

沈琳, 赵连锋, 谢小碧等. 2023. 2021 年 5 月 21 日青海玛多 M_w 7.4 地震及余震序列应力降时空分布与孕震环境. 地球物理学报, 66(10):4111-4131, doi:10.6038/cjg2022Q0914.

Shen L, Zhao L F, Xie X B, et al. 2023. Spatial-temporal evolution of stress drops in the 21 May 2021 M_w 7.4 Madoi earthquake sequence and its seismogenic environment. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 66(10):4111-4131, doi:10.6038/cjg2022Q0914.

2021 年 5 月 21 日青海玛多 M_w 7.4 地震及 余震序列应力降时空分布与孕震环境

沈琳^{1,2}, 赵连锋^{1,3*}, 谢小碧⁴, 何熹¹, 姚振兴¹

1 中国科学院地质与地球物理研究所地球与行星物理重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国科学院地质与地球物理研究所黑龙江漠河地球物理国家野外科学观测研究站, 黑龙江漠河 165099

4 美国加州大学圣克鲁兹分校地球物理与行星物理研究所, 美国圣克鲁兹, CA 95064

摘要 2021 年 5 月 21 日发生在青藏高原巴颜喀拉块体内部的玛多 M_w 7.4 地震是继 2008 年 M_w 7.9 汶川地震之后在中国陆区发生的最大地震. 由于玛多地震发生在板块内部滑移速率较缓慢的次级断裂上, 该地震成为研究巴颜喀拉块体内部地震危险性的典型震例. 通过计算 2021 年玛多地震序列中震级大于 2.5 的地震应力降, 我们调查了该地震序列应力释放的时空演化规律. 首先, 利用已有的青藏高原及其周边地区宽频带 Lg 波衰减模型, 对玛多地震序列产生的地震 Lg 波观测数据进行了传播路径衰减校正, 获得 119 个地震事件的 Lg 波震源谱; 然后, 通过将理论震源函数与观测数据拟合, 获得对 Lg 波标量地震矩、拐角频率和高频下降率的估计; 最后, 根据标量地震矩和拐角频率计算了 2021 年玛多地震序列的应力降. 结果表明, 2021 年 5 月 21 日玛多地震主震应力降为 22 MPa, 余震序列的应力降分布范围为 0.08~7.5 MPa、中位数为 0.39 MPa, 平均值为 0.88 MPa. 应力降与震级具有较强的正相关关系, 说明该地区的地震活动可能并不遵从地震自相似理论. 换言之, 大小地震具有不同的破裂动力学性质. 玛多地震序列应力降变化反映了断层面上的应力释放过程具有强烈的非均质性. 主震发生之后余震应力降显著降低, 但其间仍夹杂着少数具有较高应力降的事件. 这些高应力降事件所在区域与主震后破裂面上的闭锁和应力集中区域相对应.

关键词 2021 年玛多地震序列; Lg 波; 震源函数; 应力降; 衰减

doi:10.6038/cjg2022Q0914

中图分类号 P315

收稿日期 2022-11-15, 2023-06-10 收修定稿

Spatial-temporal evolution of stress drops in the 21 May 2021 M_w 7.4 Madoi earthquake sequence and its seismogenic environment

SHEN Lin^{1,2}, ZHAO LianFeng^{1,3*}, XIE XiaoBi⁴, HE Xi¹, YAO ZhenXing¹

1 Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2 College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Heilongjiang Mohe Observatory of Geophysics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Mohe Heilongjiang 165099, China

4 Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California at Santa Cruz, CA 95064, USA

Abstract The M_w 7.4 Madoi earthquake, which occurred inside the Bayan Har block on the

基金项目 国家自然科学基金(U2139206, 42104055, 41974061, 41974054)和中国地震科学实验场(2019CSES0103)联合资助.

第一作者简介 沈琳, 女, 1994 年生, 博士研究生, 主要研究方向为地震学. E-mail: shenlin@mail.iggcas.ac.cn

*** 通讯作者** 赵连锋, 男, 1972 年生, 研究员, 主要研究方向为地震学. E-mail: zhaolf@mail.iggcas.ac.cn

eastern edge of the Tibetan Plateau on May 21, 2021, is the largest earthquake in the Chinese continent since the 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake. The 2021 Madoi earthquake sequence, located on a secondary fault inside the block with a slow slip rate, provides us an opportunity to understand the seismic risk for the Bayan Har block. By estimating the stress drops of the 2021 Madoi earthquake sequence for events with magnitudes larger than 2.5, we investigated the temporal and spatial evolution of the stress release of the earthquake sequence. We first used an established high-resolution broadband Lg-wave attenuation model for the Tibetan Plateau and its surrounding areas to correct the attenuation effect during wave propagation and obtained the Lg-wave source excitation spectra for 119 earthquakes in the 2021 Madoi earthquake sequence. Then, we modeled the seismic moment, corner frequency, and high-frequency fall-off rate by fitting the theoretical and observed source spectra, and finally estimated the stress drops. Our results show that the stress drop of the mainshock is about 22 MPa, and the range, median and average values of the stress drop of the aftershock sequence are 0.08~7.5 MPa, 0.39 MPa, and 0.88 MPa, respectively. A strong positive dependence between the stress drops and the magnitudes was observed, indicating the earthquakes in this area may not follow the earthquake self-similarity theory. In other words, large and small earthquakes have different rupture dynamics. The spatial and temporal variations of stress drops reflect strong heterogeneity and a complex stress release process on the fault plane. Though the stress drops of these aftershocks decrease rapidly after the mainshock, there are several aftershocks with relatively high stress drops. The regions with high stress drop indicate the area of stress concentration on the fault plane after the mainshock.

Keywords 2021 Madoi earthquake sequence; Lg-wave; Source excitation spectrum; Stress drop; Attenuation

0 引言

迄今约 50 Ma 开始,印度板块向欧亚板块俯冲碰撞,青藏高原地壳因受到不断挤压而缩短和增厚,同时伴随着中部大规模断层滑移和东西向高原物质运动(Tapponnier et al., 2001; Li et al., 2015).巴颜喀拉块体位于青藏高原中北部,是青藏高原地震最活跃的区域之一,也是现今中国内陆构造最为活跃的块体之一(张培震等, 2003).巴颜喀拉块体北部和南部分别以昆仑和甘孜—玉树—鲜水河大型走滑断裂带为边界,西部以阿尔金断裂带为界,东部边缘以大型逆冲的龙门山断裂带与四川盆地相碰撞(图 1a)(Yin and Harrison, 2000).地球物理观测资料表明,该地区中下地壳具有低速、强衰减和高电导率特征,因此被认为是印度—欧亚碰撞带地壳物质向外挤出的通道(Zhao et al., 2013; Bao et al., 2015; 詹艳等, 2022; Yang et al., 2022; Zhang et al., 2022a).近几十年来,巴颜喀拉块体周边断裂带中发育有大量的中强地震,例如,2001 年 11 月 14 日的可可西里 M_w 7.8 地震(Tocheport et al., 2006),2010 年 4

月 14 日玉树 M_w 6.9 地震(倪四道等, 2010),以及 2014 年 2 月 12 日的于田 M_w 6.9 地震(张广伟等, 2014).然而,在巴颜喀拉块体内部发生较大地震非常罕见.2021 年 5 月 21 日 18 时 04 分(世界标准时间)在青海省果洛州玛多县(34.59°N , 98.34°E)发生了一次较强地震,据中国地震台网正式测定此次地震震级为 M_w 7.4,震源深度为 17 km(<https://news.ceic.ac.cn/CC20210522020411.html>).这次地震是继 1947 年 3 月 17 日 M 7.7 达里地震以来巴颜喀拉块体内部最大的一次地震,也是 2008 年 5 月 12 日汶川 M_w 7.9 地震以来中国大陆内发生的震级最大的地震(梁明剑等, 2014).该地震引发了大量余震,从主震发生至 2021 年 5 月 30 日,共记录到 2979 次余震(王未来等, 2021).

野外地质观测、地震重定位和大地测量结果表明,2021 年 5 月 21 日玛多地震序列主要发生在玛多—甘德断裂与达日断裂之间一条近东西走向的昆仑山口—江错断裂带,距离东昆仑断裂带约 85 km(图 1b)(王未来等, 2021; He et al., 2021a; Pan et al., 2022).根据震源破裂过程、同震位移场和震源机制等研究,玛多地震破裂面长度超过 150 km,同

震滑移峰值约为 2~6 m,主震位于破裂面中部,是典型的左旋双侧走滑型破裂(Jin and Fialko, 2021; Chen et al., 2022; Hong et al., 2022; Liu et al., 2022; Ren et al., 2022; Wang et al., 2022). 余震沿北西西方向分布,走向约为 285° ,余震区两端均出现条带状分叉特征,可能与地震触发的分支断裂活动有关(王未来等, 2021; He et al., 2021a; Liu et al., 2021). 地震学和大地测量资料联合反演结果证实了玛多 $M_w7.4$ 地震为一次超剪切破裂事件,其中东部破裂速度大于西部破裂速度(Yue et al., 2022; Zhang et al., 2022c). 主震及余震序列的震源深度主要集中在 5~15 km,大地电磁测深剖面揭示该地震序列主要分布在中下地壳高电导率韧性层向上地壳低电导率脆性层过渡的层位(詹艳等, 2022). 根据震间 GPS 资料,2021 年玛多地震的震源区域滑动速率较为缓慢,约为 $1.2\sim 1.7\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ (Guo et al., 2021; Zhu et al., 2021). 然而,巴颜喀拉块体北部边界的东昆仑断裂带滑动速率高于其内部滑动速率,由西到东从 $10\sim 12\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 降低到 $2\sim 8\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$,表明块体内部的多条次级断裂吸收了部分内部变形(Ren et al., 2021). 2021 年玛多地震的发生证实了大地震在滑动率非常低的断层上发生是可能的(王迪晋等, 2022; Yue et al., 2022). 该地震的发生为我们研究大型板块内地震的破裂几何形状、破裂动力学和变形过程以及相关区域构造提供了契机(Pan et al., 2022; Ren et al., 2022). 研究玛多地震主震及余震序列应力释放的规律能够揭示断层的应力状态,为了解青藏高原东向扩展、地震危险性和孕震环境提供约束.

应力降表示地震前后断层面上的平均应力之差,是衡量地震破裂过程中断层应力释放大小的一个重要震源物理参数(Abercrombie, 1995; Shearer et al., 2006). 计算和分析一个地震序列应力降的时空变化有助于我们认识震源物理过程和强地面运动预测. 对于一些中小地震,确定破裂面积难度较大,因此许多研究倾向于利用观测振幅谱的地震矩和拐角频率来估计应力降的大小(Ide et al., 2003; Mayeda et al., 2007; Abercrombie et al., 2021; Ji et al., 2022). 这种计算方法需要从波形数据中去除传播过程中衰减和几何扩散的影响以及台站下方的场地效应等,从而准确地分离出震源频谱以用于应力降测量(刘杰等, 2003; Allmann and Shearer, 2007; Shearer et al., 2019). 最常用的计算方法是利用目标地震邻近的小震或是多个地震的叠加作为

格林函数来间接消除路径上的衰减和台基响应(Abercrombie, 2014; Shearer et al., 2022). 然而,小震通常具有较多的高频成分,而目标地震往往因震级较大而含有丰富的低频成分,因此很难在较宽的频带上利用小震作为格林函数对频率相关的路径衰减进行有效校正(He et al., 2020). 反之,如果能够获取研究区内的宽频带衰减模型,便可直接进行路径上的衰减校正,从而获得震源谱函数的估计,这种作法已经成功应用于地下核试验的爆炸当量估计(Nuttli, 1973; Zhao et al., 2008; 谢小碧和赵连锋, 2018; He et al., 2018).

作为大陆路径上最显著的区域震相之一,Lg 波可被视为在地壳内传播的 S 波经超临界反射形成的导波或是高阶面波的叠加(Campillo et al., 1985; Kennett, 1989; Phillips et al., 2000; Fan and Lay, 2002). 由于对震源辐射花样不敏感,Lg 波常被用于震级测量、核爆监测和震源函数估计等研究(Ottmöller, 2002; Ottmöller and Havskov, 2003; Zhao et al., 2008; He et al., 2020; Sarkar et al., 2021; He et al., 2023). Zhao 等(2013)建立了青藏高原及周边地区的宽频带 Lg 波衰减模型. 以此为基础,我们对 2021 年玛多地震主震及部分余震进行了路径衰减校正,获得了它们的震源频谱,进而计算了它们的标量地震矩 M_0 和拐角频率 f_c ,并由此得到它们的应力降 $\Delta\sigma$.

1 数据与方法

我们使用王未来等(2021)利用双差定位方法获得的 2021 年青海玛多 $M_w7.4$ 地震序列精定位目录,从中选取了震级范围在 2.5~7.4 之间包括主震在内的 119 个地震事件,在震中距 200~1000 km 范围内选取了 232 个地震台站,从而获取区域 Lg 波垂直分量记录. 这些波形数据从中国地震学数据中心和国家测震台网数据备份中心收集. 图 1a 显示了地震台站位置. 我们对原始波形进行了去均值,去趋势和去仪器响应,利用 Zhao 等(2013)的方法进行波形数据预处理.

作为一个例子,图 2 显示了 2021 年 5 月 22 日 9 时 39 分一个 $M4.6$ 余震在不同方位角和震中距所接收到的 Lg 波波形. 通常,Lg 波在稳定大陆区域内以 $3.6\sim 3.0\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的群速度传播(Fan and Lay, 2002; Ottmöller, 2002). 但由于地壳厚度和地震波传播速度的差别,Lg 波群速度存在一定地区差异

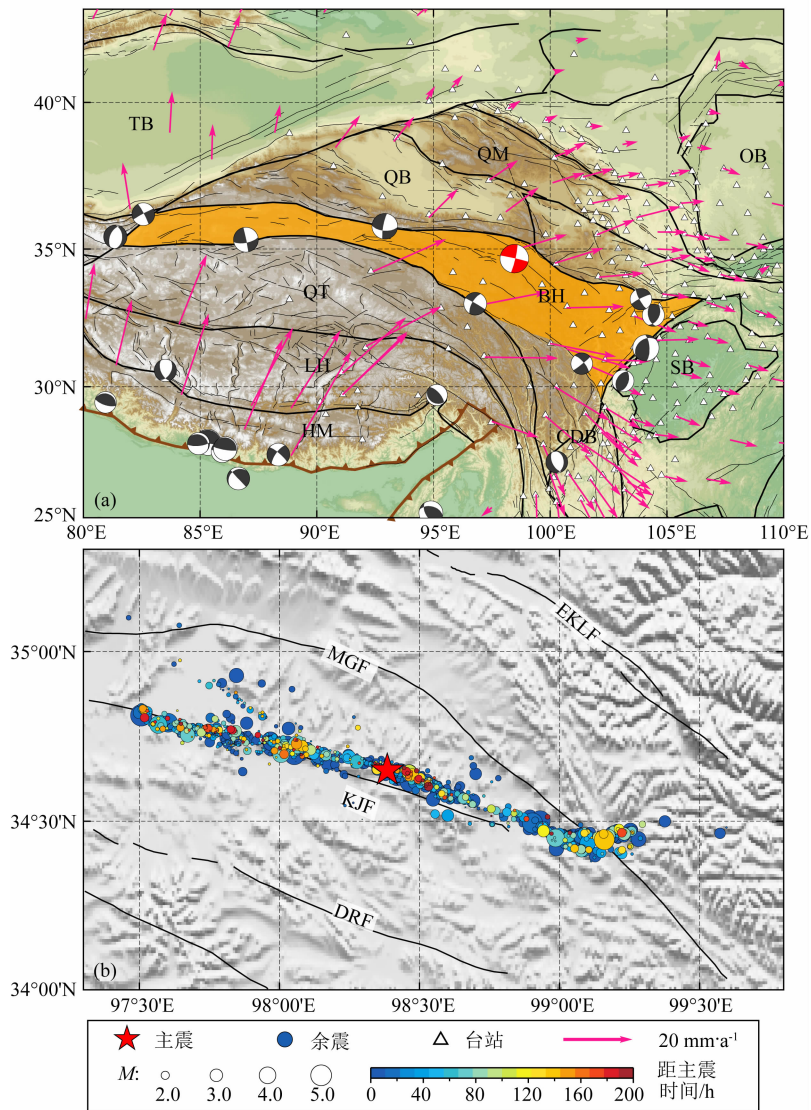


图 1 玛多地震序列及区域地质构造

(a) 青藏高原巴颜喀拉块体(橙色)和主要板块边界(黑色粗线)、断层带(黑色细线)、俯冲带(带三角线段)、地震台站(白色三角)和大于 6.5 级地震的震源机制解(黑白震源球)(<https://www.globalcmt.org/>), 2021 年 5 月 21 日玛多 $M_w7.4$ 地震震源机制解(红白震源球)以及以欧亚大陆为参考的 GPS 速率分布(玫瑰红色箭头)(Kreemer et al., 2014); 以及(b) 2021 年 5 月 21 日玛多 $M_w7.4$ 地震及余震序列分布, 其中主震用五角星表示, 余震用圆圈表示, 余震距主震的间隔时间由填充颜色表示, 圆圈大小表示震级大小。地震目录和重定位数据来自王未来等(2021)。图中的缩写分别为, BH, 巴颜喀拉块体; CDB, 川滇块体; DRF, 达日断裂; EKLf, 东昆仑断裂带; HM, 喜马拉雅块体; KJF, 昆仑山口—江错断裂; LH, 拉萨块体; MGF, 玛多—甘德断裂; OB, 鄂尔多斯盆地; QB, 柴达木盆地; QM, 祁连山脉; QT, 羌唐块体; SB, 四川盆地; TB, 塔里木盆地。

Fig. 1 Maps showing the distribution of the Madoi earthquake sequence and regional geology

(a) Bayan Har block (orange) in the Tibetan Plateau, with major block boundaries (thick black lines), fault systems (thin black lines), and subduction zones (line with triangles), the distribution of stations used in this study, the focal mechanisms of magnitudes larger than 6.5 earthquakes (<https://www.globalcmt.org/>), the GPS velocities relative to the Eurasia block (pink arrows) (Kreemer et al., 2014). (b) The locations of the 2021 $M_w7.4$ Madoi main shock (red star) and its aftershocks (circles). The size and color of the circles denote their magnitudes and times since the mainshock, respectively. The earthquake catalog and relocation data were based on Wang et al. (2021). The abbreviations are BH, Bayan Har Block; CDB, Chuandian Block; DRF, Dari Fault; EKLf, Kunlun fault; HM, Himalaya Block; KJF, Kunlunshankou—Jiangcuo Fault; LH, Lhasa Block; MGF, Madoi—Gande Fault; OB, Ordos Basin; QB, Qaidam Basin; QM, Qilian Mountain; QT, Qiangtang Block; SB, Sichuan Basin; TB, Tarim Basin, respectively.

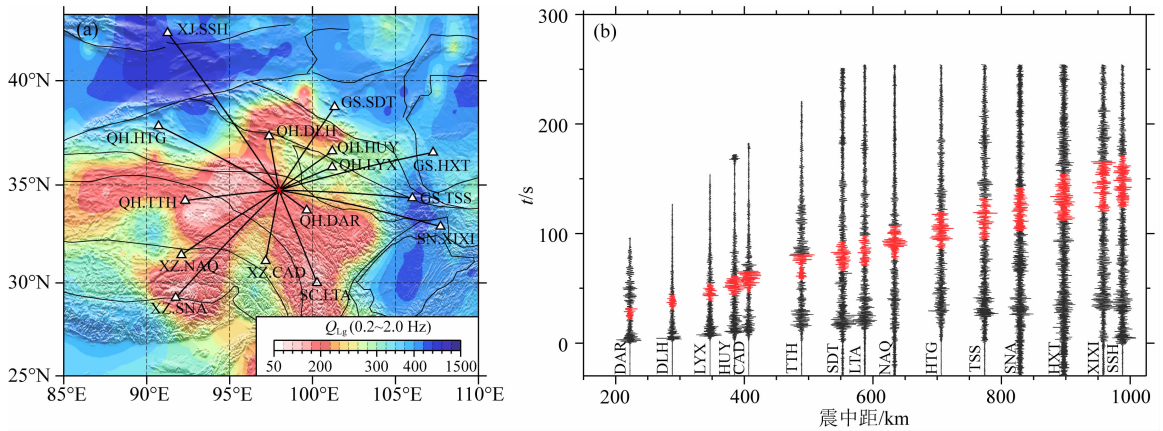


图2 青藏高原东部区域地壳 Lg 波 Q 值分布、2021 年 5 月 22 日 9 时 39 分 $M_w 4.6$ 地震事件位置(红色五角星)和地震台站位置(白色三角形)(a)和区域地震图(b)

其中波形为归一化的垂直分量地面速度记录.地震波形滤波频带范围为 $0.5 \sim 5.0$ Hz,按震中距排列,

以 P 波初动到时在零时刻对齐,台站名称标于波形下方,其是 Lg 波波形用橙红色显示.

Fig. 2 Map showing the crustal Lg-wave attenuation in the eastern part of the Tibetan Plateau and the locations of the earthquake with magnitude of 4.6 that occurred at 9:39 on May 22, 2021 (red star) and of stations (white triangles) (a), and regional seismograms (b)

All seismograms are normalized vertical-component velocity recordings filtered between 0.5 and 5.0 Hz. The recordings are ordered by their epicentral distances and aligned according to the first P-wave arrival time. Also labeled are the station names near the waveforms, in which the Lg waves were highlighted (red).

(赵连锋等, 2022). 例如, Pasyanos 等(2009)利用经 $0.5 \sim 5.0$ Hz 带通滤波的 Lg 波震相发现伊朗南部和阿拉伯板块中部的 Lg 波群速度分别为 3.4 和 $3.5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Sarkar 等(2021)对每条波形上的 Lg 波相应群速度窗口进行可视化检查后提取所选窗口.我们采用给定 $0.6 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的群速度窗长,同时在 $3.7 \sim 2.9 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 群速度范围内扫描经 $0.5 \sim 5.0$ Hz 带通滤波的地震图,并将获得最大能量的窗口作为实际 Lg 波采样窗(Zhang et al., 2022b).与此同时,采用与 Lg 波等时间长度的采样窗截取 P 波前噪声和 Lg 波前噪声序列,再在其两端增加窗长度的 10% 用于余弦镶边消减.对信号和噪声分别进行傅里叶变换,求取 Lg 波和两种噪声的振幅谱,计算 $0.05 \sim 10.0$ Hz 之间对数域内等间隔的 58 个频率上的 Lg 波振幅谱值、事件前噪声和 Lg 震相前噪声谱值,以及 Lg 信号对两种噪声的信噪比.为了确保获得高质量的数据,避免受到 Sn 尾波的干扰,我们选取 Lg 信号对事件前噪声的信噪比大于 2.0、对震相前噪声的信噪比大于 1.0 的 Lg 波频谱,用于震源函数反演(Furumura et al., 2014; He et al., 2021b).其中,假设地震记录是有效信号与噪声的叠加,且噪声在一定时段内为与信号不相关的平稳随机过程,并由此对 Lg 波信号中事件前噪声的影响进行去噪处理,建立 Lg 波 Q 值成像的振幅谱数据

集(Ringdal et al., 1992; Schlittenhardt, 2001).详细的数据预处理流程如图 3 所示.

在频率域中,由台站 j 记录到的事件 k 的振幅可表示为(Xie and Mitchell, 1990)

$$A_{kj} = S_k G_{kj} \Gamma_{kj} P_j r_{kj}, \quad (1)$$

其中 S_k 是震源频谱, $G_{kj} = (\Delta_0 \Delta_{kj})^{-1/2}$ 为几何扩散因子,其中 Δ_0 是参考震中距,通常设定为 100 km , Δ_{kj} 是事件 k 与台站 j 之间的距离(Street et al., 1975). P_j 是场地效应, r_{kj} 是 Lg 波传播过程中的随机效应,通常可忽略,即 $r_{kj} = 1$. Γ_{kj} 是传播路径上的衰减因子,可表示为

$$\Gamma_{kj} = \exp \left[-\frac{\pi f}{V} \int_k^j \frac{ds}{Q(x, y, f)} \right], \quad (2)$$

其中 $\int_k^j ds$ 是事件 k 到台站 j 之间路径的积分, V 是 Lg 波的群速度, $Q(x, y, f)$ 可从已建立的高分辨率宽频带 Lg 波 Q 模型获得(Zhao et al., 2013; Ma et al., 2023),是频率与地表位置 (x, y) 的函数.为了对震源项进行传播路径上进行衰减补偿,我们依据扰动理论对方程(1)两边同时取对数可得

$$\ln A_{kj} = \ln S_k + \ln G_{kj} - \frac{\pi f}{V} \cdot \int_k^j \frac{ds}{Q(x, y, f)} + \ln P_j. \quad (3)$$

令

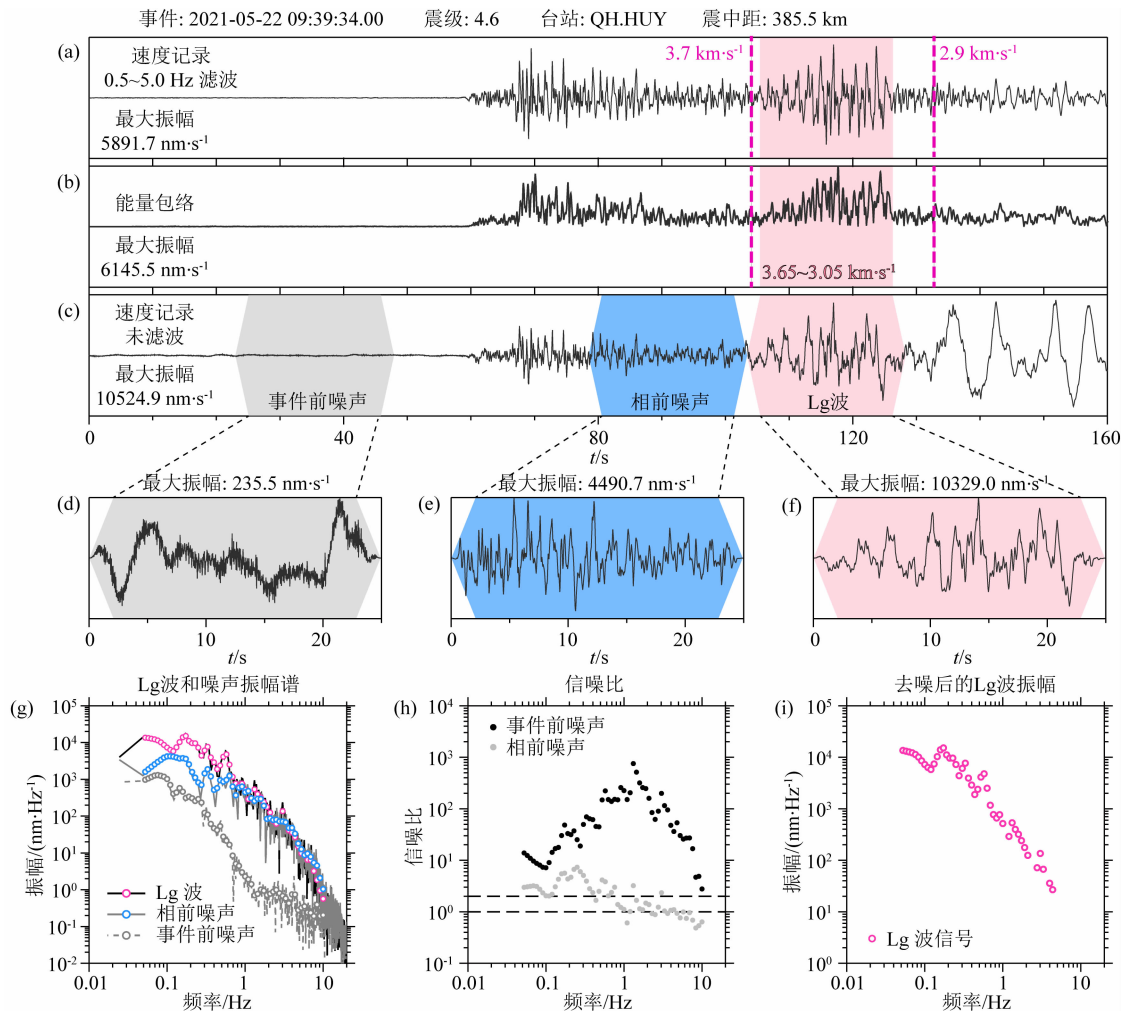


图3 Lg波数据预处理过程

(a) 地震波速度记录, 滤波频带为 0.5~5.0 Hz; (b) 希尔伯特变换得到的能量包络; (c) 未滤波的速度记录; (d) 事件前噪声; (e) Lg 波相前噪声; (f) Lg 波; (g) Lg 波和噪声的振幅谱; (h) 信噪比; (i) 去噪后得到的 Lg 波信号谱, 其中相前信噪比小于 1.0 和事件前信噪比小于 2.0 的信号会被舍弃. 两条玫瑰红色竖虚线所圈定的群速度范围 3.7~2.9 km·s⁻¹ 是我们搜索 Lg 波群速度窗的区间. 图中红色阴影区域是利用最大能量原则搜索得到的 Lg 波群速度窗口, 灰色和蓝色标明的是实际使用的事件前噪声和震相前噪声的采样窗.

Fig. 3 Data processing procedure for calculating Lg-wave spectra

(a) Velocity record filtered between 0.5 and 5.0 Hz; (b) Envelop from the 0.5 to 5.0 Hz filtered waveform. This curve can be used to calculate the maximum energy arrival and determine the Lg-wave group velocity window; (c) Unfiltered velocity record. Sampled waveforms for (d) pre-event noise; (e) pre-Lg noise and (f) Lg wave; (g) Fourier spectral amplitudes of Lg wave and noises; (h) Signal-to-noise ratios (SNR); (i) Lg spectra after corrected by pre-event noise. All Lg spectra with their SNR to pre-Lg noise lower than 1.0 or SNR to pre-event noise lower than 2.0 were dropped.

$$\frac{1}{Q(x, y, f)} \approx \frac{1}{Q^0(x, y, f)} - \frac{\delta Q(x, y, f)}{[Q^0(x, y, f)]^2}, \quad (4)$$

$$\ln S = \ln S^0 + \delta \ln S, \quad (5)$$

$$\ln P = \ln P^0 + \delta \ln P, \quad (6)$$

得

$$h = \sum_{i=1}^N [a_i \cdot \delta \ln Q_i] + e \cdot \delta \ln S + u \cdot \delta \ln P, \quad (7)$$

$$h = \ln A - \ln S^0 - \ln G + \frac{\pi f}{V} \int \frac{ds}{Q^0(x, y, f)} - \ln P^0, \quad (8)$$

其中 h 是观测到的 Lg 波观测谱与合成数据的残差, 上标 0 表示初始值或是上一次迭代得到的中间结果, δ 表示残差, N 是成像区域离散单元数, 方程(7)中的 a 是微分系数, e 和 u 是系数, 在本研究中取 1. 为简化表达式, 我们将方程(7)和(8)表示为矩阵形式:

$$\mathbf{H} = \mathbf{A} \cdot \delta \mathbf{Q} + \mathbf{E} \cdot \delta \mathbf{S} + \mathbf{F} \cdot \delta \mathbf{P}, \quad (9)$$

其中矩阵 \mathbf{A} 和 \mathbf{E} 分别建立了衰减扰动量 $\delta \mathbf{Q}$ 和震源扰动量 $\delta \mathbf{S}$ 与振幅数据残差 \mathbf{H} 之间的关系. 在求解方程(9)时, 假定台基响应 \mathbf{P} 中各项之和为 0, 即忽略台基响应并将台基响应项归入无法拟合的残差

内. 因为区域地震 Lg 波形资料丰富, 能够对超定方程(9)进行求解. 根据已有的宽频带高分辨率地壳 Lg 波衰减模型, 我们对传播路径上的衰减进行补偿, 在每个频率上独立地进行反演计算, 获得震源函数的准确估计. 然而, 由于衰减与震源项之间存在一定的折衷效应, 我们在反演过程中允许 Q 值在已知的区域衰减模型基础上浮动 10% 进行衰减模型更新, 以适应局部衰减起伏对震源谱函数反演结果的潜在影响, 从而减小反演残差, 促进收敛. 这里采用最小二乘正交分解法 (LSQR) 求解线性方程组 (9) (Paige and Saunders, 1982), 主要步骤包括数据规格化、阻尼和平滑约束, 得到更新的 Q 值和震源函数扰动值后, 将它们代入线性方程组重复迭代更新结果. 将迭代次数设置为 50 次, 选取振幅残差二范数最小时的震源函数和 Q 值作为结果进行收录. 图 4a 显示了 1.0 Hz 情况下根据 Lg 波振幅反演震源

函数和 Q 修正值的均方根残差随迭代次数的变化, 在第 12 次迭代时残差最小, 因此我们收录此次迭代所得到结果. 上述反演过程中尚存在一些未完全解释的数据残差, 其中主要应为台基响应. 因此, 我们进一步利用这些残差数据求取台基响应项. 对该项的约束条件是

$$\sum \delta P = 0 \text{ 和 } \sum |\delta P| < \epsilon, \quad (10)$$

其中 ϵ 为台基响应归一化的经验值 (Ottmöller et al., 2002; Zhao and Mousavi, 2018). 在考虑了局部衰减修正和台基响应校正之后, 振幅反演残差不断降低, 最终反演的均方根残差小于 1.0 (图 4b). 振幅残差的平均值和方差显著降低, 残差符合正态分布 (图 4c 和 d).

获得了单个事件的震源频谱后, 我们进一步使用下述震源模型来拟合 Lg 波震源谱以获取标量地震矩 M_0 和拐角频率 f_c :

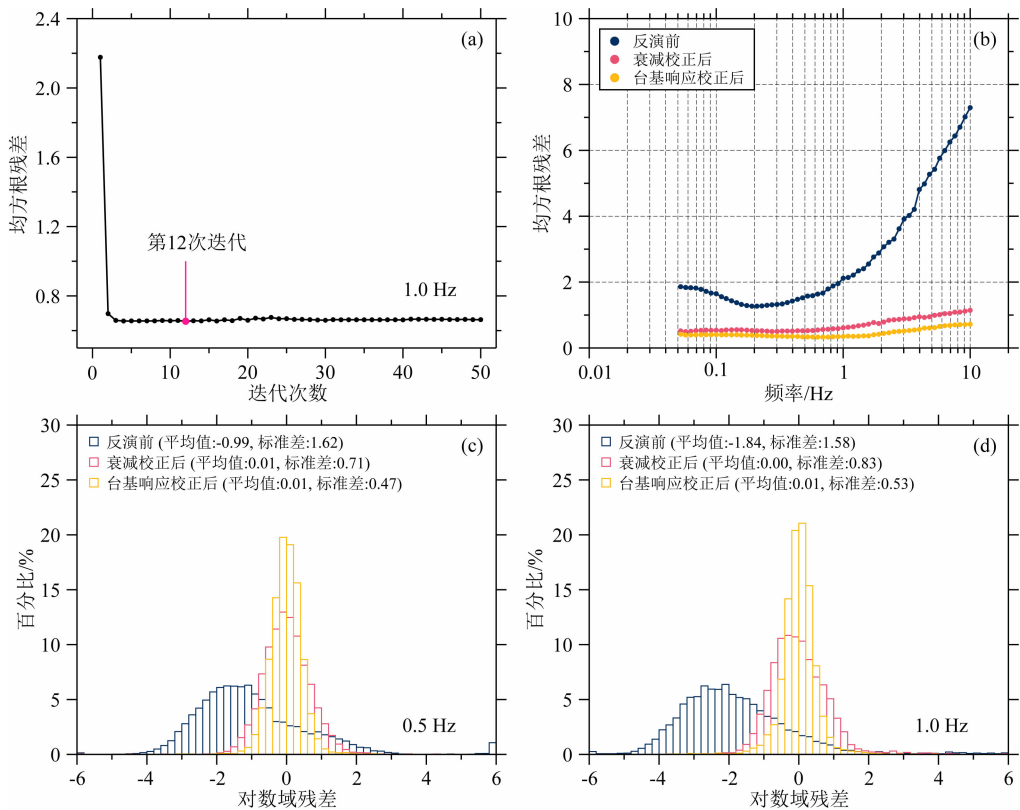


图 4 (a) 1.0 Hz Lg 波振幅谱反演过程中均方根残差随迭代次数的变化, 其中第 12 次迭代时残差最小为 0.68; (b) 反演前、衰减校正后、衰减和台基响应校正后各个频率 Lg 波振幅均方根残差, 作为代表, (c) 和 (d) 分别为 0.5 和 1.0 Hz Lg 波振幅反演前、衰减校正后、衰减和台基响应校正后拟合残差的统计直方图, 其中标出了残差的平均值和标准差

Fig. 4 (a) The root mean square (RMS) of the Lg spectra amplitude residual versus the iteration during the inversion at 1.0 Hz, in which the smallest residual of 0.68 appears at the 12th iteration. (b) The RMS residuals for 58 frequencies before inversion, after corrected by local attenuation, and after corrected by both attenuation and site response. Histograms of the Lg spectra amplitude misfit before the inversion (dark blue), corrected by the attenuation (pink), and corrected by both the local attenuation and site response (yellow) at 0.5 Hz (c) and 1.0 Hz (d), respectively, where the mean and standard deviation values are labeled

$$S(f) = \frac{M_0}{4\pi\rho v^3 [1 + (f/f_c)^n]}, \quad (11)$$

其中, ρ 和 v 分别是震源区介质密度和横波速度, n 为高频下降率, 也称高频衰减常数 (Boatwright, 1980; Abercrombie, 1995; 吴忠良等, 1999). 对于方程(11), 当 $n=2$ 时为最常用的 ω^{-2} 震源模型 (Brune, 1970). 由于高频下降率与破裂过程各向异性、近源效应、地震破裂尺度等因素有关, 其数值通常并非整数并介于 1.5~4.0 之间 (Dahlen, 1974; Madariaga,

1976; Boatwright, 1980; Abercrombie, 1995; 吴忠良等, 1999; Prieto et al., 2004; He et al., 2023). 为了更好地拟合震源谱函数, 我们将高频下降率 n 设置为除地震矩 M_0 和拐角频率 f_c 之外的第三个控制理论震源谱形态的独立系数, 并将其数值变化范围约束在 1.5~4.0.

震源谱函数通常是由平坦的低频和高频下降部分组成 (图 5(a, e, f, g)) (Aki, 1967; Abercrombie, 2021). 然而部分小震级事件的震源谱函数会在低频

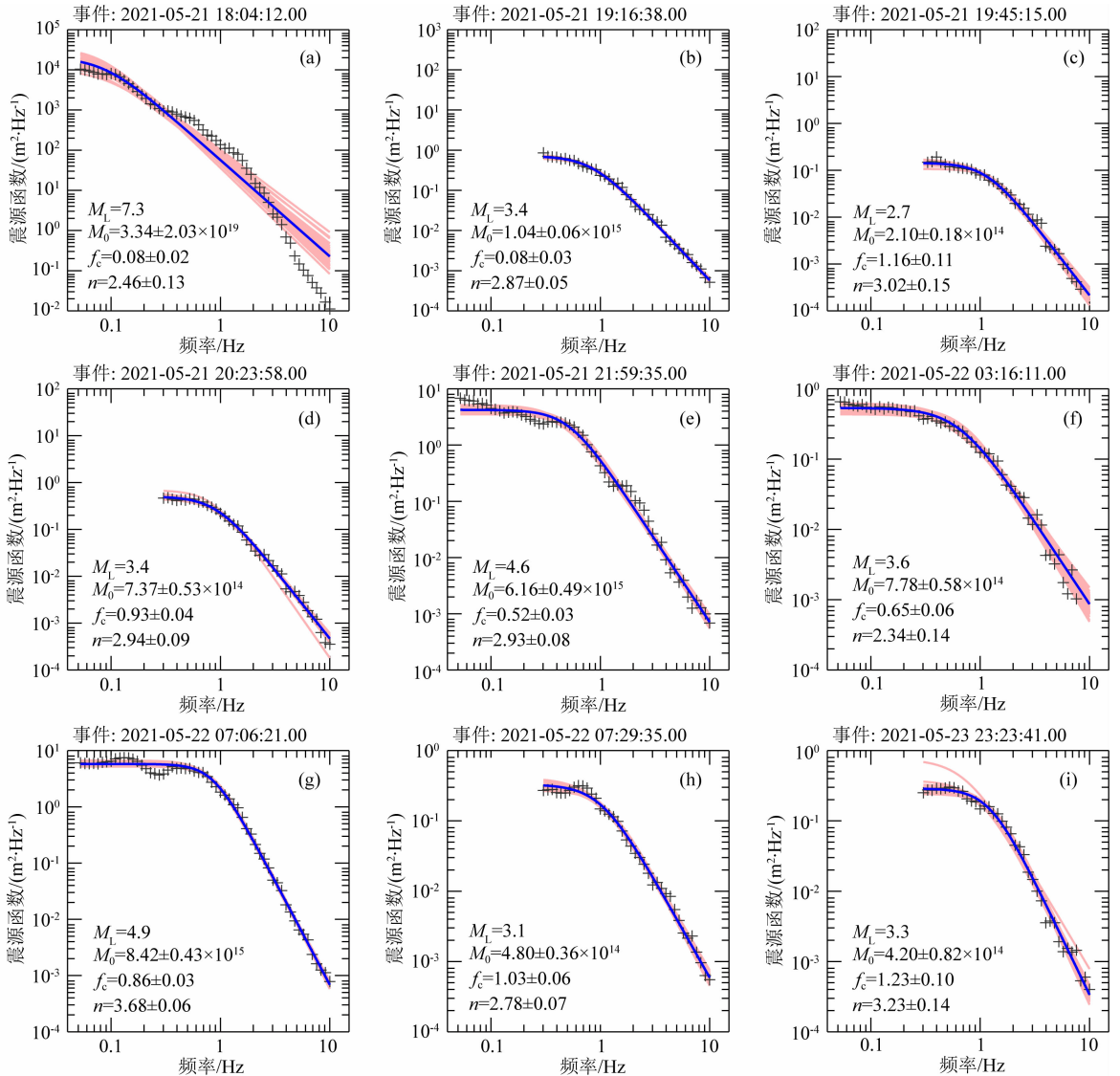


图 5 利用 Lg 波震源激发函数拟合震源参数计算实例

对于较大地震, 拟合所用频率为 0.05~10 Hz. 对于震级小于 3.5 级的地震, 通过目测方法适当截断低频频谱, 经过衰减校正过的 Lg 波震源谱函数 (黑色十字), 拟合得到最佳理论震源谱 (蓝色实线) 和相应的震源参数. 为检验反演稳定性, 随机选取 80% 震源函数数据进行 80 次拟合的理论震源谱曲线如粉色实线所示. 每幅小图中标出了发震时刻, 地方震级 M_L , 地震矩 M_0 , 拐角频率 f_c 和 高频下降率 n .

Fig. 5 Examples of observed Lg-wave source excitation spectra and source parameters obtained by fitting the data. For large earthquakes, the 0.05 to 10.0 Hz frequency band is used, and for earthquakes smaller than M_L 3.5, low frequency band is dropped based on visual inspection. The black crosses denote the source spectra corrected by the observed Lg-wave attenuation. The best-fit source models are shown in solid blue lines. To check the inversion stability, bootstrapping source models are calculated, where we randomly selected 80% Lg spectra data to fit the source model for 80 times, and the results are shown as pink lines. The origin time, local magnitude M_L , seismic moment M_0 , corner frequency f_c , and high-frequency falloff rate n with their standard deviations are labeled in each panel.

部分出现非常大而明显的“低频台阶”,这种情况与低频噪声的混入有关,如图 5(b,c,d,h,i). 这些低频噪声可能包含前序震相、高频面波、或者前一个地震的尾波. 同时,由于 2021 年玛多地震序列各事件之间间隔较为密集,后续地震往往也会受到此前地震面波所产生的低频交混回响的影响. 这部分低频噪声几乎不影响大震级事件震源函数,因为大地震事件低频信号丰富,振幅较大,明显高于噪声水平. 然而,如果不对小地震震源谱函数中的“低频台阶”现象进行处理,就会导致我们显著低估角频率和高估地震矩. 在之前的研究中我们发现这部分低频噪声源较为复杂,单纯地提高信噪比不是解决此问题的最佳手段(沈琳等, 2023; He et al., 2023). 通过检查所有地震事件的震源函数,我们发现“低频台阶”主要集中在小于 3.5 级的地震事件中. 小震通常具有较高的拐角频率,在拟合震源参数过程中并不依赖极低频率的成分. 因此对于震级小于 3.5 的事件,通过检查其震源函数来设置低频截止频率,以消除混入的低频成分(沈琳等, 2023; He et al., 2023). 在选择截断频率时,既希望去除受干扰的低频成分,又希望保有足够的低频平坦部分来估计标量地震矩. 如果一个震源函数的截止频率无法明显地观测出来,为了防止人为因素引入的误差,我们会将此地震事件去掉,不予拟合震源参数. 快速模拟退火方法是一种非穷举全局优化算法(Kirkpatrick et al., 1983),它通过最小化观测和合成 Lg 震源谱之间误差的 L2 范数来估计地震矩 M_0 、拐角频率 f_c 和高频下降率 n . 为进一步评估拟合的误差,我们使用 Bootstrap 方法每次选取 80% 的数据进行拟合,计算 80 次来获取地震矩 M_0 、拐角频率 f_c 和高频下降率 n 拟合的误差(Efron, 1983).

标量地震矩 M_0 可用来计算矩震级 M_w (Hanks and Kanamori, 1979):

$$M_w = \frac{2}{3} \log M_0 - 6.03. \quad (12)$$

基于圆盘断层模型(Eshelby, 1957; Brune, 1970), 将地震断层面与一个半径为 R 的圆盘等效,假设剪切应力同时作用于整个断层面,应力降 $\Delta\sigma$ 的表达式为

$$\Delta\sigma = \frac{7M_0}{16} \left(\frac{1}{R} \right)^3, \quad (13)$$

其中圆盘断层半径 R 为

$$R = \frac{kv}{f_c}, \quad (14)$$

其中 k 是一个依赖于理论震源模型的常数, f_c 为拐

角频率. 目前最广泛使用的结果来自 Madariaga (1976), 他使用有限差分法对圆盘断层模型进行了动力学计算,假设破裂速度为剪切波速度的 90%, 获得了 S 波的 k 值为 0.21. 因此,应力降可以基于地震矩 M_0 和拐角频率 f_c 计算得到,即

$$\Delta\sigma = \frac{7M_0}{16} \left(\frac{f_c}{0.21v} \right)^3. \quad (15)$$

2 结果

利用上述计算方法,我们获取了 2021 年玛多地震序列 119 个包括主震在内震级大于 2.5 级地震的地震矩、拐角频率、高频下降率和应力降,这些震源参数列于表 S1 中. 在前面震源谱反演过程中,对每个频率是独立计算的,未使用任何与频率相关的假定,因此得到的震源频谱相对客观. 而在拟合震源函数时未对高频下降率做任何先验假定,而是允许其在一定范围内变化,使得获得的震源参数拟合残差更小. 2021 年玛多地震序列高频下降率主要集中在 2.0~3.5,中位数和平均值分别为 2.67 和 2.73. 图 5 显示了震源谱函数观测值与理论值的拟合实例. 2021 年玛多地震主震的地震矩为 $3.34 \pm 2.03 \times 10^{19} \text{ N} \cdot \text{m}$,拐角频率为 $0.08 \pm 0.02 \text{ Hz}$,高频下降率为 2.46 ± 0.13 . 图 6a 显示了 2021 年玛多地震序列地震矩随拐角频率的变化. 地震矩分布范围为 $10^{13} \sim 10^{17} \text{ N} \cdot \text{m}$,拐角频率主要分布在 0.4~2.3 Hz 之间. 基于圆盘断层假设,我们计算了 2021 年玛主震的应力降为 $22 \pm 18 \text{ MPa}$,余震序列应力降分布在 0.1~7.5 MPa. 利用区域 Lg 波震相估计拐角频率,与使用近场或远场 S 波得到的结果相比较低,这种系统性的偏差存在于前人的研究中(Munguía and Brune, 1984; Haar et al., 1986). 例如,Haar 等(1986)认为 Lg 波的拐角频率明显低于 S 波拐角频率. Street(1984)利用 Lg 波获取的 1982 年美国阿肯萨斯州震级 3.0 左右地震的拐角频率约为 1.1 Hz. 根据所得的地震矩 M_0 ,我们利用公式(12)来估计矩震级 M_w ,并比较其与中国地震台网中心给出的地方震级 M_L 之间的关系. 利用线性回归,我们得到了玛多地震序列矩震级与地方震级的关系为 $M_L = 1.47M_w - 2.34$ (图 6b). 这一比例关系与 Bethmann 等(2011)获得的 M_L 正比于 $1.5M_w$ 的结果较为接近. 地方震级与矩震级之间的比例关系通常介于 0.97~2.25 之间,其具体的数值主要依赖于震级范围、不同地区以及矩震级 M_w 的计算方法,也

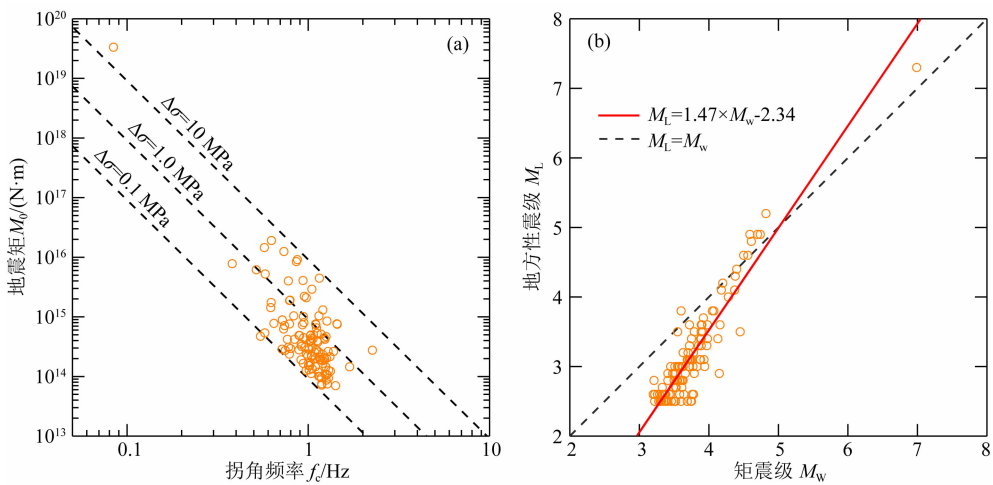


图 6 (a) 标量地震矩 M_0 与拐角频率 f_c 的关系, 其中给出应力降为 0.1, 1.0, 10 MPa 的等值线(虚线);

(b) 地方震级 M_L 与矩震级 M_w 之间的关系, 两条曲线分别给出具有不同截距和斜率的线性关系(虚线和红线)

Fig. 6 (a) Seismic moment versus corner frequency for the 2021 Madoi earthquake sequence, in which the dashed lines mark the constant stress drop of 0.1, 1.0, and 10.0 MPa; (b) The local magnitude M_L given by CENC versus moment magnitude M_w , in which the red and dashed black lines give two linear regressions with different slopes and intersections

可能受传播过程中衰减和散射的影响(Bethmann et al., 2011; Goertz-Allmann et al., 2011; Munafò et al., 2016).

2021 年玛多地震序列的应力降分布表明, 主震具有最大应力降, 余震序列沿断层展现出较大的变化, 说明断层强度和作用在之上的应力分布具有较大的横向不均匀性(图 7). 通过将地震事件投影到走向 285° 的垂直剖面上, 我们调查了 2021 年玛多地震及余震序列应力降的空间变化. 高应力降的地震主要集中在断层破裂东西两侧终点附近和主震以西约 30 km 处. 这些高应力降区域可能与断层面存在的障碍物有关(Kanamori, 1986; Hong et al., 2022; Ren et al., 2022). 2021 年玛多地震及余震序列应力降随时间的变化呈现较为分散的特征, 自主震发生以来两天内应力降有着明显下降, 但几次 4 级以上的余震应力降大于 1 MPa, 明显大于余震序列中位数 0.4 MPa(图 8). 应力降波动特征表明断层面上应力重新分配的时间相对较长, 可能与玛多地震的发震断层长度较大有关.

3 讨论

理想震源函数谱对于一些震源破裂过程较为复杂的地震来说可能较为简单, 以至于会出现拟合效果差的情况, 例如如图 5a 所示的 2021 年玛多主震. 目前针对该问题最好的方法是估计最低的拐角频率并将其与断裂的最大尺度相对应, 也是对估计断裂面

积最有用的拐角频率(Abercrombie, 2021). 根据 Lg 波得到的主震地震矩估计的矩震级 M_w 为 7.0, 低于 InSAR 观测数据和利用近震或远震体波方法估计的矩震级. 例如, 美国地质调查局利用 W 震相估计的玛多地震主震矩震级为 7.34 (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000e54r/moment-tensor>). Gao 等(2021) 利用高速全球导航卫星系统(GNSS)数据估计的 2021 玛多地震的矩震级为 7.3. Guo 等(2021) 利用 GPS 和 InSAR 观测数据估计了玛多地震释放的能量约为 1.5×10^{20} N·m, 等同于一个矩震级为 7.39 级的地震. 在 Lg 波震源谱估计中, 我们采用了震中距大于 200 km 的区域地震波形资料, 这与前人利用近场体波资料获取地震矩存在使用资料和方法的差异. 因此, 使用不同震相或数据频段, 可能导致应力降计算结果存在一定的系统偏差. 另一方面, 利用 Lg 波估计较大震级地震可能存在震级饱和现象. 我们得到的玛多 7.3 级地震的拐角频率为 0.08 Hz, 较为接近拟合频带下限, 可能存在震级饱和现象, 从而低估地震矩 M_0 .

准确估计应力降绝对数值存在较大难度, 不仅由于消除传播过程中路径衰减影响过程存在不确定性, 而且还因为计算应力降过程中需要对破裂动力学模型和多种参数进行假设(Abercrombie, 2015; Abercrombie et al., 2017; Shearer et al., 2019). 不同研究学者对于断层模型和部分参数选择存在较大差异, 这使得不同研究结果中应力降数值存在较大系统性偏差难以横向比较, 但其数值通常分布在

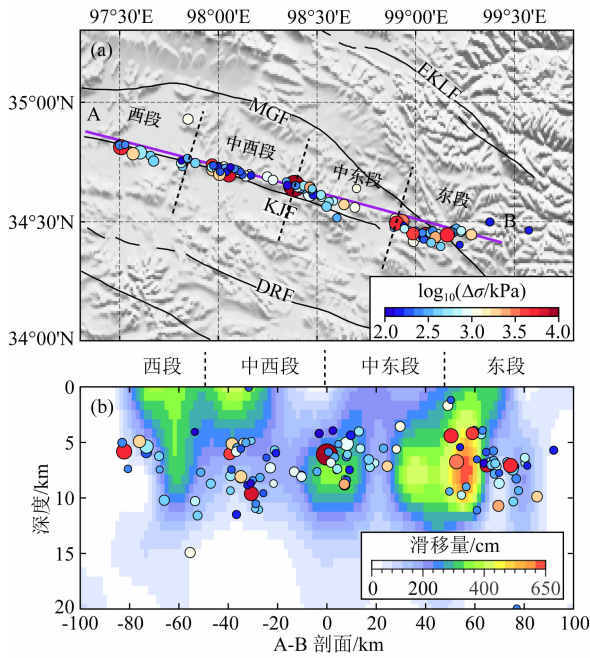


图 7 (a) 2021 年玛多地震序列应力降的空间分布图; (b) 沿 A-B 的同震破裂滑动量 (Wang et al., 2022) 深度剖面, 其中 2021 玛多地震破裂带分段位置来自 潘家伟等 (2021). 圆圈大小和内部填色分别表示震级和应力降大小, 紫色线段为剖面位置. 图中断层缩写与图 1 一致

Fig. 7 (a) Map view and (b) depth profile showing event locations for the 2021 Madoi earthquake sequence. The magnitudes and stress drops are coded by sizes and colors of circles. The purple line in (a) represent the location of the vertical profile. The color image in (b) denotes the distribution of coseismic slip (Wang et al., 2022), and the segmentation of surface ruptures was collected from Pan et al. (2021). The fault abbreviations are the same as those used in Fig. 1

0.1~100 MPa (Abercrombie, 1995; Shearer et al., 2006; Allmann and Shearer, 2007; Kaneko and Shearer, 2014; Goebel et al., 2015). 在大多数情况下由于无法直接获得断层破裂尺寸, 因此通常使用震源谱函数的角频率 f_c 和假设理论破裂模型来估计震源的尺寸大小 (Allmann and Shearer, 2007; Trugman and Shearer, 2017; Ji et al., 2022). 在本研究中, 我们假设断层破裂面为一对称的圆盘 (断层圆盘模型), 破裂速度为 S 波速度的 90%, 并利用常数 k 来关联拐角频率和源半径来估计应力降 (Eshelby, 1957; Madariaga, 1976). 由公式 (13) 和 (14) 可知, 应力降随着源半径的立方而变化, 因此破裂速度、拐角频率和 k 值的微小变化就会导致计算的应力降发生显著变化. 在拟合震源参数时, 我们允许高频下降率 n 值在一定范围内进行变化, 可以更好地拟合震源谱函数进而获取更准确的拐角频率. 破裂速度估计取决于

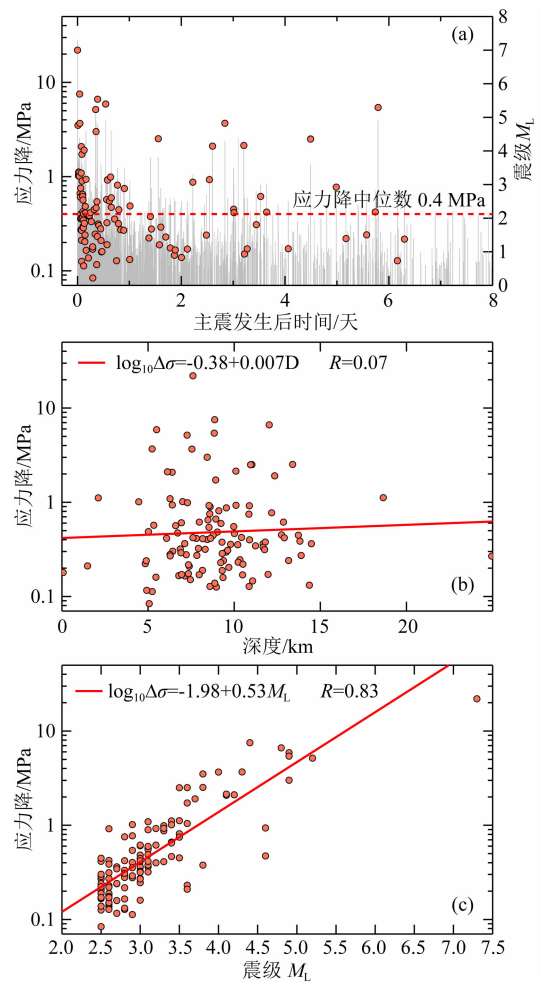


图 8 (a) 余震应力降和震级距主震发震时刻的关系, 红色虚线标出了应力降中位数; (b) 应力降随震源深度的变化; (c) 应力降和震级的关系, 红色实线为线性回归结果

Fig. 8 (a) Variations of stress drops and local magnitudes versus the time since the mainshock, where the red dashed line indicates the median value of the stress drop (b), the stress drop versus the local magnitude, and (c) the relationship between the stress drops with the magnitude, respectively

震源区 S 波速度, 2021 年玛多地震序列发震深度主要集中在 5~10 km, 根据区域的 S 波速度模型选取 $3.5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ (Bao et al., 2015). 常数 k 值选取取决于使用哪种理论关系来关联拐角频率和源半径. 对于 S 波来说, k 值通常取值为 0.37 (Brune, 1970)、0.21 (Madariaga, 1976)、0.29 (Sato and Hirasawa, 1973) 和 0.26 (Kaneko and Shearer, 2014) 等. 我们选取 k 值为 0.21 来估计应力降 (Madariaga, 1976). 由公式 (14) 可知, k 值选取只会影响绝对应力降数值但并不会影响地震序列之间应力降数值的相对变化. 例如, 如果我们选取 Brune (1970) 提出的 $k = 0.37$ 的理论模型, 估计的地震应力降的值将会整体偏低

约 5.56 倍. 然而, 2021 年玛多 $M_w 7.4$ 地震的地表破裂长宽分别为 160~180 km 和 18~30 km, 大致为一矩形破裂面(王未来等, 2021; 刘计洪等, 2022; Hong et al., 2022). 在这种情况下, 利用断层圆模型估计主震应力降会造成偏差. 但是若引入断层矩形模型估计主震应力降则会存在不同震源模型之间的系统偏差, 无法获取主震与余震序列应力降变化趋势. Allmann 和 Shearer(2009) 为了获取全球中到大地震应力降变化趋势, 利用断层圆盘模型估计获得了全球 $M_w 5.2\sim 8.3$ 级地震的应力降数值. 因此, 虽然不同研究之间模型选择和参数设置存在差异, 但是这些参数选择不影响应力降变化趋势, 即选用同种计算方法和模型假设所获取的应力降变化趋势是稳定可靠的(Shearer et al., 2006; Goebel et al., 2015; He et al., 2023).

3.1 地震非自相似性

应力降可为解释地震震源物理过程和评估地震危险性提供约束(Shearer et al., 2006; Abercrombie et al., 2021). Aki(1967) 提出地震自相似假设认为大震和小震震源物理过程相似, 应力降基本不随震级大小而发生变化. 在这种假设下, 大地震是小地震的完美放大版本. 然而, 近年来越来越多研究表明, 并非所有地震都遵循自相似理论, 对该现象是真实的还是由计算方法所导致的假象仍存在较大争议(Cocco et al., 2016; Folesky et al., 2021). 地震自相似性对于我们理解大地震与小地震破裂动力学是否相似具有重要的理论意义(Mayeda et al., 2007; Cocco et al., 2016). 例如, Trugman 和 Shearer(2017) 利用谱分解方法计算了南加州地区 5 个地震活动区大量地震事件的应力降, 发现应力降与震级之间的关系具有显著的区域依赖性. 2021 年玛多地震序列应力降与震级之间存在良好的线性关系, 应力降随震级增加而增大(图 8c). 这一结果可能反映出较大震级的地震有能力破裂更大尺度的断层, 从而释放更多的能量(Boyd et al., 2017). 赵翠萍等(2011) 获取的中国天山中东段地区、青藏高原东缘及龙门山断裂带的中小地震应力降也呈现与震级的正相关趋势. 同时, 前人对青藏高原东缘大量地震应力降结果的分析同样显示出与震级之间的良好线性关系(华卫等, 2009; 吴微微等, 2017; Wu et al., 2020). 这说明发生在青藏高原东部地区的地震可能并不符合破裂的自相似性假设. 该地区的大地震似乎具有较高的应力降, 相对辐射出更多的能量, 表明该区大小地震的破裂动力学过程是不相同的.

3.2 应力降对深度的依赖性

随着震源深度的增加, 作用在断层面的上伏压力不断增加, 因此许多研究观测到了应力降随震源深度增加而增加的趋势, 并推测深度越大的地震辐射出来的能量越高(Boyd et al., 2017; Huang et al., 2017; Trugman, 2020). 通过统计 2021 年玛多地震序列应力降与深度的关系, 我们发现二者之间没有表现出明显的线性关系, 相关系数较低. 前人对浅层地震序列应力降的研究也得出了相似的结论(Abercrombie et al., 2017; Trugman and Shearer, 2017). 因此, 应力降不随震源深度变化, 可能说明 2021 年玛多地震序列发震断层面本身的强度较高, 与岩石静压力的变化相比, 前者对应力释放起主导作用(Folesky et al., 2021).

3.3 玛多地震发震断层的非均匀性与孕震环境

通常, 随着强震发生之后断层面上应力快速释放和滑动面的愈合, 应力降会随着时间推移而不断降低(Hauksson, 2015). 但是由于断层面局部存在异常结构, 例如断层不同位置的强度、粗糙程度等存在差异, 因此沿断面上的应力降变化通常较为分散复杂(Goebel et al., 2015). 断层面上较低应力降的余震可能归因于断层面尚未完全愈合的部分再次破裂(Shaw et al., 2015; Sumy et al., 2017). 而对于那些局部较大应力降的余震可能为主震未完全破裂的部分在余震期间破裂, 或是与断层面上应力的局部集中和断层几何摩擦特性的变化有关(Mildon et al., 2019). 因此, 我们结合同震滑动位移模型和玛多地震序列应力降对断层面强度的非均匀分布进行分析. 2021 年玛多地震的余震大多发生在同震滑动量较低的位置(图 7b), 较大应力降的余震主要集中在同震滑动较小的区域, 例如主震西部约 40 km 和东部约 70 km、同震滑移量小于 200 cm 的区域, 这表明这些区域的应力没有被主震完全释放(Hong et al., 2022). 然而, 主震东部约 20 km 处, 同震滑移量小于 200 cm, 但是余震数量较少且应力降数值也明显偏低. 相似的主震东部低滑移地震空区在 Yue 等(2022) 研究中也存在, 可能与主震东部发生的快速超剪切破裂消耗了大量能量导致该区域剩余应力水平偏低有关. 同震高滑移区域指示了断面上的凹凸体, 对主震破裂过程起到主导作用. 主震后断面上的剩余应力通常沿凹凸体边缘区域重新分布, 如图 7b 所示, 高应力降余震所在区域可能指示了玛多主震后破裂面上闭锁和应变集中区域(Aki, 1984; 李正芳和周本刚, 2015).

2021 年玛多地震序列震源区的应力场、断层破

裂面和余震展布方向与巴颜喀拉块体主应力方向基本一致,反映了该块体受青藏高原东向挤出逃逸作用的影响(徐志国等, 2021; 曹学来等, 2022). 尽管巴颜喀拉块体内部滑动速率仅为 $1.2\sim 1.7\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 但漫长的应力累计外加上大规模的中下地壳低速高导体使得上覆脆性层更容易积累能量,进而发生板块内部强震(Guo et al., 2021; 詹艳等, 2022; Yang et al., 2022). 巴颜喀拉块体内部地震活动性较低,但是此次地震序列为我们认识该区域应力积累和潜在地震风险提供了宝贵资料,玛多地震高应力降地震暗示着板块内部可能存在多个潜在震源成核区域. 同震库伦应力变化结果显示玛多地震明显地提升了巴颜喀拉块体内部断层的应力积累水平,未来这些区域地震活动性可能会显著增加(冯雅杉等, 2022). 随着板块内部应力长时间的加载,该板块内部未来仍存在较高地震风险.

4 结论

利用已建立的青藏高原及其周边地区 Lg 衰减

模型(Zhao et al., 2013),对 Lg 波传播路径上的衰减进行补偿,利用 Lg 波理论震源谱模型与实际观测数据进行拟合,获取标量地震矩和拐角频率,进而计算玛多地震序列的应力降. 得到了 2021 年玛多地震序列震级大于 2.5 的 119 个地震事件的应力降. 结果表明,主震应力降为 22 MPa,118 个余震事件应力降分布范围为 $0.08\sim 7.5\text{ MPa}$,中位数是 0.39 MPa ,平均值为 0.88 MPa . 应力降的时空变化反映了该地震的断层活动具有非均质性强烈、应力释放过程复杂等特征. 应力降大小与震级的关系表明,玛多地震及余震不具备地震自相似性. 较大震级的地震有可能导致较大尺度的断层破裂,单位面积辐射能量较高. 较高应力降的余震主要分布在同震滑移量相对较低的区域,指示了主震后断层面上应力集中和闭锁的位置.

致谢 感谢两位审稿专家的宝贵建议. 地震波形资料来自于中国地震台网中心(CENC),中国地震局地球物理研究所国家数字测震台网数据备份中心(郑秀芬等, 2009). 图件绘制采用 GMT 软件(www.soest.hawaii.edu/gmt).

附表 S1 地震参数列表

Appendix Table S1 Earthquake parameters used in this study

事件参数						接收到的台站数量	震源参数			
日期 (年-月-日)	时间 (时:分:秒 国际标准时间)	纬度 (°N)	经度 (°E)	震源 深度 (km)	震级		地震矩 M_0 ($\text{N}\cdot\text{m}$)	拐角 频率 f_c (Hz)	高频 下降率 n	应力降 $\Delta\sigma$ (kPa)
2021-05-21	18:04:12	34.6502	98.3848	7.607	7.3	203	$3.34\pm 2.03\times 10^{19}$	0.08 ± 0.02	2.46 ± 0.13	21994.7 ± 17896.2
2021-05-21	18:16:32	34.4477	99.0684	26.272	3.8	64	$2.76\pm 0.18\times 10^{14}$	2.26 ± 0.11	3.69 ± 0.15	3499.4 ± 574.3
2021-05-21	18:30:29	34.419	98.9888	30.901	3.6	127	$1.90\pm 0.59\times 10^{15}$	0.79 ± 0.08	2.98 ± 0.10	1045.4 ± 467.0
2021-05-21	18:30:55	34.6398	98.7004	7.008	2.9	128	$1.88\pm 0.52\times 10^{15}$	0.79 ± 0.09	2.96 ± 0.10	1017.3 ± 445.7
2021-05-21	18:35:08	34.9294	97.8465	18.65	3.5	170	$5.24\pm 1.17\times 10^{15}$	0.58 ± 0.06	2.74 ± 0.07	1117.8 ± 437.5
2021-05-21	18:50:57	34.5127	98.8946	2.111	3.4	186	$7.61\pm 0.72\times 10^{14}$	1.10 ± 0.07	3.04 ± 0.10	1111.3 ± 241.7
2021-05-21	18:55:25	34.5605	98.6915	4.461	3.4	184	$4.67\pm 1.55\times 10^{14}$	1.25 ± 0.16	3.38 ± 0.17	1011.7 ± 511.0
2021-05-21	19:03:06	34.4507	99.051	8.867	4.4	212	$4.46\pm 1.25\times 10^{15}$	1.15 ± 0.10	3.94 ± 0.15	7517.1 ± 2823.3
2021-05-21	19:09:16	34.7395	97.9676	7.548	4.0	187	$2.91\pm 0.12\times 10^{15}$	1.05 ± 0.03	3.44 ± 0.06	3672.0 ± 372.2
2021-05-21	19:16:38	34.4407	99.0923	8.93	3.4	154	$1.04\pm 0.06\times 10^{15}$	0.83 ± 0.03	2.87 ± 0.05	662.0 ± 89.7
2021-05-21	19:22:38	34.6039	98.5234	6.935	3.0	190	$4.98\pm 0.44\times 10^{14}$	1.03 ± 0.06	3.01 ± 0.08	605.8 ± 120.5
2021-05-21	19:28:28	34.4506	99.0877	9.79	3.0	192	$2.53\pm 0.41\times 10^{14}$	1.09 ± 0.12	2.90 ± 0.13	357.9 ± 130.9
2021-05-21	19:29:39	34.587	98.5837	8.579	2.8	107	$2.62\pm 1.27\times 10^{14}$	1.38 ± 0.43	2.75 ± 0.51	753.4 ± 794.5
2021-05-21	19:33:40	34.7461	97.8831	10.893	3.2	176	$3.14\pm 0.90\times 10^{14}$	1.05 ± 0.18	2.53 ± 0.16	399.5 ± 236.0
2021-05-21	19:36:51	34.4541	99.0085	13.885	2.6	185	$3.20\pm 0.46\times 10^{14}$	0.92 ± 0.11	2.55 ± 0.10	272.5 ± 102.7
2021-05-21	19:45:15	34.7374	97.9704	11.68	2.7	176	$2.10\pm 0.18\times 10^{14}$	1.16 ± 0.11	3.02 ± 0.15	361.9 ± 107.1
2021-05-21	19:47:01	34.7331	98.0285	6.274	3.1	197	$7.40\pm 0.91\times 10^{14}$	1.10 ± 0.09	3.48 ± 0.16	1090.4 ± 301.0
2021-05-21	19:49:14	34.7173	97.9715	6.399	4.1	196	$4.02\pm 0.41\times 10^{15}$	0.78 ± 0.05	3.22 ± 0.12	2080.7 ± 469.5

续附表 S1

事件参数						震源参数				
日期 (年-月-日)	时间 (时:分:秒 国际标准时间)	纬度 (°N)	经度 (°E)	震源 深度 (km)	震级	接收到 的台站 数量	地震矩 M_0 ($N \cdot m$)	拐角 频率 f_c (Hz)	高频 下降率 n	应力降 $\Delta\sigma$ (kPa)
2021-05-21	19:57:17	34.5025	98.9055	1.487	2.5	159	$1.46 \pm 0.27 \times 10^{14}$	1.10 ± 0.14	2.58 ± 0.14	211.3 ± 89.2
2021-05-21	19:59:51	34.4684	99.1892	8.968	2.5	180	$2.75 \pm 1.38 \times 10^{14}$	0.75 ± 0.23	1.85 ± 0.17	125.9 ± 132.9
2021-05-21	20:00:47	34.4698	99.196	24.945	2.5	113	$2.14 \pm 0.42 \times 10^{14}$	1.04 ± 0.17	2.75 ± 0.16	267.6 ± 141.9
2021-05-21	20:04:30	34.5726	98.6367	8.925	3.6	205	$1.04 \pm 0.05 \times 10^{15}$	1.15 ± 0.04	3.28 ± 0.06	1721.6 ± 216.3
2021-05-21	20:13:13	34.4621	99.08	8.602	3.1	151	$4.41 \pm 0.30 \times 10^{14}$	1.23 ± 0.07	3.11 ± 0.11	896.7 ± 161.2
2021-05-21	20:23:58	34.4564	99.0732	8.479	3.4	206	$7.37 \pm 0.53 \times 10^{14}$	0.93 ± 0.04	2.94 ± 0.09	648.0 ± 102.9
2021-05-21	20:24:18	34.7326	97.8183	14.48	3.1	172	$8.84 \pm 1.34 \times 10^{14}$	0.72 ± 0.07	2.59 ± 0.10	362.5 ± 118.6
2021-05-21	20:24:46	34.697	98.16	7.126	3.0	172	$8.89 \pm 1.06 \times 10^{14}$	0.72 ± 0.06	2.59 ± 0.10	363.8 ± 107.4
2021-05-21	20:27:45	34.7458	97.8106	12.859	3.2	147	$3.98 \pm 0.25 \times 10^{14}$	1.12 ± 0.06	3.15 ± 0.09	616.3 ± 109.7
2021-05-21	20:30:08	34.642	98.4654	10.42	2.6	157	$2.59 \pm 0.27 \times 10^{14}$	1.14 ± 0.10	2.91 ± 0.12	423.2 ± 124.5
2021-05-21	20:36:13	34.6316	98.4761	6.601	3.1	201	$4.27 \pm 0.85 \times 10^{14}$	1.06 ± 0.10	3.32 ± 0.17	563.6 ± 197.4
2021-05-21	20:39:03	34.6674	98.345	9.539	2.8	118	$3.07 \pm 0.60 \times 10^{14}$	0.96 ± 0.13	2.62 ± 0.13	296.3 ± 130.7
2021-05-21	20:44:18	34.7723	97.6565	9.301	2.5	184	$2.00 \pm 0.28 \times 10^{14}$	1.09 ± 0.09	2.94 ± 0.11	286.3 ± 79.2
2021-05-21	20:45:48	34.466	98.9635	11.237	2.7	200	$1.92 \pm 0.32 \times 10^{14}$	1.18 ± 0.13	2.75 ± 0.15	344.6 ± 127.0
2021-05-21	20:52:33	34.3968	99.1273	8.435	2.9	188	$1.96 \pm 0.22 \times 10^{14}$	1.23 ± 0.11	2.92 ± 0.11	402.8 ± 117.3
2021-05-21	20:55:33	34.653	98.3503	5.239	2.9	180	$5.38 \pm 2.98 \times 10^{14}$	0.58 ± 0.16	2.21 ± 0.12	112.8 ± 112.2
2021-05-21	21:09:11	34.4471	99.2819	12.352	3.7	198	$8.53 \pm 0.43 \times 10^{14}$	1.27 ± 0.06	3.09 ± 0.10	1907.3 ± 277.4
2021-05-21	21:14:00	34.7313	97.9994	6.871	3.1	171	$7.17 \pm 2.93 \times 10^{14}$	0.74 ± 0.14	2.50 ± 0.15	319.3 ± 227.2
2021-05-21	21:28:18	34.4477	99.1082	9.689	2.5	188	$1.71 \pm 0.23 \times 10^{14}$	1.03 ± 0.10	2.70 ± 0.11	203.7 ± 65.6
2021-05-21	21:32:27	34.6422	98.426	9.375	2.5	173	$1.07 \pm 0.26 \times 10^{14}$	1.27 ± 0.22	2.57 ± 0.19	240.1 ± 139.3
2021-05-21	21:37:37	34.5845	98.5604	9.025	3.0	205	$4.01 \pm 0.52 \times 10^{14}$	1.03 ± 0.08	3.01 ± 0.12	481.9 ± 134.4
2021-05-21	21:50:51	34.5643	98.5486	8.17	3.3	204	$7.60 \pm 0.75 \times 10^{14}$	0.79 ± 0.07	2.78 ± 0.11	410.2 ± 112.9
2021-05-21	21:59:35	34.6154	98.4646	6.403	4.6	199	$6.16 \pm 0.49 \times 10^{15}$	0.52 ± 0.03	2.93 ± 0.08	936.4 ± 204.0
2021-05-21	22:04:22	34.4997	99.376	7.133	2.8	96	$2.94 \pm 0.88 \times 10^{14}$	0.80 ± 0.15	2.43 ± 0.12	164.7 ± 104.2
2021-05-21	23:06:49	34.4642	99.573	25.807	2.6	191	$1.12 \pm 0.22 \times 10^{14}$	1.04 ± 0.18	2.18 ± 0.12	136.7 ± 76.2
2021-05-21	23:32:04	34.7187	98.0657	11.806	3.1	193	$4.89 \pm 0.54 \times 10^{14}$	0.89 ± 0.08	2.61 ± 0.11	378.5 ± 114.1
2021-05-22	0:00:26	34.7767	97.6557	7.805	3.1	210	$4.48 \pm 0.00 \times 10^{14}$	0.94 ± 0.00	2.61 ± 0.00	414.2 ± 0.0
2021-05-22	0:26:38	34.4739	99.2058	11.68	2.8	213	$1.95 \pm 0.47 \times 10^{14}$	1.16 ± 0.15	2.48 ± 0.14	332.7 ± 151.1
2021-05-22	1:04:56	34.6307	98.4701	10.491	2.6	174	$1.52 \pm 0.30 \times 10^{14}$	1.00 ± 0.27	2.15 ± 0.25	169.5 ± 140.1
2021-05-22	1:05:13	34.7051	98.0444	0.069	2.6	169	$1.53 \pm 0.40 \times 10^{14}$	1.02 ± 0.25	2.17 ± 0.18	179.6 ± 141.9
2021-05-22	1:06:50	34.7564	97.8131	5.066	2.5	127	$4.72 \pm 0.88 \times 10^{14}$	0.54 ± 0.10	2.07 ± 0.12	83.9 ± 48.4
2021-05-22	1:48:07	34.7111	98.0755	13.727	2.5	177	$3.83 \pm 0.39 \times 10^{14}$	1.02 ± 0.10	2.62 ± 0.13	447.1 ± 139.4
2021-05-22	2:11:44	34.4547	99.1894	10.331	3.0	212	$2.37 \pm 0.23 \times 10^{14}$	0.98 ± 0.09	2.46 ± 0.10	245.2 ± 70.7
2021-05-22	2:29:34	34.8125	97.5066	7.267	5.2	177	$1.91 \pm 0.19 \times 10^{16}$	0.63 ± 0.04	3.47 ± 0.10	5159.0 ± 1148.2
2021-05-22	2:38:44	34.5011	98.9306	8.428	4.9	204	$1.45 \pm 0.15 \times 10^{16}$	0.57 ± 0.07	3.06 ± 0.17	3002.6 ± 1072.7
2021-05-22	2:42:17	34.7292	97.9686	10.01	3.4	46	$1.74 \pm 0.22 \times 10^{15}$	0.62 ± 0.06	2.65 ± 0.11	466.0 ± 148.3
2021-05-22	2:58:14	34.6389	98.4085	4.922	2.7	184	$2.87 \pm 0.48 \times 10^{14}$	0.72 ± 0.12	2.04 ± 0.13	116.3 ± 63.5
2021-05-22	3:02:15	34.4556	99.2294	8.533	2.9	196	$2.15 \pm 0.19 \times 10^{14}$	1.32 ± 0.11	2.87 ± 0.12	540.8 ± 140.8
2021-05-22	3:16:11	34.7006	98.0051	10.225	3.6	185	$7.78 \pm 0.58 \times 10^{14}$	0.65 ± 0.06	2.34 ± 0.14	231.0 ± 61.6

续附表 S1

事件参数						震源参数				
日期 (年-月-日)	时间 (时:分:秒 国际标准时间)	纬度 (°N)	经度 (°E)	震源 深度 (km)	震级	接收到 的台站 数量	地震矩 M_0 ($N \cdot m$)	拐角 频率 f_c (Hz)	高频 下降率 n	应力降 $\Delta\sigma$ (kPa)
2021-05-22	3:21:17	34.6961	98.0529	12.029	4.8	191	$9.13 \pm 0.71 \times 10^{15}$	0.87 ± 0.05	3.52 ± 0.10	6631.8 ± 1159.8
2021-05-22	3:36:30	34.4753	98.8892	11.766	2.6	80	$1.23 \pm 0.58 \times 10^{14}$	1.32 ± 0.30	2.45 ± 0.22	314.0 ± 259.1
2021-05-22	3:55:39	34.6347	98.4324	6.43	2.5	188	$1.27 \pm 0.14 \times 10^{14}$	1.29 ± 0.14	2.30 ± 0.13	302.4 ± 106.8
2021-05-22	4:47:03	34.7251	98.0368	6.276	2.8	194	$2.25 \pm 0.44 \times 10^{14}$	1.04 ± 0.19	2.07 ± 0.15	278.9 ± 163.1
2021-05-22	4:59:02	34.7959	97.6031	7.387	3.6	188	$4.21 \pm 0.60 \times 10^{14}$	0.77 ± 0.08	2.48 ± 0.11	209.1 ± 69.8
2021-05-22	5:09:23	34.6237	98.4799	9.346	2.7	199	$1.90 \pm 0.35 \times 10^{14}$	0.91 ± 0.16	2.10 ± 0.16	158.6 ± 89.3
2021-05-22	5:21:25	34.614	98.4823	5.453	3.0	201	$3.09 \pm 0.17 \times 10^{14}$	0.78 ± 0.07	2.38 ± 0.12	160.0 ± 43.7
2021-05-22	7:06:21	34.4949	98.9033	5.492	4.9	210	$8.42 \pm 0.43 \times 10^{15}$	0.86 ± 0.03	3.68 ± 0.06	5899.6 ± 647.7
2021-05-22	7:29:35	34.4362	99.0224	5.331	3.1	211	$4.80 \pm 0.36 \times 10^{14}$	1.03 ± 0.06	2.78 ± 0.07	570.7 ± 111.2
2021-05-22	7:39:04	34.6409	98.4169	7.925	3.0	190	$2.84 \pm 0.37 \times 10^{14}$	1.01 ± 0.14	2.28 ± 0.14	323.4 ± 137.6
2021-05-22	7:42:47	34.4577	99.0099	8.16	2.5	148	$1.18 \pm 0.18 \times 10^{14}$	1.13 ± 0.22	2.43 ± 0.16	189.3 ± 113.9
2021-05-22	7:54:09	34.6447	98.4016	8.535	3.2	199	$5.12 \pm 0.17 \times 10^{14}$	1.18 ± 0.05	3.08 ± 0.09	924.3 ± 113.2
2021-05-22	7:54:59	34.7027	98.1573	10.876	2.6	195	$5.13 \pm 0.18 \times 10^{14}$	1.18 ± 0.05	3.08 ± 0.10	919.0 ± 110.6
2021-05-22	8:50:07	34.6741	98.2753	9.976	3.1	185	$4.42 \pm 1.16 \times 10^{14}$	1.04 ± 0.16	2.86 ± 0.23	551.5 ± 294.4
2021-05-22	9:20:25	34.724	97.9932	7.285	3.3	196	$6.55 \pm 0.45 \times 10^{14}$	1.11 ± 0.08	2.55 ± 0.10	988.5 ± 215.4
2021-05-22	9:39:34	34.7906	97.6025	6.716	4.6	187	$7.79 \pm 0.90 \times 10^{15}$	0.38 ± 0.04	2.55 ± 0.12	471.9 ± 168.1
2021-05-22	9:42:48	34.651	98.4328	9.233	3.1	111	$3.76 \pm 5.22 \times 10^{14}$	1.13 ± 0.24	2.71 ± 0.17	596.0 ± 911.8
2021-05-22	11:13:26	34.7156	98.0991	10.21	2.9	197	$1.84 \pm 0.24 \times 10^{14}$	1.20 ± 0.14	2.58 ± 0.15	354.3 ± 134.4
2021-05-22	12:08:01	34.4347	99.0351	8.591	2.8	210	$2.38 \pm 0.14 \times 10^{14}$	0.79 ± 0.08	2.00 ± 0.11	128.0 ± 37.8
2021-05-22	12:32:41	34.6921	98.1391	9.111	3.5	196	$5.28 \pm 0.42 \times 10^{14}$	1.12 ± 0.07	2.89 ± 0.09	811.5 ± 168.4
2021-05-22	13:00:05	34.449	99.0837	8.316	3.0	208	$1.65 \pm 0.20 \times 10^{14}$	1.20 ± 0.13	2.53 ± 0.13	316.4 ± 109.5
2021-05-22	13:09:12	34.4532	99.0736	8.779	3.0	200	$2.02 \pm 0.16 \times 10^{14}$	1.26 ± 0.09	2.86 ± 0.10	444.8 ± 103.0
2021-05-22	14:01:13	34.6344	98.4691	7.83	3.0	199	$4.20 \pm 0.76 \times 10^{14}$	0.84 ± 0.11	2.64 ± 0.14	273.0 ± 118.3
2021-05-22	15:24:54	34.8206	97.4999	6.28	3.0	183	$6.24 \pm 1.19 \times 10^{14}$	0.73 ± 0.09	2.73 ± 0.12	269.1 ± 107.7
2021-05-22	15:46:13	34.4478	99.1083	10.851	3.5	213	$8.00 \pm 0.35 \times 10^{14}$	0.95 ± 0.05	2.84 ± 0.08	747.5 ± 118.4
2021-05-22	18:11:24	34.7296	97.9957	14.359	2.8	190	$7.17 \pm 3.77 \times 10^{13}$	1.19 ± 0.24	2.55 ± 0.26	131.7 ± 105.0
2021-05-22	18:19:38	34.6127	98.5197	5.017	3.1	202	$3.96 \pm 0.81 \times 10^{14}$	1.04 ± 0.13	3.01 ± 0.22	487.8 ± 209.5
2021-05-23	3:06:34	34.4644	99.0005	4.84	2.5	204	$9.37 \pm 1.93 \times 10^{13}$	1.29 ± 0.24	2.38 ± 0.20	223.2 ± 130.6
2021-05-23	3:46:53	34.4493	99.171	9.293	3.8	215	$1.43 \pm 0.12 \times 10^{15}$	0.62 ± 0.04	2.58 ± 0.08	377.3 ± 83.9
2021-05-23	4:15:54	34.4622	99.0865	7.215	2.9	194	$1.97 \pm 0.46 \times 10^{14}$	1.09 ± 0.13	2.46 ± 0.12	277.6 ± 120.4
2021-05-23	7:24:32	34.4356	99.1006	13.395	3.8	214	$1.31 \pm 0.07 \times 10^{15}$	1.20 ± 0.05	3.26 ± 0.09	2518.7 ± 366.8
2021-05-23	7:55:28	34.7361	97.9743	9.303	2.6	185	$8.65 \pm 1.46 \times 10^{13}$	1.26 ± 0.22	2.30 ± 0.23	188.6 ± 103.8
2021-05-23	8:35:45	34.5169	98.6009	6.909	2.9	197	$3.47 \pm 0.66 \times 10^{14}$	0.91 ± 0.12	2.41 ± 0.11	290.4 ± 123.5
2021-05-23	10:52:35	34.8228	97.5271	9.221	2.6	174	$1.10 \pm 0.16 \times 10^{14}$	1.23 ± 0.19	2.33 ± 0.19	228.3 ± 108.4
2021-05-23	12:56:38	34.4263	99.0416	7.336	2.6	207	$9.57 \pm 2.06 \times 10^{13}$	1.18 ± 0.25	2.35 ± 0.22	174.7 ± 116.2
2021-05-23	14:51:42	34.7099	98.04	11.067	2.6	191	$1.29 \pm 0.34 \times 10^{14}$	1.01 ± 0.19	2.28 ± 0.16	146.1 ± 92.5
2021-05-23	15:14:35	34.4829	98.9408	6.782	2.5	205	$1.01 \pm 0.15 \times 10^{14}$	1.14 ± 0.18	2.36 ± 0.14	166.4 ± 80.8
2021-05-23	18:09:46	34.4039	99.2227	8.875	2.5	207	$7.54 \pm 1.44 \times 10^{13}$	1.19 ± 0.18	2.49 ± 0.16	138.3 ± 69.7
2021-05-23	20:55:07	34.6974	98.1227	7.968	2.5	193	$9.95 \pm 2.66 \times 10^{13}$	1.16 ± 0.24	2.45 ± 0.22	170.2 ± 115.7

续附表 S1

事件参数						接收到的 台站 数量	震源参数			
日期 (年-月-日)	时间 (时:分:秒 国际标准时间)	纬度 (°N)	经度 (°E)	震源 深度 (km)	震级		地震矩 M_0 ($N \cdot m$)	拐角 频率 f_c (Hz)	高频 下降率 n	应力降 $\Delta\sigma$ (kPa)
2021-05-23	23:23:41	34.6894	98.2475	9.547	3.3	200	$4.20 \pm 0.82 \times 10^{14}$	1.23 ± 0.10	3.23 ± 0.14	871.0 ± 266.5
2021-05-24	5:41:27	34.4536	99.0339	4.899	2.7	210	$1.09 \pm 0.19 \times 10^{14}$	1.26 ± 0.17	2.57 ± 0.16	239.2 ± 105.4
2021-05-24	7:06:13	34.6754	98.2764	10.104	3.3	183	$1.01 \pm 0.05 \times 10^{15}$	0.94 ± 0.04	3.17 ± 0.08	928.0 ± 129.4
2021-05-24	8:31:27	34.785	97.5679	6.129	4.2	187	$2.22 \pm 0.22 \times 10^{15}$	0.95 ± 0.06	3.48 ± 0.11	2102.9 ± 438.7
2021-05-24	14:15:19	34.4503	98.9861	5.232	4.3	213	$4.08 \pm 0.44 \times 10^{15}$	0.94 ± 0.06	3.49 ± 0.09	3679.5 ± 769.5
2021-05-24	18:15:56	34.7545	97.672	12.75	3.5	189	$2.38 \pm 0.15 \times 10^{14}$	1.20 ± 0.07	2.86 ± 0.11	450.0 ± 85.7
2021-05-24	18:27:11	34.4126	99.0784	8.627	3.0	210	$2.07 \pm 0.18 \times 10^{14}$	1.22 ± 0.09	2.78 ± 0.13	413.6 ± 95.5
2021-05-24	23:00:19	34.6982	98.0056	10.096	4.1	195	$2.10 \pm 0.20 \times 10^{15}$	0.97 ± 0.07	3.14 ± 0.13	2139.7 ± 530.5
2021-05-24	23:16:58	34.6948	98.1654	7.454	2.6	193	$1.66 \pm 0.28 \times 10^{14}$	0.94 ± 0.16	2.09 ± 0.13	150.6 ± 81.4
2021-05-25	0:33:24	34.7096	98.009	6.955	2.6	175	$7.50 \times 10^{13} \pm 5.37 \times 10^{15}$	1.27 ± 0.54	2.09 ± 0.29	170.8 ± 1242.2
2021-05-25	4:46:23	34.7658	97.8436	9.622	2.8	174	$1.44 \pm 0.36 \times 10^{14}$	1.25 ± 0.23	2.44 ± 0.17	308.9 ± 184.2
2021-05-25	6:46:51	34.4625	99.2309	7.973	3.0	214	$2.63 \pm 0.43 \times 10^{14}$	1.29 ± 0.11	2.69 ± 0.13	616.1 ± 185.3
2021-05-25	9:30:38	34.4574	99.1763	12.908	3.0	213	$2.85 \pm 4.06 \times 10^{14}$	1.10 ± 0.13	2.69 ± 0.12	419.9 ± 618.6
2021-05-25	19:30:58	34.7101	98.1122	11.964	2.5	194	$1.34 \pm 0.24 \times 10^{14}$	1.05 ± 0.18	2.67 ± 0.19	171.4 ± 93.0
2021-05-26	5:54:10	34.6451	98.4647	11.03	3.6	198	$7.66 \pm 0.43 \times 10^{14}$	1.44 ± 0.07	3.46 ± 0.14	2505.7 ± 409.5
2021-05-26	5:54:10	34.6452	98.4631	10.949	3.5	198	$7.52 \pm 0.34 \times 10^{14}$	1.44 ± 0.06	3.46 ± 0.13	2500.3 ± 341.4
2021-05-26	17:45:25	34.4709	98.9428	12.174	2.9	207	$1.45 \pm 6.04 \times 10^{14}$	1.69 ± 0.25	3.35 ± 0.26	771.9 ± 3240.7
2021-05-26	22:14:07	34.7237	98.0679	10.51	2.6	176	$7.03 \pm 1.88 \times 10^{13}$	1.42 ± 0.27	2.50 ± 0.23	219.8 ± 138.5
2021-05-27	7:48:10	34.7222	98.0819	13.158	2.7	193	$2.22 \pm 0.22 \times 10^{14}$	0.99 ± 0.10	2.43 ± 0.09	240.7 ± 78.2
2021-05-27	11:48:03	34.6384	98.4752	7.603	2.8	198	$2.74 \pm 0.54 \times 10^{14}$	1.12 ± 0.20	2.09 ± 0.17	420.2 ± 243.6
2021-05-27	13:06:07	34.4453	99.1597	8.843	4.9	215	$1.25 \pm 0.11 \times 10^{16}$	0.73 ± 0.05	3.19 ± 0.09	5417.9 ± 1134.5
2021-05-27	22:03:19	34.7285	98.0607	10.866	2.6	186	$1.26 \pm 0.24 \times 10^{14}$	0.97 ± 0.17	2.19 ± 0.16	127.9 ± 71.9
2021-05-28	1:16:39	34.6522	98.3928	7.343	2.8	201	$2.80 \pm 0.76 \times 10^{14}$	0.89 ± 0.19	2.26 ± 0.18	216.6 ± 148.2

References

- Abercrombie R E. 1995. Earthquake source scaling relationships from -1 to $5 M_L$ using seismograms recorded at 2.5-km depth. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100 (B12): 24015-24036.
- Abercrombie R E. 2014. Stress drops of repeating earthquakes on the San Andreas Fault at Parkfield. *Geophysical Research Letters*, 41(24): 8784-8791, doi: 10.1002/2014GL062079.
- Abercrombie R E. 2015. Investigating uncertainties in empirical Green's function analysis of earthquake source parameters. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(6): 4263-4277, doi:10.1002/2015JB011984.
- Abercrombie R E, Bannister S, Ristau J, et al. 2017. Variability of earthquake stress drop in a subduction setting, the Hikurangi Margin, New Zealand. *Geophysical Journal International*, 208 (1): 306-320, doi: 10.1093/gji/ggw393.
- Abercrombie R E. 2021. Resolution and uncertainties in estimates of earthquake stress drop and energy release. *Phil. Trans. Roy. Soc. A*, 379(2196): 20200131, doi: 10.1098/rsta.2020.0131.
- Abercrombie R E, Trugman D T, Shearer P M, et al. 2021. Does earthquake stress drop increase with depth in the crust?. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126 (10): e2021JB022314, doi: 10.1029/2021JB022314.
- Aki K. 1967. Scaling law of seismic spectrum. *Journal of Geophysical Research*, 72(4): 1217-1231.
- Aki K. 1984. Asperities, barriers, characteristic earthquakes and strong motion prediction. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B7): 5867-5872.
- Allmann B P, Shearer P M. 2007. Spatial and temporal stress drop variations in small earthquakes near Parkfield, California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112 (B4): B04305, doi: 10.1029/2006JB004395.
- Allmann B P, Shearer P M. 2009. Global variations of stress drop for moderate to large earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B1): B01310, doi: 10.1029/2008JB005821.
- Bao X W, Song X D, Li J T. 2015. High-resolution lithospheric structure beneath mainland China from ambient noise and

- earthquake surface-wave tomography. *Earth and Planetary Science Letters*, 417: 132-141, doi: 10.1016/j.epsl.2015.02.024.
- Bethmann F, Deichmann N, Mai P M. 2011. Scaling relations of local magnitude versus moment magnitude for sequences of similar earthquakes in Switzerland. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(2): 515-534, doi: 10.1785/0120100179.
- Boatwright J. 1980. A spectral theory for circular seismic sources; simple estimates of source dimension, dynamic stress drop, and radiated seismic energy. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 70(1): 1-27.
- Boyd O S, McNamara D E, Hartzell S, et al. 2017. Influence of lithostatic stress on earthquake stress drops in North America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(2): 856-868, doi: 10.1785/0120160219.
- Brune J N. 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 75(26): 4997-5009.
- Campillo M, Plantet J L, Bouchon M. 1985. Frequency-dependent attenuation in the crust beneath Central France from Lg waves; Data analysis and numerical modeling. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75(5): 1395-1411.
- Cao X L, Chang L J, Lu L Y, et al. 2022. Variations of shear wave splitting in the source region of the Madoi $M_s7.4$ earthquake, Qinghai. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 65(5): 1644-1659, doi: 10.6038/cjg2022P0944.
- Chen K J, Avouac J P, Geng J H, et al. 2022. The 2021 $M_w7.4$ Madoi earthquake: an archetype bilateral slip-pulse rupture arrested at a splay fault. *Geophysical Research Letters*, 49(2): e2021GL095243, doi: 10.1029/2021GL095243.
- Cocco M, Tinti E, Cirella A. 2016. On the scale dependence of earthquake stress drop. *Journal of Seismology*, 20(4): 1151-1170, doi: 10.1007/s10950-016-9594-4.
- Dahlen F A. 1974. On the ratio of P-wave to S-wave corner frequencies for shallow earthquake sources. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 64(4): 1159-1180.
- Efron B. 1983. Estimating the error rate of a prediction rule; improvement on cross-validation. *Journal of the American Statistical Association*, 78(382): 316-331.
- Eshelby J D. 1957. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems. *Proc. Roy. Soc. London Ser. A*, 241(1226): 376-396.
- Fan G W, Lay T. 2002. Characteristics of Lg attenuation in the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B10): 2256, doi: 10.1029/2001JB000804.
- Feng Y S, Xiong X, Shan B, et al. 2022. Coulomb stress changes due to the 2021 $M_s7.4$ Madoi Earthquake and expected seismicity rate changes in the surroundings. *Science China Earth Sciences*, 65(4): 675-686, doi: 10.1007/s11430-021-9882-8.
- Folesky J, Kummerow J, Shapiro S A. 2021. Stress drop variations in the region of the 2014 $M_w8.1$ Iquique earthquake, northern Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(4): e2020JB020112, doi: 10.1029/2020JB020112.
- Furumura T, Hong T K, Kennett B L N. 2014. Lg wave propagation in the area around Japan; observations and simulations. *Progress in Earth and Planetary Science*, 1(1): 10, doi: 10.1186/2197-4284-1-10.
- Gao Z Y, Li Y C, Shan X J, et al. 2021. Earthquake magnitude estimation from high-rate GNSS data: a case study of the 2021 $M_w7.3$ Madoo earthquake. *Remote Sensing*, 13(21): 4478, doi: 10.3390/rs13214478.
- Goebel T H W, Hauksson E, Shearer P M, et al. 2015. Stress-drop heterogeneity within tectonically complex regions; a case study of San Geronio Pass, southern California. *Geophysical Journal International*, 202(1): 514-528, doi: 10.1093/gji/ggv160.
- Goertz-Allmann B P, Edwards B, Bethmann F, et al. 2011. A new empirical magnitude scaling relation for Switzerland. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(6): 3088-3095, doi: 10.1785/0120100291.
- Guo R M, Yang H F, Li Y, et al. 2021. Complex slip distribution of the 2021 $M_w7.4$ Madoo, China, earthquake: an event occurring on the slowly slipping fault. *Seismological Research Letters*, 93(2A): 653-665, doi: 10.1785/0220210226.
- Haar L C, Mueller C S, Fletcher J B, et al. 1986. Comments on "Some recent Lg phase displacement spectral densities and their implications with respect to prediction of ground motions in Eastern North America" by R. Street. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 76(1): 291-295.
- Hanks T C, Kanamori H. 1979. A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84(B5): 2348-2350.
- Hauksson E. 2015. Average stress drops of southern California earthquakes in the context of crustal geophysics; implications for fault zone healing. *Pure and Applied Geophysics*, 172(5): 1359-1370, doi: 10.1007/s00024-014-0934-4.
- He L J, Feng G C, Wu X X, et al. 2021a. Coseismic and early postseismic slip models of the 2021 $M_w7.4$ Madoo earthquake (western China) estimated by space-based geodetic data. *Geophysical Research Letters*, 48(24): e2021GL095860, doi: 10.1029/2021GL095860.
- He X, Zhao L F, Xie X B, et al. 2018. High-precision relocation and event discrimination for the 3 September 2017 underground nuclear explosion and subsequent seismic events at the North Korean test site. *Seismological Research Letters*, 89(6): 2042-2048, doi: 10.1785/0220180164.
- He X, Zhao L F, Xie X B, et al. 2020. Stress drop assessment of the August 8, 2017, Jiuzhaigou earthquake sequence and its tectonic implications. *Earthquake Science*, 33(4): 161-176, doi: 10.29382/eqs-2020-0161-01.
- He X, Zhao L F, Xie X B, et al. 2021b. Weak crust in southeast Tibetan Plateau revealed by Lg-wave attenuation tomography: implications for crustal material escape. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(3): e2020JB020748, doi: 10.1029/2020JB020748.
- He X, Zhao L F, Xie X B, et al. 2023. Eastward expansion of the Tibetan plateau: Insights from stress drops of the 2021 $M_s6.4$

- Yangbi, Yunnan and $M_{\text{S}}7.4$ Maduo, Qinghai earthquake sequences in China. *Frontiers in Earth Science*, 11: 1081605, doi: 10.3389/feart.2023.1081605.
- Hong S Y, Liu M, Liu T, et al. 2022. Fault source model and stress changes of the 2021 $M_{\text{W}}7.4$ Maduo earthquake, China, constrained by InSAR and GPS measurements. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 112(3): 1284-1296, doi: 10.1785/0120210250.
- Hua W, Chen Z L, Zheng S H. 2009. A study on segmentation characteristics of aftershock source parameters of Wenchuan $M8.0$ earthquake in 2008. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(2): 365-371.
- Huang Y H, Ellsworth W L, Beroza G C. 2017. Stress drops of induced and tectonic earthquakes in the central United States are indistinguishable. *Science Advances*, 3(8): e1700772, doi: 10.1126/sciadv.1700772.
- Ide S, Beroza G C, Prejean S G, et al. 2003. Apparent break in earthquake scaling due to path and site effects on deep borehole recordings. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B5): 2271, doi: 10.1029/2001JB001617.
- Ji C, Archuleta R J, Wang Y F. 2022. Variability of spectral estimates of stress drop reconciled by radiated energy. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 112(4): 1871-1885, doi: 10.1785/0120210321.
- Jin Z Y, Fialko Y. 2021. Coseismic and early postseismic deformation due to the 2021 $M7.4$ Maduo (China) earthquake. *Geophysical Research Letters*, 48(21): e2021GL095213, doi: 10.1029/2021GL095213.
- Kanamori H. 1986. Rupture process of subduction-zone earthquakes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14: 293-322.
- Kaneko Y, Shearer P M. 2014. Seismic source spectra and estimated stress drop derived from cohesive-zone models of circular subshear rupture. *Geophysical Journal International*, 197(2): 1002-1015, doi: 10.1093/gji/ggu030.
- Kennett B L N. 1989. On the nature of regional seismic phases-I. Phase representations for Pn, Pg, Sn, Lg. *Geophysical Journal*, 98(3): 447-456.
- Kirkpatrick S, Gelatt C D, Vecchi M P. 1983. Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598): 671-680.
- Kreemer C, Blewitt G, Klein E C. 2014. A geodetic plate motion and Global Strain Rate Model. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(10): 3849-3889, doi:10.1002/2014GC005407.
- Li Y L, Wang C S, Dai J G, et al. 2015. Propagation of the deformation and growth of the Tibetan-Himalayan orogen: A review. *Earth-Science Reviews*, 143: 36-61, doi: 10.1016/j.earscirev.2015.01.001.
- Li Z F, Zhou B G. 2015. Analysis on the meaning of the asperity and barrier located on the seismic fault plane. *Recent Developments in World Seismology* (in Chinese), (5): 22-27, doi: 10.3696/j.issn.0235-4975.2015.05.005.
- Liang M J, Zhou R J, Yan L, et al. 2014. The relationships between neotectonic activity of the middle segment of Dari fault and its geomorphological response, Qinghai province, China. *Seismology and Geology* (in Chinese), 36(1): 28-38, doi: 10.3969/j.issn.0263-4967.2014.01.003.
- Liu C Y, Bai L, Hong S Y, et al. 2021. Coseismic deformation of the 2021 $M_{\text{W}}7.4$ Maduo earthquake from joint inversion of InSAR, GPS, and teleseismic data. *Earthquake Science*, 34(5): 436-446, doi: 10.29382/eqs-2021-0050.
- Liu J, Zheng S H, Huang Y L. 2003. The inversion of non-elasticity coefficient, source parameters, site response using genetic algorithms. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 25(2): 211-218.
- Liu J H, Hu J, Li Z W, et al. 2022. Complete three-dimensional coseismic displacements due to the 2021 Maduo earthquake in Qinghai Province, China from Sentinel-1 and ALOS-2 SAR images. *Science China Earth Sciences*, 65(4): 687-697, doi: 10.1007/s11430-021-9868-9.
- Liu X W, Chen Q, Yang Y H, et al. 2022. The 2021 $M_{\text{W}}7.4$ Maduo earthquake: coseismic slip model, triggering effect of historical earthquakes and implications for adjacent fault rupture potential. *Journal of Geodynamics*, 151: 101920, doi: 10.1016/j.jog.2022.101920.
- Ma X, Zhao L F, Xie X B, et al. 2023. Warm versus cold crust in the Tien Shan orogenic belt revealed by seismic Lg attenuation tomography. *Geophysical Journal International*, 233(3): 2142-2154, doi: 10.1093/gji/ggad055.
- Madariaga R. 1976. Dynamics of an expanding circular fault. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 66(3): 639-666.
- Mayeda K, Malagnini L, Walter W R. 2007. A new spectral ratio method using narrow band coda envelopes: Evidence for non-self-similarity in the Hector Mine sequence. *Geophysical Research Letters*, 34(11): L11303, doi: 10.1029/2007GL030041.
- Mildon Z K, Roberts G P, Faure Walker J P, et al. 2019. Coulomb pre-stress and fault bends are ignored yet vital factors for earthquake triggering and hazard. *Nature Communications*, 10: 2744, doi: 10.1038/s41467-019-10520-6.
- Munafò I, Malagnini L, Chiaraluce L. 2016. On the relationship between M_{W} and M_{L} for small earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(5): 2402-2408, doi: 10.1785/0120160130.
- Munguía L, Brune J N. 1984. High stress drop events in the Victoria, Baja California earthquake swarm of 1978 March. *Geophysical Journal International*, 76(3): 725-752.
- Ni S D, Wang W T, Li L. 2010. The April 14th, 2010 Yushu earthquake, a devastating earthquake with foreshocks. *Science China Earth Sciences*, 53(6): 791-793, doi: 10.1007/s11430-010-0083-2.
- Nuttli O W. 1973. Seismic wave attenuation and magnitude relations for eastern North America. *Journal of Geophysical Research*, 78(5): 876-885.
- Ottmøller L. 2002. Lg wave Q tomography in Central America. *Geophysical Journal International*, 150(1): 295-302.
- Ottmøller L, Shapiro N M, Singh S K, et al. 2002. Lateral variation of Lg wave propagation in southern Mexico. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B1): ESE 3-1 - ESE 3-13, doi: 10.

- 1029/2001JB000206.
- Ottmøller L, Havskov J. 2003. Moment magnitude determination for local and regional earthquakes based on source spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(1): 203-214, doi: 10.1785/0120010220.
- Paige C C, Saunders M A. 1982. LSQR: an algorithm for sparse linear equations and sparse least squares. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 8(1): 43-71.
- Pan J W, Bai M K, Li C, et al. 2021. Coseismic surface rupture and seismogenic structure of the 2021-05-22 Maduo (Qinghai) M_s 7.4 earthquake. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 95(6): 1655-1670.
- Pan J W, Li H B, Chevalier M L, et al. 2022. Co-seismic rupture of the 2021, M 7.4 Maduo earthquake (northern Tibet): Short-cutting of the Kunlun fault big bend. *Earth and Planetary Science Letters*, 594: 117703, doi: 10.1016/j.epsl.2022.117703.
- Pasyanos M E, Matzel E M, Walter W R, et al. 2009. Broad-band Lg attenuation modelling in the Middle East. *Geophysical Journal International*, 177(3): 1166-1176, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04128.x.
- Phillips W S, Hartse H E, Taylor S R, et al. 2000. 1 Hz Lg Q tomography in Central Asia. *Geophysical Research Letters*, 27(20): 3425-3428.
- Prieto G A, Shearer P M, Vernon F L, et al. 2004. Earthquake source scaling and self-similarity estimation from stacking P and S spectra. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B8): B08310, doi: 10.1029/2004JB003084.
- Ren J J, Zhang Z W, Gai H L, et al. 2021. Typical Riedel shear structures of the coseismic surface rupture zone produced by the 2021 M_w 7.3 Maduo earthquake, Qinghai, China, and the implications for seismic hazards in the block interior. *Natural Hazards Research*, 1(4): 145-152, doi: 10.1016/j.nhres.2021.10.001.
- Ren J J, Xu X W, Zhang G W, et al. 2022. Coseismic surface ruptures, slip distribution, and 3D seismogenic fault for the 2021 M_w 7.3 Maduo earthquake, central Tibetan Plateau, and its tectonic implications. *Tectonophysics*, 827: 229275, doi: 10.1016/j.tecto.2022.229275.
- Ringdal F, Marshall P D, Alewine R W. 1992. Seismic yield determination of Soviet underground nuclear explosions at the Shagan river test site. *Geophysical Journal International*, 109(1): 65-77.
- Sarkar S, Jaiswal N, Singh C, et al. 2021. Source spectral studies using Lg wave in western Tibet. *Journal of Seismology*, 25(2): 625-638, doi: 10.1007/s10950-020-09971-y.
- Sato T, Hirasawa T. 1973. Body wave spectra from propagating shear cracks. *Journal of Physics of the Earth*, 21(4): 415-431.
- Schlittenhardt J. 2001. Teleseismic Lg of Semipalatinsk and Novaya Zemlya nuclear explosions recorded by the GRF (Gräfenberg) array: Comparison with regional Lg (BRV) and their potential for accurate yield estimation. *Pure and Applied Geophysics*, 158(11): 2253-2274, doi: 10.1007/PL00001148.
- Shaw B E, Richards-Dinger K, Dieterich J H. 2015. Deterministic model of earthquake clustering shows reduced stress drops for nearby aftershocks. *Geophysical Research Letters*, 42(21): 9231-9238, doi: 10.1002/2015GL066082.
- Shearer P M, Prieto G A, Hauksson E. 2006. Comprehensive analysis of earthquake source spectra in southern California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B6): B06303, doi: 10.1029/2005JB003979.
- Shearer P M, Abercrombie R E, Trugman D T, et al. 2019. Comparing EGF methods for estimating corner frequency and stress drop from P wave spectra. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(4): 3966-3986 doi: 10.1029/2018JB016957.
- Shearer P M, Abercrombie R E, Trugman D T. 2022. Improved stress drop estimates for M 1.5 to 4 earthquakes in southern California from 1996 to 2019. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(7): e2022JB024243, doi: 10.1029/2022JB024243.
- Shen L, Zhao L F, Xie X B, et al. 2023. Stress drops calculated from seismic Lg-waves and their applications for investigating the typical earthquake sequences in the eastern margin of the Tibetan Plateau. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics* (in Chinese), 54(5): 512-531, doi: 10.19975/j.dqyxx.2022-038.
- Street R. 1984. Some recent Lg phase displacement spectral densities and their implications with respect to the prediction of ground motions in Eastern North America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 74(2): 757-762.
- Street R L, Herrmann R B, Nuttli O W. 1975. Spectral characteristics of the Lg wave generated by central United States earthquakes. *Geophysical Journal International*, 41(1): 51-63.
- Sumy D F, Neighbors C J, Cochran E S, et al. 2017. Low stress drops observed for aftershocks of the 2011 M_w 5.7 Prague, Oklahoma, earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(5): 3813-3834, doi: 10.1002/2016jb013153.
- Tapponnier P, Xu Z Q, Roger F, et al. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. *Science*, 294(5547): 1671-1677, doi: 10.1126/science.105978.
- Tocheport A, Rivera L, van der Woerd J. 2006. A study of the 14 November 2001 Kokoxili earthquake: history and geometry of the rupture from teleseismic data and field observations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(5): 1729-1741, doi: 10.1785/0120050200.
- Trugman D T, Shearer P M. 2017. Application of an improved spectral decomposition method to examine earthquake source scaling in Southern California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(4): 2890-2910, doi: 10.1002/2017jb013971.
- Trugman D T. 2020. Stress-drop and source scaling of the 2019 Ridgecrest, California, earthquake sequence. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 110(4): 1859-1871 doi: 10.1785/0120200009.
- Wang D J, Wang D Z, Zhao B, et al. 2022. 2021 Qinghai Madoi M_w 7.4 earthquake coseismic deformation field and fault-slip distribution using GNSS observations. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 65(2): 537-551, doi: 10.6038/cjg2022P0568.
- Wang S, Song C, Li S S, et al. 2022. Resolving co- and early post-seismic slip variations of the 2021 M_w 7.4 Madoi earthquake in east Bayan Har block with a block-wide distributed deformation

- mode from satellite synthetic aperture radar data. *Earth Planet. Phys.*, 6(1):108-122, doi: 10.26464/epp2022007.
- Wang W L, Fang L H, Wu J P, et al. 2021. Aftershock sequence relocation of the 2021 $M_s7.4$ Maduo Earthquake, Qinghai, China. *Science China Earth Sciences*, 64(8): 1371-1380, doi: 10.1007/s11430-021-9803-3.
- Wang W M, He J K, Wang X, et al. 2022. Rupture process models of the Yangbi and Maduo earthquakes that struck the eastern Tibetan Plateau in May 2021. *Science Bulletin*, 67(5): 466-469, doi: 10.1016/j.scib.2021.11.009.
- Wu W W, Wu P, Wei Y L, et al. 2017. Regional characteristics of stress state of main seismic active faults in mid-northern part of Sichuan-Yunnan block. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 60(5): 1735-1745, doi: 10.6038/cjg20170511.
- Wu W W, Long F, Liang M J, et al. 2020. Spatial and temporal variations in earthquake stress drops between the 2008 Wenchuan and 2013 Lushan earthquakes. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 94(5): 1635-1650, doi: 10.1111/1755-6724.14582.
- Wu Z L, Chen Y T, Mozaffari P. 1999. Scaling of stress drop and high-frequency fall-off of source spectra. *Acta Seismol. Sinica* (in Chinese), 21(5): 460-468.
- Xie J, Mitchell B J. 1990. Attenuation of multiphase surface waves in the Basin and Range province, part I: Lg and Lg coda. *Geophysical Journal International*, 102(1): 121-137.
- Xie X B, Zhao L F. 2018. The seismic characterization of North Korea underground nuclear tests. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 61(3): 889-904, doi: 10.6038/cjg2018L0677.
- Xu Z G, Liang S S, Zhang G W, et al. 2021. Analysis of seismogenic structure of Madoi, Qinghai $M_s7.4$ earthquake on May 22, 2021. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 64(8): 2657-2670, doi: 10.6038/cjg2021P0390.
- Yang Z Q, Zhao D P, Dong Y P, et al. 2022. Crustal flow and fluids affected the 2021 $M7.4$ Maduo earthquake in Northeast Tibet. *Journal of Asian Earth Sciences*, 225: 105050, doi: 10.1016/j.jseas.2021.105050.
- Yin A, Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. *Annual Review of Earth & Planetary Sciences*, 28: 211-280.
- Yue H, Shen Z K, Zhao Z Y, et al. 2022. Rupture process of the 2021 $M7.4$ Maduo earthquake and implication for deformation mode of the Songpan-Ganzi terrane in Tibetan Plateau. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 119(23): e2116445119, doi: 10.1073/pnas.2116445119.
- Zhan Y, Liang M J, Sun X Y, et al. 2021. Deep structure and seismogenic pattern of the 2021. 5. 22 Madoi (Qinghai) $M_s7.4$ earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 64(7): 2232-2252, doi: 10.6038/cjg2021O0521.
- Zhang G W, Lei J S, Sun C Q. 2014. Relocation of the 12 February 2014 Yutian, Xinjiang, Mainshock ($M_s7.3$) and its aftershock sequence. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(3): 1012-1020, doi: 10.6038/cjg20140330.
- Zhang G W, Li Y J, Hu X P. 2022a. Nucleation mechanism of the 2021 $M_w7.4$ Maduo earthquake, NE Tibetan Plateau: Insights from seismic tomography and numerical modeling. *Tectonophysics*, 839: 229528, doi: 10.1016/j.tecto.2022.229528.
- Zhang L, Zhao L F, Xie X B, et al. 2022b. Lateral variations in crustal Lg attenuation in and around the Hangay Dome, Mongolia. *International Journal of Earth Sciences*, 111(2): 591-606, doi: 10.1007/s00531-021-02131-8.
- Zhang P Z, Deng Q D, Zhang G M, et al. Active tectonic blocks and strong earthquakes in the continent of China. *Science in China (Series S)*, 2003, 46 (Suppl.): 13-24.
- Zhang X, Feng W P, Du H L, et al. 2022c. Supershear rupture during the 2021 $M_w7.4$ Maduo, China, earthquake. *Geophysical Research Letters*, 49(6): e2022GL097984, doi: 10.1029/2022GL097984.
- Zhao C P, Chen Z L, Hua W, et al. 2011. Study on source parameters of small to moderate earthquakes in the main seismic active regions, China mainland. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 54(6): 1478-1489, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.06.007.
- Zhao L F, Xie X B, Wang W M, et al. 2008. Regional seismic characteristics of the 9 October 2006 North Korean nuclear test. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(6): 2571-2589, doi: 10.1785/0120080128.
- Zhao L F, Xie X B, He J K, et al. 2013. Crustal flow pattern beneath the Tibetan Plateau constrained by regional Lg-wave Q tomography. *Earth and Planetary Science Letters*, 383: 113-122, doi: 10.1016/j.epsl.2013.09.038.
- Zhao L F, Mousavi S M. 2018. Lateral variation of crustal Lg attenuation in Eastern North America. *Sci. Rep.*, 8: 7285, doi: 10.1038/s41598-018-25649-5.
- Zhao L F, Xie X B, He X, et al. 2022. Seismic Lg-wave attenuation tomography: method, algorithm, data processing flow and application. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics* (in Chinese), 53(6): 721-744, doi: 10.19975/j.dqyxx.2022-024.
- Zheng X F, Ouyang B, Zhang D N, et al. 2009. Technical system construction of Data Backup Centre for China Seismograph Network and the data support to researches on the Wenchuan earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(5): 1412-1417, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.031.
- Zhu L Y, Ji L Y, Liu C J. 2021. Interseismic slip rate and locking along the Maqin-Maqu Segment of the East Kunlun Fault, Northern Tibetan Plateau, based on Sentinel-1 images. *Journal of Asian Earth Sciences*, 211: 104703, doi: 10.1016/j.jseas.2021.104703.

附中文参考文献

- 曹学来, 常利军, 鲁来玉等. 2022. 2021年青海玛多 $M_s7.4$ 地震震源区横波分裂变化特征. *地球物理学报*, 65(5): 1644-1659, doi: 10.6038/cjg2022P0944.
- 冯雅杉, 熊熊, 单斌等. 2022. 2021年玛多 $M_s7.4$ 地震导致的周边地区库仑应力加载及地震活动性变化. *中国科学: 地球科学*, 52(6): 1100-1112, doi: 10.1360/SSTe-2021-0201.
- 华卫, 陈章立, 郑斯华. 2009. 2008年汶川 8.0级地震序列震源参数分段特征的研究. *地球物理学报*, 52(2): 365-371.

- 李正芳, 周本刚. 2015. 地震断层面上凹凸体和障碍体含义的解析. 国际地震动态, (5): 22-27, doi: 10.3696/j.issn.0235-4975. 2015.05.005.
- 梁明剑, 周荣军, 闫亮等. 2014. 青海达日断裂中段构造活动与地貌发育的响应关系探讨. 地震地质, 36(1): 28-38, doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2014.01.003.
- 刘杰, 郑斯华, 黄玉龙. 2003. 利用遗传算法反演非弹性衰减系数、震源参数和场地响应. 地震学报, 25(2): 211-218.
- 刘计洪, 胡俊, 李志伟等. 2022. 融合哨兵 1 号和 ALOS-2 数据的 2021 年青海玛多地震高精度三维同震形变场研究. 中国科学: 地球科学, 52(5): 882-892, doi: 10.1360/N072021-0172.
- 倪四道, 王伟涛, 李丽. 2010. 2010 年 4 月 14 日玉树地震: 一个有前震的破坏性地震. 中国科学: 地球科学, 40(5): 535-537, doi: 10.1360/zd2010-40-5-535.
- 潘家伟, 白明坤, 李超等. 2021. 2021 年 5 月 22 日青海玛多 $M_s7.4$ 地震地表破裂带及发震构造. 地质学报, 95(6): 1655-1670, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021166.
- 沈琳, 赵连锋, 谢小碧等. 2023. 利用 Lg 波计算地震应力降的方法及在青藏高原东缘典型震例中的应用. 地球与行星物理论评, 54(5): 512-531, doi: 10.19975/j.dqyxx.2022-038.
- 王迪晋, 王东振, 赵斌等. 2022. 2021 年青海玛多 $M_w7.4$ 地震 GNSS 同震形变场及其断层滑动分布. 地球物理学报, 65(2): 537-551, doi: 10.6038/cjg2022P0568.
- 王未来, 房立华, 吴建平. 2021. 2021 年青海玛多 $M_s7.4$ 地震序列精确定位研究. 中国科学: 地球科学, 51(7): 1193-1202, doi: 10.1360/SSTe-2021-0149.
- 吴微微, 吴朋, 魏娅玲等. 2017. 川滇活动块体中-北部主要活动断裂带现今应力状态的分区特征. 地球物理学报, 60(5): 1735-1745, doi: 10.6038/cjg20170511.
- 吴忠良, 陈运泰, Mozaffari P. 1999. 应力降的标度性质与震源谱高频衰减常数. 地震学报, 21(5): 462-468.
- 谢小碧, 赵连锋. 2018. 朝鲜地下核试验的地震学观测. 地球物理学报, 61(3): 889-904.
- 徐志国, 梁姗姗, 张广伟等. 2021. 2021 年 5 月 22 日青海玛多 $M_s7.4$ 地震发震构造分析. 地球物理学报, 64(8): 2657-2670, doi: 10.6038/cjg2021P0390.
- 詹艳, 梁明剑, 孙翔宇等. 2022. 2021 年 5 月 22 日青海玛多 $M_s7.4$ 地震深部环境及发震构造模式. 地球物理学报, 64(7): 2232-2252, doi: 10.6038/cjg2021O0521.
- 张广伟, 雷建设, 孙长青. 2014. 2014 年 2 月 12 日新疆于田 $M_s7.3$ 级地震主震及余震序列重定位研究. 地球物理学报, 57(3): 1012-1020, doi: 10.6038/cjg20140330.
- 张培震, 邓起东, 张国民等. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块. 中国科学: D 辑, 33(S1): 12-20.
- 赵翠萍, 陈章立, 华卫等. 2011. 中国大陆主要地震活动区中小地震震源参数研究. 地球物理学报, 54(6): 1478-1489, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.06.007.
- 赵连锋, 谢小碧, 何焘等. 2022. 地震 Lg 波衰减成像方法、算法、数据处理流程及应用. 地球与行星物理论评, 53(6): 721-744, doi: 10.19975/j.dqyxx.2022-024.
- 郑秀芬, 欧阳飏, 张东宁等. 2009. "国家数字测震台网数据备份中心"技术系统建设及其对汶川大地震研究的数据支撑. 地球物理学报, 52(5): 1412-1417, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.031.

(本文编辑 胡素芳)