

2025 年西藏定日 M_s 6.8 级地震余震序列精定位与地震烈度

徐志双^{1,2} 文鑫涛¹ 席楠¹ 李志强¹ 段乙好¹ 李晓丽¹ 杨理臣³ 任静¹ 董雨澈¹

1. 中国地震台网中心, 北京 100045

2. 贵州省地震局, 贵州贵阳 550000

3. 青海省地震局, 青海西宁 810000

摘要: 为了解 2025 年西藏定日 M_s 6.8 地震余震序列和地震烈度分布, 采用双差定位法对 72 小时内余震进行重新定位, 并对重定位余震进行震级加权的标准差椭圆拟合; 同时对震中附近 150 km 的强震动数据进行处理得到仪器烈度值。精定位余震呈南北向展布, 2 小时余震分布情况与 72 小时一致, 余震中心和宏观震中均位于震中北向, 余震长轴方向与烈度等震线 IX 度长轴方向相差 5° , 余震沿长轴方向展布 71 km。震中附近强震台站较少, 计算的仪器烈度在烈度等震线 VI 度及以上区域只有 4 个值, 其中 2 个值与宏观烈度相吻合。基于余震空间分布和震源机制解成果, 推断定日 M_s 6.8 发震断层节面参数为走向 181° /倾角 51° /滑动角 -81° 。地震呈现出明显的上/下盘效应, 上盘高烈度区大于下盘, 余震主要分布于上盘。

关键词: 余震; 仪器烈度; 双差定位; 震源机制; 等震线

中图分类号: P315

收稿日期: 2025-01-24

Aftershock Relocation and Intensity Distribution of the Dingri M_s 6.8 Earthquake in 2025

Xu Zhishuang^{1,2}, Wen Xintao¹, Xi Nan¹, Li Zhiqiang¹, Duan Yihao¹, Li Xiaoli¹, Yang Lichen³, Ren Jing¹, Dong Yuwei¹

1. China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

2. Guizhou Earthquake Agency, Guiyang 550000, China

3. Qinghai Earthquake Agency, Xining 810000, China

Abstract: (Objective) In order to understand the aftershock sequence and intensity distribution of the Dingri M_s 6.8 earthquake in 2025, (Method) the double-difference location method has been utilized to relocate the aftershocks within 72 hours and the standard deviation ellipse weighted by magnitude has been used to analyze the relocated aftershocks. Meanwhile, the instrumental intensities have been calculated with the strong-motion data within 150 km away from the epicenter. (Results) The relocated aftershocks distribute in a north-south direction, and the distribution of aftershocks within 2 hours shows consistence with that of the 72 hours. The aftershock center and macroseismic epicenter are both located to the north of the epicenter, and the major-axis direction of the aftershock area is 5° different from that of the intensity IX of the isoseismal lines. The distribution length of the aftershocks along the major axis is 71 km. There are few strong motion stations around the epicenter, therefore only 4 calculated intensity values have been obtained in areas of intensity VI and above, 2 of which show agreement with the macroseismic intensities. (Conclusions) Based on the spatial distribution of aftershocks and the focal mechanism solution, it is inferred that the nodal parameters of the seismogenic fault of the Dingri M_s 6.8 earthquake are strike 181° /dip 51° /rake -81° for strike/dip/rake angles. This earthquake shows a significant upper/lower wall effect, with greater high-intensity areas and a concentrated distribution of aftershocks in the upper wall.

Keywords: aftershock; instrumental intensity; double-difference location; focal mechanism; isoseismal line

作者简介: 徐志双 (1989-), 女, 高级工程师, 博士, 主要从事地震灾害快速评估和地震活动性研究. E-mail: xzs0610@seis.ac.cn, ORCID: 0000-0003-3820-1628.

引言

2025 年 1 月 7 日 9 时 5 分,西藏自治区日喀则市定日县措果乡(北纬 28.50°,东经 87.45°)发生 M_s 6.8 地震,震源深度 10 km。主震后余震频发,截至 2025 年 1 月 10 日 9 时 5 分,记录到 1387 个余震,最大余震为主震后 19 分钟发生的 4.4 级地震。震中 10 公里范围内平均海拔约 4471 米,人口密度约 14 人/平方公里,人口约 4400 人,农村河谷地区人口相对集中。发震时间为冬季非生产时段,大多数居民仍在睡眠中,来不及避险。地震造成 126 人遇难,188 人受伤,受灾群众达 6.15 万名。

大震后的余震活动受区域应力变化的控制(King et al., 1994; 李平恩等, 2022),可用于揭示主震破裂尺度和评估地震灾害情况(Kisslinger and Jones, 1991; 白仙富等, 2011; 王伟镭等, 2011; 杨天青等, 2015)。然而,初始位置可能存在较大误差,特别是台站分布稀疏、震源深度远小于震中距时震源深度误差较大(郑勇等, 2017)。因此,需要精确的重定位来勾画三维破裂面,揭示发震构造和评估震害分布(陈晨和胥颐, 2013; 徐甫坤等, 2015; 张广伟等, 2016; 李启雷等, 2021; 徐志双等, 2020; Xu et al., 2023; Katsumata, 2024; 王同利等, 2024; 张恩会等, 2024)。

地震烈度反映地震现场破坏和人员伤亡情况,与震级、地质构造背景、建筑物抗震设防和人口分布有关(Galli et al., 2017; Kiani et al., 2019; Qu et al., 2020)。地震烈度包括地震等震线表征的烈度和仪器测量的烈度。等震线系主震发生后工作队前往现场开展震害调查后绘制,其烈度值表示实际震害情况,一般用罗马数字表示。仪器烈度利用台站记录到的 P 波信号预测地震动峰值加速度(Peak ground acceleration, PGA)和地震动峰值速度(Peak ground velocity, PGV),再进一步计算成烈度数值(朱景宝等, 2024)。定日地震发生后,中国地震局派出现场工作队 6 个调查组,利用地震现场应急信息分析系统,对灾区 167 个调查点开展了实地震害调查,并充分参考各种科技支撑成果确定地震烈度等震线,最高烈度为 IX 度¹。

考虑到震后 3 天发布地震烈度图,本文利用双差定位法对西藏定日 M_s 6.8 震后 72 小时余震进行重新定位,获得较为精细的地震序列空间分布,然后对余震进行震级加权的标准差椭圆拟合获得余震中心和长轴方向;对主震后十余分钟获取的震中 150 km 范围内强震动数据进行计算得到仪器烈度;将余震空间分布、仪器烈度和烈度等震线进行对比,并结合震源机制解和破裂过程共同探讨西藏定日 6.8 级地震的特点。

1 地质构造背景

定日 M_s 6.8 地震发生于雅鲁藏布江缝合带以南、藏南滑脱拆离系断裂以北、青藏高原中南部申扎-定结断裂带附近。震中位于青藏高原拉萨地块核心活动区域,该区域地质活动复杂,集中发育南北向展布的大型伸展构造,是现今青藏高原内部最为显著的活动构造。距离震中最近的断层为丁木错断裂,位于申扎-定结断裂带南段的丁木错地堑东缘,与震中相距 11 公里左右。丁木错断裂近南北走向,南起措果乡,向北延伸约 60 公里,沿线曾发生多次地震活动,并在地表留下断裂陡坎和破裂迹象(吴佳杰等, 2025; 杨婷等, 2025)。

活断层不仅是大地震级地震发震的潜在震源,也是严重地震灾害的主要成因(徐锡伟等, 2023)。震中附近活断层分布如图 1 所示,1949 年以来该地区发生 5.0 级及以上地震较多,

¹应急管理部 中国地震局发布西藏定日 6.8 级地震烈度图. (2025-01-10).
http://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202501/t20250110_517756.shtml

其中距震中最近的两次地震为2020年3月20日西藏日喀则市定日县5.9级地震和1998年9月4日的西藏定日与定结间6.2级地震，两次地震距 M_s 6.8震中均为15公里，均未造成人员伤亡。此次定日 M_s 6.8地震为申扎-定结断裂带有历史记录以来震级最大的一次地震事件。

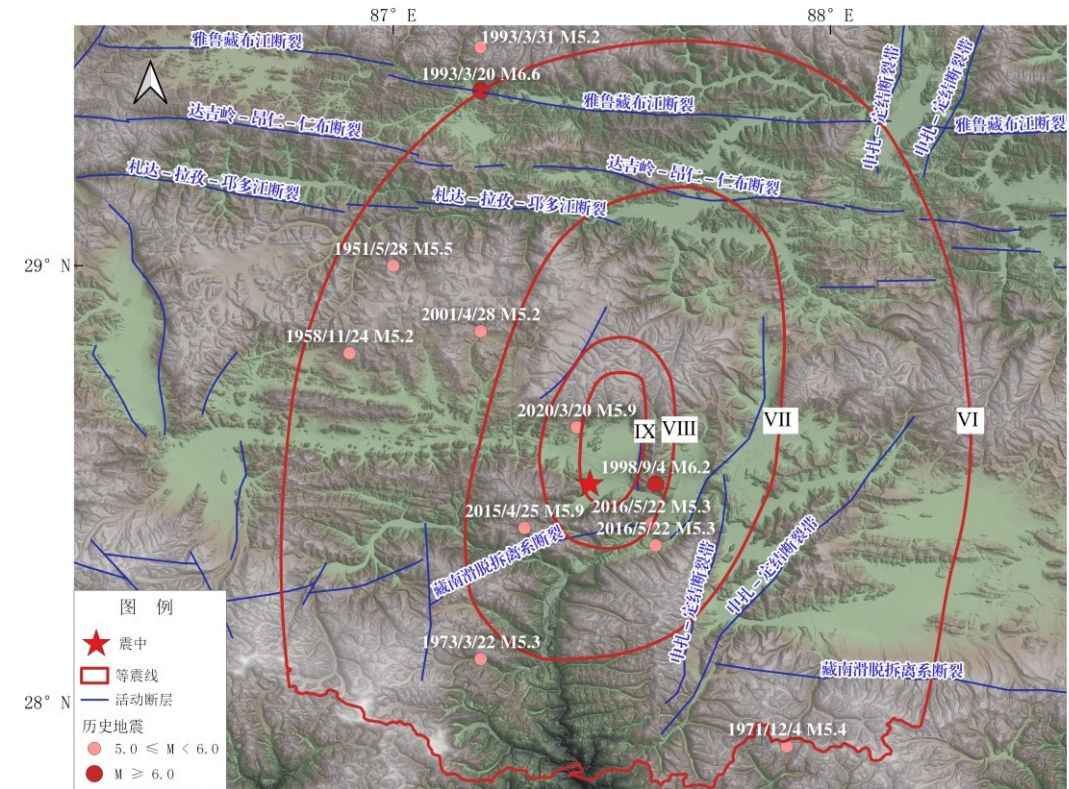


图1 定日 M_s 6.8震中周边历史地震和活断层分布

(活断层数据来源于地震活动断层探索数据中心，等震线来源于应急管理部¹)

Fig.1 Previous earthquakes and active faults around the epicenter of Dingri M_s 6.8 earthquake (The active faults are resulted from Seismic Active Fault Survey Data Center, and the isoseismal lines are after the Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China¹)

2 数据与方法

2.1 双差定位

双差定位(hypoDD)是Waldhauser and Ellsworth(2000)提出的一种相对定位方法，假设两次地震间的距离小于震源与台站之间的距离和地壳速度不均匀的尺度，那么台站接收到两次地震的走时差只与它们之间的位置有关系。将观测台站和地震事件组成事件对，使地震对的观测和理论走时残差最小，据此反演地震序列中每个地震相对于矩心的相对位置，可以有效避免地壳速度横向不均匀而导致的定位误差，在国内外地震研究中得到广泛使用(陈晨和胥颐，2013；徐甫坤等，2015；张广伟等，2016；李丹宁等，2017；徐志双等，2020；李启雷等，2021；Xu et al., 2023；Katsumata, 2024；王同利等，2024；张恩会等，2024)。双差法的基本方程如下：

¹应急管理部 中国地震局发布西藏定日6.8级地震烈度图.(2025-01-10).
http://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202501/t20250110_517756.shtml

$$\Delta t_{jk} - \Delta t_{ik} = -S_{jk}\Delta X_j + S_{ik}\Delta X_i + \varepsilon_{jk} - \varepsilon_{ik} \quad (1)$$

(1) 式中, Δt_{jk} 和 Δt_{ik} 分别是地震事件 j 和 i 到台站 k 的到时残差, S_{jk} 和 S_{ik} 是两个地震震源到台站 k 的慢度矢量, X_j 和 X_i 是两个地震震源的位置矢量, ε_{jk} 和 ε_{ik} 是两个地震在台站 k 的到时拾取。

本文使用的震相数据来源于中国地震台网的观测报告, 选取定日 M_s 6.8 震后 72 小时内 $M_L \geq 2.0$ 的 401 个余震进行重新定位。由于震中附近海拔高、台站密度比较稀疏, 使用震中距 400 km 以内 25 个台站 (包含 5 个流动台) 的震相资料进行计算。每个事件的定位台站不少于 4 个, 震相数据不少于 6 个, 经过筛选得到 P 波数据 7092 对, S 波数据 6463 对, 共 363 次地震事件参加重定位。采用共轭梯度法 (LSQR), MAXDIST 设为 400 km, OBSCT 设为 4, 迭代 5 次, WRCT、WDCT 和 DAMP 分别设为 5、15 和 40。地壳模型采用中国科学院地球物理研究所 (1981) 给出的雅鲁藏布江以南地区的速度模型, 分为 6 层, 波速比 1.73。P 波权重赋值 1, S 波权重 0.7。

2.2 标准差椭圆拟合

为了确定余震中心和长轴方向, 采用标准差椭圆 (Mitchell, 2009) 对余震序列进行拟合。标准差椭圆方程为:

$$\left(\frac{x}{\sigma_x}\right)^2 + \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2 = s \quad (2)$$

s 表示置信度值, 本文取 95% (两个标准差椭圆), 即生成的椭圆包含约 95% 的余震。

σ_x 、 σ_y 分别表示长半轴和短半轴:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\tilde{x}_i \cos \theta + \tilde{y}_i \sin \theta]^2}{n}} \quad (3)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\tilde{x}_i \sin \theta - \tilde{y}_i \cos \theta]^2}{n}} \quad (4)$$

上式中 θ 表示任意旋转角, $(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$ 是第 i 个余震坐标 (x_i, y_i) 和加权地理中心 $(\bar{X}_m, \bar{Y}_m)$ 的差值, 即 $\tilde{x}_i = x_i - \bar{X}_m, \tilde{y}_i = y_i - \bar{Y}_m$ 。椭圆旋转角 θ_m 是一个特定的 θ 值, 椭圆 y 轴从正北方向顺时针旋转到该角度时, 标准差达到极值。利用 (3) 和 (4) 对 θ 求导后解算出 θ_m , 即可获得对应的椭圆参数 σ_x 、 σ_y 。

椭圆中心采用加权地理中心:

$$\bar{X}_m = \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (5)$$

$$\bar{Y}_m = \frac{\sum_{i=1}^n m_i y_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (6)$$

计算过程中使用兰伯特投影进行地理坐标转换。利用（2）~（6）式可绘制余震分布的标准差椭圆，简称余震椭圆。椭圆中心点即余震中心，椭圆长轴方向表示余震分布的方向，短半轴表示余震分布的范围。本文主要使用余震中心和长轴方向进行对比分析，涉及的方向均用正北方向顺时针旋转的角度来表示。

2.3 仪器烈度计算

仪器烈度的计算参照《中国地震烈度表》（GB/T 17742-2020）附录 A。地震动记录通过基线校正、记录转换和数字滤波后得到合成记录，获得地震动加速度的最大值 PGA 和地震动速度记录的最大值 PGV，再通过以下式子分别计算 PGA 和 PGV 对应的仪器烈度：

$$I_{PGA} = 3.17 \log_{10}(PGA) + 6.59 \quad (7)$$

$$I_{PGV} = 3.00 \log_{10}(PGV) + 9.77 \quad (8)$$

进一步利用（9）式确定震中附近 150 km 范围内仪器烈度数值。

$$I_I = \begin{cases} I_V & I_A \geq 6.0 \text{ 且 } I_V \geq 6.0 \\ (I_A + I_V)/2 & I_A < 6.0 \text{ 或 } I_V < 6.0 \end{cases} \quad (9)$$

3 结果与讨论

3.1 震后 72 小时精定位余震

重定位后获得定日 Ms 6.8 震后 72 小时 172 个余震，震源深度主要集中于 0~30km 之间。重定位后相对误差为 EW 向 125 m，NS 向 123 m，深度误差 323 m。重定位前平均定位残差为 1.5 s，重定位后定位残差均值为 0.25 s，定位残差减小。余震分布显示地震为单侧破裂，震源区绝大部分余震分布于主震正北方向，少部分在震中附近沿南向扩展，余震展布方向与震中附近区域集中发育的大型伸展构造和实际地表破裂走向一致，与杨婷等（2025）12 天余震拟合结果相吻合。使用震级加权的标准差椭圆拟合后获得 72 小时余震长轴方向为 180°，2 小时余震数目较少但展布方向和范围与 72 小时相差不大，2 小时余震长轴方向为 178°。与 Xu et al.（2023）研究中大部分震例一样，2 小时余震拟合结果能代表本次地震余震分布尺度，可用于震后早期快速评估地震影响范围。

定日地震烈度图共有 VI~IX 四个烈度区，不同烈度长轴方向并不完全一致，VI、VIII 和 IX 度比较一致，约为 185°，VII 度有明显差异，为 195°。72 小时余震长轴方向与 IX 度相差 5°，与 VII 度相差 15°。Xu et al.（2023）发现 2012-2021 年中国大陆 6.0 级及以上主余型地震的余震长轴方向与极震区长轴方向平均差值为 9°，定日地震极震区为 IX 度区，二者差值为 5°，再次验证用余震长轴方向评估烈度长轴方向是可行的。VII、VIII、IX 度长轴长度分别为 123 km、54 km 和 34 km。VI 度有部分区域位于国境线以外，因此不讨论其长度。72 小时余震沿长轴方向展布约 71 km，介于烈度等震线 VII 和 VIII 度长轴长度之间。Xu et al.（2023）指出余震中心一般由震中向上盘方向偏移，本次地震余震中心均位于震中北向 17 km、宏观震中西北方向 6 km。

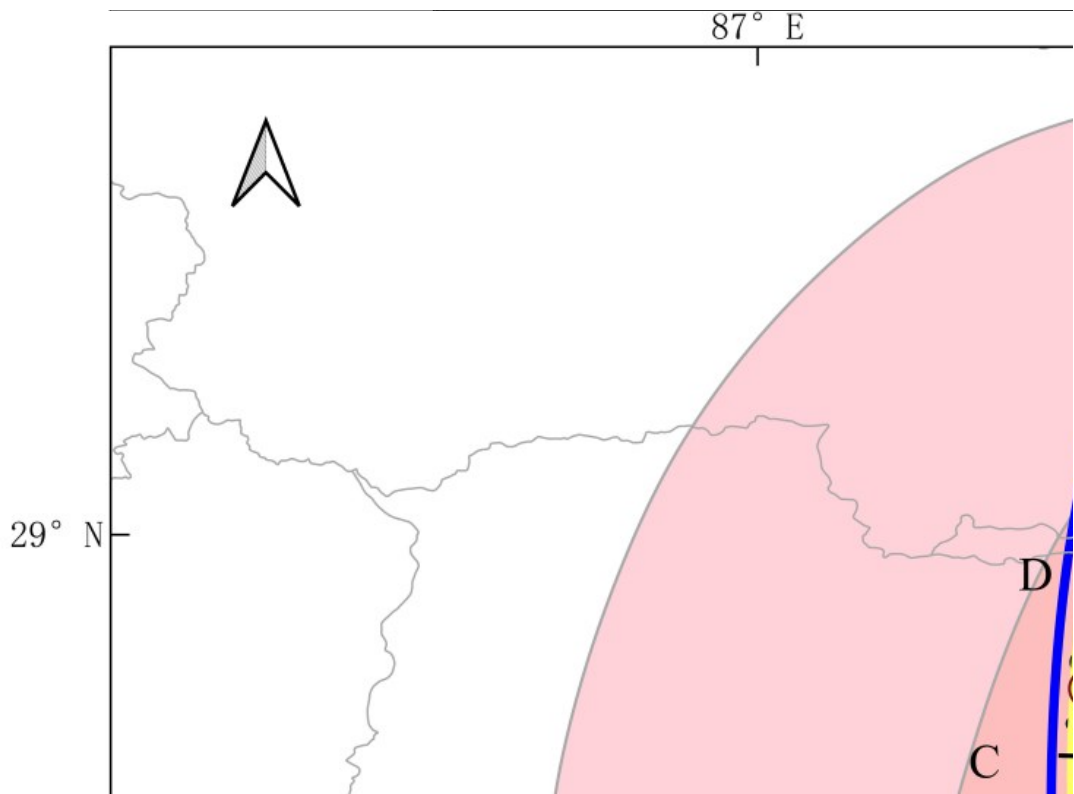


图 2 定日 Ms 6.8 震后 2 小时和 72 小时余震精定位结果 (AA'为沿 72 小时余震长轴方向的剖面线, BB'、CC'和 DD'为垂直于长轴方向的剖面线)

Fig. 2 Relocated aftershocks within 2 hours and 72 hours after Dingri Ms 6.8 earthquake (AA' indicates the major-axis direction of the 72-hour aftershock ellipse, while BB', CC' and DD' are the directions perpendicular to the major-axis direction.)

余震的深度分布能够勾画三维破裂面的特征,于是沿着余震椭圆长轴方向 AA'和垂直于长轴方向的 BB'、CC'和 DD'三条测线绘制余震深度剖面。为了解台站分布对定位精度的影响,首先采用 20 个固定台站进行双差定位,结果如图 3(a)和 3(b)所示,余震深度分布在 10 km 附近出现明显分界。增加震中附近 5 个流动台一起拟合后,深度分界消失,余震分布更为集中(图 3c 和 3d),可见台站的方位覆盖不足严重影响定位的精度。

图 2 可见 72 小时余震从南向北分为南段(BB')、中段(CC')和北段(DD'),主震位于余震序列的南段,主震附近 3.0 级以上余震较多,中段的余震分布范围较宽,可能揭示分支断裂特征,北段的余震序列主要呈 NNE 向展布,与杨婷等(2025)余震结果相吻合。进一步分析余震深度剖面(图 3d),BB'剖面余震整体呈西倾特征,CC'剖面出现明显的分支断裂,各断裂倾向各异,而 DD'深度剖面倾向并不明显,结合杨婷等(2025)给出的断裂位置和地表破裂的分布,可能是多组不同倾向的断裂均发生破裂的结果。

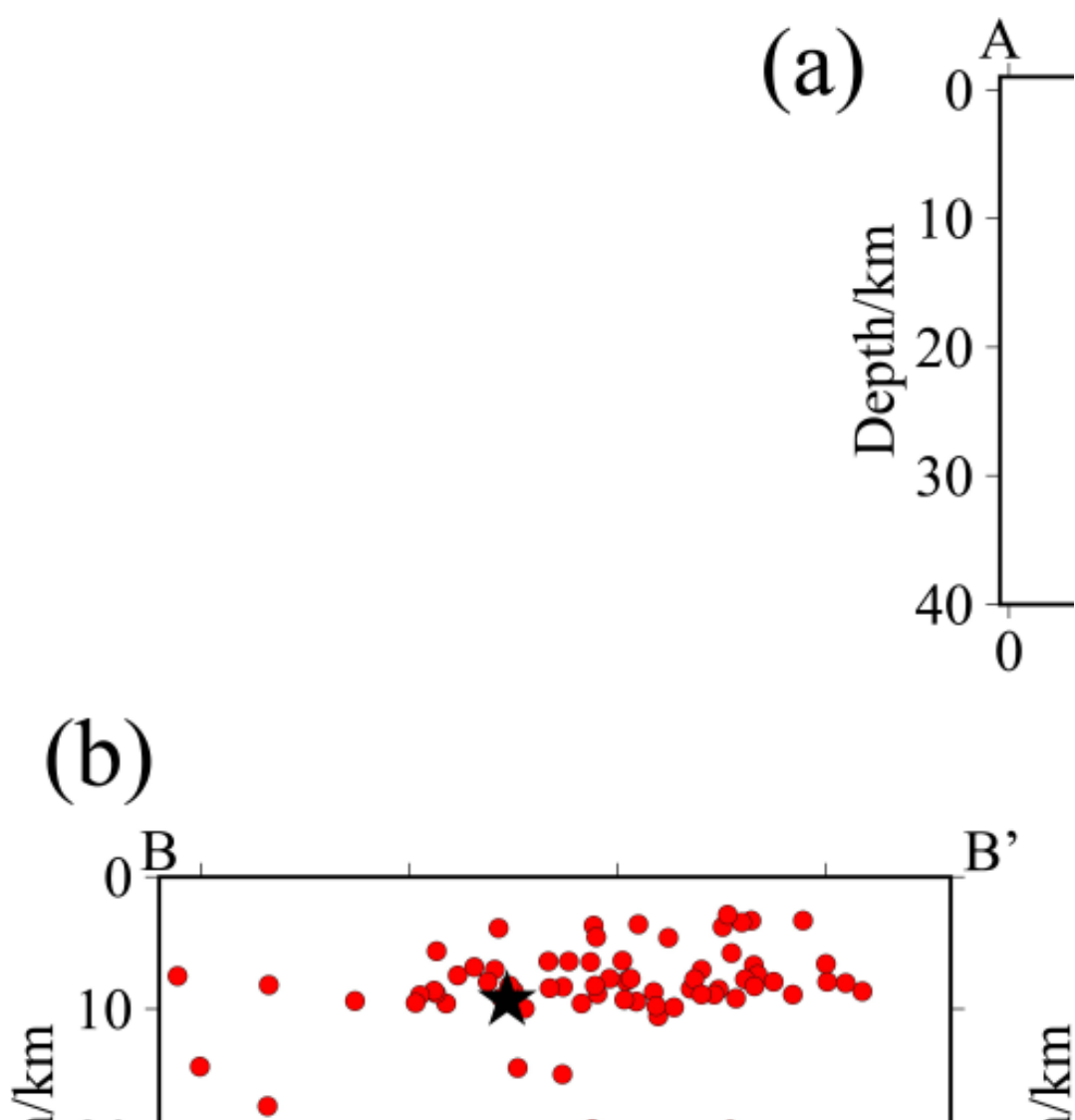


图 3 震后 72 小时余震深度分布剖面

- (a) 使用 20 个固定台站参与定位，沿余震长轴方向的震源深度剖面 AA'（剖面线两侧各取 15 km）
- (b) 使用 20 个固定台站参与定位，垂直于余震长轴方向的震源深度剖面 BB'、CC' 和 DD'（剖面线两侧各取 16 km）
- (c) 增加 5 个流动台站参与定位，沿余震长轴方向的震源深度剖面 AA'（剖面线两侧各取 15 km）
- (d) 增加 5 个流动台站参与定位，垂直于余震长轴方向的震源深度剖面 BB'、CC' 和 DD'（剖面线两侧各取 16 km）

Fig. 3 Depth distribution profiles of the aftershocks within 72 hours

- (a) Relocated with data from 20 fixed stations. Vertical cross-sections along the major-axis direction of the aftershock area (Projection width for each side is 15 km)
- (b) Relocated with data from 20 fixed stations. Vertical cross-sections perpendicular to the major-axis direction of the aftershock area (Projection width for each side is 16 km for each section)
- (c) Relocated with data from 5 more temporary stations. Vertical cross-sections along the

major-axis direction of the aftershock area (Projection width for each side is 15 km)

(d) Relocated with data from 5 more temporary stations. Vertical cross-sections perpendicular to the major-axis direction of the aftershock area (Projection width for each side is 16 km for each section)

3.2 地震仪器烈度

由于定日地区地理位置特殊，强震台站较少，震中 150 km 范围内只有 6 个台站，计算的仪器烈度值与烈度等震线吻合率为 67%（表 1）。其中有 4 个仪器烈度位于VI度及以上区域，仪器烈度最高值 8.0 比该点所处的实际烈度高 1 度，5.4 比实际烈度低 1 度。徐钦等(2018)认为相差 1 度是合理的，因为宏观烈度表征一定区域范围内的平均震害情况，而强震数据只是个别点上的数据，不能忽略两者之间的差异性。国内外震例研究也发现部分仪器烈度值可能与实地调查的地震烈度存在差异，与场地效应、计算模型等有关（温瑞智等，2013；Cilia et al., 2017；陈鲲等, 2021；Smith and Mooney, 2021；许亚吉和庞卫东，2021；江鹏等，2023；周中红等，2024）。仪器烈度 8.0 偏高的原因可能是定日震中及周边区域包含盆地和冲积平原，对地震动产生放大作用；地震矩震级高，震源浅，使得地震能量在地表释放较为集中，加剧了地震动强度，导致仪器烈度和评估烈度值均偏高（吴佳杰等，2025）。

表 1 震中 150 km 范围地震动参数
Table 1 Strong-motion data within 150 km of the epicenter

序 号	台 站 位 置	台 站 代 码	经 度 (° E)	纬 度 (° N)	震 中 距 (k m)	PGA (cm·s ⁻²)			PGV (cm·s ⁻¹)			IPGA	IPGV	仪 器 烈 度	烈 度 等 震 线
						东 西	北 南	垂 直	东 西	北 南	垂 直				
1	定 结 县	D000 4	87.7 8	28.3 7	35.4	103. 5	103. 7	61.1	13.4	8.6	4.8	6.8	7.3	7.3	VII
2	拉 孜 县	D000 7	87.6 3	29.0 9	67.7	371. 5	395. 3	292. 1	25.3	18.9	15.0	8.5	8.0	8.0	VII
3	萨 迦 县	DS00 2	88.0 2	28.9 0	71.2	38.7	41.1	37.4	2.9	3.3	2.1	5.3	5.6	5.4	VI
4	昂 仁 县	D000 1	87.2 4	29.3 0	91.0	52.2	33.0	35.0	5.9	4.3	5.8	5.9	6.3	6.1	VI
5	岗 巴 县	D000 5	88.4 1	28.2 4	98.4	16.6	16.3	16.5	2.1	1.8	1.8	4.4	5.0	4.7	V
6	谢 通 门	DX0 01	88.2 6	29.4 4	130. 7	11.9	14.6	5.5	3.6	2.1	1.8	4.6	6.3	5.4	V

3.3 与震源机制解和破裂过程对比

定日地震发生后，中国地震台网中心（CENC）、全球质心矩张量解（GCMT）、美国地质调查局（USGS）等机构解算了主震的震源机制解（表 2）。各机构研究结果比较吻合，均显示本次地震为一次正断层型错动，与 2020 年定日 5.9 级地震震源机制解和区域构造应力（张小涛等，2020）较为一致。不同的是，2020 年定日 5.9 级地震为孤立型地震序列，而 2025 年 6.8 级地震为主余型序列。此外，不同机构给出的震中位置及中国地震台网发布的正式速报位置有差异，可能是由于震源区海拔高、地形复杂，近距离的长期观测资料比较缺乏。

表 2 不同研究机构给出的定日 6.8 级地震震源机制解

Table 2 The focal mechanism solutions for Dingri 6.8 earthquake obtained by various institutions

发震时刻	震中位置		节面I / (°)			节面II / (°)			矩震级	矩心深度	产出机构
年 - 月 - 日 时 : 分 : 秒	北纬 / (°)	东经 / (°)	走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角	(Mw)	/km	
2025-01-07 09:05:18	28.59	87.33	348	40	-100	181	51	-81	7.1	15	CENC ¹
2025-01-07 01:05:17 (UTC)	28.56	87.47	356	42	-88	173	48	-92	7.1	12	GCMT ²
2025-01-07 01:05:16 (UTC)	28.639	87.361	349	42	-103	187	49	-78	7.1	11.5	USGS ³

¹ 震源机制解 <https://www.cen.gov.cn/cea/dzpd/dzdt/5789988/5789990/5790377/index.html>

² Global CMT Catalog <https://www.globalcmt.org>

³ M 7.1 - 2025 Southern Tibetan Plateau Earthquake
<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000pi9w/moment-tensor>

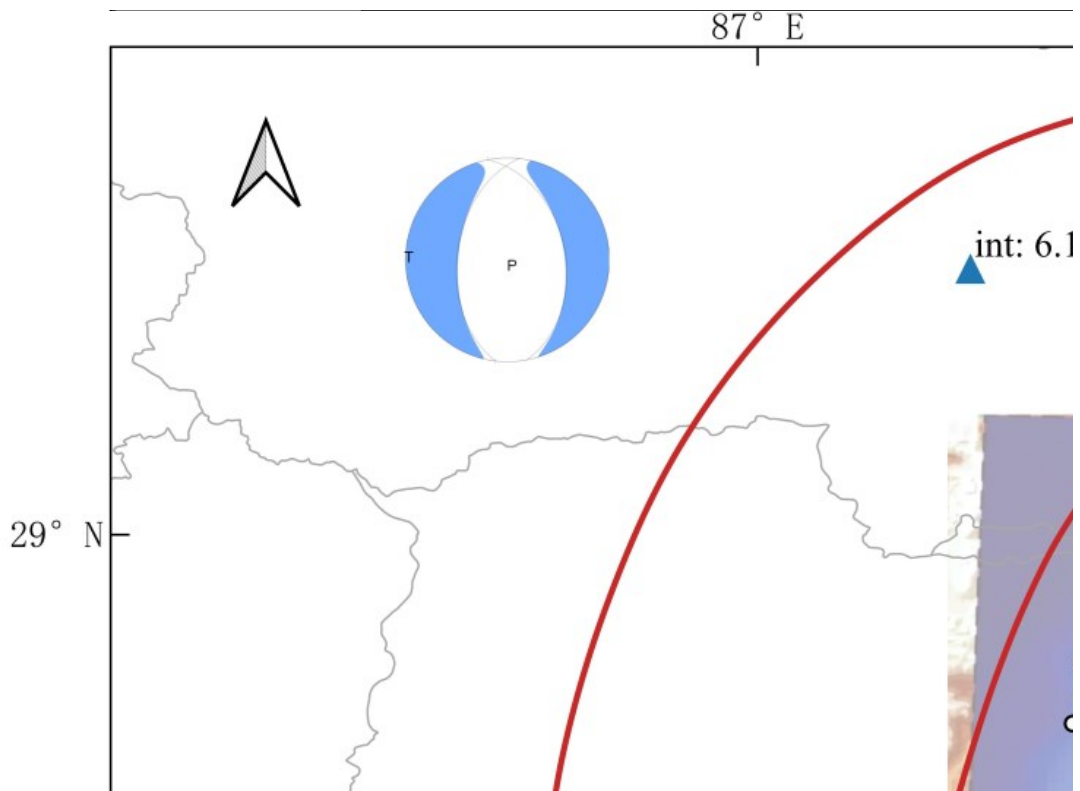


图 4 定日 M_s 6.8 地震余震、仪器烈度、震源机制解、破裂过程和等震线对比
(破裂过程来源于台网中心，震源机制解结果来源于 USGS)

Fig. 4 Comparison of relocated aftershocks, calculated intensities, focal mechanism, rupture process and isoseismal lines of the Dingri M_s 6.8 Earthquake

(The rupture process is from CENC, while the focal mechanism from USGS)

72 小时精定位余震长轴走向 180° ，与各机构给出的节面 II ($173^\circ \sim 187^\circ$) 走向相近，推测此次地震为与节面 II 参数相近的一次正断型为主的事件，据此推断断层西侧为上盘方向。以 USGS 震源机制解结果为例，节面走向 187° ，与极震区长轴走向 185° 相差仅 2° ，满足徐志双等 (2022) 发现的 83% 震例震源机制解走向与极震区长轴方向差值小于 30° 的结论。震源机制解给出的 $48\text{--}51^\circ$ 倾角与图 3 (d) 较陡的余震深度剖面相吻合。三个机构的矩震级一致性较高，均为 7.1 级，比面波震级 6.8 高 0.3。若地震震级相差 0.3 级，地震释放能量相差约 2.8 倍，这可能是此次地震灾害偏重的原因之一。吴佳杰等 (2025) 以矩震级 7.1 作为输入参数进行了烈度快速评估，得到的重灾区 (VIII 度及以上区域) 涉及的乡镇分布总体与实地调查结果较为吻合。

震后 1 小时，台网中心产出震源破裂过程¹，估计破裂长度约 55 千米，破裂由震中向北向延伸，由深部向浅部扩展，最大破裂点位于震中北向 30 千米，对应滑动量为 1.4 米，破裂可能出露地表。吴佳杰等 (2025) 基于密集远场地震台阵的破裂过程快速测定结果也是北向单侧破裂，但破裂尺度较小，约为 30 km。地震现场工作队调查发现 26 公里地表破裂，且有显著的垂直位错，断层穿过长所乡，造成长所乡死亡 94 人。估计的破裂长度小于余震展布长度，大于地表破裂，推测的最大位移点并非破坏最严重的等震线 IX 度几何中心，而在其北向 16 km 处，位于实际地表破裂最北点西侧 4 km 处。破裂过程给出的延伸方向与余震长轴方向基本吻合，然而余震深度剖面未见明显的深部向浅部扩展特征。

定日 M_s 6.8 地震呈现显著的上/下盘效应，发震断层两侧受灾面积分布不对称，VIII 度

¹ 震源破裂过程 <https://www.cen.gov.cn/cea/dzpd/dzdt/5789988/5789990/5790383/index.html>

和IX度两个高烈度区位于上盘一侧的面积明显大于下盘，余震也大部分集中分布于断层上盘。以往研究发现逆断层为主的地震常常表现出明显的地震动上/下盘效应，如1994年美国北岭地震、1999年台湾集集地震、2008年汶川地震、2013年芦山地震、2019年长宁地震等（俞言祥和高孟潭，2001；王栋，2010；Wang et al., 2010；温瑞智等，2013；徐志双等，2020），本次地震说明正断层也同样存在上/下盘效应。由于定日地区地理位置特殊，强震台站较少，在VI度及以上区域只有4个仪器烈度值，无法进一步分析地震动的上/下盘特征。

4 结论

本文利用双差定位法对西藏定日 M_s 6.8 地震 72 小时内余震进行了重新定位和震级加权的标准差椭圆拟合得到余震分布，利用震中附近 150 km 的强震动数据计算仪器烈度，将余震序列和仪器烈度与震源机制解、破裂过程和烈度等震线等对比，得到以下结论：

（1）定日 M_s 6.8 地震的余震主要沿主震北向展布，具有单侧破裂特征，余震展布方向为 180° 。2 小时余震数目较少但展布方向和范围与 72 小时相差不大，二者长轴方向仅相差 2° 。

（2）72 小时余震沿长轴方向展布约 71 km，介于VII和VIII度长轴长度之间，大于破裂过程反演结果 55 km 和地表破裂 26 km；余震中心位于震中北向 17 km、宏观震中西北方向 6 km。

（3）针对定日 M_s 6.8 地震，不同机构（CENC、GCMT 和 USGS）给出的震源机制解结果比较一致，利用余震长轴走向可判定节面II为发震断层，走向为 $173^\circ\sim 187^\circ$ ，据此推断断层西侧为上盘方向。定日 M_s 6.8 地震上/下盘效应明显，上盘高烈度区（VIII度和IX度）大于下盘，余震主要分布于断层上盘。

（4）由于定日地区地理位置特殊，震中 150 km 范围内只有 6 个强震台站，计算的仪器烈度与烈度等震线吻合率为 67%，VI度及以上区域只有 4 个仪器烈度值。建议今后进一步增设强震台站等观测手段，以便快速获取地震信息，为震区震情监视跟踪和应急准备夯实基础。

致谢

感谢西藏日喀则市定日县 6.8 级地震现场工作队为烈度调查工作的辛苦付出。感谢两位匿名审稿专家和编委会对文章提出宝贵意见。感谢 Waldhauser F. 提供双差定位程序。本文利用 QGIS 和 GMT 软件绘制图件。

References

- Bai, X. F., Dai, Y. Q., Li, Y. Q., 2011. Rapid Assessment of the Macro-epicenter and Earthquake-effected Field based on Aftershocks: A Case Study of Yunnan Area. *Journal of Seismological Research*, 34(4): 525-532 (in Chinese with English abstract).
- Chen, C., Xu, Y., 2013. Relocation of the Lushan M_s 7.0 Earthquake Sequence and Its Tectonic Implication. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(12) : 4028—4036. (in Chinese with English abstract)
- Chen, K., Wang, Y. Z., Xi, N., et al., 2021. Earthquake Ground Motion Intensity Map of the 21 May, 2021 M_s 6.4 Yangbi, Yunnan Earthquake. *Seismology and Geology*, 43(4): 899-907. <https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-4967.2021.04.010> (in Chinese with English abstract)
- Cilia, M. G., Mooney, W. D., Robinson, A. A., 2017. Seismic Intensity Survey of the 1 April 2014 M 8.2 Iquique, Chile, Earthquake and Tsunami, and a Comparison with Strong-Motion Data. *Seismological Research Letters*, 88(5): 1232-1240. <https://doi.org/10.1785/0220170030>
- Galli P., Castenetto S., Peronace E., 2017. The Macroseismic Intensity Distribution of the 30 October 2016 Earthquake in Central Italy (M_w 6.6): Seismotectonic Implications. *Tectonics*, 36, 2179–2191. <https://doi.org/10.1002/2017TC004583>
- Institute of Geophysics, Academia Sinica, 1981. Explosion Seismic Study for Velocity Distribution and Structure of the Crust and Upper Mantle from Damxung to Yadang of Tibet Plateau. *Acta Geophysica Sinica*, 24(2): 155-170 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, P., Li, P. P., Li, T. L. et al., 2023. The Characteristics of Strong Motion Records of the 2022 Luding, Sichuan M_s 6.8 Earthquake., *Journal of Seismological Research*, 46(4): 593-603. <https://doi.org/10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0057> (in Chinese with English abstract).
- Kiani, A., Torabi, M., Mirhosseini, S. M., 2019. Intensity Measures for the Seismic Response Evaluation of Buried Steel Pipelines under Near-field Pulse-like Ground Motions. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 18(4): 917-931.
- Kisslinger, C., Jones, L M., 1991. Properties of Aftershocks Sequences in Southern California. *J Geophys Res*, 96: 11947-11958. <https://doi.org/10.1029/91JB01200>
- Li, D. N., Gao, Y., Zhu, H. Y., et al. 2017. Research on Double-difference Relocations and Focal Mechanism Solutions of the 2014 Yunnan Jinggu M_s 6.6 Earthquake Sequence. *Journal of Seismological Research*, 40(3): 465-473. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2015.156> (in Chinese with English abstract).
- Li, P. N., Liao, L., Feng, J. Z., 2022. Relationship between Stress Evolution and Aftershocks after Changning M 6.0 Earthquake in Sichuan on 17 June, 2019. *Earth Science*, 47(6): 2149-2164. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.143> (in Chinese with English abstract).
- Li, Q. L., Li, Y. L., Tu, H. w. et al., 2021. The Relocation, Focal Mechanisms of the Dingqing Earthquakes and A Preliminary Study of Its Seismogenic Structure. *Seismology and Geology*, 43(1): 209-231 (in Chinese with English abstract).
- Katsumata, K., 2024. Not Trench-parallel but Trench-normal Source Fault of the 1994 Hokkaido Toho-oki Earthquake as Revealed by the Aftershock Relocation Using HypoDD. *Earth Planets and Space*, 76:126. <https://doi.org/10.1186/s40623-024-02069-6>
- King, G. C. P., Stein, R. S., Lin, J., 1994. Static Stress Changes and the Triggering of Earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(3): 935-953. <https://doi.org/10.1029/94JB00611>.

- Mitchell, A., 2009. The Esri Guide to GIS Analysis Volume 2: Spatial Measurement & Statistics. California: Esri.
- Qu, Z., Fu, X., Kishiki, S., Cui Y., 2020. Behavior of Masonry Infilled Chuandou Timber Frames Subjected to In-plane Cyclic Loading. *Engineering Structures*, 211: 110449. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110449>.
- Smith, E.M., Mooney, W. D. A., 2021. Seismic Intensity Survey of the 16 April 2016 M_w 7.8 Pedernales, Ecuador, Earthquake: A Comparison with Strong-Motion Data and Teleseismic Backprojection. *Seismological Research Letters*, 92(4): 2156–2171. <https://doi.org/10.1785/0220200290>.
- Waldhauser, F., Ellsworth, W., 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. <https://doi.org/10.1785/0120000006>.
- Wang, D., 2010. The Fanging Wall/footwall Effects of Near-fault Ground Motions. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration (in Chinese).
- Wang, D., Xie, L. L., Abrahamson, N. A., et al., 2010. Comparison of Strong Ground Motion from the Wenchuan, China, Earthquake of 12 May 2008 with the Next Generation Attenuation (NGA) Ground-Motion Models. 2010, 100(5B): 2381-2395.
- Wang, T. L. ,Zhang, S. Z., Cui, B. W. ,et al., 2024. Microearthquake Detection and Seismicity Analysis of the 2020 Guye M_s 5.1 Earthquake Sequence. *Chinese J. Geophys.* ,67(4):1501-1514. <https://doi.org/10.6038/cjg2023Q0865> (in Chinese with English abstract).
- Wang, W. K., Li, X. L., Li, Z. Q.. 2011. Rapid Determination of Macro Epicenter based on Aftershocks. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 6(1): 36-48 (in Chinese with English abstract).
- Wen, R. Z., Ren, Y.F., Huang, X. T., et al., 2013. Strong Motion Records and Their Engineering Damage Implications for Lushan Earthquake on April 20, 2013. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 33(4): 1-12. <https://doi.org/10.11810/1000-1301.20130401> (in Chinese with English abstract).
- Wu, J. J., Chen, W. K., Jia, Y. J., et al. 2025. Rapid Seismic Intensity and Disaster Assessment Based on Dense Seismic Array——An Case of the 2025 Rikaze M_s 6.8 Earthquake in Xizang. *Earth Science*. doi: 10.3799/dqkx.2025.035 (in Chinese with English abstract).
- Xu, F. K., Liu, Z. F., Zhang, Z. Q., et al., 2015. Double Difference Relocation and Focal Mechanisms of the Jinggu M_s 6.6 Earthquake in Yunnan Province in 2024. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 40(10): 1741-1754. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2015.156> (in Chinese with English abstract).
- Xu, Q., Tian, X. F., Wang, W. H., et al. 2018. A Comparison and Analysis of Instrumental Intensity and Macroseismic Survey Intensity of the 2013 Minxian-Zhangxian M_s 6.6 Earthquake in Gansu Province. *China Earthquake Engineering Jourbal*, 40(1): 124-129. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0844.2018.01.124> (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. W., Li, F., Cheng, J., et al. 2023. Advances in Research on Active Faults and Exploration of Relevant Frontier Scientific Problems. *Coal Geology & Exploration*, 51(12): 1–16. doi: 10.12363/issn.1001-1986.23.12.0805(in Chinese with English abstract).
- Xu, Y. J., Pang, W. D., 2021. Application of the Rapid Intensity Reporting Subsystem to the 2021 Yangbi, Yunnan M_s 6.4 Earthquake. *Journal of Seismological Research*, 44(3): 407-413 (in

- Chinese with English abstract).
- Xu, Z. S., Liu, J., Zheng, T. Z., et al., 2020. Iseismic Line of Sichuan Changning M_s 6.0 Earthquake in 2019 based on Precisely Located Aftershocks Sequence. *Acta Seismol. Sin.* 42, 447-4456. <https://doi.org/10.11939/jass.20200072> (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. S., Ren, J., Tan, Z. T., et al., 2022. Determination of the Long-axis Direction of the Seismic Influence Field Using the Strike of the Focal Mechanism Solution. *J. Seismo. Res.* 45, 88–99. <https://doi.org/10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666> (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. S., Liu, J., Yalikun, A., et al., 2023. Determination of the Major Axis Direction and Macroseismic Epicenter of the Assessed Intensity Map based on Relocated Aftershock Sequences. *Front. Earth Sci.* 11:1128827. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1128827>
- Yang, T. Q., Jiang, L. X., Dong, M., et al., 2015. Rapid Determination Method of Extreme Earthquake Disaster Area based on Aftershock Sequence Spatial Distribution. *Journal of Catastrophology*, 30(1): 8-15 (in Chinese with English abstract).
- Yang, T., Wang, S. G., Fang, L. H., et al. 2025. Analysis of Earthquake Sequence and Seismogenic Structure of the 2025 M_s 6.8 Dingri Earthquake in Tibetan Plateau. *Earth Science*. doi:10.3799/dqkx.2025.033 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Y. X., Gao, M. T., 2001. Effects of the Hanging Wall and Footwall on Peak Acceleration during the Chi-Chi Earthquake, Taiwan. *Acta Seismological Sinica*, 23(6): 615-621 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, E.H., Zhao, T., Zhang, Y.Q., et al., 2024. Seismogenic Structure of Gaoling Seismic Swarm in Weihe Basin. *Earth Science*, 49(7): 2662-2674. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.483> (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. W., Zhang H. Y., Sun, C. Q., 2016. Mechanism of the 2015 Pishan, Xinjiang, M_s 6. 5 Mainshock and Relocation of Its Aftershock Sequences. *Seismology and Geology*, 38(3) : 711-720. <https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-4967.2016.03.016> (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. T., Jiang, X. H., Xue, Y., et al., 2020. Summary of the Dingri M_s 5.9 earthquake in Tibet on March 20. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 41(4): 193-203. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-3246.2020.04.024> (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y., Xie, Z. J., 2017. Present Status and Prospect of Earthquake Focal Depth Locating. *Journal of Seismological Research*, 40(2) : 167—175 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Z. H., Sun, Y. P., Zhu, R. 2024. Evaluation of Post - Earthquake Buried Personnel Based on a New Model of Seismic Intensity Rapid Assessment. *Earth Science*, 49(2): 437-450. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.178> (in Chinese with English abstract).
- Zhu, J. B., Liu, H. Y., Luan, S. C., et al., 2024. Prediction of On-site Peak Ground Motion Based on Machine Learning and Transfer Learning. *Earth Science*, 2024-07-22 online. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2024.071> (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 白仙富, 戴雨芃, 李永强. 2011. 基于余震信息的宏观震中和影响场方向快速判定方法——以云南地区为例. *地震研究*, 34(4): 525-532.

- 陈晨, 胥颐. 2013. 芦山 M_s 7.0 地震余震序列重新定位及构造意义. 地球物理学报, 56(12): 4028—4036.
- 陈鲲, 王永哲, 席楠, 等. 2021. 2021 年 5 月 21 日云南漾濞 6.4 级地震的地震动强度图. 地震地质, 43(4): 899-907.
- 江鹏, 李萍萍, 李同林, 等. 2023. 2022 年 9 月 5 日泸定 M_s 6.8 地震强震动记录特征分析. 地震研究, 46(4): 593-603.
- 李丹宁, 高洋, 朱慧宇, 等. 2017. 2014 年云南景谷 M_s 6.6 地震序列双差定位及震源机制解特征研究. 地震研究, 40(3): 465-473.
- 李平恩, 廖力, 奉建州. 2022. 2019 年 6 月 17 日四川长宁 6.0 级地震震后应力演化与余震关系. 地球科学, 47(6): 2149-2164.
- 李启雷, 李玉丽, 屠泓为, 等. 2021. 丁青地区地震重定位、震源机制及其发震构造初步分析. 地震地质, 43(1): 209-231.
- 王栋. 2010. 近断层地震动的上/下盘效应研究. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 王同利, 张盛中, 崔博闻, 等. 2024. 2020 年古冶 M_s 5.1 地震序列微震检测及活动性研究. 地球物理学报, 67(4): 1501-1514.
- 王伟铤, 李晓丽, 李志强. 2011. 利用余震法快速判定宏观震中的研究. 震灾防御技术, 6(1): 36-48.
- 温瑞智, 任叶飞, 黄旭涛, 等. 2013. 芦山 7.0 级地震强震动记录及其震害相关性. 地震工程与工程振动, 33(4): 1-14.
- 吴佳杰, 陈文凯, 贾艺娇, 等. 2025. 基于密集台阵的地震烈度及灾情快速评估——以 2025 年西藏日喀则 M_s 6.8 地震为例. 地球科学, doi: 10.3799/dqkx.2025.035.
- 徐甫坤, 刘自凤, 张竹琪, 等. 2015. 2014 年云南景谷 M_s 6.6 地震序列重定位与震源机制解特征. 地球科学——中国地质大学学报, 40: 1741-1754.
- 徐钦, 田秀丰, 王维欢, 等. 2018. 2013 年甘肃岷县—漳县 6.6 级地震仪器烈度与宏观调查烈度比较分析. 地震工程学报, 40(1): 124-129.
- 徐锡伟, 李峰, 程佳, 等. 2023. 活动断层研究进展及其科学前沿问题讨论. 煤田地质与勘探, 51(12): 1-16.
- 许亚吉和庞卫东, 2021. 烈度速报子系统在 2021 年云南漾濞 M_s 6.4 地震中的应用. 地震研究, 2021, 44(3): 407-413.
- 徐志双, 刘杰, 郑通彦, 等. 2020. 基于精定位余震序列的 2019 年四川长宁 M_s 6.0 地震等震线研究. 地震学报, 42(4): 418-427.
- 徐志双, 任静, 谭专条, 等. 2022. 利用震源机制解走向判定地震影响场长轴方向. 地震研究, 2022, 45(1): 88-99.
- 杨天青, 姜立新, 董曼, 等. 2015. 基于余震序列分布信息的地震极灾区快速判断方法研究. 灾害学, 30(1): 8-15.
- 杨婷, 王世广, 房立华, 等. 2025. 2025 年 1 月 7 日西藏定日 M_s 6.8 地震余震序列特征与发震构造. 地球科学, doi:10.3799/dqkx.2025.033
- 俞言祥, 高孟潭. 2001. 台湾集集地震近场地震动的上盘效应. 地震学报, 23(6): 615-621.
- 张恩会, 赵 韬, 张永奇, 等. 2024. 渭河盆地高陵震群的发震构造. 地球科学, 49(7): 2662-2674.
- 张广伟, 张洪艳, 孙长青. 2016. 2015 年新疆皮山 M_s 6.5 地震震源机制及余震序列定位. 地震地质, 38(3): 711—720.
- 张小涛, 姜祥华, 薛 艳, 等. 2020. 2020 年 3 月 20 日西藏定日 M_s 5.9 地震总结. 地震地磁观测与研究, 41(4): 193-203.

郑勇, 谢祖军. 2017. 地震震源深度定位研究的现状与展望. 地震研究, 40(2): 167—175.

中国科学院地球物理研究所. 1981. 青藏高原当雄—亚东地带地壳与上地幔结果与速度分布的爆炸地震研究. 地球物理学报, 24(2), 155—170.

周中红, 孙艳萍, 朱 瑞. 2024. 基于新型地震烈度快速评估方法的震后人员压埋估计. 地球科学, 49(2): 437-450.

朱景宝, 刘赫奕, 栾世成, 等, 2024. 基于机器学习和迁移学习的现地地震动峰值预测. 地球科学. doi:10.3799/dqkx.2024.071

作者贡献度说明:

徐志双: 提出文章思路, 进行余震双差定位处理和图件绘制, 主笔撰写文章;

文鑫涛: 撰写引言部分和校对全文;

席楠: 强震动数据处理;

李志强: 图件和观点审核;

段乙好: 绘制图 1 和图 4;

李晓丽: 烈度图矢量化;

杨理臣: 地表破裂矢量化;

任静: 破裂过程矢量化;

董雨澈: 编制参考文献。

投稿者联系方式:

徐志双, 北京市西城区三里河南横街 5 号 中国地震台网中心, 100045. 电话: 18810404355,
E-mail: xzs0610@seis.ac.cn