

张佩,周聪,王文青,等. 2024. 利用背景噪声互相关研究安宁河—则木河断裂带周边地区波速变化[J]. 地震研究, 47(4): 493–502, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0045.

Zhang P, Zhou C, Wang W Q, et al. 2024. Study on the seismic wave velocity variation around the Anninghe-Zemuhe fault zone by ambient noise cross-correlation [J]. *Journal of Seismological Research*, 47(4): 493–502, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0045.

利用背景噪声互相关研究安宁河—则木河 断裂带周边地区波速变化*

张佩^{1,2}, 周聪¹, 王文青¹, 柴旭超¹, 刘庚¹, 史克旭¹

(1. 中国地震局第二监测中心, 陕西 西安 710054; 2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘要: 使用2013—2018年安宁河—则木河断裂带周边地区23个宽频带流动台站的连续波形记录, 通过背景噪声干涉测量, 计算获取了台站对之间的相对地震波速变化; 计算了5个不同周期的相对波速变化, 重点分析了2018年石棉 $M_s4.5$ 地震前后的波速变化。结果显示: 在1~3 s周期, 相对波速变化显示出明显的季节性变化特征, 即每年的6—10月, 相对波速变化显示出缓慢的降低趋势, 误差也较小, 而每年的1—5月的相对波速变化呈现出随机变化特征, 且误差较大。结合当地气象数据推测, 地震波速变化可能与季节性降水引起的孔隙压力变化有关。3~8 s周期的波速变化呈离散型分布, 更长周期的6~15 s和8~20 s波速变化较弱, 在零值线附近波动, 表明中下地壳介质处于相对稳定状态。高频段1~4 Hz结果显示, 石棉地震后近震源区的部分台站出现波速降低, 而未见震源区地表破裂, 推测波速变化可能是由地震引起浅部裂隙的张开或闭合所致。

关键词: 背景噪声; 西昌台阵; 安宁河—则木河断裂带; 波速变化

中图分类号: P315.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2024)04-0493-10

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0045

0 引言

在地壳演化过程中, 介质的物理性质将发生一系列改变, 如出现微破裂、扩容、塑性硬化等, 因此当地震波通过地壳传播时, 波速也将发生相应的变化, 所以通过波速的变化研究地下介质的物性变化是可行的(冯德益, 1981)。早在20世纪六七十年代, 研究人员就关注到地震前波速会有微小变化, 而预期会存在很大变化的结果都争议较大。地质环境中影响波速走时改变的因素很

多, 包括潮汐应力(De Fazio et al, 1973)、地下水的季节性改变(Sens-Schönfelder, Wegler, 2006)、地震或火山活动导致的应力改变(Rubinstein, Beroza, 2005; Peng, Ben-Zion, 2006)、震前的流体迁移和扩容(Aggarwal et al, 1973)等。因此研究地震波速变化对地震监测预报和火山预警等都有重要的意义。

主动源探测技术(Vidale, Li, 2003; Wang et al, 2008)和重复地震的相似波形(Peng, Ben-Zion, 2006; Schaff, Beroza, 2004)实现了对地下时变的监测, 但它们在时空上的不均匀性使得

* 收稿日期: 2023-08-03.

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划(2023-JC-QN-0306, 2021JQ-981); 国家重点研发计划(2018YFC1503405); 国家自然科学基金青年基金(41904063).

第一作者简介: 张佩(1989-), 助理研究员, 主要从事地震学成像方法与地球内部物理方面的研究.

E-mail: zhpec15@163.com.

连续长期的地震波速监测依旧困难重重。近年来,得益于地震背景噪声技术的发展,使用背景噪声互相关得到的相似波形推动了连续监测地震波速变化技术的快速发展。已有很多研究利用这一技术来监测地下介质的时间变化,包括地下波速的季节性变化 (Sens - Schönfelder, Wegler *et al*, 2006; Wang *et al*, 2017)、与火山喷发相关的波速变化以及强震相关的波速变化等 (Brennguier *et al*, 2008a, b; Chen *et al*, 2010; Hobiger *et al*, 2016; Liu *et al*, 2014; Nimiya *et al*, 2017; Wu *et al*, 2016; 杨建文等, 2021)。

本文收集了 2013—2018 年安宁河—则木河断裂带周边地区 23 个宽频带地震仪记录的连续波形数据,利用背景噪声互相关技术计算了各台站对之间的波速变化及时空分布特征,讨论了波速变化与信号频带之间的联系、波速变化的可能机理和环境气候因素等对介质变化的影响。

1 数据和方法

西昌台阵主要布设在鲜水河断裂带南段、安宁河—则木河断裂带北段,包含 36 个宽频带地震仪,仪器记录起始于 2013 年 1 月。考虑到数据缺失会影响波速变化计算的精度,本文选用了 2013—2018 年西昌台阵中 23 个连续性较好的宽频带地震仪 (图 1) 记录的连续波形数据。数据预处理参照 Liu 等 (2014) 的方式进行:对每天的三分量波形进行 10 Hz 的重采样;为了降低地震信号、仪器周边干扰及其它非稳态噪声源的影响,得到高质量的单台背景噪声记录,对重采样波形记录进行了 0.02 ~ 1.0 Hz 带通滤波、时域归一化处理及 0.05 ~ 1 Hz 频带谱白化处理。

当台间距较大时,很难在短时间内稳定地重构出经验格林函数,因此本文仅对台间距小于 200 km 的台站对做进一步分析。我们计算了 4 个不同周期 (1 ~ 3 s, 3 ~ 8 s, 6 ~ 15 s 及 8 ~ 20 s) 的互相关函数。为了提高信噪比,对于不同周期数据,将各台站对当天及其前、后 15 天 (共 31 天) 的互相关函数叠加来代表该天的经验格林函数,而参考经验格林函数则由各台站对 2013—2018 年整个研究时段的互相关函数进行叠加得到。

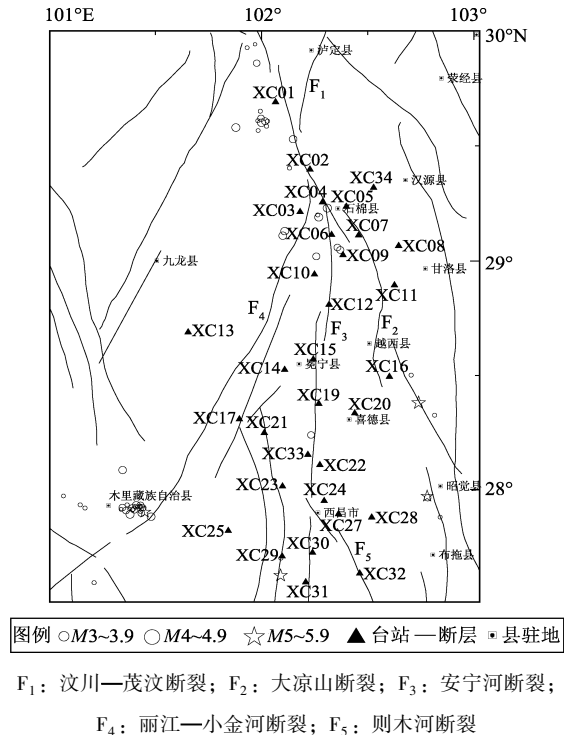


图 1 西昌台阵和研究区 2013—2018 年

3.0 级以上地震分布

Fig. 1 Stations of the Xichang seismic array and the $M_L \geq 3.0$ earthquakes during 2013—2018 in the study area

Froment 等 (2010) 研究发现噪声源的季节性变化会严重影响噪声互相关的面波信号,而其对尾波的影响则很小,所以本文选用噪声互相关函数的尾波部分估算地震波速变化。参照 Liu 等 (2018) 的测试结果,在 1 ~ 3 s 周期,选取瑞利波到达后 30 ~ 90 s 的时间窗来计算 dt ; 对于 3 ~ 8 s 周期, dt 的时间窗为瑞利波到达后的 40 ~ 130 s; 6 ~ 15 s 及 8 ~ 20 s 周期计算的 dt 时间窗则分别为瑞利波到达之后的 40 ~ 160 s 和 50 ~ 200 s。不同周期的 dt 计算窗口的选择如图 2 所示,图中白色粗实线为各周期的平均瑞利波走时曲线,两条白色虚线之间的部分即为该周期计算 dt 所选择的信号时窗。

假设地壳介质相对地震波速在空间上是均匀变化的,相对波速变化可以通过测量每天的经验格林函数与参考经验格林函数之间的相对走时偏移来获得,即 $dv/v = -dt/t$ (Sens - Schönfelder, Wegler, 2006; Snieder *et al*, 2002)。获取走时偏移的方法主要有两种:一是频率域的移动窗互谱

方法 (Poupinet *et al*, 1984; Brenguier *et al*, 2008a, b; Clarke *et al*, 2011)。它将用于计算的格林函数尾波部分分成若干个相互重叠的窗口, 再将每个窗口信号变换到频率域, 通过互相关谱的计算得到走时偏移, 进而获得波速变化; 另一种是时间域的压缩—拉伸方法 (Lobkis, Weaver, 2003; Sens - Schönfelder, Wegler, 2006)。

该方法通过适当拉伸或压缩每天的经验格林函数, 以使经验格林函数与参考经验格林函数的相关性达到最大, 进而获得波速相对变化。噪声的季节性变化会干扰压缩—拉伸方法的测量结果 (刘志坤, 黄金莉, 2010; Zhan *et al*, 2013)。因此, 本文采用移动窗互谱方法计算相对走时偏移 dt/t 。

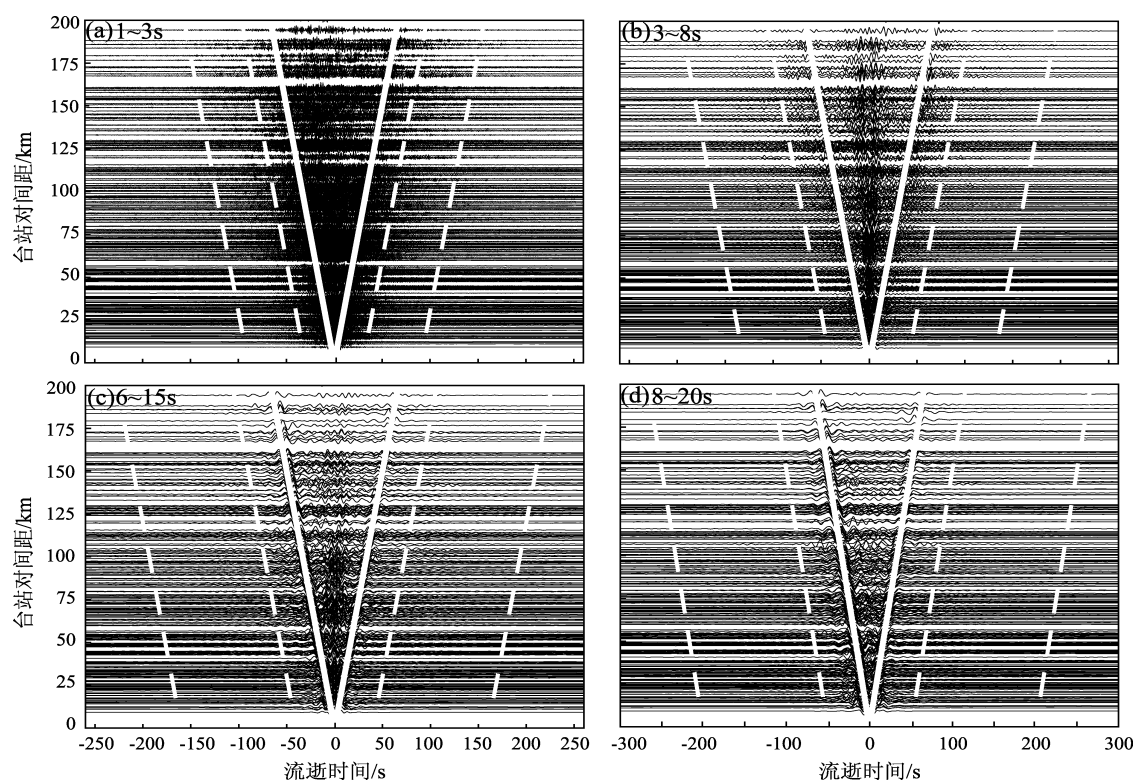


图2 所有台站对在不同周期的垂向分量的参考经验格林函数

Fig. 2 Reference cross-correlation functions of Z component for all station pairs aligned with the station spacing for the different period bands

2 结果分析

2.1 不同周期的台站对波速变化

图3展示了采用移动窗互谱方法计算出的2013—2018年部分典型台站对1~3 s周期的相对波速变化。图3a中各台站对相对波速变化呈现出明显的周期性变化: 每年6—10月, 相对波速变化显示出缓慢的降低趋势, 计算误差也较小, 这种降低趋势在图3b中更加明显, 如红色矩形框所示。每年的1—5月, 相对波速呈现出无规律的随机变化特征, 并且在随机变化的时段计算误差相

对也较大, 如图3中暖色所示。部分台站对相对波速出现较大误差, 如图3中暗红色标示, 经异常核实发现, 较大误差是由于该台站对在此时间段波形数据缺失, 用于当天经验格林函数叠加计算的天数不足31天, 从而导致信噪比较低, 计算误差偏大。

典型台站对3~8 s周期的相对波速变化如图4a所示。各台站对的相对波速变化总体呈现出无规律的随机性: 不同位置的台站对在不同时间段内, 相对波速变化在 $(-0.4\%, +0.4\%)$ 范围内呈弥散性分布。3~8 s周期相对波速变化结果中XC04-XC06部分时间段计算误差较大, 主要

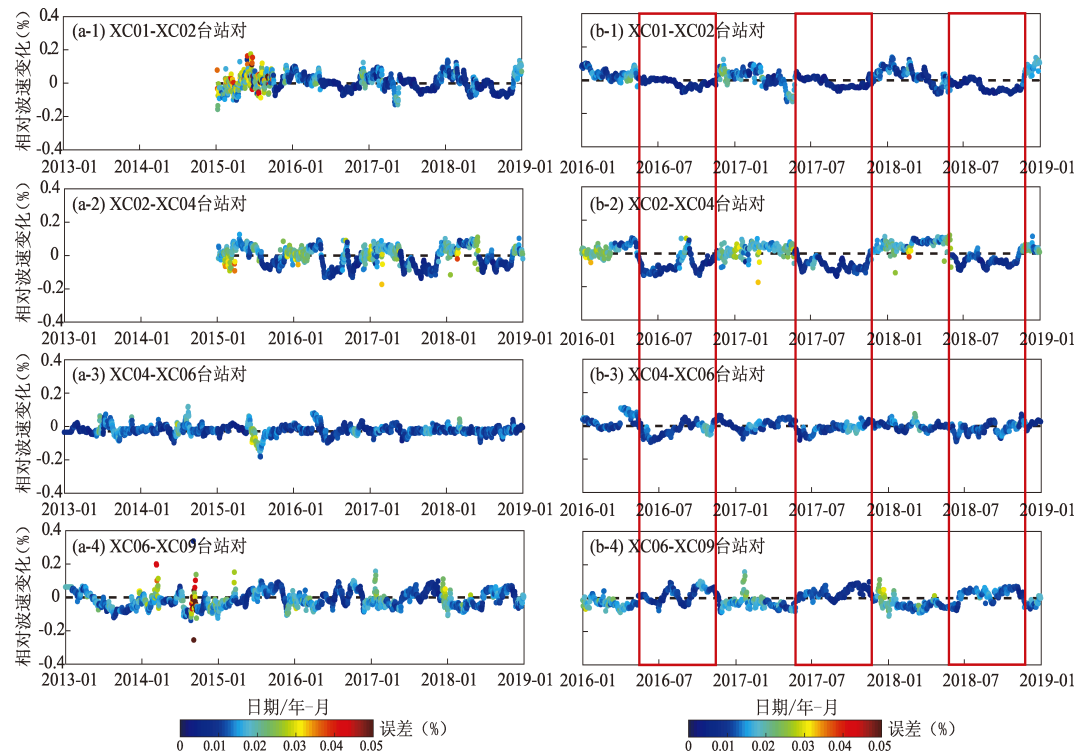


图3 采用移动窗互谱方法计算出的2013—2018年(a)及2016—2018年(b)典型台站对1~3 s周期的相对波速变化

Fig. 3 Relative changes of the wave - velocity of typical station pairs in the period 1 - 3 s obtained through the moving - window cross spectrum (MWCS) method during 2013—2018 (a) and 2016—2018 (b)

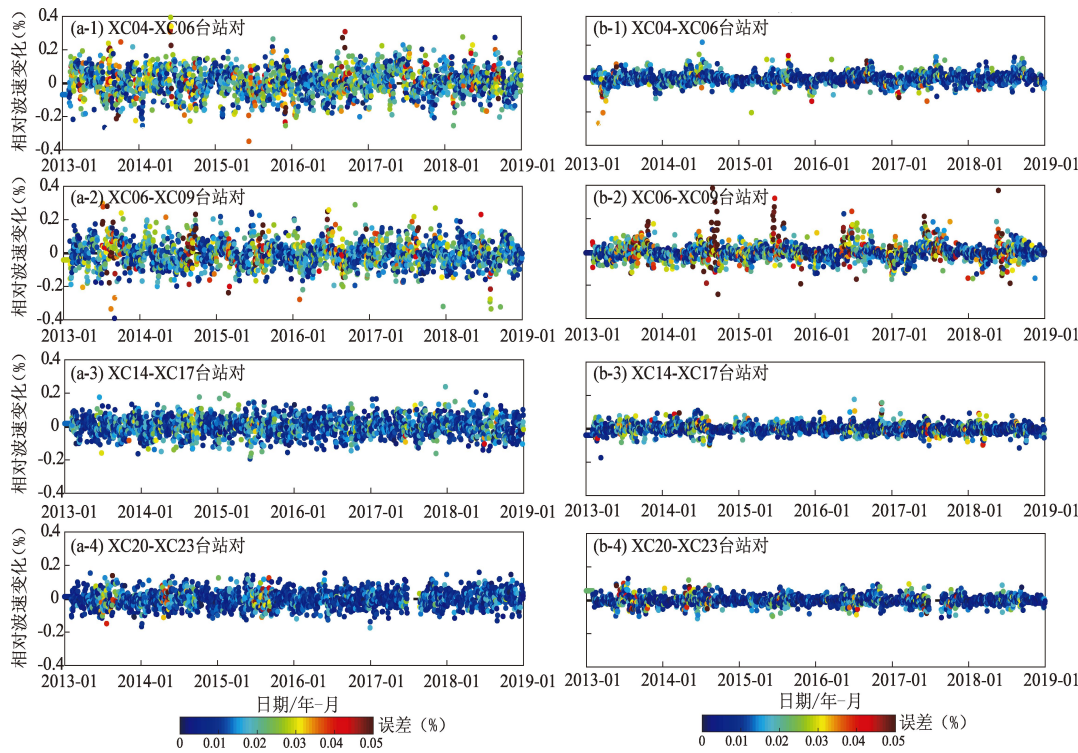


图4 两个较长周期3-8 s (a) 和6-15 s (b) 的典型台站对相对波速变化

Fig. 4 Relative wave-velocity changes of the typical station pairs in two periods: 3 - 8 s (a) and 6 - 15 s (b)

是由于 XC06 台站缺少波形数据。其它台站对的相对波速变化的计算误差较低, 表明了该周期相对波速变化计算结果的稳定性。图 4b 展示了 6 ~ 15 s 周期的相对波速变化, 相比于 3 ~ 8 s 周期的结果, 该周期相对波速变化趋于平缓, 基本围绕在零值线附近波动; 8 ~ 20 s 周期的相对波速变化呈现出与 6 ~ 15 s 周期相同的特征。而 XC06 - XC09 台站对之间出现了误差较大的相对波速变化异常, 经检验发现是由 XC09 台站部分时段数据缺失所致。

2.2 波速变化的空间分布

对于各台站对的相对波速变化时间序列, 我们仅在 1 ~ 3 s 周期观测到季节性波动, 其它 3 个周期的相对波速变化均未呈现出明显的规律性分布。为了更好地确认 1 ~ 3 s 周期相对波速变化的季节性变化特征, 将 2016—2018 年每年 1—5 月和 6—10 月的各台站相对波速度变化分别叠加平均, 得到各台站对之间平均波速变化的空间分布 (图 5)。图 5a 中干季 (1—5 月) 的台站对平均波速变化显示整体波速变化的增大或减小都较大, 且有一定的空间分界特征: 29°N 以北的台站对平均波速变化以增大为主, 29°N 以南的台站对平均波速变化以减小为主。相比于干季

的平均波速变化, 湿季各台站对的平均波速变化明显减弱, 仅有部分台站对出现微弱的平均波速度增大或减小 (图 5b), 说明该地区的平均波速变化受气候影响显著。

2018 年 5 月 16 日四川省石棉地区接连发生了 3 次地震 ($M_s3.3$ 、 $M_s4.5$ 、 $M_s4.3$)。为了更好地探究地震对震源区周围介质的影响范围, 本文以石棉 $M_s4.5$ 地震为例, 分别计算了地震前 2 个月 (2018 年 3 月 15 日—2018 年 5 月 15 日) 和地震后 2 个月 (2018 年 5 月 17 日—2018 年 7 月 17 日) 各台站对的平均波速变化 (图 6)。图 6a 显示, 地震前 XC06 - XC34、XC02 - XC05 与 XC05 - XC08 台站对平均波速明显增大, 而 XC04 - XC06、XC04 - XC07、XC07 - XC09 与 XC07 - XC34 台站对波速显著降低。地震后 XC04 - XC06 与 XC07 - XC08 台站对出现明显的波速降低现象, XC07 - XC34 台站对的波速继续降低 (图 6b), XC06 - XC34 台站对的波速增大现象消失, XC08 - XC09 台站对则由震前的波速降低转变为震后的波速增加。

总体来说, 波速变化主要局限在震源区较近范围内, 且随着台站对之间距离的增大, 波速变化的平均效应增强, 即台间距较大的台站对呈现相对弱的波速变化。

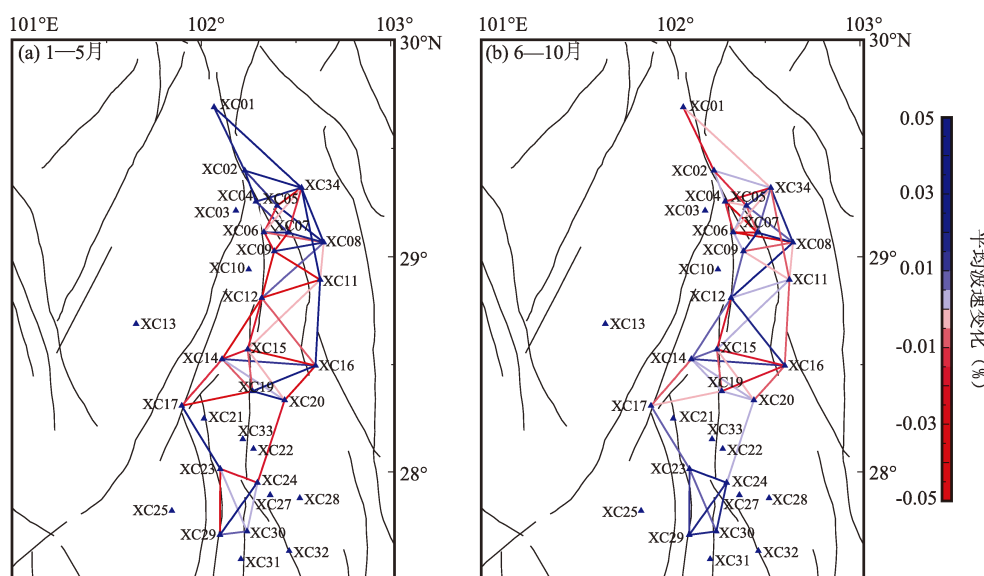


图 5 2016—2018 年台站对 1 ~ 3 s 周期干 (a)、湿 (b) 季平均波速变化空间分布

Fig. 5 The spatial distribution of the mean values of relative wave-velocity changes in 1 - 3 s period in the dry (a) and wet (b) seasons from 2016 to 2018

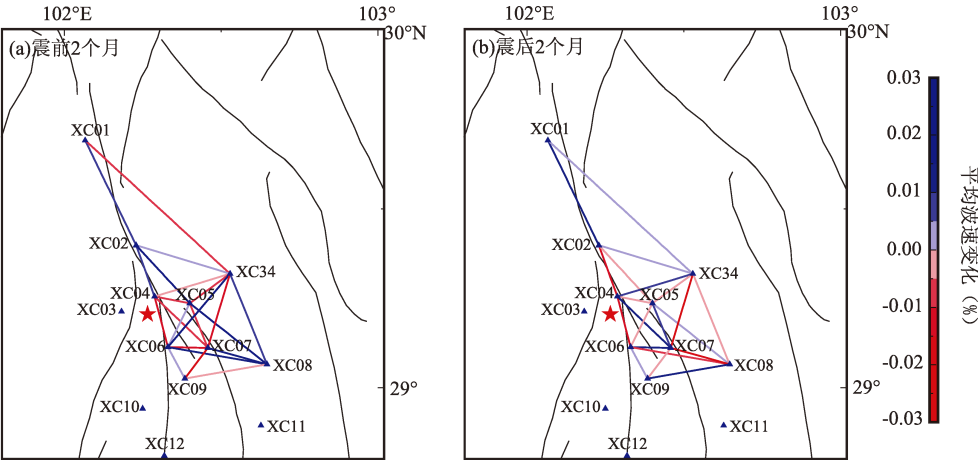


图6 石棉 $M_s4.5$ 地震前 (a)、后 (b) 两个月内平均地震波波速变化的空间分布
Fig. 6 The spatial distribution of the mean values of relative wave – velocity changes two months before (a) and after (b) the Shimian $M_s4.5$ earthquake

3 讨论

3.1 降雨对波速变化的影响

前人研究结果表明波速变化可能受季节性变化影响较大 (Sens – Schönfelder and Wegler, 2006; Hobiger *et al*, 2016; 王俊等, 2020)。图 3 也显示 1 ~ 3 s 周期的相对波速变化具有明显的季节性变化特征。为了更好地研究波速变化与环境因素之间的联系, 将石棉地震震中周边地区的相对波速变化与汉源气象站的日降水量数据进行比较, 降雨量使用中国气象局数据中心提供的距离石棉地震区最近的汉源气象台数据。对比不同位置的台站对相对波速变化与降雨量 (图 7) 可以发现: 每年的湿季 (6—10 月) 波速变化平缓, 干季 (1—5 月) 波速变化剧烈且随机。尤其是 2018 年湿季, 降雨量明显增多, 波速降低明显, 湿季过后地震波速开始缓慢回升。

水力作用对地震波速的影响引起了学者的广泛关注, 地下水和降雨会导致地震波速度降低 0.01% ~ 0.1% (Sens – Schönfelder, Wegler, 2006; Meier *et al*, 2010; Wang *et al*, 2017; Lecocq *et al*, 2017; 胡淑芳等, 2021)。随着降雨量的增加, 雨水渗透到地下致使地壳最上部数百米深度范围内孔隙压力增大, 进而导致了剪切模量的降低与地震波速的减小。Wang 等 (2017) 在对日本波速变化的研究中发现了幅度高达 10^{-4} 的季节性变化, 并将这种夏季波速的

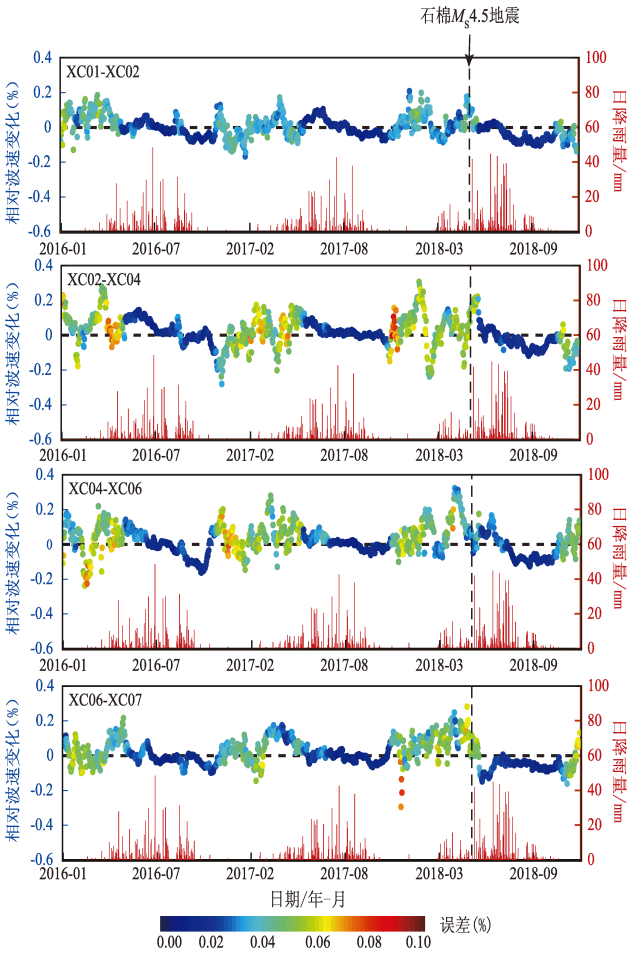


图7 2016—2018 年石棉 $M_s4.5$ 地震区周边台站对相对波速变化与降水量分布
Fig. 7 The relative wave-velocity changes of the station-pairs around the Shimian $M_s4.5$ earthquake from 2016 to 2018

降低归因于强降雨导致的地壳流体孔隙压力的增大。谢凡等(2020)在滑坡监测中也发现降雨导致介质内部的流变特性的改变,特别是其内部颗粒体间含水量的增大,介质内部有效应力的降低,从而导致波速随弹性模量下降而下降。本文采用Wang等(2017)研究公式计算了石棉地区由于降雨渗流导致的孔隙压力变化,结果表明孔隙压力的变化相对降雨量有一定的时间延迟,这是由雨水从地表缓慢渗透到地下一定深度范围内所导致的。图7中各台站对波速降低的极值与降雨量的最大值也有一定的时间延迟,据此我们推测在1~3 s周期观测到的地震波速度的季节性变化主要受到区域季节性降水影响。

3.2 地震对波速变化的影响

大地震的发生往往伴随震源区的破坏和地表破碎带的显现。基于背景噪声的震源区介质变化研究为探测地壳深部应力的积累与释放提供了独特的视角,发现了大量同震波速降低和震后快速恢复的证据(Wegler *et al.*, 2009; Brenguier *et al.*, 2008a; Chen *et al.*, 2010; Cheng *et al.*, 2010; 赵盼盼等, 2012; Froment *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2014, 2018)。研究认为地震导致的波速变化的主要机理为浅部的动态震动(Sleep, 2015)和深部介质应力状态的改变。

为了避免直达面波受噪声源强烈的季节性变化的影响,本文采用噪声互相关波形的尾波计算波速变化。噪声互相关波形尾波的早期部分主要是面波成分,因此可以通过测量不同周期的波速变化来得到不同深度的波速变化(Liu *et al.*, 2014; Wu *et al.*, 2016)。Froment等(2013)和Liu等(2014)计算了汶川震区内瑞利波对剪切波速度扰动的灵敏度曲线,发现1~3 s周期面波对3 km以上的浅层地壳更为敏感,而3~8 s和6~15 s面波周期则分别对2~10 km和5~20 km的地壳结构更为敏感。Liu等(2018)采用10年数据对龙门山断裂带的波速变化进行了研究,发现1~3 s和3~8 s面波周期均存在明显的同震波速降低,而在6~15 s和8~20 s周期未观测到与汶川地震有关的明显信号。说明同震波速变化在短周期比较明显,反映地壳浅部物质的状态变化。本文对安宁河—则木河断裂带周边地区的地震波速变化研究发现,

波速变化在1~3 s周期具有明显的季节性变化特征,在3~8 s周期未发现与地震相关的信号。

使用重复地震和噪声互相关技术的研究表明,波速瞬时变化主要限制在地壳最上部的几百米范围内(Rubinstein, Beroza, 2005; Peng, Ben-Zion, 2006; Wegler *et al.*, 2009; Takagi *et al.*, 2012)。地壳最浅部的这种波速变化主要与强震动下裂隙的张开有关,是一种非线性的场地响应。谢凡等(2020)在2~25 Hz的较高频带观测到了四川长宁 $M_s6.0$ 地震后波速的短时下降(约0.5%)以及恢复过程,认为地球表层介质受到地震影响导致颗粒间隙松动,从而使整体弹性模量下降。随后在重力以及温度场的共同作用下,介质内部颗粒间隙重新减小,导致波速变化在同震后出现快速下降,而震后介质弹性模量的恢复则促使了地震波速度复原的进程(Niu *et al.*, 2008)。为探究地震与震源区周围介质波速变化之间的联系,本文将背景噪声互相关的频带提高到1~4 Hz,进一步研究近地表物质的变化情况。结果显示,距离2018年石棉 $M_s4.5$ 地震震中较近的几个台站对均出现了明显的同震波速降低,随后迅速恢复的现象(图8)。随着震中距的增大,其它较远的台站对并未发现同震信号。这说明作为一个中等强度地震,石棉地震的影响范围有限,一般不会出现明显的地表破裂带,地震波速的变化更可能是由地震引起浅部裂隙的张开或闭合所致。

3.3 波速变化与测量周期关系

利用背景噪声互相关技术计算获得了2013—2018年安宁河—则木河断裂带周边地区相对波速的时空变化。结果表明,仅在1~3 s周期观测到比较显著的季节性变化,其它3个周期(3~8 s、6~15 s及8~20 s)的波速变化无明显信号特征。已有研究表明,1~3 s周期面波反映地壳之上3 km以内的介质特性,相应地,3~8 s和6~15 s周期则分别对地下2~10 km和5~20 km的结构更为敏感(Froment *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2014)。已有研究成果也证实,地震引起的波速变化主要局限于3~4 km的浅层地壳(Peng, Ben-Zion, 2006; Wegler *et al.*, 2009),甚至只发生在地表以下数百米的深度(Rubinstein, Beroza, 2005),其机制为强震引起地壳浅部裂隙产生及发展而导致

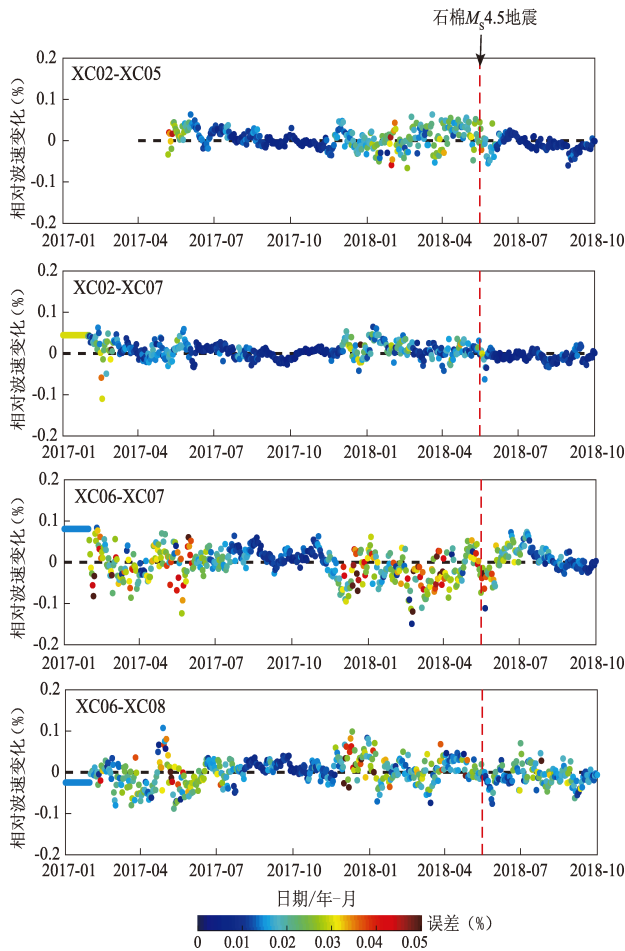


图8 邻近石棉 $M_s4.5$ 地震震中的典型台站在 1~4 Hz 频段的相对波速变化

Fig. 8 Wave-velocity changes of some typical station paris in the frequency band of 1–4 Hz around the Shimian $M_s4.5$ earthquake

介质的物理破坏。研究区近年来中小地震频发,但未发生造成浅地表的介质严重破坏的强震。结合前文降雨量数据的分析,区域季节性降水是在 1~3 s 周期观测到相对波速变化的主要原因。

对于更长周期的波速变化测量,Froment 等 (2013) 和 Obermann 等 (2014) 利用川西流动地震台阵数据检测到 12~20 s 周期的波速延迟变化,但 Liu 等 (2018) 在对龙门山断裂带 10 年尺度的波速变化研究中并未观测到较长周期 (8~20 s)、与地震有关的、可靠的地震波速变化。安宁河—则木河断裂带周边地区小震活动较强,但研究时段内未发生大地震,因而不会造成断层内部及其周边岩石的严重破坏,也不会导致断层内部介质结构和应力状态的强烈变化;另一方面,气候的

季节性变化主要影响浅地表物质,降雨导致的地下孔隙压力变化也主要作用于地壳浅部。因此,我们仅在反映浅部结构特征的 1~3 s 周期观测到相对波速变化的季节性特征,而未能在较长周期的观测中发现明显的相对波速变化规律。

4 结论

本文利用 2013—2018 年西昌台阵记录的连续波形资料,通过背景噪声互相关计算了安宁河—则木河断裂带及周边地区 23 个台站之间的相对波速变化,得到如下主要结论:

(1) 地震波速变化在短周期 (1~3 s) 呈现出明显的季节性变化特征,短周期结果主要反映地壳最上部的介质变化,与降雨主要影响地壳最浅部具有较强的一致性,因此认为在 1~3 s 周期观测到的相对波速的季节性变化主要受到区域季节性降水影响。其它周期 (3~8 s, 6~15 s 及 8~20 s) 没有观测到明显的波速变化特征。

(2) 2018 年 5 月 16 日石棉地震发生后,靠近震源区的部分台站在高频段 (1~4 Hz) 出现震后波速降低,而未见震源区地表破裂,推测地震波速的变化可能是由震动引起浅部裂隙的张开或闭合所致。但受观测数据和数据处理技术等限制,目前尚未有与石棉 $M_s4.5$ 地震相当震级地震相关的可靠波速变化的报道。

(3) 基于背景噪声互相关方法计算出的地震波速变化是台站对之间一定范围内地壳介质状态的一种平均效应,介质变化的精确时间和空间位置及物理机制都尚未有明确的论断。本文仅观测到了反映地壳最上部几千米的短周期波速变化和地震后靠近震源区部分台站对的震后波速降低,未见明显的前震信号或类似火山喷发前的前兆信号,关于介质速度能否对中小地震孕育发生过程产生明显的响应还需要进一步研究。

中国地震局地球物理研究所“中国地震科学探测台阵数据中心”为本研究提供地震波形数据,汉源气象台降雨数据来自于国家气象科学数据中心 (<http://data.cma.cn/site/index.html>),审稿专家对本文提出了宝贵的修改意见,在此一并表示感谢。

参考文献:

- 冯德益. 1981. 地震波速异常[M]. 北京:地震出版社.
- Feng D Y. 1981. Velocity anomalies of seismic waves[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- 胡淑芳, 李军, 戴宗辉, 等. 2021. 利用背景噪声研究福建金钟库区地壳介质波速变化[J]. 地震研究, 44(1): 49–55.
- Hu S F, Li J, Dai Z H, *et al.* 2021. Crustal media seismic velocity changes in Jinzhong reservoir area in Fujian by using ambient noise[J]. Journal of Seismological Research, 44(1): 49–55. (in Chinese)
- 刘志坤, 黄金莉. 2010. 利用背景噪声互相关研究汶川地震震源区地震波速度变化[J]. 地球物理学报, 53(4): 853–863.
- Liu Z K, Huang J L. 2010. Temporal changes of seismic velocity around the Wenchuan earthquake fault zone from ambient seismic noise correlation[J]. Chinese Journal of Geophysics, 53(4): 853–863. (in Chinese)
- 王俊, 郑定昌, 张金川, 等. 2020. 2013年芦山地震震源区地壳介质地震波速变化的特征分析[J]. 地球物理学报, 63(2): 517–531.
- Wang J, Zheng D C, Zhang J C, *et al.* 2020. Seismic velocity changes in the epicentral region of the 2013 Lushan earthquake measured from ambient seismic noise[J]. Chinese Journal of Geophysics, 63(2): 517–531. (in Chinese)
- 谢凡, 夏开文, 黄会宝, 等. 2020. 基于多重散射波波速变化的滑坡实时监测方法与应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 39(11): 2274–2282.
- Xie F, Xia K W, Huang H B, *et al.* 2020. A new rock mass wave velocity monitoring method of slopes based on multiple scattering waves and its field application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 39(11): 2274–2282. (in Chinese)
- 杨建文, 金明培, 叶泵, 等. 2021. 利用背景噪声研究漾濞 $M_s 6.4$ 地震前区域波速变化[J]. 地震地质, 43(5): 1171–1187.
- Yang J W, Jin M P, Ye B, *et al.* 2021. A study on the regional wave velocity changes before the $M_s 6.4$ Yangbi earthquake using ambient noise[J]. Seismology and Geology, 43(5): 1171–1187. (in Chinese)
- 赵盼盼, 陈九辉, Campillo M, 等. 2012. 汶川地震区地壳速度相对变化的环境噪声自相关研究[J]. 地球物理学报, 55(1): 137–145.
- Zhao P P, Chen J H, Campillo M, *et al.* 2012. Crustal velocity changes associated with the Wenchuan $M 8.0$ earthquake by auto-correlation function analysis of seismic ambient noise[J]. Chinese Journal of Geophysics, 55(1): 137–145. (in Chinese)
- Aggarwal Y P, Sykes L R, Armbruster J, *et al.* 1973. Premonitory changes in seismic velocities and prediction of earthquakes[J]. Nature, 241(5385): 101–104.
- Brenguier F, Campillo M, Hadziioannou C, *et al.* 2008b. Postseismic relaxation along the San Andreas fault at Parkfield from continuous seismological observations[J]. Science, 321(5895): 1478–1481.
- Brenguier F, Shapiro N M, Campillo M, *et al.* 2008a. Towards forecasting volcanic eruptions using seismic noise[J]. Nature Geoscience, 1(2): 126–130.
- Chen J H, Froment B, Liu Q Y, *et al.* 2010. Distribution of seismic wave speed changes associated with the 12 May 2008 $M_w 7.9$ Wenchuan earthquake[J]. Geophysical Research Letters, 37(18): L18302.
- Cheng X, Niu F L, Wang B. 2010. Coseismic velocity change in the rupture zone of the 2008 $M_w 7.9$ Wenchuan earthquake observed from ambient seismic noise[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 100(5B): 2539–2550.
- Clarke D, Zaccarelli L, Shapiro N M, *et al.* 2011. Assessment of resolution and accuracy of the Moving Window Cross Spectral technique for monitoring crustal temporal variations using ambient seismic noise[J]. Geophysical Journal International, 186(2): 867–882.
- De Fazio T L, Aki K, Alba J. 1973. Solid earth tide and observed change in the in situ seismic velocity[J]. Journal of Geophysical Research, 78(8): 1319–1322.
- Froment B, Campillo M, Chen J H, *et al.* 2013. Deformation at depth associated with the 12 May 2008 $M_w 7.9$ Wenchuan earthquake from seismic ambient noise monitoring[J]. Geophysical Research Letters, 40(1): 78–82.
- Froment B, Campillo M, Roux P, *et al.* 2010. Estimation of the effect of nonisotropically distributed energy on the apparent arrival time in correlations[J]. Geophysics, 75(5): SA85–SA93.
- Hobiger M, Wegler U, Shiomi K, *et al.* 2016. Coseismic and post-seismic velocity changes detected by passive image interferometry: comparison of one great and five strong earthquakes in Japan[J]. Geophysical Journal International, 205(2): 1053–1073.
- Lecocq T, Longuevergne L, Pedersen H A, *et al.* 2017. Monitoring ground water storage at mesoscale using seismic noise: 30 years of continuous observation and thermo-elastic and hydrological modeling[J]. Scientific Reports, 7(1): 1–16.
- Liu Z K, Huang J L, He P, *et al.* 2018. Ambient noise monitoring of seismic velocity around the Longmenshan fault zone from 10 years of continuous observation[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 123(10): 8979–8994.
- Liu Z K, Huang J L, Peng Z G, *et al.* 2014. Seismic velocity changes in the epicentral region of the 2008 Wenchuan earthquake measured from three-component ambient noise correlation techniques[J]. Geophysical Research Letters, 41(1): 37–42.
- Lobkis O I, Weaver R L. 2003. Coda-wave interferometry in finite solids: Recovery of P-to-S conversion rates in an elasto-dynamic billiard[J]. Physical Review Letters, 90(25): 254302.
- Meier U, Shapiro N M, Brenguier F. 2010. Detecting seasonal variations in seismic velocities within Los Angeles basin from correlations of ambient seismic noise[J]. Geophysical Journal International, 181(2): 985–996.
- Nimiya H, Ikeda T, Tsuji T. 2017. Spatial and temporal seismic velocity changes on Kyushu Island during the 2016 Kumamoto earthquake[J]. Science Advances, 3(11): e1700813.
- Niu F L, Silver P G, Daley T M, *et al.* 2008. Preseismic velocity changes observed from active source monitoring at the Parkfield SAFOD drill site[J]. Nature, 454(7201): 204–208.
- Obermann A, Froment B, Campillo M, *et al.* 2014. Seismic noise correlations to image structural and mechanical changes associated with the $M_w 7.9$ 2008 Wenchuan earthquake[J]. Journal of Geophysical Research

- search; *Solid Earth*, 119(4):3155–3168.
- Peng Z G, Ben-Zion Y. 2006. Temporal changes of shallow seismic velocity around the Karadere – Duzce branch of the north Anatolian fault and strong ground motion [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 163(2):567–600.
- Rubinstein J L, Beroza G C. 2005. Depth constraints on nonlinear strong ground motion from the 2004 Parkfield earthquake [J]. *Geophysical Research Letters*, 32(14):1–5.
- Schaff D P, Beroza G C. 2004. Coseismic and postseismic velocity changes measured by repeating earthquakes [J]. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 109(B10):B10302.
- Sens – Schönfelder C, Wegler U. 2006. Passive Image Interferometry and seasonal variations of seismic velocities at Merapi Volcano, Indonesia [J]. *Geophysical Research Letters*, 33(21):229–236.
- Sleep N H. 2015. Shallow S – wave well logs as an indicator of past strong shaking from earthquakes on the Newport – Inglewood fault [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(5):2696–2703.
- Snieder R, Grêt A, Douma H, *et al.* 2002. Coda wave interferometry for estimating nonlinear behavior in seismic velocity [J]. *Science*, 295(5563):2253–2255.
- Takagi R, Okada T, Nakahara H, *et al.* 2012. Coseismic velocity change in and around the focal region of the 2008 Iwate – Miyagi Nairiku earthquake [J]. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 117(B6):B06315.
- Vidale J E, Li Y G. 2003. Damage to the shallow Landers fault from the nearby Hector Mine earthquake [J]. *Nature*, 421(6922):524–526.
- Wang B S, Zhu P, Chen Y, *et al.* 2008. Continuous subsurface velocity measurement with coda wave interferometry [J]. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 113(B12):B12313.
- Wang Q Y, Brenguier F, Campillo M, *et al.* 2017. Seasonal crustal seismic velocity changes throughout Japan [J]. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 122(10):7897–8002.
- Wegler U, Nakahara H, Sens – Schönfelder C, *et al.* 2009. Sudden drop of seismic velocity after the 2004 M_w 6.6 mid – Niigata earthquake, Japan, observed with Passive Image Interferometry [J]. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 114(B6):B06305.
- Wu C, Delorey A, Brenguier F, *et al.* 2016. Constraining depth range of S wave velocity decrease after large earthquakes near Parkfield, California [J]. *Geophysical Research Letters*, 43(12):6129–6136.
- Zhan Z W, Tsai V C, Clayton R W. 2013. Spurious velocity changes caused by temporal variations in ambient noise frequency content [J]. *Geophysical Journal International*, 194(3):1574–1581.

Study on the Seismic Wave Velocity Variation around the Anninghe-Zemuhe Fault Zone by Ambient Noise Cross – correlation

ZHANG Pei^{1,2}, ZHOU Cong¹, Wang Wenqing¹, Chai Xuchao¹, LIU Geng¹, SHI Kexu¹

(1. The Second Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

(2. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract

We presented the 6 – year continuous changes of the seismic wave velocity from 2013 to 2018 around the Anninghe – Zemuhe fault zone. The continuous waveforms recorded by the Xichang array consisting of 23 broadband stations, and ambient noise correlation techniques were used to calculate the wave velocity changes in five different period bands. A significant characteristic of the seasonal variation of the wave velocity changes was observed in the period band of 1 – 3 s; from June to October each year, the relative wave velocity changes (dv/v) showed a trend of slow decreasing, and the error of the speed change was small. The relative speed change from January to May showed the characteristics of random change with larger errors. Referring to the local meteorological data, we speculated that the wave velocity changes may be related to the pore pressure changes caused by seasonal precipitation. The velocity changes in the 3 – 8 s period band were discretely distributed, while velocity changes in the period bands 6 – 15 s and 8 – 20 s were weaker and fluctuated near the zero line, this indicated that the middle and lower crustal media were in a relatively stable state. In the focal area of the Shimian M_s 4.5 earthquake, we had also detected wave velocity reduction at some paired-station in the 1 – 4 Hz frequency band. Although there were frequent small earthquakes in Shimian region, no surface rupture had been spotted yet. It is more likely that the opening or closing of shallow cracks induced by ground motions contributes to the changes in wave velocity.

Keywords: ambient noise; the Xichang array; the Anninghe-Zemuhe fault zone; wave-velocity variation