

魏红梅, 陈丽娟, 王同军. 重庆地区背景噪声面波群速度层析成像[J]. 华南地震, 2020, 40(1): 46–52. [WEI Hongmei, CHEN Lijuan, WANG Tongjun. Surface Wave Group Velocity Tomography of Background Noise in Chongqing Area [J]. South China journal of seismology, 2020, 40(1): 46–52]

重庆地区背景噪声面波群速度层析成像

魏红梅, 陈丽娟, 王同军

(重庆市地震局, 重庆 401147)

摘要: 选取重庆、四川、湖北、湖南及贵州测震台网共 25 个固定台站 2015 年 3~9 月的连续地震背景噪声记录, 利用互相关方法获得瑞利面波的格林函数, 再用时频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重庆地区深度为 5~20 km 的 S 波速度图像。成像结果表明重庆地区浅部地壳 S 波速度结构存在横向不均匀性; S 波速度异常与研究区内断裂构造分布有较好的相关性, 基底埋深较浅的山脉地区为高值异常区。

关键词: 背景噪声; 互相关; 格林函数; 群速度频散; 面波层析成像; 重庆地区

中图分类号: P315.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662(2020)01-0046-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2020.01.007

Surface Wave Group Velocity Tomography of Background Noise in Chongqing Area

WEI Hongmei, CHEN Lijuan, WANG Tongjun

(Chongqing Earthquake Agency, Chongqing 401147, China)

Abstract: This paper selected the continuous seismic background noise records from March to September 2015 recorded by 25 fixed stations in Chongqing, Sichuan, Hubei, Hunan, and Guizhou. The cross-correlation method was used to obtain the Green's function of the Rayleigh surface wave, and the group velocity dispersion curve of the Rayleigh surface wave was extracted by time-frequency analysis method. Finally, the surface wave tomography method was used to invert the S-wave velocity images in Chongqing with a depth of 5–20 km. The imaging results show that the S wave velocity structure of shallow crustal in Chongqing area has lateral heterogeneity. There is a good correlation between the S wave velocity anomalies of Rayleigh wave and the distribution of fault structures in the study area. The mountain area with shallow basement is a high value anomaly area.

Keywords: Background noise; Cross-correlations; Green's function; Group velocity dispersion; Surface wave tomography; Chongqing region

收稿日期: 2018-08-30

基金项目: 地震监测、预测、科研三结合课题(CEA-JC/3JH-162201); 地震监测、预测、科研三结合课题(3JH-202001072)

作者简介: 魏红梅(1980–), 女, 副研究员, 主要从事地震监测工作。

E-mail: 124706259@qq.com.

0 引言

重庆位于华南地震区的长江中下游地震带内,属于相对稳定的华南板块。重庆地区地壳岩层结构大致可以分为基底和盖层两大岩层部分,基底由基底断裂和深断裂分割为渝东北、渝西、渝中、渝东南四大块。区内断裂构造以北东向为主导,主要基底断裂为华蓥山基底断裂、方斗山基底断裂、七曜山—金佛山基底断裂、彭水基底断裂和长寿—遵义基底断裂。

利用地震台站记录的背景噪声互相关获得面波的格林函数,并进行层析成像反演是近年来发展迅速的一种新的地震成像方法。Shapiro等^[1]最早利用背景噪声层析成像方法反演得到美国加州7.5 s和15 s周期的瑞利面波群速度分布图。相比于传统的基于地震面波的层析成像方法,这种方法不受震源分布、震源位置误差,以及短周期面波衰减的影响,特别适合少震地区。近年来该方法广泛用于全球多个地区地壳速度的研究^[2-6]。方洪健等^[7]提出的基于小波变换的多尺度地震成像方法利用小波多分辨分析的优良性质,实现了速度模型的多尺度成像,具有数据自适应的优点;而基于

射线追踪的面波数据直接反演方法由面波频散数据直接反演得到三维速度结构,相比于传统方法,不会因为某个周期数据少而舍弃该周期的数据,考虑了面波非大圆路径的影响,对短周期面波反演尤其有利。本文利用重庆、四川、湖北、湖南及贵州测震台网记录的地震噪声的垂直分量数据,提取地震台站间瑞利面波的格林函数,利用面波层析成像方法反演得到荣昌地区周期为5~15s的S波速度图像。

1 数据及方法

选取重庆、四川、湖北、湖南及贵州测震台网总共25个固定台站2015年3~9月的连续地震背景噪声记录。其中重庆测震台网14个台站,四川测震台网6个台站,湖北测震台网2个台站,湖南测震台网1个台站,贵州测震台网2个台站。仪器采样率为100 Hz,除重庆台网麻柳台、石龙台、云门台为短周期仪器外,其余为宽频带仪器。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分量的地震记录。台站分布如图1所示。

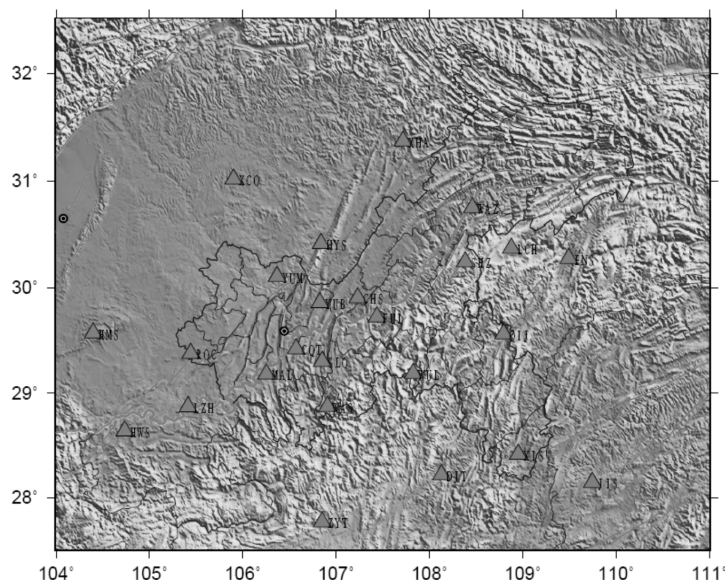


图1 台站分布图

Fig.1 Station distribution map

数据预处理对每一个台站每天垂直分量的数据进行重采样(5 Hz)、去除仪器响应、带通滤波、频率域归一化、谱白化、时间域归一化去除天然地震信号、仪器故障引起的异常信号以及地震台站附近非平稳噪声对互相关计算结果的影响,提高背景噪声的“信噪比”。

对于给定的观测台站A和B,环境噪声的互相关函数与格林函数之间的关系可由 $dC_{AB}(t)/dt = -\hat{G}_{AB}(t) + \hat{G}_{BA}(-t) \approx -G_{AB}(t) + G_{BA}(-t)$, $-\infty \leq t < \infty$ 给出。这里, $C_{AB}(t)$ 为台站A和台站B环境噪声的互相关函数; $G_{AB}(t)$ 为台站B的精确格林函数(以A为源); $G_{BA}(-t)$ 则是台站A的逆向格林函数(以B为

源); $\hat{G}_{AB}(t)$ 和 $\hat{G}_{BA}(-t)$ 表示相应的估计值(经验格林函数), t 表示时间。

由于格林函数的空间互易性, 利用 $\hat{G}_{AB}(t) = \frac{d}{dt} \left[\frac{G_{AB}(t) + G_{AB}(-t)}{2} \right]$, $0 \leq t < \infty$ 可由环境噪声的互相关函数测量台站 B 的经验格林函数 (以台站 A 为源)。

研究表明, 如果噪声源在空间上分布是均匀的, 那么噪声数据正向和逆向互相关的结果应该是对称的, 这样得到的经验格林函数和精确格林函数的相位信息是相同的。但实际上, 噪声源的

空间分布通常是不均匀的, 以至于不能保证由实际观测数据得到的正向和逆向的互相关序列的对称性。为此, 用噪声数据正向及逆向互相关函数的反序平均结果计算相应的经验格林函数。这不但能够有效的降低噪声源分布不均匀造成的影响, 而且可同时提高结果的信噪比。本文先将互相关函数求时间导数, 再将得到的正向及逆向求导结果做反序平均, 最终可获得等价的经验格林函数。图 2 是计算得到的所有台站 2015 年 3~9 月共 7 个月速度谱噪声互相关函数。计算结果不但显示了很好的对称性, 而且具有较高的信噪比。

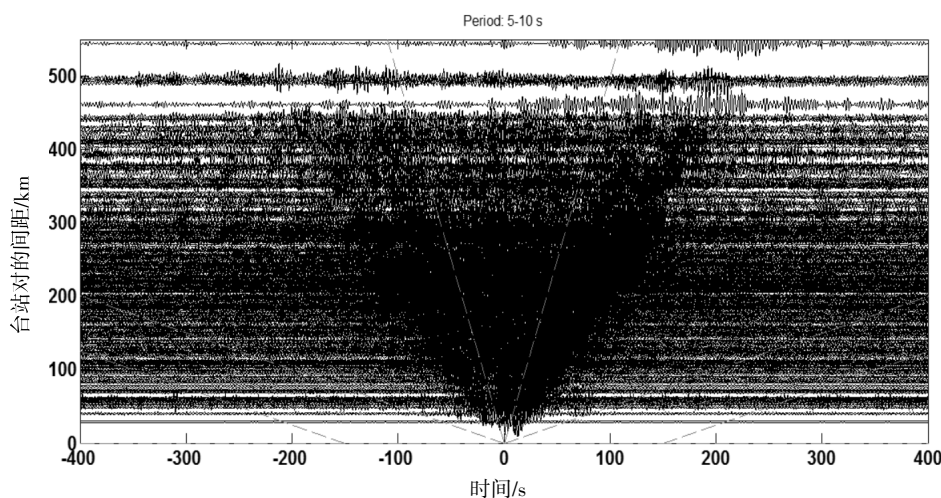


图 2 所有台站经验格林函数

Fig.2 EGFs at all stations

本文采用姚华建等^[2]提出的基于图像分析的方法来提取面波经验格林函数或噪声互相关函数的相速度频散和群速度频散曲线提取方法提取双台站间瑞利面波群速度频散曲线。

为了获得可靠的频散曲线, 我们规定台站间的距离至少需要两倍波长, 因此可以测量到截止周期(T)和台站间距离(Δ_{AB})与平均群速度 v_{AB} 需要满足以下条件: $\Delta_{AB} \geq 2\lambda = 2v_{AB} \times T$, 式中 λ 表示测量截止周期为 T 的波长。我们选取的台站间最大、最小距离分别为 295 km 和 28 km, 取测量平均群速度 v_{AB} 为 3.5 km/s, 计算得到的频散曲线周期范围约为 4.2~42 s。因此, 本文提取 5~40 s 周期范围内的频散曲线, 在此范围内测量的频散曲线是较为可靠的。

另外, 频散曲线的可靠性与信噪比(SNR)有密切的关系, 我们舍弃信噪比小于 5 的数据, 同时去除台站间距小于 2 倍波长的射线路径数据以提高群速度测量的可靠性, 然后, 利用得到的噪声互相关函数来测量瑞利波的群速度。

图 3 是重庆台和花马寺台间频散曲线测量示意图, 其中图 3(a)是信噪比计算结果, 表明 5~50 s 周期内信噪比是满足要求的; 图 3(b)虚线部分是截取的噪声信号时间窗; 图 3(c)是群速度频散曲线计算结果。

2 质量控制

本文共选取研究区域内 25 个台站, 理论上可以得到 300 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, 最终得到 146 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 5 给出了各周期参与反演的频散曲线数目。图 5 表明, 在 5~20 s 周期内获得了一定数量的频散曲线, 射线分布基本能满足反演计算的要求。

为了验证层析成像结果的可靠性, 一般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的理论速度模型，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 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ，加上 2% 的速度扰动进行相应的检测板测试。

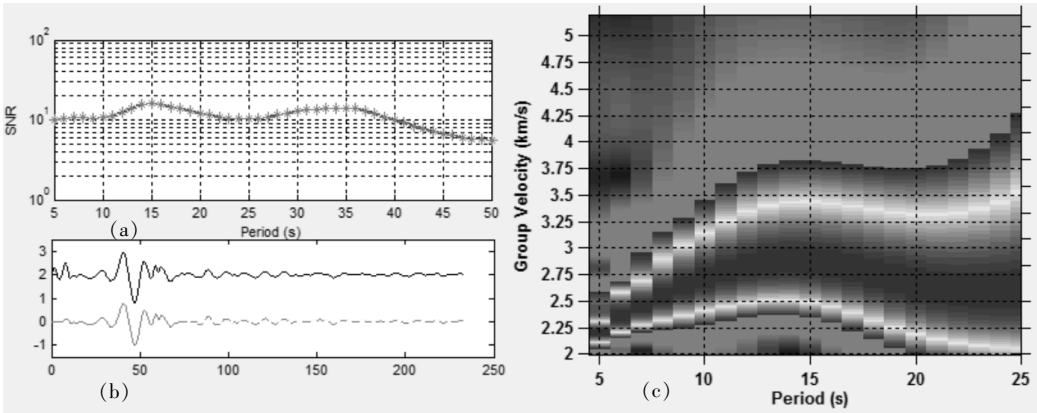


图 3 频散曲线测量示意图
Fig.3 Schematic diagram of dispersion curve measurement

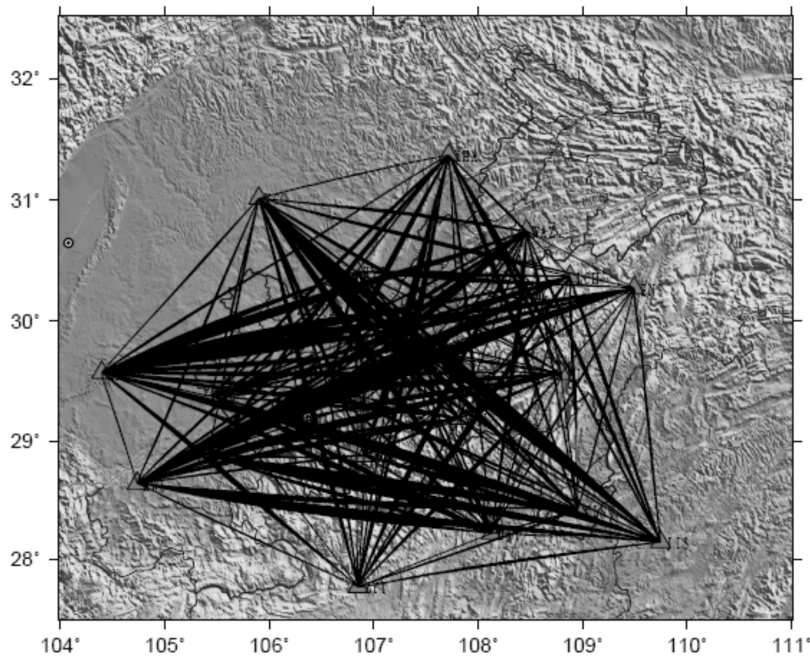


图 4 射线分布图
Fig.4 Ray distribution map

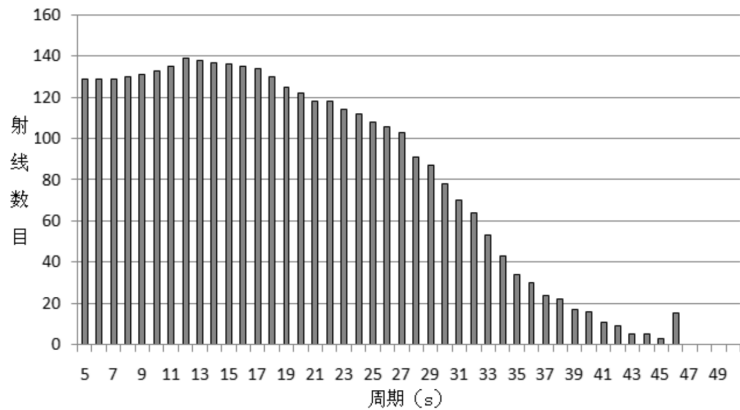


图 5 各周期射线路径数目
Fig.5 Number of ray paths per cycle

图 6 给出深度为 5 km、10 km、15 km、20 km、25 km、30 km、35 km 检测板测试结果及初始检测板模型。检测结果显示, 深度为 5~25 km

时, 反演重建的速度结果较好, 即反演结果重现了给定的理论速度模型和扰动, 成像结果的可信度较高, 但研究区边缘重建结果相对较差, 且随着深度的增加, 重建效果相对较差。

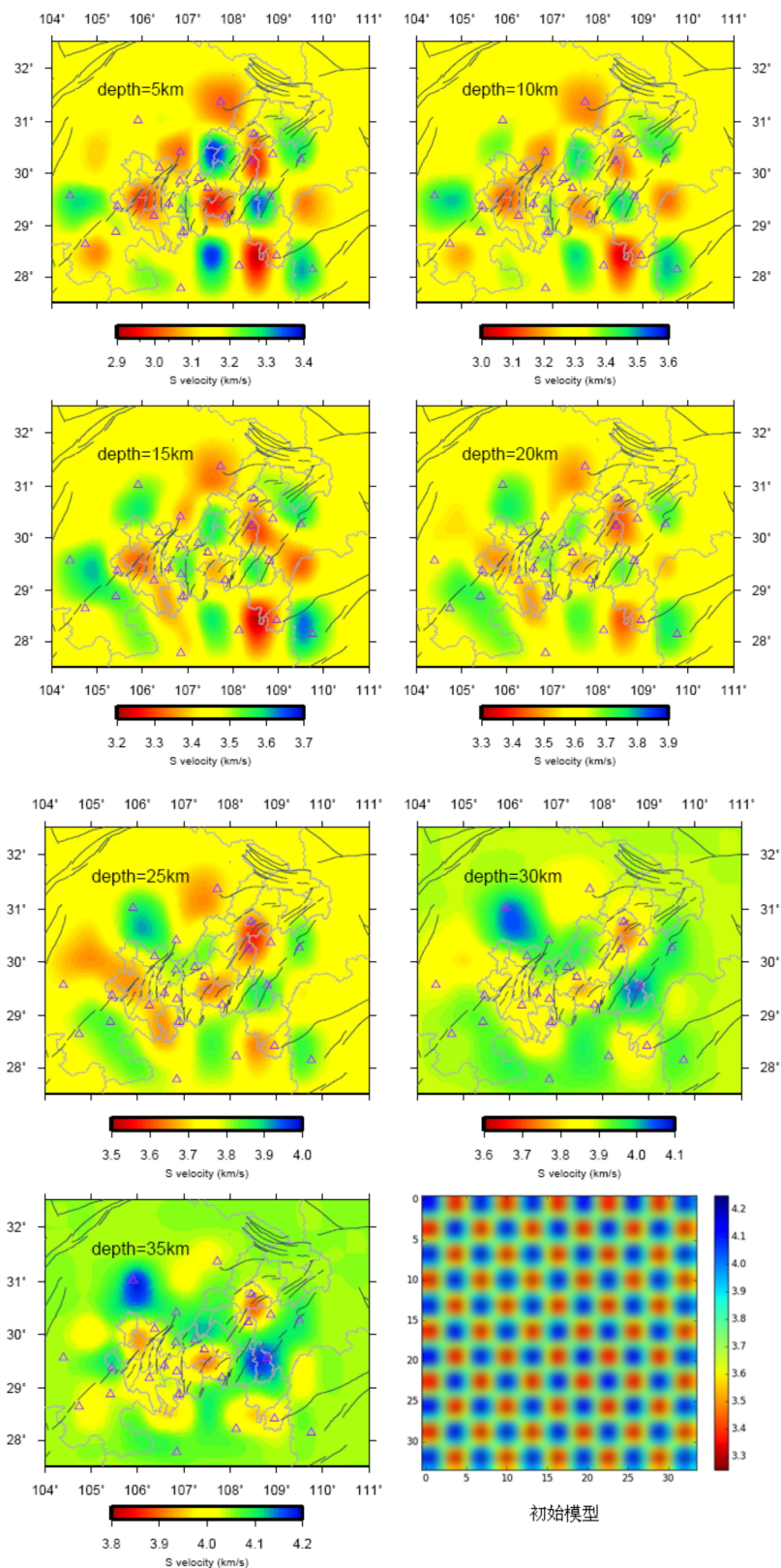


图 6 检测板测试结果(5~35km 及初始模型)

Fig.6 Test results of test board

3 结论及讨论

面波群速度表示一组面波能量的传播,即波包最大振幅的传播速度。通过面波层析成像可以了解某一深度范围内速度结构的横向变化特征,以及不同深度范围内的速度变化差异。S波速度随深度从浅到深的变化反映地球介质从浅到深速度结构的变化趋势,对研究区构造特征的研究有重要的参考价值。本文用姚华建等^[2,8-14]提出的面波层析成像方法反演深度为5~35 km S波速度。根据群速度分布特征及检测板可靠性分析结果,选取深度为5 km、10 km、15 km、20 km的S波群速度分布图像进行讨论(图7)。从图7可以看出:

(1) S波速度高与低不均匀分布,表明研究区中上地壳速度结构存在横向不均匀性。同一深度,S波速度出现高值、低值异常交替出现的情况。

(2) depth=5 km时,S波速度横向变化反映了地表构造特征,速度变化呈现出受研究区内华蓥山基底断裂、七曜山—金佛山基底断裂等构造断裂控制的区块化特征。尤其是沿华蓥山断裂带一线有明显的低速异常,与断裂东西两侧形成明显的不同,可能与断裂旁侧次级断层、褶皱发育有关。

(3) 同一地区S波速度随深度的变化而变化,反映出地壳不同深度S波速度的变化情况。重庆石柱—忠县附近地区为高速异常区,且随着深度的增加而增加,depth=5 km时,S波速度约为3.25 km/s,depth=20 km时,S波速度约为3.65 km/s,表明石柱—忠县一带基底埋深较浅。綦江—万盛地区为低值异常区,表明綦江—万盛地区沉积厚度相对较大。荣昌及附近地区S波速度随着深度的增加而增加,深度为5 km时,S波速度约为3.2 km/s,深度为20 km时,S波速度约为3.7 km/s。

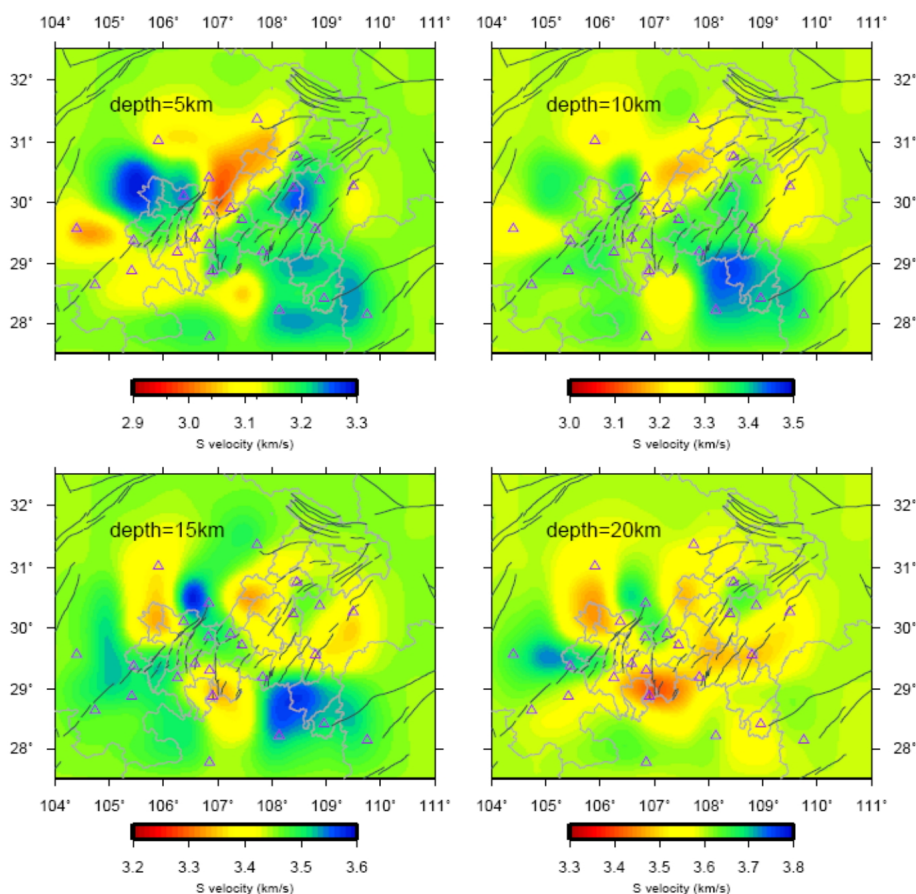


图7 深度为5~20 km S波速度层析成像结果

Fig.7 S wave velocity tomography results at depth of 5–20 km

(4) 重庆辖区地震活动相对较频繁的地区包括荣昌及附近以及三峡库区石柱—忠县段,区内除有华蓥山基底断裂、七曜山—金佛山基底断裂经过外,还包含一系列北东向的断层,如曹子冲

断层、燕子岩断层、石柱断层等,而这两个地区都表现出S波速度高值异常,与国内其他地区的研究结果显示了同样的特征,即山脉地区S波速度为高值异常。另外,荣昌地区采气注水及库区

水体的对地下裂隙的渗透都对地震活动产生一定的触发作用。

本文获得了研究区内中上地壳的 S 波速度分布, 研究结果基本能反映出重庆地区浅部地壳 S 波速度结构特性以及与地震活动性的一些关系, 为重庆地区的地震活动构造背景及地震孕育机理提供重要参考资料。因研究区内台站数量有限等因素的影响, 结果不是很理想。随着台站的增加、台站分布均匀性的提高以及计算时间的加长, 信噪比会有所提高, 也能得到更加精细的成像结果。

参考文献:

- [1] Shapiro N M, Campillo M, Stehly L, et al. High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise [J]. Science, 2005, 307(5715): 1615-1618.
- [2] 姚华建, 徐果明, 肖翔, 等. 基于图像分析的双台面波相速度频散曲线快速提取方法[J]. 地震地磁观测与研究, 2004, 25(1): 1-8.
- [3] Yang Y, Ritzwoller M H, Levshin A L, et al. Ambient noise Rayleigh wave tomography across Europe [J]. Geophys. J. Int., 2007, 168(1): 259-274.
- [4] 李昱, 姚华建, 刘启元, 等. 川西地区台阵环境噪声瑞利波相速度层析成像[J]. 地球物理学报, 2010, 53(4): 842-852.
- [5] 房立华, 吴建平, 吕作勇. 华北地区基于噪声的瑞利面波群速度层析成像 [J]. 地球物理学报, 2009, 52 (3): 663-671.
- [6] 王小龙, 马胜利, 郭志, 等. 利用背景噪声成像技术反演三峡库区及邻近地区地壳剪切波速度结构 [J]. 地球物理学报, 2013, 56(12): 4113-4124.
- [7] Fang H., Yao H., Zhang H., et al. Direct inversion of surface wave dispersion for three-dimensional shallow crustal structure based on ray tracing: methodology and application [J]. Geophysical Journal International, 2015, 201(3): 1251-1263.
- [8] 徐果明, 姚华建, 朱良保, 等. 中国西部及其邻域地壳上地幔横波速度结构[J]. 地球物理学报, 2007, 50(1): 193-208.
- [9] 易桂喜, 姚华建, 朱介寿, 等. 中国大陆及邻区 Rayleigh 面波相速度分布特征 [J]. 地球物理学报, 2008, 51(2): 402-411.
- [10] 陈俊磊, 胡家富, 杨海燕, 等. 重庆及其邻区地壳结构研究[J]. 地震研究, 2013, 36(4): 478-484.
- [11] 黄元敏, 沈玉松, 杨马陵. 广东省东部地区背景噪声面波群速度层析成像 [J]. 中国地震, 2012, 28 (4): 360-369.
- [12] 高东辉, 陈永顺, 孟宪森, 等. 黑龙江地区背景噪声面波群速度层析成像[J]. 地球物理学报, 2011, 54(4): 1043-1051.
- [13] 沈玉松, 康英. 广东及其邻域噪声面波层析成像[J]. 地震学报, 2014, 36(5): 826-834.
- [14] Li H, Su W, Wang C, et al. Ambient noise Rayleigh wave tomography in western Sichuan and eastern Tibet[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2009, 282(1-4): 201-211.