

王爽, 孙新蕾, 秦加岭等. 2018. 利用密集地震台网高频环境噪声研究广东新丰江库区浅层地下结构. 地球物理学报, 61(2): 593-603, doi:10. 6038/cjg2018L0434.

Wang S, Sun X L, Qin J L, et al. 2018. Fine fault structure of Xinfengjiang water reservoir area from high-frequency ambient noise tomography. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 61(2): 593-603, doi:10. 6038/cjg2018L0434.

# 利用密集地震台网高频环境噪声研究 广东新丰江库区浅层地下结构

王爽<sup>1,2</sup>, 孙新蕾<sup>1\*</sup>, 秦加岭<sup>1,2</sup>, 何立朋<sup>1,2</sup>, 邓阳凡<sup>1</sup>

1 同位素地球化学国家重点实验室, 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

2 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 广东河源新丰江水库位于华南典型断层上, 自 1959 年水库蓄水以来, 库区地震活动性明显增强, 并发生了 6.1 级触发地震. 然而我们对其地下结构的了解还远远不够, 对库区地震的研究也因此存在很多不确定性. 为了研究库区浅层地下结构, 我们在 2015 年初在新丰江库区人字石断裂周边布设了 42 个短周期地震仪的密集地震台网. 台间距大约为 100~500 m, 时间跨度为 1 个月. 我们对获得的每个台站的连续信号分段进行处理, 并对任意台站对的信号进行互相关和叠加处理, 恢复所有台站对间的经验格林函数(EGF). 然后利用多次滤波分析方法测量瑞利波群速度频散曲线, 并反演该区域的群速度分布和三维剪切波速度结构. 我们的结果表明, 对于这样比较密集的台站间距, 高频(0.2~1.2 s)频散信号基本可以得到很好的恢复, 且该频段信号对浅层地下结构(<1 km)较为敏感. 剪切波速度分布表明该区域人字石断裂位置出现明显的低速分布, 并且低速区在断裂南端向两侧延伸, 有可能代表与人字石断裂交错的小断裂区域. 同时, 人字石断裂把该区域划分成了东西两部分, 两侧整体上呈现高速异常, 与地表山丘相吻合. 我们的结果得到了新丰江人字石断裂附近的近地浅层的小尺度精细速度结构, 为进一步理解该区域的构造以及地震发生提供了重要依据.

**关键词** 新丰江水库; 密集台网; 环境噪声; 层析成像

doi:10. 6038/cjg2018L0434

中图分类号 P315

收稿日期 2017-07-13, 2017-09-11 收修定稿

## Fine fault structure of Xinfengjiang water reservoir area from high-frequency ambient noise tomography

WANG Shuang<sup>1,2</sup>, SUN XinLei<sup>1\*</sup>, QIN JiaLing<sup>1,2</sup>, HE LiPeng<sup>1,2</sup>, DENG YangFan<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guangzhou 510640, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The Xinfengjiang (XFJ) water reservoir in Guangdong, China locates in Yanshanian granites. After the impoundment of the reservoir in 1959, numerous earthquakes occurred, including the M6.1 one in 1962. XFJ water reservoir is one of the most active seismic zones in Guangdong. However, the underground structure of this area is not yet well understood, and

基金项目 广州市科技计划项目(201707020029), 国家自然科学基金(41774053)和同位素地球化学国家重点实验室(中国科学院广州地球化学研究所)基金(SKLabIG-16-03)共同资助.

第一作者简介 王爽, 女, 1992 年生, 现于中国科学院广州地球化学研究所攻读博士学位, 主要从事地震学方面的研究.

E-mail: wang\_shuang9279@163.com

\* 通讯作者 孙新蕾, 女, 研究员, 1976 年生, 主要从事地球内部结构及动力学方面的研究. E-mail: xsun@gig.ac.cn

there are uncertainties about the mechanism of reservoir earthquakes. To investigate the shallow crustal structure near XFJ water reservoir area, we deployed 42 short period stations near Renzishi Fault (RZSF), with inter-station distance between 100~500 m in year 2015. We retrieved the empirical Green's function (EGF) of all possible station pairs, and obtained their Rayleigh wave group velocity dispersion. Finally, we inverted Rayleigh group velocity and 3D shear wave velocity beneath RZSF area. Our results show that for such dense spacing stations, high frequency (0.2~1.2 s) dispersion signals can be well retrieved, which are important to resolve shallow crustal structure (<1 km). Shear wave velocity maps show obvious low velocity anomalies beneath RZSF, and this slow anomaly extend to both sides of the fault in the south. The two sides of the RZSF show relatively high velocities, which may correlate with surficial geology. Our results show fine structures of the distribution and geometry of fractures near the RZSF, and provide important constraints in understanding the geological tectonics and seismicity in XFJ water reservoir area.

**Keywords** Xinfengjiang water reservoir; Dense array; Ambient noise; Tomography

## 0 引言

广东省河源的新丰江水库,位于中生代末期巨大的花岗岩加里东褶皱带上,库区及其周围断裂构造比较发育.新丰江水库自1959年蓄水以后,库区地震活动性明显增强,其中包括了1962年发生的6.1级强震和1989、1999、2012、2013年分别发生的5级左右的地震,以及其他数以千计的微小地震.其中1962年的主震成为世界上为数不多的水库触发的6级以上地震之一.新丰江水库的地震研究,对理解水库地震的特点和发震机制,有着重要的意义.

新丰江地区的地质构造以中生代以后的历次构造运动留下的断裂为主,褶皱次之(李敬等,2014).库区地质构造以北北东、北北西、北东东向断裂构成的网格状格局为主要特征.北北东向断裂是地表最发育的断裂,其规模也比较大,包括河源断裂(HYF)、人字石断裂(RZSF)和大坪-岩前断裂(DYF)(图1a)(沈崇刚等,1974;丁原章等,1983;万永芳等,2008;程惠红等,2012).北北西向断裂主要分布在水库东侧,由一系列断层组成.其中石角-新港-白田断裂(SXBF)是最主要的北北西向断裂,多次切割北北东向断裂.北东东向断裂表面不出露,但航空磁测和重力异常资料均显示该断裂存在于深部区域(万永芳等,2008).北东东断裂主要位于水库南侧峡谷区两侧,构成了地壳深部的构造格局.

很多地学工作者分别用震源机制(王妙月等,1976)、构造应力场分析(魏柏林等,1991)、有限元模拟(程惠红等,2012)、波速比变化(冯锐,1977;杨选等,2012)等对相关问题做了探索,提出了新丰

江水库地震主要受区域应力和地质结构影响的观点.但对新丰江水库地区的地下结构,尤其是精细结构的研究,之前由于台站分布比较稀疏,分辨率不足,相关研究比较缺少(郭贵安和冯锐,1992).杨卓欣等(杨卓欣等,2013)利用基于主动源和被动源的体波反演的方法,用52个台站进行了整个新丰江库区的上地壳三维层析成像,其结果表明库区上地壳结构很复杂,高低速互相切割.叶秀薇等(叶秀薇等,2013)基于2012年4.8级锡场地震及其余震,联合反演了新丰江水库西北侧的地下结构和地震位置分布,得出了地下10~20 km左右的高速层分布,并可发现地震序列穿过此高速体.这些方法虽在空间分辨率上有一定提高,但其结果仍然没能清晰地显示出库区内断裂结构的详细信息.我们需要获得高分辨率的库区精细地下结构,包括断层的形态、展布和速度变化等,从而能更好地研究和理解地下结构和地震活动性的关系.

在本研究中,我们选择了人字石断裂地区来研究其地下浅层的精细结构.人字石断裂在地表比较发育,断裂附近地震活动性也较强,水库蓄水后发生过数次3级以上地震(图1a).考虑到新丰江地区地震分布不均匀以及分辨率较高的要求,我们采用密集地震台网环境噪声层析成像方法.与传统的地震层析成像相比,环境噪声成像方法因其不依赖地震位置、无需考虑震源位置和发震时刻的误差、以及对短周期面波信号的良好恢复,在过去的十几年中获得了长足的发展和广泛的应用(Shapiro et al., 2005; Weaver, 2005; Yao et al., 2006; Bensen et al., 2007; Yang et al., 2007; Lin et al., 2007, 2008, 2009; Yang and Ritzwoller, 2008; Zheng et al., 2008; Sun et

al., 2010). 大多数环境噪声的研究关注于区域结构, 其研究深度在几十到上百公里. 随着流动台网布设的发展, 环境噪声成像的分辨率逐渐提高, 研究区域及成像深度在更小更浅的方向发展, 可达近十千米 (Huang et al., 2010; Li et al., 2016). 这些研究为小区域的精细结构研究提供了很好的结果, 对关乎小尺度的地球动力学以及地质构造等提供了强有力的约束. 然而, 对于高密度地震台网环境噪声研究千米尺度内的精细结构, 还未广泛开展. 目前已有研究包括 Lin 等 (Lin et al., 2013) 对北加州长滩的新港—英格伍德断层的研究: 他们通过 5200 个台站间距约 100 m 的大规模检波器阵列, 恢复了频率范围为 0.5~4 Hz 面波信号, 并给出了长滩地区 800 m 深度的结构, 包括断层位置和深度等.

我们基于密集地震台网的优势, 在新丰江的人字石断裂附近布设了密集短周期地震台网, 来研究新丰江库区的精细断层结构. 对该地区的环境噪声精细成像将极大的加深我们对发震地区断层结构的认识, 并期望能对该地区的地震发生过程有更进一步的理解.

## 1 数据与方法

2015 年初, 我们在新丰江库区人字石断裂周围

布设了 42 个三分量短周期地震仪, 台间距为 100~500 m (图 1b), 地震仪频段为 0.2~120 Hz. 由于一台仪器中途被破坏, 最后我们获得 41 个台站的一个月的连续地震记录.

我们采用 Bensen (Bensen et al., 2007) 的方法来恢复台站间的经验格林函数. 首先, 我们选取了垂直分量并分别把每个台站的原始连续数据剪切成 4 小时一段, 然后对分段数据做去均值和去趋势处理. 为了尽量去除地震、非固定噪声源和仪器误差等因素对互相关结果的影响, 我们也对每段波形做了时域归一化和频谱白化的处理. 随后, 我们对所有台站对的数据做互相关和叠加处理, 提高信噪比. 图 2 展示了台站对 26 和 34 的互相关波形, 其频率范围是 0.1~1.5 s. 图中也呈现了互相关波形在 4 个不同频段的波形信号, 从中可以看出瑞利波在不同周期显示出明显的速度差异, 即瑞利波频散现象. 图 3 展示了三个不同滤波频段范围内台站 34 和其他所有台站之间的经验格林函数, 可以看到高频瑞利波信号均可以很好地恢复出来. 然后, 我们对互相关波形做了多次滤波分析, 手动挑选出 0.2~3 s 的瑞利波群速度频散曲线 (Herrmann, 2013). 为了增加数据的可靠性, 我们摒弃了信噪比较低和台站间距不大于 1.5 倍波长的群速度频散曲线. 图 4 显示出不同周期的最终射线路径分布图. 从中可以看出, 0.2~

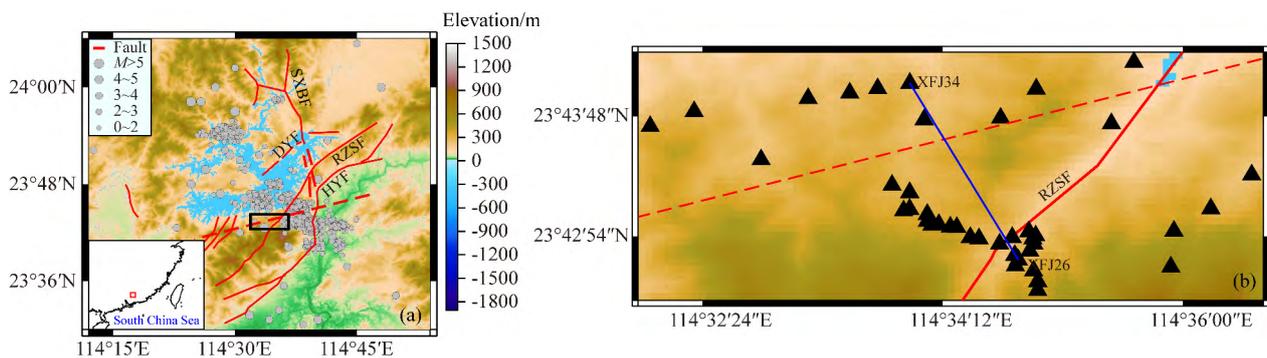


图 1 (a) 新丰江库区地理位置示意图. 其中红色实线分别代表河源断裂 (HYF)、人字石断裂 (RZSF)、大坪-岩前断裂 (DYF)、石角-新港-白田断裂 (SXBF), 红色虚线表示北东东向深部断裂, 灰色圆圈表示自 1970 年至今该地区发生的 3 级以上地震及 2010—2015 年 0 级以上地震. 左下角红色方框中显示了图 1a 的位置. 靠近新丰江水库的黑色方形即为图 1b 的位置; (b) 人字石断裂及密集地震台网的分布情况. 黑色三角形表示台站位置, 红色实线表示人字石断裂. 蓝色实线为图 2 中台站 26 和 34 的射线路径.

Fig. 1 (a) The geological setting of XFJ water reservoir area. Red lines in the map are the NNE and NNW faults, which include Heyuan Fault (HYF), Renzishi fault (RZSF), Daping-Yanqian fault (DYF) and Shijiao-Xingang-Baitian faults (SXBF). The NEE fault is represented by red dashed line, since it is an inferred deep fault. The grey circles indicate earthquakes with magnitude greater than 3 since 1970 and earthquakes with magnitude greater than zero from 2010 to 2015. The red rectangular in the lower left-hand shows the region of Fig. 1a. The black rectangular in Fig. 1a next to XFJ reservoir shows the location of Fig. 1b. (b) Distribution of the dense seismic array and the RZSF in XFJ area. Stations and the fault are denoted by black triangles and red line, respectively. The blue line represent the ray path between the station pair 26 and 34 in Fig. 2.

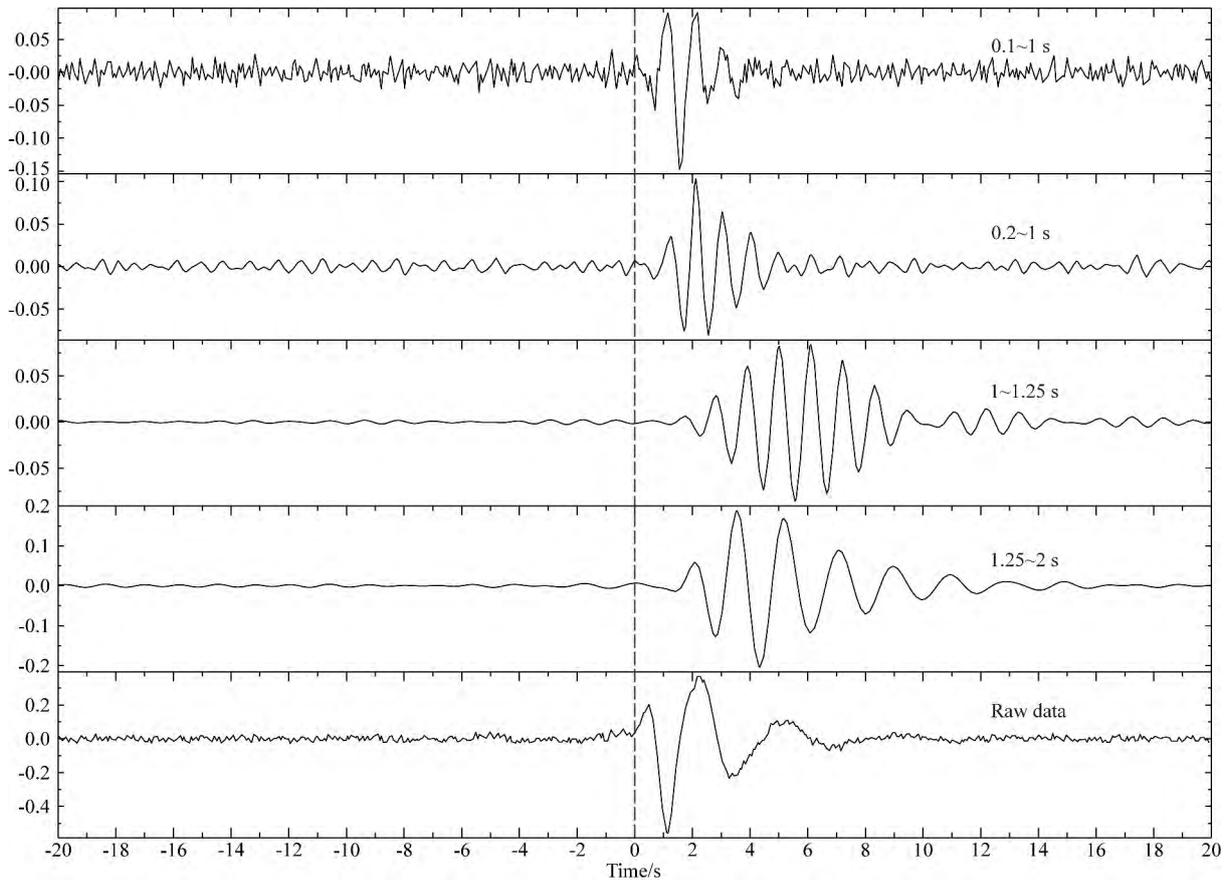


图2 台站 26 和 34 之间一个月的瑞利波互相关波形, 其不同滤波频段的信号也同时展示, 表现出明显的频散现象  
 Fig. 2 Example of a one-month cross-correlation between the station pair 26 and 34. The raw cross-correlation (bottom) is filtered by 4 different frequency bands, and are shown in the same figure as comparison. The dispersion of the Rayleigh waves is clearly observed

0.8 s 的射线路径分布比较均匀, 在整个反演区域都有较好的交叉路径. 随着周期的逐渐增大, 周期大于 1.0 s 的射线路径数目随之减少, 但分布规律比较相似.

随后, 我们对这些频散数据利用 Fast Marching Method (FMM) (Rawlinson and Sambridge, 2005) 反演出 0.2~1.2 s 的瑞利波群速度分布. FMM 方法是一种基于网格利用有限差分实现的快速且无条件稳定的非线性方法, 它通过正演和反演步骤的多次迭代来解决反演问题的非线性问题. 由于浅部地壳具有强烈的横向不均匀性, 面波传播的大圆路径假设不再适用, FMM 能够解释偏离大圆路径的射线弯曲, 从而提高成像可靠性. 反演步骤允许施加平滑和阻尼正则化, 以解决解的不唯一性问题. 在反演中, 对每个周期, 我们控制格点间距为 0.8 km × 0.8 km. 我们对不同的平滑系数和阻尼系数进行了搜索, 从中选出达到最好的分辨率和可靠的结构的结果.

最后, 对于每一个格点, 我们在 0.2~1.2 s 瑞利波群速度的基础上, 进行了一维地下速度结构反演.

我们采用线性反演方法 (Herrmann, 2013), 反演的初始速度模型为  $3.5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  的均匀模型, 每 20 m 分一层, 深度为 1 km. 在反演过程中, 因为极小区域速度模型的复杂性, 我们并没有合适的先验初始模型. 而 Herrmann 的反演方法, 在初始速度模型为均匀结构的情况下, 一般都能比较准确的恢复地下结构 (Sun et al., 2010), 因此我们的初始模型选择是合理可靠的. 图 5 为我们在反演过程中不同迭代次数后模型收敛的情况. 可以看出一般 3 次迭代后结果基本收敛.

## 2 结果和讨论

首先, 我们对所用的数据进行了分辨率测试. 测试的模型为 0.8 km × 0.8 km 的网格, 背景速度与反演背景速度相同, 但在每个控制格点施加  $\pm 0.2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  的相间速度扰动. 我们的分辨率测试建立在图 4 射线路径的基础上, 所有数据和反演参数均与真实数据和反演过程的参数相同.

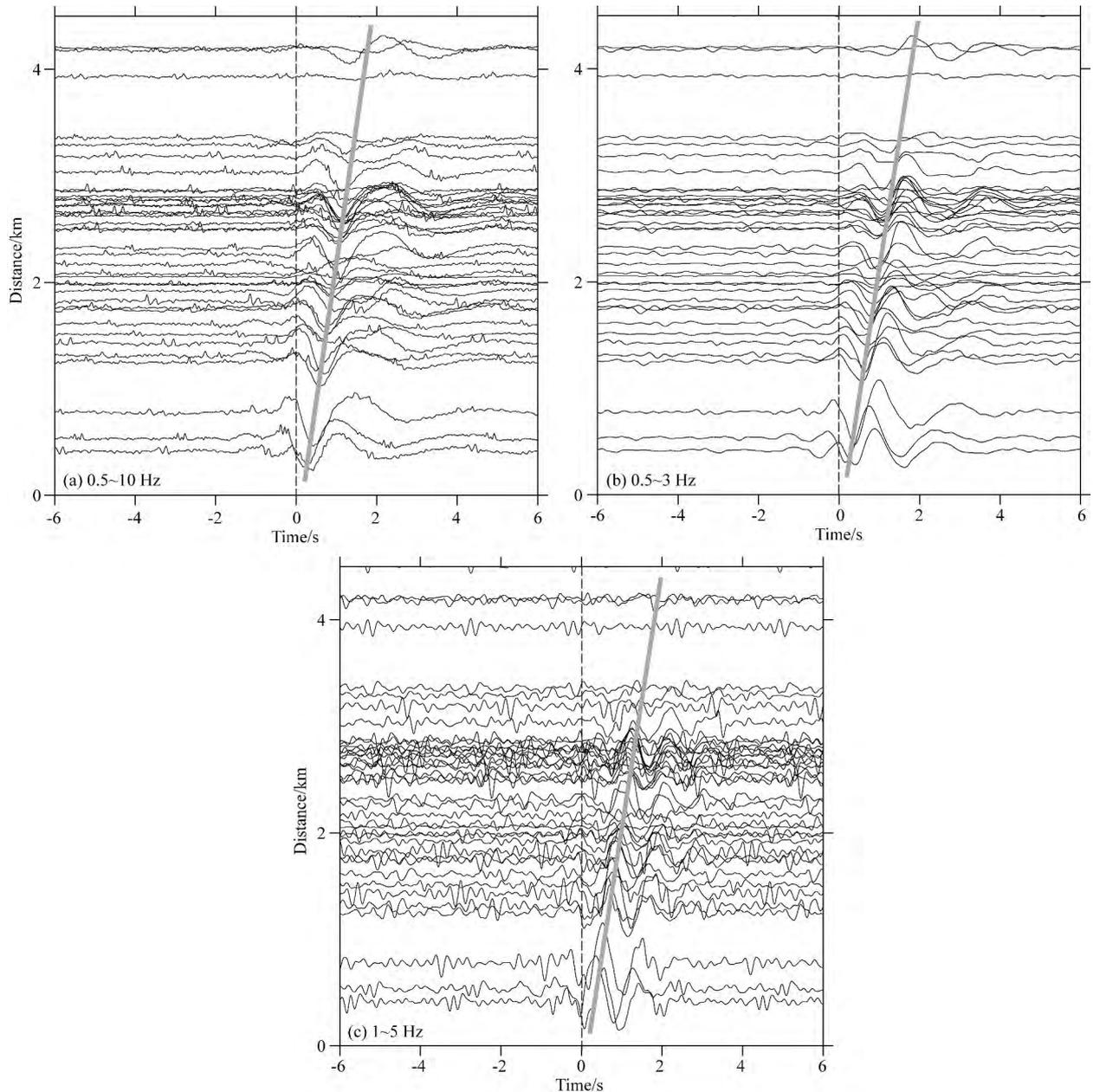


图3 台站34与其他所有台站之间的经验格林函数,滤波范围分别为(a) 0.5~10 Hz、(b) 0.5~3 Hz、(c) 1~5 Hz. 虚线为零时间线,灰色斜线表示该频段内瑞利波在不同距离的近似到时,其斜率为区域的平均慢度

Fig. 3 Example of a one-month cross-correlation record-sections between station 34 and all the other stations. These seismograms are bandpass filtered from (a) 0.5 to 10 Hz, (b) 0.5 to 3 Hz and (c) 1 to 5 Hz, respectively. The dashed line is the zero time and thick grey line indicates the approximate arrival times of Rayleigh waves at different distances, whose slope can be approximated as averaged slowness of this area

与基于传统地震方法的已有研究相比较而言,本研究的分辨率有了非常大的提高,大约为  $0.8 \text{ km} \times 0.8 \text{ km}$ (图6). 除了地震台网的边缘部分,大多数区域分辨率都比较好. 在较长周期,由于射线路径覆盖比较稀疏(图4),所以  $0.8 \text{ s}$  以上的周期其分辨率比  $0.2 \sim 0.8 \text{ s}$  略差. 图6中我们用虚线圈定了分辨率较好、并且在台站覆盖范围内的区域. 之后我们关于

速度结果的讨论将关注在这个区域内.

图7是不同周期的群速度分布图. 可以看到,人字石断裂处相对于断裂两侧呈现出明显的低速异常. 在人字石断裂的西南侧,有一个比较明显的低速异常. 整体上,区域的速度结构呈高速异常与低速异常相间分布,这种结构特征在不同周期基本相似,但随深度增加分布状态略有变化.

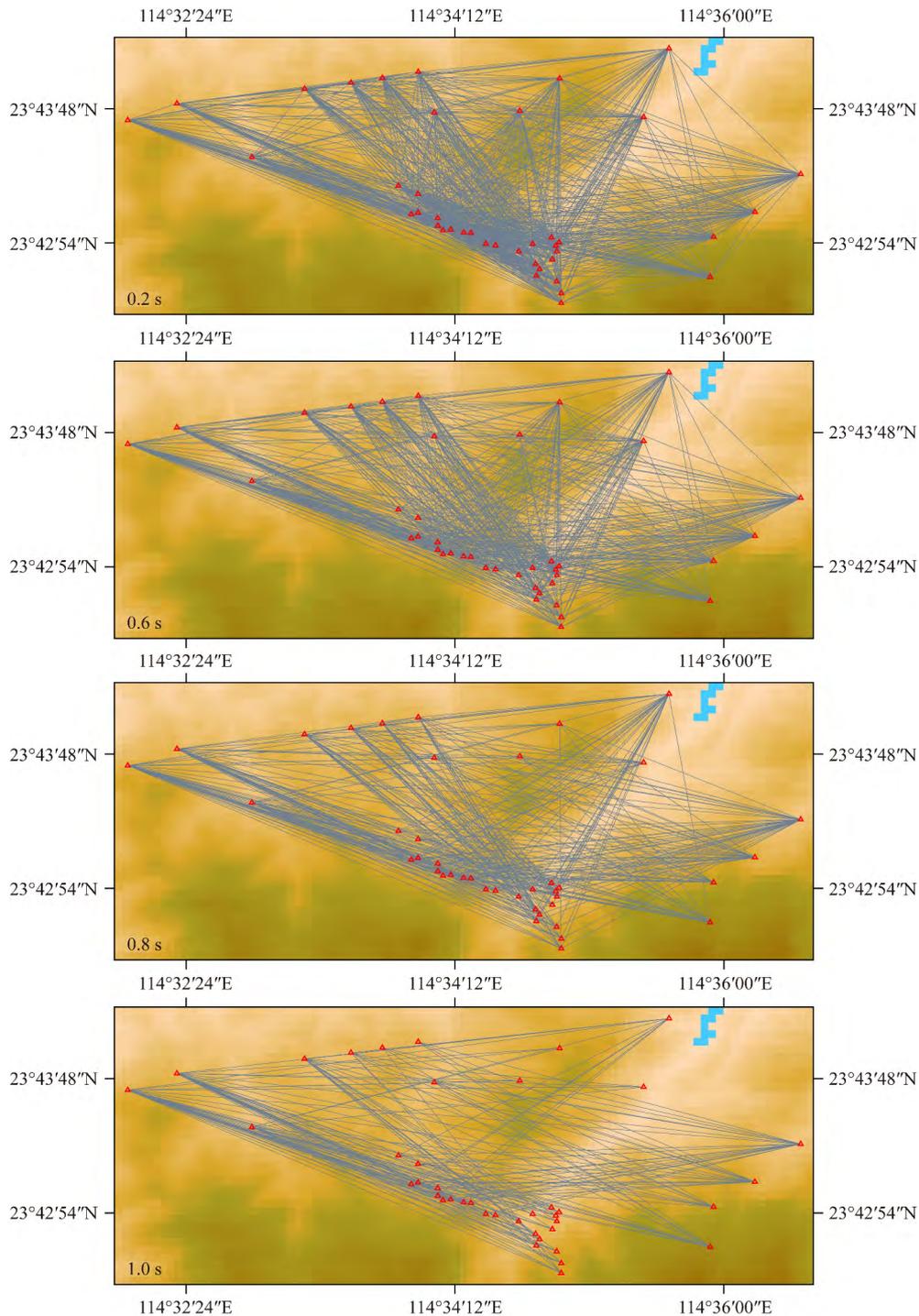


图 4 不同周期射线路径覆盖图

Fig. 4 Ray path coverage of Rayleigh wave group velocity at four different periods

图 8 所示为不同深度剪切波速度结构的水平分布图. 总体上看, 该区域的速度分布比较破碎, 剪切波速度表现出强烈的横向变化. 在 100、300、450 m 和 650 m 深度, 剪切波速度分布与图 7 中的瑞利波群速度分布模式大体一致. 这与深度敏感核 (图 9) 的预期是相对应的. 在各个深度上, 人字石断裂处都呈现出明显的低速异常. 在较浅深度上 (100 m), 研究

区域北部的人字石断裂处低速异常尤其突出. 这可能是由于该处为水库延伸区, 受水的渗透作用影响断层的破碎程度比较大, 因而速度比人字石断裂其他区域更低. 随着深度的增加, 该低速异常的北端向西南方向略有移动. 此外, 在人字石断裂的西南端, 垂直人字石断裂的方向有一个明显的低速层向人字石断裂两侧延伸. 这个低速区很可能是北西方向的

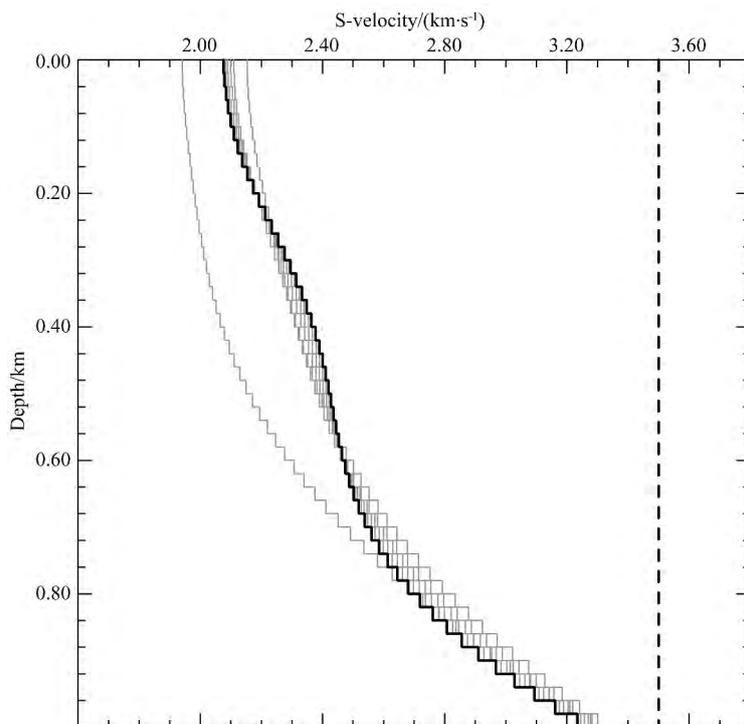


图 5 线性剪切波速度反演的例子

黑色虚线和实线分别表示初始模型和最终模型, 灰色线表示中间的迭代结果.

Fig. 5 Examples of shear wave velocity inversion

The black dashed and solid lines are the starting and final models, respectively. Intermediate iteration results are shown with grey lines.

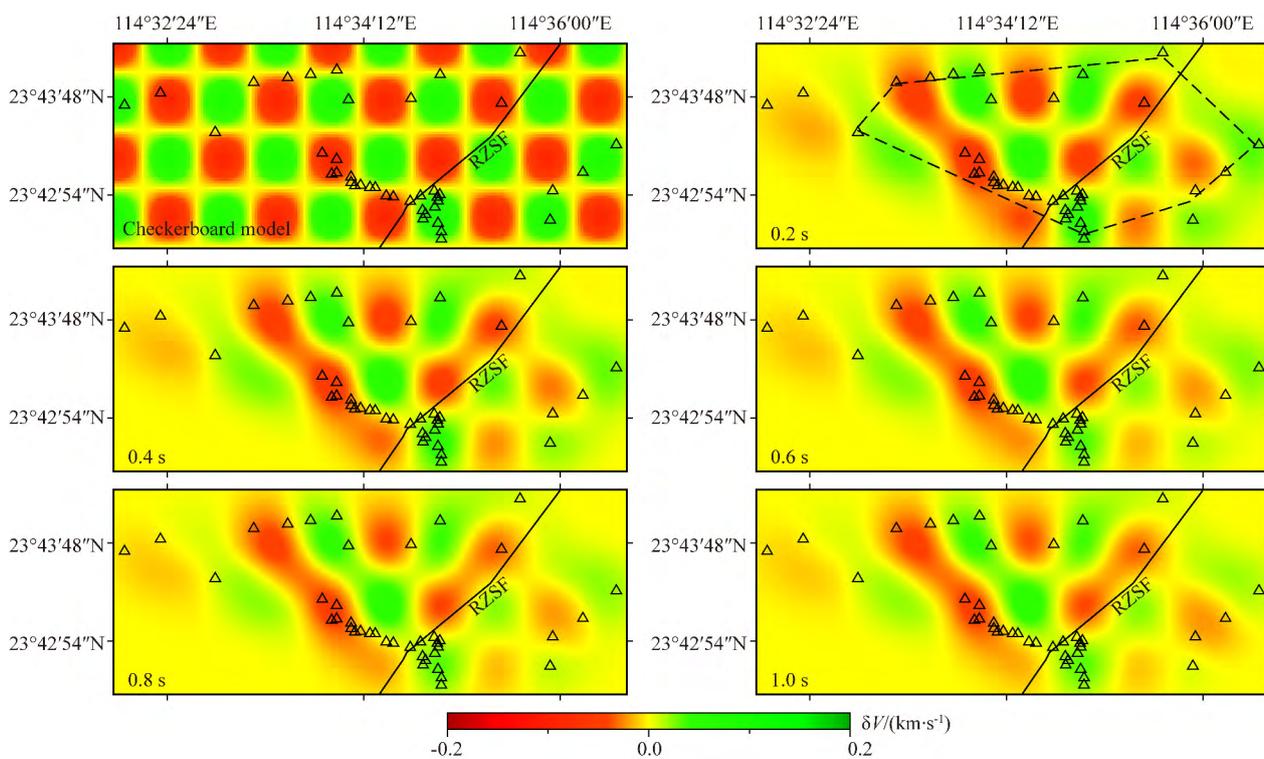


图 6 不同周期群速度的检测板测试恢复图

左上角为真实模型. 格点尺寸为  $0.8 \text{ km} \times 0.8 \text{ km}$ , 速度扰动在  $0.2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  之间. 图中还显示了台站(黑三角)和人字石断裂(黑色线)位置. 虚线区域为我们研究区域.

Fig. 6 The checkerboard test at different periods

Upper left is the input model. The grid is  $0.8 \text{ km} \times 0.8 \text{ km}$ , and the velocity perturbation is  $0.2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ . Triangles are seismic stations and the black line is the RZSF. Area within the dashed lines is our study area.

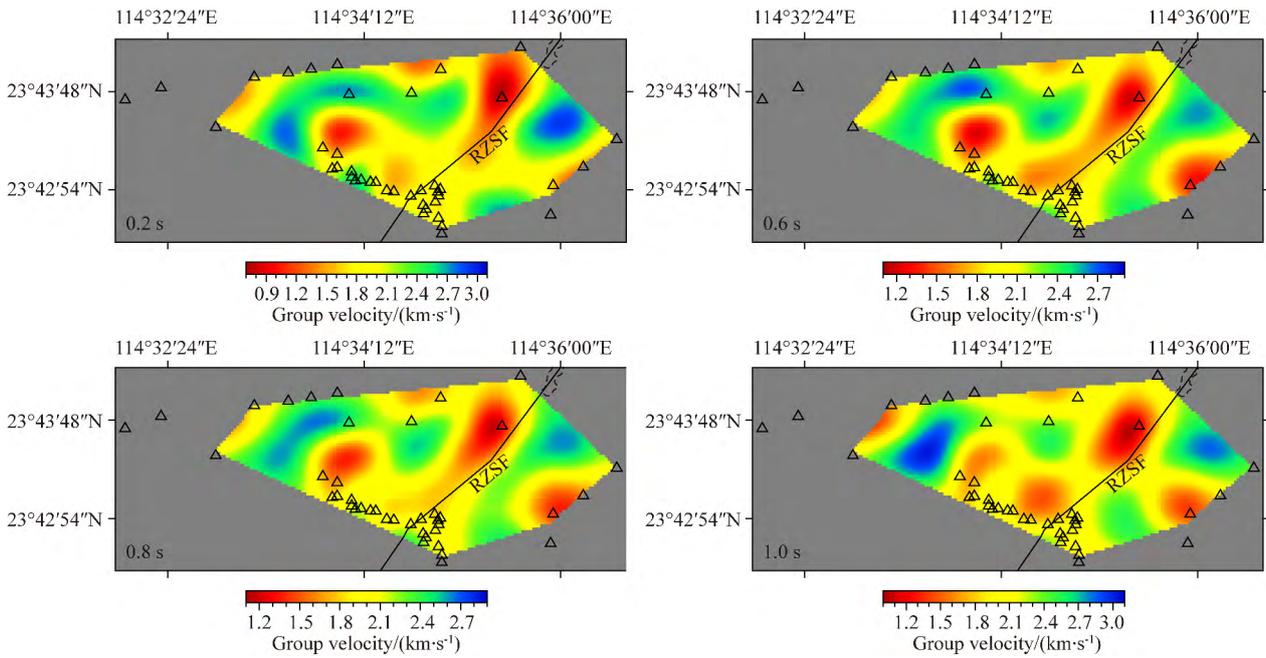


图 7 瑞利波群速度图

每幅图的周期标在左下角. 剪切区域为图 6 中虚线所围区域. 黑色三角形表示台站位置. 图中右上角虚线为水库一角.

Fig. 7 Maps of Rayleigh wave group velocity at different periods

The period for each figure is labeled on the lower left corner. The cut lines of the velocity area are from dashed cut lines in Fig. 6. The black triangles indicate the location of the seismic stations. The black dashes line on the upper right corner is XFJ reservoir.

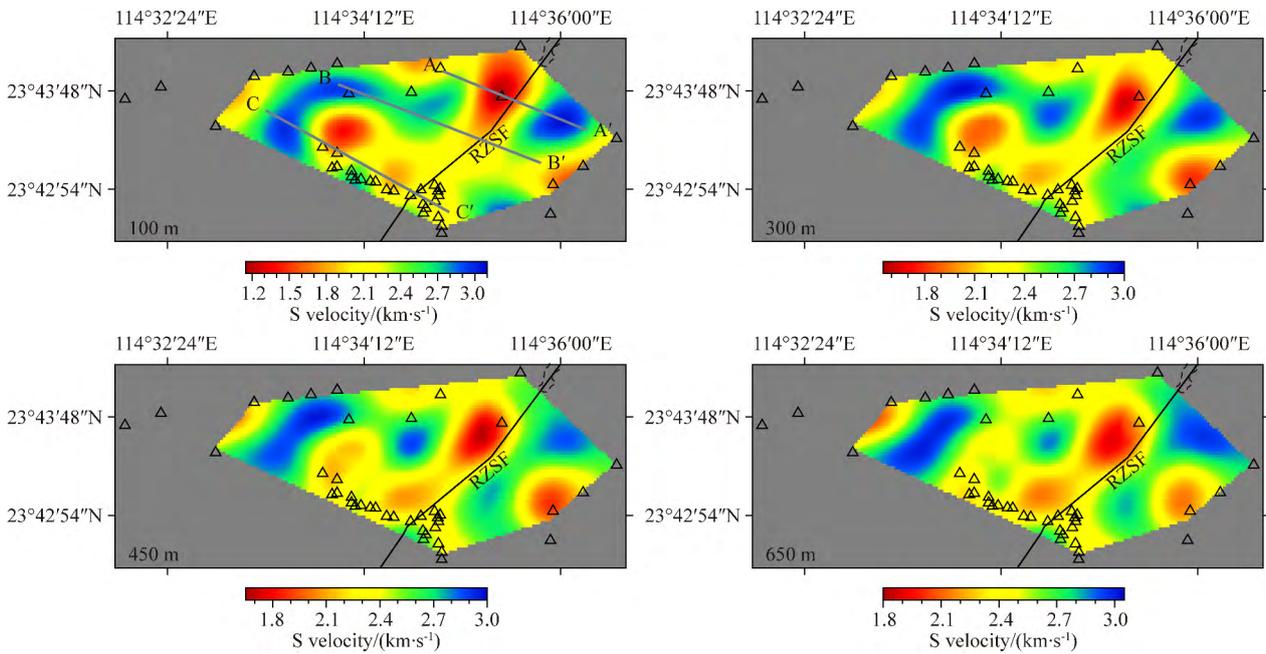


图 8 100、300、450、650 m 深度的剪切波速度图像

深度标于左下角. 图标同图 7 一样. 灰色实线表示图 10 垂直剖面位置.

Fig. 8 Maps of shear wave velocity at depth of 100 m, 300 m, 450 m and 650 m

The depth for each figure is labeled on the lower left corner. Symbols are the same as in Fig. 7.

The three grey cross section lines used in Fig. 10 are shown.

一个小断裂,与北北东方向的人字石断裂相互交错. 人字石断裂处的低速条带将该区域划分成了东西两部分,断裂两侧整体上呈现出相对高速,与地表山丘

地貌相对应,可能为较完整的岩体结构.

为了更直观、更全面地展示该区域的速度分布结构,我们做了几个垂直剖面(图 10). 剖面位置如

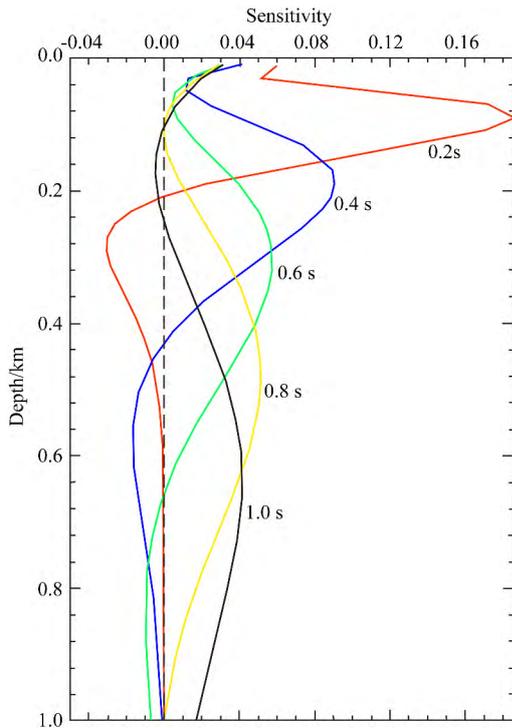


图 9 0.2~1.0 s 瑞利波群速度对剪切波速度的深度敏感核  
 Fig. 9 Depth sensitivity kernels for 0.2~1.0 s Rayleigh wave group velocity on the shear wave velocity

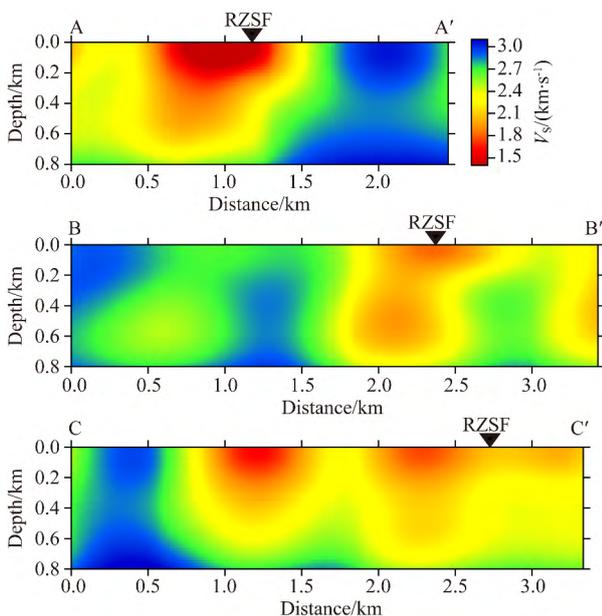


图 10 三维剪切波速度的 3 条垂直剖面图,其位置如图 8 所示. 黑色三角形表示人字石断裂所在位置  
 Fig. 10 The shear velocity structure of three cross sections (location shown in Fig. 8). The black triangles on the top represent RZSF

图 8 所示. 从 AA' 和 BB' 剖面图中可以看出,人字石断裂处呈现出低速异常,与断层应该表现的低速度相一致. 而且,该低速异常在深度上至少延伸到

800 m, 并且呈近垂直的高倾角. 此外,CC' 剖面也显示了大面积的低速分布,表明沿这个剖面,有可能是 一个北西方向的破碎带(小断层).

### 3 结论

之前新丰江地区的速度结构研究大多数都是用体波进行的比较大尺度的结构研究. 本研究证明了在台站间距足够小(100~500 m)的情况下,密集地震台网环境噪声成像应用于短周期(<1.2 s)小尺度区域进行研究是切实可行的. 由于波的衰减作用,当台站间距比较大时,恢复短周期面波的经验格林函数是很困难的. 因此,噪声成像的频率范围和分辨率取决于台站间距,台间距越小,越容易获得高频信号.

本文中,我们使用 41 个短周期地震仪形成的密集台网对新丰江库区人字石断裂周边进行环境噪声层析成像研究,台站间距为 100~500 m. 我们对每个台站获取的 1 个月的连续地震记录分段处理,获取了台站对之间的瑞利波群速度频散曲线,并反演了 0.2~1.2 s 瑞利波群速度. 我们进一步反演了人字石断层附近的浅层 800 m 深度内的地下剪切波速度结构,获得人字石断层附近前所未有高分辨率的精细浅层地下结构. 剪切波的速度结构与地表的 结构有比较好的对应,清晰的显示了人字石断裂的 展布形态.

本文对浅层地下剪切波速度构建一个高分辨率 三维模型具有重大意义. 这是在分辨率上的一个突 破,为基于传统地震学方法的研究提供了新的思路 与补充结果. 浅层地下三维速度模型可以用于研究 精细断层结构研究,精细浅层地下速度结构结合其 他已有研究能够加深我们对发震地区断层结构的认 识,帮助我们研究该地区断裂结构与强地震活动性 的关系. 此外,人字石断裂只是新丰江库区的其中一 条断裂,要想详细了解库区地震活动性,需要更多库 区其他区域的精细浅层地下结构.

### References

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. *Geophysical Journal International*, 169(3): 1239-1260, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03374.x.

Cheng H H, Zhang H, Zhu B J, et al. 2012. Finite element investigation of the poroelastic effect on the Xinfengjiang

- Reservoir-Triggered earthquake. *Science China Earth Sciences*, 55(12): 1942-1952, doi: 10.1007/s11430-012-4470-8.
- Ding Y Z, Pan J X, Xiao A Y, et al. 1983. Tectonic environment of reservoir induced earthquake in the Xinfengjiang reservoir area. *Seismology and Geology* (in Chinese), 5(3): 63-74.
- Feng R. 1977. On the variations of the velocity ratio before and after the Xinfengjiang reservoir impounding earthquake of  $M=6.1$ . *Acta Geophysica Sinica* (in Chinese), 20(3): 211-221.
- Guo G A, Feng R. 1992. The joint inversion of 3-D velocity structure and source parameter in Xinfengjiang reservoir. *Acta Geophysica Sinica* (in Chinese), 35(3): 331-342.
- Herrmann R B. 2013. Computer programs in seismology: an evolving tool for instruction and research. *Seismological Research Letters*, 84(6): 1081-1088, doi: 10.1785/0220110096.
- Huang Y C, Yao H, Huang B S, et al. 2010. Phase velocity variation at periods of 0.5~3 seconds in the taipei basin of taiwan from correlation of ambient seismic noise. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(5A): 2250-2263, doi: 10.1785/0120090319.
- Li J, Yang J A, Li Z J, et al. 2014. Introduction of the special array for seismic response of xinfengjiang reservoir dam. *Science and Technology of West China*, 13(7): 22-24, doi: 10.3969/j.issn.1671-6396.2014.07.010.
- Li Z W, Ni S D, Zhang B L, et al. 2016. Shallow magma chamber under the Wudalianchi Volcanic Field unveiled by seismic imaging with dense array. *Geophysical Research Letters*, 43(10): 4954-4961, doi: 10.1002/2016gl068895.
- Lin F C, Ritzwoller M H, Townend J, et al. 2007. Ambient noise Rayleigh wave tomography of New Zealand. *Geophysical Journal International*, 170(2): 649-666, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03414.x.
- Lin F C, 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. *Geophysical Journal International*, 173(1): 281-298, doi: 10.1111/j.1365-246X.2008.03720.x.
- Lin F C, Ritzwoller M H, Snieder R. 2009. Eikonal tomography: surface wave tomography by phase front tracking across a regional broad-band seismic array. *Geophysical Journal International*, 177(3): 1091-1110, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04105.x.
- Lin F C, Li D Z, Clayton R W, et al. 2013. High-resolution 3d shallow crustal structure in long beach, California: application of ambient noise tomography on a dense seismic array. *Geophysics*, 78(4): Q45-Q56, doi: 10.1190/geo2012-0453.1.
- Rawlinson N, Sambridge M. 2005. The fast marching method: an effective tool for tomographic imaging and tracking multiple phases in complex layered media. *Exploration Geophysics*, 36(4): 341-350, doi: 10.1071/eg05341.
- Shapiro N M, Campillo M, Stehly L, et al. 2005. High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise. *Science*, 307(5715): 1615-1618, doi: 10.1126/science.1108339.
- Shen C G, Chen H Q, Zhang C H, et al. 1974. Xinfengjiang reservoir earthquakes and its influence on the dam. *Science in China* (in Chinese), 17(2): 184-205.
- Sun X L, Song X D, Zheng S H, et al. 2010. Three dimensional shear wave velocity structure of the crust and upper mantle beneath China from ambient noise surface wave tomography. *Earthquake Science*, 23(5): 449-463, doi: 10.1007/s11589-010-0744-4.
- Wan Y F, Ye D H, Chen D Q. 2008. Study on earthquake characteristics in Xinfengjiang region. *South China Journal of Seismology*, 28(2): 59-66, doi: 10.3969/j.issn.1001-8662.2008.02.009.
- Wang M Y, Yang M Y, Hu Y L, et al. 1976. Mechanism of the reservoir impounding earthquake at Xinfengjiang and a preliminary endeavour to discuss their cause. *Acta Geophysica Sinica* (in Chinese), 19(1): 1-17.
- Weaver R L. 2005. Information from seismic noise. *Science*, 307(5715): 1568-1569, doi: 10.1126/science.1109834.
- Wei B, Chen P L, Li F G, et al. 1991. Focal mechanisms and tectonic stress field of the Xinfengjiang earthquakes. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 13(4): 471-479.
- Yang X, Kang Y, Lin X D. 2012. Discussion of wave velocity ratio variation and its type before the  $M_L 5.2$  earthquake on February 16, 2012 in Xinfengjiang. *South China Journal of Seismology* (in Chinese), 32(S1): 64-72.
- Yang Y J, Ritzwoller M H, Levshin A L, et al. 2007. Ambient noise Rayleigh wave tomography across Europe. *Geophysical Journal International*, 168(1): 259-274, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03203.x.
- Yang Y J, Ritzwoller M H. 2008. Characteristics of ambient seismic noise as a source for surface wave tomography. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(2): Q02008, doi: 10.1029/2007gc001814.
- Yang Z X, Liu B F, Wang Q C, et al. 2013. Tomographic imaging of the upper crustal structure beneath the Xinfengjiang reservoir area. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(4): 1177-1189, doi: 10.6038/cjg20130413.
- 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. *Geophysical Journal International*, 166(2): 732-744, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03028.x.
- Ye X W, Huang Y M, Hu X M, et al. 2013. Location of the Dongyuan  $M_S 4.8$  earthquake sequence of Guangdong and 3D P-wave velocity structure in and around source region. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 35(6): 809-819.
- Zheng S H, Sun X L, Song X D, et al. 2008. Surface wave tomography of China from ambient seismic noise correlation. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(5): Q05020, doi: 10.1029/2008gc001981.

#### 附中文参考文献

- 程惠红, 张怀, 朱伯靖等. 2012. 新丰江水库地震孔隙弹性耦合有限元模拟. *中国科学: 地球科学*, 42(6): 905-916.

- 丁原章, 潘建雄, 肖安予等. 1983. 新丰江水库诱发地震的构造条件. 地震地质, 5(3): 63-74.
- 冯锐. 1977. 新丰江6.1级水库地震前后的波速比变化. 地球物理学报, 20(3): 211-221.
- 郭贵安, 冯锐. 1992. 新丰江水库三维速度结构和震源参数的联合反演. 地球物理学报, 35(3): 331-342.
- 李敬, 杨建安, 李志军等. 2014. 新丰江水库大坝地震反应专用台阵介绍. 中国西部科技, 13(7): 22-24, doi: 10.3969/j.issn.1671-6396.2014.07.010.
- 沈崇刚, 陈厚群, 张楚汉等. 1974. 新丰江水库地震及其对大坝的影响. 中国科学, 17(2): 184-205.
- 万永芳, 叶东华, 陈大庆. 2008. 广东新丰江地区地震研究. 华南地震, 28(2): 59-66, doi: 10.3969/j.issn.1001-8662.2008.02.009.
- 王妙月, 杨懋源, 胡毓良等. 1976. 新丰江水库地震的震源机制及其成因初步探讨. 地球物理学报, 19(1): 1-17.
- 魏柏林, 陈庞龙, 李富光等. 1991. 新丰江地震震源机制解及构造应力场. 地震学报, 13(4): 471-479.
- 杨选, 康英, 林向东. 2012. 新丰江2012年02月16日 $M_L$ 5.2级地震前的波速比变化及地震类型探讨. 华南地震, 32(S1): 64-72.
- 杨卓欣, 刘宝峰, 王勤彩等. 2013. 新丰江库区上地壳三维细结构层析成像. 地球物理学报, 56(4): 1177-1189, doi: 10.6038/cjg20130413.
- 叶秀薇, 黄元敏, 胡秀敏等. 2013. 广东东源 $M_S$ 4.8地震序列震源位置及周边地区P波三维速度结构. 地震学报, 35(6): 809-819.

(本文编辑 胡素芳)