

利用背景噪声研究通海 5.0 级、墨江

5.9 级地震震源区波速变化*

杨建文^{1,2}, 叶 泵^{1,2}, 高 琼^{1,2}, 王 军^{1,2}, 陈 佳^{1,2}

(1. 中国地震科学实验场大理中心, 云南 大理 671000; 2. 云南大理滇西北
地壳构造活动野外科学观测研究站, 云南 大理 671000)

摘要: 利用 2017 年 1 月 31 日—2019 年 12 月 1 日云南数字地震台网的宽频带连续波形资料, 基于背景噪声互相关方法, 提取了 14 个台站对当天经验格林函数与参考经验格林函数的直达瑞利波走时偏移来研究 2018 年通海 5.0 级、墨江 5.9 级地震震源区的波速变化特征。结果表明, 通海 5.0 级和墨江 5.9 级地震都在一定程度上造成了震源区地壳介质速度的变化。地震发生前后, 穿过地震震中和震中附近的部分台站对的瑞利波走时偏移在地震发生前的 20 余天表现出明显的异常特征, 且短期内走时变化具有较好的同步性, 但异常幅度大小和异常持续时间存在一定差异, 异常台站对走时偏移变化形态为“V”或双“V”型结构, 两次地震都发生在了第 1 个“V”型的前端。多台站对组合的平均走时偏移结果显示, 两次地震造成的震源区波速的异常持续时间大概都为 260 d (通海地震略长于墨江地震), 但墨江地震造成的最初的走时偏移变化量和持续时间均高于通海地震。

关键词: 背景噪声; 波形互相关; 经验格林函数; 波速变化

中图分类号: P315.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2021)04-0529-12

0 引言

地震的孕育和发生往往伴随着地下介质应力状态的变化, 从而引起地震波速的变化, 监测这种波速变化, 对地震预测以及余震趋势的判断具有重要意义 (王伟涛等, 2009)。近年来, 随着背景噪声层析成像技术的发展, 从该方法中获取的经验格林函数也被应用于研究地壳内部地震波速度的时空变化特征。如 Brenguier 等 (2008) 分析富尔奈斯火山 21 个台站背景噪声得到的波速变化, 发现火山喷发前波速出现了约 0.1% 的降低, 且在火山喷发期间逐渐恢复正常。Stehly 等 (2016) 利用 2008 年汶川地震震中区域 21 个台站的背景噪声, 发现主震当天有 0.07% 的波速下降。刘志坤和黄金莉 (2010) 发现 2008 年汶川地震造成了震

源区地震波速度的急剧降低, 最大降幅达 0.4%。宫猛等 (2017) 通过提取直达的瑞利波走时偏移发现在 2015 年 9 月 14 日昌黎 $M_L 4.7$ 地震前部分台站对的瑞利波速出现上升变化, 而震后随着时间的流逝又慢慢恢复到背景值附近波动。Liu 等 (2018) 通过三分量地震背景噪声干涉测量技术, 对龙门山断裂带 10 年地震波速变化进行了研究, 发现在 1~3 s 和 3~8 s 周期, 汶川 $M_W 7.9$ 地震造成了断层区附近急剧的同震波速降低, 降幅为 0.04%~0.06%, 2013 年芦山 $M_W 6.6$ 地震造成了 1~3 s 周期的微小但较为可靠的波速降低, 幅度约为 0.01%。温扬茂等 (2019) 利用双台站 2 年的连续背景噪声数据分析了 2017 年墨西哥 $M_W 7.1$ 地震震源区的地震波速变化特征, 发现震源区浅部 5~10 km 的地震波速在地震中上升约 0.77%, 而在 2~5 km 的地震波速则有约 0.05% 的下降趋势。地

* 收稿日期: 2021-05-07.

基金项目: 中国地震局地震监测、预报、科研三结合课题 (3JH-2021045), 中国地震局 2021 年度震情跟踪定向工作任务 (2021010105) 和云南省陈颙院士工作站 (2014IC007) 联合资助。

第一作者简介: 杨建文 (1989-), 工程师, 主要从事背景噪声波速测量研究工作. E-mail: 928547602@qq.com.

震背景噪声分布广且不依赖于特定震源, 非常适合于跟踪地壳内部结构的物性变化。

2018 年 8 月 13、14 日云南省玉溪市通海县 (24.19°N, 102.71°E) 相继发生了 2 次 5.0 级地震, 震源深度分别为 7 km 和 6 km (本文将这两次地震合在一起进行研究, 称为“通海 5.0 级地震”)。9 月 8 日, 云南省普洱市墨江县 (23.26°N, 101.53°E) 又发生 5.9 级地震, 震源深度为 11 km。地震发生后, 相关学者进行了一系列的研究, 主要包括: 地震前的视应力 (彭关灵等, 2018, 2020)、波速比 (刘自凤等, 2018)、地震精定位和发震构造讨论 (王光明等, 2018) 以及地震前后的 GNSS 面应变时空演化特征 (杨建文等, 2020a、b) 等。其中的 GNSS 研究表明, 2 组地震前后, 震中区域附近存在较为明显的应变场演化过程 (面应变显著积累——短期内面应变快速反向调整——调整过程中相继发生通海和墨江地震) (杨建文等, 2020a、b)。

地震前后明显的应变场变化会引起地下介质波速的变化, 因此, 本文基于 2018 年通海 5.0 级、墨江 5.9 级地震震中附近区域固定台站记录的连续波形数据, 采用背景噪声波速测定方法, 开展震源区波速变化研究。

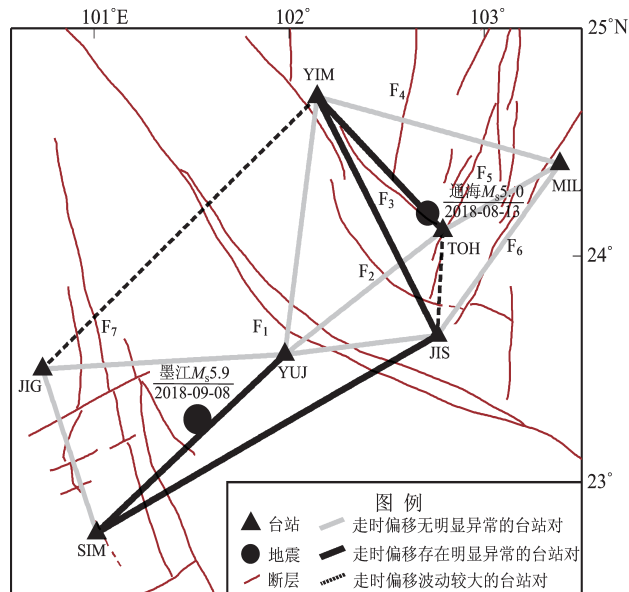
1 数据和方法

1.1 观测数据

本文从云南数字地震台网中选用震中周边 7 个台站 (图 1) 记录的 2017 年 1 月 31 日—2019 年 12 月 1 日垂直分量连续波形资料。经检测, 在该研究时间范围内, 所有台站的数据连续性都很好, 因此基本能够反映该时段内的介质波速变化。数据处理分为三步: ①对单台数据进行预处理, 得到地震背景噪声; ②通过计算台站对间背景噪声的互相关函数来提取经验格林函数; ③计算不同时段的经验格林函数与参考经验格林函数的走时偏移, 获取地震波速度变化。

1.2 单台站数据预处理

在获取各台站的连续波形数据后, 为消除天然地震和仪器本身异常信号的影响, 需要先对



F₁: 红河断裂; F₂: 石屏—建水断裂; F₃: 玉江断裂; F₄: 普渡河断裂; F₅: 明星—二街断裂; F₆: 小江断裂; F₇: 无量山断裂;
YIM: 易门台; MIL: 弥勒台; TOH: 通海台; JIS: 建水台;
YUJ: 元江台; JIG: 景谷台; SIM: 思茅台

图 1 本文研究所用数字地震台站、地震震中及相关台站对分布

Fig. 1 Distribution of digital seismic stations, earthquake epicenters, and related station pairs

单台数据进行预处理, 以获取高质量的地震背景噪声 (刘志坤, 黄金莉, 2010; 温扬茂等, 2019)。数据预处理过程为: ①将连续波形数据按天截取, 采用 1 Hz 对波形数据进行抽样, 以降低数据采样率; ②去除仪器响应、去均值、去趋势及带通滤波处理; ③对波形数据进行时域平均, 以去除地震事件的影响; ④频谱白化处理后得到背景噪声。

1.3 背景噪声互相关及数据叠加

单台数据预处理后, 对研究范围内各台站对每天的背景噪声在相同时间内作互相关计算, 其结果即为台站对间的经验格林函数 (刘志坤, 黄金莉, 2010; Shapiro *et al.*, 2005)。本文基于 7 个台站可获取 21 个台站对每天的经验格林函数。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 (Liu *et al.*, 2018), 因此本文仅对台间距小于 200 km 的台站对作进一步分析。经过筛选, 共挑选出 14 个台站对, 台站对分布如图 1 所示。

背景噪声的来源及能量的差异, 会极大影响经验格林函数的形态 (王伟涛等, 2009)。Stehly 等 (2006) 首次基于噪声互相关函数对噪声源的性质进行分析, 研究指出, 对任意两个地震台站记录到的背景噪声进行互相关处理, 理论上得到的经验格林函数中都有一正、一负两个分支, 分别表示台站对路径上的因果和非因果信号。当台站两侧的噪声源分布均匀时, 因果信号和非因果

信号的到时一致、振幅相同。而当噪声源分布不均匀时, 两个方向的信号到时相同、但振幅不同, 在噪声源能量较强的一侧产生的信号振幅较大 (图 2a)。为了在一定程度上消除噪声源能量分布不均对波速测量结果的影响, 进一步增强数据的信噪比, 以 0 为界线, 把经验格林函数的“负支”反号后与“正支”进行对称叠加, 形成“叠加分量” (图 2b)。

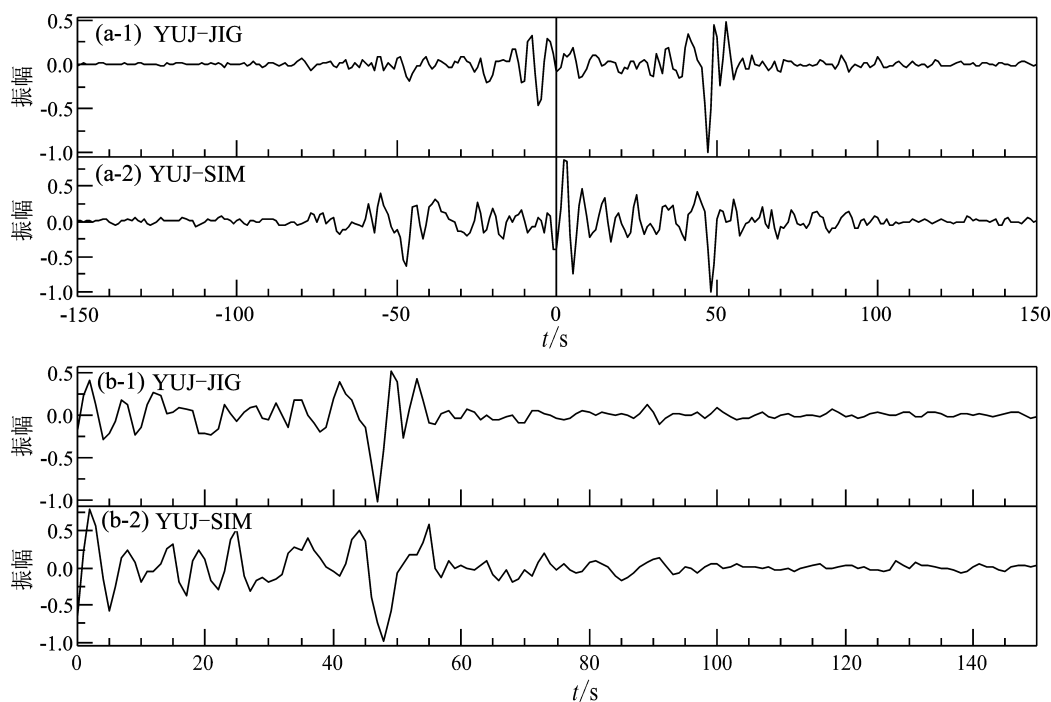


图2 YUJ-JIG、YUJ-SIM 台站对的原始 (a) 和对称叠加后的 (b) 经验格林函数 (3 年数据叠加结果)

Fig. 2 The original (a) and the symmetric superposition (b) of YUJ-JIG, YUJ-SIM station pairs of the empirical Green's function (overlay of 3 years' data)

由于受噪声源的不均匀分布和噪声成分的不确定性等因素的影响, 加上台间距较大, 台站对间的单日经验格林函数的信噪比普遍较低, 很难分辨地震波形态 (温扬茂等, 2019)。为了提高信噪比, 将各台站对当天前、后各 30 d (共 61 d) 的经验格林函数进行叠加, 作为当天经验格林函数。在此基础上, 通过进一步的滑动叠加, 可获取 2017 年 1 月 31 日—2019 年 12 月 1 日的当天经验格林函数 (数据开始和结尾的各 30 d 因为叠加数据不足 61 d, 因此不参与进一步的分析)。

为了获得台站对间经验格林函数随时间变化的定量信息, 须确定各台站对 (刘志坤, 黄金

莉, 2010; 温扬茂等, 2019; Liu *et al.*, 2018)。Stehly 等 (2006) 研究发现背景噪声源的季节性变化会引起由互相关方法重构的面波信号的走时变化, 因此建议尽量采用较长时间范围 (至少 1 年) 的资料来确定参考经验格林函数。本文将各台站对 2017 年 1 月—2019 年 12 月的经验格林函数进行叠加作为各自的参考经验格林函数 (图 3)。从图 3 可以看到清晰的直达瑞利面波和尾波, 根据瑞利波信号的到达时间与台站对的间距, 可估算其面波速度约为 3 km/s, 符合瑞利波理论值范围 (2~4 km/s)。这也间接地反映了本文数据处理的正确性。

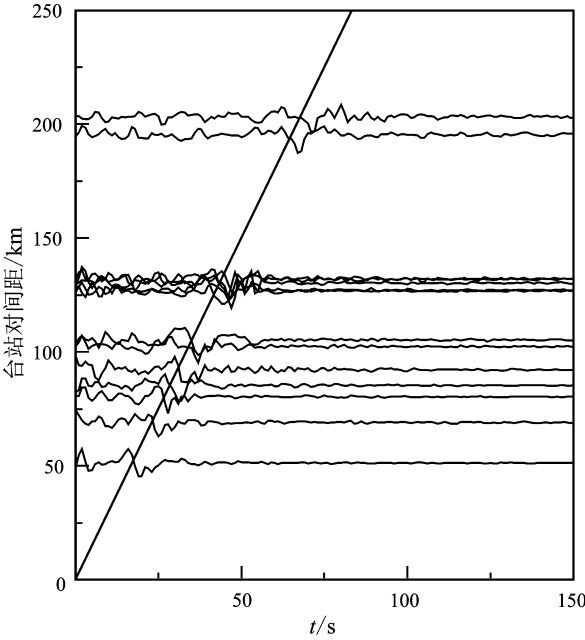


图3 参考经验格林函数的台站对间距-时间图
Fig. 3 Station pair distance - time diagram of the referential empirical Green's function

1.4 走时偏移提取

对台站对间的当天经验格林函数和参考格林函数作互相关计算, 获取相似波形窗口的互相关系数 (图 4), 互相关系数最大时所对应的时间延迟就是这两段相似波形窗口的走时偏移, 为了提高精度, 对计算结果余弦插值后提取更高精度的走时偏移。

由图 4b、c 可知, 在 43 ~ 60 s 的波形窗口内, YUJ - SIM 台站对的当天经验格林函数和参考经验格林函数的互相关系数都在 0.9 以上, 表示在该时窗内的两波形具有较高的相似性。经统计, 进行互相关计算后, 14 个台站对的瑞利波部分的互相关系数基本都在 0.9 以上。鉴于此, 以互相关系数 0.9 以上为约束, 通过提取直达的瑞利波中的部分震相 (图 4b、c 中的阴影部分, 震相窗长约 15 s, 不同台站对取值存在较小差异) 的走时偏移来计算台站对间的瑞利波速度变化。

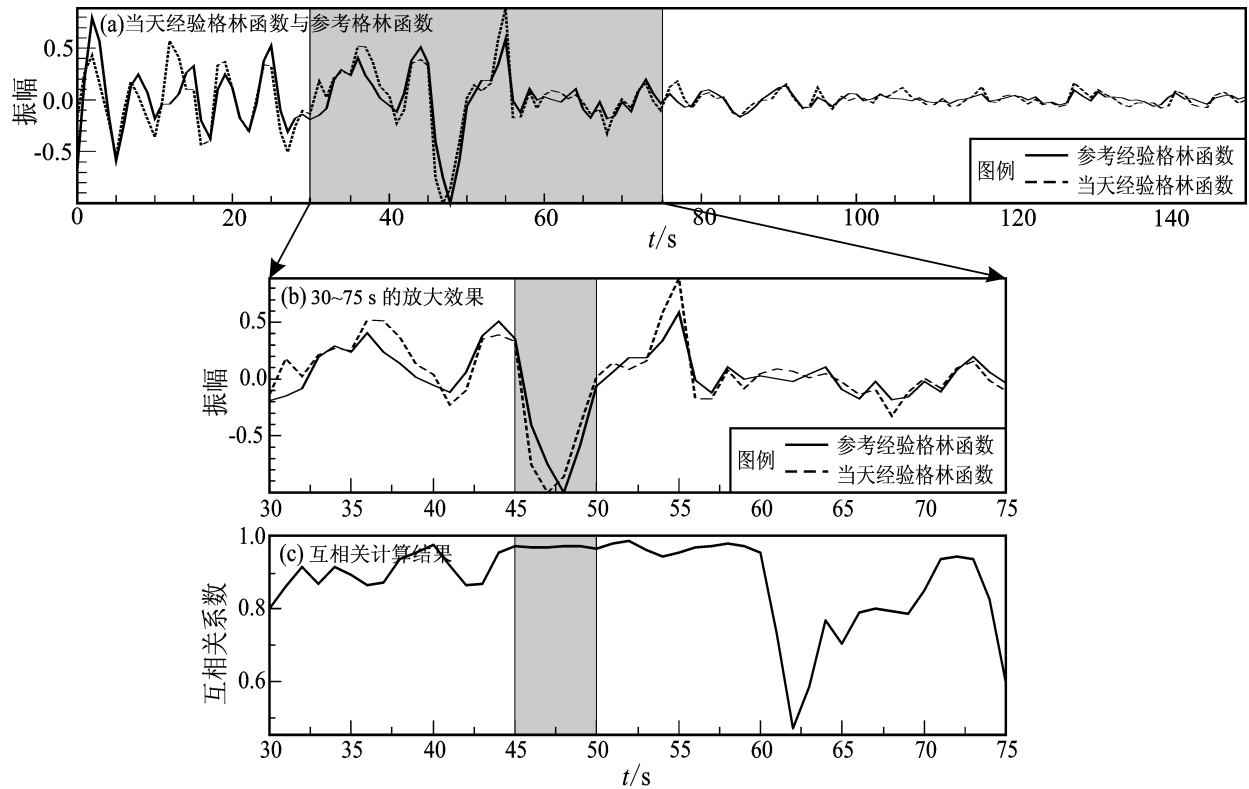


图4 YUJ - SIM 台站对当天经验格林函数与参考经验格林函数互相关计算结果
Fig. 4 The cross - correlation calculation results of the daily empirical Green's function and the referential empirical Green's function of YUJ - SIM station pair

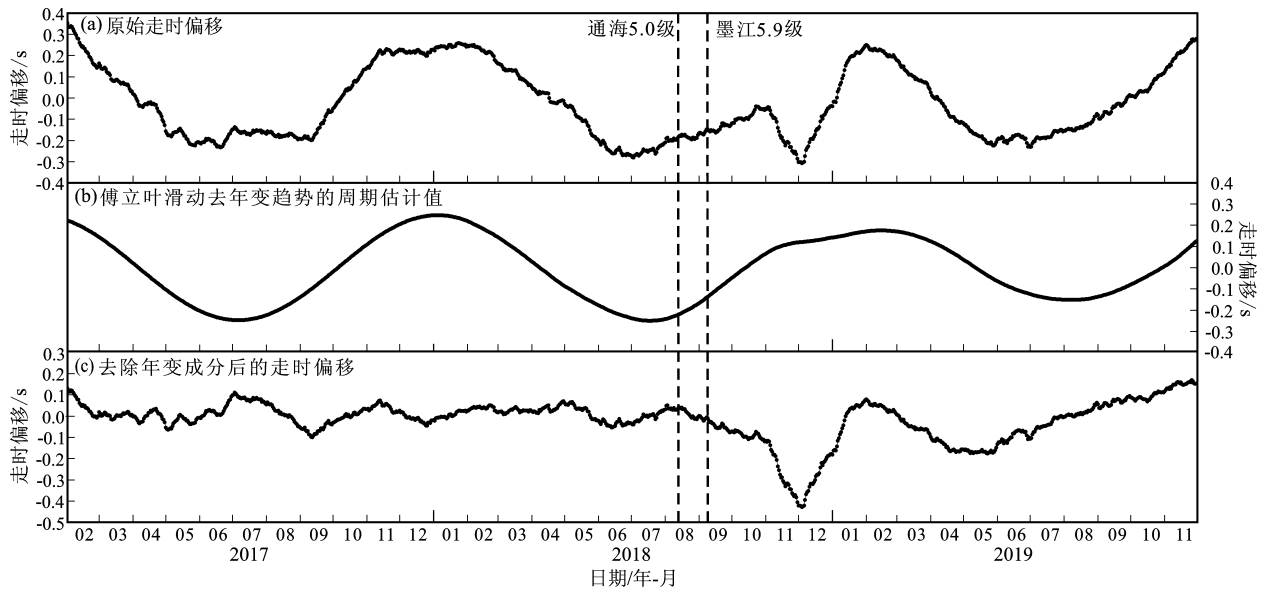


图5 YUJ-SIM 台站对瑞利波走时偏移变化曲线

Fig. 5 Curve of the travel-time shift of the Rayleigh wave of YUJ-SIM station pair

由图5a可以看到，YUJ-SIM 台站对瑞利波走时偏移变化曲线存在明显的年变成分。为消除年变成分对走时偏移的影响，本文采用傅立叶滑动去年周期方法去除其中的年变成分，以获取长趋势变化背景下隐含的波速变化特征。

1.5 傅立叶滑动去年周期

傅立叶滑动去年周期的主要目的是排除瑞利波走时偏移中的年变周期成分。主要方法概要为(蒋骏等, 2000):

假设某台站对的瑞利波走时偏移时间序列为: $y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$, 其中年变周期长度用 T 表示, 即一年中等间隔均值序列有 T 个观测值; 年变序列成分的序列用 $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 表示。利用三角级数公式由 y 序列中的 T 个观测值 $\{y_{n-T+1}, y_{n-T+2}, \dots, y_n\}$ 计算出 x_n ; 由 $\{y_{n-T+2}, y_{n-T+3}, \dots, y_{n+1}\}$ 计算出 x_{n+1} , 按这样的思路, 相应的计算公式为:

$$a_n = \frac{2}{T} \sum_{j=n-T+1}^n y_j \cos \frac{2\pi(j-n+T)}{T} \quad (1)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \sum_{j=n-T+1}^n y_j \sin \frac{2\pi(j-n+T)}{T} \quad (2)$$

$$x_n = a_n \cos \frac{2\pi(j-n+T)}{T} + b_n \sin \frac{2\pi(j-n+T)}{T} \quad (3)$$

排除年变化的新序列为:

$$G_n = y_n - x_n \quad (n = T, T+1, \dots, N) \quad (4)$$

由式(1)和(2)计算出的 a_n 和 b_n 是随年变强弱而动态变化的。对 y_n 序列中前 $T-1$ 个数据通过基波拟合求得 x_1, x_2, \dots, x_{T-1} , 然后利用式(4)计算出 G_0, G_1, \dots, G_{T-1} 。本文是在台站对日均值瑞利波走时偏移时间序列上排除年变化, 因此, $T=365$ 。

本文采用傅立叶滑动去年周期方法对图5a进行处理, 分别得到傅立叶滑动去年变趋势的周期估计值(图5b)及去除年变成分后的走时偏移(修正后的走时偏移)(图5c), 从图5b、c中可以看到YUJ-SIM 台站对的瑞利波走时偏移在通海5.0级和墨江5.9级地震前、后(特别是震后)存在明显的异常特征。在后面的分析中, 笔者对所有的台站对都进行了傅立叶滑动去年变趋势处理。

2 结果与分析

本文计算了2017年1月31日—2019年12月1日通海5.0级、墨江5.9级地震震中周边14个

台站对的瑞利波走时偏移。

2.1 异常台站对空间分布

对 14 个台站对的瑞利波走时偏移变化曲线分析发现, TOH - YIM、YIM - JIS、YUJ - SIM、JIS - SIM 台站对的瑞利波走时偏移在通海 5.0 级和墨江 5.9 级地震前、后存在明显的异常特征。TOH - JIS、YIM - JIG 台站对走时偏移在整个时段内波动较大, 无法分辨异常信息, 其余 8 个台站对走时偏移在地震前、后无明显异常特征。图 6 为部分台站对 2017 年 1 月 31 日—2019 年 12

月 1 日的瑞利波走时偏移变化曲线。

从图 1 的走时偏移异常台站对空间分布来看, 4 个异常台站对中 TOH - YIM、YIM - JIS 台站对分布于通海 5.0 级地震震中及邻近区域 (TOH - YIM 台站对穿过了通海 5.0 级地震的震中区域), 推测其走时偏移异常主要受通海地震过程的影响; YUJ - SIM、JIS - SIM 台站对分布于墨江 5.9 级地震震中及邻近区域 (YUJ - SIM 台站对穿过了墨江 5.9 级地震的震中区域), 推测其走时偏移异常主要受墨江地震过程的影响。

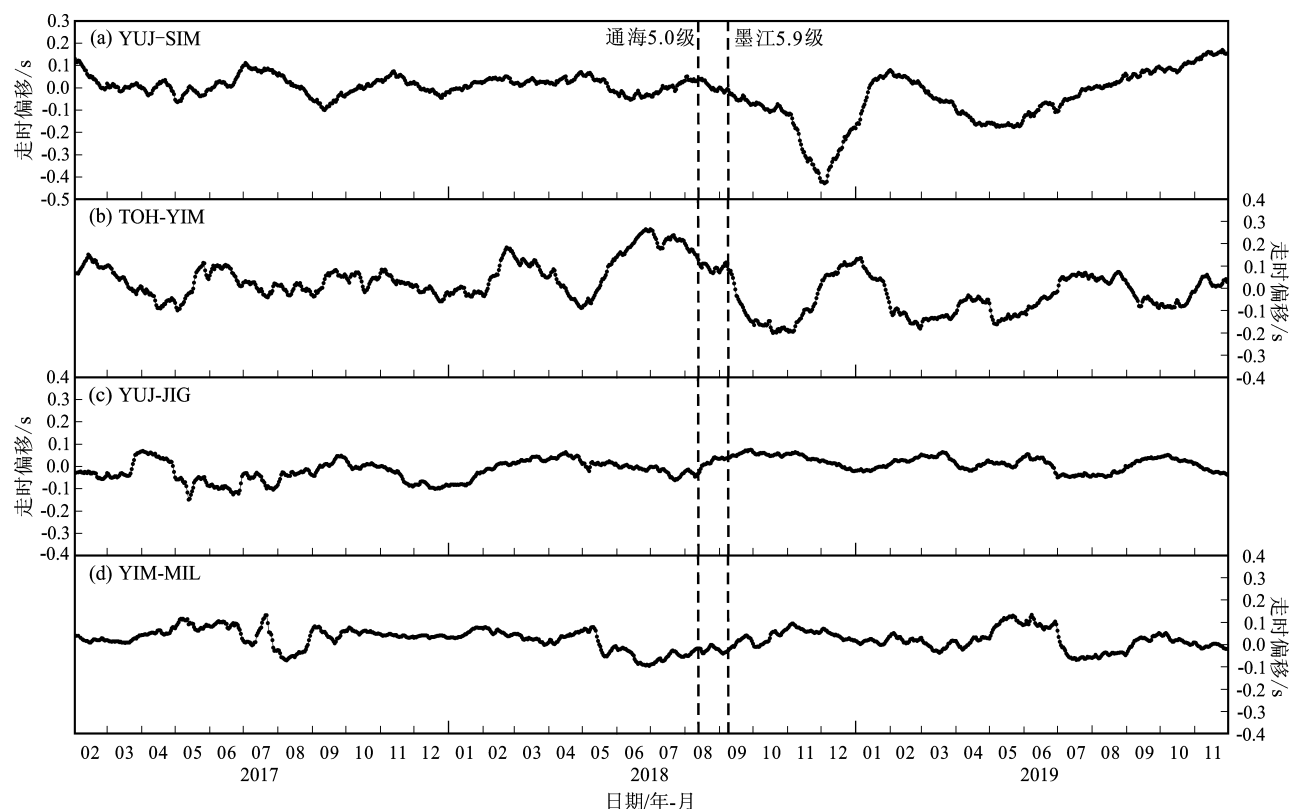


图 6 部分台站对瑞利波走时偏移变化曲线

Fig. 6 Curves of the travel-time shift of the Rayleigh wave of some station pairs

2.2 异常台站对走时偏移的时变特征

为了更好地分析通海 5.0 级、墨江 5.9 级地震的震源区的波速变化情况, 本文分别采用单台站对和多台站对组合平均的方法对走时偏移的时变特征进行分析。

(1) 单台站对的走时偏移

考虑到 4 个异常台站对的空间分布情况, 将 TOH - YIM、YIM - JIS 分为一组 (图 7), YUJ - SIM、JIS - SIM 分为另一组 (图 8), 系统分析各

台站对的瑞利波走时偏移的时变特征。

由图 7 可知, 在通海 5.0 级地震过程中 (震前 - 震中 - 震后过程), TOH - YIM 和 YIM - JIS 台站对的瑞利波走时偏移变化形态, 存在较好的相似性, 存在明显的“V”或双“V”型变化形态, 通海 5.0 级地震发生在第 1 个“V”型的前端。从 2018 年 7 月 20 日左右 (通海 5.0 级地震前 20 余天) 开始, 两个台站对的走时偏移开始同步下降。TOH - YIM 台站对的下降过程一直持续了约 180 d

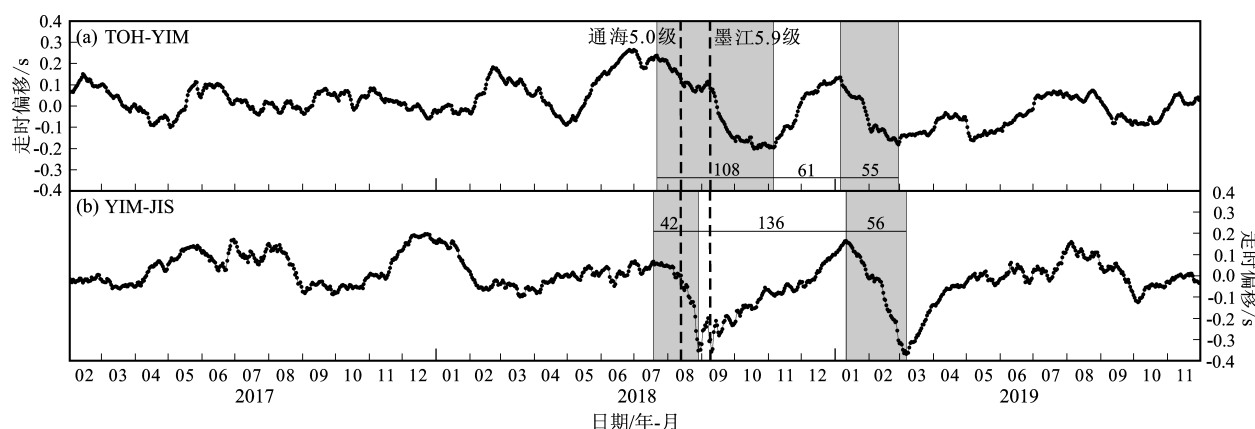


图7 TOH-YIM (a) 和 YIM-JIS (b) 台站对瑞利波走时偏移变化曲线

Fig. 7 Curves of the travel-time shift of the Rayleigh wave of TOH-YIM station pair (a) and YIM-JIS station pair (b)

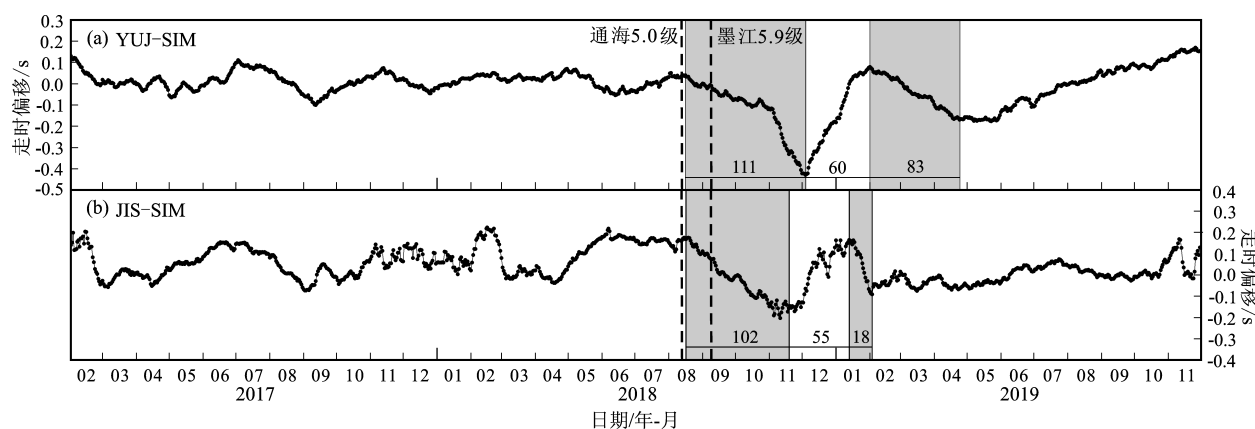


图8 YUJ-SIM (a) 和 JIS-SIM (b) 台站对瑞利波走时偏移变化曲线

Fig. 8 Shift of the travel-time of the Rayleigh wave of YUJ-SIM (a) and JIS-SIM (b) station pair

(走时偏移在墨江地震前、后存在轻微的波动), 该台站对的走时偏移从11月6日开始上升(上升过程持续了约61 d), 2019年1月5日之后又开始下降(下降过程持续了约55 d), 此后恢复平稳, 其间存在轻微的波动(图7a)。YIM-JIS台站对的下降过程持续了约42 d, 走时偏移从8月29日开始上升(上升过程持续了约136 d), 2019年1月11日之后又再次下降(下降过程持续了约56 d), 从2019年3月7日开始, 短期内存在快速恢复(走时偏移上升)的过程, 至2019年4月中旬开始恢复平稳, 其间存在轻微的波动(图7b)。

由图8可知, 在墨江5.9级地震过程中(震前-震中-震后过程), YUJ-SIM和JIS-SIM台站对的瑞利波变化形态存在较好的相似性, 走时偏

移存在明显的“V”或双“V”型变化形态, 墨江5.9级地震发生在第1个“V”型的前端。从2018年8月15日左右(墨江5.9地震前20余天)开始, 两个台站对的走时偏移开始同步下降。YUJ-SIM台站对的下降过程一直持续了约111 d, 该台站对的走时偏移从12月4日开始上升(上升过程持续了约60 d), 2019年2月1日之后又开始下降(下降过程持续了约83 d), 此后开始缓慢地恢复平稳(图8a)。JIS-SIM台站对的下降过程持续了约102 d, 该台站对的走时偏移从11月24日开始上升(上升过程持续了约55 d, 上升过程走时偏移存在轻微的波动), 2019年1月17日开始之后又再次下降(下降过程持续了约20 d), 此后恢复平稳(图8b)。

TOH-YIM和YUJ-SIM台站对分别穿过了通

海 5.0 级和墨江 5.9 级地震的震中区域（图 1），二者的走时偏移可能反映震中附近振动最剧烈、破坏比也最严重的极震区的波速变化特征。对比图 7a、8a 发现，两个台站对的走时偏移均在地震前的 20 d 左右开始下降，且下降过程均持续 110 d 左右（TOH - YIM 台站对的走时偏移变化量为 -0.44 s，YUJ - SIM 台为 -0.47 s），此后又都以 60 d 左右进行了恢复（TOH - YIM 台站对的走时偏移变化量为 0.33 s，YUJ - SIM 台为 0.51 s）。接着又分别在约 55 d 和 83 d 内再次下降（TOH - YIM 台站对的走时偏移变化量为 -0.32 s，YUJ - SIM 台为 -0.25 s）。最后二者的走时偏移均恢复平稳。纵观整个过程，二者的走时偏移时变特征具有较高的相似性。

(2) 多台站对组合的平均走时偏移

考虑到基于单台站对测量的走时偏移可能不

太稳定，将震中附近的台站对的结果进行平均来代表地震震源区的波速变化。根据图 1 的异常台站对分布，将 TOH - YIM 和 YIM - JIS 台站对分为一组（记为：第一组），将 YUJ - SIM 和 JIS - SIM 台站对分为另一组（记为：第二组），对两组双台站对的走时偏移分别进行组合平均，以分别表示通海 5.0 级（图 9a）、墨江 5.9 级地震（图 9b）震源区波速变化。

与单台站对走时偏移（图 7、8）进行对比，发现组合平均后的走时偏移变化趋势更加的稳定。表 1 为两组台站对在地震过程中不同阶段的走时瑞利波走时偏移变化情况。

由图 9a 可知，第一组台站对的走时偏移在通海 5.0 级地震前后存在明显的双“V”型变化特征，通海 5.0 级地震发生在第 1 个“V”型的前端。结合表 1 可知，第一组台站对的走时偏移

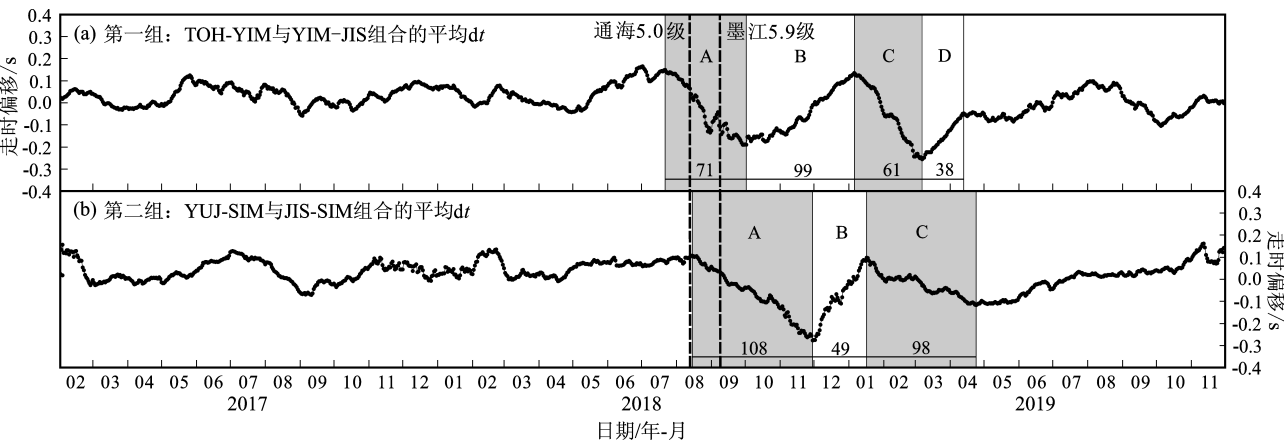


图 9 通海 5.0 级 (a) 和墨江 5.9 级 (b) 地震震源区瑞利波走时偏移
Fig. 9 Shift of the travel - time of the Rayleigh wave in the source area of the Tonghai $M_55.0$ earthquake (a) and the Mojiang $M_55.9$ earthquake (b)

表 1 两次地震前后台站对瑞利波走时偏移变化

Tab. 1 Shift of the travel - time of the Rayleigh wave of the stations pairs before and after the two earthquakes								
组别	过程	开始日期	走时偏移/s	结束日期	走时偏移/s	持续时间/d	走时偏移变化量/s	备注
第一组	A	2018 - 07 - 22	0. 15	2018 - 09 - 30	-0. 19	71	-0. 34	通海 5.0 级地震 震源区波速变化
	B	2018 - 09 - 30	-0. 19	2019 - 01 - 06	0. 13	99	0. 32	
	C	2019 - 01 - 06	0. 13	2019 - 03 - 07	-0. 26	61	-0. 39	
	D	2019 - 03 - 07	-0. 26	2019 - 04 - 13	-0. 05	38	0. 21	
第二组	A	2018 - 08 - 15	0. 11	2018 - 11 - 30	-0. 28	108	-0. 39	墨江 5.9 级地震 震源区波速变化
	B	2018 - 11 - 30	-0. 28	2019 - 01 - 17	0. 10	49	0. 38	
	C	2019 - 01 - 17	0. 10	2019 - 04 - 24	-0. 12	98	-0. 22	

在通海 5.0 级地震前约 20 d (2018 年 7 月 22 日) 开始下降, 下降过程持续了约 71 d, 变化量为 -0.34 s, 由于受墨江 5.9 级地震的影响, 下降过程中存在轻微的波动。从 2018 年 9 月 30 日开始, 走时偏移开始上升, 上升过程持续了约 99 d, 变化量为 0.32 s, 从 2019 年 1 月 6 日开始又再次下降, 下降过程持续了约 61 d, 变化量为 -0.39 s, 此后在约 38 d 内又上升了 0.21 s。经历明显的双“V”型变化后, 该组合台站对的走时偏移恢复平稳, 其间存在一定幅度的波动。

由图 9b 可知, 第二组台站对的走时偏移在墨江 5.9 级地震前后存在明显的“V”型变化特征, 墨江 5.9 级地震发生在“V”型的前端。结合表 1 可知, 第二组台站对的走时偏移在墨江 5.9 级地震前约 20 d (2018 年 8 月 15 日) 开始下降, 下降过程持续了约 108 d, 变化量为 -0.39 s, 略高于通海 5.0 级地震。从 2018 年 11 月 30 日开始, 走时偏移开始上升, 上升过程持续了约 49 d, 变化量为 0.38 s, 从 2019 年 1 月 17 日之后的约 98 d 内存在一定幅度的下降, 变化量为 -0.22 s。此后该组合台站对的走时偏移恢复平稳。

对比两组台站对的走时偏移发现, 两次地震造成的震源区及周边波速的异常持续时间大概为 260 d (通海地震异常持续时间略高于墨江地

震), 但墨江地震造成的最初的走时偏移变化量和持续时间均高于通海地震。

本文多台站对组合平均走时偏移主要采用的是震中附近地震前后存在明显异常的台站对, 其他台站对因为没出现异常, 且距离较远, 因此未参与计算。为验证计算结果的可靠性, 将震中附近的其他台站对也加入到组合平均中 (通海 5.0 级地震附近采用 TOH - YIM、YIM - JIS、TOH - MIL、YIM - MIL、MIL - JIS 台站对进行组合平均 (图 10a), 墨江 5.9 级地震附近采用 YUJ - SIM、JIS - SIM、YUJ - JIG、JIG - SIM 台站对进行组合平均 (图 10b), 以获取更大范围的组合平均走时偏移。

分别对比图 9a 和图 10a、图 9b 和图 10b, 发现采用更多台站对进行组合平均获得的瑞利波走时偏移时间序列的变化形态与原有的双台站对的具有较高的相似性。区别在于利用更多台站对获得的组合平均走时偏移在同一时段内变化量相对较小, 究其原因可能是因为新加入的台站对走时偏移变化平稳, 且离震中相对较远, 在组合平均的过程中对原有存在明显异常的台站对的走时偏移变化起到了抑制作用, 但未改变原有的变化形态。因此认为利用震中附近走时偏移存在明显异常的台站对获取的组合平均走时偏移结果更能体现震源区的波速变化。

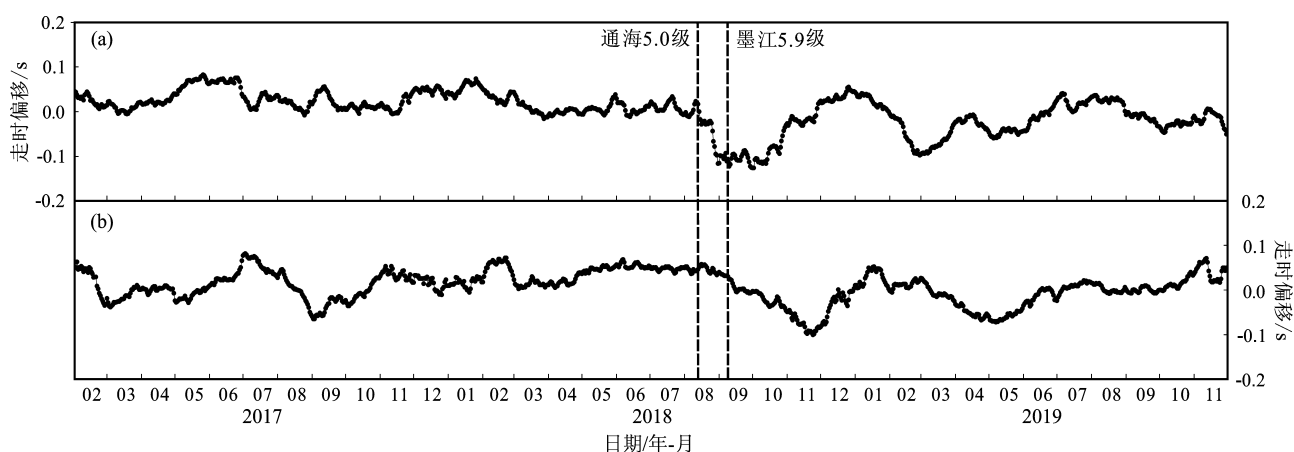


图 10 通海 5.0 级地震附近 5 个台站对 (a) 和墨江 5.9 级地震附近 4 个台站对 (b) 组合平均走时偏移

Fig. 10 The average travel - time shifts of the combination of 5 station - pairs near the epicenter of the Tonghai $M_s5.0$ earthquake (a) and the combination of 4 station - pairs near the epicenter of the Mojiang $M_s5.9$ earthquake (b)

3 讨论

本文震相提取过程中主要考虑的是信噪比和数据可靠性,因此以互相关系数作为约束(互相关系数要求在 0.9 以上),提取了经验格林函数中直达的瑞利波的走时偏移(计算的是瑞利波波速变化)。本文测量波速变化采用的周期范围是 2 ~ 10 s,瑞利波走时偏移反映的是震源区中上地壳物性介质随时间的变化特征。

研究过程中发现由于受噪声源的不均匀分布和噪声成分的不确定性等因素的影响,大部分的经验格林函数都存在左右分支不对称的现象(两个方向的信号到时相同,但振幅不同,在噪声源能量较强的一侧产生的信号振幅较大),因此在进行滑动叠加前先对经验格林函数进行了“左右叠加”,形成“叠加分量”,这在一定程度上可以消除噪声源分布不均等因素对计算结果的影响。在获得瑞利面波走时偏移后,发现大部分台站对的走时偏移都存在明显的年变趋势,为消除年变成分对走时偏移的影响,获取长趋势变化背景下的波速变化情况,采用傅立叶滑动去周期方法对台站对的走时偏移进行了处理,研究表明该方法理论基础严密,是一种稳定、可靠的周期分析方法。

根据互相关时延计算的原理,本文所提取的是当天经验格林函数相对于参考经验格林函数的走时偏移,当走时偏移为正时,表示波速变慢,当走时偏移为负时,表示波速加快。研究发现,震源区相关台站对的瑞利波走时偏移分别在地震发生前的 20 余天开始大幅度的下降且一直持续到地震发生后的很长一段时间,这表明该过程中,震源区的波速在加快。陈立德和付虹(2003)提出的“震源硬化模型”指出:岩石在受力过程中在其失稳源区存在“硬化”现象,硬化过程中其介质的刚度会增加,刚度增加可能导致速度增加,从而使走时缩短。相关台站对瑞利波走时偏移的大幅下降过程可用“震源硬化模型”以解释,之后的走时偏移的“上升-下降-再上升”过程可能与震后的区域应力场调整有关。

TOH-YIM 和 YUJ-SIM 台站对的瑞利波走时

偏移分别在通海 5.0 级和墨江 5.9 级地震过程中表现出最为明显的走时异常特征,这可能与这两个台站对分别穿越了震中附近振动最剧烈、破坏比也最严重的极震区有关。

通过背景噪声互相关方法得到的地震波速度变化反映了台站对间较大范围内地壳介质状态及属性的变化(刘志坤,黄金莉,2010),这种变化的准确空间位置和物理机制目前还不太清楚。GNSS 应变场的相关研究表明,通海 5.0 级和墨江 5.9 级地震前后,震中区域附近的面应变(面应变参数能直接反映区域挤压(收缩)或拉张(膨胀)强弱特性)分布存在较为明显的异常特征(杨建文等,2020b)。对于应变状态改变与波速异常特征之间的关系有待更进一步的研究。

4 结论

本文基于云南数字地震台网的宽频带连续波形资料,采用波形互相关方法提取了 2017 年 1 月 31 日—2019 年 12 月 1 日 14 个台站对的直达瑞利波走时偏移来研究通海 5.0 级、墨江 5.9 级地震震源区的波速变化特征,得到以下主要结论:

(1) 2 次地震前后,穿过地震震中和震中附近的台站对的瑞利波走时偏移表现出了明显的异常,这表明两次地震都在一定程度上造成了震源区地壳介质速度的变化。

(2) 通过对台站对的走时偏移时变特征进行分析发现,两次地震发生前后异常台站对的瑞利波走时偏移都表现出明显的“V”或双“V”型变化特征,且地震都发生在了第 1 个“V”型的前端,且短期内相关台站对走时偏移变化具有较好的同步性,但异常幅度大小和异常持续时间存在一定差异。

(3) 考虑到基于单台站对测量的走时偏移可能不太稳定,所以将震中及附近的异常台站对的结果进行平均来代表震源区的波速变化,结果发现,通海 5.0 级和墨江 5.9 级地震造成的震源区波速的异常持续时间大概都为 260 d (通海地震异常持续时间略高于墨江地震),但墨江地震造成的最初的走时偏移变化量和持续时间均高于通海地震。

本文研究所用连续波形资料来源于云南数字地震台网,背景噪声互相关计算程序由中国地震局地球物理研究所地球物理先导技术研究室王伟涛研究员提供,审稿专家提出了建设性修改意见,在此表示衷心感谢。

参考文献:

- 陈立德,付虹. 2003. 地震预报基础与实践[M]. 北京:地震出版社, 186-187.
- 宫猛,郭蕾,王想,等. 2017. 利用背景噪声互相关方法研究唐山地区地震波速变化[J]. 地震,37(4):152-161.
- 蒋骏,李胜乐,张雁滨,等. 2000. 地震前兆信息处理与软件系统[M]. 北京:地震出版社,231.
- 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.
- 刘自凤,张天继,付虹,等. 2018. 2018年云南通海 5.0 级地震前波速比变化特征[J]. 地震研究,41(4):494-502.
- 彭关灵,孔德育,孙楠,等. 2020. 2014 年景谷 M_s 6.6 和 2018 年墨江 M_s 5.9 地震前视应力、视体积异常特征研究[J]. 地震研究,43(2):355-362.
- 彭关灵,赵小艳,刘自凤,等. 2018. 2018 年云南通海 M_s 5.0 地震前视应力时空特征[J]. 地震研究,41(4):487-493.
- 王光明,刘自凤,赵小艳,等. 2018. 2018 年云南通海 M_s 5.0 地震序列重定位及发震构造讨论[J]. 地震研究,41(4):503-510.
- 王伟涛,王宝善,葛洪魁,等. 2009. 利用主动震源检测汶川地震余震引起的浅层波速变化[J]. 中国地震,25(3):223-233.
- 温扬茂,高松,许才军. 2019. 利用双台站背景噪声分析 2017 年墨西哥 M_w 7.1 地震震源区的地震波速变化[J]. 地球物理学报,62(8):3024-3033.
- 杨建文,张鹏映,茶文剑,等. 2020a. 2018 年云南地区 GNSS 面应变变化及地震关系分析[J]. 大地测量与地球动力学,40(3):258-263.
- 杨建文,张鹏映,何应文,等. 2020b. 2018 年通海两次 5.0 级地震前 GNSS 观测异常及震后云南地区的应变变化[J]. 大地测量与地球动力学,40(1):30-34.
- Brenguier F, Campillo M, Hadziioannou C, *et al.* 2008. Postseismic relaxation along the San Andrews fault at Parkfield from continuous seismological observations[J]. Science,321(5895):1478-1481.
- 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]. J Geophys Res:Solid Earth,123:8979-8994.
- Shapiro N M, Campillo M, Stehly L, *et al.* 2005. High resolution surface wave tomography from ambient seismic noise[J]. Science,307:1615-1618.
- Stehly L, Campillo M, Shapiro N M. 2006. A study of the seismic noise from its long-range correlation properties[J]. J Geophys Res, 111, B10306.
- Stehly L, Froment B, Campillo M, *et al.* 2016. Monitoring seismic wave velocity changes associated with the M_w 7.9 Wenchuan earthquake: increasing the temporal resolution using curvelet filters[J]. Geophysical Journal International,201(3):1939-1949.

Study of the Wave Velocity Changes in the Focal Area of the Tonghai $M_s5.0$ Earthquake and the Mojiang $M_s5.9$ Earthquake by Ambient Noise

YANG Jianwen^{1,2}, YE Beng^{1,2}, GAO Qiong^{1,2}, WANG Jun^{1,2}, CHEN Jia^{1,2}

(1. *Dali Center of China Earthquake Science Experimental Site, Dali 671000, Yunnan, China*)

(2. *Field Scientific Observation and Research Station on Crustal Tectonic Activities in Dali, Northwest Yunnan, Dali 671000, Yunnan, China*)

Abstract

Based on the ambient noise cross-correlation method, we extract the travel time shift of the direct Rayleigh – wave of the daily empirical Green’s function and the referential empirical Green’s function of 14 station pairs to study the characteristics of the wave velocity changes in the source region of the Tonghai $M_s5.0$ earthquake and the Mojiang $M_s5.9$ earthquake by using continuous seismic data recorded by the broadband stations of the Yunnan Digital Seismic Network from January 2017 to December 2019. The results show that the seismic velocity are changed in the source region by the Tonghai $M_s5.0$ earthquake and the Mojiang $M_s5.9$ earthquake in 2018 to a certain extent. Before and after the two earthquakes, the travel time shift of the Rayleigh wave of the station pairs passing through the epicenters and their vicinity shows obvious abnormal characteristics about 20 days before the earthquakes, and the travel-time changes are synchronous in the short term but there are some differences between the amplitude and the lasting-time of the anomaly of the two earthquakes. The abnormal travel-time shift of the station pairs is V-shaped or double V-shaped, and both earthquakes occurred before the appearance of the first V-shape. The average travel-time shift of multi-station pairs show that the seismic velocity changes in the source region caused by the Tonghai $M_s5.0$ and the Mojiang $M_s5.9$ earthquakes both last about 260 days. The anomaly of the Tonghai earthquake last longer than the one of the Mojiang earthquake, but in the early stage the travel-time shift is more obvious and the lasting – time of the anomaly caused by the Mojiang earthquake is longer than those caused by the Tonghai earthquake.

Keywords: ambient noise; waveform cross-correlation; the empirical Green’s function; wave velocity change