对深度略大于 IASP91 模型的, 上地幔转换带厚度正常(250±5 km), 表明中国大陆东南缘上地幔转换带未受欧亚与菲律宾板块碰撞的明显影响, 推断中国大陆东南缘及台湾海峡下方不存在俯冲板块, 或俯冲前缘未扰动到 410 km 的深度.

关键词 中国大陆东南缘, 远震 P 波接收函数, Moho, 泊松比, 闽江断裂, 上地幔转换带, 菲律宾板块, 欧亚板块

doi:10.6038/cjg20130909

中图分类号 P315

收稿日期 2012-11-13, 2013-06-28 收修定稿

Seismic receiver functions revealing crust and upper mantle structure beneath the continental margin of southeastern China

YE Zhuo^{1,2}, LI Qiu-Sheng^{1,2*}, GAO Rui^{1,2}, GUAN Ye^{1,2}, HE Ri-Zheng^{1,2},
WANG Hai-Yan^{1,2}, LU Zhan-Wu^{1,2}, XIONG Xiao-Song^{1,2}, LI Wen-Hui^{1,2}

1 Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2 Earth probe and Geodynamics Open Laboratory of CAGS, Beijing 100037, China

Abstract 1446 teleseismic P-wave receiver functions were selected from the seismographs of two NE-oriented profiles deployed along the coast and in the midland of Fujian Province, respectively. $H-\kappa$ auto-searching stacking and CCP stacking methods were used to study the crust and upper mantle structure characteristics beneath the continental margin of southeastern China (SE China). With the data from 25 permanent stations of Fujian Seismic Network joined, we obtained an image of crustal thicknesses characterized by gradually thinning from inland to coast in the region of SE China margin (Fujian region). It is shown that the crust beneath Fujian region thins from about

基金项目 国土资源部深部探测技术与实验研究专项(Sinoprobe)"宽频地震观测与壳幔速度研究"项目(201011042)资助.

作者简介 叶卓,男,1988年生,硕士,主要从事地壳上地幔结构的宽频带地震探测研究. E-mail: yezhuo5000@hotmail.com

* **通讯作者** 李秋生,男,1958年生,研究员,主要从事地球深部结构研究. E-mail: liqiusheng@cags.ac.cn

33 km in the mountain area of northwestern Fujian to < 29 km along the coast of southeastern Fujian around Xiamen, with an average of 31.3 km, which embodies the transition from continental crust to oceanic crust. Meanwhile, the Poisson's ratios of the coastal crust (> 0.26) are higher than that of the inland crust (< 0.26). The CCP migrated receiver function stacking images of crust and uppermost mantle (0~200 km) for the two profiles show that the NW trending faults like Minjiang Fault cut through the Moho, causing severe drop or uplift and different attitudes of the Moho across the faults, but such characteristics seem unobvious toward inland. NW trending faults like Minjiang affect the distributions of factors like crustal thicknesses and earthquakes in this region. There are no breaks and surge of 410 and 660 km discontinuities appearing on the image of CCP stacking results for the depths of upper mantle (300~700 km). The depths of 410 and 660 km discontinuities are slightly larger than that of IASP91 while the thicknesses of the mantle transition zone are normal (250 ± 5 km), which indicates that the mantle transition zone beneath this area is less affected by the collisions between Eurasian and Philippine Sea plates. It is inferred that there are no any subducting plates existing beneath SE China margin and Taiwan Strait or the frontier of the subducting plates has not reached the depth of 410 km.

Keywords Continental margin of SE China, P-wave receiver functions, Moho, Poisson's ratio, Minjiang Fault, Upper mantle transition zone, Philippine Sea plate, Eurasian plate

1 引言

中国大陆东南边缘地处欧亚板块和太平洋板块的交汇区域,与地球上最年轻的洋-陆汇聚造山带——台湾造山带隔海峡相望,被认为是板块相互作用研究的最佳天然实验室之一。

中国大陆东南边缘在区域上属于华南造山区的一部分,以广泛出露中-新生代岩浆岩而著称,其构造地貌受 NE 向和 NW 向的两组断裂控制,形成了“东西分带,南北分块”的基本格局(图 1)。

针对中生代大规模岩浆活动和伴随成矿爆发的深部背景、现代洋陆相互作用等地球科学问题,研究区(南起南岭,北至浙闽边界)深部地球物理调查程度相对较高。在 20 世纪 80 年代末—90 年代初即实施了人工爆破地震探测^[1-5];至少有两条全球地学断面通过^[6-7];21 世纪以来,又针对沿海的漳州盆地和福州盆地地壳稳定性和活断层进行了人工爆破密集折射和反射剖面探测^[8-9],同时期还对过去折射和宽角反射地震资料进行了再研究^[10-13];特别是近年来不少学者利用固定台站记录数据开展远震接收函数和层析成像等天然源地震探测研究^[14-18],获得了台站下方的地壳速度结构、泊松比分布以及 410 km 和 660 km 不连续面的基本信息。这些成果为本研究奠定了坚实的基础。

然而本文作者注意到,前人的研究从部署上较多关注 NW 向上地质构造及地壳结构向海过渡的差异性,而对平行于区域构造走向(NE 向)地壳结构变化注意不够。实际上仅从已有的深部探测结果就已经不难看出,华南地区的地壳结构并不具有典型的二维特征。Ai 等^[14]给出了福建省和台湾地区地壳厚度及上地幔过渡带的二维图像,但因地震台站间距较大,有待更密集的观测进一步补充证实。

基于上述考虑,作为 Sinoprobe 宽频地震观测实验的一项内容,作者在中国大陆东南缘部署了 3 条 NW 向剖面 and 2 条 NE 向剖面,它们构成对中国大陆东南缘以福建沿海为中心区的栅状剖面覆盖。本文报导先期两条 NE 向剖面的远震 P 波接收函数的初步结果。并结合本项目的 NW 向剖面和前人结果,试对中国大陆东南缘的深部动力学问题进行初步探讨。

2 数据和方法

2.1 数据资料

2008 年 8 月—2011 年 4 月,本文作者在中国大陆东南沿海(福建)地区布设了 20 个宽频地震流动台,装备了 Reftek130 数字采集器和 Guralp CMG-3ESP (30 sec to 50 Hz)和 Guralp CMG-3T (120 sec to 50 Hz)地震计,采用线性观测系统(测线

BB'), 测线长度 450 km, 采用连续记录方式, 采样频率 50 Hz, 记录周期达 18 个月, 采集到原始连续记录数据 234 GB; 并于 2011 年 4—5 月, 将沿海地区的 20 套仪器向北平移约 150 km, 重新布设于闽中北部(测线 AA'), 测线长度 280 km, 记录周期至 2012 年 9 月底, 采集到原始连续记录数据 160 GB (图 1). 本文接收函数的波形数据主要来自内陆剖面 AA', 结果讨论和结论综合了两条剖面的结果.

2.2 接收函数的提取

从地震目录(来自 USGS)中选取地震震级 $M_s > 5.5$, 震中距范围为 $30^\circ \sim 95^\circ$ 之间的地震, 从原始记录数据中截取 P 波前 10 s 后 100 s 的地震事件用于接收函数的计算. 地震事件 P 波接收函数的计算采用

时间域迭代反褶积方法^[19-20], 采用 2.5 的 Gaussian 滤波因子对接收函数进行滤波, 然后对分离出的接收函数进行挑选, 选取初动尖锐、Ps 及其两个多次波震相清晰、信噪比高的接收函数. 累计从测线 AA' 台站得到了 690 个, 从测线 BB' 台站得到 756 个高质量的接收函数, 涉及到地震事件 245 个, 它们分布在研究区的东北、东南和南部(图 2).

将测线 AA' 所有台站所得 690 个原始接收函数进行 Ps 时差校正(moveout correction)^[21], 参考慢度为 $p_0 = 6.4 \text{ s}/^\circ$, 对应震中距 67° , 并按照入射到台站的地震射线与测线走向线(N36.5°E)夹角($0 \sim 180^\circ$)由大到小的顺序将每个台站的接收函数进行排列, 最后从南到北按台站顺序将测线 AA' 所有接

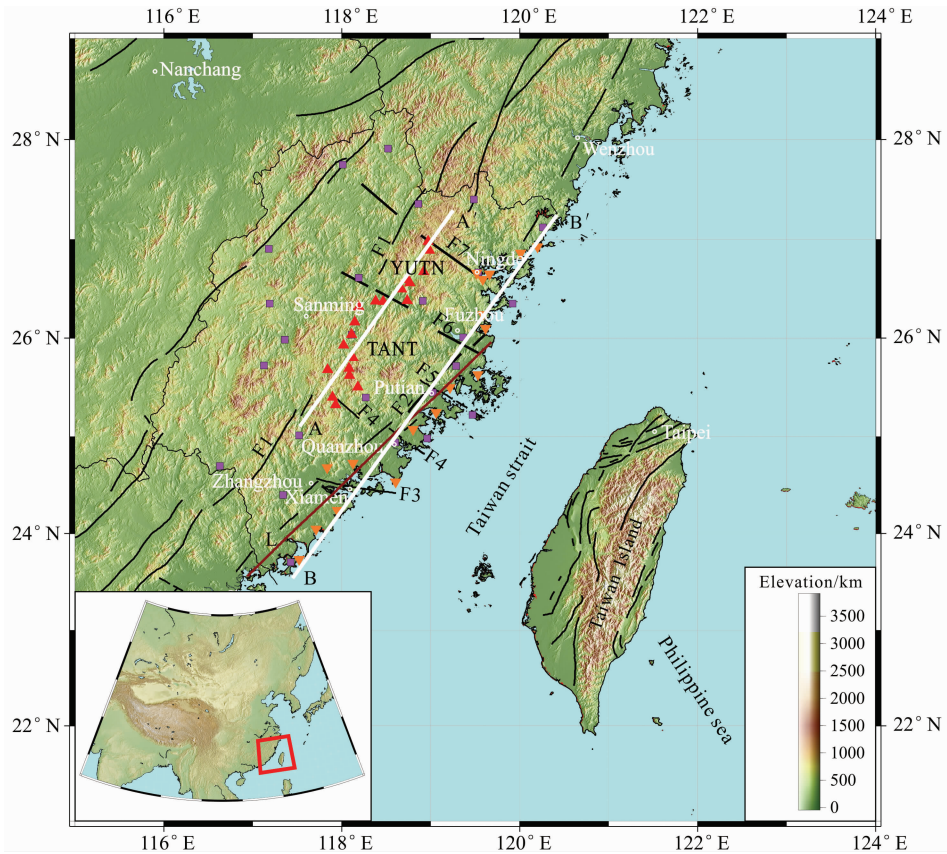


图 1 宽频流动台站测线位置图

橘红色倒三角表示 2008 年 8 月—2011 年 4 月布设于福建沿海的台站, 红色三角表示 2011 年 5 月—2012 年 9 月布设于福建中北部地区的台站; 桃红色小正方形表示本文用到的福建地震台网 25 个固定台站位置; AA' 与 BB' 为叠加剖面位置; 深红色剖面 L 为爆炸地震测线^[1]; 黑粗线表示出露的主要断裂: F1—政和-大埔断裂带, F2—长乐-诏安断裂带, F3—九龙江下游断裂, F4—晋江断裂, F5—兴化湾断裂, F6—闽江断裂, F7—三都澳断裂; 左下角的红色矩形框示意研究区位置.

Fig. 1 Topography map showing the locations of broadband seismic stations and profiles

The orange downward-pointing triangles mark the stations deployed along the coast of Fujian, operating from August 2008 to April 2011 while the red triangles mark the stations deployed in the midland of Fujian, operating from May 2011 to September 2012. The fuchsia squares denote the locations of 25 permanent stations from Fujian seismic network. White lines AA' and BB' show the locations of two stacking profiles while the crimson line L is the explosive seismic profile^[1]; Black bold lines denote the locations of main faults: F1—Zhenghe-Dabu Fault, F2—Changle-Zhao'an Fault, F3—Jiulongjiang Fault, F4—Jinjiang Fault, F5—Xinghuawan Fault, F6—Minjiang Fault, F7—Sanduo Fault. The study area is outlined with a red rectangular box in the lower left located insert map.

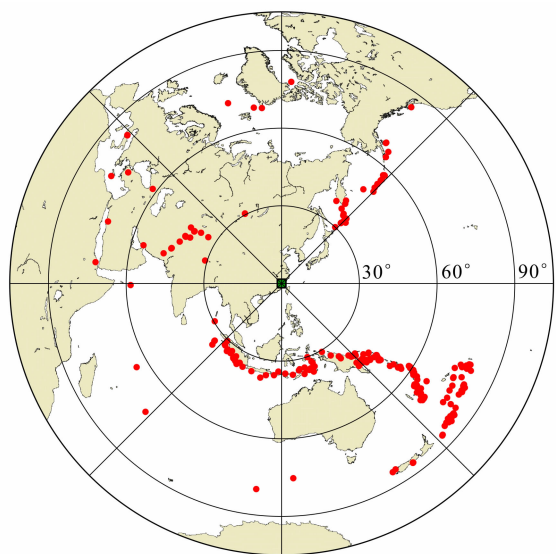


图2 远震事件分布图($M_s > 5.5$, 震中距 $30^\circ \sim 95^\circ$)

Fig. 2 Epicenter distribution of teleseismic events with $M_s > 5.5$ and epicentral distances of $30^\circ \sim 95^\circ$

收函数排列成图 3a. 图中, 30 s 后的部分进行了 0.03~0.2 Hz 的带通滤波, 并将振幅放大了三倍.

图 3a 中红色为正振幅, 表示向下的速度增加. 由图 3 可见, Moho 震相处于 3~4 s 之间, 侧向变化不大, 但从 Ps 的多次波可以看出还是有一定的起伏. 410 km 和 660 km 间断面震相亦清晰可见. 挑选研究区东南方向, 即 $90^\circ \sim 180^\circ$ 之间的地震事件相应的接收函数, 进行 Ps 时差校正后, 对每个台站作叠加, 得到每个台站的一个平均接收函数道, 并沿测线排列成图 3b, 从图中可以看到, Moho 间断面 Pms 震相较为平缓, 从 TANT 台到 ZHAH 台略有抬升. 对所有接收函数进行叠加得到图 3c (叠加剖面 CC' 位置示于下文图 7a), 叠加窗根据 530 km 深度处的射线穿入点进行划分, 叠加窗宽度为 200 km, 沿测线步长 50 km, 同样, 在叠加前对所有接收函数进行了 Ps 时差校正, 并只选择了叠加窗内接收函数数量大于 50 的叠加结果. 如图可见, 410 km 和 660 km

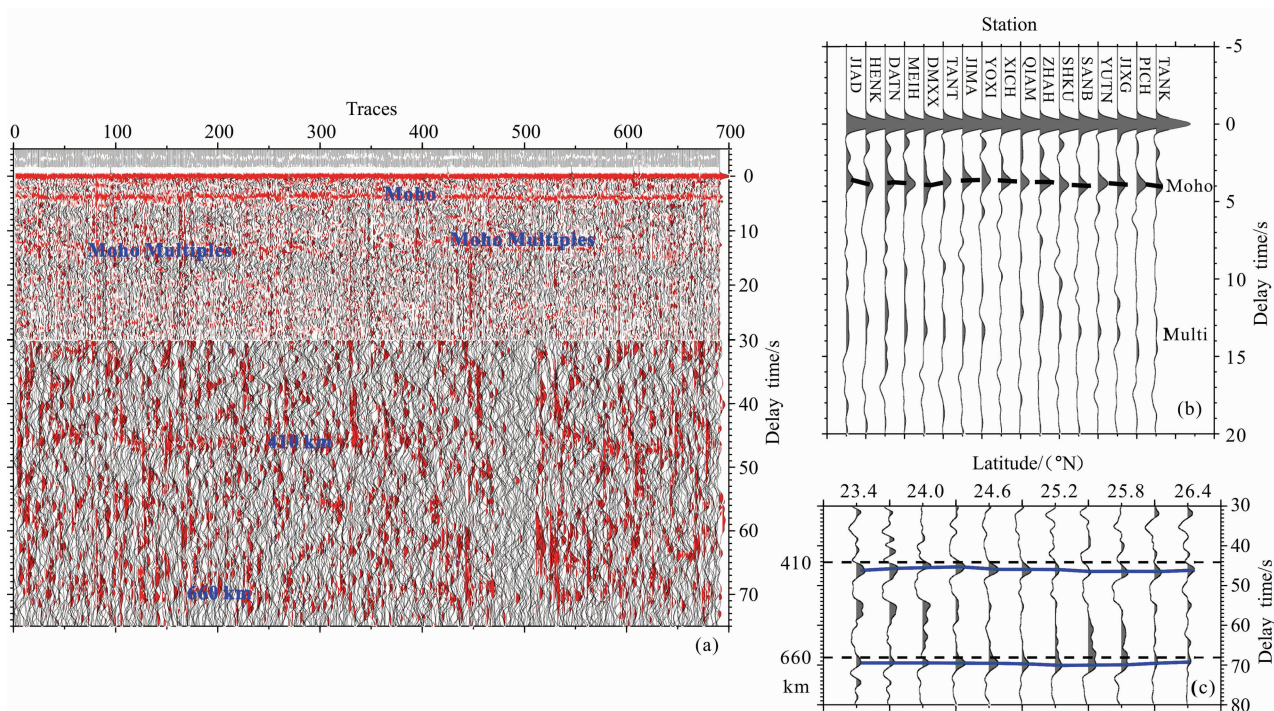


图3 原始接收函数时间剖面及叠加剖面

(a) 测线 AA' 原始接收函数排列, 按入射到台站的地震射线与测线走向线 ($N36.5^\circ E$) 夹角 ($0 \sim 180^\circ$) 由大到小顺序将每个台站的接收函数进行排列; (b) 测线 AA' 按台站顺序 (从西南到东北方向) 的接收函数叠加结果, 台站名标在每条接收函数上方; (c) 沿图 7a 中的剖面 CC' 划分叠加窗的接收函数叠加结果 (按纬度排列), 图中虚线表示 IASP91 模型 410 km 和 660 km 震相到时, 蓝色实线标出了实际震相.

Fig. 3 Time domain section of the raw receiver functions and the stacked receiver function sections

(a) Raw receiver functions for all stations along profile AA', sorted by the angles ($0 \sim 180^\circ$) made by each incident ray with the profile trending line ($N36.5^\circ E$) from large to small for each station; (b) The stacked receiver functions of profile AA' for each station with the corresponding station name shown at the top. (c) Binning stacked receiver functions sorted by latitudes of the stacking bins along profile CC' in Fig. 7a. The dash lines indicate the arrivals of the 410 km and 660 km phases predicted by the IASP91 model while the blue solid lines approximately mark the observed arrivals.

震相均滞后于 IASP91 模型标准震相 1.5~2.5 s, 且保持平缓,起伏幅度基本保持在 1 s 以下。

2.3 资料处理方法

本文使用时间域迭代反褶积方法^[19-20]实现接收函数的反褶积计算,此方法由 Kikuchi^[22]提出,并详细描述了时间域迭代反褶积方法的数学原理。相对于频率域反褶积方法,此方法的反褶积过程摆脱了水准值、时间域平滑和阻尼系数对接收函数的影响之间的复杂关系,这对接收函数的分析是有利的^[19]。

本文采用 $H-\kappa$ 自动搜索叠加方法^[23]和共转换点叠加偏移成像^[24-25]来研究台站下方的地壳厚度和泊松比以及获得研究区地壳上地幔主要速度间断面的成像。 $H-\kappa$ 搜索方法利用 P 波接收函数的转换震相及其多次波相对于 P 波初至的走时与地壳厚度及 V_p/V_s 波速比的关系,联合使用 Moho 界面的 Ps 转换震相和它的多次波震相(信号较强的有 PpPs, PpSs+PsPs),通过对不同的震相分配相应的权重,对接收函数的振幅进行叠加,搜索得到地壳厚度和 V_p/V_s 的最佳估计。

共转换点叠加偏移方法(CCP)是将接收函数每个点的振幅都偏移 to 相应的地下转换点(Piercing Point)的过程,首先通过设定背景速度模型确定了每个接收函数的射线路径,进行入射角矫正和时深转换后,接收函数每个点上的振幅被偏移到了深度域射线上造成此点振幅的相应 P-S 转换点上,而这个振幅就表示了转换点处的速度改变(波阻抗改变)。而后将整个剖面空间进行划分,设定一定的长(沿测线方向)、宽(横向垂直于测线方向)、高(深度方向),将剖面空间划分成一个个小的叠加单元,叠加同一单元内的振幅得到此叠加单元的一个平均振幅。通过这种方法,我们实现了沿测线方向,对测线下方的地球内部结构的一个网格化的成像,能够直观地反映出地下各速度间断面的分布及沿剖面变化情况。

3 地壳厚度和泊松比变化特征

参考前人的工震探测结果^[1-2,8-9],将研究区地壳平均 P 波速度取为 6.3 km/s,地壳厚度 H 的范围取为 10~50 km,P-S 波速比 V_p/V_s 搜索范围定为 1.5~2.0,另外,根据所得接收函数的特征(图 4),Moho 面的 P-S 转换波 Ps 震相和它的两个多次波震相 PpPs, PpSs+PsPs 的叠加权重系数被分别定为 0.7,0.2 和 0.1。

图 4 给出了两个台站(YUTN 台和 TANT 台)的接收函数排列和 $H-\kappa$ 叠加的结果,从图中可以看到,Moho 的 Ps 震相约出现在 P 波初至之后的 3.5~4 s 之间,PpPs 震相亦能清晰识别, $H-\kappa$ 叠加的结果显示 YUTN 台的地壳厚度为 32.0 km,地壳 V_p/V_s 值为 1.73,TANT 台的地壳厚度为 32.5 km,地壳 V_p/V_s 值为 1.69(图 4)。

对内陆和沿海的两条剖面所有台站进行 $H-\kappa$ 叠加扫描,获得台站下的地壳厚度 H 和泊松比 σ ,基于测线 AA'和 BB'的上述结果,结合 25 个固定台站的 $H-\kappa$ 叠加扫描结果绘制的图 5 显示,中国东南大陆缘的地壳依厚度大致可分为三个带:第一带位于闽西北,地壳厚度大于 32 km,武夷山位于此带;第二个带对应闽中南丘陵地带,地壳厚度介于 30~32 km 之间;第三带大致对应沿海地带,地壳厚度小于 30 km。地壳厚度从内陆到沿海,沿 NW-SE 方向经这三个厚度带依次递减,从 33 km 以上减薄到 29 km 以下,这反映地壳厚度从内陆向沿海减薄的总体变化趋势。

根据大陆地壳岩石性质与泊松比的关系的划分^[26-28],随着岩石中酸性成分的减少和镁铁质含量的增加,地壳岩石泊松比被划分为低值($\sigma < 0.26$)、中值($0.26 \leq \sigma < 0.28$)、高值($0.28 \leq \sigma < 0.30$)和超高值($\sigma \geq 0.30$),基本对应着岩石成分酸性、中性到基性以及地壳岩石破裂而富含流体或者部分熔融。据本研究结果可看出,中国大陆东南缘主要分布中酸性岩石,沿海剖面 BB'台站泊松比平均值为 0.265,内陆剖面 AA'泊松比平均值为 0.248,如图所示,沿海地区泊松比明显高于内陆地区。泊松比分布显示的分带特征比地壳厚度变化更为明显。从沿侧线 AA'和 BB'的泊松比变化剖面图上可以看到,在断裂带的交汇区域,泊松比呈现相对的异常高值,如在漳州盆地(对应图 5 中③),泊松比异常高值达到了 0.284。

在图 5 上,读者不难看出,闽江断裂可认为是福建中东部地壳厚度的一条重要分界线。以闽江为界,福建中东部地区被分为南北两部分,南部地壳厚度普遍小于 32 km,北部地壳厚度普遍大于 32 km。32 km 地壳厚度等值线勾勒出闽江河谷西南部和东北部两个半封闭的局部地壳厚度区,西南部的区域地壳厚度小于 32 km,东北部区域地壳厚度在 32 km 以上。

据前人研究,闽江断裂对福建地区的地震、地热等分布也有明显的控制作用^[2,29-30],而我们研究

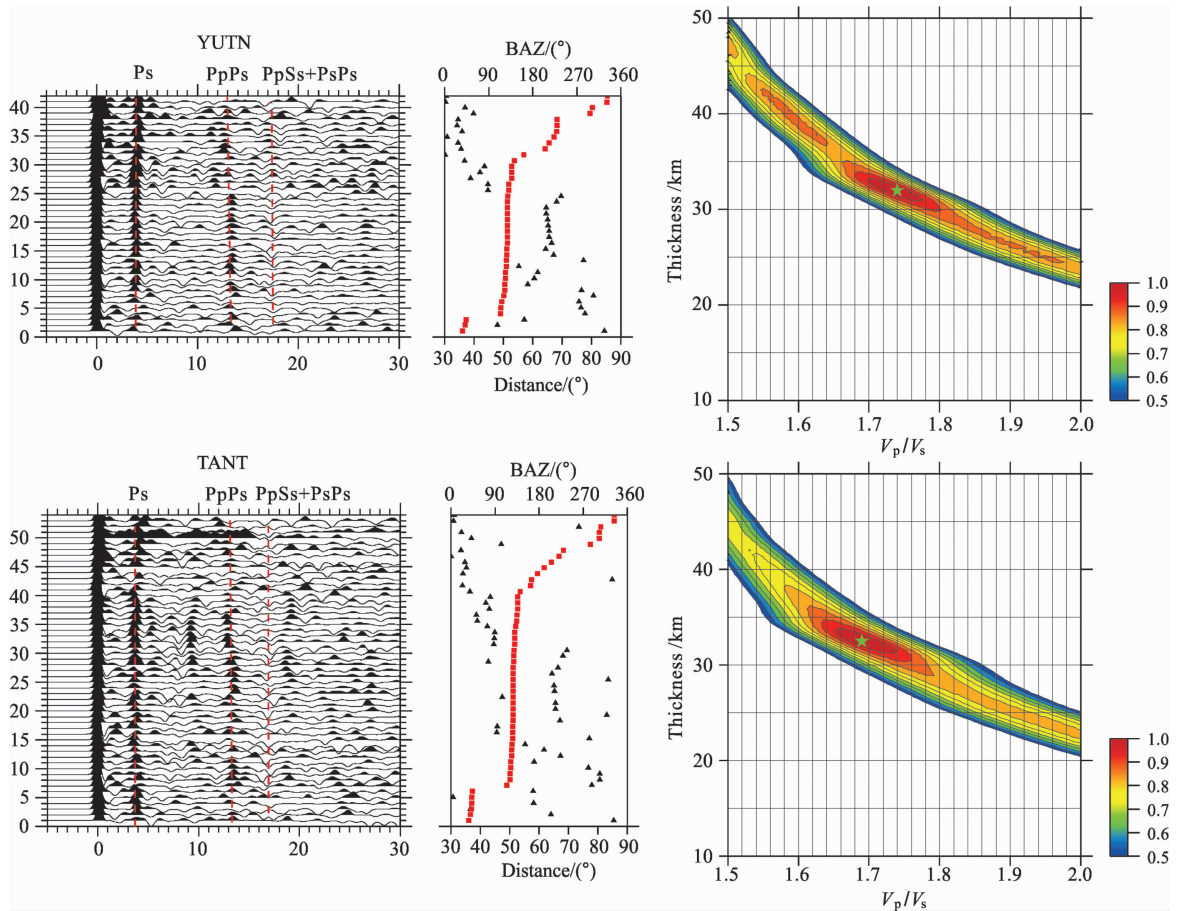


图 4 YUTN 台和 QIAM 台的接收函数排列和 $H-\kappa$ 叠加结果

接收函数按后方位角(图中红点)排列, Moho 的转换波(Ps)和它的两个多次波震相(PpPs, PpSs+PsPs)用红色虚线标出, 黑色三角表示震中距分布; 右图为相应的 $H-\kappa$ 叠加结果, 五角星标出了最佳估计点。

Fig. 4 Receiver functions of stations YUTN and TANT, sorted by back azimuth (shown as red dots)

The converted wave (Ps) from Moho and the multiple waves (PpPs, PpSs+PsPs) are marked by red dashed lines. Black triangles denote the distribution of the epicentral distances. $H-\kappa$ stacking results for the two stations are shown on the right with the green stars denoting the best estimations.

区的布格重力分布图上亦可看出, 沿闽江河谷的布格重力异常与南北两侧有明显差异^[31], GPS 和地壳形变测量结果也证明福建地区南北部的地壳现时运动和应变场存在显著的分带差异, 而且受 NW 向断裂带的控制^[32]. 这些地壳结构和物质组成的局部、次级的变化在区域地壳演化研究、矿产资源勘查和地震灾害研究等方面具有潜在的重要意义。

4 地壳与上地幔间断面成像结果

4.1 地壳上地幔顶部 CCP 偏移叠加成像

利用已有的折射及宽角反射地震剖面^[8-9]的地壳速度模型对 IASP91 地球速度模型^[33]的地壳部分作相应修正, 得到一个本地的一维速度结构模型, 用于进行时深偏移. 将叠加空间设置成沿测线方向 2 km, 横向垂直于测线方向宽度 150 km, 深度方向

0.5 km 的叠加单元. 射线沿测线方向的叠加宽度由菲涅尔带计算得到, 菲涅尔带的大小决定着对成像的平滑程度, 随着深度的增大, 菲涅尔带半径增大, 这实际等于应用了一个自地表到地下成锥状的平滑窗. 0~200 km 深度范围的 CCP 叠加是沿图 1 中的台站剖面 AA' 和 BB' 进行的, 结果如图 6a 所示. 人工源爆炸地震测深剖面 L(图 1)来自于国家地震局 1982 和 1985 年在福州—泉州—汕头地区的人工爆炸地震测深研究^[1], 其剖面位置与剖面 BB' 位置相近, 对剖面 L 地壳探测结果 Moho 深度进行采样, 并与 BB' 剖面的 CCP 偏移结果进行比较, 另外将各台站的 $H-\kappa$ 叠加结果也投影到剖面 BB', 对比如图 6b 所示.

剖面 AA' 和 BB' 的 CCP 偏移叠加剖面图显示, 沿两条剖面下方的 Moho 界面都表现为连续而强烈的转换震相正振幅, 界面较为平缓, 保持在 30 km

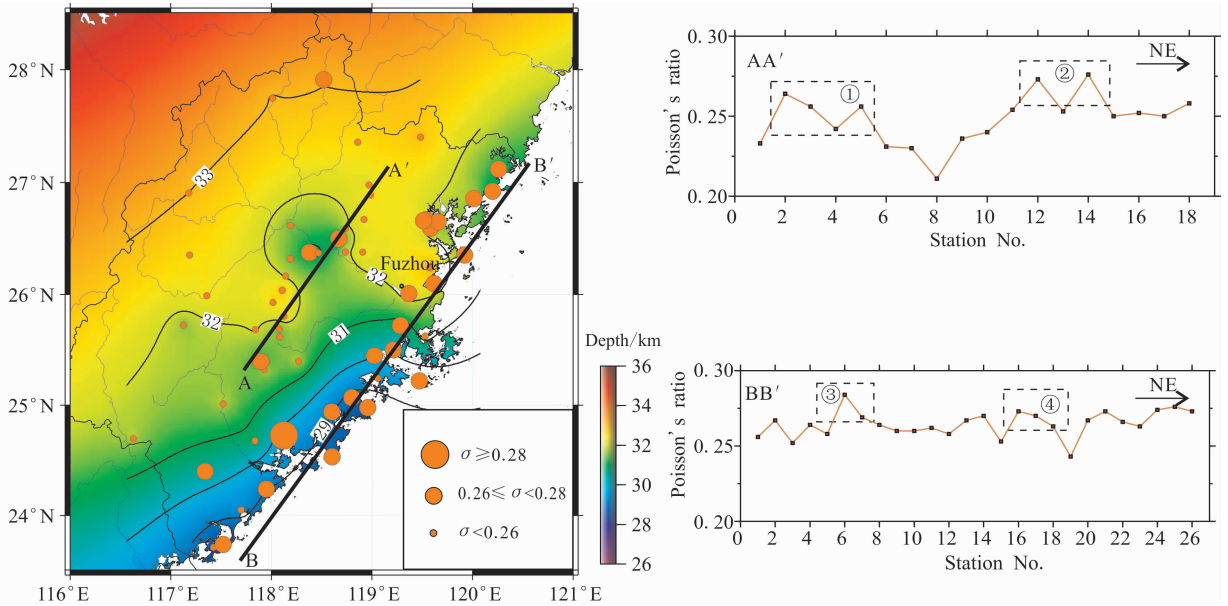


图 5 福建地区地壳厚度和泊松比分布图($H-\kappa$ 叠加结果)

橘黄色圆圈表示各台站相应的地壳泊松比大小;沿测线 AA' 和 BB' 的泊松比变化剖面图绘于右侧,图中虚线矩形框指出了几个 σ 相对高值异常区,其中:①对应晋江断裂和政和-大埔断裂带交汇区域,②对应闽江断裂和政和-大埔断裂带交汇区域,③对应九龙江断裂和长乐-诏安断裂带的交汇区域,④对应闽江断裂和长乐-诏安断裂带的交汇区域。

Fig. 5 The distribution of crustal thicknesses beneath Fujian region from $H-\kappa$ stacking results

Poisson's ratios for the stations are marked on the map with orange filled circles. The sections of Poisson's ratios along line AA' and BB' are plotted on the right side with 3 dashed rectangular box outlining the relatively high σ anomalies. Box ①: intersection area of Jinjiang Fault and Zhenghe-Dabu Fault; Box ②: intersection area of Minjiang Fault and Zhenghe-Dabu Fault; Box ③: intersection area of Jiulongjiang Fault and Changle-Zhao'an Fault; Box ④: intersection area of Minjiang Fault and Changle-Zhao'an Fault.

左右深度水平上小幅变化,总体呈现为南浅北深趋势。两条剖面与闽江河谷相交处的 Moho 都出现了突变的迹象,在内陆剖面 AA' (约 26.4°N 处)上, Moho 转换震相表现的断裂特征并不太明显,但从位于 100 km 深度的多次波上可分辨其变化;沿海剖面 BB' 跨过闽江处(约 26°N)和宁德三都澳(约 26.7°N)的 Moho 可见较明显的下沉,下沉幅度约为 3~4 km。从 BB' 剖面的 CCP 偏移结果、 $H-\kappa$ 叠加结果与前人的爆炸地震探测结果的比较(图 6b)可以发现,三者一致反映了沿海地区 Moho 深度南浅北深的变化趋势,宽频带天然源地震探测结果与人工源地震探测结果基本保持一致(在 24.5° 位置宽频地震台站向内陆偏离较远,所以此处对比结果有偏差),且可发现晋江断裂(25°N)到兴化湾断裂(25.5°N)之间,即泉州到莆田之间的 Moho 界面较其两侧有较明显的抬升^[1]。

4.2 上地幔转换带 CCP 偏移叠加成像

两条测线所有台站所记录接收函数在上地幔 410 km 和 660 km 深度的穿入点(piercing points)在地表的投影位置分布如图 7a 所示,它们沿北东向

成带状分布,我们将上地幔深度的 CCP 叠加设置为穿入点分布最为密集的 CC' 剖面,平面研究区域如图 7a 矩形框所示,叠加空间被设置为沿测线方向 5 km,横向垂直于测线方向宽度 200 km,深度方向 0.5 km 的叠加单元,穿过每个叠加单元接收函数数量如图 7b 所示,除去边缘部分外,大部分叠加单元内的接收函数数量都大于 30,可见数据的覆盖密度是可靠的。在进行叠加之前,先用一个零相位 Butterworth 带通滤波器对所有接收函数进行滤波,拐角频率取为 0.03~0.2 Hz。

上地幔主要间断面的 CCP 偏移叠加成像结果如图 7b 所示,如图可见,研究区的 410 km 和 660 km 都清晰地表现为强烈的正振幅震相界面,保持平缓而连续,未发现剧烈起伏和突变,其深度均大于 IASP91 全球标准模型的界面深度,其中 410 km 界面深度在 430 km 左右,660 km 界面深度在 678 km 左右,但两个界面间的上地幔转换带的厚度接近全球平均值 250 km(± 5 km)。520 km 间断面是一个 β 相尖晶石到 γ 相尖晶石的相变面^[34],在图中也能清晰地观察到,深度为 520 km,但不连续。

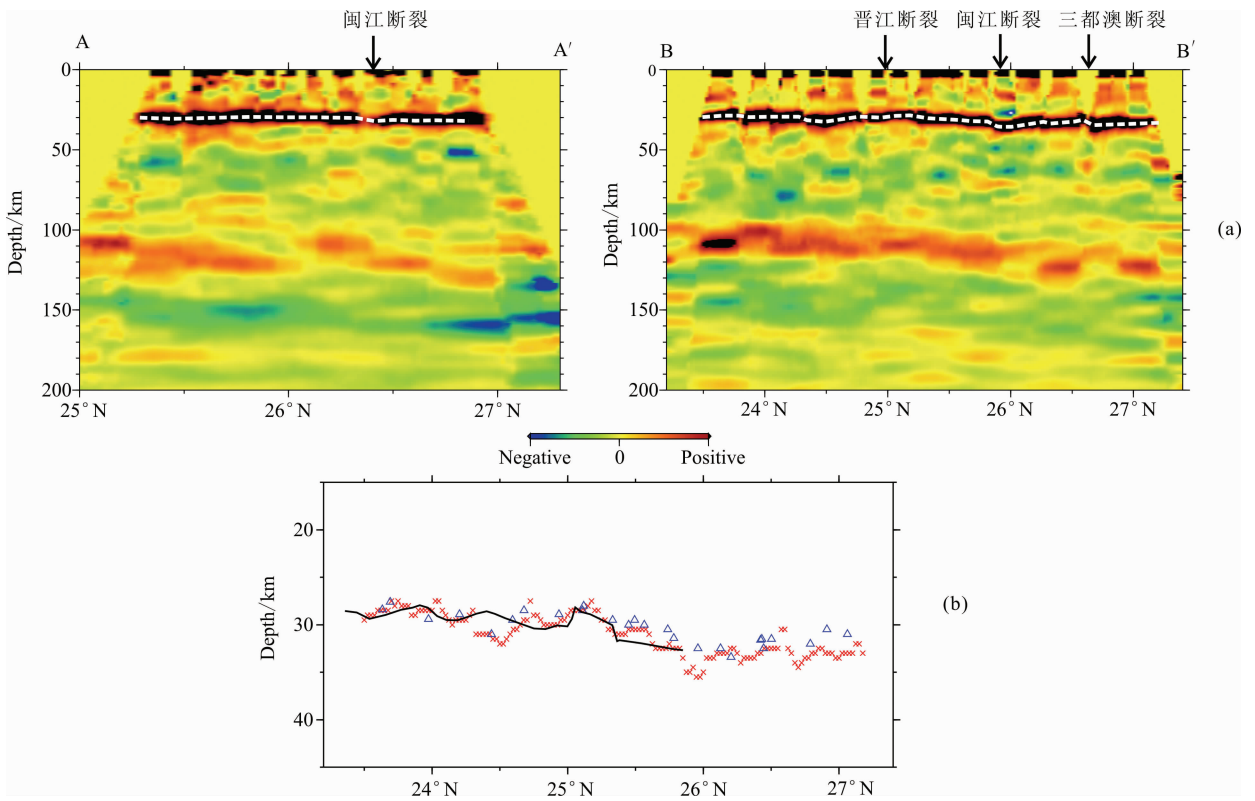


图 6 (a) 测线 AA' 和 BB' 的 CCP 叠加剖面图 (0~200 km), 红色和黑色表示正振幅 (表示速度向下增加), 蓝色和绿色表示负振幅 (表示速度向下减小), 闽江断裂、晋江断裂和三都澳断裂的位置在图中用箭头标出; (b) CCP 偏移结果 (红色 × 表示来自 Moho 的 Ps 转换震相的最大振幅点)、 $H-\kappa$ 叠加结果 (蓝色三角) 与人工源地震探测结果 (黑实线) 所得 Moho 深度的比较, 各台站的 $H-\kappa$ 叠加结果被投影到 BB' 剖面, 人工源地震剖面位置见图 1

Fig. 6 (a) CCP migrated receiver function stacking images (0~200 km) along profiles AA' and BB'. Reddish black colors indicate positive (velocity increasing downwards) and bluish green colors negative (velocity decreasing downwards) signals. Locations of Minjiang Fault, Jinjiang Fault and Ningde Sanduao Fault are denoted with little arrows on the top of the images. (b) Comparison of Moho depth from CCP migration (red "×"s indicate the tops of the Ps converted phases from the Moho), $H-\kappa$ stacking (blue triangles) and explosive seismic profile (black bold line). $H-\kappa$ stacking results of each station are projected to the profile BB'. See Fig. 1 for the explosive profile

5 结果讨论

5.1 中国大陆东南缘地壳减薄及泊松比分布

本研究两条平行海岸线剖面的 $H-\kappa$ 叠加扫描结果, 在空间上与前人垂直海岸线剖面的结果^[14-17]相协调. 新的数据和对比分析结果进一步证实华南地区地壳厚度从内陆到沿海呈线性减薄, 并在此基础上进一步揭示了地壳在平行海岸线方向 (近平行区域构造走向) 的局部起伏和分块特征. 为深入理解中国大陆东南缘的动力学和成矿背景提供了新的深部信息. 中国大陆东南缘地壳厚度的分布, 与中国大陆东南缘所处的板块构造环境有关, 在现今板块构造动力体制下, 台湾海峡及中国大陆东南缘总体处于弧后伸展环境, 地幔上隆, 大陆边缘处于“自由”边

界, 地壳“蠕散”作用使其缓慢减薄^[35].

地壳泊松比在垂直大陆边缘方向的分带性前人已有论述^[14,16], 本文的结果以更为密集的观测补充提供了新的特征, 在沿海和内陆两条剖面上揭示了泊松比在 NE 向变化的细节. 沿海剖面 BB' 台站泊松比平均值为 0.265, 明显高于内陆地区 (0.248), 泊松比分布的分带特征比地壳厚度变化更为明显.

地壳泊松比大小依赖于地壳岩石的石英质含量变化, 而岩浆岩的石英质含量与其源区深度密切相关, 源区深度越大石英含量越低. 华南地区的地壳结构定型于燕山运动. 燕山期多期次岩浆侵入和火山活动 (时代逐渐变新) 对地壳的添加, 改变了地壳的物质组成. 早燕山期 (180~142 Ma) 形成的大量的过铝质花岗岩 (石英质含量高) 主要分布于内陆一侧, 而晚燕山期 (142~67 Ma) 形成的高钾钙碱性花

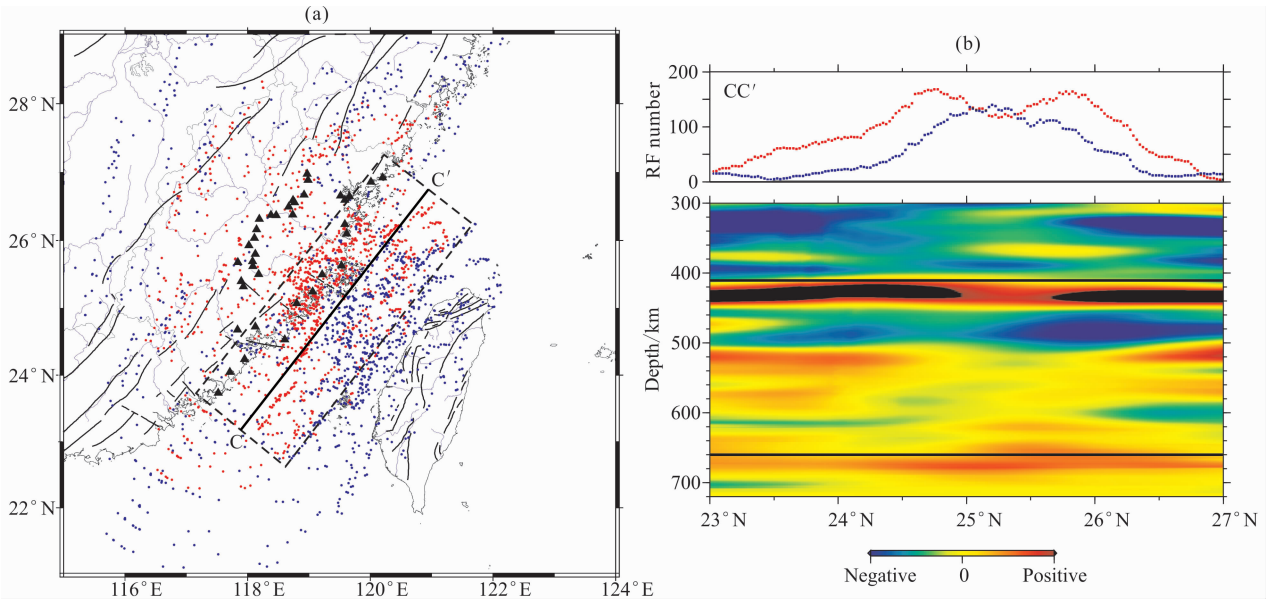


图7 (a) 穿入点分布图. 红点和蓝点分别表示P波接收函数在410 km和660 km深度处的穿入点位置, 虚线矩形框表示CCP叠加所涉及的范围, 叠加剖面CC'处于矩形框的中线位置; (b) 沿剖面CC'的上地幔转换带偏移叠加成像图(300~700 km). 黑色实线为IASP91模型410 km和660 km深度线; 上图中的红色和蓝色点曲线分别代表410 km和660 km深度处穿过每个叠加单元接收函数数量(RF number)

Fig. 7 (a) Piercing points of P-receiver functions at 410 km (red dots) and 660 km (blue dots). The dashed rectangular box outlines the area of piercing points involved in the CCP stacking, with a stacking profile CC' located in the center of the box. (b) Migrated image of mantle transition zone (300 ~ 700 km) along profile CC'. 410 km and 660 km discontinuities from IASP91 model are marked with black solid lines on the image. The red and blue dots on the top denote the number of receiver functions (RF number) passing through each bin at 410 km and 660 km

岗岩更为广泛地分布在沿海地带. 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). 而沿海地带的显著高泊松比, 可能是深部的铁镁质岩浆的底侵作用的结果^[36-37].

地壳泊松比相对异常高值区与断裂带的交汇区域具有很好的对应关系, 人工源地震研究结果亦证实了这一点^[1]. 用Wan等^[38]的观点可以解释为什么地壳泊松比异常高值区与断裂带的交汇区域具有的对对应关系. Wan等认为, 构造断裂-圈层滑脱与洋陆过渡型岩石圈的存在是造成中国东部岩浆起源的主要原因, 构造岩浆活动主要发生在区域性的深大断裂与岩石圈各界面的的交切带附近, 断层切割深度的不同造成了不同类型的岩浆活动, 而且区域性的主干断裂很容易成为岩浆上侵或喷出的通道, 更多的基性岩浆物质上侵到壳内并在断裂带附近富集, 造成了断裂带的交汇区域地壳泊松比值的异常高.

5.2 中国东南大陆边缘地壳结构的侧向变化

中国大陆东南缘福建沿海地区的构造地貌由NE向和NW向2组断裂控制, NE向断裂带有政

和一大埔断裂带、长乐—诏安断裂带和滨海断裂带; NW向主要有韩江断裂、九龙江断裂、晋江断裂、兴化湾断裂和闽江断裂等^[39].

前人在中国大陆东南边缘地区所开展的人工源或天然源的地震探测剖面, 多数垂直于NE向构造布置, 较少针对NW向构造开展研究, 仅有廖其林等利用人工源地震^[1-2]和邵学钟等^[29]利用天然地震转换波对中国大陆东南边缘地壳结构进行了初步研究, 其反映晋江、闽江断裂在深部可能延伸较大, 而且平行区域构造走向地壳结构也存在较大差异. 结合已有NW向剖面研究结果^[14-17], 本文两条宽频地震接收函数剖面进一步证实, 在中国大陆东南缘地区, 平行区域构造走向的地壳结构不均匀性可能并不亚于垂直构造走向的变化.

NE向布设的两条接收函数剖面CCP偏移叠加图像揭示, 在地壳从内陆向沿海总体减薄的背景下, 沿大陆海岸线方向, Moho面也有较明显起伏和错断. 自南西向北东跨过晋江断裂有小幅的起伏变化, 且晋江断裂到兴化湾断裂之间的Moho界面较其两侧有较明显的抬升, 跨过闽江断裂和三都澳断裂, Moho有3~4 km快速下沉和产状变化(图6).

这些结果与前人的人工源地震探测结果保持一致。

闽江断裂构成闽中东部地区的地壳厚度的一条重要分界线,以其为界,以南地壳厚度普遍小于 32 km,以北地壳厚度普遍大于 32 km. 研究资料显示,闽江等 NW 向断裂是一组较新的、活动性强烈的左旋张性断裂,几乎切割错断了其他所有方向的断裂,对福建沿海地区的地震、地热等地壳内部活动起着明显的控制作用^[2, 29-30]. 上述 NW 向断裂的地震活动性(强度)向南递增,强震一般发生在 NE 向和 NW 向断裂交会的部位^[39-40].

对比剖面 AA' 和 BB', 发现 Moho 界面在 BB' (沿海剖面)受闽江断裂等 NW 向断裂的影响较 AA' (内陆剖面)更明显,这似乎表明,这些 NW 向断裂与更新世晚期以来活动增强的滨海断裂关系更密切. 闽江断裂等 NW 向断裂深切 Moho 界面对中国大陆东南缘的深部动力学研究是一个重要信息,它表明 NW 向断裂在该区现今板块动力学体系中也扮演着重要角色.

中国大陆东南缘,现今构造应力场主要受菲律宾海板块与欧亚板块碰撞俯冲机制控制,由于菲律宾海板块与欧亚板块碰撞俯冲的形式以台湾花莲为节点由伸展转换为挤压,作者认为可能是逆时针的张扭作用导致了中国大陆东南西缘自南西而北东的地壳厚度增大及闽江、晋江等不同规模的 NW 向转换断层的发育.

5.3 中国大陆东南缘上地幔转换带特征

410 km 和 660 km 速度间断面分别是 α 橄榄石到 β 相尖晶石的相变面和 γ 相尖晶石到钙钛矿+镁质方铁矿的相变面,Clapeyron 斜率在两个相变面的变化决定了,上地幔转换带厚度的大小取决于转换带内温度的高低^[41]. 中国大陆东南缘(包括台湾海峡)上地幔主要速度间断面 410 km 和 660 km 在横向上未发现明显突变或起伏,与 Ai 等先前的结果一致^[14]. 虽然两个界面的绝对深度略大于 IASP91 全球标准模型的界面深度,但上地幔转换带厚度与全球平均值保持一致,暗示了此区上地幔转换带温度保持正常状态,进一步表明,无论在横向上和还是纵向上,中国大陆东南缘和台湾海峡地区的上地幔转换带都未受到欧亚大陆板块与菲律宾板块碰撞的明显影响.

6 结 论

综上所述,得到如下结论:

(1)野外采集和初步处理结果表明,宽频带地震观测用以探测中国大陆东南沿海岩浆岩出露区壳幔结构是有效的方法.

(2)中国大陆东南缘(福建地区)地壳厚度从内陆到沿海大致呈线性减薄,从闽西北山区的 33 km 减薄到沿海一带的不足 29 km,符合大陆地壳向大洋地壳过渡的一般特征;沿剖面地壳厚度向北东方向略有增大,主要与各地段所处板块动力环境有关. 地壳泊松比向海岸线方向增加趋势与前新生代地壳演化过程有关. 沿海地带泊松比异常高可能是来自深部的铁镁质岩浆的底侵作用的结果. 沿剖面的地壳泊松比相对高值区与断裂带的交汇区域具有很好的对应关系. 区域性的主干断裂很容易成为岩浆上侵或喷出的通道,更多的基性物质自断裂交汇区深部添加到地壳,造成了该处地壳泊松比值异常高.

(3)闽江断裂等 NW 向断裂深切 Moho 界面,将中国大陆东南缘自南而北划分出不同的地壳块体,表明 NW 向断裂在中国大陆东南缘的现今深部动力学体系中也扮演着重要角色. 闽江等 NW 向断裂对研究区的地震、地热、地壳应变等因素有着重要的控制作用,应引起足够重视. 目前亟待查明闽江等断裂向台湾海峡内部延伸的状态,以便更好理解菲律宾板块与欧亚板块碰撞如何向中国大陆东南缘过渡和传递.

(4)本次观测结果表明,在中国大陆东南缘从内陆到沿海 250 km 范围的条带状区域内,未见上地幔 410 km 和 660 km 间断面有可辨别的突变或起伏,其绝对深度略大于 IASP91 模型,但上地幔转换带厚度与全球平均值保持一致,暗示了研究区上地幔转换带温度处于正常状态. 可知中国大陆东南缘和台湾海峡下方的上地幔转换带未受到欧亚大陆板块与菲律宾板块碰撞的明显影响.

致 谢 原始资料采集过程中得到福建省地震局及市县地震部门的大力支持;论文撰写过程中得到张洪双博士和史大年研究员的帮助,中国科学院青藏高原研究所刘启民博士在数据处理上给予耐心指导,衷心感谢审稿专家及兰州地震研究所沈旭章博士对本文提出的建设性意见.

参考文献(References)

- [1] 廖其林,王振明,王屏路等. 福州—泉州—汕头地区地壳结构的爆炸地震研究. 地球物理学报, 1988, 31(3): 270-280.
Liao Q L, Wang Z M, Wang P L, et al. Explosion seismic study of the crustal structure in Fuzhou-Quanzhou-Shantou region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1988, 31(3):

- 270-280.
- [2] 廖其林, 王振明, 丘陶兴等. 福州盆地及其周围地区地壳深部结构与构造的初步研究. *地球物理学报*, 1990, 33(2): 163-173.
- Liao Q L, Wang Z M, Qiu T X, et al. Preliminary research of the crustal structure in Fuzhou basin and its adjacent area. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1990, 33(2): 163-173.
- [3] 章慧芳. 中国东南沿海地区泉油爆破深地震测深资料的再解释. *中国地震*, 1988, 4(2): 96-105.
- Zhang H F. Explanation for data of DSS profiles at Quanshan area in the coast of Southeast China. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 1988, 4(2): 96-105.
- [4] 丘陶兴, 廖其林, 王振明等. 福建沿海地区地壳 S 波速度结构和泊松比分布特征. *华南地震*, 1991, 11(2): 23-30.
- Qiu T X, Liao Q L, Wang Z M, et al. The S wave velocity structure and Poisson's ratio distribution characteristic in Fujian coastal area. *South China Journal of Seismology* (in Chinese), 1991, 11(2): 23-30.
- [5] 熊绍柏, 金东敏, 孙克忠等. 福建漳州地热田及其邻近地区的地壳深部构造特征. *地球物理学报*, 1991, 34(1): 55-63.
- Xiong S B, Jin D M, Sun K Z, et al. Some characteristics of deep structure of the Zhangzhou geothermal field and its neighbourhood in the Fujian Province. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1991, 34(1): 55-63.
- [6] 袁学诚. 阿尔泰—台湾地学断面论文集. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997.
- Yuan X C. Memoirs of the Geoscience Transection for the Continental Lithosphere Beneath Altay-Taiwan, China (in Chinese). Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997.
- [7] 王椿镛, 林中洋, 陈学波. 青海门源—福建宁德地学断面综合地球物理研究. *地球物理学报*, 1995, 38(5): 590-598.
- Wang C Y, Lin Z Y, Chen X B. Comprehensive study of geophysics on geoscience transect from Menyuan, Qinghai Province, to Ningde, Fujian Province, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1995, 38(5): 590-598.
- [8] Zhu J F, Xu X W, Zhang X K, et al. Joint exploration of crustal structure in Fuzhou basin and its vicinities by deep seismic reflection and high-resolution refraction as well as wide-angle reflection/refraction. *Science in China (Ser. D: Earth Sciences)*, 2005, 48(7): 925-938.
- [9] Zhu J F, Fang S M, Zhang X K, et al. Exploration and research of deep crustal structures in the Zhangzhou basin and its vicinity. *Earthquake Research in China*, 2006, 20(4): 412-425.
- [10] Zhang Z J, Badal J, Li Y K, et al. Crust-upper mantle seismic velocity structure across Southeastern China. *Tectonophysics*, 2005, 395(1-2): 137-157.
- [11] Zhang Z J, Zhang X, Badal J. Composition of the crust beneath southeastern China derived from an integrated geophysical data set. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(B4): B04417, doi: 10.1029/2006JB004503.
- [12] Zhang Z J, Teng J W, Badal J, et al. Construction of regional and local seismic anisotropic structures from wide-angle seismic data: crustal deformation in the southeast of China. *Journal of Seismology*, 2009, 13(2): 241-252.
- [13] Zhang Z J, Xu T, Zhao B, et al. Systematic variations in seismic velocity and reflection in the crust of Cathaysia: New constraints on intraplate orogeny in the South China continent. *Gondwana Research*, 2012, doi: 10.1016/j.gr.2012.05.018.
- [14] Ai Y S, Cheng Q F, Zeng F, et al. The crust and upper mantle structure beneath southeastern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 260(3-4): 549-563.
- [15] 袁丽文, 郑斯华. 用远震接收函数反演福建地区宽频带台站下方莫霍界面深度. *华南地震*, 2009, 29(3): 85-97.
- Yuan L W, Zheng S H. Moho depths beneath broad-band stations in Fujian area inverted by teleseismic receiver function. *South China Journal of Seismology* (in Chinese), 2009, 29(3): 85-97.
- [16] 黄晖, 米宁, 徐鸣洁等. 福建地区地壳上地幔 S 波速度结构与泊松比. *高校地质学报*, 2010, 16(4): 465-474.
- Huang H, Mi N, Xu M J, et al. S-wave velocity structures of the crust and uppermost mantle, and Poisson's ratios in Fujian Province. *Geological Journal of China Universities* (in Chinese), 2010, 16(4): 465-474.
- [17] Huang Z C, Wang L S, Zhao D P, et al. Upper mantle structure and dynamics beneath Southeast China. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2010, 182(3-4): 161-169.
- [18] Zheng H W, Gao R, Li T D, et al. Collisional tectonics between the Eurasian and Philippine Sea plates from tomography evidences in Southeast China. *Tectonophysics*, 2013.
- [19] Ligorria J P, Ammon C J. Iterative deconvolution and receiver-function estimation. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1999, 89(5): 1395-1400.
- [20] Zhu L P. Lateral variation of the Tibetan lithospheric structure inferred from teleseismic waveforms. // Chen Y T, Teng J W, Kan R J, et al eds. *Advancements in Seismology and Physics of the Earth Interior in China*. Beijing: Seismological Press, 2004: 295-310.
- [21] Yuan X H, Ni J, Kind R, et al. Lithospheric and upper mantle structure of southern Tibet from a seismological passive source experiment. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(B12): 27491-27500.
- [22] Kikuchi M, Kanamori H. Inversion of complex body waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1982, 72(2): 491-506.
- [23] Zhu L P, Kanamori H. Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(B2): 2969-2980.
- [24] Zhu L P. Crustal structure across the San Andreas Fault, southern California from teleseismic converted waves. *Earth*

- and Planetary Science Letters*, 2000, 179(1): 183-190.
- [25] Zhu L P. Deformation in the lower crust and downward extent of the San Andreas Fault as revealed by teleseismic waveforms. *Earth Planets Space*, 2002, 54(11): 1005-1010.
- [26] Ji S C, Wang Q, Salisbury M H. Composition and tectonic evolution of the Chinese continental crust constrained by Poisson's ratio. *Tectonophysics*, 2009, 463(1-4): 15-30.
- [27] 嵇少丞, 王茜, 杨文采. 华北克拉通泊松比与地壳厚度的关系及其大地构造意义. *地质学报*, 2009, 83(3): 324-330.
Ji S C, Wang Q, Yang W C. Correlation between crustal thickness and Poisson's ratio in the North China Craton and its implication for lithospheric thinning. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 2009, 83(3): 324-330.
- [28] 杨文采, 瞿辰, 于长青. 华北东部地区地壳泊松比异常及其成因. *地学前缘*, 2011, 18(3): 13-21.
Yang W C, Qu C, Yu C Q. High Poisson's ratio anomalies in the crust of the eastern part of North China and its origin. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2011, 18(3): 13-21.
- [29] 邵学钟, 顾忠华, 张家茹. 福州地区地壳结构的地震转换波测深研究. *地震地质*, 1993, 15(2): 174-180.
Shao X Z, Gu Z H, Zhang J R. Investigation of crust structure in Fuzhou area by means of converted waves of earthquakes. *Seismology and Geology* (in Chinese), 1993, 15(2): 174-180.
- [30] 陈宗基, 孔祥儒, 刘云龙. 福建地热地球物理研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1992.
Chen Z J, Kong X R, Liu Y L. The Studies on Geothermal Geophysics in Fujian Province (in Chinese). Beijing: Science & Technology Press of China, 1992.
- [31] 张季生, 高锐, 李秋生等. 台湾海峡及邻区地球物理特征及地壳密度结构. *地质论评*, 2008, 54(5): 694-698.
Zhang J S, Gao R, Li Q S, et al. Geophysical characteristic and density structure of crust in Taiwan Strait and neighboring area. *Geological Review* (in Chinese), 2008, 54(5): 694-698.
- [32] 周硕愚, 吴云, 施顺英等. 中国大陆东南边缘海现时地壳运动与地震动力学综合研究. *地壳形变与地震*, 2001, 21(1): 1-14.
Zhou S Y, Wu Y, Shi S Y, et al. Integrated research on current crustal movement and earthquake dynamics in marginal sea, Southeast of China continent. *Crustal Deformation and Earthquake* (in Chinese), 2001, 21(1): 1-14.
- [33] Kennett B L N, Engdahl E R. Traveltimes for global earthquake location and phase identification. *Geophysical Journal International*, 1991, 105(2): 429-465.
- [34] Shearer P M. Transition zone velocity gradients and the 520 km discontinuity. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101(B2): 3053-3066.
- [35] Li Q S, Gao R, Wu F T, et al. New observation results of the crust and upper mantle seismic structure in the southeastern China using teleseismic receiver functions. *Tectonophysics*, 2013.
- [36] Zhou X M, Li W X. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. *Tectonophysics*, 2000, 326(3-4): 269-287.
- [37] Zhou X M, Sun T, Shen W Z, et al. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution. *Episodes*, 2006, 29(1): 26-33.
- [38] Wan T F, Zhao Q L. The genesis of tectono-magmatism in eastern China. *Science in China Earth Sciences*, 2012, 55(3): 347-354.
- [39] 张路, 曲国胜, 朱金芳等. 福建沿海盆地第四纪构造运动模式与动力学环境. *地质通报*, 2007, 26(3): 275-288.
Zhang L, Qu G S, Zhu J F, et al. Model of Quaternary tectonic movement and dynamic setting of basins along the coast of Fujian, China. *Geological Bulletin of China* (in Chinese), 2007, 26(3): 275-288.
- [40] 张虎男. 福建长乐—诏安断裂带的新构造运动. *地质学报*, 1987, (3): 231-239.
Zhang H N. Characteristics of the neotectonic movement of the Changle-Zhao' An Fault belt in Fujian. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 1987, (3): 231-239.
- [41] Bina C R, Helffrich G R. Phase transition Clapeyron slopes and transition zone seismic discontinuity topography. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(B8): 15853-15860.

(本文编辑 胡素芳)