华南地块及其邻区Rayleigh波相速度层析成像研究

吕坚^{①②*}, 谢祖军^②, 郑勇^②, 查小惠^①, 胡睿^①, 曾新福^①

① 江西省地震局, 南昌 330039;

② 大地测量与地球动力学国家重点实验室, 中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉 430077

* E-mail: lvjian8438@163.com

收稿日期: 2016-03-22; 接受日期: 2016-07-21; 网络版发表日期: 2016-09-22

地震科技星火计划项目(编号: XH16023、XH12027)、国家自然科学基金优秀青年基金项目(批准号: 41422401)、地震行业科研专项项目(编号: 201508020-05)资助

摘要 基于华南地块及其邻区609个宽频带地震台站2010~2012年的垂直分量连续波形记录, 通过波形互相关和叠加计算得到各台站对间的经验格林函数. 采用时频分析法提取出大量高质量的Rayleigh波相速度频散曲线, 并反演得到了研究区周期6~50s的Rayleigh波相速度分布图像. 结果显示周期6~10s的相速度分布与地壳中上部地质特征一致性较好, 区域内的主要盆地和一些小尺度地堑和盆地呈现低速异常, 造山带和褶皱带则呈现高相速度分布特征; 周期20~30s的相速度分布以太行山-武陵山重力梯度带和地壳厚度突变带为界, 西部地区主要表现为低速异常, 东部地区则整体表现为高速异常, 其中秦岭-大别造山带以南的华南地块东部相对以北的华北地块东部而言具有相对更高的相速度, 可能与中生代以来华北克拉通和华南地块的构造演化存在差异有关; 周期40~50s的相速度分布主要与下地壳和上地幔速度结构的横向变化有关, 青藏高原东部因地壳厚度较厚表现为显著的低速异常, 华北平原东南部和华南沿海地区表现为相对的高低速相间分布, 四川盆地、鄂尔多斯盆地南部表现为显著高速异常, 体现这两个块体稳定的上地幔岩石圈特征. 从不同周期的相速度分布来看, 华南地块西边界南段在云南南部及附近地区, 相速度分布与当前的块体边界划分不太相符, 仍需要深入研究. 四川盆地相速度随着周期的增加存在“整体低速-盆地中部向外渐变高速-整体高速”的分布特点, 反映了该盆地中部结晶基底和上地幔的高速. 位于华北地块的鄂尔多斯盆地南部中上地壳存在一定程度的非均匀性, 下地壳-上地幔顶部可能存在高速异常体. 秦岭-大别造山带中段和位于桂东南的广西加里东期花岗岩分布区域在一定的周期范围存在显著高速异常体, 其形成机理有待进一步分析.

关键词 华南地块, 背景噪声, 相速度层析成像, 地壳上地幔

1 引言

根据国家重点基础研究发展计划《大陆强震机理与预测》项目的研究成果, 中国大陆及邻区可以划

分为青藏、西域、滇缅、华南、华北和东北亚6个I级地块(张培震等, 2003; 张国民等, 2004). 其中华南地块在新构造运动上属于比较稳定的地块(图1), 其北边界为秦岭-大别山构造带及其向海域的延伸部分; 西

中文引用格式: 吕坚, 谢祖军, 郑勇, 查小惠, 胡睿, 曾新福. 2016. 华南地块及其邻区Rayleigh波相速度层析成像研究. 中国科学: 地球科学, 46: 1528-1541, doi: 10.1360/N072015-00372
英文引用格式: Lü J, Xie Z J, Zheng Y, Zha X H, Hu R, Zeng X F. 2016. Rayleigh wave phase velocities of South China block and its adjacent areas. Science China Earth Sciences, 59: 2165-2178, doi: 10.1007/s11430-015-5372-5

边界为龙门山-小江断裂带;南边界从云南的红河断裂向西南,横切北部湾,经海南岛北部转向北延伸;东边界沿东南沿海向北,经台湾海峡,再沿琉球岛弧西部延伸(张培震等, 2013).

华南地块具有漫长而复杂的演化过程,经历了多次构造-岩浆-热事件,造成了现今地壳物质成分的复杂性和构造样式的多样性(张国伟等, 2013). 其东南部受到太平洋、菲律宾海板块与欧亚板块的相互作用,出现板块俯冲、岛弧形成和大陆增生的地球动力学特征;而西部则主要受到青藏高原隆升推挤形成系列造山带,引起岩石圈内部变形的构造特征(朱介寿等, 2005; 熊小松等, 2009). 从大地构造特征来看,华南地块自西向东由扬子地块、华夏地块(包括赣湘桂地块、东南沿海地块)及东海大陆架拼合而成(朱介寿等, 2005),经历了加里东、印支和燕山构造运动复杂的变形过程,也造就了区域矿产和油气等资源的独特形成和储存地质条件,为国家的经济发展提供了支撑. 因此,关于华南大陆的地壳上地幔速度结构、岩石圈形成演化过程和大陆再造的动力学机制一直是地球科学研究的热点(许靖华等, 1987; 任纪舜等, 1990; 郭令智, 2001; 郑永飞和张少兵, 2007; 袁学诚和华九如, 2011; 舒良树, 2012; 张岳桥等, 2012),前人通过人工地震测深和天然地震波层析成像方法得到了许多重要成果(袁学诚, 1997; 廖其林等, 1987, 1990; 陈学波, 1994; 王椿镛等, 1997; 朱介寿等, 2005; 嘉世旭等, 2006; Li等, 2013),这些成果对于我们研究和理解华南大陆的形成与演化提供了重要的深部证据. 但总体而言,早期的人工地震测深测线较少,研究程度并不高,且主要局限于P波速度结构的研究,而近期福建省地震局主持的“福建及台湾海峡深部构造海陆联测项目”尚在进行中. 受地震活动性弱和分布不均匀、台网密度和定位精度的制约,华南地块已有的基于天然地震的面波层析成像研究结果分辨率也较低(2° 以上),难以分辨出较小的构造块体,且短周期的频散测量较少,对浅部的速度结构约束较差(朱介寿等, 2005; Li等, 2013).

近几年来,从地震背景噪声中提取两个台站格林函数的方法已经被理论和实践证明是一种非常有效的方法(Shapiro等, 2005; Bensen等, 2007),并被广泛应用于研究各地区的地壳和上地幔顶部速度结构,研究区域包括北美大陆(Liang和Langston, 2008; Yang等, 2008a; Bensen等, 2009)、新西兰岛(Lin等, 2007)、欧

洲大陆(Yang等, 2007)和中国大陆地区(Yao等, 2006; Zheng等, 2008; 房立华等, 2009; Guo等, 2009; Li等, 2009; 李昱等, 2010; Yang等, 2010; Sun等, 2010; 潘佳铁等, 2014)等. 与天然地震面波成像方法相比,背景噪声成像(ANT)方法能够获取短周期的频散,对地球浅部结构有着较好的分辨能力,可以克服地震分布不均匀性的限制和由于地震震源不确定而引起的误差,理论上任何两个地震台之间的面波格林函数都可以通过噪声获得. 郑现等(2012)曾采用背景噪声成像方法讨论了中国大陆中东部地区Rayleigh波群速度图像和地质构造特征的关系,结果显示短周期的瑞利波群速度在研究区内的主要盆地表现为低速分布,而在造山带呈现高速分布;中长周期的瑞利波群速度图中存在一条北北东-南南西向的分界线,该分界线与中国大陆东部的地壳厚度突变带基本吻合,四川盆地下方基底具有上隆特征. 该研究涉及到了华南地块的主体区域,总体成像分辨率达到 0.5° ,但结果对华南地块的西边界和南边界约束有限,采用的台站对格林函数信噪比偏低,且研究的是群速度图像,没有对相速度进行分析,而相速度的准确性和分辨率在通常情况下比群速度高很多,因此,单纯的群速度对于精确了解地下结构存在着不足. Zhou等(2012)采用背景噪声和天然地震联合反演的方法研究了华南地块的Rayleigh波群速度、相速度和SV波速度图像,结果显示出包含四川盆地的西扬子块体地壳和岩石圈相对于东扬子克拉通和华南褶皱带都较厚,其揭示了华南块体东南部受太平洋板块北西向平俯冲和随后的板块回撤作用,西北部受青藏高原物质东移扩张的作用,因此东扬子克拉通和华南褶皱带受侵蚀而变薄,西扬子块体及四川盆地受阻挡而增厚,这一成果对于认识华南地块形成演化具有重要的意义. 由于该成果采用的资料时段为2009~2010年,这一时期区域内各省台网的宽频带台站数量相对要少,高信噪比长周期频散曲线的数量有待提升,结果对华南地块的北边界研究也存在一些不足,而秦岭-大别山构造带自身就是一条具有重要科学意义的古老造山带(刘启元等, 2005; 郑永飞和吴福元, 2009).

要深入认识华南地块的构造及其演化特征,获取完整的、可靠的、高精度的速度结构是非常必要的. 同时,高分辨率的速度结构还可以提供与地震发生位置及震源介质有关的重要信息,有助于深入探讨和分

析区域地震孕震机理和深浅构造耦合关系, 也可为区域地震预测研究提供科学参考(张国民, 2003; 陈章立和李志雄, 2008; 吴建平, 2009)。因此, 本文通过收集比以往研究时段更新、积累时间更长、台站数量更多、分布更理想的宽频带连续地震波形记录, 采用背景噪声成像方法研究华南地块及其邻区高分辨率的Rayleigh波相速度图像, 并探讨其可能包含的地质构造和地球动力学意义。

2 资料与方法

本文研究区域为 $18^{\circ}\sim 38^{\circ}\text{N}$, $97^{\circ}\sim 123^{\circ}\text{E}$, 覆盖了整个华南地块及其周边区域(图1a), 国家数字测震台网数据备份中心(郑秀芬等, 2009)及相关省市地震局提供了各台站2010年~2012年的垂直分量连续波形记录。参考Zhou等(2012)的研究, 我们对数据质量存在问题的台站进行了剔除, 筛选出609个台站的数据用以开展Rayleigh波成像研究, 使用到的台站分布如图1b所示, 相对密集而且较为均匀, 绝大多数台站所用仪器观测频带的低频端为60s和120s, 有少数仪器可达360s, 这些为我们获取高分辨率的Rayleigh波速度结构提供了数据保障。

首先对获取的连续波形记录进行1Hz重采样, 并截取成一天长度的数据单元, 再去均值、去倾斜及去

除仪器响应。经过以上预处理得到单台数据后, 进行3~150s带通滤波。参照Bensen等(2007)的研究, 我们利用滑动绝对值平均法对单台数据进行时域归一化并进行频谱白化处理, 再计算各台站对间的互相关函数。由于在时间域计算互相关函数非常耗时, 我们选择在频率域通过快速傅立叶变换后卷积再反傅立叶变换到时间域得到互相关函数。对任意两个台站做互相关函数计算时, 都能得到一个正的分支和一个负的分支, 分别代表第一个台站到第二个台站传播的波以及第二个台站向第一个台站反向传播的波。

由于在日本九州岛存在定点的噪声干扰源(Zheng等, 2011), 对华北和东北地区的噪声成像干扰很大。为了厘定日本九州岛噪声源的影响, 我们根据Zheng等(2011)的方法, 定量计算了其影响大小, 发现该噪声源的影响主要集中在日本海、东北和华北区域(图2)。对于本研究区域, 该噪声源导致的相速度测量误差很小, 特别是在周期12s以下和周期18s以上, 造成的速度干扰很小, 对相速度成像分析影响很小。因此, 在华南地块的研究中, 我们将忽略日本九州岛噪声源的影响, 在受其影响的江苏沿海局部区域, 12~16s的周期范围内, 利用Zheng等(2011)的方法进行数据的挑选, 以保证结果的可靠性。

此外, 由于背景噪声的来源比较复杂, 包括了海洋引起的噪声以及火山、季风等其他作用导致的噪声。

图1 研究区域的主要构造单元(a)和台站分布图(b)

(a) 蓝色粗线表示华南地块边界(据张培震等, 2013), 红色线条为扬子地块与华夏地块边界(据朱介寿等, 2005), 黑色线条为各次级块体边界(华南地块内部据朱介寿等, 2005; 其余地块内部据张培震等, 2013); (b) 所有三角形为本研究使用的台站, 白色三角形为Zhou等(2012)使用的台站, 蓝色三角形为图4中的AHANQ台, 红色三角形为图5中的SCHSH台、HNCNS和FJQZH台, 红色线条为FJQZH台和SCHSH台间的大圆路径, 黄色线条为FJQZH台和HNCNS台间的大圆路径, 蓝色线条为HNCNS台和SCHSH台间的大圆路径。

图2 日本九州岛噪声源对周边区域Rayleigh波相速度成像的影响
色标表示由于九州岛噪声源影响导致的相速度测量误差

在不同季节,不同海域的海洋噪声激发状况差别很大,因此,造成了噪声源在不同周期上存在着方向性和大小的差异.为了确定噪声源的方向,我们采用(Yang等, 2008b)和王伟涛等(2012)的定位方法来分析研究区域在研究时段内的平均噪声源方向.由于噪声源的能量在不同周期上来源可能存在差异(Stehly等, 2006),考虑到本研究的噪声情况,我们对8~12s和12~20s周期的噪声源方向进行了定位,结果如图3所示.可以看到,

图3 华南地块及其邻区2010~2012年噪声源能量的方向性

8~12s周期的噪声源在东南方向相对较强,可能与夏季的中太平洋环流有一定的关系,而西北方向噪声能量分布很弱,这可能与西北方向远离海洋,而且短周期信号衰减比较快有关. 12~20s周期的噪声源主要来自于东北和西南方向,可能和北太平洋的环流和印度洋季风关系密切,但除西北方向外其他方位上的能量分布差异并不太大. 总体而言,经过三年的叠加,基本上噪声源的能量分布较为均匀,因此,得到的噪声格林函数频散曲线的准确性较高,保证了结果的可靠性.

为了提高信噪比,我们将互相关函数正负分支反向叠加,得到称为“对称分量”的互相关函数. 分析表明,对称分量的信噪比比正负分支都高,因此之后的数据处理都基于对称分量. 通过将同一台站对累计36个月以天为单位的互相关函数进行叠加,最后得到每个台站对较高信噪比的互相关函数,亦即Rayleigh波经验格林函数(EGF). 图4给出的是AHANQ与其他台站的对称分量互相关函数,滤波范围为4~50s.

基于经验格林函数,我们采用自动时频分析方法(FTAN, Frequency Time Analysis)(Bensen等, 2007; Lin等, 2007)测量Rayleigh波的相速度. 由于在测量时重复周期可能带来一定的不确定性,而长周期的相速度估计值是相对可靠的,因此我们先从长周期开始向短周期跟踪来获得相速度的频散曲线,并采用以下三个标准(Yang等, 2010)进行严格质量控制: ①台站间的距离

大于波长的三倍; ②对于单个周期,EGF的信噪比大于15; ③在成像过程中,当已获取比较可信的面波速度分布之后,正演计算每个台站对的理论面波走时,如果与提取的频散曲线相差超过4s,则去除该条频散曲线. 经过筛选,最终获得用于层析成像的各周期频散曲线,如表1所示,在10s~30s周期使用的频散曲线数目

图4 AHANQ与其他台站的对称分量互相关函数

表1 各周期所使用的频散曲线数目、理论与观测走时偏差绝对值的平均值

周期(s)	条数		理论与观测走时偏差绝对值的平均值(s)			阻尼参数	
	本文	Zhou等(2012)	本文	Zhou等(2012)	空间光滑因子	空间光滑宽度(km)	射线密度因子
6	30806	20726	0.963	1.03	400	100	50
8	52046	34546	0.978	1.14	600	100	60
10	74336	45369	0.923	1.15	600	100	60
12	76113	50356	0.810	1.02	800	100	60
14	76547	52191	0.745	0.90	800	100	60
16	76734	52171	0.716	0.79	1000	100	60
18	76548	51141	0.688	0.74	900	100	60
20	76305	48907	0.690	0.76	900	100	60
25	75758	38159	0.785	0.88	800	100	60
30	70303	27066	0.997	1.19	800	100	40
35	57248	18570	1.142	1.32	600	100	10
40	44279	12630	1.236	1.51	600	100	10
45	32932	未给结果	1.295	未给结果	600	100	10
50	24413	未给结果	1.331	未给结果	600	100	10

均超过70000条. 反演Rayleigh波相速度结构时, 我们采用Barmin等(2001)提出的射线理论层析成像法, 将研究区划分为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的网格, 利用频散曲线的走时信息对各周期进行反演, 并通过结果的误差统计, 选择合适的阻尼参数来反演Rayleigh波相速度. 阻尼参数的选取通过综合考虑射线分布、反演网格大小、不同的周期等因素, 采用试错法寻找最佳组合. 在空间光滑宽度的选取上, 因为我们采用的网格是 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 如果采用小于50km的光滑宽度, 那么反演结果会存在很多局部极小的假象, 而采用大于100km的光滑宽度, 可能会导致结果太过平滑, 损失结果的分辨率, 因此, 综合起来, 我们选取100km宽度作为空间光滑宽度, 空间光滑因子和射线密度因子在此基础上进行试错法

选取. 选取的阻尼参数如表1所示. 成像分辨率研究则采用Levshin等(2005)的方法进行分析.

图5a和b分别给出的是福建台网FJQZH和四川台网SCHSH台站对Rayleigh波经验格林函数及相速度频散曲线, 该台站对的大圆路径跨域华夏地块和扬子地块, 穿过了四川盆地(图1b), 获得的Rayleigh波相速度存在明显的频散特征, 其中长周期部分的速度较快. 以HNCNS台为中间节点, 图5c为提取的位于华夏地块内部的FJQZH和HNCNS台站对Rayleigh波相速度频散曲线, 图5d为提取的位于扬子地块内部的HNCNS和SCHSH台站对Rayleigh波相速度频散曲线, 两者对比显示出在短周期华夏地块比扬子地块的相速度更高, 在长周期华夏地块比扬子地块的相速度频散曲线更

图5 Rayleigh波经验格林函数及频散曲线示意图

(a) FJQZH和SCHSH台站对的经验格林函数经不同频带滤波后的结果; (b) 提取的FJQZH和SCHSH台站对Rayleigh波相速度频散曲线; (c) 提取的FJQZH和HNCNS台站对Rayleigh波相速度频散曲线; (d) 提取的HNCNS和SCHSH台站对Rayleigh波相速度频散曲线

早出现滞平趋势,可能反应出华夏地块比扬子地块的岩石圈厚度要薄.

3 结果与讨论

使用上述方法,我们获得了研究区域6~50s周期的

Rayleigh波相速度图像及其分辨率. 图6和7分别给出了具有代表性的9个周期的Rayleigh波相速度图像及其相应的成像分辨率图,可看出研究区绝大部分区域各周期图像的成像分辨率达到0.5°. 基于反演得到的速度结构,我们计算了每条频散曲线的理论走时,对应每个周期,统计得到理论与观测走时偏差绝对值的

图6 不同周期的Rayleigh波相速度分布图

白色虚线为太行山-武陵山重力梯度带,黑色实线为块体或次级块体边界,其中黑色粗实线为华南地块边界

图 7 不同周期Rayleigh波相速度分辨率图

平均值见表1。相比于以往的结果(Zhou等, 2012), 本研究使用的台站无论是在华南地块内部, 还是在华南地块-华北地块的边界区域都更为密集(图1b), 反演得到的走时偏差相对更小, 成像结果精度相对更高(表1)。图6显示出成像结果与华南地块及其邻区的已知地质构造有着较好的相关性。

相对于密度、P波速度和厚度等层状地球模型的其他参数而言, 基阶Rayleigh波相速度对大约1/3波长

深度处的S波速度结构敏感, 且周期越短, 面波相速度的最敏感深度范围就越窄。周期越长, 相速度就越能反映更深范围的S波速度结构。为此, 本文基于AK135模型(Kennett等, 1995)计算了不同周期相速度在深度方向的敏感核函数, 如图8所示。

如图8相速度敏感核所示, 周期6~10s的Rayleigh波相速度分布对上地壳结构更为敏感, 主要反映了15km以内地壳速度结构的横向变化, 受到沉积盆地等地表

图8 基阶Rayleigh相速度对S波速度随深度变化的敏感度

地形所影响(图6、1a)。由图6和1a可以看出,四川盆地、苏北盆地、河淮盆地、渤海湾盆地和鄂尔多斯盆地南部等都表现为低速异常,这种沉积盆地在短周期面波频散图上表现为低速异常的现象在已有的地震波成像(Li等, 2013)和噪声成像研究(Zhou等, 2012; 郑现等, 2012)中早有发现。但和已有的研究成果相比,本研究得到的相速度图分辨率更高,清晰地勾画出了江汉盆地、汾渭地堑、雷琼盆地和南襄盆地等小尺度低速异常。从相速度随周期的分布来看,不同周期显示的低速异常也在一定程度上反映出沉积层的深度。由于四川盆地、苏北盆地、渤海湾盆地、鄂尔多斯盆地南部和汾渭地堑的最大沉积厚度在10km左右或超过10km(朱介寿等, 2005; 邓晋福等, 2007; 冯希杰等, 2008; 徐树斌等, 2013),在周期14s的相速度图中仍然表现为低速异常,这与14s周期的相速度仍然对5~15km深度的速度结构有较大的敏感度有关。在河淮盆地内部(邓晋福等, 2007),周口盆地最大沉积厚度达到6km左右,在周期6~14s的相速度图中均表现为低速异常,而沉积厚度为2~3km的合肥盆地只有在周期6~8s的相速度图中才有显示。与上述沉积层较厚地区形成对比的是,秦岭-大别造山带、苏鲁造山带、山西复背斜、鲁西复背斜、雪峰山隆起、浙西褶皱带

和赣湘桂地块、东南沿海地块等沉积层薄、甚至缺失的地区,在6~14s相速度分布图上则呈现高相速度分布特征。这表明山地和褶皱带区域结晶基底出露明显,沉积层很薄。

周期20~30s的Rayleigh波相速度分布对中、下地壳速度结构,尤其对地壳厚度更为敏感,其中周期25s左右的相速度分布与利用接收函数研究得到的地壳厚度分布(Li等, 2014)具有很好的相关性(图6和9)。在周期20s的相速度图中,四川盆地、苏北盆地、鄂尔多斯盆地南部也表现出一定的低速分布状态,但从总体上看,周期20s相速度图像与25s的图像更加类似,与14s的图像相差较大。综合考虑20s的敏感核函数(图8),该分布状态应该主要受中地壳的介质结构影响。以太行山-武陵山重力梯度带和地壳厚度突变带为界,在周期20~30s的相速度分布上地壳较厚的西部地区主要表现为低速异常,而地壳较薄的东部地区则整体表现为相对的高速异常。对于研究区东部而言,以秦岭-大别造山带为界,在25s周期上,其北部地区呈现为相对的低速异常(均值3.66km/s),苏北盆地、渤海湾盆地的轮廓依然可见;而秦岭-大别造山带以南则呈现为相对的高速异常(均值3.74km/s)。从地壳厚度分布图(图9a)来看,秦岭-大别造山带南北两侧的华北平原东南部和华南沿海地区的地壳厚度均为30km左右,相差不大,因而这两个区域在周期20~30s相速度图上的差异可能主要与下地壳速度结构差异有关。有关研究(朱介寿等, 2005; 邓晋福等, 2007)表明,晚中生代-新生代中国大陆东部经历了岩石圈再活化过程,华北克拉通和华南地块在这一时期的构造演化有着明显差异。秦岭-大别造山带北侧在该周期上相速度比较低,意味着中下地壳的剪切波速度比较低,与华北克拉通在中新生代构造活动强烈,并发生地壳的伸展和减薄有关(Chen等, 2009);而南侧相速度比较高,表明中下地壳剪切波速度相对较高,可能与华南沿海地区经历了中生代以来玄武质岩浆底垫作用,下地壳主要为基性成分有关(赵凤清等, 1995; 朱介寿等, 2005; Zhou等, 2006)。另外,20~30s周期Rayleigh波相速度也受到30~70km深度的剪切波速度影响(图8),同时40~50s周期结果也显示出华北平原东南部与华南沿海地区相比整体上相速度相对更低(图6),因此不排除两个区域相速度差异与上地幔顶部剪切波速度变化相关的可能性。

另一个需要注意的现象是,接收函数研究结果显

图9 接收函数研究的地壳厚度(a)和周期25s的Rayleigh波相速度(b)

白色虚线为太行山-武陵山重力梯度带, 黑色实线为块体或次级块体边界, 据Li等(2014)

示秦岭-大别造山带中段地壳厚度存在整体减薄(图9a). 本研究在周期20~30s的相速度分布上表现为高速异常, 其中周期30s时高速异常在114°~115°E区域非常明显, 近期在大别造山带开展的噪声成像研究也得到了同样的结果(Luo等, 2012; Ouyang等, 2014), 这一区域在地质构造上位于大悟-罗山断裂和商城-麻城断裂之间, 已有研究表明该地区在25~30km深度的P波速度是整个大别造山带最高的区域(朱介寿等, 2005). 李华等(2008)基于宽频带流动台阵(位于114.5°~115°E, 31.33°~31.83°N)的接收函数反演研究也显示, 在32~36km深度, 各台站几乎所有方向的S波速度突然增大, 台阵区域的莫霍面由南向北缓倾(南浅北深), 壳幔边界存在4~6km的垂向断错, 下地壳底部存在高速异常体. 综合这些研究, 本研究所显示的高速异常体可能与该区下地壳拆沉作用后, 与中国东部大规模拉张裂谷作用相伴的幔源基性岩浆底侵入下地壳下部有关(高山等, 1999).

周期40~50s的相速度分布主要反映了研究区下地壳和上地幔速度结构的横向变化(图6、1a). 与6~30s周期的相速度分布图相比, 该周期范围相速度的横向变化幅度明显减弱. 由于研究区西部的柴达木、祁连、羌塘和巴颜喀拉等块体地壳厚度深达50~70km, 因此上述块体在40~50s的相速度图上仍然表现为显著

的低速异常. 川滇地块的西北部也表现为显著的低速异常, 而从川滇地块的东南部到滇西地块再到滇南地块, 低速异常有逐渐减弱趋势. 对于经度103°E以东的研究区范围而言, 最显著的特点是, 华北平原东南部和华南沿海地区表现为相对的高低速相间分布, 四川盆地表现为显著的高速异常, 和已有的噪声成像研究结果(Zhou等, 2012; 郑现等, 2012)是一致的. 鄂尔多斯盆地南部表现为高速异常, 这和人利用天然地震双平面波成像方法(李鹏等, 2010; 李多等, 2012)得到的结果一致, 也和陈九辉等(2005)利用接收函数研究得出的鄂尔多斯地块上地幔顶部S波速度较高的结果一致, 说明本研究结果具有较高的精度.

从周期6~50s的相速度分布图综合分析, 鄂尔多斯地块南部在短周期(6~20s)的相速度图上表现为低速异常, 而在中长周期(>25s)相速度图上则表现为高速异常, 这与其稳定的克拉通块体特征(Liu等, 1992)相一致. 但该稳定块体南部中上地壳存在一定程度的非均匀性, 具体表现在小于20s周期时块体东南部的相速度略高于块体西南部, 下地壳-上地幔顶部可能存在相速度高速异常体. 相比之下, 其周缘地区的地壳结构更为复杂, 鄂尔多斯东南缘的汾渭地堑显示出上地壳低速(6~14s周期)和地壳减薄(图9a), 反映了新生代拉

张断陷盆地的特点,可能与晚中生代到新生代华北克拉通再次活化和华北地区岩石圈拉张减薄有关。而鄂尔多斯西南缘的六盘山地区地壳较厚(图9a),在周期14~30s的相速度分布图上显示出低速分布,表明该区域的地壳中下部存在低速异常区,可能与青藏高原东北缘向北东方向运动受鄂尔多斯刚性块体阻挡形成的地壳缩短增厚与深部物质流动过程有关。

在华南地块西边界南段的云南东部及附近地区,不同周期的相速度分布图与当前的块体边界划分不太相符(图6、1a)。滇东地区在现有的地块划分上属于扬子地块范畴(张培震等, 2003; 张国民等, 2004; 张培震等, 2013),在周期6~40s的相速度分布图上却显示出和川滇地块东南部较为一致的低速分布,和黄忠贤等(2013)利用天然地震成像得到的S波速度结构结果相似。在大地构造上,张国伟等(2013)将滇东地区归属于滇黔桂南盘江构造体系,认为其总体构成既不同于华南大陆的扬子准克拉通构造,又不同于华南复合陆内造山区构造。再往南,滇南地块的东南边界作为华南地块的西部边界比较明显,其东侧的滇东南-桂西北地区,在不同周期的相速度分布图上显示为相对高速分布,剪切波速度结构也具有相同特征(黄忠贤等, 2013),该高速块体可能和四川盆地一起对川滇地块深部介质向南东方向运动起到了阻挡的作用,这一推测可以为GPS观测(江在森等, 2003; Shen等, 2005; 王阎昭等, 2008)和各向异性研究(黄金莉等, 2003; 黎源和雷建设, 2012; 黄忠贤等, 2013)结果所佐证。上述研究结果在一定程度上表明华南地块西边界南段的块体边界划分目前还存在一定的不确定性。

在华南地块内部,针对四川盆地有着较多的研究,有些成果认为该盆地的上地幔隆起且具有双层基底结构(马杏垣, 1989; 朱介寿等, 2005),结晶基底具有“两隆三凹”的特征(郭正吾等, 1996)。从6~14s周期的相速度分布来看(图6),四川盆地不同区域的相速度有很大差异,一定程度上体现了沉积层厚度的差异。周期6s的相速度低速分布与四川盆地形态一致,从周期8s开始相速度分布在四川盆地中部呈现相对高速,周期20~40s高速分布区不断扩大,周期50s整个盆地表现为高速分布特征,而在南部边缘,相速度相对中部区域也偏低,也可能表现出四川盆地结晶基底可能存在中间高,边缘低的弯曲形态,该形态有可能与四川盆地受到青藏高原的推挤作用和雪峰山隆起的阻挡,向

秦岭下部挤压俯冲有关。

在周期6~10s的相速度分布图上,雪峰山隆起的高速分布特征非常明显,在周期14s时也有显示,和江南复背斜-浙西褶皱带的高速异常区断续相连(图6)。朱介寿等(2005)认为位于这一断续高速分布带东侧的江绍-萍乡-茶陵-永兴断裂可能为华南地块内部扬子地块和华夏地块在地面构造分区上的边界(图1a),但在壳幔边界、岩石圈底面上扬子地块和华夏地块的边界应该向东或向南倾斜。张国伟等(2013)认为在不同的历史时期,华南地块内部次级块体的边界存在一个不断演化的过程。本研究在周期20~30s的相速度分布上,赣湘桂地块、东南沿海地块的高速分布成为一体,而雪峰山隆起在短周期分布图上出现的高速分布特征消失。这种在不同周期上的差异可能与浅层的沉积层分布有关,由于山区附近沉积层比较薄,从而体现出短周期的高速特征;而中长周期则主要体现的构造边界特征,因此造成这种差异,目前尚难说明块体的边界在深度方向上存在着差异。在周期6~10s、周期30~50s的相速度分布图上,位于赣湘桂地块和东南沿海地块分界线附近的桂东南区域(109°E、22.5°N附近)均显示出一个北东走向的高速异常体,其形态和广西加里东期花岗岩的分布范围一致(张国伟等, 2013),该奇特地质体的形成机理有待于进一步深入研究。

另外,从30~50s周期的华南地块相速度分布来看,从西北到东南整体上是西北部相速度异常越来越偏高,体现出四川盆地的下地壳及上地幔顶部的高速特征,表明四川盆地及边缘区域的岩石圈较厚,且稳定。而东南部的华夏地块相速度从高逐渐转向低速异常,且周期越长相速度低速异常越明显,考虑到40~50s的敏感核函数主要反映了50km以上深度的介质信息,而华夏地块的岩石圈厚度约为80km左右(朱介寿等, 2005; Zhou等, 2012),表明华夏地块岩石圈下部的物质可能处于高温状态,岩石圈受到侵蚀,深部物质沿着晚中生代岩浆通道上涌到浅部从而使上地幔顶部表现为低速异常(Zhou等, 2006; Huang等, 2010)。

4 结论

综合本文的噪声成像与以往同类研究和区域地质构造特征的对比分析结果,得出如下结论:

(1) 与区域已有的同类研究相比,本文得到的

Rayleigh波相速度分布具有更好的横向分辨率. 周期6~10s的相速度分布与地壳中上部地质特征, 特别是沉积层的分布有良好的一致性. 区域内的四川盆地、苏北盆地、河淮盆地、渤海湾盆地、鄂尔多斯盆地南部, 甚至小尺度的江汉盆地、汾渭地堑、雷琼盆地、南襄盆地等均呈现低速异常, 其中四川盆地、苏北盆地、鄂尔多斯盆地南部在周期14~20s的相速度图中仍显示为相对低速分布, 表明这些区域存在着很厚的沉积层. 秦岭-大别造山带、苏鲁造山带、山西复背斜、鲁西复背斜、雪峰山隆起、浙西褶皱带和湘鄂赣地块、东南沿海地块则呈现高相速度分布特征; 周期20~30s的相速度分布以太行山-武陵山重力梯度带和地壳厚度突变带为界, 西部地区主要表现为低速异常, 东部地区则整体表现为高速异常, 其中秦岭-大别造山带以南的华南地块东部相对以北的华北地块东部而言具有相对更高的相速度; 周期40~50s的相速度分布主要反映了研究区下地壳和上地幔速度结构的横向变化, 柴达木、祁连、羌塘和巴颜喀拉地块因地壳厚度较厚表现为显著的低速异常, 云南地区的相速度整体变化与地壳厚度有关, 华北平原东南部和华南沿海地区表现为相对的高低速相间分布, 四川盆地、鄂尔多斯盆地南部表现为显著高速异常.

(2) 从短周期到中长周期的相速度变化显示, 华南地块西边界南段的块体边界划分具有一定的不确定性; 位于扬子地块的四川盆地从盆地中部向外逐渐出现高速分布, 反映了该盆地中部基底和上地幔的上隆特征; 位于华北地块的鄂尔多斯盆地南部中上地壳存在一定程度的非均匀性, 下地壳-上地幔顶部可能存在高速异常体, 其周缘的汾渭地堑和六盘山地区的结构更为复杂, 可能与华北克拉通再次活化、地壳减薄和青藏高原东北缘的物质流动、地壳增厚过程有关.

(3) 在周期20~30s的相速度分布上, 秦岭-大别造山带中段的大悟-罗山断裂和商城-麻城断裂之间表现为高速异常. 在周期6~10s、周期30~50s的相速度分布图上, 位于桂东南的广西加里东期花岗岩分布区域表现为显著高速异常, 这些特殊现象的形成机理有待于进一步深入研究.

(4) 华南地块的长周期(30~50s)相速度分布显示, 东南部相速度异常逐渐从高速变成低速, 而西北部特别是四川盆地, 逐渐从低速变成高速, 可能与岩石圈的温度以及厚度变化有关, 需要进一步的分析.

致谢 中国地震局地球物理研究所国家数字测震台网数据备份中心(doi:10.7914/SN/CB)和相关省市地震局为本研究提供了地震波形数据, 中国地震局地球物理研究所李永华研究员、王伟涛和潘佳铁博士提供了大量帮助, 审稿专家给出重要修改意见, 在此一并致谢.

参考文献

- 陈九辉, 刘启元, 李顺成, 郭颀, 赖院根. 2005. 青藏高原东北缘-鄂尔多斯地块地壳上地幔S波速度结构. 地球物理学报, 48: 333-342
- 陈学波. 1994. 长江三峡工程坝区及外围深部构造特征研究. 见: 长江三峡工程坝区及外围深部构造特征研究. 北京: 地震出版社. 179
- 陈章立, 李志雄. 2008. 对地震预报的科学思考(一)——地震预报某些经验与做法的再认识及思考地震预报问题的基本出发点. 地震, 28: 1-18
- 邓晋福, 魏文博, 邱瑞照. 2007. 中国华北地区岩石圈三维结构及演化. 北京: 地质出版社. 287
- 房立华, 吴建平, 吕作勇. 2009. 华北地区基于噪声的瑞利面波群速度层析成像. 地球物理学报, 52: 663-671
- 冯希杰, 李晓妮, 任隽, 师亚芹, 戴王强, 王夫运, 苗康运, 韩恒悦. 2008. 渭河断裂深、中、浅和近地表显示. 地震地质, 30: 264-272
- 高山, 张本仁, 金振民. 1999. 秦岭-大别造山带下地壳拆沉作用. 中国科学D辑: 地球科学, 29: 532-541
- 郭令智. 2001. 华南板块构造. 北京: 地质出版社. 264
- 郭正吾, 邓康玲, 韩永辉. 1996. 四川盆地的形成与演化. 北京: 地质出版社. 200
- 黄金莉, 宋晓东, 汪素云. 2003. 川滇地区上地幔顶部Pn速度细结构. 中国科学D辑: 地球科学, 33(S1): 144-150
- 黄忠贤, 李红谊, 胥颐. 2013. 南北地震带岩石圈s波速度结构面波层析成像. 地球物理学报, 56: 1121-1131
- 嘉世旭, 李志雄, 徐朝繁, 沈繁鑫, 赵文俊, 杨卓欣, 杨键, 雷宽. 2006. 雷琼拗陷地壳结构特征. 地球物理学报, 49: 1385-1394
- 江在森, 马宗晋, 张希, 王琪, 王双绪. 2003. GPS初步结果揭示的中国大陆水平应变场与构造变形. 地球物理学报, 46: 352-358
- 李多, 周仕勇, 陈永顺, 冯永革, 李鹏. 2012. 鄂尔多斯地区上地幔岩石圈三维速度结构面波反演研究. 地球物理学报, 55: 1613-1623
- 李华, 王良书, 李成, 刘福田, 胡德昭, 于大勇. 2008. 大别造山带西段宽频带数字地震台阵观测与地壳上地幔结构. 中国科学D辑: 地球科学, 38: 862-871
- 李鹏, 周仕勇, 陈永顺, 冯永革, 姜明明, 唐有彩. 2010. 利用双平面波干涉面波层析成像方法研究山西断陷盆地及鄂尔多斯地台三维速度结构. CT理论与应用研究, 19: 47-60
- 李昱, 姚华建, 刘启元, 陈九辉, 李顺成, 黄慧, 郭颀, 王峻, 齐少华. 2010. 川西地区台阵环境噪声瑞利波相速度层析成像. 地球物理学报, 53: 842-852
- 黎源, 雷建设. 2012. 青藏高原东缘上地幔顶部Pn波速度结构及各向异性研究. 地球物理学报, 55: 3615-362
- 廖其林, 王振明, 邱陶兴, 袁定强, 王洪涛, 吴宁远, 刘宝诚. 1990.

- 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, 33: 163–173
- 廖其林, 王振明, 王屏路, 余兆康, 黄向荣. 1987. 我国华南沿海地区地壳与上地幔速度结构特征. 科学通报, 32: 933–935
- 刘启元, Rainer K, 陈九辉, 李顺成, 郭飏, Kurt W, 赖院根. 2005. 大别造山带壳幔界面的断错结构和壳内低速体. 中国科学D辑: 地球科学, 35: 304–313
- 马杏垣. 1989. 中国岩石圈动力学地图集. 北京: 中国地图出版社. 277
- 潘佳铁, 吴庆举, 李永华, 余大新. 2014. 中国东北地区噪声层析成像. 地球物理学报, 57: 812–821
- 任纪舜, 陈廷愚, 牛宝贵, 刘志刚, 刘员仁. 1990. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿. 北京: 科学出版社. 205
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征. 地质通报, 31: 1035–1053
- 王阎昭, 王恩宁, 沈正康, 王敏, 甘卫军, 乔学军, 孟国杰, 李铁明, 陶玮, 杨永林, 程佳, 李鹏. 2008. 基于GPS资料约束反演川滇地区主要断裂现今活动速率. 中国科学D辑: 地球科学, 38: 582–597
- 王椿镛, 张先康, 陈步云, 陈学波, 宋岩松, 郑金涵, 胡鸿翔, 楼海. 1997. 大别造山带的地壳结构研究. 中国科学D辑: 地球科学, 27: 221–226
- 王伟涛, 倪四道, 王宝善. 2012. 中国中东部台站噪声格林函数中面波前驱信号的分析研究. 地球物理学报, 55: 503–512
- 吴建平, 黄媛, 张天中, 明跃红, 房立华. 2009. 汶川M_s8.0级地震余震分布及周边区域P波三维速度结构研究. 地球物理学报, 52: 320–328
- 熊小松, 高锐, 李秋生, 卢占武, 王海燕, 李文辉, 管烨. 2009. 深地震探测揭示的华南地区莫霍面深度. 地球学报, 30: 774–786
- 许靖华, 孙枢, 李继亮. 1987. 是华南造山带而不是华南地台. 中国科学(B辑), 17: 1107–1115
- 徐树斌, 米宁, 徐鸣洁, 王良书, 李华, 于大勇. 2013. 利用接收函数研究渭河地堑及其周边地壳结构. 中国科学: 地球科学, 43: 1651–1658
- 袁学诚. 1997. 阿尔泰-台湾地学断面论文集. 武汉: 中国地质大学出版社, 216
- 袁学诚, 华九如. 2011. 华南岩石圈三维结构. 中国地质, 38: 1–19
- 张国民. 2003. 关于加强地震预报基础研究的思考. 国际地震动态, (11): 1–4
- 张国民, 马宏生, 王辉, 李丽. 2004. 中国大陆活动地块与强震活动关系. 中国科学D辑: 地球科学, 34: 591–599
- 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. 中国科学: 地球科学, 43: 1553–1582
- 张培震, 邓起东, 张国民, 马瑾, 甘卫军, 闵伟, 毛凤英, 王琪. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块. 中国科学D辑: 地球科学, 33(S1): 12–20
- 张培震, 邓起东, 张竹琪, 李海兵. 2013. 中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程. 中国科学: 地球科学, 43: 1607–1620
- 张岳桥, 董树文, 李建华, 崔建军, 施炜, 苏金宝, 李勇. 2012. 华南中生代大地构造研究新进展. 地球学报, 33: 257–279
- 赵风清, 金文山, 甘晓春, 孙大中, 王祖伟. 1995. 华夏地块前加里东期变质基底的特征以及深部地壳性质. 地球学报, 3: 235–245
- 郑秀芬, 欧阳飏, 张东宁, 姚志祥, 梁建宏, 郑洁. 2009. “国家数字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. 地球物理学报, 52: 1412–1417
- 郑现, 赵翠萍, 周连庆, 郑斯华. 2012. 中国大陆中东部地区基于背景噪声的瑞利波层析成像. 地球物理学报, 55: 1919–1928
- 郑永飞, 吴福元. 2009. 大克拉通岩石圈的生长和再造. 科学通报, 54: 1945–1949
- 郑永飞, 张少兵. 2007. 华南前寒武纪大陆地壳的形成和演化. 科学通报, 52: 1–10
- 朱介寿, 蔡学林, 赵风清, 曹家敏, 杜杨松, 高德章, 汪洋. 2005. 中国华南及东海地区岩石圈三维结构及演化. 北京: 地质出版社. 308
- Barmin M P, Ritzwoller M H, Levshin A L. 2001. A fast and reliable method for surface wave tomography. *Pure Appl Geophys*, 158: 1351–1375
- Bensen G D, Ritzwoller M H, Yang Y. 2009. A 3-D shear velocity model of the crust and uppermost mantle beneath the United States from ambient seismic noise. *Geophys J Int*, 177: 1177–1196
- Bensen G D, Ritzwoller M H, Barmin M P, Levshin A L, Lin F, Moschetti M P, Shapiro N M, Yang Y. 2007. Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements. *Geophys J Int*, 169: 1239–1260
- Chen L, Cheng C, Wei Z. 2009. Seismic evidence for significant lateral variations in lithospheric thickness beneath the central and western North China Craton. *Earth Planet Sci Lett*, 286: 171–183
- Guo Z, Gao X, Yao H, Li J, Wang W. 2009. Midcrustal low-velocity layer beneath the central Himalaya and southern Tibet revealed by ambient noise array tomography. *Geochem Geophys Geosyst*, 10: Q05007
- Huang Z, Wang L, Zhao D, Xu M, Mi N, Yu D, Li H, Li C. 2010. Upper mantle structure and dynamics beneath Southeast China. *Phys Earth Planet Inter*, 182: 161–169
- Kennett B L N, Engdahl E R, Buland R. 1995. Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes. *Geophys J Int*, 122: 108–124
- Levshin A L, Barmin M P, Ritzwoller M H, Trampert J. 2005. Minor-arc and major-arc global surface wave diffraction tomography. *Phys Earth Planet Inter*, 149: 205–223
- Liang C, Langston C A. 2008. Ambient seismic noise tomography and structure of eastern North America. *J Geophys Res*, 113: B03309
- Li H, Su W, Wang C Y, Huang Z. 2009. Ambient noise Rayleigh wave tomography in western Sichuan and eastern Tibet. *Earth Planet Sci Lett*, 282: 201–211
- Li Y H, Gao M T, Wu Q J. 2014. Crustal thickness map of the Chinese mainland from teleseismic receiver functions. *Tectonophysics*, 611: 51–60
- Li Y H, Wu Q J, Pan J T, Zhang F X, Yu D X. 2013. An upper-mantle S-wave velocity model for East Asia from Rayleigh wave tomography. *Earth Planet Sci Lett*, 377: 367–377
- Lin F C, Ritzwoller M H, Townend J, Bannister S, Savage M K. 2007.

- Ambient noise Rayleigh wave tomography of New Zealand. *Geophys J Int*, 170: 649–666
- Liu D Y, Nutman A P, Compston W, Wu J S, Shen Q H. 1992. Remnants of ≥ 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean craton. *Geology*, 20: 339–342
- Luo Y, Xu Y, Yang Y. 2012. Crustal structure beneath the Dabie orogenic belt from ambient noise tomography. *Earth Planet Sci Lett*, 313–314: 12–22
- Ouyang L, Li H, Lü Q, Yang Y, Li X, Jiang G, Zhang G, Shi D, Zheng D, Sun S, Tan J, Zhou M. 2014. Crustal and uppermost mantle velocity structure and its relationship with the formation of ore districts in the Middle-Lower Yangtze River region. *Earth Planet Sci Lett*, 408: 378–389
- Shapiro N M, Campillo M, Stehly L, Ritzwoller M H. 2005. High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise. *Science*, 307: 1615–1618
- Shen Z K, Lü J, Wang M, Bürgmann R. 2005. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau. *J Geophys Res*, 110: B11409
- Stehly L, Campillo M, Shapiro N M. 2006. A study of the seismic noise from its long-range correlation properties. *J Geophys Res*, 111: B10306
- Sun X, Song X, Zheng S, Yang Y, Ritzwoller M H. 2010. Three dimensional shear wave velocity structure of the crust and upper mantle beneath China from ambient noise surface wave tomography. *Earthq Sci*, 23: 449–463
- Yang Y, Ritzwoller M H, Levshin A L, Shapiro N M. 2007. Ambient noise Rayleigh wave tomography across Europe. *Geophys J Int*, 168: 259–274
- Yang Y, Ritzwoller M H, Lin F C, Moschetti M P, Shapiro N M. 2008a. Structure of the crust and uppermost mantle beneath the western United States revealed by ambient noise and earthquake tomography. *J Geophys Res*, 113: B12310
- Yang Y, Ritzwoller M H. 2008b. Characteristics of ambient seismic noise as a source for surface wave tomography. *Geochem Geophys Geosyst*, 9: Q02008
- Yang Y, Zheng Y, Chen J, Zhou S, Ceylan S, Sandvol E, Tilmann F, Priestley K, Hearn T M, Ni J F, Brown L D, Ritzwoller M H. 2010. Rayleigh wave phase velocity maps of Tibet and the surrounding regions from ambient seismic noise tomography. *Geochem Geophys Geosyst*, 11: Q08010
- Yao H J, van der Hilst R D, de Hoop M V. 2006. Surface-wave array tomography in SE Tibet from ambient seismic noise and two-station analysis-I. Phase velocity maps. *Geophys J Int*, 166: 732–744
- Zheng S H, Sun X L, Song X D, Yang Y J, Ritzwoller M H. 2008. Surface wave tomography of China from ambient seismic noise correlation. *Geochem Geophys Geosyst*, 9: Q05020, doi: 10.1029/2008GC001981
- Zheng Y, Shen W, Zhou L, Yang Y, Xie Z, Ritzwoller M H. 2011. Crust and uppermost mantle beneath the North China Craton, northeastern China, and the Sea of Japan from ambient noise tomography. *J Geophys Res*, 116: B12312
- Zhou L, Xie J, Shen W, Zheng Y, Yang Y, Shi H, Ritzwoller M H. 2012. The structure of the crust and uppermost mantle beneath South China from ambient noise and earthquake tomography. *Geophys J Int*, 189: 1565–1583
- 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. *Episodes*, 29: 26–33