

2025年1月7日西藏定日Ms 6.8地震震源破裂过程及余震

分布特征

戴宗辉¹, 高锦瑞², 王鹏^{3*}, 安艳茹⁴, 许亮², 李冬梅¹,
李翠芹¹, 徐长朋¹, 土登次仁²

1. 山东省地震局, 山东济南 250102
2. 西藏自治区地震局, 西藏拉萨 850015
3. 山东石油化工学院, 山东东营 257061
4. 中国地震台网中心, 北京 100045

摘要: 为了解西藏定日 Ms 6.8 地震的破裂机制, 本文利用远震波形反演了主震的破裂过程并采用双差定位方法对地震序列进行了精定位。研究结果显示, 主震破裂过程持续约 22 s, 破裂面沿发震断层向北单侧扩展, 破裂长度约 60 km, 在主震以北约 30 km 附近, 最大滑移量 2.4 m 并在地表形成同震破裂带, 与野外地质调查结果相吻合。余震序列呈南北分带特征, 可大致划分为三个余震丛集区, 其中, 南部和中部丛集区的地震分布表明发震断层较为复杂, 揭示了多条次级断裂的联动活动。早期余震集中分布于主破裂区外围的低滑移区, 与高滑移区 (>1.5 m) 形成空间互补, 符合“应力阴影”效应; 后期余震向南迁移, 并形成 NE-SW 与 NW-SE 向共轭集中区, 揭示震后的多向应力调整过程。结果表明, 区域构造应力场对地震破裂过程具有显著控制作用, 余震分布与主震破裂后的应力调整过程和区域构造密切相关。

关键词: 西藏定日地震; 破裂过程; 精定位; 发震构造

中图分类号: P315

收稿日期: 2025-02-20

Rupture Process and Aftershock Distribution of the Ms 6.8 Earthquake in Dingri, Xizang, on January 7, 2025

Dai Zonghui¹, Gao Jinrui², Wang Peng^{3*}, An Yanru⁴, Xu Liang², Li Dongmei¹,
Li Cuiqin¹, Xu Changpeng¹, Tudeng Ciren²

1. Shandong Earthquake Agency, Jinan 250102, China
2. Earthquake Agency of Tibet Autonomous Region, Lhasa 850015, China
3. Shandong Institute of Petroleum and Chemical Technology, Dongying 257061, China
4. China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract: To investigate the rupture mechanism of the Ms 6.8 earthquake in Dingri, Xizang, we inverted the rupture process of the mainshock using teleseismic waveforms and refined the hypocenter locations of the aftershock sequence through the double-difference relocation method. The results show that the rupture process lasted approximately 22 seconds, with unilateral propagation to the north along the causative fault. The rupture extended for about 60 km, and the maximum slip reached 2.4 meters, located roughly 30 km north of the mainshock, forming a co-seismic surface rupture zone consistent with field geological survey results. The aftershock

基金项目: 中国地震局震情跟踪定向工作任务 (CEA-ZQGZ-202501021); 山东省自然科学基金 (ZR2024MD093)。

作者简介: 戴宗辉 (1988-), 男, 工程师, 从事数字地震学研究. E-mail: daizh1116@163.com. ORCID:0000-0002-6448-7423.

*通讯作者: 王鹏 (1983-), 男, 副教授, 主要从事震源参数等研究. E-mail: wangpengeq@163.com

sequence exhibited a characteristic north-south distribution, which can be roughly divided into three clusters. The earthquake distribution in the southern and central clusters indicates a complex fault structure and suggests the co-seismic activation of multiple secondary faults. Early aftershocks were concentrated in the low-slip regions at the periphery of the main rupture zone, complementary to the high-slip areas (>1.5 m), consistent with the “stress shadow” effect. Subsequent aftershocks migrated southward and formed conjugate clusters trending NE-SW and NW-SE, revealing a multi-directional stress adjustment process during the post-seismic stage. These findings suggest that the regional tectonic stress field plays a significant role in controlling the rupture process, and that the aftershock distribution is closely related to post-rupture stress redistribution and regional tectonics.

Key words: the M_s 6.8 Dingri, Xizang Earthquake; Rupture process; Precise location; Seismogenic structure.

据中国地震台网测定，北京时间 2025 年 1 月 7 日 9 时 5 分，在西藏日喀则市定日县（ 28.50°N , 87.45°E ）发生 M_s 6.8 地震，震源深度 10 km。地震导致长所乡、措果乡等地多处建筑物倒塌破坏，极震区最高烈度 IX 度，共造成 126 人遇难、188 人受伤，约 6.15 万群众不同程度受灾，是近十年来我国致灾程度最高的地震灾害之一。

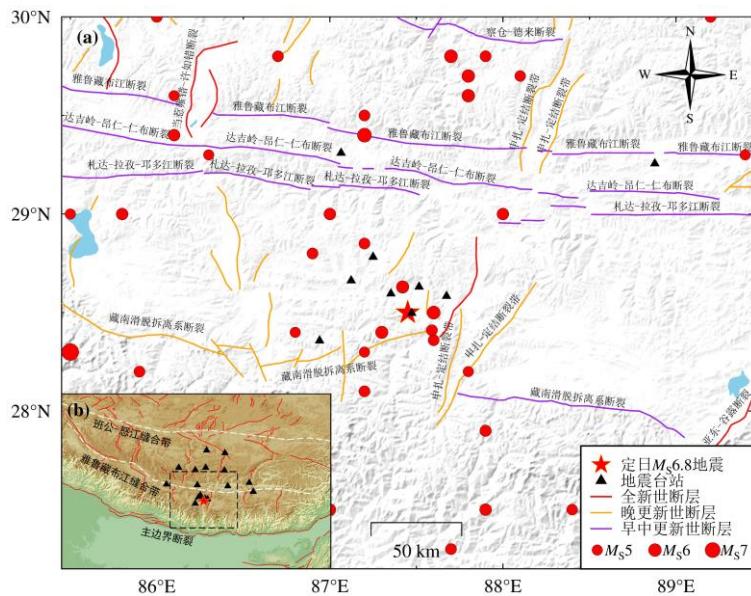


图 1 西藏定日 M_s 6.8 地震附近区域地震构造图

Fig.1 The seismic tectonic map of the area near the M_s 6.8 earthquake in Dingri, Xizang

此次地震发生在青藏高原南部，区域由南向北依次由喜马拉雅地块、拉萨地块和羌塘地块组成，区域构造活动主要受控于印度板块向北俯冲和欧亚板块的挤压作用（吴珍汉等，2005；王国灿等，2010；张佳伟等，2020）。板块间相互作用导致青藏高原中南部发生了大规模东西向伸展和一系列近南北向裂谷（Molnar and Tapponnier, 1978; Armijo et al., 1986; Harrison et al., 1992；张进江和丁林，2003；Taylor and Yin, 2009；张佳伟等，2020）。其中，近南北向裂谷系自西向东主要有隆格尔裂谷、尼玛-定日裂谷、申扎-定结裂谷、亚东-谷露裂谷和桑日-错那裂谷等，它们向南穿过雅鲁藏布缝合带和藏南拆离系，向北贯穿拉萨地块，最终到达羌塘地块（England and Houseman, 1989；张进江和丁林，2003；Gao et al., 2016；白玲等，2025）。此次地震即位于申扎-定结裂谷（张进江和丁林，2003；Wang et al., 2014；田婷婷和吴中海，2023）南段与藏南拆离系（Yang et al., 2009; Chu et al., 2024）的交汇区域（图 1）。申扎-定结裂谷北起申扎县（Wang et al., 2014），中间与格仁错断裂相连，向南穿过雅鲁

藏布江缝合带和藏南拆离系，直至定结县，总长度超过 300 km。申扎-定结裂谷南段的登么错断裂是一条全新世活动的正断层，是登么错地堑东缘的主边界断裂，2015 年尼泊尔 M_s 8.1 地震后该断裂附近地震出现集中活跃（田婷婷和吴中海，2023；李楠等，2024）。根据震后野外地质调查结果，登么错断裂产生了长约 25 km 的不连续同震地表破裂带，同时在登么错湖东岸产生了长约 10 km 的地裂缝密集形变带，据此确认此次定日 M_s 6.8 地震的发震断层为登么错断裂（石峰等，2025）。

基于构造位置的特殊性和致灾程度的严重性，定日 M_s 6.8 地震在国内外引发了广泛关注，不同学者分别从不同角度对此次地震开展了相关研究。根据目前公开发表的研究成果，综合不同研究方法和野外调查结果，普遍认为此次地震发震构造为申扎-定结裂谷系南段的登么错断裂，断层走向近 NS 向，倾向 W，倾角介于 40° - 55° ，断层最大滑移量介于 1.5-6.8 m，断层以正断性质为主，兼有少量走滑性质（石峰等，2025；白玲等，2025；陈鲲等，2025；王楠等，2025；Yu et al., 2025；李雨森等，2025；Kusky et al., 2025）。相关研究揭示，此次地震具有单侧破裂的特征，破裂过程持续约 22 秒，最大能量释放发生在初次破裂后的 11-14 秒，表明地震具有较强的瞬时释放特征（王楠等，2025；Yu et al., 2025；Kusky et al., 2025）；同时，早期余震主要集中在主震破裂区域（Yao et al., 2025；Kusky et al., 2025）。

根据现有研究成果，目前对定日地震的破裂动力学机制及深部构造响应仍存在若干关键科学问题亟待厘清：其一，现有反演结果对断层滑移量的描述仍存在显著差异（1.5-6.8 m）；其二，单侧破裂传播方向与断层的耦合机制尚未明晰，能量释放的时空非均匀性是否受控于断裂带预存障碍体或介质物性突变仍需深入探讨；其三，早期余震分布与主震破裂区的空间对应关系仍需地震精定位数据验证，余震序列迁移规律对潜在应力调整过程的指示意义有待揭示。针对上述问题，本研究将开展震源破裂过程反演与地震序列精定位研究。通过对比精定位余震丛集与反演得到的滑移亏损区域的空间耦合关系，将有助于全面理解地震的发生机制、震后余震活动的动态变化，并为未来类似地震的风险评估和应急响应提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 断层模型

定日 M_s 6.8 地震发生后，国内外多家机构和多位学者迅速给出了此次地震的震源机制解（表 1）。根据震后野外地质调查、InSAR 同震形变场和高清光学遥感解译等方法，确定地表同震破裂带整体呈近 SN 至 NNE 走向（石峰等，2025；王楠等，2025；赵伟华等，2025；李雨森等，2025），与表 1 中节面 II 走向较一致。在上述反演结果中，中国地震台网中心在震源机制解反演过程中，使用了全球宽频带地震台站（GSN）和中国大陆宽频带台站，台站数量更多、方位角覆盖更优，同时作者从历史地震对比、不同机构反演结果对比和不同方法对比等方面开展复核工作（Yang et al., 2024），进一步保证其反演结果具有较高的稳定性和可靠性，因此，本文选择中国地震台网中心发布的震源机制解节面 II（走向 181° ，倾角 51° ，滑动角 -81° ）作为反演震源破裂过程的断层面参数。根据精定位结果（详见下文第 3 节），早期余震整体沿 NS 向分布，长度约 70 km，震源深度主要集中在 0-20 km，基于此，反演区域沿走向和倾向方向分别设置 18 个和 6 个子断层，每个子断层尺寸为 4×4 km。此外，精定位结果显示，主震位于早期余震序列南段 10 km 处，震源深度 5.67 km，因此，将初始破裂点设置在沿走向方向的第 16 个子断层、倾向方向的第 2 个子断层。

表 1 定日地震震源机制解参数

Table 1 Seismic source mechanism parameters of the Dingri earthquake

序号	节面 I			节面 II			地震矩 (10^{19} N·m)	发布机构和作者
	走向 ($^{\circ}$)	倾角 ($^{\circ}$)	滑动角 ($^{\circ}$)	走向 ($^{\circ}$)	倾角 ($^{\circ}$)	滑动角 ($^{\circ}$)		
1	348	40	-100	181	51	-81	-	中国地震台网中心

2	356	42	-88	173	48	-92	5.29	GCMT
3	349	42	-103	187	49	-78	4.749	USGS
4	346	49	-95	174	42	-85	4.0469	张喆等
5	333	43	-112	182	51	-71	-	郭祥云
6	341	51	-113	196	44	-64	7.02	IPGP
7	151	56	-116	12	41	-56	5.0246	GFZ
8	344	45	255	185	47	285	3.3	张勇等
9	331	59	-110	186	36	-60	-	陈鲲等

注 USGS: 美国地质调查局; GCMT: 全球地震矩张量; IPGP: 巴黎地球物理学院;

GFZ: 德国地球科学研究中心

1.2 远震波形数据

在大地震震源破裂过程反演中, 远震波形相较于近震波形, 受局部地形和介质效应的影响较小, 能够提供更加平稳、清晰的震源信息 (Ichinose et al., 2000; Moratto et al., 2017; Yue et al., 2020), 因此本文按震中距 30° - 90° 从地震学联合研究院 (Incorporated Research Institution for Seismology, IRIS) 数据中心下载了全球地震台网 (GSN) 102 个台站的远震宽频带垂直向 P 波波形数据。为尽可能使参与反演的台站均匀分布, 本文首先按照震中距采样间隔 10° 、方位角采样间隔 10° 初步筛选台站, 在数据处理中, 对波形进行去仪器响应和 0.01-0.2Hz 带通滤波, 并筛选信噪比大于 10 的台站, 最终挑选出 29 个台站 (图 2) 参与震源破裂过程反演。

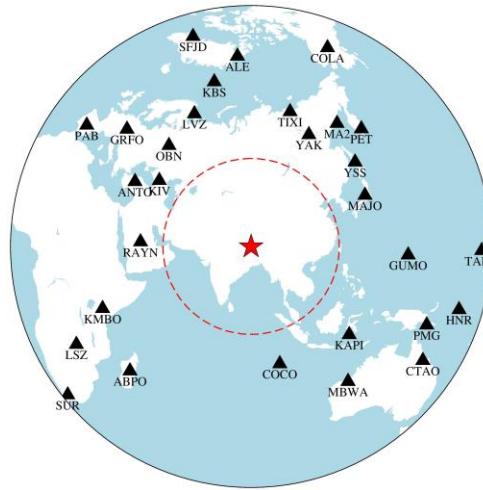


图 2 震源破裂过程反演使用台站分布图

图中红色圆圈表示震中距 30° 范围

Fig.2 Station distribution map used for the inversion of the source rupture process

The red circle in the figure indicates a 30° epicentral distance range.

1.3 震源破裂过程反演方法

本文采用基于有限震源路径近似的波形直接反演方法 (Zhang et al., 2012) 反演震源破裂过程。该方法基于位移表示定理, 将断层面离散为 N 个子断层, 台站 x 处的位移 $U(x, t)$ 与子断层的滑动分布 $M_k(t)$ 之间的关系可以表示为: $U(x, t) = \sum_{k=1}^N [M_k(t) * G_k(x, t)]$ 。式中, $M_k(t)$ 是第 k 个子断层的滑动矩时间函数, 表征子断层的动态破裂特征; $G_k(x, t)$ 为子断层到台站的格林函数, 表征波形传播路径的介质响应; * 表示时间域卷积。基于远场近似假设, 格林函数可通过初始破裂点格林函数的时移简化为: $G_k(x, t) = G_0(x, t - \Delta T_k)$ 。式中, ΔT_k 为子断层 k 相对初始破裂点的破裂传播时差。反演通过构建观测波形 d 与合成波形 Gm 的残差目标函数 $\|d - Gm\|^2$, 并引入空间拉普拉斯光滑约束 ($\lambda_s L_s m$)、时间光滑约束 ($\lambda_t L_t m$) 及标

量地震矩最小化约束, 形成超定线性方程组: $\begin{bmatrix} G \\ \lambda_s L_s \\ \lambda_t L_t \end{bmatrix} m = \begin{bmatrix} d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ 。采用加权最小二乘法求解该

方程, 获得断层滑动时空分布的最优解。通过多台站波形数据的全局拟合与约束优化, 定量揭示断层面的破裂过程特征。图 3 给出了 29 个台站观测波形和反演合成波形的对比图, 可以看出, 观测波形和合成波形的相关性较高, 其中 22 个台站的相关系数在 0.9 以上。

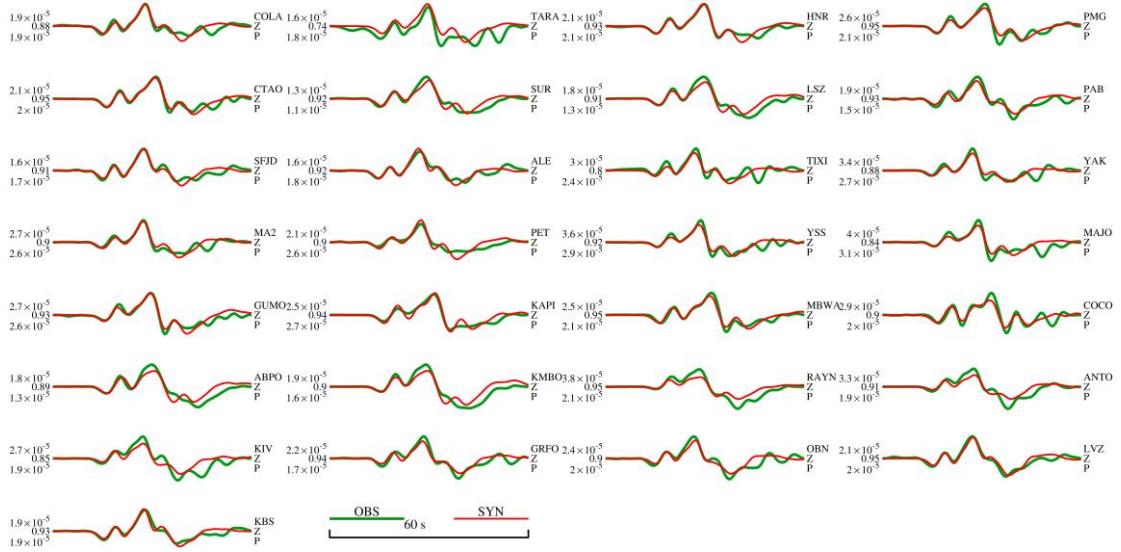


图 3 观测波形与合成波形对比图

图中绿色波形为观测波形, 红色波形为合成波形

Fig.3 Comparison of the observed and synthetic waveforms

The green waveform represents the observed data, while the red waveform represents the synthetic data.

1.4 地震精定位

地震精定位采用双差定位方法 (Waldhauser and Ellsworth, 2000)。本文共收集了 2025 年 1 月 7 日至 2 月 14 日 8 时期间 9367 个地震事件的震相观测报告, 精定位过程中, 设置搜索地震对的最大震源距离为 10 km, 组成事件对的最少震相对数为 5 个, 地震事件的最大邻居数为 20 个, 参与精定位的台站来自震中附近 300 km 范围内 (图 1)。

2 震源破裂过程反演结果

在震源破裂过程反演中, 视震源时间函数的波形特征与方位分布特性是揭示破裂时空演化规律的关键数据依据 (张勇等, 2010)。图 4 给出了参与破裂过程反演的 29 个台站的视震源时间函数 (图 4a) 及其平均结果 (图 4b)。从图 4a 可见, 不同台站视震源时间函数具有较为一致的形态特征, 所有记录均表现为由三个子事件构成的复合型视震源时间函数。值得注意的是, 代表三个子事件的波峰到时表现出随方位角的系统性变化, 这种符合破裂前缘多普勒效应的特征揭示出三个子事件的单侧破裂传播特性, 优势方向为近 N 向。

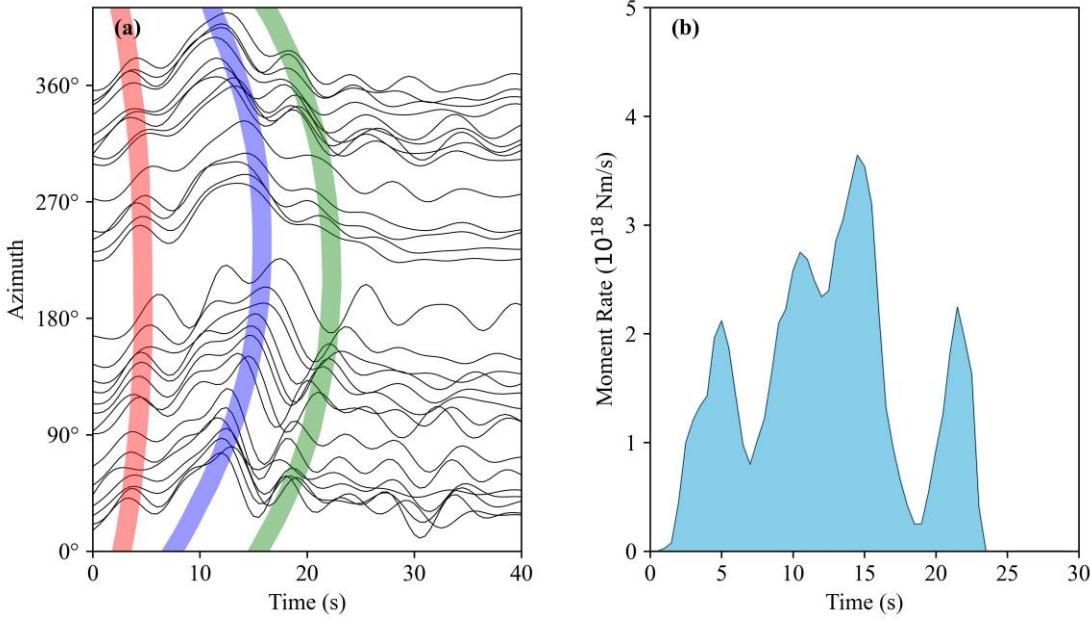


图 4 不同台站视震源时间函数和平均震源时间函数

三条彩色半透明曲线标注了三个波峰的位置

Fig.4 Apparent source time functions and the average source time function at different stations

Three colorful semi-transparent curves mark the positions of the three peaks.

图 4b 中平均震源时间函数进一步量化了破裂过程的阶段性特征。整个破裂过程持续了约 22 s，与陈鲲等（2025）和 Yu 等（2025）的结果基本一致。依据地震矩释放率的演化特征，可将破裂过程划分为三个阶段：第一阶段（1-7 s）表现为低地震矩释放率的破裂起始阶段，累计释放约 15% 的总地震矩；第二阶段（7-18 s）为能量集中释放的主破裂期，其地震矩释放速率在 15 s 达到峰值 $3.64 \times 10^{18} \text{ N}\cdot\text{m}/\text{s}$ ，贡献了全事件 65% 的地震矩；第三阶段（18-23 s）显示矩释放速率快速衰减，完成剩余 20% 的能量释放。此外，从破裂过程第二阶段的震源时间函数来看，该过程又存在两个子破裂事件。整个破裂过程释放的地震矩约为 $3.73 \times 10^{19} \text{ N}\cdot\text{m}$ ，相当于矩震级 $M_w 7.0$ 。表 1 给出了不同机构和学者发布的地震矩反演结果，其值介于 $3.3 \times 10^{19} \text{ N}\cdot\text{m} - 7.02 \times 10^{19} \text{ N}\cdot\text{m}$ 之间，本文所得结果与之相对一致。不同反演结果存在一定差异，可能源于多重因素。速度模型的低速层厚度偏大或波速值偏高，可能导致破裂尺度被低估，进而导致地震矩被低估（Dreger et al., 2005）；反演参数的设置，如子断层的划分方式、初始破裂点位置和破裂速度等，也会对反演结果造成显著影响；此外，波形滤波范围的差异将导致反演对滑动量幅值的约束不同，如未充分抑制高频噪声，可能低估深部滑移的贡献（Ji et al., 2002），从而造成反演的地震矩偏低。

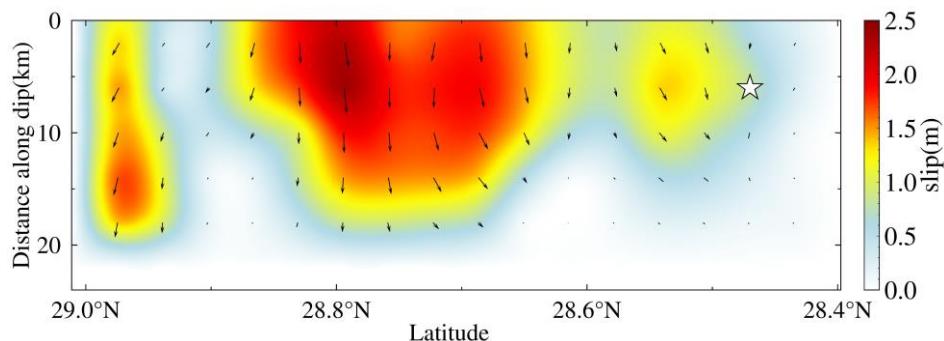


图 5 定日地震断层面静态滑移量分布图

黑色箭头表示滑移方向，白色五角星表示震源（起始破裂点）位置。

Fig.5 Map of static slip distribution on the fault plane for the Dingri earthquake

The black arrows indicate the slip direction, and the white stars represent the location of the seismic source (starting rupture point).

图 5 展示了定日地震断层面的静态滑移量分布，由图 5 可见，定日地震断层面滑移量呈现显著的非均匀分布，破裂范围介于 $28.45^{\circ}\text{N} - 29.0^{\circ}\text{N}$ 之间，沿断层倾角方向向下延伸至 20 km，并且整个破裂区域可以划分为三个滑移集中区域。其中，靠近震源（即起始破裂点）位置的集中区，破裂范围最小，滑移量最小；中间集中区破裂范围最大，滑移量也最大，最大滑移量约 2.4 m，位于 28.8°N 附近；而最北侧滑移集中区的破裂位置相对最深，最大滑移量约 2.0 m。需要特别注意的是，中间滑移集中区显示该区域可能存在地表同震破裂，该结果与石峰等（2025）的野外地质调查结果相吻合。

3 地震精定位结果

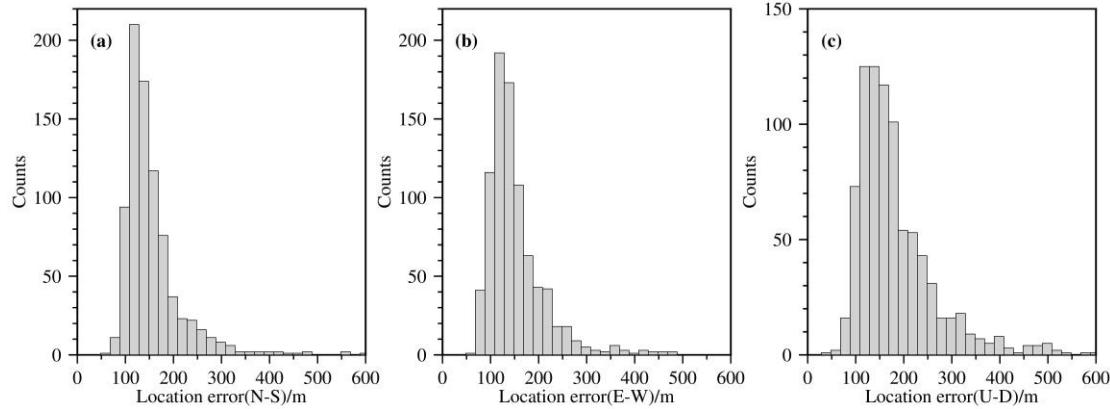


图 6 双差定位误差分布直方图

(a)、(b) 和(c) 分别表示 N-S 向、E-W 向和 Z 垂直向的误差分布。

Fig. 6 Distribution histograms of double-difference hypocenter location errors

(a), (b), and (c) represent the error distributions in the N-S, E-W, and vertical Z directions, respectively.

利用 HypoDD 程序对定日地震序列进行精定位，最终共获得 8210 个地震事件的精定位结果。精定位后震源相对位置精度显著提高，其中，平均水平定位误差由 2.81 km 下降至 0.19 km，平均深度定位误差下降至 0.17 km，平均走时残差由 0.35 s 下降至 0.16 s，相对定位误差统计如图 6 所示。由图 1 可见，地震精定位使用的台站主要集中分布于定日地震序列的北侧，而南侧缺乏足够的定位台站，导致精定位过程中对地震水平位置的约束相对不足；与此同时，余震区正上方架设有流动台站，能够对震源深度提供更强的约束。由于台站分布的不对称性以及流动台站架设在余震区正上方，导致精定位中深度误差小于水平误差。该结果与台站几何分布对定位精度的影响机制相吻合，即在近震中区域，垂直方向的观测对于震源深度的定位具有更好的分辨率。根据精定位结果，定日地震序列展现出复杂的空间分布格局，但整体呈 NS 走向（图 7），其分布特征与 Yao 等（2025）基于深度学习检测和定位的早期余震分布特征较为一致。其中，主震位于北纬 28.470° ，东经 87.512° ，深度 5.67 km。由图 7 可见，在空间分布上，余震呈显著的南北分带特征，可划分为三个具有构造指示意义的地震从集区。南部从集区（区域I）地震优势分布方向为 NW-SE 向，主震位于该从集中间偏东位置；中间从集区（区域II）展现出典型的多级破裂特征，余震在 NE-SW、NW-SE 和近 N-S 向三组优势方向上呈放射状扩展，形成约 $15 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 的三角形分布区，揭示出多组次级断裂的协同作用或共轭破裂机制；北部从集区（区域III）地震分布相对分散，整体呈 NW-SE 向分布。

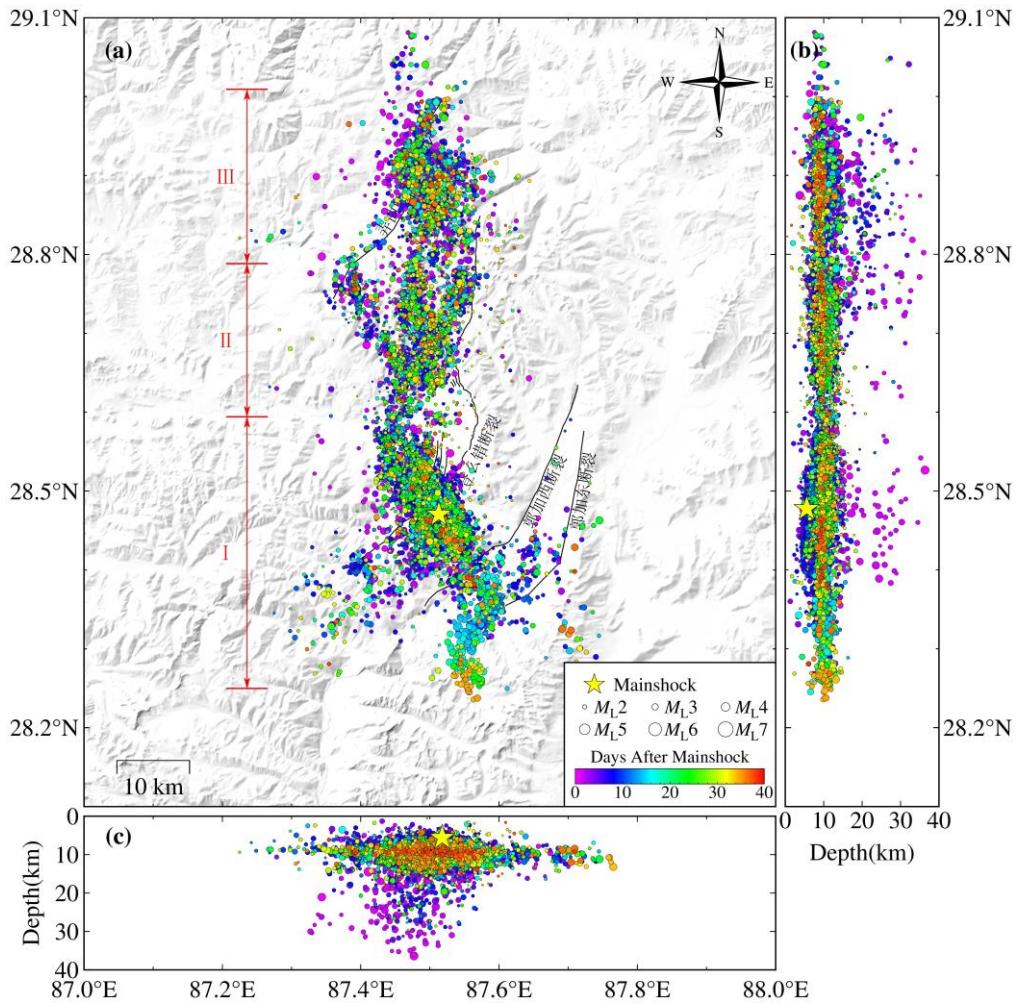


图 7 定日地震序列精定位结果

Fig.7 Precise location results of the Dingri earthquake sequence

4 讨论

4.1 破裂过程的时空演化与发震机制

为深入剖析定日地震的破裂过程，我们绘制了定日地震断层面滑移量随时间变化图（图 8）。结果显示，破裂开始后，破裂由震源位置沿 N 向单侧扩展，整体破裂长度约 60 km，最大滑移量位于震中以北约 30 km 处。在破裂开始 1-7 s 的初始阶段，滑移速率较低，破裂范围局限于震源附近，可能受断层浅部闭锁段或局部介质强度较高的限制；主能量释放阶段（7-18 s）表现为滑移速率的急剧上升，最大滑移量在 28.8°N 附近形成集中区，这一阶段的快速滑移可能触发了断层的脆性破裂，同时破裂向地表延伸，表明该段断层震前具有较高的应力积累；衰减阶段（18-23 s）滑移速率快速下降，破裂向北扩展至 29.0°N（图 5），但滑移量显著减小。

根据现有研究，定日地震附近区域构造学环境表现为近 N-S 向挤压、近 W-E 向拉张的应力结构（Liu, 1985; 李松林等, 1986; Mercier, et al., 1987; 王连捷等, 2006）。破裂方向由南向北延伸，与主压应力方向（近 N-S 向）一致，表明破裂传播受控于区域主压应力的驱动，该一致性可能反映了断裂带在长期应力积累下的优势破裂方向。同时，相关研究指出，青藏高原南部正经历冰后期地壳均衡反弹和侵蚀卸载，导致区域拉张应力增强（Fielding, 1996; Liu and Yang, 2003），这种动力学背景促使 N-S 向登么错断裂发生正断型破裂。以上结果表明，区域构造应力场对此次地震破裂过程的控制作用明显。此外，滑移量分布的显著

非均匀性(图5)可能源于深部介质强度差异等物性突变或预存障碍体的阻挡作用。

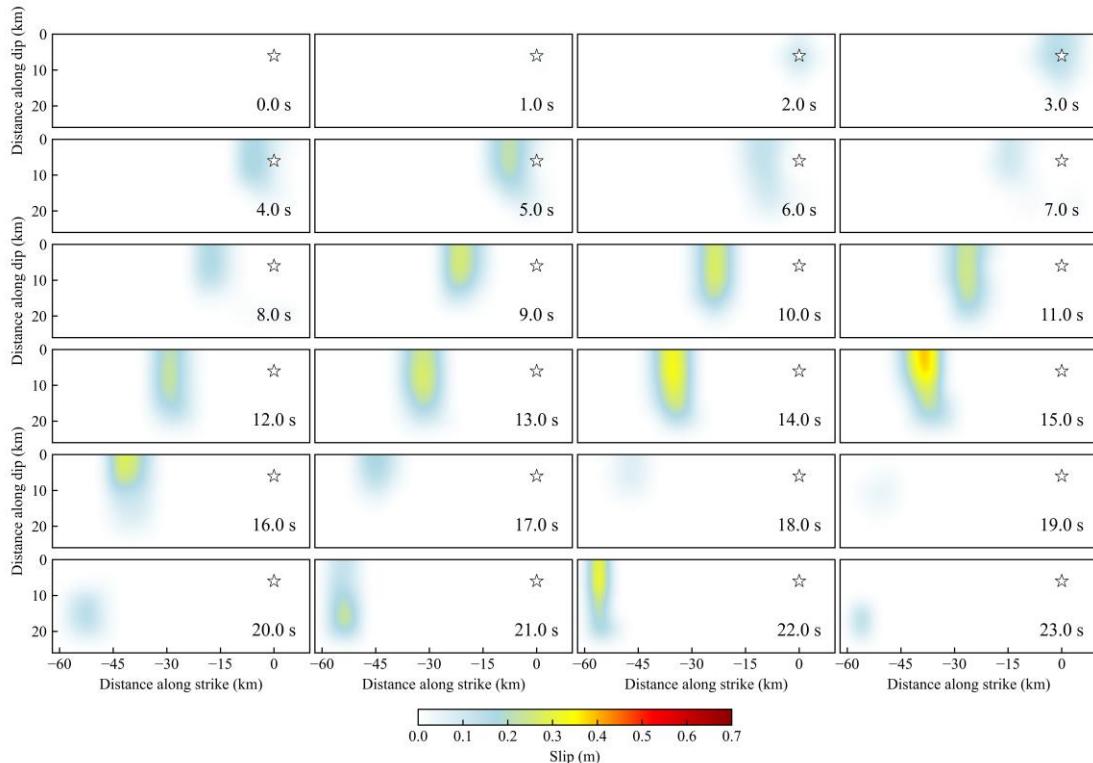


图8 定日地震断层面滑移量随时间变化图

图中五角星为初始破裂点位置，右下角数字为震后时间

Fig.8 Time-dependent slip distribution on the fault plane of the Dingri earthquake

The star symbol represents the initial rupture point, and the numbers in the lower right corner indicate the time since the event.

4.2 余震分布与应力调整过程

余震活动的时空迁移特征是揭示震后应力调整与断层相互作用的关键资料。定日地震余震序列的精定位结果表明，其空间分布与主震破裂区的滑移量分布呈现显著的空间耦合关系(图7、图9)。早期余震(主震后至1月13日20时57分 $M_S 5.0$ 余震前)主要沿主破裂带展布，且密集分布于断层滑移量较低的区域(<1.0 m)，高滑移区域(>1.5 米)与余震活动表现出明显的空间互补性(图9)。这一现象符合“应力阴影”效应理论，即高滑移区因应力释放相对充分而形成低应力区，而低滑移区未完全释放的应力则触发系列余震活动(Felzer and Brodsky, 2005; Liu, et al., 2018)。值得注意的是，在主震破裂过程中，北纬 28.6° 附近区域表现出明显的破裂空段特征，同时该区域余震活动显著稀疏，与周边区域形成鲜明对比。该处破裂空段的存在可能与登么错断裂的几何结构突变密切相关。登么错断裂在该处走向发生明显偏转，形成几何屏障区，这种几何结构的复杂性导致破裂过程的局部不连续，进而形成破裂空段。此外，断层面摩擦特性的空间异质性和应力场的非均匀分布可能也是破裂空段形成的关键因素。在主震破裂过程中，由于断层面摩擦特性的异质性，沿断层面的应力分布往往表现出较强的非均匀性，并且由于该区域断层几何形态的变化，未能集中释放应力，从而形成了滑动空区。随着时间的推移，该区域的应力可能会进一步积累，进而在未来成为新的震源区，诱发新的滑动或地震事件，从而增加该区域的地震风险。1月13日20时57分 $M_S 5.0$ 地震后，余震向南突破主震初始破裂区，形成NE-SW与NW-SE向共轭集中区。南部丛集区(区域I)余震优势方向由NW-SE向转为NE-SW向，可能与藏南拆离系的局部张性应力场重组有关；而北部丛集区(区域III)余震向NW向迁移，可能反映登么错断层与弄曲断层

的构造联动。

此外,从精定位结果不难发现,此次定日地震的发震断层存在明显的分段特征,且不同段构造复杂程度也不尽相同,特别是区域I和区域II存在多支次级断层(图7)。结合震源区位于登木错断裂与藏南拆离系交汇区的构造背景,推测障碍体的应力集中效应和区域断层复杂的几何形态变化可能是进一步调制余震空间迁移的关键因素。

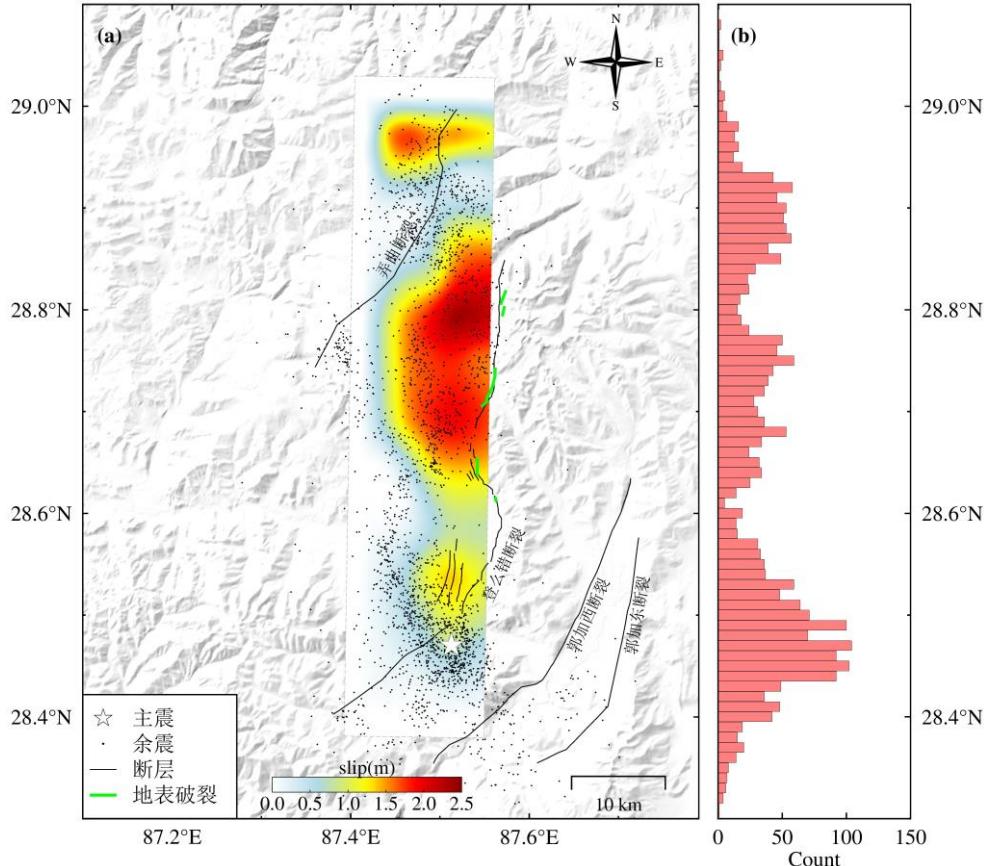


图9 定日地震断层面滑移量和早期余震分布

图(a)中黑色圆点为余震位置,彩色区域为断层面滑移量在地面投影;图(b)为沿纬度地震频次统计;地表破裂数据来自石峰等(2025)

Fig.9 Fault plane slip and the distribution of early aftershocks for the Dingri earthquake

In figure (a), the black dots represent the aftershock locations, and the colored areas represent the projection of fault plane slip onto the ground. Figure (b) shows the seismic frequency statistics along latitude.

5 结论

2025年1月7日西藏定日 M_s 6.8 地震是青藏高原南部近十年来致灾程度最高的地震事件之一。本研究通过震源破裂过程反演与余震序列精定位,系统揭示了此次地震的破裂机制、发震构造特征及震后应力调整过程,主要结论如下:

(1) 震源破裂过程与发震机制

基于远震波形反演和野外地质调查,确认发震断层为申扎-定结裂谷南段的登木错断裂,断层走向近 NS, 倾向 W, 倾角约 51°。主震破裂过程持续约 22 秒, 沿近 N 向单侧破裂, 破裂长度约 60 km, 最大滑移量 2.4 m, 位于震中以北 28.8°N 附近。破裂过程分为三个阶段:初始阶段(1-7 s)以低能量释放为主; 主破裂阶段(7-18 s)集中释放 65% 的地震矩, 滑移速率峰值达 $3.64 \times 10^{18} \text{ N}\cdot\text{m}/\text{s}$; 衰减阶段(18-23 s)完成剩余能量释放。破裂传播方向与区域主压应力(近 N-S 向)一致, 表明印度板块向北俯冲与欧亚板块挤压驱动的拉张应力场是此次地震的主要动力学背景。

(2) 断层滑移分布的非均匀性

断层滑移量呈现显著的空间非均匀性,可划分为三个滑移集中区。中间集中区(28.8°N)滑移量最大且延伸至地表,与野外调查的地表同震破裂带相吻合;北部集中区滑移位置最深,可能与深部介质强度差异或预存障碍体相关。滑移量分布的差异性揭示了断层物性非均一性对破裂传播的调控作用。此外,北纬28.6°附近区域破裂空段的存在,可能与登么错断裂的几何结构突变密切相关,同时印证了断层几何屏障对破裂空段的控制作用。

(3) 余震分布与应力调整

精定位结果显示,余震序列呈南北分带特征,大致可划分为三个丛集区:南部丛集(NW-SE向)与主震位置重叠,其南部区域在余震活动后期存在共轭断层活动;中部丛集(多向放射状)反映次级断层协同作用;北部丛集(NW向)分布相对分散。早期余震密集分布于主破裂区外围低滑移区(滑移量<1.0 m),与高滑移区(滑移量>1.5 m)形成空间互补,表明主震破裂区应力卸载充分,残余应力通过余震在低滑移区持续调整。后期余震向南迁移并形成NE-SW与NW-SE向共轭集中区,揭示震后应力场向多向扩展的动态调整过程。

致谢:两位评审专家对本文提出的中肯意见和建议极大提升了文章质量,本文使用的远震波形数据来自地震学联合研究院(I Incorporated Research Institution for Seismology, IRIS)数据中心,震源破裂过程反演使用了北京大学张勇教授提供的Ruptel 2.1程序(Zhang et al., 2012),在文章修改过程中,中国地震台网中心杨志高博士、山东省地震局郑建常研究员提出了宝贵建议,在此一并表示感谢。

References

- Armijo, R., Tapponnier P., Mercier J. L., et al., 1986. Quaternary Extension in Southern Tibet: Field Observations and Tectonic Implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91(B14): 13803-13872. doi:10.1029/JB091iB14p13803.
- Bai, L., Chen, Z. W., Wang, S. J., 2025. The 2025 Dingri Ms6.8 Earthquake in Xizang: Analysis of Tectonic Background and Discussion of Source Characteristics. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 56(0): 1-6 (in Chinese with English abstract). doi:10.19975/j.dqyxx.2025-006.
- Chen, K., Yang, T., Wang, Y. Z., et al., 2025. Quick Output Parameters Related to the 7 January 2025 M6.8 Earthquake in Dingri County Shigatse City Xizang. *Progress in Earthquake Sciences*, 55(0):1-8 (in Chinese with English abstract). doi:10.19987/j.dzkxjz.2025-004.
- Chu, Y., Guo, Y. L., Liu, T. J., 2024. South Tibetan Detachment System Activity and Leucogranite Emplacement: Insights from the Shisha Pangma Regions. *Acta Petrologica Sinica*, 40(5): 1461-1474 (in Chinese with English abstract). doi:10.18654/1000-0569/2024.05.08.
- Dreger, D. S., Gee, L., Lombard, P., et al., 2005. Rapid Finite-source Analysis and Near-fault Strong Ground Motions: Application to the 2003 Mw 6.5 San Simeon and 2004 Mw 6.0 Parkfield Earthquakes. *Seismological Research Letters*, 76 (1): 40-48. doi:10.1785/gssrl.76.1.40.
- England, P., Houseman G., 1989. Extension During Continental Convergence, with Application to the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B12): 17561-17579. doi:10.1029/JB094iB12p17561.
- Felzer, K. R., Brodsky, E. E., 2005. Testing the Stress Shadow Hypothesis. *Journal of Geophysical Research*, 110(B5):B05S09. doi:10.1029/2004JB003277.
- Fielding, E., 1996. Tibet Uplift and Erosion. *Tectonophysics*, 260:55-84. doi:10.1016/0040-1951(96)00076-5.
- Gao, R., Lu, Z., Klemperer, S. et al., 2016. Crustal-scale Duplexing Beneath the Yarlung Zangbo Suture in the Western Himalaya. *Nature Geoscience*, 9:555-560. doi:10.1038/ngeo2730.

- Harrison, T. M., Copeland, P., Kidd W. S. F., et al., 1992. Raising Tibet. *Science*, 255(5052): 1663-1670. doi:10.1126/science.255.5052.1663.
- Ichinose, G. A., Goldstein, P., Rodgers, A. J., 2000. Relative Importance of Near-, Intermediate- and Far-Field Displacement Terms in Layered Earth Synthetic Seismograms. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(2):5311-536. doi:10.1785/0119990134.
- Ji, C., Wald, D. J., Helmberger D. V., 2002. Source Description of the 1999 Hector Mine, California, Earthquake, Part I: Wavelet Domain Inversion Theory and Resolution Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92 (4): 1192-1207. doi:10.1785/0120000916.
- Kusky, T. M., Meng J. N., 2025. Perspectives on the M7.1 2025 Southern Tibetan Plateau (Xizang) Earthquake. *Journal of Earth Science*, doi:10.1007/s12583-025-0174-9.
- Li, N., Liu, L. Q., Zhu, L. D., et al., 2024. Quaternary Soft-Sediment Deformation Structures in the Dingmucuo Graben, Northern Himalaya. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 51(6):1048-1056 (in Chinese with English abstract). doi:10.3969/j.issn.1671-9727.2024.06.12.
- Li, S. L., Yue, H. F., Song, Z. L., 1986. Inferring the Tectonic Stress Field of Himalaya Arcuate Structure from the Multiple Focal Mechanisms. *Acta Geophysica Sinica (Chinese Journal of Geophysics)*, 29(4): 419-423 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. S., Li, W. L., Xu, Q., et al., 2025. InSAR Co-seismic Deformation Detection and Fault Slip Distribution Inversion of the M_s 6.8 Earthquake in Dingri, Tibet on January 7, 2025. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 52:1-13 (in Chinese with English abstract). <https://link.cnki.net/urlid/51.1634.N.20250117.1150.002>.
- Liu, C., Dong, P. Y., Zhu, B. J., et al., 2018. Stress Shadow on the Southwest Portion of the Longmen Shan Fault Impacted the 2008 Wenchuan Earthquake Rupture. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(11):9963-9981. doi:10.1029/2018JB015633.
- Liu, H., 1985. Geodynamical Basis for Crustal Deformation Under the Tibetan Plateau. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 40, 43-60. doi:10.1016/0031-9201(85)90004-4.
- Liu, M., Yang, Y. Q., 2003. Extensional collapse of the Tibetan Plateau: Results of Three-dimensional Finite Element Modeling. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B8):2361. doi:10.1029/2002JB002248.
- Mercier, J., Armijo, R., Tapponnier, P., et al., 1987. Change from Late Tertiary Compression to Quaternary Extension in Southern Tibet During the India-Asia Collision. *Tectonics*, 6(3):275-304. doi:10.1029/TC006I003P00275.
- Molnar, P., Tapponnier, P., 1978. Active tectonics of Tibet. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 83(B11): 5361-5375. doi:10.1029/JB083iB11p05361.
- Moratto, L., Saraò, A., Yuan, A., et al., 2017. The 2011 M_w 5.2 Lorca Earthquake as a Case Study to Investigate the Ground Motion Variability Related to the Source Model. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15:3463-3482. doi:10.1007/s10518-017-0110-1.
- Shi, F., Liang M. J., Luo, Q. X., 2025. Seismogenic fault and coseismic surface deformation of the Dingri Ms 6.8 earthquake in Tibet, China. *Seismology and Geology*, 47(1):1-15 (in Chinese with English abstract). doi:10.3969/j.issn.0253-4967.2025.01.00.
- Taylor, M., Yin, A., 2009. Active Structures of the Himalayan-Tibetan Orogen and Their Relationships to Earthquake Distribution, Contemporary Strain Field, and Cenozoic Volcanism. *Geosphere*, 5 (3): 199-214. doi:10.1130/GES00217.1.
- Tian, T. T., Wu, Z. H., 2023. Recent Prehistoric Major Earthquake Event of Dingmucuo Normal Fault in

- the Southern Segment of Shenzha-Dingjie Rift and Its Seismic Geological Significance. *Geological Review*, 69(s1): 53-55 (in Chinese with English abstract). doi:10.16509/j.georeview.2023.s1.020.
- Waldhauser, F., Ellsworth, W. L., 2000. A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90 (6):1353-1368. doi:10.1785/0120000006.
- Wang, G. C., Zhang, K. X., Cao, K., et al., 2010. Expanding Processes of the Qinghai-Tibet Plateau during Cenozoic: An Insight from Spatio-Temporal Difference of Uplift. *Earth Science*, 35(5): 713-727 (in Chinese with English abstract). doi:10.3799/dqkx.2010.086.
- Wang, H., Elliott, J. R., Craig, T. J., et al., 2014. Normal Faulting Sequence in the Pumqu-Xainza Rift Constrained by InSAR and Teleseismic Body-wave Seismology. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 15(7): 2947-2963. doi:10.1002/2014GC005369.
- Wang, L. J., Wu, Z. H., Wang, W., 2006. Numerical Modeling of the Present Tectonic Stress Field in the Central Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Geomechanics*, 12(2):140-149 (in Chinese with English abstract).
- Wang, N., Li, Y. S., Shen, W. H., et al., 2025. Source Parameters and Rapid Simulation of Strong Ground Motion of the $M_{\text{S}}6.8$ Earthquake on January 7, 2025 in Dingri (Xizang, China) Derived from InSAR Observatioin. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, (in Chinese with English abstract). doi:10.13203/J.whugis20250022.
- Wu, Z. H., Hu, D. G., Wu, Z. H., et al., 2005. Slip Rates and Driving Mechanism of Active Faults in Middle Tibetan Plateau. *Acta Geoscientica Sinica*, 26(2):99-104 (in Chinese with English abstract). doi:10.3975/cagsb.2005.02.01.
- Yang, X., Zhang, J., Qi, G., et al. 2009. Structure and Deformation Around the Gyirong Basin, North Himalaya, and Onset of the South Tibetan Detachment System. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52:1046-1058. doi:10.1007/s11430-009-0111-2.
- Yang, Z. G., Xu, T. R., Liang, J. H., 2024. Towards fast focal mechanism inversion of shallow crustal earthquakes in the Chinese mainland. *Earthquake Research Advances*, 4(2): 100273. doi:10.1016/j.eqrea.2023.100273.
- Yao, J.Y., Yao D. D., Chen F., et al., 2025. A Preliminary Catalog of Early Aftershocks Following the 7 January 2025 $M_{\text{S}}6.8$ Dingri, Xizang Earthquake. *Journal of Earth Science*, 10.1007/s12583-025-0210-9.
- Yu, C., Li Z. H., Hu, X. N., et al., 2025. Source Parameters and Induced Hazards of the 2025 M_{W} 7.1 Dingri Earthquake on the Southern Tibetan Plateau (Xizhang), China, as Revealed by Imaging Geodesy. *Journal of Earth Science*, doi:10.1007/s12583-025-0175-8.
- Yue, H., Zhang, Y., Ge, Z. X., et al., 2020. Resolving Rupture Processes of Great Earthquakes: Reviews and Perspective from Fast Response to Joint Inversion. *Science China Earth Sciences*, 63(4):492-511. doi:10.1007/s11430-019-9549-1.
- Zhang, J. J., Ding, L., 2003. East West Extension in Tibetan Plateau and Its Significance to Tectonic Evolution. *Chinese Journal of Geology*, 38(2): 179-189 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. W., Li, H. A., Zhang H. P., et al., 2020. Research Progress in Cenozoic N-S Striking Rifts in Tibetan Plateau. *Advances in Earth Science*, 35(8):848-862 (in Chinese with English abstract). doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2020.064.
- Zhang, Y., Feng, W. P., Chen, Y. T., et al., 2012. The 2009 L'Aquila M_{W} 6.3 earthquake: a new technique to locate the hypocentre in the joint inversion of earthquake rupture process. *Geophysical Journal International*, 191(3):1417-1426. doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05694.x.

Zhao, W. H., Xu, Q., Ji F., et al., 2025. Deformation Field Characteristics and Site Effect Analysis of the $M_{\text{S}}6.8$ Dingri Earthquake in Xizang on January 7, 2025. *Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition)*, 52(0):1-12 (in Chinese with English abstract).
<https://link.cnki.net/urlid/51.1634.N.20250121.0958.002>.

附中文参考文献

- 白玲, 陈治文, 王绍俊, 2025. 2025 年西藏定日 6.8 级地震: 构造背景分析与震源特征探讨. 地球与行星物理论评(中英文), 56(0): 1-6. doi:10.19975/j.dqyxx.2025-006.
- 陈鲲, 杨婷, 王永哲, 等, 2025. 2025 年 1 月 7 西藏日喀则市定日县 6.8 级地震的快速产出参数. 地震科学进展, 55(0):1-8. doi:10.19987/j.dzkgxjz.2025-004.
- 褚杨, 郭宜琳, 刘谭杰, 等. 2024. 藏南拆离系活动与淡色花岗岩就位-以希夏邦马峰地区为例. 岩石学报, 40(5): 1461-1474. doi:10.18654/1000-0569/2024.05.08.
- 李楠, 刘陇强, 朱利东, 等, 2024. 喜马拉雅北缘丁木错地堑第四纪软沉积物变形构造. 成都理工大学学报(自然科学版), 51(6):1048-1056. doi:10.3969/j.issn.1671-9727.2024.06.12.
- 李松林, 岳华峰, 宋占龙, 1986. 由多个地震的震源机制解推断喜马拉雅弧形山系的构造应力场. 地球物理学报, 29(4): 419-423.
- 李雨森, 李为乐, 许强, 等. 2025. 2025 年 1 月 7 日西藏定日 $M_{\text{S}}6.8$ 级地震 InSAR 同震形变探测与断层滑动分布反演. 成都理工大学学报(自然科学版)52: 1-13.
<https://link.cnki.net/urlid/51.1634.N.20250117.1150.002>.
- 石峰, 梁明剑, 罗全星, 等, 2025. 2025 年 1 月 7 日西藏定日 6.8 级地震发震构造与同震地表破裂特征. 地震地质, 47(1): 1-15. doi:10.3969/j.issn.0253-4967.2025.01.00.
- 田婷婷, 吴中海, 2023. 西藏申扎-定结裂谷南段丁木错正断层的最新史前大地震事件及其地震地质意义. 地质论评, 69(s1):53-55. doi:10.16509/j.georeview.2023.s1.020.
- 王国灿, 张克信, 曹凯, 等, 2010. 从青藏高原新生代构造隆升的时空差异性看青藏高原的扩展与高原形成过程. 地球科学, 35(5): 713-727. doi:10.3799/dqkx.2010.086.
- 王连捷, 吴珍汉, 王薇, 等, 2006. 青藏高原中段现今构造应力场的数值模拟. 地质力学学报, 12(2):140-149.
- 王楠, 李永生, 申文豪, 等, 2025. 2025 年 1 月 7 日西藏定日 $M_{\text{S}}6.8$ 地震震源机制 InSAR 反演及强地面运动快速模拟. 武汉大学学报(信息科学版), doi:10.13203/J.whugis20250022.
- 吴珍汉, 胡道功, 吴中海, 等, 2005. 青藏高原中段活动断层运动速度及驱动机理. 地球学报, 26(2):99-104. doi:10.3975/cagsb.2005.02.01.
- 张佳伟, 李汉敖, 张会平, 等, 2020. 青藏高原新生代南北走向裂谷研究进展. 地球科学进展, 35(8):848-862. doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2020.064.
- 张进江, 丁林, 2003. 青藏高原东西向伸展及其地质意义. 地质科学, 2003, 38(2): 179-189.
- 赵伟华, 许强, 吉锋, 等, 2025. 2025 年 1 月 7 日西藏定日 $M_{\text{S}}6.8$ 级地震形变场特征及场地效应分析. 成都理工大学学报(自然科学版), 52(0):1-12.
<https://link.cnki.net/urlid/51.1634.N.20250121.0958.002>.