

2025 年缅甸 M7.9 级震源区地震波速变化

吕子强^{1*}, 张紫琼¹, 雷建设², 陈召曦³, 刘珈君¹, 侯利民¹

1 辽宁工程技术大学矿业学院, 辽宁阜新 123000

2 应急管理部国家自然灾害防治研究院, 北京 100085

3 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 北京 100083

摘要: 地震波速度变化是表征地下介质应力状态演化的关键指标, 对理解地震孕育机制、破裂过程及震后调节行为具有重要意义。本文利用 2025 年 3 月 28 日缅甸 M7.9 级地震震源区 4 个固定台站的连续波形数据, 采用背景噪声自相关方法分析了地震波速在震前、同震及震后三个阶段的动态变化特征。研究结果表明, 在 0.1-2 Hz 频段范围内, 震前阶段所有台站均观测到显著的地震波速下降现象, 推测可能与实皆大型走滑断裂带在临震阶段的预滑活动或介质物理性质的渐进性改变有关。同震阶段地震波速变化呈现明显的空间差异性, 震中距较近的台站表现出更大的波速变化幅度, 表明近场区域受强地面运动的影响更为显著。震后阶段地震波速随时间呈现逐渐恢复的趋势, 可能反映了台站下方介质的自愈合过程。本研究结果为深入认识大型走滑断裂的孕震机理及震后介质愈合机制提供了新的观测依据。

关键词 缅甸 M7.9 级地震; 自相关函数; 地震波速变化; 实皆断裂

中图分类号: P315

收稿日期: 2025-06-23

Seismic Velocity Changes of the 2025 Myanmar M7.9

Earthquake

LÜ ZiQiang^{1*}, ZHANG ZiQiong¹, LEI JianShe², CHEN ZhaoXi³, LIU JiaJun¹, HOU LiMin¹

1. College of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin 123000 China

2. Key Laboratory of Crustal Dynamics, National Institute of Natural Hazards, Ministry of Emergency Management of China, Beijing 100085, China

3. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: Seismic velocity changes serve as a crucial indicator for characterizing the evolution of stress states in subsurface structure, providing significant insights into earthquake nucleation mechanisms, rupture processes, and postseismic adjustments. This study utilizes continuous waveform data from four permanent stations located in the source region of the March 28, 2025, Myanmar M7.9 earthquake. By applying the ambient noise autocorrelation method, we analyze the dynamic changes in seismic wave velocity during the pre-seismic, co-seismic, and post-seismic phases. The results reveal that all stations observed a notable decrease in seismic wave velocity within the frequency range of 0.1-2 Hz during the pre-seismic phase, which may be attributed to

基金项目 国家自然科学基金(42274129)

作者简介 吕子强(1982-), 男, 副教授, 主要从事全波形反演及地震监测等研究。E-mail: ziqianglyu@sina.com, ORCID: 0000-0003-3777-2090

preseismic slip or progressive changes in the physical properties of the media along the Sagaing large-scale strike-slip fault zone. During the co-seismic phase, the velocity changes exhibit significant spatial heterogeneity, with stations closer to the epicenter showing more pronounced variations, indicating stronger near-field ground motion effects. In the post-seismic phase, the wave velocity gradually recovers over time, likely reflecting the self-healing process of the subsurface media beneath the seismic stations. These findings provide new observational evidence for understanding the seismogenic mechanisms of large strike-slip faults and the postseismic healing processes of subsurface structure.

Keywords Myanmar M7.9 earthquake; Autocorrelation; Seismic velocity changes; Sagaing fault

引言

2025 年 3 月 28 日 6 点 20 分(UTC 时)缅甸发生 M 7.9 级地震,是该区域近年来最具破坏性的强震之一。震中位置位于 21.85°N , 95.95°E (图 1), 持续时间约 90 s, 最大滑动量约 6.5 m, 断层面的破裂尺度约 220 km (USGS: <https://earthquake.usgs.gov/>), 已造成约 5000 多人死亡, 7800 多人受伤。此次地震发生于实皆断裂带中部, 该断裂是印度板块与欧亚板块相互作用而产生的一条大型近南北向右旋走滑断层, 其滑动速率约为 2 厘米/年(Maurin et al., 2010)。该断裂自中新世形成以来, 其东西两侧已累积了超 330 公里的右旋位移, 这些累积的应变主要通过地震事件进行间歇性释放(Searle et al., 2007)。实皆断裂历史上发生过多次 7 级以上地震, 如 1931 年 M 7.7 级地震、1946 年 M 7.8 级地震和 1956 年 M 7.0 级地震等(Hurukawa and Maung, 2011)。另外, 实皆断裂纵贯缅甸中部, 穿越内比都、曼德勒和仰光等人口密集的城市, 其潜在的大震复发周期和强震风险评估仍需密切关注。

地震波速变化是理解地球内部介质动态演化的重要指标。大量研究表明, 强震引起的同震波速变化与震源区应力调整、裂隙开闭、流体迁移等过程密切相关(Brenguier et al., 2008a; Hobiger et al., 2016)。目前, 监测地下介质的地震波速变化主要采用三类技术手段: 天然重复地震分析、人工震源监测和背景噪声监测技术。其中, 天然重复地震方法通过选取震源位置相近、震源机制一致且波形高度相似的重复地震序列来测定地震波的走时变化, 但是这一方法经常受到发震时间不连续和时空分布不均匀等因素的影响(Ratdomopurbo and Poupinet, 1995; 张浩等, 2025)。人工震源方法则利用其波形高度可重复性的优势, 可实现高精度的地震波速变化监测(Silver et al., 2007; Niu et al., 2008), 但其面临工作量大、观测成

本高昂等实际挑战。随着背景噪声处理技术的发展，许多学者通过背景噪声互相关或自相关来监测地下介质波速变化，已在强震和火山区开展了地震波速的时

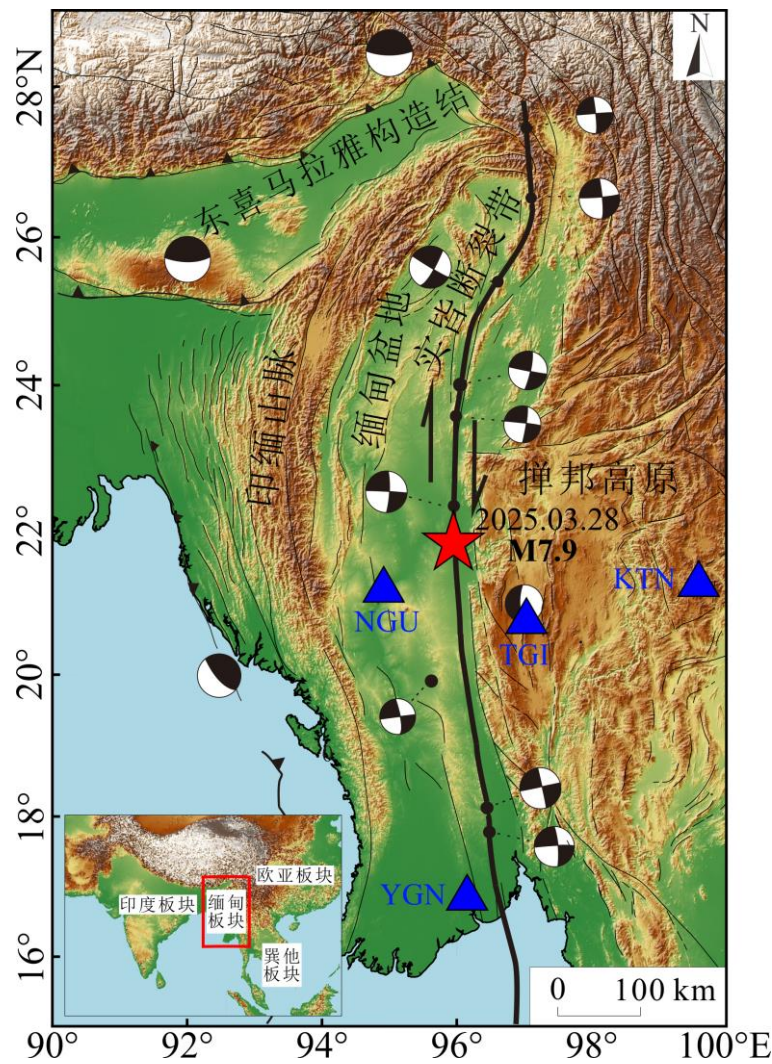


图 1 区域地质构造、台站及历史强震(M>6.5)分布图

红色五角星为 2025 年 3 月 28 日缅甸 M7.9 级地震震中位置，蓝色三角形为台站位置，震源机制结果代表历史 M>6.5 级的地震(Xiong et al., 2017).

Fig.1 Regional tectonic setting, seismic stations and historical strong earthquake (M>6.5) in the study region. The red star marks the epicenter of the March 28, 2025 M7.9 Myanmar earthquake, blue triangles represent station locations, and the focal mechanism solutions depict historical earthquakes with M>6.5 (Xiong et al., 2017).

序变化研究(Brenguier et al., 2008b; 安艳茹等, 2023)。背景噪声监测具有可重复性和时间上稳定性等特点，可以不依赖于地震或人工爆破源，有助于实时了解地壳介质结构的变化特征。

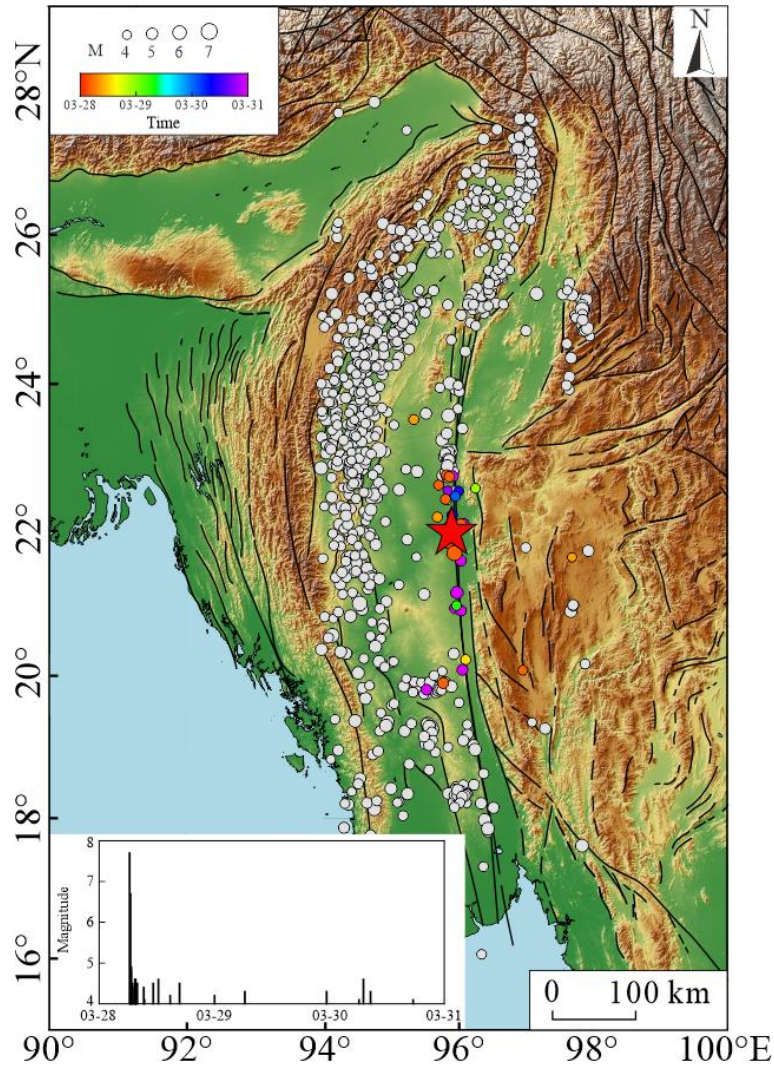


图 2 区域地震活动性

灰色圆圈为 1964 年-2021 年的地震目录，黑色五角星为缅甸 M7.9 级主震，彩色圆圈为其余震，左下角附图为缅甸地震序列 M-T 图。

Fig.2 Regional Seismic Activity. Gray circles represent the earthquake catalog from 1964 to 2021, the red star denotes the Myanmar M7.9 mainshock, and the colored circles indicate its aftershocks.

The left-lower inset is the M-T diagram of the Myanmar earthquake.

背景噪声互相关技术通过计算台站间连续噪声记录的互相关函数，可以有效地重构台站间的经验格林函数，进而利用经验格林函数的时序差异来分析地下介质的波速变化(刘志坤和黄金莉，2010; Delouche et al., 2023)。背景噪声自相关技术是利用单台记录的连续地震背景噪声，计算其自相关函数，提取地下介质的反射响应或波速变化，能够有效减少对台站对间距和方位角分布的依赖。近年研究表明，自相关函数的尾波信号来自多重散射波的后续波动信号，对地下介质波速

的微小扰动更为敏感，且在散射作用下受噪声源的变化影响更小(Mikesell et al., 2015; Mao et al., 2020; 颜杰等, 2023)，尤其适用于台站覆盖密度稀疏的地区。本研究主要利用缅甸地区固定台站数据，采用单台自相关方法获取缅甸强震期间的地下介质波速变化特征，从而提升对缅甸强震震前、同震以及震后介质波速变化规律的认识。

1 构造背景与地震活动性

缅甸处于印度板块、欧亚板块、巽他板块和缅甸微板块交汇处 (Kumar et al., 2011)，北部连接着东喜马拉雅构造结，南部衔接着安达曼海新生的洋壳(Wang et al., 2014)。区域地质构造活动强烈，形成了复杂的褶皱带、走滑断裂和沉积盆地，可分为西部的印缅山脉、中部的缅甸盆地和东部的掸邦高原(图 1)。印缅山脉被认为是由新生代岩层构成的增生楔，其核心为三叠纪变质基底，是印度板块与欧亚板块斜向汇聚的产物(Vigny, 2003)。由于印度板块沿印缅山脉东向俯冲并伴随东西向褶皱冲断作用，该区域地质构造极为复杂(Li et al., 2008)。中部缅甸盆地位于印缅山脉与实皆断裂之间，由中生代与新生代火山弧构成，其前弧盆地与背弧盆地均与孟加拉俯冲体系的内侧岩浆弧相关联(Vigny, 2003)。掸邦高原则被视为巽他板块的刚性边缘，该高原主要由古生代至中生代沉积岩和变质岩基底构成，局部覆盖新生代火山岩，整体呈现抬升的地貌特征(Bertrand et al., 2001)。实皆断裂是缅甸地区最重要的右旋走滑断裂之一，延伸约 1200 公里，北起喜马拉雅东构造结附近，南至安达曼海扩张中心，是东部掸邦高原与中部缅甸盆地的构造边界。该断裂调节着印度板块与欧亚板块/巽他板块的斜向汇聚，是全球典型的大陆转换断层。根据次级结构特征，实皆断裂可划分为 12 个段落，历史地震活动证实这些构造段落很大程度上制约着地震破裂的范围(Wang et al., 2014)。

缅甸地区的地震活动主要受喜马拉雅-缅甸弧形构造带以及实皆断裂带控制。根据国际地震中心(ISC: <https://www.isc.ac.uk/>)1964 年-2021 年的地震目录数据显示(图 2)，该区域地震震中在空间上呈现明显的非均匀分布特征。实皆断裂带北段地震活动显著，而中段和南段的地震活动相对较弱。这种分布格局可能反映了断裂带不同部位的构造应力积累状态的差异。研究学者曾指出实皆断裂中段上存在一个地震空区，长度约为 260 km，存在发生 M 7.9 级强震的可能(Hurukawa and Maung, 2011)，与本次强震的强度和发震位置大体一致。余震活动在空间上呈现

出明显的迁移特征。初期余震主要分布于主震震中的南侧区域，随后余震序列逐渐向北扩展，形成沿断裂带的带状分布，其中最大余震震级达到 M 6.4 级。

2 数据与方法

本文所采用的数据主要来自缅甸地区的 4 个固定台站的垂向分量的连续波形数据，分别为 NGU 台、TGI 台、KTN 台和 YGN 台(IRIS: <https://ds.iris.edu/>)。其中，NGU 和 TGI 台的连续波形时段为 2025 年 3 月 23 日 0 时-2025 年 4 月 4 日 0 时。由于地震期间的数据缺失，KTN 台和 YGN 台的连续波形时段为 2025 年 3 月 23 日 0 时-2025 年 3 月 28 日 6 时。NGU 和 TGI 台安装 Trillium 120QA 型地震仪，而 KTN 台和 YGN 台安装 Streckeisen STS-2.5 型地震仪，所有台站地震仪器的采样率均为 100 Hz。单台自相关处理前，我们将数据分割为 1 小时时长的时间序列，进行多个频带范围内带通滤波，并对滤波后的数据进行 0.05 秒时窗的平滑处理。在计算自相关函数时，采用单位归一化(one-bit normalization)方法对时域信号进行预处理，以有效压制地震信号振幅波动、仪器响应异常及台站周

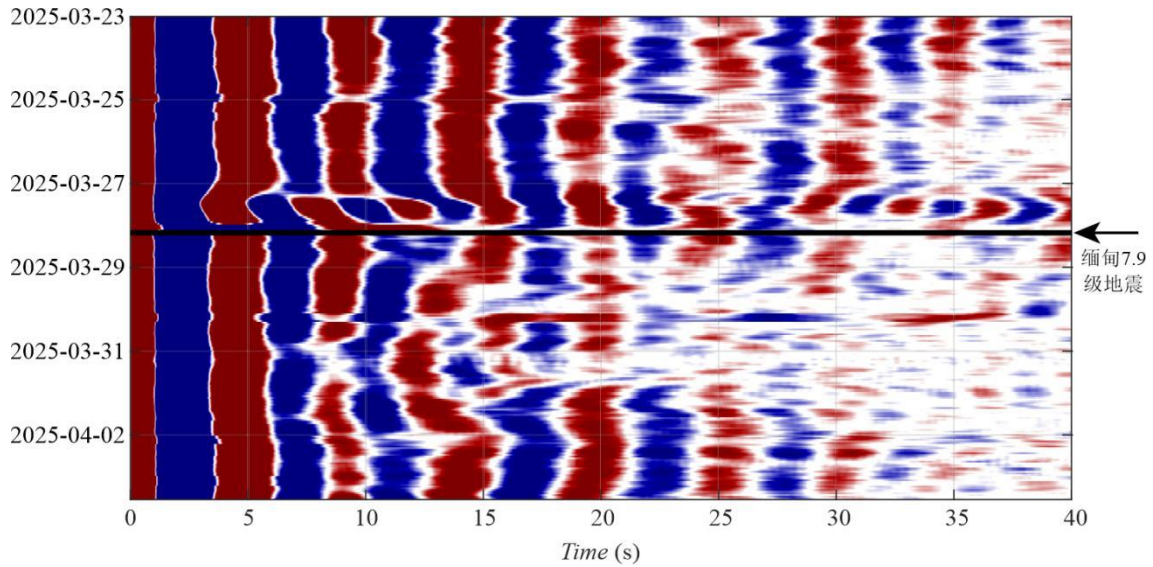


图 3 NGU 台 5 小时叠加窗口的自相关函数(黑色实线为缅甸地震发震时刻)

Fig.3 The autocorrelation functions with a 5-hour stacking window at station NGU (the black solid line indicates the origin time of the Myanmar earthquake).

边非稳态噪声源的干扰(Bensen et al., 2007; 吕子强和雷建设, 2016)。然后，对自相关函数进行不同时窗长度的叠加测试，以提高自相关函数信号的稳定性。较短的叠加时间难以获取稳定的信号，从而影响结果的可靠性；而过长的叠加时间则

会降低波速变化测量的时间分辨率。图 3 为 5 小时叠加窗口的 NGU 台的自相关函数，可以看出，震前的自相关函数变化比较稳定，同震变化相对比较复杂，震后呈现随时间逐渐恢复的状态。

本文采用压缩拉伸法(Stretching)对每台叠加后的自相关函数进行相对波速测量(Sens-Schönfelder and Wegler, 2006)。其原理是通过比较扰动前后的波形在时间轴上的变化，采用数值方法对当前自相关函数进行时间轴压缩或拉伸处理，使其与参考自相关函数达到最大相关系数，从而精确估算介质的相对波速变化($\delta v/v$)。我们选取5-30 s 作为计算时间延迟的尾波窗口，在-0.5%至0.5%范围内对测量波形进行100次的拉伸或压缩测试，然后计算参考波形与拉伸或压缩后的波形的互相关系数，选取互相关系数最大的 $\delta v/v$ 值作为最佳的波速变化值(图4)。然后采用逐时滑动计算介质波速的相对变化并对逐时波速的变化量进行累计计算。该方法对微弱的介质扰动具有较高的灵敏度，已广泛用于地震和火山地区的波速监测(Liu et al., 2022; Makus et al., 2023)。

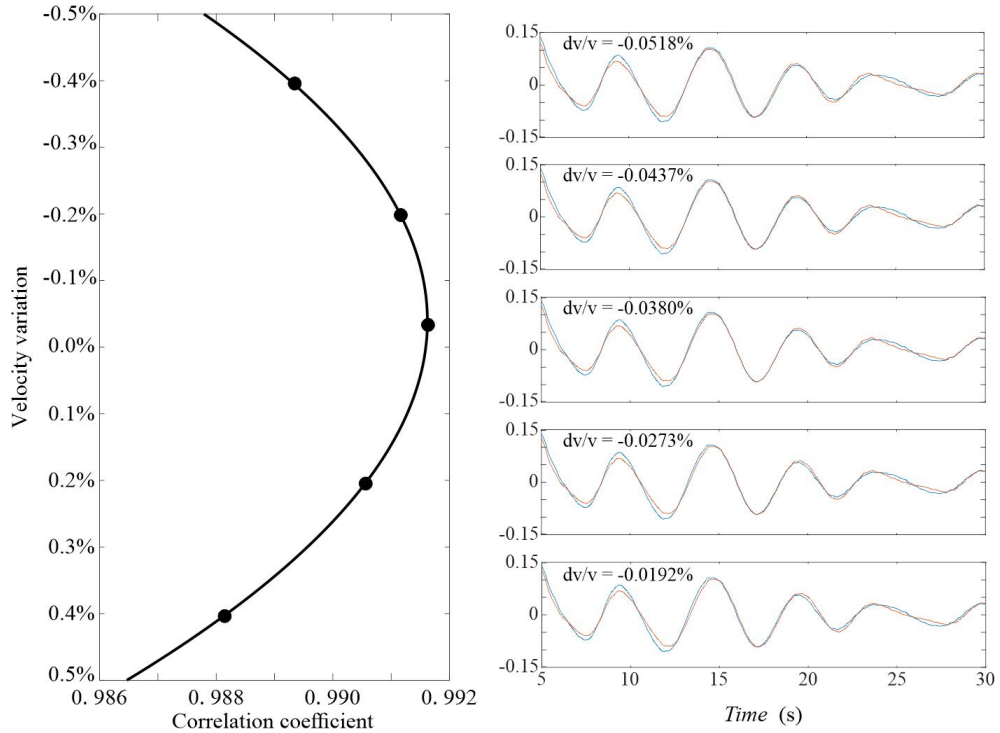


图 4 压缩拉伸法进行波速测量示例

右侧蓝色曲线为参考波形，红色曲线为不同经过不同拉伸系数处理后的波形。

Fig.4 An example of velocity measurement using compression/stretching method

The blue curves on the right panel represent the reference waveform, while the red curves show waveforms processed with different stretching coefficients.

3 结果与讨论

大地震破裂过程及其引发的强烈地面震动会对浅部地壳的地震波速结构产生显著影响(梁珊珊等, 2024)。通过多频段尾波干涉分析发现, 不同频段的尾波对介质波速变化的响应存在差异。一般来说, 低频尾波(0.1-2 Hz)主要反映更深部地壳的介质变化, 而高频(0.5-2 Hz)则对浅部的微小结构变化更为敏感。图 5 为 NGU 台不同频率范围随时间的相对波速变化, 可以看出, 所有频段都表现出震前波速下降和震后逐渐恢复的特征, 但不同频段的波速变化幅度有所不同。低频范围的自相关系数较高, 震后恢复相对较快, 而高频范围的自相关系数相对较低, 震后恢复呈现出滞后特征。这种频域差异特征可能与强震作用对地壳不同深度结构的差异化损伤作用有关。浅部地壳由于直接承受强烈的震动荷载, 更容易产生不可逆的微裂隙和塑性变形; 而深部介质则主要经历可恢复的弹性变形和黏弹性调整。

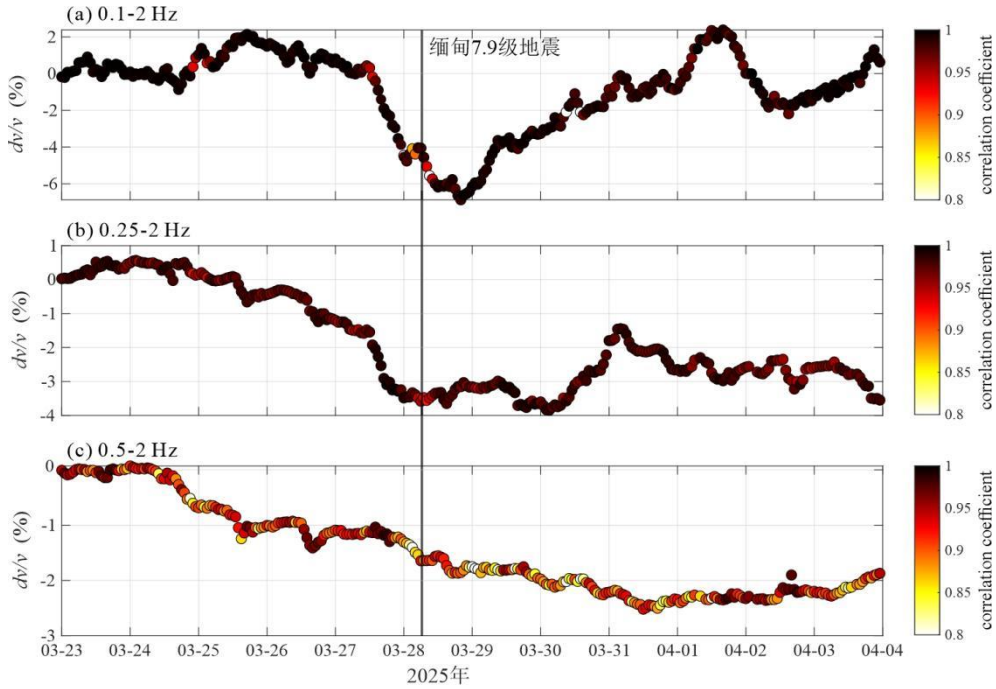


图 5 NGU 台不同频率范围随时间的相对波速变化(黑色实线为缅甸地震发震时刻)

Fig.5 Temporal variations in relative velocity changes at station NGU for different frequency bands. The black vertical line marks the origin time of the Myanmar earthquake.

单台自相关函数的稳定性对地下结构成像和介质变化监测至关重要。为了确保不同时段内单台自相关函数的稳定性, 通常采用多时段叠加自相关函数以压制短时扰动(如局部噪声、仪器瞬态干扰等)的影响。本文以 NGU 台站 0.1-2 Hz 频

段数据为例，对比分析不同滑动窗口叠加对自相关函数稳定性的影响(图 6)。可以看出，随着叠加时长的增加，自相关函数的互相关系数显著提升。为了权衡所有台站的波速测量稳定性，最终选取 5 小时时间滑动窗口进行自相关函数的叠加平均。

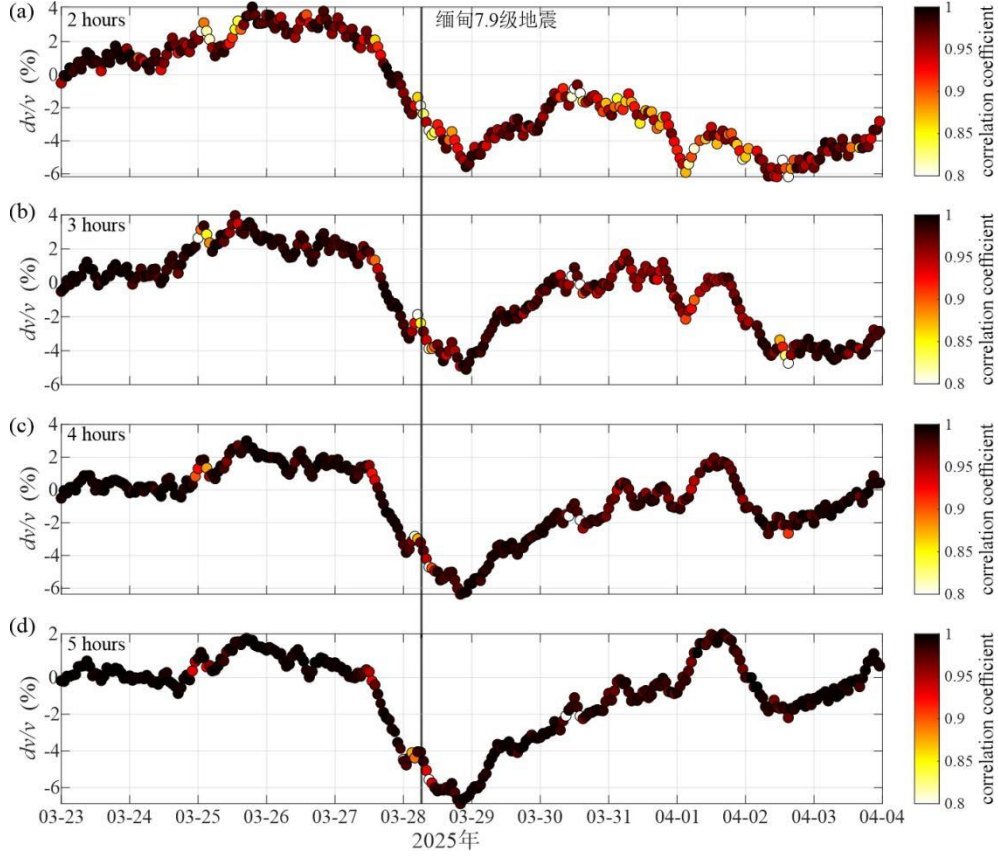


图 6 NGU 台 0.1-2 Hz 频率范围不同滑动窗口的相对波速变化(黑色实线为缅甸地震发震时刻)

Fig.6 Relative velocity changes at station NGU with different stacking time length in a frequency band of 0.1-2 Hz. The black vertical line marks the origin time of the Myanmar earthquake.

强震的同震效应会引发极其复杂的地震波形特征(肖阳等, 2024)。为了更加清晰地观测地震前后自相关函数的变化，图 7 展示了 NGU 台记录的缅甸地震前后自相关函数的变化特征。如图 7 所示，该台站记录的自相关函数在震前、同震及震后三个阶段呈现出显著差异。震前阶段，自相关函数相对比较相似。同震阶段，震相变得比较复杂，出现很多高频扰动特征。震后阶段(地震结束后 10 小时)，震相逐渐恢复平稳的状态。这种阶段性变化揭示了同震效应引发的介质动态响应过程，由震前相对稳定的初始状态，经历同震期剧烈的扰动，最终逐渐向新的平

衡状态过渡。

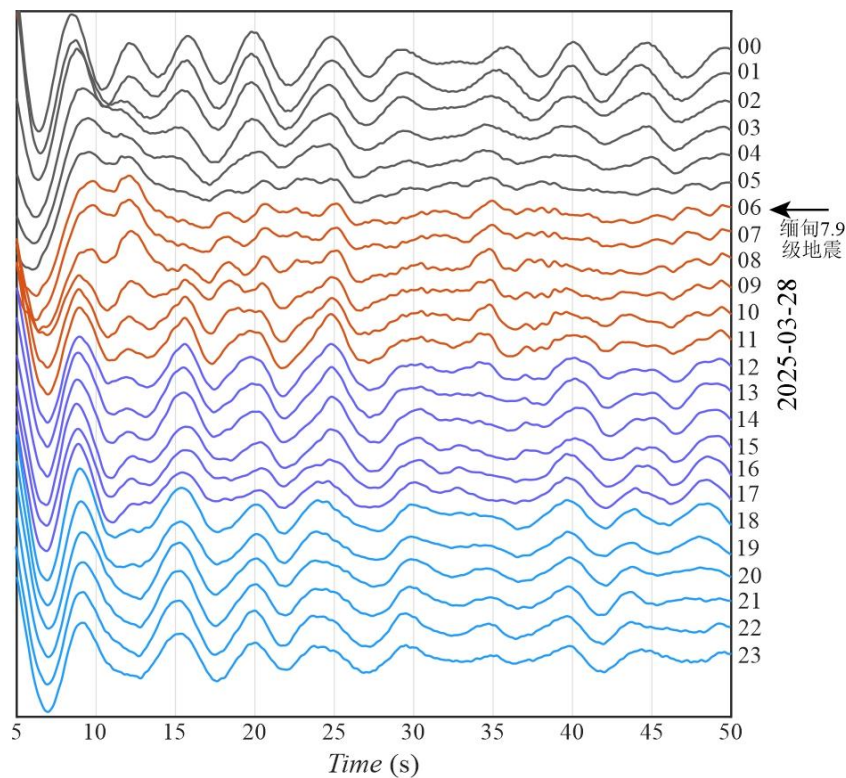


图 7 NGU 台 2025 年 3 月 28 日自相关函数变化

Fig.7 The autocorrelation function variations at NGU station on March 28, 2025

地下介质波速的动态变化特征有助于深入理解地震孕育和发生的物理机制。印度板块向欧亚板块的持续俯冲推挤,导致实皆断裂带及其周边区域应力逐渐积累,可能引发断层预滑,从而引起地壳波速的微弱变化。震前阶段,我们发现缅甸主震前约 15 小时出现显著的波速下降异常。尽管主震发生期间受一定平滑(5 小时滑动窗口)效应的影响,但 4 个台站仍能同步记录到这一系统性变化(图 8)。这种细微变化暗示着实皆大型走滑断裂震前可能存在断层预滑或介质性质改变的早期信号,强震区的地壳应力调整范围可能远超断裂带本身,影响范围可达数百公里。震前应力积累阶段,断层带附近的裂隙可能重新活化,这一过程往往伴随着地震波速的显著下降。另外,强震的孕育往往与区域的流体作用具有一定的相关性(雷建设等, 2009),流体渗入裂隙会导致岩石孔隙压力升高,进而引起地震波速降低。Niu 等(2008)在美国圣安德列斯断层开展的突破性研究,首次通过人工震源连续监测技术,在可控实验条件下观测到震前波速下降现象,为理解断层区应力积累与破裂过程提供了直接证据。此后,研究学者在不同构造环境下发现了的震前波速降低的异常现象。例如, Nimiya 等(2017)在 2016 年熊本地震前

观测到显著的波速下降，而 2008 年宫城奈利库 M 7.2 地震则观测到震前波速下降可能大于同震的情况(Takagi et al., 2012)。此外，Brenguier 等(2018b)则发现火山喷发前也存在波速降低的前兆特征。然而，由于不同构造背景下的断层性质、应力状态和流体作用存在显著差异，系统分析不同构造环境下的震前波速变化特征，仍需多学科观测数据进一步验证。

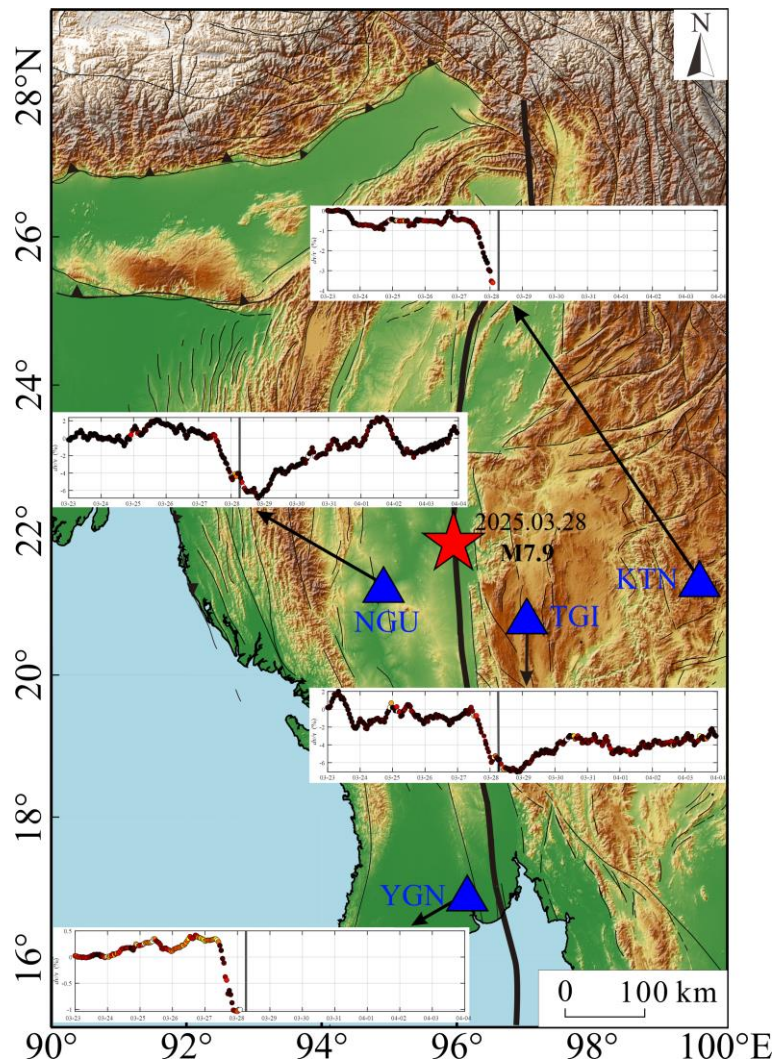


图 8 不同台站在缅甸地震前后的地震波速相对变化(0.1-2 Hz)，其中 KTN 和 YGN 台缅甸地震期间数据缺失。

Fig.8 Relative velocity changes (0.1-2 Hz) before and after the Myanmar earthquake at different stations. The data of the KTN and YGN stations were missing During the Myanmar earthquake.

同震和震后阶段的地震波速变化特征为理解断层破裂和震后调整过程提供了关键观测证据。图 8 可以看出，NGU 和 TGI 台均观测到显著的同震波速下降现象，实皆断裂带的快速错动释放长期积累的应变能，在此过程中，震源区附近

因岩石破碎和裂隙发育可能导致地震波速降低。其中 NGU 台的波速下降幅度明显大于 TGI 台。一般来说,震中距越小,同震波速变化幅度越大,随着震中距的加大,地震所造成的破坏及强地面运动也逐渐减弱。NGU 台因其更接近主震震源区,受到强地面运动的影响更为显著,导致浅部岩层结构破坏程度及应力变化更高,因此可以观测到的波速下降也比较大。国内很多地区都观测到大地震的同震波速降低现象,如 2008 年汶川地震和 2021 年漾濞地震等(刘志坤和黄金莉, 2010; 苏金波等, 2022; 安艳茹等, 2023)。一般认为,波速降低与大规模应力调整以及物质破坏裂隙增加有关(Brenguier et al., 2008a),也可能与静态应力和流体作用等因素相关(Rubinstein and Beroza, 2004)。震后阶段,这些波速异常普遍表现出随时间逐渐恢复的特征,表明实皆断裂带附近区域因同震效应产生的微裂隙,在震后应力调整作用下正逐渐愈合。NGU 台的波速恢复程度高于 TGI 台,可能与台站下方的介质自愈合能力有关。震后波速恢复过程也受地震震级、震中距以及不同频率信号(对应不同敏感深度)的影响。

4 结论

本文基于 2025 年缅甸 M 7.9 级地震震源区周边 4 个固定地震台站的连续观测数据,采用单台自相关方法分析了此次强震事件引起的地下介质波速动态演化过程。结果表明,不同频段的地震波速变化均表现出震前波速下降和震后逐渐恢复的特征,但不同频段的波速变化幅度与强震作用对地壳不同深度结构的差异化损伤作用有关。缅甸主震发生前约 15 小时,所有台站均观测到显著的波速下降异常,这一异常信号反映了实皆大型走滑断裂带在临震阶段可能出现的断层预滑活动或介质物理性质的渐进性改变。缅甸同震阶段,自相关函数的震相变得比较复杂,震中距较小的台站,同震波速变化幅度较大,表明越接近主震震源区,受到强地面运动的影响越显著。震后表现出随时间逐渐恢复的特征,可能与台站下方的介质自愈合能力有关。本研究为理解大型走滑断裂的孕震机制、破裂过程及震后介质愈合行为提供了新的观测证据。

References

- An, Y. R., Wang, W. T., Yang W., et al., 2023. Using Ambient Noise to Study the Co-seismic and Post-seismic Velocity Changes of the 2021 Yangbi Ms6.4 Earthquake in Yunnan. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese with English abstract)*, 66(8): 3185-3201.

- 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](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03374.x).
- Bertrand, G., Rangin, C., Maluski, H., et al., 2001. Diachronous Cooling Along the Mogok Metamorphic Belt (Shan scarp, Myanmar): The Trace of the Northward Migration of the Indian Syntaxis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 19(5): 649-659, doi: [10.1016/S1367-9120\(00\)00061-4](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(00)00061-4).
- Brenguier, F., Campillo, M., Hadziioannou, C., et al., 2008a. Postseismic Relaxation Along the San Andreas Fault at Parkfield from Continuous Seismological Observations. *Science*, 321(5895): 1478-1481, doi: [10.1126/science.1160943](https://doi.org/10.1126/science.1160943).
- Brenguier, F., Shapiro, N. M., Campillo, M., et al., 2008b. Towards Forecasting Volcanic Eruptions Using Seismic Noise. *Nature Geoscience*, 1(2): 126-130, doi: [10.1038/ngeo104](https://doi.org/10.1038/ngeo104).
- Delouche, E., Stehly, L., 2023. Seasonal Seismic Velocity Variations Measured Using Seismic Noise Autocorrelations to Monitor the Dynamic of Aquifers in Greece. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128(12): e2023JB026759, doi: [10.1029/2023JB026759](https://doi.org/10.1029/2023JB026759).
- 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. *Geophysical Journal International*, 205(2): 1053-1073, doi: [10.1093/gji/ggw066](https://doi.org/10.1093/gji/ggw066).
- Hurukawa, N., Maung, P. M., 2011. Two Seismic Gaps on the Sagaing Fault, Myanmar, Derived from Relocation of Historical Earthquakes Since 1918. *Geophysical Research Letters*, 38(1): L01310, doi: [10.1029/2010GL046099](https://doi.org/10.1029/2010GL046099).
- Kumar, A., Sanoujam, M., Sunil, L., et al., 2011. Active Deformations at the Churachandpur Mao Fault (CMF) in Indo Burma Ranges: Multidisciplinary Evidences. *International Journal of Geosciences*, 2(4), 597–609, doi: [10.4236/ijg.2011.24062](https://doi.org/10.4236/ijg.2011.24062).
- Li, C., Van der Hilst, R. D., Meltzer, A. S., 2008. Subduction of the Indian Lithosphere Beneath the Tibetan Plateau and Burma. *Earth and Planetary Science Letters*, 274(1), 157–168, doi: [10.1016/j.epsl.2008.07.016](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.07.016).
- Lei, J. S., Zhao, D. P., Su, J. R., et al., 2009. Fine seismic structure under the Longmenshan fault zone and the mechanism of the large Wenchuan earthquake. *Chinese Journal of Geophysics*(in

- Chinese with English abstract), 52(2):339-345.
- Liang, S. S., Xu, Z., Huang, X., et al, 2024. Regional Seismogenic Environment Revealed by the 3D Crustal Velocity Structure and Focal Mechanism of Moderate and Strong Earthquakes in Jiashi Area, Xinjiang, China. *Earth Science(in Chinese with English abstract)*, 49(2):451-468.
- Liu, Z. K., Huang, J. L., 2010. Temporal Changes of Seismic Velocity Around the Wenchuan Earthquake Fault Zone from Ambient Seismic Noise Correlation. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese with English abstract)*, 53(4): 853-863, doi: [10.3969/j.issn.0001-5733.2010.04.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.0001-5733.2010.04.010).
- Liu, Z. Q., Liang, C. T., Huang, H. X., et al., 2022. Seismic velocity Variations at Different Depths Reveal the Dynamic Evolution Associated with the 2018 Kilauea Eruption. *Geophysical Research Letters*, 49(3): e2021GL093691, doi: [10.1029/2021GL093691](https://doi.org/10.1029/2021GL093691).
- Lü, Z. Q., Lei, J. S., 2016. 3-D S-wave Velocity Structure Around the 2015 M_s8.1 Nepal Earthquake Source Areas and Strong Earthquake Mechanism. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese with English abstract)*, 59(12): 4529-4543.
- Makus, P., Sens-Schönfelder, C., Illien, L., et al., 2023. Deciphering the Whisper of Volcanoes: Monitoring Velocity Changes at Kamchatka's Klyuchevskoy Group With Fluctuating Noise Fields. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128(4), e2022JB025738, doi: [10.1029/2022JB025738](https://doi.org/10.1029/2022JB025738).
- Mao, S. J., Mordret, A., Campillo, M., et al., 2020. On the Measurement of Seismic Traveltime Changes in the Time–frequency Domain with Wavelet Cross-spectrum Analysis. *Geophysical Journal International*, 221, 550–568, doi: [10.1093/gji/ggz495](https://doi.org/10.1093/gji/ggz495).
- Mikesell, T. D., Malcolm, A. E., Yang, D., et al., 2015. A Comparison of Methods to Estimate Seismic Phase Delays: Numerical Examples for Coda Wave Interferometry. *Geophysical Journal International*, 202(1), 347–360, doi: [10.1093/gji/ggv138](https://doi.org/10.1093/gji/ggv138).
- Maurin, T., Masson, F., Rangin, C., et al., 2010. First Global Positioning System Results in Northern Myanmar: Constant and Localized Slip Rate Along the Sagaing Fault, *Geology*, 38(7), 591–594. doi: [10.1130/G30872.1](https://doi.org/10.1130/G30872.1).
- Nimiya, H., Ikeda, T., Tsuji, T., 2017. Spatial and Temporal Seismic Velocity Changes on Kyushu Island During the 2016 Kumamoto Earthquake. *Science Advances*, 3(11): e1700813, doi: [10.1126/sciadv.1700813](https://doi.org/10.1126/sciadv.1700813).

- 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. *Nature*, 454(7201): 204-208, doi: [10.1038/nature07111](https://doi.org/10.1038/nature07111).
- Ratdomopurbo, A., Poupinet, G., 1995. Monitoring a Temporal Change of Seismic Velocity in a Volcano: Application to the 1992 Eruption of Mt. Merapi (Indonesia). *Geophysical Research Letters*, 22(7): 775-778, doi: [10.1029/95GL00302](https://doi.org/10.1029/95GL00302).
- Rubinstein, J. L., Beroza, G. C., 2004. Evidence for Widespread Nonlinear Strong Ground Motion in the M_w 6.9 Loma Prieta Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94 (5): 1595–1608. doi: [10.1785/012004009](https://doi.org/10.1785/012004009).
- Sens-Schönfelder, C., Wegler, U., 2006. Passive Image Interferometry and Seasonal Variations of Seismic Velocities at Merapi Volcano, Indonesia. *Geophysical Research Letters*, 33: L21302. doi: [10.1029/2006GL027797](https://doi.org/10.1029/2006GL027797).
- Searle, M. P., Noble, S. R., Cottle, J. M., et al., 2007. Tectonic Evolution of the Mogok Metamorphic Belt, Burma (Myanmar) Constrained by U-Th-Pb Dating of Metamorphic and Magmatic Rocks. *Tectonics*, 26, TC3014. doi: [10.1029/2006TC002083](https://doi.org/10.1029/2006TC002083).
- Silver, P. G., Daley, T. M., Niu, F. L., et al., 2007. Active Source Monitoring of Cross-Well Seismic Travel Time for Stress-Induced Changes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(1B): 281-293, doi: [10.1785/0120060120](https://doi.org/10.1785/0120060120).
- Su, J. B., Yang, W., Li, X. B., et al., 2022. Co-seismic Velocity Changes with Yunnan Yangbi $M_{s6.4}$ Earthquake Measured by Airgun Source. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese with English abstract)*, 65(2): 649-662.
- 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. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117, B06315. doi: [10.1029/2012JB009252](https://doi.org/10.1029/2012JB009252).
- Vigny, C., Socquet, A., Rangin, C., et al., 2003. Present-day Crustal Deformation Around Sagaing Fault, Myanmar. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B11), 2533, doi: [10.1029/2002JB001999](https://doi.org/10.1029/2002JB001999).
- Wang, Y., Sieh, K., Tun, S. T., et al., 2014. Active Tectonics and Earthquake Potential of the Myanmar region. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119, 3767–3822, doi: [10.1002/2013JB010762](https://doi.org/10.1002/2013JB010762).

- Xiao, Y., Shan, B., Liu, C., et al., 2024. Stress Triggering and Seismic Hazard Assessment of the 2022 Lushan MS6.1 Earthquake. *Earth Science(in Chinese with English abstract)*, 49(8):2979-2991.
- Xiong, X., Shan, B., Zhou, Y. M., et al., 2017. Coulomb Stress Transfer and Accumulation on the Sagaing Fault, Myanmar, Over the Past 110 Years and its Implications for Seismic Hazard. *Geophysical Research Letters*, 44(10), 4781–4789, doi: [10.1002/2017GL072770](https://doi.org/10.1002/2017GL072770).
- Yan, J., Zhang, L. S., Hong, H. T., et al., 2023. Application of Ambient Noise and Dense Seismic Array Imaging Techniques in Goaf Detection Beneath Coal Mines at Haerwusu. *CT Theory and Applications*, 32(4): 461-470, doi: 10.15953/j.ctta.2023.023.
- Zhang, H., Lei, J. S., Song, X. Y., et al., 2025. Direct Surface-wave Tomography from Ambient Noise in the Shanxi Rift Zone and Adjacent Area. *Computerized Tomography Theory and Application(in Chinese with English abstract)*, 34(2):175-189.

附中文参考文献

- 安艳茹, 王伟涛, 杨微, 等, 2023. 利用背景噪声研究2021年云南漾濞M_S 6.4地震同震及震后波速变化. *地球物理学报*, 66(8):3185-3201.
- 梁珊珊, 徐志国, 黄小宁, 等, 2024. 新疆伽师地区地壳三维速度结构及中强震震源机制揭示的区域孕震环境. *地球科学*, 49(2):451-468.
- 雷建设, 赵大鹏, 苏金蓉, 等, 2009. 龙门山断裂带地壳精细结构与汶川地震发震机理. *地球物理学报*, 52(2):339-345.
- 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. *地球物理学报*, 53(4):853-863.
- 吕子强, 雷建设, 2016. 2015年尼泊尔M_S8.1地震震源区S波三维速度结构与强震发生机理研究. *地球物理学报*, 59(12):4529-4543.
- 苏金波, 杨微, 李孝宾, 等, 2022. 基于气枪震源信号的云南漾濞M_S6.4地震前后波速变化. *地球物理学报*, 65(2):649-662.
- 肖阳, 单斌, 刘成利, 等, 2024. 2022年芦山MS6.1 地震应力触发及地震危险性分析. *地球科学*, 49(8):2979-2991.
- 颜杰, 张立树, 洪鹤庭, 等. 2023. 背景噪声和密集台阵成像技术在哈尔乌素露天煤矿采空区的应用. *CT理论与应用研究(中英文)*, 32(4):461-470.
- 张浩, 雷建设, 宋晓燕, 等, 2025. 山西断陷带及其邻区背景噪声面波直接反演成像. *CT 理*

论与应用研究. CT 理论与应用研究(中英文), 34(2):175-189.