西藏定日 6.8 级地震破裂特征及

序列强余震预测

赵小艳1, 贺素歌1*, 孔令嵩1, 张天宇1, 彭关灵1,2

王光明1,苏有锦1

1 云南省地震局 昆明 650224

2 中国科技大学, 合肥 230051

摘要:2025年1月7日西藏定日 6.8 级地震序列余震空间分布广且复杂、最大余震震级偏小,且区域可类比历史震例资料缺失,给强余震预测带来挑战。本文利用西藏区域地震台网震相报告,采用双差定位方法,对定日 6.8 级地震序列进行了重新定位。结果显示,序列余震区长轴呈 NS 走向展布,长度约 80km,实际破裂长度大于经验估算破裂长度,且序列分段特征明显,南北端密集,中间稀疏。定日序列 Mi4.5 以上余震空间分布复杂,Mi4.5 以上余震分布受不均匀主震滑动、局部应力条件、断层几何结构、构造背景和和历史地震破裂影响等复杂因素共同影响和控制。序列最大余震为 Ms5.0,与主震震级差为 1.8,存在"破裂长度越大、主震与最大余震震级差越大"的经验关系。

关键词: 定日 6.8 级地震; ML4.5 以上余震预测; 登么错断裂; 地震精定位

中图分类号: P315 收稿日期: 2025-03-08

Rupture Characteristics of the Dingri M6.8 Earthquake in Tibet

and Prediction of Strong Aftershocks in the Sequence

ZHAO Xiaoyan¹, HE Suge^{1*}, KONG Lingsong¹, ZHANG Tianyu¹, PENG Guanling^{1,2}

WANG Guangming¹, SU Youjin¹

1 Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224

2 University of Science and Technology of China, Hefei 230051

Abstract: The M6.8 Dingri earthquake in Tibet on January 7, 2025, exhibited a spatially extensive and complex aftershock sequence, with a relatively small maximum aftershock magnitude. Additionally, the lack of comparable historical earthquake data in the region posed significant challenges for strong aftershock prediction. This study utilized phase reports from the regional seismic network in Tibet and applied the double-difference relocation method to precisely relocate the Dingri *M*6.8 earthquake sequence. The results reveal that the aftershock zone extends along a north-south (NS) trend, spanning approximately 80km in length, with the actual rupture length exceeding empirical estimates. The sequence displays distinct segmentation characteristics, with dense clusters at the northern and southern ends and sparse activity in the central section. The spatial distribution of aftershocks with magnitudes $M_L \ge 4.5$ is highly

基金项目:云南省地震科技创新团队(CXTD202412)资助。

第一作者: 赵小艳(1982-), 女,高级工程师,主要从事地震震后趋势和地震活动研究. ORCID: 0009-0008-9411-9139. E-mail: <u>zhaoxiaoyan@seis.ac.cn</u>.

通讯作者: 贺素歌(1987-), 女, 工程师, 主要从事地震活动性和地震综合预报研究. ORCID: 0009-0002-9168-7516.

E-mail:h_suge@126.com.

complex, influenced and controlled by multiple factors, including heterogeneous coseismic slip, local stress conditions, fault geometry, tectonic setting, and historical seismic rupture patterns. The largest aftershock recorded was $M_{\rm S}5.0$, yielding a magnitude difference of 1.8 from the mainshock. This observation supports the empirical relationship that "larger rupture lengths correlate with greater magnitude differences between the mainshock and its largest aftershock."

Keywords: Dingri M6.8 earthquake, $M_L \ge 4.5$ aftershocks prediction, Dengmocuo fault, Hypocenter relocation

0引言

2025年1月7日9时5分,西藏自治区日喀则市定日县发生 Ms6.8强烈地震。中国地震 台网中心(CENC)给定的微观震中(87.45°E,28.50°N)位于定日县措果乡¹。现场灾害调查 结果显示,西藏定日6.8级地震造成地表破裂约26km,等震线长轴呈近NS走向,极震区烈度 达IX度,地震共造成126人遇难,约6.15万人不同程度受灾²。

截至 2025 年 2 月 25 日,西藏自治区区域地震台网共记录到定日 6.8 级地震序列 0 级以上 余震事件 10055 次,其中,*M*_L0.0~0.9 地震 597 次,*M*_L1.0~1.9 地震 5094 次,*M*_L2.0~2.9 地震 3872 次,*M*_L3.0~3.9 地震 467 次,*M*_L4.0~4.9 地震 24 次,5.0 级以上余震仅 1 次,为 1 月 13 日 20 时 58 分 *M*_S5.0 地震,是序列最大余震。从序列 3 级以上地震日频次 *N*-*t* 图(图 1)可以看出, 定日 6.8 级地震余震较为丰富。曲松



图 1 定日 Ms6.8 地震序列 ML≥3.0 地震 M-t(a)和日频次 N-t 图(b)

(横坐标为地震日期距离 2025 年 1 月 7 日的时间间隔,单位为天)

Fig.1 *M-t* (a) and daily frequency *N-t* diagram (b) for the $M_L \ge 3.0$ events of the Dingri $M_S 6.8$ earthquake sequence (The x-axis shows the elapsed time in days from January 7, 2025, to the earthquake dates)

定日 M_s6.8 地震发生后,震区余震活动判定成为地震工作者的研究焦点之一。在定日 M_s6.8 地震序列跟踪中发现,该地震序列的一个显著特征是余震分布尺度显著偏长。余震重定位结果、野外踏勘资料、InSAR 显示的地表形变和地震破裂过程结果均表明,定日 6.8 级地震断层破裂

¹ https://news.ceic.ac.cn

² https://www.cea.gov.cn/cea/xwzx/fzjzyw/5790712/index.html

³https://www.cea-igp.ac.cn/cxdt/280884.html

尺度超过 70km³。根据国内外学者对强震断层破裂尺度与地震震级的统计关系研究(Utsu,1961; Wells and Coppersmith, 1994; 蒋海昆等, 2015),对于定日 6.8 级地震而言,其经验估算断层 破裂长度应在 42-55km 之间,而实际断层破裂长度远远超过该经验估计值。定日地震断层破裂 长度显著偏长这一特征,对判定后续余震活动水平是否存在影响? 地震破裂尺度与后续余震活 动之间是否存在一定相关性? 由于破裂尺度偏长,给强余震地点预测也带来了极大的难度。本 研究将利用精定位研究定日 6.8 级地震破裂时空特征,以及这些特征在强余震预测中的应用。

1区域地质构造背景及历史地震情况

印度板块与欧亚板块的碰撞和持续挤压导致了青藏高原地壳缩短、岩石圈增厚、高原隆升 等一系列新生代构造变形,是控制中国大陆西部构造变形的主要动力学机制。在这一构造动力 作用下,青藏高原由西南向东北可以细分为喜马拉雅地块、拉萨地块、羌塘地块、巴颜喀拉地 块、柴达木地块(肖卓,2019)。定日 6.8 级地震发生在青藏高原南部的拉萨地块内部,是近 50 年来地块内发生的最大正断型地震(图 2)。

除碰撞和持续的挤压外,增厚抬升的青藏高原地壳在重力作用下发生塌陷,在其南部形成 一系列平行展布、近 SN 走向的正断层裂谷系,是青藏高原最为独特的活动构造变形形迹之一 (England and Houseman, 1989;张进江和丁林, 2003;张佳伟等, 2020;郭长宝等, 2024)。 在这种独特的构造变形作用下,自西向东形成了当惹雍错-许如错断裂裂谷、尼玛-定日裂谷、 申扎-定结裂谷、亚东-谷露裂谷、桑日-错那裂谷。这些裂谷向南穿过雅鲁藏布江缝合带和藏南 拆离系,到达高喜马拉雅地区,向北贯穿整个拉萨地块到达羌塘地块(Armijo *et al.*,1986)。根 据 GPS 观测结果,藏南裂谷系总的伸展速率约 15mm/a,并显示出空间不均匀性(Wang and Shen, 2020),是高原内部重要的控震构造(Armijo *et al.*, 1986;吴中海等, 2015)。喜马拉雅 地区板块挤压作用积累的应力以不同方式释放,在珠穆朗玛峰南坡以南北挤压型逆冲地震为主, 如 2015 年尼泊尔 *M*s8.1 地震及其 *M*s7.1 余震;在珠穆朗玛峰市坡以东西拉张型正断型地震为 主,如本次定日 6.8 级地震,本文研究区域内地震震源机制以正断型为主(白玲等, 2025)。

定日 6.8 级地震发生在藏南裂谷系自西向东的第 4 条裂谷—申扎-定结裂谷上,为全新世活动的正断裂带,长约 350km,整体走向 N20°E,依据裂谷几何特征及其活动习习性,可大致将

其分为南、北 2 段。此次地震发生在裂谷南段的登么错断裂上。该断裂控制了登么错湖盆地的东

缘,为全新世活动断裂,全长约 60km,断裂带宽 30~300m 不等,走向总体近 SN。登么错断裂 南段主要沿登么错湖盆东边缘展布,呈 NE 向的弧形,而北段则呈近 SN 走向,呈拉长的"S"

型,倾向W,倾角为56°~68°,晚更新世以来的垂直活动速率为0.1mm/a,全新世以来的垂直

滑动速率为(0.28±0.04)mm/a(田婷婷和吴中海, 2023;梁明剑等, 2025)。

根据中国地震局监测预报司提供的《中国 5 级以上地震目录汇编》(内部资料),研究区 (27.5~30°N, 85~90°E) 20 世纪以来共发生 Ms≥6.0 地震 11 次,其中 6~6.9 级地震 10 次,7 级地震仅 1 次,为 2015 年 4 月 26 日尼泊尔 7.1 级地震,该地震为 2015 年 4 月 25 日尼泊尔 8.1 级地震的余震,其余 6 级以上地震相对发生在申扎-定结裂谷断裂北段。20 世纪 90 年代申 扎-定结断裂带及其周边区域一直处于中强地震活跃期,分别于 1996 年和 1998 年发生 3 次 6

级以上地震。1998年9月4日在本次定日 6.8级地震东侧约 13km 的地方曾发生一次 Ms6.2地





图 2 区域构造、历史强震及台站分布(1900—2025, Ms 26.0)

Fig.2 Regional tectonic settings and historical strong earthquakes with M_S≥6.0 from 1900 to 2025

2 定日地震序列重新定位

2.1 方法和数据

定位方法采用双差定位,该方法的核心是将地震事件丛集根据震中距、震相数量等规则进行配对,使用地震对中两个事件相对于同一地震台站的观测走时差与理论走时差之差(双差)反演震源之间的相对位置,从而得到整个地震丛的精确位置(Waldhauser and Ellsworth, 2000)。 速度模型采用 Crust1.0 模型,该模型通过地震、重力密度约束提供了较为合理的地壳特征,是 广为使用的全球模型之一(张倩文等, 2024)。

定日 6.8 级地震发生后,西藏自治区地震局在震中周边架设了 6 个流动台,并于 2025 年 1 月 9 日 0 时起开始记录地震数据,加上原有固定台站,主震震中附近 300km 范围内有 18 个地 震台站,最近的台距离震中约 10km,这些台站为地震定位提供了丰富的近台观测数据(图 2)。

本研究选取 2025 年 1 月 7 日至 2 月 25 日西藏地震台网记录的正式观测报告,并要求每个 地震事件至少有 6 个震相记录的地震事件进行重定位,共筛选出 6945 次地震事件参与重定位, 经过重定位程序预处理,最终共有 563,190 个 P 波震相对和 575,592 个 S 波震相对参与重定位。 利用双差定位方法对定日地震序列重定位后,共得到 6121 次地震事件的精确震源位置,重定 位率约为 89%。

2.2 地震序列时空发展特征

重定位后的 Ms6.8 主震震中位置为(28.516°N, 87.490°E),震源深度为6.5km。重定位后 纬度、经度、深度和发震时刻相对平均定位误差分别为45.17m、48.37m、115.48m 和0.082s, 比徐志双等(2025)对定日地震震后72小时内余震精定位的误差略小,是由于其使用的主要 是流动台架设前的震相数据。本文精定位结果显示,流动台架设前,纬度、经度、深度相对平 均定位误差分别为66.90m、58.64m、781.47m;流动台架设后,上述3个误差分别为43.53m、 47.60m、65.28m,深度的误差减小最显著。

余震震中主要分布在登么错断裂的西侧,整体呈近 NS 向展布,余震序列长约 80km,宽约 10km (图 3a)。为了展现序列的空间分布细节,采用 0.005°的步长,计算了每个空间节点半径

2km 范围内的地震对数密度。从地震空间密度图(图 3b)可以看出,序列由 5 个丛集组合而成。从图 3a、b 可见,余震序列的分段性特征明显,北段呈密集条带分布于登么错断裂的西侧,即断层的上盘;往南密度出现分支现象,与图 4c 剖面图显示的结果一致。主震附近余震分布极其复杂,余震已穿过登么错断裂,并持续向东南发展,形成另一个余震密集区(图 3b⑤号密集区),登么错断裂在此段走向由 NS 变为 NE,可能是受该断裂在南段变形的影响,以及郭加东断裂的约束作用。

在序列中间段(③④密集区中间、剖面 DD*)有明显的小震稀疏段,该稀疏段位于登么错 湖以西。造成这一区域余震稀疏的原因可能是在本次定日 6.8 级地震东侧约 10km 的地方曾于 1998 年 9 月 4 日发生一次 *M*s6.2 地震(图 2),该稀疏段可能在 6.2 级地震时已完全破裂。此 外,根据定日地震地表破裂方面的研究认为,登么错湖附近的破裂表现出新生性的弥散型破裂 特征,破裂宽度较宽(邹俊杰等,2025)。一次地震释放的能量主要包括断层机械运动做功、剪 切生热及地震波辐射能 3 部分(蒋海昆等,2008),定日地震在登么错湖产生了长约 10km、宽 度达 200m 的地裂缝密集形变带(邵延秀等,2025;杨婷等,2025),该剪切摩擦过程中产生巨



(图 a 中蓝色虚线为辅助线,表示图 4 中深度剖面的位置,其中 AA*代表平行地震序列长轴的剖面位置,

BB*、CC*、DD*、EE*、FF*、GG*分别为不同段落剖面位置)

Fig.3 Map of epicentral distribution (a) and epicentral density (b)

(Blue dash lines represent Fig. 4 depth profiles location, AA* represents the profile parallel to the major axis of Dingri earthquake sequence, and BB*、CC*、DD*、EE*、FF*、GG*)

主震发生后当天,余震即发生在整个 NS 走向破裂区,而 *M*_L≥4.5 余震只发生在破裂的南 北两端两个区域:主震近端(距离主震约 3~8km)和余震分布的最北端(距离主震约 52~53km)。 随时间推移,在震后 7 天以后,*M*_L≥4.5 余震突破原有集中区,2 次 *M*_L≥4.5 地震发生在主震东 南端 NE 走向分支。即 *M*_L≥4.5 余震相对集中在以下 3 个区域:主震附近有 5 次地震,且发生 了序列最大余震;余震区的最北端在主震当日即发生了 2 次地震;余震区东南端发生 2 次 *M*_L≥4.5 余震。

杨建文等(2025)计算定日 6.8 级地震的同震库仑应力变化结果显示,定日地震导致发震断层东、西两侧的同震库仑应力降低;断层破裂段南、北两端及其周围区域库仑应力显著增加,加载量远大于地震触发阈值,本文定位得到的余震集中区域主要位于沿破裂面以及主破裂以西的库仑应力增强区。

深度剖面显示(图 4a),少部分地震的震源深度在 20km 以下,这些地震显深蓝色,时间 集中在震后 2 天内,即流动台架设前的地震,这说明流动台的数据对地震定位精度尤其是深度 精度有大幅提升。重定位后地震序列主要集中在 8~15km 的深度范围内,呈现出北端深、南端 浅的特征。

根据余震空间及其密度空间分布图,在垂直于长轴的剖面上取了 3 个剖面(BB*、CC*、 DD*),3 个剖面显示的断层倾角较陡,与登么错断裂的 60~70°倾向特征相符,但不同剖面余 震分布特征断裂形态各异,北段 BB*剖面呈西倾但陡立的特征,CC*剖面出现 3 组分支断裂, 且各分支断裂呈现倾向各异的特点,西倾和东倾并存,结合登么错断裂构造分析认为,最东侧 剖面是登么错断裂。



Fig. 4 Depth profiles of Dingri earthquake sequence in different orientations

(The location of profiles see Fig. 3; Purple-red dash lines represent the inferred seismogenic faults) 主震以南区域的余震展布较为复杂,出现了纵横交错的分支和发散现象,以两组 NE 走向 分支为主,在该区域分别取了 3 个剖面(EE*、FF*、GG*),结果显示,主震附近的 EE*剖面地 震集中分布在主震深度以下 5km 左右,整体的深度约为 6~12km,相对北段的余震较浅,但断 层的倾向并不明显; FF*剖面余震发生的时间相对较晚,深度西南浅东北深,断层倾向不明显, 可能为主震及早期余震激发了郭加断裂活动。

3 定日地震最大余震预测

震后趋势判定及强余震预测涉及许多尚未解决的科学问题,常用的方法是基于历史地震序 列类比的统计方法。这是由于地震序列类型与区域构造运动形式和深部介质环境有关,结合区 域及发震构造特征的历史地震序列类比,可为序列类型判定和余震衰减活动特征预测提供参考 依据(蒋海昆等,2015)。但是由于西藏地区测震台站建设相对滞后,整体地震监控能力较弱, 截止 2023 年西藏大部分地区地震监测能力约为 *M*_L2.5 左右,历史地震监控能力更弱,约为 *M*_L4.5 左右(多布拉等,2023),造成历史地震序列资料不完备,无法利用区域地震序列余震活 动特征对最大余震进行预测,因此本文从定日 6.8 级地震时空展布特征开展强余震预测。

3.1 强余震地点预测

Das 和 Henry(2003)通过对全球 8 次大地震主震滑动与余震分布的空间关系分析认为, 余震在空间上大多分布于主震滑移的终止区域、高滑移区边缘、高低滑移区转换部位及低滑移 区,这些区域的显著特征是主震后明显的应力增长,这意味着主震破裂面内残余凹凸体在震后 应力调整过程中的进一步破裂导致余震。而高滑动区域余震较少这一普遍现象的解释是,凹凸 体通常会完全破裂,因此滑动量低,应力梯度小。

在地震瞬时的地壳弹性介质中,地震破裂末端通常是主要且最大的应力增加区域,这些区域是余震最密集的区域,而且通常会发生序列最大余震。最典型的震例为 2008 年汶川 8.0 级 地震和 1997 年丽江 7.0 级地震:青川-平武是汶川地震破裂过程的终止区域,发生了序列最大 余震青川 6.4 级地震,该区域也是序列 5.5 级较大余震的主体活动区域(蒋海昆等,2008);丽 江 7.0 级地震为典型的单侧正断型破裂地震,较强余震和最大余震均发生在破裂末端(He *et al*, 2001)。多家机构给出了定日 6.8 级地震的震源破裂过程,综合地表破裂调查结果,分析认为定 日 6.8 级地震瞬间,快速向北单侧破裂,由于同震库仑应力触发,在主震后 6 分钟内即在北段 触发了两次 *M*_L≥4.5 余震(图 3),但由于主震滑动量随距离衰减,破裂末端无法聚集更多能量 触发更多、更大余震。

定日 6.8 级地震 *M*_L4.5 以上余震相对集中在主震附近及其东南侧,也是余震最为密集的区域(图 3b 中④号密集区),该区域是同震库仑应力增加幅度最大的区域(杨建文等,2025;李雨森等,2025)。定日 6.8 级地震震源破裂过程显示,主震附近的最大位移量可达 1.5m,且随距离呈现高梯度衰减,有利于应力在该区域的释放(中国地震局地球物理研究所,2025)。此外,登么错断裂在该区域由 NS 走向转为 NE 走向(图 3),断层走向发生变化的区域往往是余震密集区,如 1992 年兰德斯 7.3 级地震余震最密集区位于断层北端向东跃迁至其他断层处(Cohee and Beroza, 1994)。主断层上从较高滑移过渡到较低滑移的区域,即滑移梯度较大的区域,预计也会有类似的应力增加。

此外,相关研究结果显示,强余震会受区域速度结构影响,这是由于速度结构控制着沿断 层面的滑移分布,如汶川 8.0 级地震震区两个高速体恰好对应着两个较大滑移距离的区域,而 滑移分布又与余震分布密切相关,汶川 8.0 级地震的强余震全部发生在波速比相对较高的地区 (Pei *et al*, 2010)。这是由于高速区多属地壳脆性介质,易于造成应力集中,导致发生地震; 反之,低速区则可能代表破碎程度较高、富含流体或温度较高区域,因而更倾向于产生无震变 形(田有等,2007;赵小艳等,2014)。但目前为止,尚无关于定日 6.8 级地震震源区详细速度 结构研究结果。

通过绘制不同时段的序列事件在长轴剖面 AA*上的投影来研究本次地震序列的发展特征。 从图 5 可以看出,序列整体呈起伏衰减,可以分为:2 个 *M*_L4.5 以上余震时空丛集释放阶段(震后 1.5 天、7 天),共发生 6 次 4.5 级以上地震,空间集中在主震附近和破裂最北端;2 个余震 丛集释放阶段,发生了序列最大余震及其余 4 次 *M*_L4.5 以上余震。空间上,从震后 10 天开始 不断南扩,触发了主断层东南端郭加断裂的地震活动;中北段震后 5 天之后无 4.5 级以上地震 发生,最大余震震级为 *M*_L4.0,远小于南段的余震活动。一个有趣的现象是,主震及 *M*_L4.5 以 上余震深度随时间从 6km 左右逐渐加深至 10km 左右,可能是主震触发了登么错断裂及郭加断 裂的深部地震活动。

综上,定日 6.8 级地震 *M*_L4.5 以上余震空间分布复杂,受主震滑动、局部应力条件、断层 几何、构造背景和历史地震破裂影响等因素共同影响和控制,可依靠全球和中国大陆现有历史 震例类比、破裂力学模型、经验认识对 *M*_L4.5 以上余震地点做出一定程度的预测。





不同颜色代表强余震活动水平,其中浅红色表示强余震时空丛集释放,浅橙色表示余震时空丛集释放, 灰色区域为地震平静的时空域

Fig. 5 The spatiotemporal evolution pattern of the 2025 Dingri Ms6.8 earthquake sequence

Different colors represent the levels of strong aftershock activity, where light red indicates the spatiotemporal clustering release of strong aftershocks, light orange indicates the spatiotemporal clustering release of aftershocks, and

the gray areas represent spatiotemporal domains of seismic quiescence.

3.3 余震强度预测

对于最大余震震级,早期一般认为主震与最大余震震级差Δ*M* 是一个与主震震级无关的常数(Bath 定律,平均约为 1.2),但是该定律并不适合所有余震序列,实际受震源机制、震源 深度、序列类型、区域构造特征、断层之间相互作用等多种因素的影响,Δ*M* 范围非常大 (Kisslinger and Jones, 1991; Helmstetter and Sornette, 2003; 蒋海昆等, 2015; Shcherbakov et al, 2013; 苏有锦等, 2014; Žalohar, 2014)。从已有研究结果看,Δ*M* 存在区域差异性(Tsapanos, 1990),如果区域历史地震序列统计样本足够丰富,可在震后快速估算最大余震震级。但由于 西藏地区历史强震序列资料不完备,无法利用区域Δ*M* 值进行最大余震估算。

余震时空分布作为地震发生后可直接观测的信息,能够反映断层破裂规模和地震能量释放时空分布等特征。苏有锦等(2014)分析全球7级地震时认为,余震区或震源破裂区线性度较高,其余震活动频度和最大余震水平较低高。蒋海昆等(2008)对全球12次8级地震统计结果显示,存在"破裂尺度越大、主震与最大余震震级差越大"的统计规律。破裂尺度越大,必然导致摩擦滑动过程中巨大的剪切生热,因此剩余的与余震活动相关的能量较为有限,从而导致余震活动水平偏弱。

余震区域形成时间在一周以内,第一周之后,余震区域通常变化不大,后期余震只是填充 了早期形成的区域(Das and Henry, 2003)。因此,尽管用于定位地震数据截止时间不一样, 本研究精定位得到定日6.8级地震序列余震长度约80km,宽度约20km,与杨婷等(2025)、Yao et al (2025) 研究结果一致。

根据国内外学者对强震断层破裂尺度与地震震级的统计关系研究(Utsu,1961;吴开统等,1990;蒋海昆等,2007),定日地震断层破裂长度应在42~55km之间,而实际断层破裂长度超过该经验估计值。表1给出了西藏及周边地区地震破裂长度、主震与最大余震震级差、震源错断类型等相关信息,表中红色为破裂尺度相比利用经验公式计算结果偏长的震例,与定日6.8级地震类似典型震例有2001年昆仑山口西8.1、2008年四川汶川8.0和2021年青海玛多7.4级地震,余震分布尺度均大于理论断层破裂尺度,主震与最大余震震级差分别为2.4、1.6和2.3(苏有锦等,2014;蒋海昆等,2015;李佺洪和万永革,2024),均显著高于Bath定律1.2的理论震级差。2020西藏尼玛6.6级地震震源错断类型为正断型,与本次定日6.8级地震相似,但该地震发生在羌塘块体,距离本次地震522km,且破裂长度仅25km,震级差1.2,符合Bath定律,因此从区域历史震例类比角度,由于藏南裂谷系历史地震资料缺乏,暂时无法找到可类比的震例。

统计结果显示,地震震级与破裂长度经验回归模型不会因震源错断类型不同而产生显著变化,即在相同震级下,震源错断类型不会导致地震破裂长度差异很大(Wells and Coppersmith, 1994),二者之间是通过构造背景、应力累积、断层几何及动力学过程相互作用。因此,综合分析认为,对于7级左右地震,余震分布尺度与后续余震活动之间存在一定相关性,存在"破裂长度越大、主震与最大余震震级差越大"的经验关系,与地震震源错断类型无关。可以根据这一特点,利用余震展布空间尺度信息对震后余震活动水平进行估算。值得注意的是,反过来,破裂尺度越小,震级差不一定越小,如2017年米林6.9级地震(表1)。

表1 地震破裂长度、震级差、震源错断类型表

红色表示破裂长度偏长

Tab.1 Earthquake rupture length, magnitude differences, and focal mechanism types					
(Red indicates rupture length longer than empirical estimated rupture length)					
编号	主震信息	破裂长	经验估算	ΔM	震源错断类型
		度/km	破裂长度/km		
1	2001昆仑山口西8.1	383	154~214	2.4	走滑型
2	2008四川汶川8.0	300	143~191	1.6	逆冲型
3	2015尼泊尔8.1	200	154~214	0.8	逆冲兼走滑
4	2017西藏米林6.9	30	48~59	1.9	逆冲型
5	2020西藏尼玛6.6	25	33~47	1.2	正断型
6	2021青海玛多7.4	170	83~94	2.3	走滑型
7	2025西藏定日6.8	80	42~55	1.8	正断型

注: 表中破裂长度根据余震空间分布估算得到, 经验估算破裂长度分别根据以下公示:

 $\log L = 0.5M_0 - 1.8$ (Ustu, 1961); $\log L = 0.51M_0 - 1.78$ (吴开统等, 1990); $\log L = 0.347M_0 - 0.622$ (蒋海昆等, 2015)

4 结论

本文通过精定位后的地震目录分析了定日 6.8 级地震序列的时空演化特征,参考定日地震发震断层几何结构、地表破裂展布特征、同震库仑应力变化、震源破裂模型等资料,尝试综合利用上述研究成果,对定日 6.8 级地震序列 *M*_L4.5 以上余震发生地点和最大余震强度进行预测,得到以下初步认识:

1) 定日 6.8 级地震序列余震沿着登么错断裂走向呈近 NS 向展布,余震序列长约 80km, 宽约 10km。序列的分段性特征明显,北段呈密集条带分布于登么错断裂的西侧,南段余震分 布随着登么错断裂走向的改变,其分布极其复杂,出现了纵横交错的分支和空间发散现象。

2) 地震序列主要集中在 8~15km 的深度范围内,北端深、南端浅。垂直于走向的 3 个剖面

显示断层倾角较陡,与登么错断裂的 60~70°倾向特征相符。主震附近地震集中分布在主震深度以下 5km 左右,整体的深度约为 6~12km,无明显倾向。

3) 定日 6.8 级地震 *M*_L≥4.5 余震空间分布复杂,相对集中在主震附近及其东南侧,受主震 滑动不均匀、局部应力条件、断层几何结构、构造背景和和历史地震破裂影响共同影响和控制。

4) 定日 6.8 级地震序列破裂尺度大于理论破裂尺度,主震与最大余震震级差为 1.8,符合"破裂尺度越大、主震与最大余震震级差越大"经验关系。

根据本文研究结果,可将余震空间展布长度作为最大余震强度预测的重要依据,作为可以 在震后较短时间内获取的余震空间尺度信息,尤其是在历史地震序列缺乏、区域构造复杂地区, 该方法具有较强的时效性和可操作性,同时,随着地震发生后震源破裂过程、地震科考成果等 信息的不断补充,还可对预测结果进行相应的修正。

此外,本文研究结果显示,流动台站架设前后定位误差减小,尤其是深度的误差减小了10 倍,而深度剖面的细致刻画,可协助判断发震构造及其三维几何性质,对断裂的活动习性和孕 震规模研究至关重要。鉴于此,应在震后尽可能快的架设流动地震台并迅速组网观测,以获得 震后序列更全面的观测数据。

致谢:感谢西藏自治区地震局在震后布设的流动台站,感谢中国地震台网中心、西藏自治 区地震局提供的正式、快报观测报告以及地震目录。2025年1月7日至1月21日,中国地震 台网中心、西藏自治区地震局联合云南省地震局,每日召开定日地震的专题序列会商,本文得 益于与会专家,尤其是蒋海昆研究员、刘杰研究员和孟令媛研究员的指导,西藏自治区地震局 高锦瑞台长在数据使用方面提供的帮助,在此一并致谢。文中图件采用 GMT6.0 软件绘制。

Rreferences

- 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. https://doi.org/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(3):258-263. https://doi.org/10.19975/j.dqyxx.2025-006(in Chinese with English abstract).
- Cohee, B.P., Beroza, G.C., 1994. Slip Distribution of the 1992 Landers Earthquake and Its Implications for Earthquake Source Mechanics. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84 (3):692-712. https://doi.org/10.1016/0148-9062(95)94486-9.
- Das, S., Henry, C., 2003. Spatial Relation Between Main Earthquake Slip and Its Aftershock Distribution. *Reviews of Geophysics*, 41(3). https://doi.org/10.1029/2002RG000119.
- Duobla, Puqiong, Luosangluobu, et al., 2008. The construction and development of seismic monitoring network in Tibet. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 44(2):73-78(in Chinese with English abstract).
- 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. https://doi.org/10.1029/JB094iB12p17561_
- Guo, C.B., Wu, R.A., Zhong, N., et al., 2024. Large Landslides along Active Tectonic Zones of Eastern Tibetan Plateau: Background and Mechanism of Landslide Formation. *Earth Science*, 49(12):4635-4658. https://doi.org/10.3799/dqkx.2024.124(in Chinese with English abstract).
- HE, H.L., Oguchi, T., Zhou, R.Q., et al., 2001. Damage and Seismic Intensity of the 1996 Lijiang Earthquake, China: A

GIS Analysis. Geographical Review of Japan, 74(2):187-198. https://doi.org/10.4157/grj1984b.74.187.

- Helmstetter, A., Sornette, D., 2003. Bath's Law Derived from the Gutenberg-Richter Law and from Aftershock Properties. *Geophysical Research Letters*, 30 (20):1-4. https://doi.org/10.1029/2003gl018186.
- Institute of Geophysics, China Earthquake Administration. 2025. January 7, 2025 Tibet Shigatse City Dingri County *M*6.8 Earthquake Science and Technology Support Briefing[EB/OL].(2025-01-07)[2025-1-16]. https://www.ceaigp.ac.cn/kydt/280883.html(in Chinese).
- Jiang, H.K., Li, M.X., Wu, Q., et al., 2008. Features of the May 12 M8.0 Wenchuan Earthquake Sequence and Discussion on Relevant Problems. *Seismology and Geology*, 30(3):746-758 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, H.K., Yang, M.L., Fu, H., et al., 2015. A Reference Guide for Post-earthquake Trend Judgment. Beijing: Seismological Press(in Chinese).
- Kisslinger, C., Jones, L.M., 1991. Properties of Aftershock Sequences in Southern California. Journal of Geophysical Research:Solid Earth, 96(B7):11947-11958. https://doi.org/10.1029/91JB01200.
- Li, Q.H., Wan, Y. G., 2024. Geometry of Seismogenic Faults Determination of the 2021 Maduo Earthquake Sequence by Fuzzy Clustering Algorithm. *Earth Science*, 49(9):3363-3376. https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.096(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_s6.8 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).
- Liang, M.J., Dong Y.X., Zuo H., 2025. Surface Deformation Characteristics and Causes of the Dengmecuo Segment in the Xizang Dingri *M*6.8 Earthquake. *Seismology and Geology*, 47(1):80-89(in Chinese with English abstract).
- Pei, S.P., Su, J.R., Zhang, H.J., et al., 2010. Three-Dimensional Seismic Velocity Structure Across the 2008 Wenchuan Ms8.0 Earthquake, Sichuan, China. *Tectonophysics*, 491(1-4):211-217. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.08.039.
- Shao, Y. X., Wang, A. S., Liu, J., et al., 2025. Preliminary Investigation on Surface Rupture and Coseismic Displacement of the January 7, 2025 Dingri Earthquake in Xizang. *Earth Science*. https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.040(in Chinese with English abstract).
- Shcherbakov, R., Goda, K., Ivanian, A., et al., 2013. Aftershock Statistics of Major Subduction Earthquakes. Bulletin of the Seismological Society of America, 103 (6):3222-3234. https://doi.org/10.1785/0120120337.
- Su, Y.J., Li, Z.H., Zhao, X.Y., et al., 2014. Study on Global Earthquake Sequences with Magnitude 7 and Above. Kunming: Yunnan University Press(in Chinese with English abstract).
- 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(1):53-55(in Chinese with English abstract).
- Tian, Y., Zhao, D.P., Sun, R.M., et al., 2007. The 1992 Landers Earthquake: Effect of Crustal Heterogeneity on Earthquake Generation. *Chinese Journal of Geophysics*, 50(5):1488-1496(in Chinese with English abstract).
- Tsapanos, T.M., 1990. B-values of Two Tectonic Parts in the Circum-Pacific Belt. Pure & Applied Geophysics, 134(2):229-242. https://doi.org/10.1007/BF00876999.
- Utsu, T., 1961. A Statistical Study on the Occurrence of Aftershocks. Geophysical magazine, 30:521-605.
- 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. https://doi.org/10.1785/0120000006.
- Wang, M., Shen, Z.K., 2020. Present-Day Crustal Deformation of Continental China Derived From GPS and Its Tectonic Implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(2). https://doi.org/10.1029/2019JB018774.
- Wells D L, Coppersmith K J. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4):974-1002.
- Wu, Z.H., Long, C.X, Fan, T.Y., et al., 2015. The Arc Rotational-Shear Active Tectonic System on the Southeastern

Margin of the Tibetan Plateau and Its Dynamic Characteristics and Mechanism. *Geological Bulletin of China*, 34(1):1-31(in Chinese with English abstract).

- Xiao, Z., 2019. Interior Structure of the Tibetan Plateau Revealed by Seismic Imaging. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration(in Chinese with English abstract).
- Xu, Z.S., Wen, X.T., Xi, N., et al., 2025. Aftershock Relocation and Intensity Distribution of the Dingri *M*s6.8 Earthquake in 2025. Earth Science. https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.044(in Chinese with English abstract).
- Yang. J.W., Jin, M.P., Ye, B., et al., 2025. Source Rupture Mechanism and Stress Changes to the Adjacent Area of January 7, 2025, *Ms*6.8 Dingri earthquake, Xizang China. *Seismology and Geology*, 47(1):36-48(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 Ms6.8 Dingri Earthquake in Tibetan Plateau. *Earth Science*, 47(1):1-15(in Chinese with English abstract).
- Yao, J.Y., Yao, D.D., Chen, F., et al., 2025. A Preliminary Catalog of Early Aftershocks Following the 7 January 2025 Ms6.8 Dingri, Xizang Earthquake. Journal of Earth Science. https://doi.org/10.1007/s12583-025-0210-9.
- Žalohar, J., 2014. Explaining the physical origin of Båth's law. *Journal of Structural Geology*, 60:30-45. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2013.12.009.
- 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).
- Zhang, Q.W., Xu, Y., Wang, X.G., 2024. Characteristics of global gravitational potential energy and its geological significance analysis based on the Crust1.0 model. *Chinese Journal of Geophysics*, 67(1):77-88(in Chinese with English abstract).
- Zhao, X.Y., Han, L, B., Xu, F.K., et al., 2014. Research on Tracking Analysis for Ludian *M*s6.5 Earthquake Sequence in Yunnan in 2014. *Journal of Seismological Research*, 37(4):508-514(in Chinese with English abstract).
- Zou, J.J. Shao, Z.G., He, H.L., et al., 2025. Surface Rupture Interpretation and Building Damage Assessment of Xizang Dingri Ms6.8 Earthquake on January 7, 2025. Seismology and Geology, 47(1):16-35(in Chinese with English abstract).

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,56(3):258-263.
- 多布拉,普穷,洛桑罗布,等,2023. 西藏地震监测台网的建设与发展. 地震地磁观测与研究,44(2):73-78.
- 郭长宝,吴瑞安,钟宁,等,2024. 青藏高原东部活动构造带大型滑坡成灾背景与灾变机制. 地球科学, 49(12):4635-4658.
- 蒋海昆,黎明晓,吴琼,等,2008. 汶川 8.0 级地震序列及相关问题讨论. 地震地质, 30(3):746-758.
- 蒋海昆,杨马陵,付虹,等,2015. 震后趋势判定参考指南. 北京:地震出版社.
- 李佺洪, 万永革, 2024. 采用模糊聚类算法确定 2021 年玛多地震序列的断层结构. 地球科学, 49(9):3363-3376.
- 李雨森,李为乐,许强等,2025.2025年1月7日西藏定日 Ms6.8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.
- 梁明剑,董芸希,左洪,等,2025.2025年西藏定日 6.8级地震登么错段地表变形特征及其成因. 地震地质, 47(1):80-89.
- 邵延秀,王爱生,刘静,等,2025.2025 年 1 月 7 日西藏定日地震地表破裂特征和野外同震位移测量初步结果. 地球科学.https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.040.
- 苏有锦,李忠华,赵小艳,等,2014. 全球7级以上地震序列研究. 昆明:云南大学出版社.

- 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(1):53-55.
- 田有,赵大鹏,孙若昧,等,2007.1992年美国加州兰德斯地震——地壳结构不均匀性对地震发生的影响.地 球物理学报,50(5):1488-1496.
- 吴中海,龙长兴,范桃园,等,2015. 青藏高原东南缘弧形旋扭活动构造体系及其动力学特征与机制. 地质通报,34(1):1-31.
- 肖卓, 2019. 青藏高原深部结构的地震学成像. 北京:中国地震局地球物理研究所.
- 徐志双, 文鑫涛, 席楠, 等, 2025. 2025 年西藏定日 *M*s6.8 级地震余震序列精定位与地震烈度. 地球科学. https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.044.
- 杨婷, 王世广, 房立华, 等, 2025. 2025 年 1 月 7 日西藏定日 Ms6.8 地震余震序列特征与发震构造. 地球科学, 47(1):1-15.
- 杨建文,金明培,黎朕灵,等,2025.2025 年 1 月 7 日西藏定日 6.8 级地震震源破裂机理及邻区应力变化.地 震地质,47(1):36-48.
- 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, 38(2):179-189.
- 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.
- 张倩文,徐亚,王信国,2024. 全球重力势能特征及其地质意义——基于 Crust1.0 模型的分析. 地球物理学报, 67(1):77-88.
- 赵小艳,韩立波,徐甫坤,等,2014.2014年云南鲁甸 6.5级地震序列跟踪分析研究. 地震研究,37(4):508-514. 中国地震局地球物理研究所,2025.2025年1月7日西藏日喀则市定日县 6.8级地震科技支撑简报[EB/OL]. (2025-01-07)[2025-1-16]. https://www.cea-igp.ac.cn/kydt/280883.html.
- 邹俊杰,邵志刚,何宏林,等,2025.2025年1月7日西藏定日 Ms6.8 地震地表破裂解译与建筑物震害损毁统 计. 地震地质,47(1):16-35.