

周旻炜、周龙泉, 2018, 利用随机噪声研究华南地区瑞利波相速度特征, 中国地震, 34(2), 328~336.

利用随机噪声研究华南地区瑞利波相速度特征

周旻炜¹⁾ 周龙泉²⁾

1) 中国地震局地震预测研究所, 北京市海淀区复兴路 63 号 100036

2) 中国地震台网中心, 北京市西城区三里河南横街 5 号 100045

摘要 基于 2009~2010 年国家、区域测震台网的 387 个宽频带台站数据, 通过互相关方法提取到可靠的瑞利波经验格林函数, 利用相位匹配滤波时频分析技术测量瑞利波相速度频散曲线, 最后采用噪声层析成像方法获得了华南地区不同周期的瑞利波相速度分布图。结果显示, 华南地区速度结构横向变化幅度较小, 反映了华南地区作为一个整体较为稳定, 与华南地区自晚中生代以来未发生过强烈构造活动的特征基本一致; 虽然华南地区整个岩石圈速度结构较为均匀, 但扬子块体西部、四川盆地与扬子块体东部、华夏块体间存在明显的速度差异, 体现在周期为 8~10s 时华夏块体相速度大于扬子块体西部、川滇块体以及四川盆地, 由于沉积层较厚四川盆地速度最低; 周期为 10~30s 时华夏块体面波相速度大于扬子块体西部和四川盆地, 而川滇块体速度最低; 周期为 35s 时扬子块体、华夏块体、四川盆地的速度基本一致, 且高于川滇块体, 这与华南地区地壳厚度明显小于川滇块体的特征相符。

关键词: 随机噪声 瑞利波层析成像 华夏块体 扬子块体

[文章编号] 1001-4683(2018)02-0328-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

华南地区位于欧亚板块与太平洋板块的交汇区, 其北侧为秦岭-大别造山带, 西侧以龙门山断裂、鲜水河断裂以及小江断裂与青藏高原相连, 南西侧以红河断裂与滇缅块体为界, 东南侧为西太平洋构造区 (Zhang et al, 1984, 2003; 舒良树, 2012)。华南地区由扬子块体和华夏块体构成 (图 1), 其岩石圈经历了多期幕式的生长, 以侧向块体拼合为主, 垂向岩浆上侵为辅。具体构造演化过程为: ①新元古代华夏块体沿 NW 向朝扬子块体东南缘俯冲, 华夏块体与扬子块体碰撞、拼合形成相对稳定的华南岩石圈构造, 华夏块体与扬子块体之间形成了 NE 向江南新元古代弧形造山带 (Guo et al, 1989; Wang et al, 1995; Shu et al, 2008; 舒良树, 2012); ②早古生代晚期在东南侧的南海-东海块体和西北侧的扬子块体的共同碰撞挤压下, 华夏块体隆起发生强烈的 NE 向褶皱、推覆以及岩浆上侵 (Shu et al, 2008; 舒良树, 2012); ③早中生代东亚境内古特提斯洋的关闭导致华南与华北 2 大块体沿秦岭-大别一带

[收稿日期] 2017-02-16; [修定日期] 2017-04-14

[项目类别] 川滇国家地震监测预报实验场项目(2016CESE0101)资助

[作者简介] 周旻炜, 男, 1991 年生, 硕士研究生在读, 主要从事地震层析成像研究。E-mail: 332415127@qq.com

周龙泉, 通讯作者, 男, 1976 年生, 博士, 正研级高级工程师, 主要从事地震层析成像和地震预测方法研究。
E-mail: lqzhou@seis.ac.cn

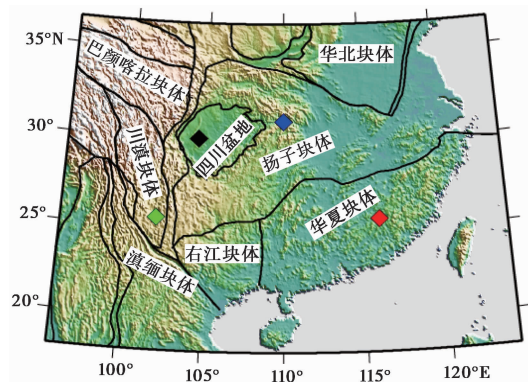


图 1 华南地区基本构造单元

4 种颜色的菱形标记为图 7 中相速度频散曲线位置示意

碰撞,形成近 EW 向的褶皱造山带和前陆盆地 (Hacker et al, 1998; Faure et al, 2003); ④晚中生代华南块体受古太平洋板块朝东亚陆缘的低角度俯冲作用的影响,从近 EW 向的特提斯构造朝 NE 向古太平洋构造转变,形成东南沿海的构造伸展和岩浆活动 (Wang et al, 2012)。

虽然新生代岩石圈结构较为稳定,但受青藏高原隆升的影响,华南地区西部(川、滇、湘、黔地区)岩石圈地壳相对较厚,且华南地区地质历史年代经历过多次强烈构造运动,其速度结构存在横向或纵向不均匀性。刘建华等(1996)研究了华南地区三维 P 波速度结构,发现该地区地壳和上地幔存在显著的横向不均匀性。滕吉文等(2001)利用穿过中国东南大陆的瑞利波频散数据研究了 $4^{\circ} \times 4^{\circ}$ 的面波三维速度结构,认为华南大陆 Moho 界面埋深为 30~40km,并由西向东逐渐减薄,在陆缘地区为 25~28km,具有明显的分区特征。Zheng 等(2008)利用中国大陆 59 个地震台站的连续波形记录,采用随机噪声成像方法反演了中国大陆周期为 6~60s 的面波群速度图像,结果显示,华南地区周期为 8s 的群速度横向差异较大,12、20s 的群速度整体性较好,30s 的群速度扬子块体相对小于华夏块体,45s 的群速度东、西差异较大。易桂喜等(2010)采用远震面波反演了中国大陆岩石圈 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 的面波速度结构,其中,周期为 20s 的相速度显示,华夏块体与扬子块体的速度间存在明显的差异。Huang 等(2006)研究了中国大陆及邻区 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 的三维 P 波壳幔结构,其中,15km 深度华夏块体速度相对大于扬子块体。由于无论是横向上还是纵向上上述研究的分辨率均较低,且所用的地震台站相对较少,还无法详细刻画华南地区速度的细致结构,为此,本文基于 2009~2010 年华南地区 387 个地震台站(图 2)记录的连续波形数据,采用随机噪声成像方法反演华南地区周期为 8~40s 的瑞利波相速度,以期探讨华夏块体、扬子块体以及扬子块体内部四川盆地、上扬子和下扬子的速度差异性特征。

1 数据及处理方法

“十五”以来中国地震局开展了数字地震台网改造,建成了由 170 个国家台网台站、859 个区域台网台站、27 个区域台网火山监测站以及 2 个国家台网小孔径台阵等组成的近 1200 个台站的国家测震台网(郑秀芬等,2009)。国家台网台站间距约 250km,常用 VBB(50Hz~120s)和 UBB(20Hz~360s)2 种带宽地震计。大部分地区的区域台网台站间距为 30~60km,

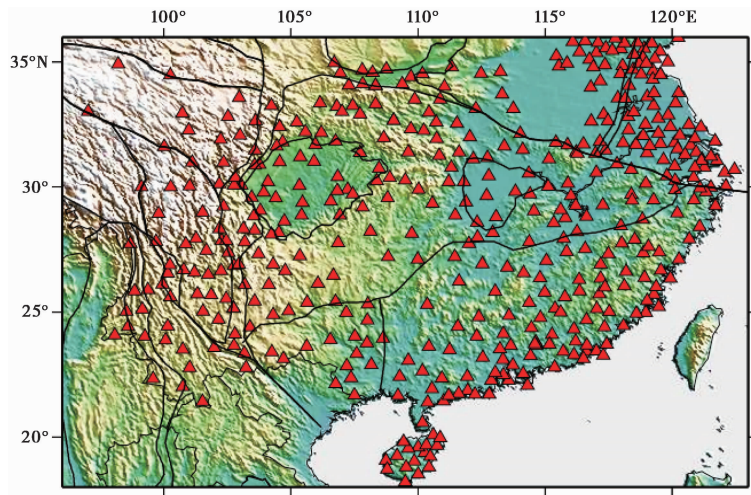


图2 华南地区及邻区地震台站分布

常用 SP(40Hz~1s)、BB(40Hz~20s)和 VBB(50Hz~120s)等3种带宽地震计。华南地区及邻区共有482个区域台网地震台站,由于本文主要研究华南地区周期为8~40s的面波相速度,因此,在排除仪器响应问题和SP地震计台站后,选取了387个符合条件的BB、VBB宽频地震台站(图2)记录的2009~2010年连续波形数据进行数据处理。

噪声数据处理过程分为4个步骤(Bensen et al,2007;房立华等,2009;Fang et al,2010):①单台数据预处理;②波形记录互相关和叠加;③频散曲线测量;④数据质量控制。Bensen等(2007)、Lin等(2008)详细介绍了该噪声数据处理方法,本文采用相同的方法和程序代码。由于只使用垂直分量的噪声连续记录,因此,通过互相关提取出的格林函数主要为瑞利波信号。单台数据预处理主要是对连续数据进行重新采样(1Hz)、去均值、去倾斜、带通滤波(6~50s)和去仪器响应,在时间域采用滑动绝对平均方法对数据进行归一化,压制地震信号和突跳等干扰信号对互相关计算结果的影响。同时,为了拓宽频谱范围且抑制单一频率的优势,在频率域对信号进行频谱白化处理。然后,我们利用频率域的互相关方法提取经验格林函数,并进行叠加和正负分支信号相加,提高信噪比,最终得到格林函数,即瑞利波信号。

我们采用自动时频分析方法(FTAN)(Bensen et al,2007)进行瑞利波的相速度频散曲线测量。图3(a)为经过川滇块体、四川盆地、华夏块体等3个不同区域的相速度频散曲线测量的实例,其中,台站SCRTA与YNLiC之间的路径经过川滇块体,台站CQCHK与SCMDS之间的路径经过四川盆地,台站FJHAHF与GXGUL之间的路径经过华夏地块,3个台站对之间都提取到信噪比较高的瑞利波信号(图3(b))。比较通过川滇块体、四川盆地和华夏块体不同路径的相速度频散曲线结果发现(图3(c)),周期小于12.5s时华夏块体相速度最大,其次是川滇块体,四川盆地最小,反映了华夏块体地壳浅层较为稳定,川滇块体地壳浅层相对变形较大,四川盆地沉积层较厚;周期为12.5~35.0s时华夏块体相速度大于四川盆地和川滇块体,川滇块体速度最小,可能反映了华夏块体地壳向四川盆地和川滇块体逐渐变厚,这也符合滕吉文等(2001)、Huang等(2006)的研究结果;周期大于35s时四川盆地相速度最大,

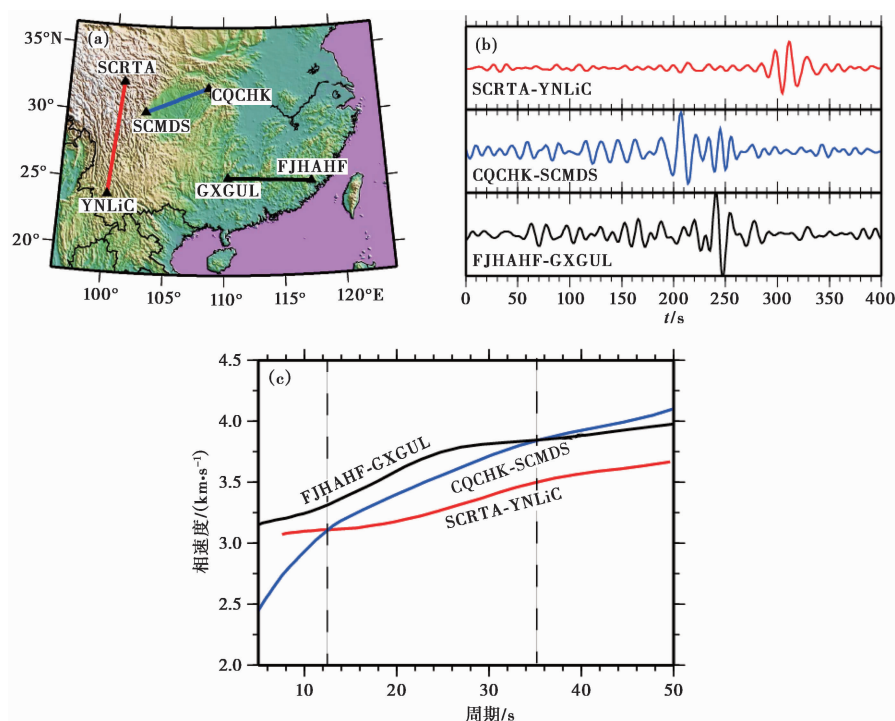


图 3 相速度频散曲线测量

(a) 3 个站对的路径, 红色为经过川滇块体的路径, 蓝色为经过四川盆地的路径, 黑色为经过华夏块体的路径; (b) 通过 3 个不同地区的格林函数 (颜色同图 (a), 滤波范围 6~50s); (c) 通过 3 个不同地区的相速度频散曲线 (颜色同图 (a))

其次是华夏块体, 川滇块体最小。

经过台站对格林函数频散曲线测量后, 须对产出数据进行质量控制, 质量控制标准有 3 个: ①根据给定的信噪比阈值, 挑选可靠的频散曲线测量值, 根据 Bensen 等 (2007) 的研究, 当信噪比小于 10 时, 利用频散曲线测量的速度值误差急剧增大, 所以本研究中阈值一般选取大于 10; ②要求台站对中 2 个台站的距离大于 3 倍的波长, 同时选择测量的速度为 1.5~5.0km/s; (3) 在面波成像过程中对数据进行了进一步筛选, 将其中走时残差较大的数据删除 (Barmin et al, 2001)。最终得到不同周期的台站对相速度数据 (图 4), 由图 4 可知, 周期大于 20s 时射线数量下降较快, 反映了华南地区 BB (40Hz~20s) 台站数量较多。

2 相速度面波成像结果

Barmin 等 (2001) 提出了一种快速而可靠的面波层析成像方法, 该方法可用于局部、区域和全球尺度的面波成像, 也可进行方位各向异性层析成像。利用挑选后的相速度频散测量值, 可以进行面波成像研究。本研究采用 Barmin 等 (2001) 提出的面波层析成像方法, 将研究区划分为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的网格进行瑞利波相速度成像。面波层析成像过程分为 2 步: ①首次面波成像给出每个周期的相速度分布图, 计算路径的测量走时与理论走时之间的残差, 根据走时残差来识别和删除较差的频散测量结果, 这即是上节中提到的数据质量控制的第 3 个标

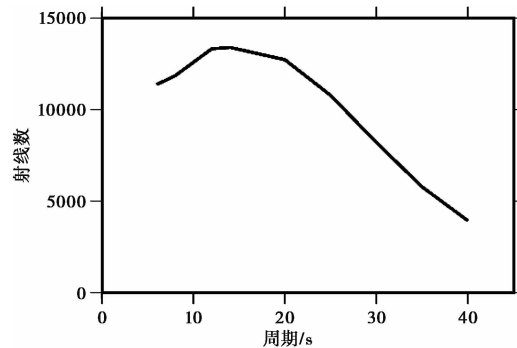


图4 不同周期的台站对射线数

准,我们舍弃走时残差大于5s的相速度测量结果;②再次进行相速度面波层析成像。

本文采用检测板方法估计解的分辨率(Humphreys et al, 1988; Inoue et al, 1990),其基本原理是,在给定速度模型参数的基础上,对各节点正负相同进行扰动,然后根据实际射线分布通过正演计算得到理论走时数据,将理论走时数据加上一定随机误差后作为观测数据进行反演,要求反演方法与实际成像过程中的方法一致,最后比较反演结果与检验板间的相似程度作为解的可靠性的估计。本文扰动值取为正常值的 $\pm 5\%$,检测板分辨实验结果显示(图5),周期为8、14、25、35s时华南大部分地区解的分辨率是令人满意的。此外,周期为8、14、25、35s时面波层析成像前后走时残差的标准偏差出现了明显下降,如8s时走时残差的标准偏差由2.10s降为1.14s,14s时由1.40s降为0.87s,25s时由2.09s降为0.88s,35s时由2.22s降为1.32s。

图6为周期为8、14、25、35s时的相速度分布图。由图6可见,周期为8s的相速度(深度约8km)结果显示,除四川盆地外,华南地区横向上面波速度较为一致,即地壳浅部整个华南地区比较稳定;四川盆地为低速区,反映盆地沉积层较厚。周期为14、25s时的相速度(深度约14、25km)分布反映了华南地区中下地壳的面波相速度分布情况,即扬子块体东部(110°E以东)和华夏块体为高速区,且速度分布较为一致;扬子块体西部(110°E以西)为低速区。周期为35s时的相速度(深度约35km)分布反映了华南地区上地幔顶部的面波相速度分布情况,扬子块体和华夏块体速度较大,且速度分布整体性较好。综上所述,除四川盆地以外华南地区地壳浅部速度分布较为一致,除扬子块体西部外中下地壳速度分布亦较为一致,上地幔顶部速度分布基本一致,这种整个岩石圈速度的一致性反映了华南地区作为一个整体较为稳定,与该地区自新生代以来岩石圈内未出现大的构造活动或岩浆侵入的特征基本一致(舒良树,2012)。周期为14、25s时的相速度显示(图6),扬子块体西部中下地壳面波相速度明显小于华南其他区域,可能是受青藏高原隆升以及向SE方向推挤的影响,扬子块体西部岩石圈地壳厚度相对较大。四川盆地位于扬子块体西部,其沉积层较厚,但在中下地壳其速度与扬子块体西部大致相当,反映其主要受巴颜喀拉块体的挤压作用。扬子块体东部和华夏块体的整个岩石圈速度结构基本一致,它们作为一个整体未受到青藏块体构造运动的影响。

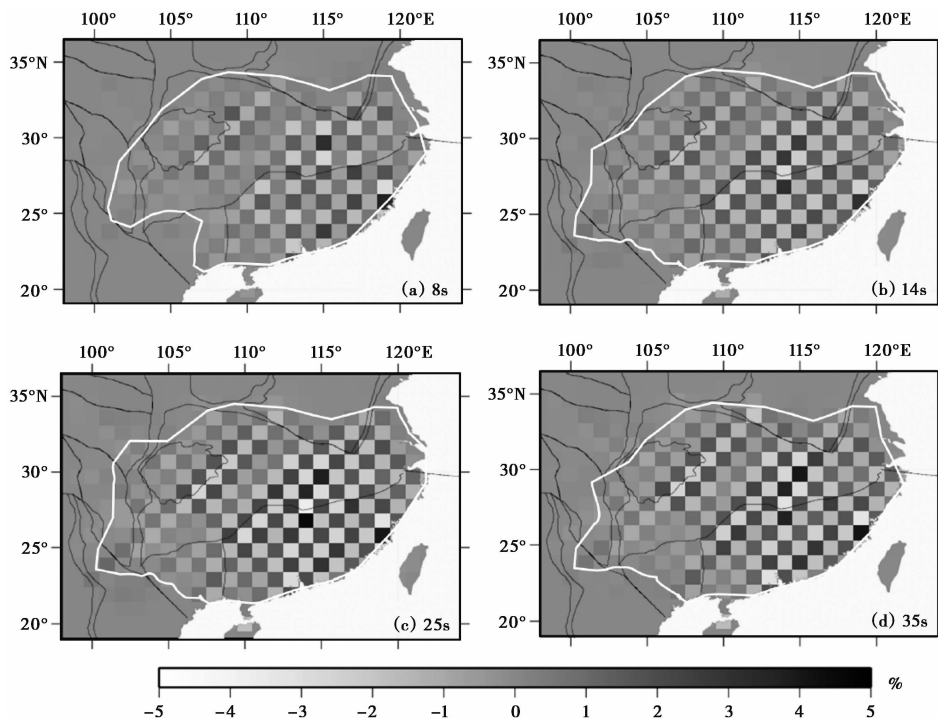


图 5 不同周期的检测板测试结果
白线范围内为分辨率较高的区域

3 结论和讨论

(1) 本文利用 2009、2010 年国家及区域测震台网的 387 个宽频带台站数据,通过互相关方法提取到可靠的瑞利波经验格林函数,利用相匹配滤波的时频分析技术测量瑞利波群速度频散曲线,最后利用地震随机噪声层析成像方法给出华南地区周期为 8、14、25、35s 的瑞利波相速度分布图。

(2) 除四川盆地外华南地区地壳浅部速度分布较为一致,除扬子块体西部外中下地壳速度分布亦较为一致,上地幔顶部速度分布基本一致,这种整个岩石圈速度的均匀性反映了华南地区作为一个整体较为稳定。根据华南地区构造演化历史可知,10 亿年前华夏块体向扬子块体东南缘俯冲、碰撞、拼合形成相对稳定的华南岩石圈构造,之后除了在早古生代晚期和晚中生代出现了 2 次强烈的褶皱、推覆以及岩浆上侵构造活动外,整个华南地区均为非常稳定的块体(Shu et al, 2008; 舒良树, 2012; Wang et al, 2012),这与本文得到的华南地区岩石圈速度结构非常均匀的特征基本一致。Zhou 等(2012)采用随机噪声数据和地震数据反演了整个华南地区岩石圈的三维高精度速度结构模型,其地壳速度结构与本文得到的结果基本一致。

(3) 虽然华南地区整个岩石圈速度结构较为均匀,但扬子块体西部、四川盆地与扬子块体东部、华夏块体之间存在明显的速度差异,体现在周期为 8~10s 时华夏块体相速度大于扬子块体西部、川滇块体以及四川盆地(图 6、7),由于沉积层较厚四川盆地速度最低;周期为

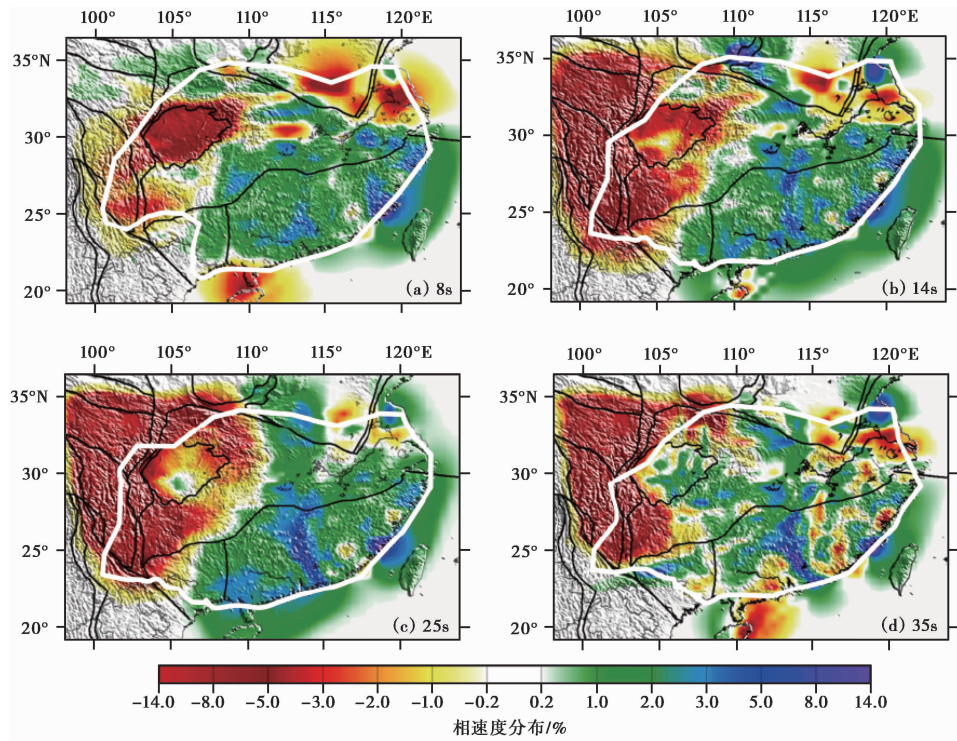


图 6 不同周期的相速度分布
白线范围内为分辨率较高的区域

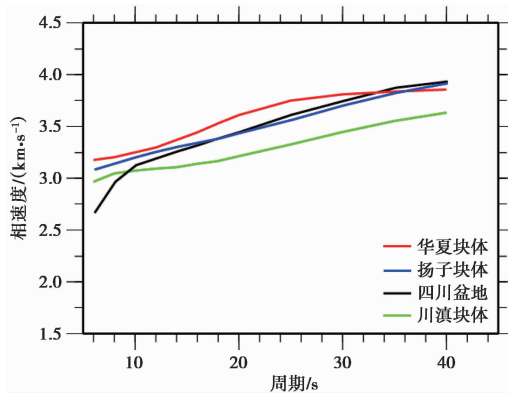


图 7 华南地区不同位置点的相速度频散曲线

10~30s 时华夏块体面波相速度大于扬子块体西部和四川盆地,川滇块体速度最小(图 6、7),由此推测,青藏高原隆升以及向 SE 方向的推挤,导致扬子块体西部岩石圈地壳相对较厚,但这种影响未到达华夏块体;周期为 35s 时扬子块体、华夏块体、四川盆地的速度基本一致,且大于川滇块体(图 6、7),这与华南地区地壳厚度明显小于川滇块体的特征相符(滕吉文等,2001;Huang et al,2006)。

致谢: 感谢 University of Colorado at Boulder 地球内部成像中心提供的噪声数据处理程序、面波成像程序和帮助。

参考文献

- 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**(3), 663~671.
- 刘建华、吴华、刘福田, 1996, 华南及其海域三维速度分布特征与岩石层结构, *地球物理学报*, **39**(4), 483~492.
- 滕吉文、张中杰、胡家富等, 2001, 中国东南大陆及陆缘地带的瑞利波频散与剪切波三维速度结构, *地球物理学报*, **44**(5), 663~677.
- 舒良树, 2012, 华南构造演化的基本特征, *地质通报*, **31**(7), 1035~1053.
- 易桂喜、姚华建、朱介寿等, 2010, 用 Rayleigh 面波方位各向异性研究中国大陆岩石圈形变特征, *地球物理学报*, **53**(2), 256~268, doi:10.3969/j.issn.00015733.2010.02.004.
- 郑秀芬、欧阳飏、张东宁等, 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**(5), 1412~1417, doi:10.3969/j.issn.00015733.2009.05.031.
- 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, Barmin M P, et al, 2007, Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements, *Geophys J Int*, **169**, 1239~1260.
- Fang L H, Wu J P, Ding Z F, et al, 2010, High resolution Rayleigh wave group velocity tomography in North China from ambient seismic noise, *Geophys J Int*, **181**(2), 1171~1182.
- Faure M, Lin W, Scharer U, et al, 2003, Continental subduction and exhumation of UHP rocks: Structural and geochronological insights from the Dabieshan (East China), *Lithos*, **70**, 213~241.
- Guo L Z, Shi Y S, Lu H F, et al, 1989, The pre-Devonian tectonic patterns and evolution of South China, *J SE Asian Earth Sci*, **3**, 87~93.
- Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, et al, 1998, U-Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen, China, *Earth Planet Sci Lett*, **161**, 215~230.
- Huang J, Zhao D, 2006, High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions. *J Geophys Res*, **111**, B09305. doi:10.1029/2005JB004066.
- Humphreys E, Clayton R W, 1988, Adaptation of back projection tomography to seismic travel time problems, *J Geophys Res*, **93**, 1073~1085.
- Inoue H, Fukao Y, Tanabe K, et al, 1990, Whole mantle P-wave travel time tomography, *Phys Earth Planet Inter*, **59**, 294~328.
- Lin F, Moschetti M P, Ritzwoller M H, 2008, Surface wave tomography of the western United States from ambient seismic noise: Rayleigh and Love wave phase velocity maps, *Geophys J Int*, doi:10.1111/j1365-246X.2008.03720.x.
- Shu L S, Faure M, Wang B, et al, 2008, Late Paleozoic-Early Mesozoic Geological Features of South China: Response to the Indosinian Collision Event in Southeast Asia, *C R Geosci*, **340**, 151~165.
- Wang D Z, Shu L S, 2012, Late Mesozoic Basin and range tectonics and related magmatism in Southeast China, *Geoscience Frontier*, **3**(2), 109~124.
- Wang H Z, Mo X X, 1995, An outline of the tectonic evolution of China, *Episodes*, **18**(1/2), 6~16.
- Zhang P Z, Deng Q D, Zhang G M, et al, 2003, Active tectonic blocks and strong earthquakes in the continent of China, *Sci China: Ser D*, **46**(Sup), 13~24.
- Zhang Z M, Liu J G, Coleman R G, 1984, An outline of the plate tectonics of China, *Geol Soc Am Bull*, **95**, 295~312.
- Zheng S H, Sun X L, Song X D, et al, 2008, Surface wave tomography of China from ambient seismic noise correlation, *Geochem Geophys Geosyst*, **9**, Q05020. doi:10.1029/2008GC001981.
- Zhou L Q, Xie J Y, Shen W S, et al, 2012, The structure of the crust and uppermost mantle beneath South China from ambient noise and earthquake tomography, *Geophys J Int*, **189**, 1565~1583.

Ambient Noise Rayleigh Wave Tomography across South China

Zhou Minwei¹⁾ Zhou Longquan²⁾

1) Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

2) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract The data used in this study are continuous seismic waveforms recorded at broadband seismic stations including the 387 stations of China National and Regional Seismic Network in 2009 and 2010. Cross-correlations are computed in daily segment to retrieve the reliably empirical Rayleigh wave Green's function. Rayleigh wave phase velocity dispersion curves are measured using a phase-matched filter and frequency time analysis technique. We apply seismic ambient noise tomography to image the different period phase velocity maps of South China. Our results indicate that the phase velocity of the whole lithosphere in South China is relatively uniform, which also reflects that South China as a whole is characterized of the relative stability. Our results agree that there have been no intense tectonic activities in South China since late Mesozoic. Although the velocity structure of the whole lithosphere in South China is relatively uniform, distinct velocity differences appear in the west of the Yangtze Block, Sichuan Basin, the east of Yangtze Block and Cathaysia Block, namely, the 8–10s period phase velocity of Cathaysia Block is higher than the west of the Yangtze Block, Sichuan-Yunnan region and Sichuan Basin. The Sichuan Basin has the lowest velocity because of the relatively thick sedimentary layer. The velocity of the Cathaysia Block in the 10–30s period phase is higher than those of the Yangtze Block and Sichuan Basin and the Sichuan-Yunnan region has the lowest velocity. In the 35s period phase, the velocities of the Yangtze Block and Cathaysia Block and Sichuan Basin are basically the same and higher than that of the Sichuan-Yunnan region. This is consistent with the feature that the crustal thickness in South China is obviously smaller than that of the Sichuan-Yunnan region.

Key words: Ambient noise; Rayleigh wave tomography; Cathaysia Block; Yangtze Block