# 基于高分七号影像和 DSM 差分技术的 2025 年西藏 定日 Ms6.8 地震同震地表形变

刘俊涛1、刘小利1\*、贾治革1、唐家铮1、阮巧喆1、黄宇1、邓德贝尔2、李凡1、邵延秀3

1. 中国地震局地震研究所,武汉,430071

2. 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院,武汉,430074

3. 天津大学地球系统科学学院, 天津, 300072

**摘要:**精细的同震地表变形是理解断层浅层破裂机制和准确评估地震危害的关键参数。首次利用中国高 分七号光学影像和数字地表模型差分技术获取了 2025 年 1 月 7 日西藏定日地震高分辨率的同震地表垂向 形变场,揭示的发震断层地表形迹与垂向位移特征与正断活动为主的登么错断裂吻合,表明本次地震为 正断型地震。本次地震造成长 42km 的地表形变带,垂向位移幅度、形变梯度和形变带宽度具有明显的分 段性,与断层几何复杂性和动态破裂过程有关。自北向南分为 N22°E 的扎南拉段、N160°E 的登么错湖段 和 N25°E 的措果乡段;显著变形集中发生在扎南拉段,最大垂向位移约 2.97±0.2m;登么错段地表变形最 微弱,可能与断层走向变化有关。沿同震形变带多处宽度达 100~150m,表明在断层周围上百米范围内的 弥散性变形可能被忽视或被低估,有必要开展高精度地连续形变测量。

关键词:定日地震;登么错断裂;同震地表变形;高分七号影像;数字地表模型中图分类号:P315 收稿日期:2025-03-28

# Coseismic Surface Deformation of the 2025 Ms6.8 Dingri Earthquake in Tibet, China Based on GaoFen-7 Imagery and DSM Differencing Technique

Liu Juntao<sup>1</sup>, Liu Xiaoli<sup>1\*</sup>, Jia Zhige<sup>1</sup>, Tang Jiazheng<sup>1</sup>, Ruan Qiaozhe<sup>1</sup>, Huang Yu<sup>1</sup>, Deng Debeier<sup>2</sup>, Li Fan<sup>1</sup>, Shao Yanxiu<sup>3</sup>

1. Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China

2. School of Geophysics and Spatial Information, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

3. School of Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract: High-precision coseismic surface deformation is a key parameter for understanding shallow fault rupture mechanisms and accurately assessing seismic hazard. For the first time, GaoFen-7 imagery and Digital

基金项目:中国地震局地震研究所和应急管理部国家自然灾害防治研究院基本科研业务费专项资助项目(No.IS202226325);中国国家自然科学基金项目(No.4241001018)

第一作者简介: 刘俊涛 (2001-), 硕士研究生, 主要从事地震大地测量学研究. ORCID:0009-0002-4237-7394, Email: liu127186@163.com

通讯作者简介: 刘小利(1977-), 副研究员, 主要从事地震大地测量学研究. Email: liuxl.j@163.com

Surface Model (DSM) differencing technique were employed to obtain high-resolution coseismic surface vertical deformation associated with the January 7, 2025 Dingri Ms6.8 earthquake in Tibet, China. The revealed surface trace of the seismogenic fault and vertical deformation characteristics coincide with the Dengmocuo Fault dominated by normal faulting, indicating that the earthquake was a normal-faulting event. This earthquake generated a 42-kilometer-long surface deformation zone, with distinct segmentation in both deformation amplitude, gradient and width related to fault geometric complexity and dynamic rupture process. The deformation zone is divided into three segments from north to south: the N22°E-trending Zhananla segment, the N160°E-trending Dengmocuo Lake segment, and the N25°E-trending Cuoguoxiang Segment. Pronounced deformation occurred in the Zhananla segment, reaching a maximum vertical displacement of approximately 2.97±0.2m meters. The surface deformation observed along the Dengmocuo Lake segment is the least pronounced, potentially attributable to a change in the fault's orientation. The width of the coseismic deformation zone on fault segments spans 100 to 150 meters, suggesting that the diffuse deformation occurring within a limited volume surrounding the faults may be overlooked or underestimated, so it is necessary to carry out high-precision continuous monitoring.

**Keywords**: Dingri earthquake; Dengmocuo Fault; Coseismic surface deformation; GaoFen-7 imagery (GF-7); Digital Surface Model (DSM)

# 0.引言

根据中国地震台网中心测定(https://news.ceic.ac.cn),2025年1月7日9时5分(北京时间),西藏日 喀则市定日县措果乡附近发生 Ms6.8级地震,震源深度10.0km,震中位于(87.45°E,28.50°N)。该地震属 于浅源地震,极震区烈度达 IX 度(9度),震后余震频发,造成日喀则市定日、拉孜、萨迦、萨嘎、定结 等7个县20万人不同程度受灾。震区局部人口集中,房屋抗震性能弱,截至2025年1月31日,本次地 震造成126人遇难,倒塌房屋2.69万间,损坏房屋21.5万间,直接经济损失89.45亿元,是西藏自治区 成立以来震级最高、伤亡最惨重的地震灾害之一(中华人民共和国应急管理部,2025)。

来自不同权威机构的主震震源机制解(表 1)均显示,定日地震是一次典型的正断型地震,发生在一条近南北走向、倾角 40°~50°的正断层上。截止 2025 年 1 月 20 日 9 时 44 分,共发生 4312 次余震(杨婷等,2025),震源深度集中在 7~12km,主要呈近南北向条带状分布在登么错湖西侧,与登么错湖东侧的登么错断裂近平行。考虑到余震活动与发震断层上盘的应力调整和次级断层活动密切相关,我们推测本次地震的发震断层是以正断活动为主的登么错断裂。

- 农工 本日 (1) 印加 均 印 足 口 地 辰 辰 你 机 町 胎
--------------------------------------

Table 1 The earthquake source mechanism of the Dingri earthquake by different institutions

来源	纬度	经度	深度/	震级/	节面I/(°)			节面II/ (°)		
			( <b>km</b> )	(Mw)	走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角
CENC	28.59°N	87.33°E	15	7.1	348	40	-100	181	51	-81
GCMT	28.56°N	87.47°E	12	7.1	356	42	-88	173	48	-92
USGS	28.573°N	87.375°E	11.5	7.05	349	42	-103	187	49	-78
GFZ	28.57°N	87.41°E	14	7.1	0	49	-79	164	41	-102

注: CENC (中国地震台网中心, <u>https://www.cenc.ac.cn/cenc/tpxw/414670/index.html</u>), GCMT (全球矩心矩张量, <u>https://www.globalcmt.org/</u>), USGS (美国地质调查局, <u>https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000pi9w/moment-tensor</u>), GFZ (德国地球科学研究中心, <u>https://geofon.gfz.de/eqinfo/event.php?id=gfz2025albe</u>)。

同震地表变形是断层滑动从深部向地表扩展的结果,是探究断层浅地壳破裂行为的重要窗口,也是 地震灾情评估的关键依据(Klinger et al., 2018; Oskin et al., 2012; Wesnousky, 2008; Xu et al., 2002)。合成孔 径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)和光学影像等卫星测地技术已是获取 同震位移的重要方法(Xu et al., 2002; Xu et al., 2016)。InSAR 可以提供高精度三维位移,由于在大地震中 相位失相干和强地面震动,通常无法提供近断层(距离主破裂带地表形迹数百米范围)的位移估计(Xu et al., 2016)。利用震中区域震前和震后光学影像的相关性匹配只能生成亚像素精度的近断层(一般不大于 3km 范围) 位移, 但局限于水平位移分量(Leprince, et al., 2007)。利用激光雷达(Light Detection and Ranging, LiDAR) 点云或三维立体影像的差分技术可以确定地震三维位移(Oskin et al., 2012; Nissen, et al., 2014; Zhou, et al., 2018), 但地震前的 LiDAR 数据常常是缺失的(Nissen, et al., 2014)。我国自主研发的 GF-7 卫星于 2019 年 11 月 3 日成功发射,是一种高分辨率对地观测卫星,重放周期短且具备亚米级(前视全 色波段分辨率 0.8m, 后视全色波段分辨率 0.65m) 立体成像能力, 能够获取高空间分辨率光学立体观测 数据和高精度激光测高数据(曹海翊等,2020)。这为 2025 年定日地震的应急救援、科学考察以及全面快 速获取 2025 年 1 月 7 日定日地震引起的地表破裂和同震位移提供了有力的数据支撑。本文基于定日地震 震前和震后 GF-7 立体像对数据集,利用数字地表模型(Digital Surface Model, DSM)差分技术快速生成 了震中区域同震地表形变场,识别了发震断层的几何形态,测量了近场(<250m)的地表垂向位移,确定 了定日地震地表垂向位移的空间变化。

## 1. 地质背景

青藏高原是印度板块与欧亚大陆持续碰撞(50 Ma 以来)形成的巨型构造地貌单元(Yang et al., 2019; 赵俊猛和杜品仁, 2016),其南缘受印度板块北东向强烈挤压作用(40-50 mm/a)的驱动,导致显著的地壳 缩短和高原隆升(5-10 mm/a),并伴随发育了大规模近南北走向的正断层裂谷系统(Armijo et al., 1986; Kapp and Guynn, 2004; Yang et al., 2019; Yin, 2000)。其中,申扎-定结裂谷系是藏南自西向东7条裂谷系中 的第5条裂谷带,北起申扎县甲岗雪山,南至定结下县南,总长度约345km(图1)。该裂谷系也是最活 跃的一条裂谷带,自中新世中期(<17 Ma)开始发育,晚中新世-上新世(8-4 Ma)活动加剧并向北扩展, 其EW 向伸展速率达18.7mm/a,单条断裂垂直活动速率为1-2 mm/a(Armijo et al., 1986; Kapp and Guynn, 2004)。以雅鲁藏布江缝合带为界,申扎-定结裂谷系北段为申扎-谢通门断裂段,南段为谢通门-定结断裂 段。有地震记录以来,多次6级以上强震活动均发生在申扎-谢通门断裂段(Wang et al., 2019;徐心悦, 2019)。2015年尼泊尔 Mw7.8级地震以来,谢通门-定结断裂段作为高原伸展构造与走滑系统的过渡区 (Armijo et al., 1986),进入地震活跃期,相继发生2015年定日Ms5.9地震、2016年定结Ms5.3地震、2020 年定结Ms5.6地震,以及多次4~5级地震,呈现显著丛集特征(田婷婷和吴中海, 2023),可能与印度板块 挤压与远场地震触发耦合作用导致的应力场动态调整有关(田婷婷和吴中海, 2023;徐心悦, 2019)。



图 1. 青藏高原南部正断层裂谷系

断层改自 Tapponnier et al.(2001); 1976 年以来的 Mw≥6.0 震源机制解引自 GCMT; 1976 年以前的 M>7.5 地震来自《全球地震目录》和《全球地震灾害信息目录》

Figure 1. Normal fault rift system in southern Tibetan Plateau

Faults are modified from Tapponnier et al.(2001). Focal mechanism solutions of earthquakes with Mw>6.0 since 1976 are cited from the GCMT. Earthquakes with M>7.5 before 1976 are from the "Global Earthquake Catalog" and the "Global Earthquake Disaster Information Catalog".

登么错断裂是申扎-定结裂谷系南段的核心构造,北起芒普乡秋古村,向南经长所乡,终止于措果乡 南董热,全长约 60km(图 2)。自北向南,断层走向及地形地貌发生明显变化,可分为三段(图 3):长 所乡以北(扎南拉段),走向约 N9°E,长约 25km,沿宽 1~2km 的冰川谷东缘发育,沿线小型高山湖泊、 大型三角面和多级陡坎发育;长所乡附近(登么错湖段),总体走向 N20°W,长约 9km,断层沿登么错 断陷盆地东缘发育,山前断层陡坎高耸,切割了登么错湖东岸阶地和冲积扇;长所乡以南(措果乡段), 总体走向 N25°E,长度约 26km,在措果乡附近穿过 NWW 流向的朋曲继续向南约 15km。探槽研究揭示 其全新世以来至少 3 次古地震事件,最新活动年代为 1350±50 AD,复发周期 800-1200 年,具备 Mw6.8-7.2 级地震潜能(田婷婷和吴中海, 2023)。2015 年尼泊尔 Mw7.8 地震后,申扎-定结断裂带南段附近应变率 变化显著(Chen et al., 2024),进入地震活跃期,发生 10 次 M≥5.0 地震,呈现显著的丛集特征(田婷婷和吴 中海, 2023;徐心悦, 2019)(图 2)。2025 年定日地震的面波震级 Ms6.8、矩震级 Mw7.1,与探槽研究估计的 震级一致,但比预计的复发时间要早。



图 2. 登么错断裂及定日地震序列

断层引自全国活动断层数据库 2006 版. 余震引自杨婷等(2025). 地表破裂带数据来自刘富财等(2025)、邵延 秀等(2025)、石峰等(2025). 浅层次生地表变形数据来自刘富财等(2025). 历史地震来自 CENC.

Figure 2. Dengmecuo fault and Dingri seismic sequence

Fault data from the National Active Fault Database (2006 Edition). Aftershocks from Yang et al. (2025). Surface ruptures from Liu et al. (2025), Shao et al. (2025), Shi et al. (2025). Shallow secondary surface deformation is from Liu Fucai et al (2025). History earthquakes are cited from the CENC.

![](_page_5_Figure_0.jpeg)

图 3.登么错断裂不同段落的地形差异

(a) 登么错断裂带地形剖面,(b)扎南拉段断层槽谷,(c)登么错湖段断层陡坎,(d)措果乡段断层坡折带Figure 3. Topographic variations along different segments of Dengmocuo Fault

(a) Topographic profile of the Dengmocuo fault, (b) fault valley along the Zhananla segment, (c) fault scarp at the
 Dengmocuo Lake segment, (d) slope break zone along the Cuoguoxiang segment

# 2. 数据处理

## 2.1 数据

我国 GF-7 卫星搭载了双线阵立体相机、激光测高仪等有效载荷,具有全色、多光谱和立体像对等多种成像模式,前视相机能获取空间分辨率为 0.8m 的全色波段;后视相机可获取 0.65m 分辨率的全色波段和 3.2m 分辨率的多光谱波段。利用亚米级前视、后视全色像对可生成高精度的 DSM,实现 1:1 万地形制图,在活动构造研究和同震地表形变监测方面具有很大应用潜力。我们收集了定日地震震中区域震前和震后 6 景 GF-7 前视、后视全色像对(表 1),用于生产相应的 DSM。

表 2. 定日地震震前和震后高分七号影像序列

Table 2.	<b>GF-7</b>	satellite	imagery	sequence	s before	and af	fter the l	Dingri	earthq	uake
			0 1					0		

 卫星类型	产品序列号	轨道号	产品级别	数据采集时间	
GF-7	1351763	23451	LEVEL1A	2023-12-05	•
GF-7	1351764	23451	LEVEL1A	2023-12-05	
GF-7	1351765	23451	LEVEL1A	2023-12-05	
GF-7	1834696	29736	LEVEL1A	2025-01-16	
GF-7	1834697	29736	LEVEL1A	2025-01-16	
GF-7	1834698	29736	LEVEL1A	2025-01-16	

#### 2.2 DSM 差分处理

利用高分七号光学立体像对生成同震地表垂向形变场是一个复杂的过程,主要包括数据预处理、 DSM 生成和 DSM 差分三个环节。其中,前两个步骤在 Inpho 软件下通过优化流程和参数完成,第三步通 过编写 Python 脚本在 Globle mapper 软件中实现。总体技术路线如图 4。

![](_page_6_Figure_2.jpeg)

图 4. 基于 DSM 差分技术获取地表垂向形变场路线图

Figure 4. Technique framework for surface vertical deformation derived by DSM differencing methodology

#### 2.2.1 数据预处理

数据预处理主要对立体影像对进行辐射校正、几何校正、区域网平差等处理,消除非地物特征因素 对像素值的影响。利用 GF-7 多视影像对生成 DSM 中,可能因大气、光照条件(如云雾遮挡)、轨道姿态 扰动、影像畸变等因素带来误差。为此,本文采取了多种策略以消除或抑制上述影响,包括:优先选用 晴朗时相、云量较低(<5%)的高质量影像;根据影像元数据设置辐射校正参数,减弱大气散射、太阳 高度角变化及传感器响应不一致带来的亮度波动,提高 DSM 差分结果的稳定性与可信度;利用区域网平 差与有理函数模型(RFM)优化几何校正算法,提升影像间几何一致性与立体匹配精度。

高分七号立体像对数据采用有理函数模型来描述像点与地面点之间的对应关系,由于卫星影像的 RFM 模型存在一定的系统误差,需要对有理函数模型进行系统误差补偿(Yang et al., 2017)。利用影像间的 连接点进行空间前方交会,生成虚拟控制点。通过多视影像匹配,计算同名点的三维坐标,作为约束条 件优化有理函数模型。

对于 GF-7 立体图像,图像坐标与目标空间坐标的转换关系(式 1)用有理函数模型(RFM)表示。 采用区域网平差法对图像的仿射变换参数进行补偿(式 2),提高立体图像的几何成像模型和 DEM 产品的精度。

$$\begin{cases} r = \frac{P_1(X, Y, Z)}{P_2(X, Y, Z)} \\ c = \frac{P_3(X, Y, Z)}{P_4(X, Y, Z)} \end{cases}$$
(1)  
$$\begin{cases} \Delta c = a_0 + a_1 c + a_2 r \\ \Delta r = b_0 + b_1 c + b_2 r \end{cases}$$
(2)

式中(c, r)为图像坐标;(X, Y, Z)为目标空间坐标;p1, p2, p3, p4为 RPC 系数; ( $\Delta c, \Delta r$ )为图像坐标补偿值; ai, bi (i = 0, 1, 2)是仿射变换系数,通过平差求解。修正后的影像坐标为 ( $c + \Delta c, r + \Delta r$ )。优化 ai, bi (i = 0, 1, 2),使补偿后的坐标更接近真实几何关系。 数据预处理后,基于半全局匹配算法(Semi-Global Matching, SGM)生成高质量视差图,根据校正影像和视差图利用前方交会的方法计算像素点的空间位置得到三维点云,将其栅格化得到震前、震后 DSM。

像素密集匹配是 DSM 提取的核心环节,其匹配结果直接影响 DSM 的精度。为了提高影像匹配的精 度并减少匹配时间,在立体影像匹配前对影像进行核线校正,将二维匹配搜索降低为一维搜索。针对震 中区域 GF-7 影像存在的姿态误差、复杂地形匹配困难等问题,通过辐射校正提升图像灰度一致性,引入 区域网平差优化 RFM 模型,并对视差搜索范围进行差异化设置,这些调整提升了复杂地形条件下 DSM 差分结果的几何精度与稳定性。SGM 算法(Hirschmuller, 2008)是一种兼顾效率和精度的立体匹配算法。其 核心思想是通过多路径代价聚合近似全局能量优化,在保持较高匹配精度的同时显著提升计算效率,已 成为解决密集匹配问题的主流选择。通过建立全局能量函数,SGM 算法在能量函数达到最小时获得潜在 的最优视差。能量函数为:

$$E(D) = \sum_{p} \left( C(p, D_p) + \sum_{q \in N_p} P_1 \cdot T[|D_p - D_q| = 1] + P_2 \cdot T[|D_p - D_q| > 1] \right) (3)$$

其中*C*为匹配代价,公式的第一项是数据项,表示当视差图为*D*时,所有像素的匹配代价的累加,第 二项和第三项是平滑项,表示对像素*p*的*Np*邻域内的所有像素*q*进行惩罚。

SGM 算法首先计算左影像上每个像素在视差搜索范围内的匹配代价,组成代价矩阵。代价矩阵维度为*r*×*c*×(*d<sub>max</sub> – d<sub>min</sub>*),其中*r*为影像行数,*c*为影像列数,*dmax、dmin*表示视差搜索的上下界。计算完代价矩阵后,对代价矩阵上的每个点考虑从多个方向进行积聚。对像素点*p*,其在*r*方向上的积聚函数为:

$$L_{r}(p,d) = C(p,d) + min \begin{cases} L_{r}(p-1,d) \\ L_{r}(p-1,d-1) + P_{1} \\ L_{r}(p-1,d+1) + P_{1} - minL_{r}(p-1,i) \\ minL_{r}(p-1,k) + P_{2} \end{cases}$$
(4)

其中: *L*(*p*,*d*)表示像素*p*在当前路径对应视差*d*的累积代价; *r*表示路径的方向; *C*(*p*,*d*)表示当前像素 *p*对应视差*d*的代价; *p*-1表示在当前路径上,像素*p*的前一个像素。

SGM 算法采用式(5)对整张影像进行多个方向的代价累积,最后对各个方向的累积结果相加,得到最终的代价积聚结果:

$$S(p,d) = \sum_{r} L_{r}(p,d)$$
(5)

其中,S表示对各个方向代价积聚结果相加后,得到的总体代价积聚结果。根据代价积聚结果进行视差 计算,在视差搜索范围内利用赢家通吃(Winner Take All, WTA)算法获取积聚值最小位置即为当前像素的 最优视差,最优视差选择遵循式(6),D为像素匹配最优视差。

$$D = minS(p, d)$$

(6)

对视差进行的优化具体包括子像素拟合、一致性检查、唯一性约束、剔除小连通区、中值滤波、弱 纹理优化和填补空洞等操作,得到最优视差。

利用前方交会计算同名像素点的空间位置得到点云数据,通过插值方法将离散点云转化为栅格数据,

即 DSM。如图 5, 震前、震后 DSM 的相关系数为 0.996, 残差均值为 0.01m, 表明震前、震后 DSM 整体 高程变化趋势一致; 平均残差距离为 17.21m, 均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)为 48.5m, 这主要是局部区域(包括云层遮挡区、视差剧烈变化区、弱纹理湖/雪区)较多的误匹配导致,为此对其 采取了掩膜和均一化处理。

![](_page_8_Figure_1.jpeg)

图 5. 震前、震后 DSM 及精度评估

![](_page_8_Figure_3.jpeg)

Figure 5. Pre- and post-earthquake DSM and accuracy assessment

(a) Pre-earthquake DSM, (b) Post-earthquake DSM, (c) Elevation histogram of pre- and post-earthquake DSM, (d) Distribution of fitting residuals

#### 2.2.3 垂向变形场获取及精度评估

通过图像配准、迭代最近点(Iterative Closest Point, ICP)算法、形变梯度校正等方法尽可能消除 DSM 中的各种误差,通过高斯滤波和中值滤波方法平滑噪声,最终得到垂向形变场。

SGM 匹配处理虽然通过多路径代价聚合策略提升了整体匹配鲁棒性,但一阶平滑约束的优化模型对 复杂的地形效应抑制作用有限。山区地形因地表连续起伏导致影像纹理特征畸变,匹配代价函数陷入局 部极值(杨文环,2020)。立体匹配得到的 DSM 在山地区域的高程误差相对较大(范鑫东等,2023;李对对等, 2024),这种高程误差经震前、震后 DSM 差分处理后,会在大范围山区形成地形效应,表现为空间相关 的条带状伪形变,干扰真实地震形变信号的提取。因此,为精确获取地震引起的垂向变形场,需对震前、 震后 DSM 进行校正。首先针对震前、震后 DSM 数据进行互相关 (Cross Correlation)配准(Nissen et al., 2014),使得水平方向差异减少到亚像素级别。应用 ICP 算法(Besl and McKay, 1992),经过多次迭代配准, 使得震前、震后 DSM 平均残差距离降至 0.5m 以内。将配准后的点云数据利用双三次插值的方法进行重采样,恢复连续特征,通过差分获取初始地表垂向差分图。

利用中心差分法,计算初始垂向差分图的形变梯度获取水平方向梯度校正值,对震后 DSM 做改正, 消除水平向误差;利用高斯差分降低噪声干扰,在此基础上进行中值滤波得到最终的垂向变形场。

$$\begin{cases} G_x(i,j) = \frac{\Delta H(i,j+1) - \Delta H(i,j-1)}{2\Delta x} \\ G_y(i,j) = \frac{\Delta H(i+1,j) - \Delta H(i-1,j)}{2\Delta y} \end{cases}$$
(7)

其中, *Gx* 表示在位置(i, j)处的东西方向形变梯度, *Gy* 表示在位置(*i*, *j*)处的南北方向形变梯度, *ΔH*表示在位置(*i*, *j*)处的垂向变形量, Δx、Δy表示两倍空间分辨率。

$$\Delta DSM = DSM'_{post} - DSM'_{pre} \tag{8}$$

其中, DSM'post表示滤波后的震后 DSM, DSM'pre为滤波后的震前 DSM, DSM为高程差异。

为检查结果的可靠性,定量化评估了不同阶段导出的全域地表高程差分布情况以及最优差分图高程 差与坡度的相关性(图 6)。图 6a 中的不同颜色分别表示不同阶段导出的全域地表高程差分布,蓝色曲线 呈微小的波状,没有极值,这表明由于震前、震后 DSM 间的系统性偏差和条带误差,导致初始地表垂向 差分结果缺少明确指示形变梯度的峰值; 经过 ICP 配准,极大地消除了这两类显著误差; 形变梯度校正 进一步减小了远场高程残差与空间趋势项;因此橙色、绿色曲线表现为峰值略微右偏的正偏态分布,表 明较小的差分值略多,并少量的较大差分值,接近同震地表形变空间变化趋势;极端大值也会影响分布 形态,高斯与中值滤波显著抑制了局部异常值,其校正结果(红色曲线)整体表现为尖峰型正态分布, 这表明主要区域(如远场)未发生形变或形变微弱,大位移值相对较少。这些结果表明滤波后的地表高 程差分图(图 6b)噪声水平相对较低。考虑到沿断层走向的大部分段落地形陡峭,采用网格分析法(边 长为 200m) 评估了滤波后的地表高程差与坡度的相关性(图 6c),颜色表示坡度,每个网格中的圆圈大 小表示相关性强弱。结果表明,近场高程差与坡度的相关性整体上较低,但在局部区域较为显著,这些 区域主要集中在地形复杂区域。由于担心复杂度干扰匹配算法的一致性,扩大了高程差与坡度的相关性。 此外,由于 GF-7 相机采用多 CCD 推扫成像,虽然已进行辐射归一化,但 CCD 拼接边缘仍可能出现亮度 跳变。这种沿轨条带的亮度非均匀性(Tang et al., 2022)在 DSM 构建中可能产生"阶跃伪差"(图 6b), 易被误判为真实地形变形。在本研究中,由于距离发震断层较远,比较容易区分。图幅拼接处也会存在 明显的阶跃,但不会改变相对高程差,不需要融合处理,以避免"额外"引入偏差。

![](_page_10_Figure_0.jpeg)

图 6. 全域高程差分布趋势及其与坡度的相关性 (a) 高程差分布, (b) 全域高程差分图, (c)高程差与坡度的相关性

Figure 6. Distribution trend of elevation differences in the entire region and its correlation with slope gradients(a) Distribution trend of elevation differences in the entire region, (b) Filtered elevation difference map of the entire region, (c) Correlation between elevation differences and slope gradients

经 ICP 配准、形变梯度校正后导出的跨断层 1km 宽的近场地表高程差分布展现了一致的正态分布特 征(图 7a),这表明近场存在显著的形变梯度。滤波后的近场地表高程差(图 7b)分布整体表现为正态 分布,但右侧分布呈台阶状下降,表明正的高程差在多个取值区间集中性出现,符合同震地表形变空间 变化预期。滤波后的近场地表高程差与坡度的相关性(图 7c)表明,近场高程差与坡度的相关性整体上 较弱,具有较高的可靠性。相对全域结果(图 6c),近场高程差与坡度之间的弱相关性表明,近场形变相 对较大,地形效应对大形变的影响相对较小。但在局部区域仍较为显著,如区域①处(断层北端约~4km 长度),相关性系数普遍大于 0.3,表明受陡峭的地形(坡度>15°)影响较大;区域②紧邻羊姆丁错姆冰湖 区,水体干扰以及沿岸的重力垮塌、同震液化都会影响 DSM 匹配和配准精度;区域③处(尼辖错、拉昂 水库),高程差与坡度也存在明显的相关性;区域④处(断层南端约~5km 长度),断层地表形迹横跨东西 向朋曲河谷,向南侧山谷延伸,除了受峡谷地形影响之外,朋曲河谷附近同震液化也会带来额外干扰, 结果可靠性较差。

![](_page_11_Figure_0.jpeg)

(a) 高程差分布, (b) 近场(<1km)高程差分图, (c)高程差与坡度的相关性

Figure 7. Distribution trend of elevation differences in the near field and its correlation with slope gradients (a) Distribution trend of elevation differences in the near field, (b) Filtered elevation difference map of the near field, (c) Correlation between elevation differences and slope gradients

近场(<1km)不同段落地表高程差分布模式(图 8)差异较大,进一步验证了高程差幅度上的分段性(图 7a)。其中,北端(区域①)呈弱负偏态分布,区域⑧呈显著的正偏态分布,这坡度相关性分析结果一致,表明这两段高程差结果包含了配准误差,数据可靠性被降低。相对地,措果乡段、登么错湖段和扎南拉段均呈不同程度的双峰形态,局部峰值之间的过渡区集中在零值附近,表明存在明显的形变梯度,使得断层两盘的高程差表现为"二分"值。综上分析,区域①、⑧的地表高程差结果可靠性相对较差,仅作为参考,需要结合其他观测结果进一步佐证是否具有形变指示意义。

![](_page_12_Figure_0.jpeg)

图 8. 近场(<1km)分段高程差分布趋势及其与坡度的相关性

#### Figure 8. Distribution trend of elevation differences in the near field along each fault segment

需要说明的是,最优的地表高程差分结果表征了地震发生后地表的高程变化,特别是近场高程差较 好地反映了定日地震中断层两盘的垂向位移。高程差分图显示,西侧表现为沉降,东侧表现为抬升,符 号登么错断裂正断倾滑运动性质。此外,由于水平向匹配结果显示水平向形变分量极其微弱,接近或低 于噪声水平,因此这里不做讨论。

# 3. 结果

尽管部分区域受地形影响较大,最优的地表高程差图(图 7)仍直观地展示了登么错断裂的地表形迹, 整体上反映了 2025 年定日地震震中区域地表高程变化特征。沿断层走向,利用跨断层条带剖面测量法 (图 9)获取近场垂向位移量及其相应的变形带宽度。条带剖面参数设置为:条带宽度 20m,跨断层宽度 1000m,条带间隔~50m,在适当消除噪声的同时保留垂向位移沿走向的变化细节。同震地表形变往往高 度受限于数米至数十米宽的主破裂带上,但也会在远离主破裂带数百米或更远的地方产生分布式或弥散 性形变(Zhou, et al; 2018; 刘小利等, 2022)。考虑到高程差结果中仍包含微弱的地形效应,且登么错断裂 沿线近断层西侧发育多处高原冰湖,以及 0.5%通常代表理论非弹性变形阈值(Barnhart et al., 2020)。这 里仅将且形变梯度(高程差与相应的形变区宽度比)大于 0.5%且形变区宽度小于 250m 的地表高程差作 为定日地震引起的地表垂向形变。人工筛选每条剖面的极近场(0~50m)和次近场(50~250m)垂向位移 及形变区宽度。此外,形变值小于 1/10 个像素大小(<20cm)的、形变梯度小于 0.5%的情况不予考虑; 地形效应较大、靠近湖泊(如羊姆丁错姆冰湖区、尼辖错)的区域(掩膜去除)不纳入测量范围。

![](_page_13_Figure_0.jpeg)

图 9. 跨断层同震垂向位移测量示意图 (a) 形变梯度>1%的实例,(b) 形变梯度<1%的实例

![](_page_13_Figure_2.jpeg)

最终确定了 142 个极近场位移值和 522 个次近场位移值(图 10a、10b),以及相应的测量误差(图 10c)、形变梯度(图 10d)和形变区宽度(图 10e)。图 10a和 10b展示了光学极近场地表位移与现场测量结果高度一致。总体上,地表形变带与早期绘制的登么错断裂带高度吻合(杨婷等,2025),呈左阶斜列展布,南段的措果乡段和北段的扎南拉段走向近平行,由登么错湖段大角度连接。光学最大值 2.97±0.2m,与现场测量的 2.6~3.3m 相当(刘富财等,2025;邵延秀等,2025;石峰等,2025)。有明确位移的地表形变带长度约 43km,平均宽度 62m,部分段落达 150~200m。地表垂向位移及变形带宽度沿走向变化较大,与断层的局部走向变化和分布式变形密切相关,具有明显的分段性(图 11)。

![](_page_14_Figure_0.jpeg)

(a) 沿登么错断裂垂向位移分布图, (b) 垂向位移沿走向分布, (c) 光学垂向位移及误差, (d)光学形变梯度, (e)形变带宽度

![](_page_14_Figure_2.jpeg)

(a) Vertical displacements along the dengmocuo fault, (b) Vertical displacements along the fault strike, (c) Optical vertical displacement errors, (d) Optical vertical displacement gradients, (e)Surface deformation width

![](_page_15_Figure_1.jpeg)

Figure 11. Comparison of surface vertical deformations, their errors and deformation zone widths among different fault segments

措果乡段地表形变沿走向 N25 ℃ 的先存断层展布,长约 12km (图 10a),存在分支破裂,主破裂带 宽约 50~60m。总体上,地表垂向形变微弱,平均值 0.59m,与现场观测结果一致 (刘富财等,2025)。在图 10c 中的 A 区极近场和次近场均观察到较大形变值,可能与登么错湖东岸分布式的次级破裂和浅层滑坡、崩塌、砂土液化等次生地表变形有关 (刘富财等,2025;邵延秀等,2025;石峰等,2025)。

登么错湖段的地表形变总体走向为 N160 E,长约 11km。相对措果乡段发生约 45°逆时针旋转,是连 接措果乡段和扎南拉段的弯道。地表垂向位移幅度整体偏低,平均值约 0.56m,最大值 0.95m,与现场观 测结果一致(刘富财等,2025;邵延秀等,2025)。形变带宽度平均 41m,部分段落(图 10c 中的 B 区)形变 梯度小但形变区宽度超过 100m,可能与分布式的微弱形变有关(图 10d、10e)。在 28km 附近,缺少现 场观测结果,光学垂向形变约 0.2~0.8m,相应的形变梯度小于 1%,推测该段落主要以分布式弥散变形为 主,也可能与野外调查发现的线性张裂缝带和崩塌体有关(邵延秀等,2025;石峰等,2025)。

扎南拉段的地表形变总体走向 N22 ℃,长约 20km,是本次地震的主要形变区。地表垂向位移普遍大 于 1.2m,显著形变集中在西勒以东的段落 (23.5~28.5km),主要分布宽 60~100m 的范围内。在该段落, 垂向形变及其梯度在量值上均较大,且与野外观察在量值上相当、位置上一致(刘富财等,2025;邵延秀等, 2025;石峰等,2025)。这种一致性表明应变高度局部化,断层上形变占主导,弥散变形较为微弱 (Gold et al,2015)。在图 10c 中的 C、D 区域,缺少现场测量结果,光学次近场结果反映了聚集性的垂向形变且形 变宽度大于 150m。相比较,C 区形变梯度较小且测量误差较大,D 区形变梯度较大且误差较小。在空间 上,C、D 区域对应着次级破裂和浅层次生地表变形。地表破裂野外填图结果显示该区域存在次级破裂、 线性张裂缝带和崩塌体 (刘富财等,2025;邵延秀等,2025)。因此,我们推测这两个区域的光学形变观测反 映了浅地表的分布式弥散变形。此外,该段形变带北侧紧邻狭长的羊姆丁错姆冰湖区,发育斜列分布的 微弱张裂缝,但未见明显的垂直位移(邵延秀等,2025)。考虑水体散射作用通常会导致地表形变结果噪声 水平升高,且湖东岸距断层形迹最近距离~1.3km。因此,仅统计了冰湖区东侧部分点位上的垂向形变。 这些光学形变及其梯度在量值上均较小,与野外观测结果一致,反映了微弱的次级破裂 (刘富财等,2025)。

## 4.讨论

首次利用高分七号获得了 2025 年西藏定日 Ms6.8 地震地表形变场,全面地刻画了同震地表变形及其

空间分布特征,有利于后续深入开展地震灾害评估和地震破裂过程研究。

#### 4.1 光学垂向形变与其他结果的比较

光学地表垂向形变结果直观反映了 2025 年西藏定日 Ms6.8 地震的发震断层为申扎-定结裂谷系南段登 么错断裂,是一次正断型破裂事件。造成了长约 42km、宽 60~150m 的地表形变带,显著变形区集中在西 勒东侧附近。早期地质调查指出登么错断裂长约 60km (田婷婷和吴中海, 2023)。2025 年定日地震现场调 查结果表明,同震地表破裂带总长度约 25km (石峰等, 2025) ~36.5km (邵延秀等, 2025),主要分布在登么 错断裂中部。InSAR 和地震波反演结果显示深部破裂长度约 50km (王楠等, 2025)或近 70km(参考中国地 震局地震研究所李琦地震波反演结果)。相对间断性的地表破裂统计结果,光学形变带是连续性的,其长 度略长,满足 Wells 和 Coppersmith (1994)建立的全球正断型地震破裂参数关系。同时,光学地表形变 带明显比深部破裂长度短,反映了部分区间深部变形并未达到浅地表。

光学极近场形变最大包络线与现场调查结果高度吻合,这反映了显著应变主要集中在较窄(<50m)的形变区内。光学极近场和次近场最大垂向位移分别为 2.5±0.1m(形变区宽~47m)、2.97±0.2m(形变区 宽~80m),与现场调查得到的极近场最大位移 2.6~2.8m(刘富财等,2025;邵延秀等,2025;石峰等,2025)和基于 DEM 剖面测量得到的 3.3±0.1m(刘富财等,2025)基本一致。A、B、C、D四个区域缺少现场调查结果,但存在明确的光学形变梯度。相比较,A 区域形变梯度较大,且形变宽度窄,但部分形变误差大,反映了次级破裂与浅层次生地表变形的杂糅结果(刘富财等,2025;邵延秀等,2025;石峰等,2025);B 区域形变及其梯度、误差小,但形变宽度相对大,可能与线性张裂缝带和崩塌体等非构造成因的地表变形有关(御延秀等,2025;石峰等,2025);C 区域形变及其误差、形变宽度相对大,而形变梯度小,可能与线性张裂缝带和崩塌体等非构造成因的地表变形有关(刘富财等,2025;邵延秀等,2025);D 区域的形变量及其误差、形变梯度、形变宽度均较大,可能反映了该区域存在次级破裂、线性张裂缝带和崩塌体(刘富财等,2025;邵延秀等,2025)。因此,综合光学形变量及其形变梯度有助于更好地判定地表形变的成因。

#### 4.2 地表垂向形变的分段性

2025 年定日地震的地表垂向形变及其形变梯度和形变带宽度具有明显的分段特征(图 11)。显著的 垂向形变主要集中在扎南拉段,登么错湖段和措果乡段形变量级相当,相对较小。扎南拉段和措果乡段 的形变梯度普遍大于登么错段,最大形变梯度出现在扎南拉段。整体上,形变带宽度由北向南逐渐变窄, 但最显著的形变集中区(23.5~28.5km)对应着远低于整个形变带平均水平的宽度。可见,扎南拉段形变 带较宽的段落存在着分布式的次级破裂或浅层次生地表变形,导致较宽的变形带。总的来看,登么错段 相对其他两段,形变最微弱,可能与断层段走向变化有关。光学结果和现场调查均指示登么错湖南端向 北,垂向形变呈衰减趋势,在登么错段中部(长所乡东侧)达到最小,继续向北几乎呈线性递增。CENC 发布的地震破裂过程反演结果(https://data.earthquake.cn/gxdt/info/2025/334672994.html)显示破裂在西勒 附近达到滑动峰值。这些观测表明,断层的垂向滑动幅度除了受走向变化影响,还与向北的动态破裂传 播密切相关,速度的增强克服了断层几何复杂性对破裂传播的阻碍。

#### 4.3 分布式的地表变形

光学垂向形变结果表明 2025 年定日地震地表变形带宽度平均达 62m,在部分断层段形变梯度大于

0.5%的变形带宽约 100~150m,局部甚至宽达 200~250m。尽管不排除光学垂向形变结果包含了跨断层一 定范围内(50~250m)的滑坡、崩塌等浅层次生地表变形,但较大的形变梯度和现场调查均反映沿整个地 表形变带由南向北多个段落存在次级破裂,如杂村段、古荣村东北侧、尼辖错东北侧、羊姆丁错姆东侧 (刘富财等, 2025; 邵延秀等, 2025)。最为显著的是, 在朋曲河北岸至登么错湖断层西侧(上盘)观察到多 条近平行断裂产生了地表破裂,总变形宽度达 4km (邵延秀等, 2025)。余震精定位结果也证实破裂带南段 多条断裂参与了同震变形 (杨婷等, 2025)。一种可能的解释是破裂在局部区域主要分布在深部,尽管在地 表没有产生明显的破裂,但存在弥散而分布的变形,在现场调查中往往难以"察觉"或被充分"捕捉" (刘小利等, 2022)。与高倾角甚至直立的走滑型断层相比,正断层倾角一般为中等角度,甚至低角度,在 其上盘往往会产生更宽的同震变形 。例如, 2010 年 EI Mayor Mw7.2 地震是一次正断型事件, 触发了多 条断层破裂,产生了长约 120km 的复杂地表破裂,震后高精度的激光雷达观测揭示隐伏在科罗拉多河三 角洲巨厚沉积中的一条未知盲断层发生了错断 (Oskin, et al., 2012)。这种广泛分布在断层周围数百米甚至 上公里的弥散性变形在越来越多的地震中被高分辨率大地测量观测到(Li et al., 2022; Liu et al., 2025; Zhou et al., 2018)。这意味着同震滑动可能被低估,直接影响地震危险性评估和近断层工程抗断设计。此外,定 日地震在VI烈度区内触发了大量的同震滑坡和砂土液化,对建筑物地基失效的破坏作用也不容忽视(徐岳 仁等,2025)。因此,利用现代高精度对地观测技术精细刻画同震地表变形是必要的,有助于全面了解断层 浅层破裂机制和准确评估地震风险。

## 5. 结论

本研究利用 2025 年定日地震震前、震后 GF-7 立体像对数据集和 DSM 差分技术,生成了震中区域同 震地表垂向形变场,获得以下主要初步认识:发震断层为登么错断裂,发生了长约 42km 的地表变形,最 大地表垂向位移为 2.97±0.2m;沿同震形变带平均宽度约 62m,多个段落变形区宽达 100~250m;光学极 近场形变最大包络线与现场调查结果高度吻合,这反映了显著应变主要集中在较窄(<50m)的形变区内; 垂向位移幅度、形变梯度和形变带宽度具有明显的分段性,显著形变集中发生在扎南拉一带,且形变梯 度较高,登么错湖段形变最微弱,措果乡段形变微弱而弥散,这与断层几何复杂性和动态破裂过程有关; 光学次近场形变指示沿同震地表变形带多处存在分布式的次级破裂和非构造成因的滑坡、崩塌等非构造 成因的次生地表变形,表明在断层周围上百米范围内的弥散性变形可能被忽视或被低估,有必要开展高 精度地连续形变测量。

致谢:感谢审稿专家对本文的认真审阅和提出的宝贵建议。感谢国家遥感数据与应用服务平台、中 国地震局预测研究所提供高分七号卫星影像。感谢中国地震局地质研究所李涛研究员和中国地质科学院 地质研究所刘富财博士提供的野外调查数据。感谢中国地震局地球物理研究所提供定日地震目录。感谢 中国地震局地震研究所李琦助理研究员分享并讨论地震波反演结果。

# 参考文献

[1] Armijo, R., Tapponnier, P., Mercier, J.L, 1986. Quaternary extension in southern Tibet: Field observations an d tectonic implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91(B14): 13803-13872. https://doi.or

g/10.1029/JB091iB14p13803.

- [2] Barnhart, W.D., Gold, R.D., Hollingsworth, J., 2020. Localized fault-zone dilatancy and surface inelasticity o f the 2019 Ridgecrest earthquakes. *Nature Geosci* 13, 699–704. https://doi.org/10.1038/s41561-020-0628-8.
- [3] Besl, P.J. and McKay, N.D., 1992. A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on Pattern An alysis and Machine Intelligence*, 14(2): 239-256. https://doi.org/10.1109/34.121791.
- [4] Chen, H., Qu, C., Zhao, D., et al , 2024. Large-Scale Extensional Strain in Southern Tibet From Sentinel-1 In SAR and GNSS Data. *Geophysical Research Letters*, 51(19): e2024GL110512. https://doi.org/10.1029/2024 GL110512.
- [5] Gold, R.D., Reitman, N.G., Briggs, R.W., et.al, 2015. On- and off-fault deformation associated with the Sept ember 2013 Mw 7.7 Balochistan earthquake: Implications for geologic slip rate measurements. *Tectonophysi* cs 660, 65-78. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.08.019.
- [6] Hirschmuller, H., 2008. Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information. *IEEE Transacti* ons on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 30(2): 328-341. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2007.116
   6.
- [7] Kapp, P. and Guynn, J.H., 2004. Indian punch rifts Tibet. *Geology*, 32(11): 993-996. https://doi.org/10.1130/ G20689.1.
- [8] Klinger, Y., Okubo, K., Vallage, A., et al, 2018. Earthquake Damage Patterns Resolve Complex Rupture Proc esses. *Geophysical Research Letters*, 45(19): 10,279-10,287. https://doi.org/10.1029/2018GL078842.
- [9] Leprince, S., Barbot, S., Ayoub, F., et al, 2007. Automatic and precise orthorectification, coregistration, and s ubpixel correlation of satellite images, application to ground deformation measurements, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 45(6), 1529–1558. https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.888937.
- [10] Li, C., Li, T., Shan, X.et al, 2022. Extremely Large Off Fault Deformation during the 2021 Mw 7.4 Maduo, Tibetan Plateau, Earthquake. *Seismological Research Letters*, 94(1): 39-51. https://doi.org/10.1785/0220220 139.
- [11] Liu, J., Jónsson, S., Li, X., et al, 2025. Extensive off-fault damage around the 2023 Kahramanmaraş earthqua ke surface ruptures. *Nature Communications*, 16(1): 1286.
- [12] Nissen, E., Maruyama, T., Ramon Arrowsmith, et al, 2014. Coseismic fault zone deformation revealed with d ifferential lidar: Examples from Japanese Mw ~7 intraplate earthquakes. *Earth and Planetary Science Letter* s, 405: 244-256. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.08.031.
- [13] Oskin, M.E., Arrowsmith, J.R., Corona, A.H., et al, 2012. Near-field deformation from the El Mayor-Cucapa h earthquake revealed by differential LiDAR. *Science*, 335(6069): 702-705. https://www.science.org/doi/10.1 126/science.1213778.
- [14] Tapponnier, P., Xu, Z., Roger, F., et al, 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet plateau. *Science*, 294(5547): 1671-7. https://doi.org/10.1126/science.105978.
- [15] Tang, H., Xie, J., Tang, X., et al. 2022. On-orbit radiometric performance of GF-7 satellite multispectral imag ery. *Remote Sensing*, 14(4), 886. https://doi.org/10.3390/rs14040886.
- [16] Wang, M., & Shen, Z.-K,2020. Present-day crustal deformation of continental China derived from GPS and i ts tectonic implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(12), e2019JB018774. https://doi. org/10.1029/2019JB018774.
- [17] Wang, H., Wright, T.J., Liu Zeng, et al , 2019. Strain Rate Distribution in South Central Tibet From Two Decades of InSAR and GPS. *Geophysical Research Letters*, 46(10): 5170-5179. https://doi.org/10.1029/2019 GL081916.
- [18] Wells, D.L. and Coppersmith, K.J., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupt ure width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84. https://www.action.com/actional-acti

//doi.org/10.1785/BSSA0840040974.

- [19] Wesnousky, S.G., 2008. Displacement and Geometrical Characteristics of Earthquake Surface Ruptures: Issu es and Implications for Seismic-Hazard Analysis and the Process of Earthquake Rupture. *Bulletin of the Seis mological Society of America*, 98(4): 1609-1632. https://doi.org/10.1785/0120070111.
- [20] Xu, X., Tong, X., Sandwell, et al, 2016. Refining the shallow slip deficit. *Geophysical Journal International*, 204(3): 1843-1862. https://doi.org/10.1093/gji/ggv563.
- [21] Xu, X., Chen, W., Ma, W., et al, 2002. Surface Rupture of the Kunlunshan Earthquake (Ms 8.1), Northern Ti betan Plateau, China. *Seismological Research Letters*, 73(6): 884-892. https://doi.org/10.1785/gssrl.73.6.884.
- [22] Yang, B., Wang, M., Xu, W., et al, 2017. Large-scale block adjustment without use of ground control points b ased on the compensation of geometric calibration for ZY-3 images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 134: 1-14. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.10.013.
- [23] Yang, W., Jiang, J., Qu, C., et al, 2019. A study on origin of Cenozoic rifts in Qinghai-Xizang(Tibetan) Plate au. *Geological Review*, 65(02): 267-279.
- [24] Yin, A., 2000. Mode of Cenozoic east-west extension in Tibet suggesting a common origin of rifts in Asia du ring the Indo-Asian collision. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B9): 21745-21759. https:// doi.org/10.1029/2000JB900168.
- [25] Zhou, Y., Parsons, B.E. and Walker, R.T., 2018. Characterizing Complex Surface Ruptures in the 2013 Mw 7.
   7 Balochistan Earthquake Using Three-Dimensional Displacements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(11): 10,191-10,211. https://doi.org/10.1029/2018JB016043.
- [26] 曹海翊,张新伟,赵晨光,等,高分七号卫星总体设计与技术创新.中国空间科学技术,2020,40(05):1-9. doi: 10.16708/j.cnki.1000-758X.2020.0052.
- [27] 范鑫东, 王洋洋, 唐新明, 2023. 高分七号卫星立体影像无地面控制区域网平差与精度验证. 遥感信息, 38(05): 73-80.doi: 10.20091/i.cnki.1000-3177.2023.05.010.
- [28] 李对对, 隋正伟, 龙小祥, 等, 2024. 高分七号卫星双线阵相机几何处理及其精度验证. 遥感学报, 28(03): 756-766.doi:10.11834/jrs.20221073 .
- [29] 刘小利, 夏涛, 刘静, 等, 2022. 2021 年青海玛多 Mw7.4 地震分布式同震地表裂缝特征. 地震地质, 44(02): 461-483. doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2022.02.012.
- [30] 刘富财,潘家伟,李海兵,等, 2025 年 Mw7.1 西藏定日地震地表破裂与同震位移分布特征.地质学报,2025,99(03):685-703.doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2025069.
- [31] 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. 1-29. doi:10.3799/dqkx.2025.040.
- [32] 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.0253-4967.2025.01.001.
- [33] 田婷婷, 吴中海, 2023. 西藏申扎一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.
- [34] 王楠, 李永生, 申文豪, 等, 2025. 2025 年 1 月 7 日西藏定日 Ms6.8 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), 50(02): 404-411.doi:10.13203/j.whugis20250022.
- [35] 徐心悦, 2019. 藏南申扎一定结断裂系卡达正断裂晚第四纪活动性及其环境效应. 北京:中国地震局地 质研究所.
- [36] 徐岳仁, 付国超, 梁泽毓,等, 2025. 2025 年 1 月 7 日西藏定日 Ms6.8 级地震触发滑坡与砂土液化特征 初步研究. 地球科学: 1-26. doi:10.3799/dqkx.2025.043.
- [37] 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: 1-17. doi:10.3799/dqkx.2025.033.
- [38] 杨文环, 2020. 光学卫星遥感影像弱纹理区域数字表面模型提取方法研究. 武汉: 武汉大学.

- [39] 赵俊猛, 杜品仁, 2016. 印度-亚洲大陆的初始碰撞. 地震地质, 38(3): 783-796.doi:10.3969/j.issn.0253-4967.2016.03.022.
- [40] 中华人民共和国应急管理部, 2025. 2025 年 1 月全国自然灾害情况. http://220.197.169.100/xw/yjglbgzdt/202503/t20250306\_516049.shtml.