

黄元敏、沈玉松、杨马陵, 2012, 广东省东部地区背景噪声面波群速度层析成像, 中国地震, 28(4), 360 ~ 369。

• 研究论文 •

广东省东部地区背景噪声面波群速度层析成像

黄元敏 沈玉松 杨马陵

广东省地震局, 广州市先烈中路 81 号 510070

摘要 选取广东省东部及福建和江西测震台网的 26 个固定台站 2011 年 3 ~ 9 月的地震背景噪声的垂直分量数据, 用互相关方法获得瑞利面波的格林函数, 再用频时分析方法提取瑞利面波的群速度频散曲线, 最后用面波层析成像方法反演得到研究区周期为 5 ~ 15s 的瑞利面波群速度图像。反演结果揭示了广东省东部地区浅部地壳群速度结构存在明显横向不均匀性。短周期群速度异常与研究区内山脉、盆地的分布有较好的对应关系, 沉积厚度较大的盆地地区表现为低速异常, 而基底埋深较浅的山脉则显示了高速异常; 地热分布对面波群速度产生重要影响, 地热值较高的区域面波群速度一般表现为低速异常; 粤东地区特别是粤东沿海地区地壳中部可能存在低速层。

关键词: 地震背景噪声 互相关 格林函数 频散曲线

[文章编号] 1001-4683 (2012) 04-0360-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

广东省东部地区位于中国大陆的东南沿海地带, 地处欧亚板块与菲律宾板块俯冲、碰撞近前缘地带。受到菲律宾板块俯冲 - 碰撞作用的影响, 该区大地构造格局较为复杂。区域内分布有北东走向的山脉 (如: 莲花山、九连山等)、沉积盆地 (惠阳盆地、海陆丰盆地、潮汕盆地和兴宁 - 五华盆地等) 及复杂交错的断裂系统 (包括北东向的邵武河源断裂、五华 - 深圳断裂、莲花山断裂、潮州 - 普宁断裂、长乐 - 诏安断裂以及北西向的韩江断裂、练江断裂和黄岗河断裂等) (魏柏林等, 2000, 2001) (图 1)。特定的地质构造和地球动力学环境造成该地区地震活动频繁, 历史记载本区发生 $M_s 7$ 以上地震 2 次, $M_s 6$ 以上地震 9 次, $M_s 5$ 以上地震 40 多次 (魏柏林等, 2000, 2001)。

基于背景噪声的层析成像技术是近年来迅速发展的一种新的地震成像方法。Shapiro 等 (2005) 对地震台站长时间地震背景噪声记录进行互相关计算, 提取出台站间的格林函数, 反演得到了美国南加州地区周期为 7.5s 和 15s 的瑞利面波群速度分布图。近年来该方

[收稿日期] 2012-06-20

[项目类别] 中国地震局 2011 年度震情跟踪合同制项目 (2011020105) 与地震动力学国家重点实验室开放基金课题 (LED2011B04) 资助

[作者简介] 黄元敏, 男, 1982 年生, 工程师, 主要从事地震预测研究。E-mail: eq_hym@yahoo.com.cn

法广泛用于全球多个地区地壳速度的研究,并逐步向前发展(Yang,2007; Lin,2007; 房立华,2009a、2009b; 李军,2009; 李昱,2010; 宫猛,2010; 高东辉,2011; 梁富华,2011、2012; 唐有彩,2011)。本文利用广东、福建以及江西测震台网记录的地震噪声的垂直分量数据,提取地震台站间短周期面波的格林函数,进而将研究区域划分成 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的网格,利用面波层析成像方法反演得到研究区 5 ~ 15s 周期的瑞利面波群速度图像。

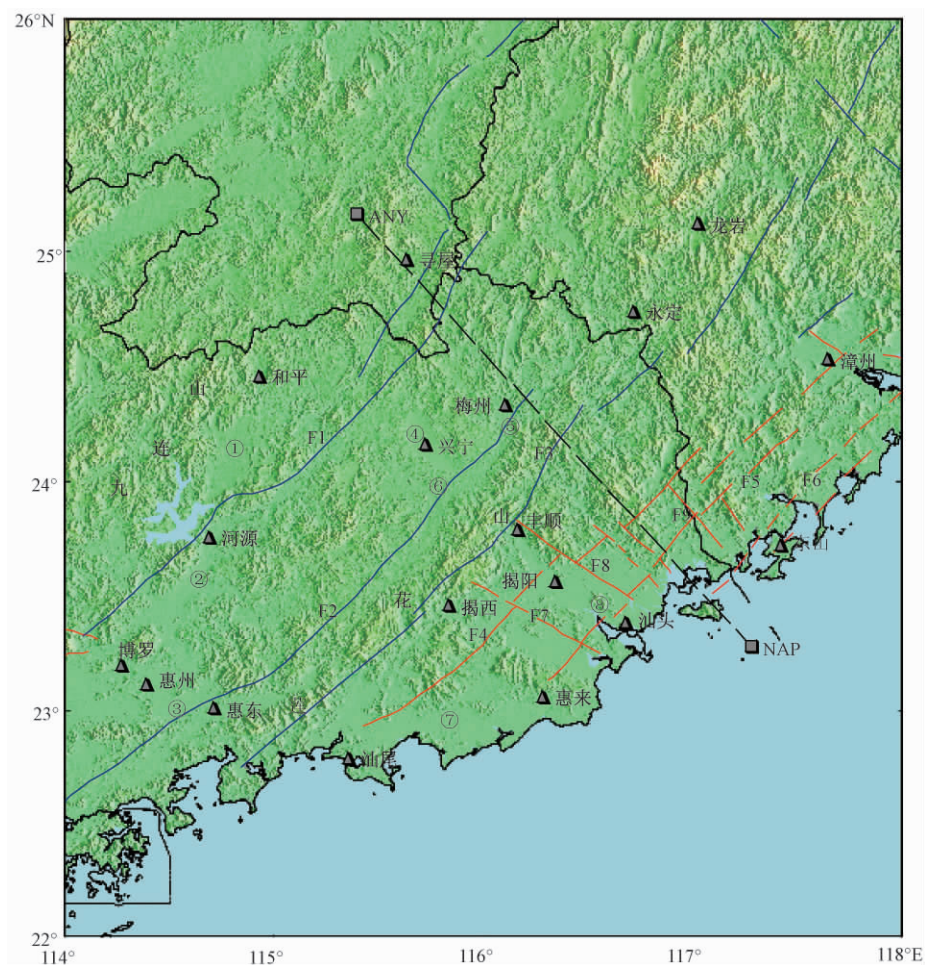


图1 粤闽交界地区地貌及主要构造单元分布图(据魏柏林等(2000、2011)修改)

F1 邵武河源断裂;F2 五华深圳断裂;F3 莲花山断裂;F4 潮州 - 普宁断裂;F5 漳州 - 惠来断裂;F6 长乐 - 诏安断裂;F7 韩江断裂;F8 练江断裂;F9 黄岗河断裂;①灯塔盆地;②河源盆地;③惠阳盆地;④兴宁盆地;⑤梅州盆地;⑥五华盆地;⑦海陆丰盆地;⑧潮汕盆地

1 数据与方法

本文收集了广东省东部及福建和江西测震台网 26 个固定台站 2011 年 3 ~ 9 月的连续地震背景噪声记录。由于需要从台站记录的背景噪声中提取瑞利面波的格林函数,因此只使用了瑞利面波能量较强的垂直向分量地震记录。

在背景噪声层析成像数据处理步骤上,按照 Bensen 等(2007)的处理流程和成像技术获得广东省东部地区的群速度分布图像。Bensen 的数据处理流程如下:①单台数据预处理;②相邻台站地震背景噪声互相关计算与叠加;③频散曲线的测量;④质量控制和误差分析;⑤面波层析成像。单台数据预处理需要对各个台站每天的数据重新降频采样、仪器响应校正、去平均值、去除线性趋势、带通滤波,采用滑动绝对平均方法(Bensen et al, 2007)去除天然地震信号、仪器故障引起的异常信号以及地震台站附近的噪声对互相关计算结果的影响,再通过频谱白化处理抑制某一单频信号的干扰,同时拓宽背景噪声信号的频带,提高背景噪声的“信噪比”。

单台数据预处理结束后,对任一一站对对的背景噪声数据进行互相关计算和叠加获得最终互相关函数即经验格林函数。对于任意两连续信号 $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$ 在时间域的互相关函数可以由下式计算。

$$C(\tau) = \int_0^T u_1(t) \cdot u_2(t + \tau) dt \quad (1)$$

对任意两个时间序列做互相关计算都会得到一个正的时间信号分支和一个负的时间信号分支,这两个分支分别代表波动传播的两个相反方向。由于非均匀分布的噪声源及其距台站距离等因素的影响,正负分支振幅往往不对称。Lin 等(2007)的研究结果表明,将正负分支反序叠加得到的“对称分量”可提高信噪比,因此我们采用这种方法获取两台站间的平均互相关波形(图 2)。

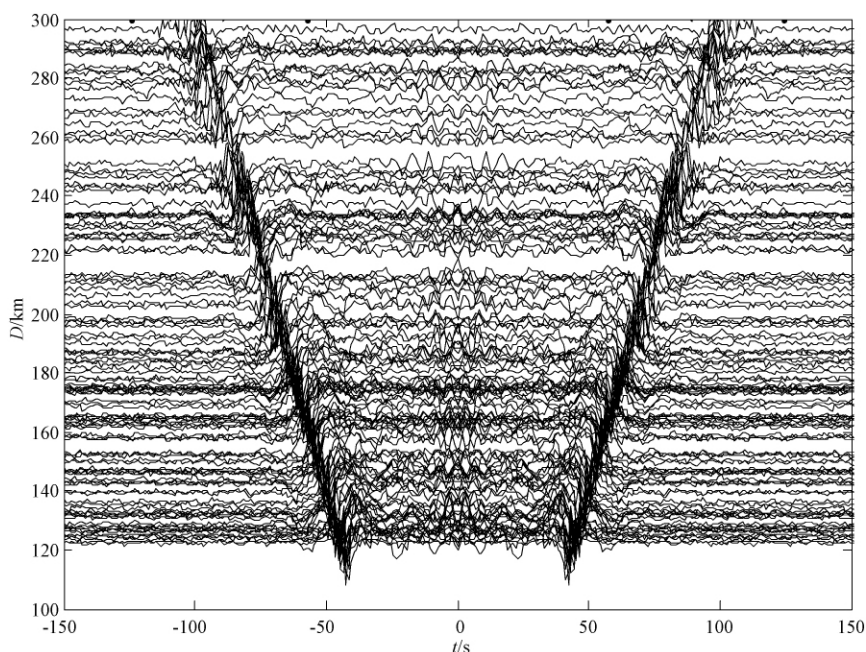


图 2 部分台站垂直分量互相关计算结果

Bensen 等(2007)研究发现,频散曲线的可靠性与信噪比(SNR)有密切关系,因此,在提取频散曲线之前,我们采用房立华等(2009b)的方法计算互相关曲线的信噪比,并舍弃信噪

比小于 8 的数据,同时去除台站间距小于 3 倍波长的射线路径数据以提高群速度测量的可靠性。然后,用 Levshin 等(1972)所述的频时分析方法(frequency-time analysis,即 FTAN)测定群速度频散曲线。

对于时间信号 $s(t)$,用傅立叶变换得到其频谱 $S(\omega)$,即

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \exp(i\omega t) dt \quad (2)$$

高斯滤波器在频率域可表示为

$$G(\omega - \omega_i) = \exp\left[-a \left(\frac{\omega - \omega_i}{\omega_i}\right)^2\right] \quad i = 1, \dots, N \quad (3)$$

式中, ω_i 为滤波器的中心频率。对 $S(\omega)$ 应用高斯滤波,通过傅立叶反变换得到

$$A(\omega_i, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) G(\omega - \omega_i) \exp(i\omega t) d\omega \quad (4)$$

那么, $|A(\omega_i, t)|$ 就是滤波后频率为 ω_i 的时间函数 $s(t)$ 的包络线, $|A(\omega_i, t)|$ 最大振幅对应的群走时 $t(\omega_i)$ 即为频率 ω_i 的群走时。通过多重滤波可以得到各频率的走时曲线 $t(\omega)$,那么群速度频散曲线可以表示为

$$v(\omega) = r/t(\omega) \quad (5)$$

式中, r 是震中距。

从前述互相关波形数据中,我们利用该方法提取了双台站间瑞利面波 5 ~ 30s 的群速度频散曲线,图 3 给出了其中 ANY-NAP 台站对的频散曲线。在得到每个台站对的群速度频散曲线后,进而采用面波层析成像方法来反演研究区域的群速度图像。

2 质量控制

研究区域内共有 26 个台站,理论上可以得到了 325 条路径上的格林函数。通过上述信噪比计算等一系列数据筛选,最终使用了 135 条路径来进行面波层析成像反演(图 4)。由于台站间距不等,不同周期参与反演的射线路径数目不尽相同,图 4 给出了各周期参与反演的频散曲线数目 N 。为更好地评估研究区的射线分布,将研究区按 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的网格进行划分,然后计算周期为 5 ~ 15s 时各网格的射线密度(图 5)。计算结果显示,周期为 5 ~ 15s 时研究区大部分网格点的射线数都达到 10 条以上,绝大部分网格点都有射线通过,射线分布基本能满足反演计算的要求。

为验证层析成像结果的可靠性,通常使用检测板测试对台站分布和射线路径的影响进行检测。其基本原理是通过给定理论速度模型,按实际射线分布计算理论走时,加上一定的速度扰动后作为“观测走时”,然后用同样的方法和控制参数进行反演,检查其反演结果是否能恢复给定的理论速度模型。本文输入检测板测试的网格划分为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,给定初始速度模型的平均速度为 3.0km/s,加上 13% 的速度扰动进行相应的检测板测试。

检测结果显示,周期为 5s 和 12s 时,反演重建的速度结果较好,即反演结果重现了给定理论速度模型的样式和扰动幅度,成像结果的可信度较高,研究区域边缘由于射线少、密度稀,速度重建结果不太理想;周期为 15s 时,研究区中心区域重建的速度结果较好,但研究区西侧速度重建的效果稍差(图 6)。因此,在计算周期为 5 ~ 12s 的群速度时,按 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 网格划分是合理的,而周期为 15s 时,研究区西侧及周围地区的计算结果可靠性偏低。

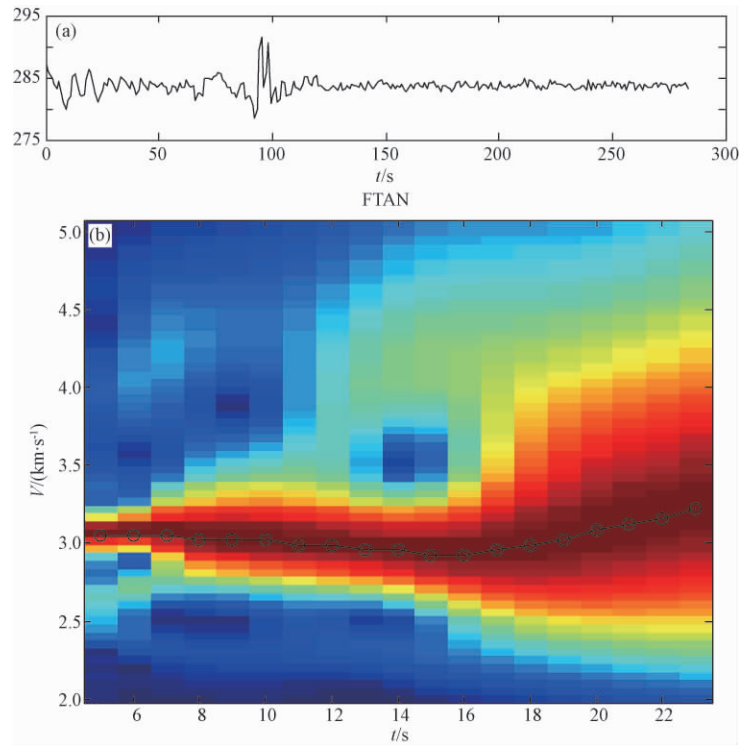


图3 ANY-NAP 台站对群速度频散曲线

(a) ANY 台和 NAP 台的互相关计算结果; (b) 应用多重滤波后得到的 FTAN 图像 (实线表示自动拾取的频散曲线)

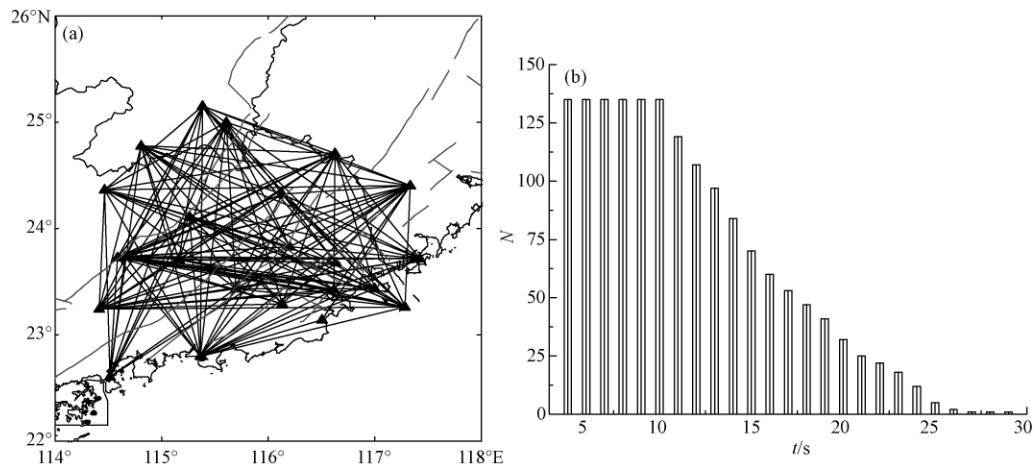


图4 射线分布及各周期射线路径数目 (5~30s)

(a) 5~10s 周期的射线分布; (b) 各周期射线路径数目 (5~30s)

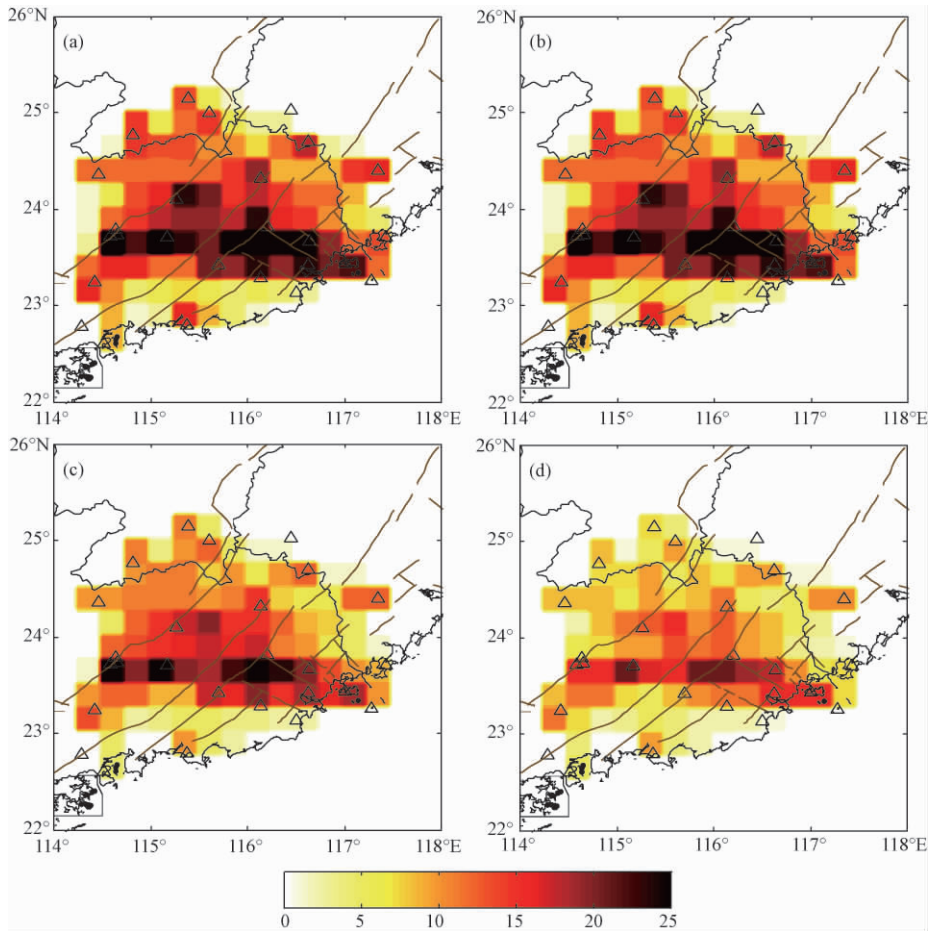


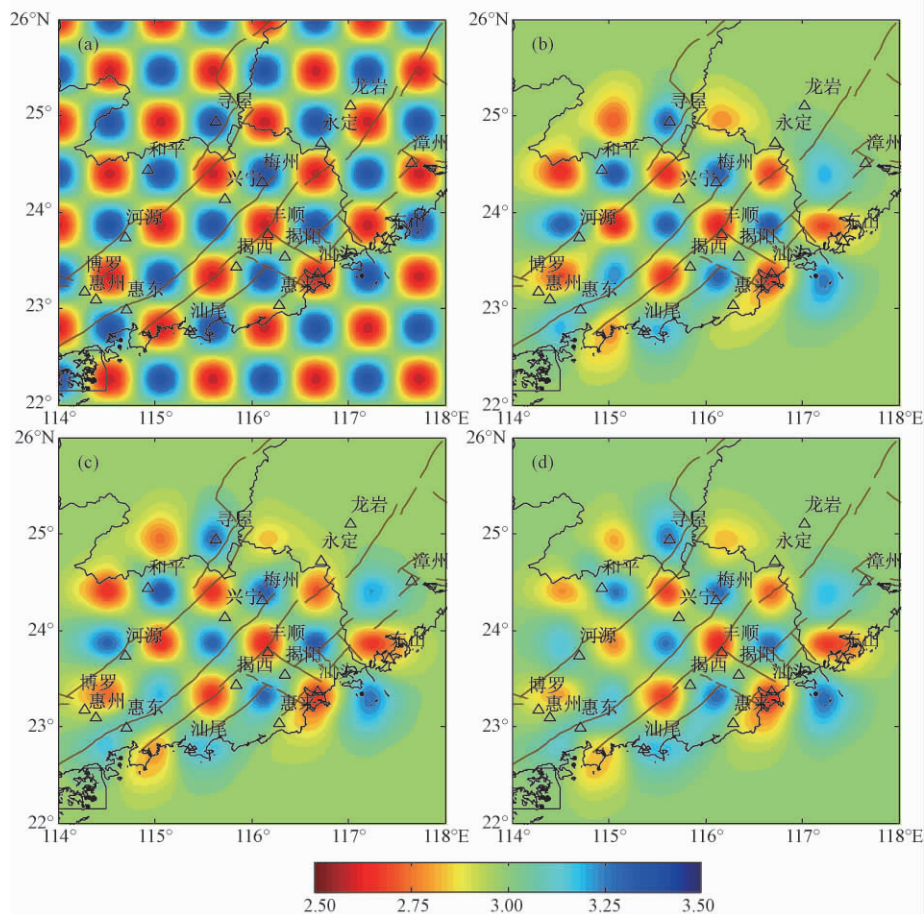
图5 不同周期网格点射线密度($0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$)

(a) 5s; (b) 10s; (c) 13s; (d) 15s

3 结果与讨论

面波具有频散特征,不同周期的面波反映不同深度范围内结构的横向变化情况,一般来说,短周期面波主要反映地球浅部的速度结构特征,而长周期面波则更能反映地下深部速度结构特征。群速度分布图呈现出的速度横向不均匀性,对研究该区域内构造块体边界和特征都具有重要的参考价值。本文将采用 Rawlinson 等(2005)提出的面波层析成像方法 FMST(Fast Marching Surface Tomography)反演研究区周期为 5~15s 的面波群速度。根据群速度分布特征及检测板可靠性分析结果,我们选取周期为 5s、8s 和 11s 的面波群速度分布图像进行讨论(图 7)。

周期在 5~15s 范围内的面波群速度对中、浅部地壳介质比较敏感。图 7 显示:惠州及其以南区域、汕尾及其东南地区、汕头及其周边区域以及兴宁-五华一带在不同的周期都显示出了低速异常,这些区域分别对应惠阳盆地、海陆丰盆地、潮汕盆地以及兴宁-五华盆地(图 1),表明这些地区沉积层厚度较大;惠州与汕尾之间沿莲花山延伸方向以及和平附近的

图6 检测板试验结果($0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$)

(a) 初始模型; (b) 5s; (c) 12s; (d) 15s

九连山地区则显示了高速异常,表明这些区域基底埋深较浅。研究区群速度的异常分布较好地勾画了地质构造单元,盆地地区显示低速异常,而山脉地区则显示高速异常,国内其他地区的结果也显示了相同的特征(房立华,2009a;李军,2009;宫猛,2010;高东辉,2011)。相关研究显示地下热流也是影响面波群速度的一个重要因素(黄金莉,2007;梁富华,2011;唐有彩,2011),陈定国等(1984)指出莲花山断裂在丰顺、揭西附近的高温热泉较多,最高温度达 93°C ,顺莲花山向西,温泉数量减少,水温逐渐下降,这解释了高速异常背景的莲花山脉在周期为5s和8s时的揭西附近,周期为11s时的揭西到丰顺一带显示出低速异常的原因。

图7显示,群速度的高与低交叉分布,表明研究区上地壳速度结构的横向变化剧烈。以汕头附近为例,汕头及其东南显示出低速异常特征,且异常的范围随周期的增加而增大;但其北及东北部分地区则显示高群速度异常,表现为明显的速度差异,人工爆破的结果也表明该地区北边和东边的速度结构差异较大(廖其林等,1988)。另外,莲花山断裂带在揭西以西的西南端显示明显的高速异常,其西边的惠阳盆地则显示出一定程度的低速异常,这一结果与华南人工地震测线(连县-港口测线)获得的结果较为接近。人工剖面显示博罗到惠

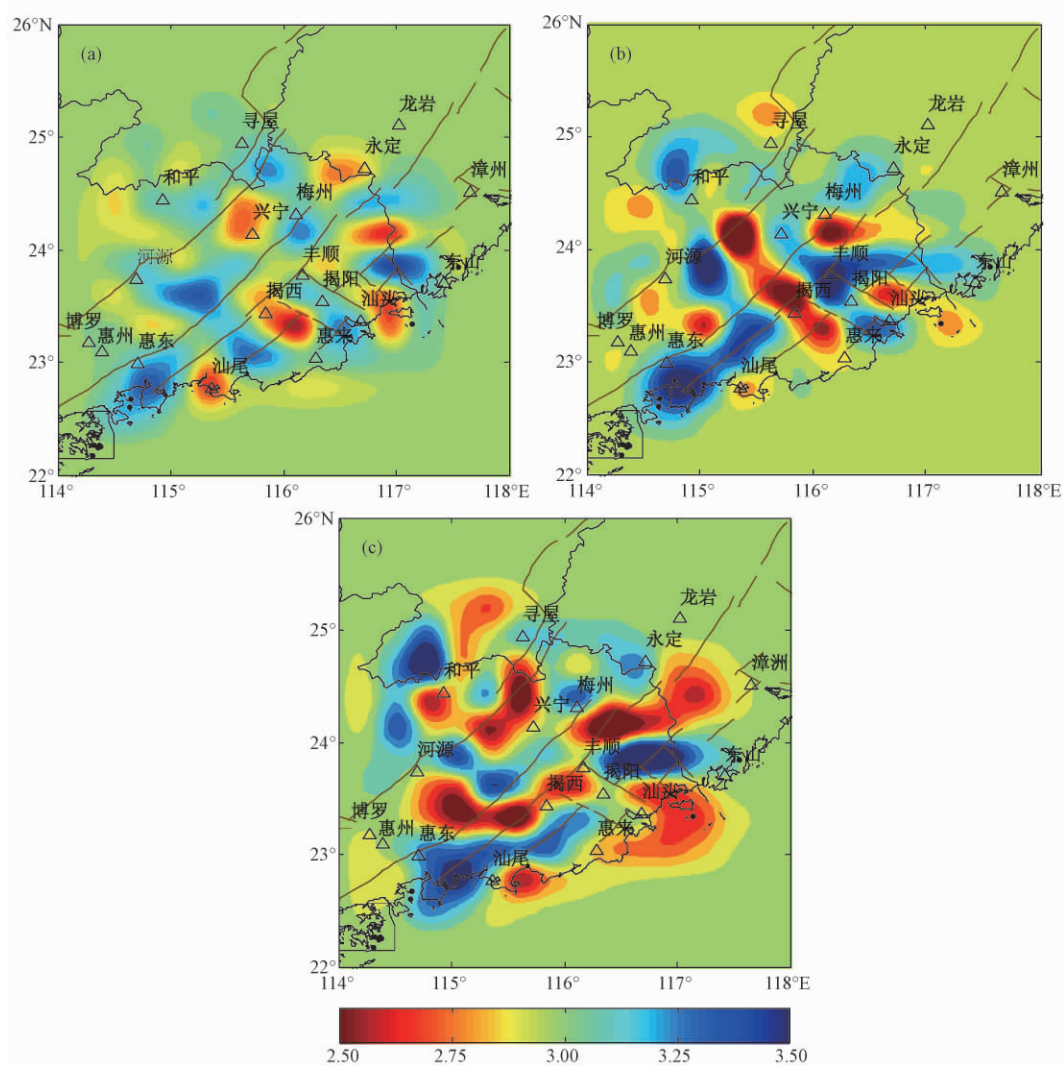


图7 典型周期瑞利面波群速度分布图像

(a) 5s; (b) 8s; (c) 11s

东之间的地壳浅层速度等值线出现明显的下弯,显示低速异常;而莲花山断裂带速度等值曲线密集分布,显示高速特征(尹周勋等,1999)。对比周期为 5s、8s 和 11s 群速度分布,周期为 11s 时的低速区域较 5s 和 8s 时明显增加,特别是从汕尾到汕头的低速异常区在 11s 时比前两个周期明显扩大并表现出互相贯通的趋势,表明研究区周期为 11s 的瑞利面波群速度值较低,可能存在低速层。瑞利面波群速度深度敏感核分析结果显示周期为 11s 的面波反应了 10 ~ 20km 地壳深处的速度值(房立华,2009b;唐有彩等,2011),由此我们可以推测研究区的地壳在 10 ~ 20km 深度上可能存在着低速层,这个结果与人工剖面以及海陆联测的结果较为吻合(廖其林,1987,1988;赵明辉,2004;徐辉龙,2006)。综上分析,本文的研究结果较好地揭示了研究区浅部地壳的横向速度变化。

4 结论

本文利用背景噪声层析成像方法反演获得广东省东部地区 5 ~ 15s 瑞利面波群速度分布图像,反演结果揭示了广东省地区中上地壳速度结构的横向不均匀性,反映了研究区域内不同构造单元的地震波速度结构特征。5 ~ 15s 瑞利波群速度分布图像显示海陆丰盆地、潮汕盆地等沉积厚度较大的区域表现为低速异常,而莲花山脉、九连山等基底埋深较浅的地区则表现为高速异常,群速度异常的分布较好地勾画了研究区内山脉、盆地等构造单元的分布特征。沿莲花山脉瑞利面波群速度总体表现为高速异常,但在地热值较高的区段(如揭西到丰顺地区)则显示出低速异常,说明地热的分布也是影响瑞利面波群速度值的重要因素。周期为 11s 时群速度低速异常区域较周期为 5s 和 8s 时的分布范围广,沿海盆地的低速异常在该周期表现出贯通的趋势,说明研究区特别是沿海地区在地壳中部可能存在着低速层。

本文获得了研究区内中上地壳的群速度分布,为进一步获得该地区地壳剪切波速度结构奠定了基础。随着研究范围的加大和台站分布均匀性的提高以及计算时间的加长,信噪比也将会进一步提升,更高的分辨率将会获得更为精细的地壳结构。另外,结合天然地震面波反演获得的地壳剪切波速度结构,将对研究广东省东部地区区域构造活动和地球动力学过程以及探讨地震分布和成因都具有重要意义。

参考文献

- 陈定国、姚梅尹,1984,莲花山断裂带南段的地震和构造,华南地震,4(1),42 ~ 51。
- 房立华、吴建平、吕作勇,2009a,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。
- 房立华、吴建平,2009b,背景噪声频散曲线测定及其在华北地区的应用,地震学报,31(5),544 ~ 554。
- 宫猛、李红谊、徐小明等,2010,青藏高原东部基于噪声的面波群速度分布特征,地学前缘,17(5),151 ~ 162。
- 高东辉、陈永顺、孟宪森等,2011,黑龙江地区背景噪声面波群速度层析成像,地球物理学报,54(4),1043 ~ 1051。
- 黄金莉、李祖宁、林树等,2007,福建及台湾地区三维 P 波地壳速度结构,2007 年中国地球物理学会年刊 - 中国地球物理学会第二十三届年会论文集,354。
- 廖其林、王振明、王屏路等,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(12),933 ~ 935。
- 廖其林、王振明、王屏路等,1988,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,31(3),270 ~ 280。
- 李军、金星、周峥嵘等,2009,利用地震噪声准实时监测短周期面波波速变化,地震学报,31(6),629 ~ 640。
- 李昱、姚华建、刘启元等,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(4),842 ~ 852。
- 梁富华,2011,福建地区瑞利面波层析成像研究,硕士学位论文,哈尔滨:中国地震局工程力学研究所。
- 梁富华、金星、李军等,2012,福建地区环境噪声瑞利波群速度层析成像,中国地震,28(1),22 ~ 32。
- 唐有彩、陈永顺、杨英杰等,2011,华北克拉通中部地区背景噪声成像,地球物理学报,54(8),2011 ~ 2022。
- 魏柏林、陈仁法、黄日恒,2000,广东省地震构造概论,北京:地震出版社。
- 魏柏林、冯均敏、陈定国等,2001,东南沿海地震活动特征,北京:地震出版社。
- 徐辉龙、丘学林、赵明辉等,2006,南海东北部南澳大地震($M=7.5$)震中区的地壳结构特征与震源构造,科学通报,51(增刊 II),83 ~ 91。
- 尹周勋、赖明惠、熊绍柏等,1999,华南连县 - 博罗 - 港口地带地壳结构及速度分布的爆炸地震探测结果,地球物理学报,42(3),383 ~ 392。
- 赵明辉、丘学林、叶春明等,2004,南海东北部海陆深地震联测与滨海断裂带两侧地壳结构分析,地球物理学报,47(5),845 ~ 852。
- 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。

- Lin F C, Ritzwoller M H, Townend J, et al, 2007, Ambient noise rayleigh wave tomography of New Zealand, *Geophys J Int.*, **170** (2), 649 ~ 666.
- Levshin A L, Pisarenko V F, Pogrebinsky G A, 1972, On a frequency-time analysis of oscillations, *Ann. Geophys.*, **28**, 211 ~ 218.
- Rawlinson N, Sambridge M, 2005, The fast marching method: An effective tool for tomographic imaging and tracking multiple phases in complex layered media, *Explor. Geophys.*, **36**, 341 ~ 350.
- Shapiro N M, Campillo M, Stehly L, et al, 2005, High resolution surface wave tomography from ambient seismic noise, *Science*, **307**, 1615 ~ 1618.
- Yang Y, Ritzwoller M H, Levshin A L, et al, 2007, Ambient noise rayleigh wave tomography across Europe, *Geophysical Journal International*, **168**, 259 ~ 274.

Surface wave group velocity tomography from ambient seismic noise in east region of Guangdong Province

Huang Yuanmin Shen Yusong Yang Maling

Earthquake Administration of Guangdong Province, Guangzhou 510070, China

Abstract We have inverted for the Rayleigh wave group velocity distribution of east region of Guangdong Province at periods of 5 ~ 14s using vertical component of ambient seismic noise tomography. Seven months continuous data (March to September, 2011) used in this study are from 26 permanent seismic stations of the Guangdong Regional Seismic Network and its adjacent stations in Fujian and Jiangxi Provinces. Green's functions were first extracted from cross-correlations of data at adjacent stations and group velocity dispersion measurements were then made using the frequency-time analysis method. Our results show significant lateral variations in uppermost crustal structures of the region. Group velocity anomalies at short periods correlate well with the surface geology of basins and mountains. The slow velocity anomaly at basin area suggests a rather thick sediment deposit, and the high velocity anomaly at mountains suggests a shallow buried depth of basement. Geothermal was an important impact factor for group velocity, and the slow velocity anomaly generally correlate with the area of high geothermal. A low-velocity layer may exist in the middle crust in the eastern region of Guangdong, especially in the coastal area of the region.

Key words: Ambient seismic noise Cross-correlation Green's function Dispersion curves