引文格式:王楠,李永生,申文豪,等.2025年1月7日西藏定日Ms 6.8地震震源机制InSAR反演及强地面运动快速模拟[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(2):404-411.DOI:10.13203/j.whugis20250022

Citation: WANG Nan, LI Yongsheng, SHEN Wenhao, et al. Source Parameters and Rapid Simulation of Strong Ground Motion of the Ms 6.8 Earthquake on January 7, 2025 in Dingri (Xizang, China) Derived from InSAR Observation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(2):404-411.DOI:10.13203/j.whugis20250022

2025年1月7日西藏定日Ms 6.8地震震源机制InSAR反演及强地面运动快速模拟

王 楠[1] 李永生[1] 申文豪[1] 姜文亮[1] 李 强[1] 焦其松[1]

1 应急管理部国家自然灾害防治研究院,北京,100085

摘 要:北京时间2025-01-07,中国西藏自治区日喀则定日县发生了Ms 6.8地震,造成大量人员伤亡。地震发生在青藏高原拉萨地块内部,为快速获取此次地震的发震构造和准确理解震源机制,基于陆探1号(Lutan-1, LT-1)卫星升轨数据和Sentinel-1卫星降轨数据提取了本次地震的同震形变场,并以此作为约束资料对发震断层几何参数和滑动分布进行反演。同震形变场显示,发震地区以垂直变形和东西向伸展变形为主要特征,视线向最大变形量达到了2 m。反演结果表明,此次地震发生于一条走向为187°、倾角为40°的正断层,断层最大位错量达6 m,矩震级达到了Mw 7.1。基于反演断层滑动模型模拟地震烈度,结果显示此次地震最大烈度可达Ⅸ度。综合使用InSAR地震同震形变场和两步法断层参数反演算法快速获取地震震源机制和破裂参数,可为地震应急救援、烈度估算和震害分析等提供快速准确的数据支持。

关键词:定日地震;InSAR反演;同震形变;震源机制;强地面运动

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2025-01-15

DOI:10.13203/j.whugis20250022 **文章编号**:1671-8860(2025)02-0404-08

Source Parameters and Rapid Simulation of Strong Ground Motion of the Ms 6.8 Earthquake on January 7, 2025 in Dingri (Xizang, China) Derived from InSAR Observation

WANG Nan[1] *LI Yongsheng*[1] *SHEN Wenhao*[1] *JIANG Wenliang*[1] *LI Qiang*[1] *JIAO Qisong*[1]

1 National Institute of Natural Hazards, Ministry of Emergency Management of China, Beijing 100085, China

Abstract: **Objectives**: On January 7, 2025, an Ms 6.8 earthquake struck Dingri County, Shigatse City, Xizang Autonomous Region, China, resulting in numerous casualties. This earthquake took place within the Lhasa block of the Qinghai-Tibet Plateau. To swiftly ascertain the seismogenic structure of this earthquake and gain a precise understanding of its source mechanism, this study utilized ascending data from the Lutan-1 (LT-1) satellite and descending data from the Sentinel-1 satellite to extract surface coseismic deformation. **Methods**: This deformation data served as constraint information for the inversion of geometric parameters and slip distribution of the seismogenic fault. **Results**: The findings reveal that the earthquake-affected areas primarily exhibited near east-west extension deformation, with the maximum deformation in the line of sight direction attaining 2 m. The inversion outcomes demonstrate that the earthquake occurred on a normal fault with a strike of 187° and a dip angle of 40°, exhibiting a maximum slip of 6 m and a simulated moment magnitude of 7.1. By simulating earthquake intensity based on the estimated fault slip model, it was found that the maximum intensity of this earthquake could reach level Ⅸ. **Conclusions**: The integrated application of interferometry synthetic aperture radar seismic coseismic deformation field and a two-step fault parameter inversion algorithm achieved a rapid

基金项目:国家自然科学基金(42374039);应急管理部国家自然灾害防治研究院基本科研业务专项(ZDJ2024-18)。

第一作者:王楠,助理研究员,主要从事InSAR灾害应急监测。wangnan@ninhm.ac.cn

通信作者:李永生,研究员。yongshengli@ninhm.ac.cn

acquisition of the earthquake's source mechanism and rupture parameters. This approach offers swift and precise data support for earthquake emergency response, intensity estimation, and damage analysis.

Key words: Dingri earthquake; InSAR inversion; coseismic deformation; focal mechanism; strong ground motion

北京时间 2025-01-07 9 时 5 分，中国西藏自治区日喀则市定日县发生 Ms 6.8 地震。根据中国地震台网正式测定，此次地震震中位置为 28.50°N，87.45°E，震源深度约为 10 km。到 2025-01-07 晚上，地震已造成 126 人死亡，数百人受伤，大量建筑物损坏[1]。截至 1 月 7 日 16 时 12 分，共记录到余震 80 次[2]。国内外多家科研机构或者学者采用不同的方法和数据对本次地震的震源机制和破裂分布进行研究，均认为本次事件是一次典型的正断层拉张型地震[2-3]。地震震源机制快速反演有助于确定发震断层的几何形态，理解发震断层的构造活动特征、孕震机制和进行强地面运动模拟，从而有利于指导地震现场应急。利用合成孔径雷达干涉测量（interferometry synthetic aperture radar，InSAR）[4-5]技术进行地表变形监测是获取地震同震形变场及断层滑动分布的快速有效方式之一[6-8]。本文利用国产陆探一号（Lutan-1，LT-1）卫星数据和欧洲空间局 Sentinel-1 卫星数据快速获取了此次地震同震形变，并以 InSAR 同震变形观测资料为约束，基于两步法断层参数模拟方法反演了发震断层几何参数和滑动分布，进一步利用随机振动有限断层模型计算区域地震烈度分布。通过利用国产高分光学影像数据进行地表破裂遥感解译，证明了此次地震震源机制反演结果的可靠性。本研究提供的地震变形场、破裂参数和烈度分布等信息能够为地震救灾和灾害评估提供重要参考依据。

1　构造背景

此次地震的震中位于青藏高原拉萨地块内部，受印度板块与欧亚板块之间发生的陆陆碰撞作用影响，该区域伸展构造运动、构造地貌演化以及地震活动显著[9]。拉萨地块自西向东被多条近南北向的裂谷所切割，向南切穿雅鲁藏布江缝合带直至喜马拉雅山弧形地带，地块内近东西向伸展变形主要通过多条平行排列的近南北展布的正断层裂谷系来进行调整。其中拉萨块体内部涉及到近南北向构造裂谷主要包括亚东—谷露裂谷、申扎—定结裂谷、岗嘎—当穹错裂谷中南段、聂拉木—措勤裂谷、仲巴—达雄裂谷、霍尔巴—仓木错裂谷等[10]。这些构造裂谷第四纪活动显著，强震频发，例如近代历史记录以来的定日—戈芒错裂谷内 1908 年尼玛县申亚乡 Ms 7.0 地震和亚东—谷露裂谷内 1952 年 Ms 7.5 地震，距离此次地震时间最近的是 2020-03-20 发生的定日县 5.9 级地震（中国地震台网地震查询系统，http://www.ceic.ac.cn/history），距离此次震中约 15 km。本次定日 Ms 6.8 地震发震断裂位于申扎—定结裂谷和尼玛—定日裂谷之间的登么错断裂附近。图 1 展示了此次地震震中、主要余震及周边区域主要断层的分布位置。

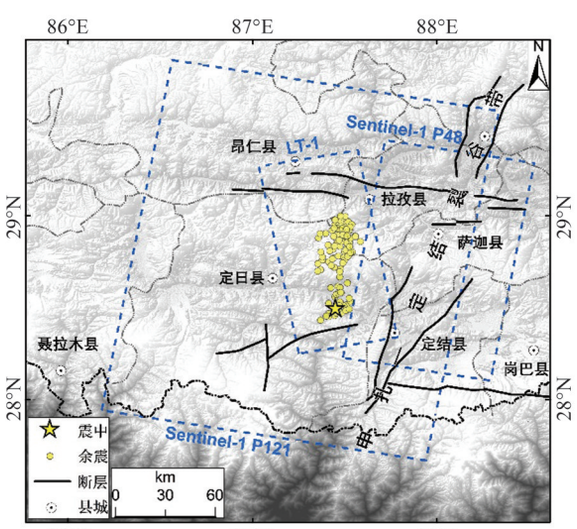


图 1　2025 年 1 月 7 日定日 Ms 6.8 地震区域构造背景图

Fig. 1　Regional Tectonic Background of the Ms 6.8 Dingri Earthquake on January 7, 2025

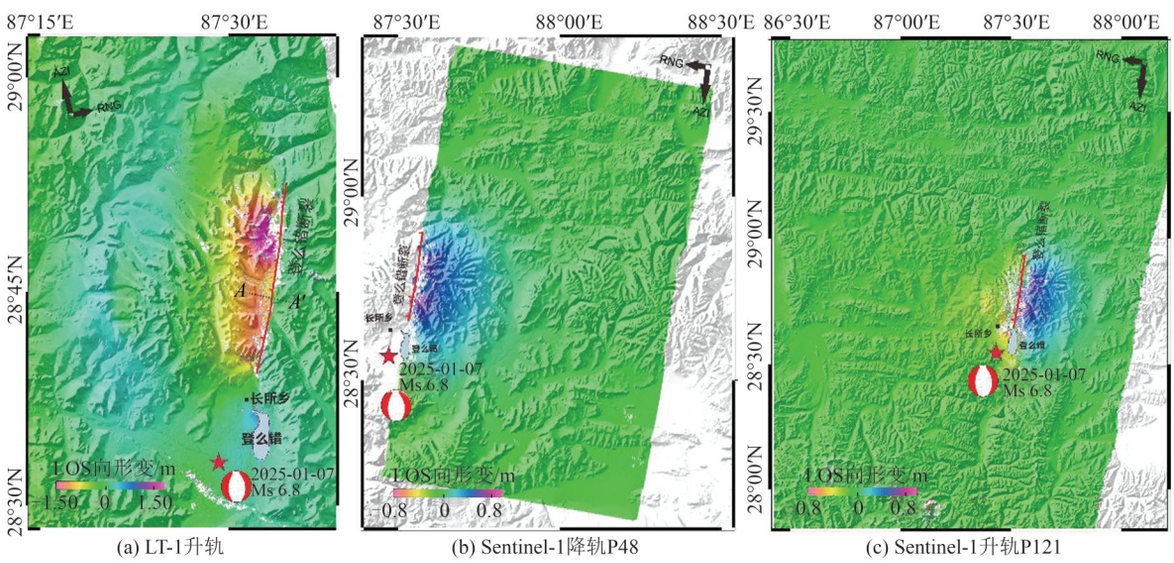
2　InSAR 同震形变监测方法与结果

2.1　InSAR 同震形变场

LT-1 合成孔径雷达（synthetic aperture radar，SAR）卫星是中国第一组民用 L 波段 SAR 干涉卫星星座，以地表形变差分干涉测量模式为主[11]，双星编队的成像模式可以实现 4 d 的严格重访，非常有利于地震等自然灾害的地表变形监测和应急响应。目前已在土耳其地震和中国的四川省泸定地震、甘肃省积石山地震、台湾省花莲地震等多个地震同震变形监测、地震次生灾害应急评估以及活动断裂解译和遥感探查中得到有效应用[12]。

本文利用升轨 LT-1 卫星震前影像（2024-12-

06)和震后应急拍摄影像(2025-01-07)完成了本次地震的同震形变场的快速获取和断层破裂参数反演,LT-1影像覆盖范围如图1所示。获取本次地震的视线向(line of sight,LOS)同震地表位移场如图2(a)所示。InSAR结果表明地震引起的形变集中于登么错的北部,最大LOS向变形量达到-2 m(负值表示远离卫星方向)。对于Sentinel-1卫星,本文首先获取了覆盖震中东部地区的降轨P48的影像,数据获取时间分别为2024-12-27和2025-01-08,覆盖范围如图1所示。提取到的InSAR同震形变(图2(b))显示其LOS向形变最大值为0.8 m(正值表示朝向卫星方向)。LT-1卫星和Sentinel-1卫星P48轨道数据获取的大范围同震形变场特征证实此次地震为一次正断层破裂过程,发震断裂为登么错断裂。InSAR快速获取的大范围同震形变场能够快速锚定地震极震区,为地震现场应急提供有力的技术支撑。



(a) LT-1升轨 (b) Sentinel-1降轨P48 (c) Sentinel-1升轨P121

图2 LT-1和Sentinel-1 P48和P121 InSAR同震形变场

Fig. 2 InSAR-Derived Coseismic Deformation Fields of LT-1 Dataset and P48 Dataset and P121 Dataset of Sentinel-1

同时,基于Sentinel-1 P121降轨数据(2025-01-01和2025-01-13)获得了完整覆盖震中周围区域的InSAR同震形变场,见图2(c)。结果表明,断裂下盘(断裂带东侧)的形变量级和空间分布特征与P48轨道数据的结果较为一致,而在断裂上盘(断裂带西侧)P121的结果与LT-1数据结果相差较大,虽然升降轨数据获取正断层地震形变结果可能存在一定的差异性,但此处差异过大的原因可能是由于此次地震同震形变显著,尤其在断层上盘变形量级非常大,现场考察资料亦已证实其变形达到2~3 m[13],因而导致P121轨道数据在该区域可能出现相干性较差和相位解缠错误等问题。综合考虑以上因素,本文在后续的震源机制反演中未使用该轨道的结果,而只使用LT-1和Sentinel-1 P48数据结果作为约束资料,虽然两者都未完整获取地震的形变场,但是其在上下盘分别提供了可靠观测量,可以保证后续的反演精度。

2.2 震源机制反演

为详细探究此次地震同震破裂的滑动分布,本文以LT-1和Sentinel-1 P48 SAR数据获取的定日地震同震形变场为约束资料,基于粒子群优化算法[14-15]反演发震断层参数并分析其滑动机制。为尽可能降低局部变形或噪声影响,首先采用数据分辨率约束的四叉树方法对InSAR形变场进行降采样,同时能够降低计算量,提高反演效率。

震源机制反演的第一步为利用均一断层模型获取发震断层的位置(经纬度)、顶部埋深、走向、倾角等空间几何参数。基于Okada弹性位错模型[16],利用随机搜索粒子群优化算法对获取的观测值和模拟的LOS向形变值进行比较,当适配函数达到最小解时即确定反演的最优参数。适配函数定义为[15]:

$$\sigma=\sqrt{\frac{\left(\boldsymbol{W}(\boldsymbol{D}-\boldsymbol{GS})\right)^2}{N}} \tag{1}$$

式中，G 为系数矩阵，表示均一断层上单位滑动量引起的地表运动响应；S 表示滑动矢量矩阵；W 表示每个数据集的相对权重矩阵；D 表示地表形变观测值矩阵；N 表示形变观测值的个数。

第二步为利用分布式断层模型计算了此次地震的断层滑动空间分布，沿断层走向扩展其长度到 50 km，沿着断层面的宽度延伸至 20 km。InSAR 形变资料与震源参数在断层上的函数关系可表示为：

$$D = GS \tag{2}$$

分布式模型在断层走向和倾向上进行离散子断层分割，子断层的长度和宽度各设置为 2 km。为了对滑动分割的粗糙度进行约束，在此使用二次差分拉普拉斯算子对分割单元尺寸进行控制，式(2)可表示为：

$$\begin{bmatrix} G \\ \alpha^2 L \end{bmatrix} S = \begin{bmatrix} D \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中，L 为二阶微分算子；α^2 为平滑系数。

在反演过程中，倾角的变化范围设置在 35°～55°，平滑系数范围设置在 1～10，通过计算其全局最小值得到最优倾角和平滑参数(图 3)。本文根据破裂模型推断出断层在地表的投影位置如图 4(a)中虚线表示，模拟得到的分布式断层模型下地震破裂结果如图 4(b)所示，结果显示，此次地震发震断层走向为 187°，倾角为 40°，最优平滑系数为 4.0，揭示了本次地震为正断层占主导兼有少部分右旋走滑分量的断裂错动过程。

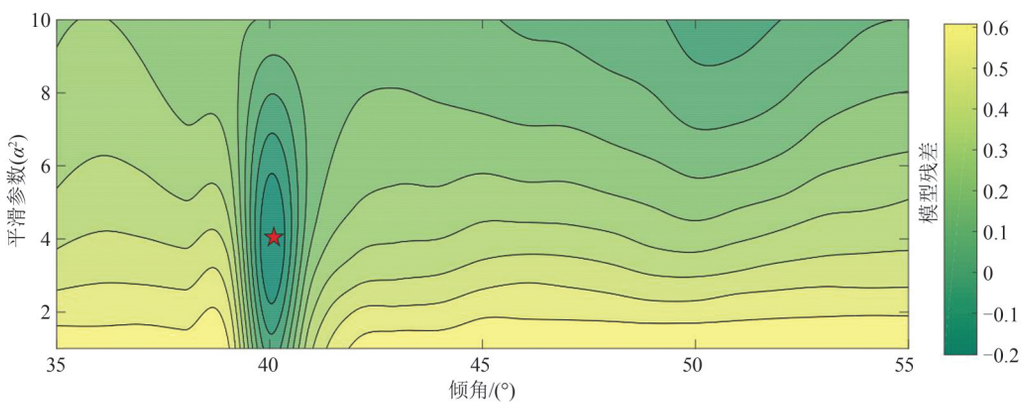
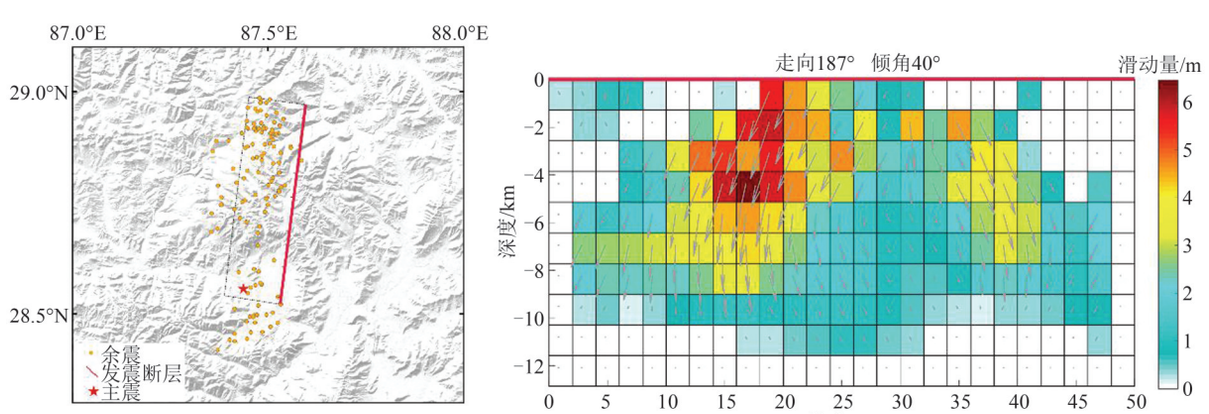


图 3　倾角和平滑系数变化的对数函数等值线图(α^2)，红星表示全局最小点

Fig. 3　Contour Map of Log Function with Variations in Dips and Smoothing Coefficients (α^2), the Red Star Indicates the Global Minimum Point

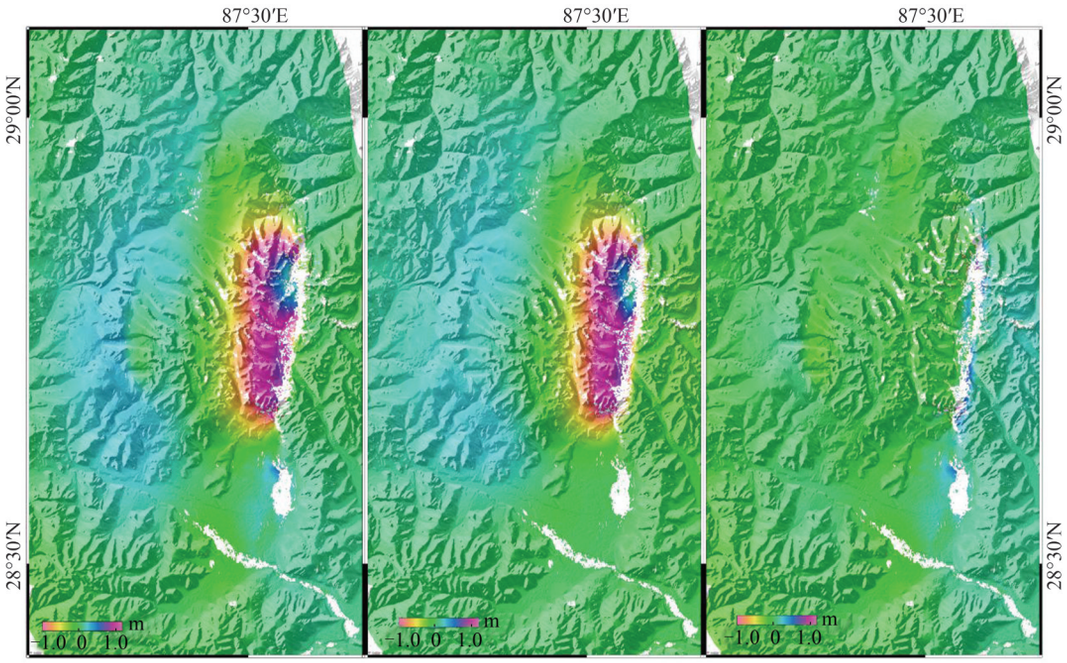


(a) 发震断层与余震位置　　(b) 最优分布式滑动模型

图 4　最优分布式断层模型的滑动分布结果

Fig. 4　Sliding Distribution Results of the Optimal Distributed Fault Model

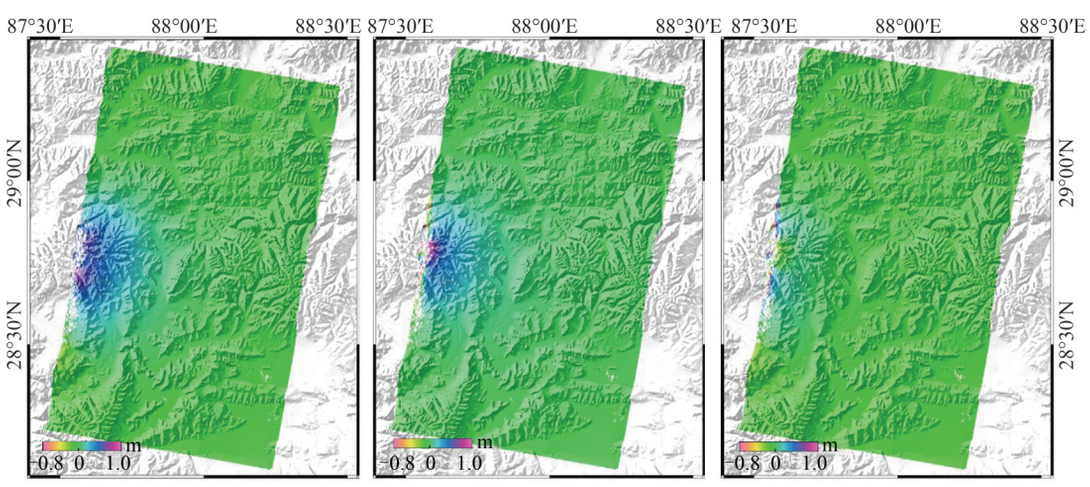
本次地震破裂分布明显，破裂断层面近地表区域亦存在明显的滑动区，表明同震滑动传播至地表，中国地震局相关团队的现场考察资料亦显示本次地震位错出露地表[13]。分布式滑动分布模型中发震断层的最大破裂位置较浅，主要集中在 1～6 km 深度范围内，最大的滑动量达 6 m，说明本次地震释放了巨大能量，模拟结果显示本次地震的矩震级达到了 Mw 7.1。图 5 和图 6 分别表示 LT-1 和 Sentinel-1 P48 数据的形变观测值、形变模拟值及残差值，两种数据的残差值均较小，表明本文得到的断层模型能够很好地拟合观测数据，反演策略和结果稳定、可靠。



(a) LT-1形变观测值 (b) 形变模拟值 (c) 残差值

图5 LT-1数据LOS向同震形变场、最优拟合模型解算的位移场和模型残差

Fig. 5 LOS Coseismic Deformation Field, Simulated Coseismic Deformation Field, and Residual Distribution of LT-1 Dataset



(a) Sentinel-1形变观测值 (b) 形变模拟值 (c) 残差值

图6 Sentinel-1 P48数据LOS向同震形变场、最优拟合模型解算的位移场和模型残差

Fig. 6 LOS Coseismic Deformation Field, Simulated Coseismic Deformation Field, and Residual Distribution of Sentinel-1 P48 Dataset

3 地震烈度快速估算

地震烈度通常被用来作为判断地震震害的重要准则。为了快速评估此次地震的地震动分布和地震动特征,本文基于InSAR资料约束下的断裂破裂参数,使用随机振动有限断层模型[17-18],通过计算震区内的峰值加速度(peak ground acceleration,PGA)及峰值速度(peak ground velocity,PGV),获取此次地震的烈度分布结果。随机有限断层模型将断层破裂面分成N个大小相等的矩形子源,并将其作为满足ω平方衰减规律的点源,通过设定震源模式和破裂传播速度,可以得到子源破裂的时间顺序,根据子源与场地的几何关系,计算每个子源对场地的影响。将所有子源在观测点引起的地震动在时域中进行叠加,获得场地的地震动时程$a(t)$[19]:

$$a(t)=\sum_{i=1}^{N_L}\sum_{j=1}^{N_W}a_{ij}(t+\Delta t_{ij}) \tag{4}$$

式中,N_L、N_W分别为断层沿长度和宽度划分的子断层数;i和j分别代表沿断层走向和倾向方向的断层指标;Δt_{ij}为子源到场地的滞后时间;$a_{ij}(t)$为子源利用随机点源方法得到的在观测点的地震动时程。

为了考虑场地的浅层速度结构对地震场地效应和地震灾害程度的影响，本文使用从地形数据生成的浅层剪切波速 V_s^{30} 计算研究区场地条件对 PGA 和 PGV 的放大作用[20]：

$$\begin{cases}\ln(\mathrm{PGA}')=\ln(\mathrm{PGA})-0.36\ln\left(V_s^{30}/760\right)\\ \ln(\mathrm{PGV}')=\ln(\mathrm{PGV})-0.6\ln\left(V_s^{30}/760\right)\end{cases}\tag{5}$$

式中，PGA′和 PGV′为考虑了场地放大效应后的强地面运动参数。通过式(5)计算得到的模拟结果能够充分反映浅层速度结构的影响。进而利用得到的网格点 PGA 和 PGV，通过经验转换关系[21]分别转化为烈度，最后取两种烈度的加权平均作为最终烈度值。PGA 和 PGV 与地震烈度尺度(modified mercalli intensity，MMI)的转换关系为[21]：

$$\mathrm{MMI}=\begin{cases}3.73\lg(\mathrm{PGA})-1.23\\ 3.61\lg(\mathrm{PGV})+2.72\end{cases}\tag{6}$$

基于上述方法，利用 InSAR 形变结果模拟的地震破裂参数，进一步计算得到地震烈度分布，结果如图 7 所示，其中红色实线为地震烈度等值线。此次正演获得的地震烈度在空间分布的大致走向、烈度等级范围与中国地震局公布的调查[22]结果基本一致。此次地震最大烈度可达Ⅸ度，主要分布于定日县。

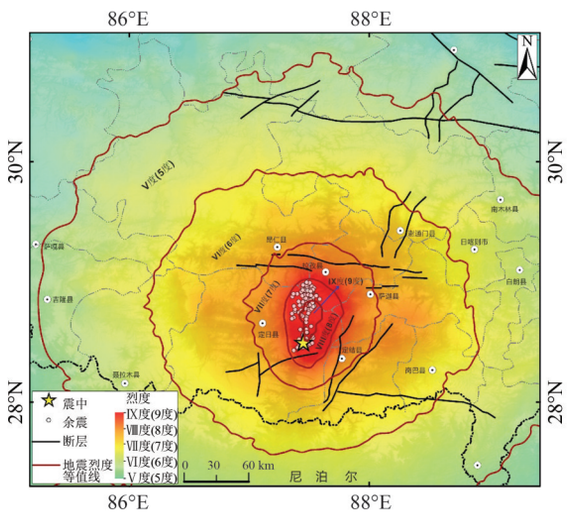


图 7　震源机制参数约束下的地震烈度快速估算结果

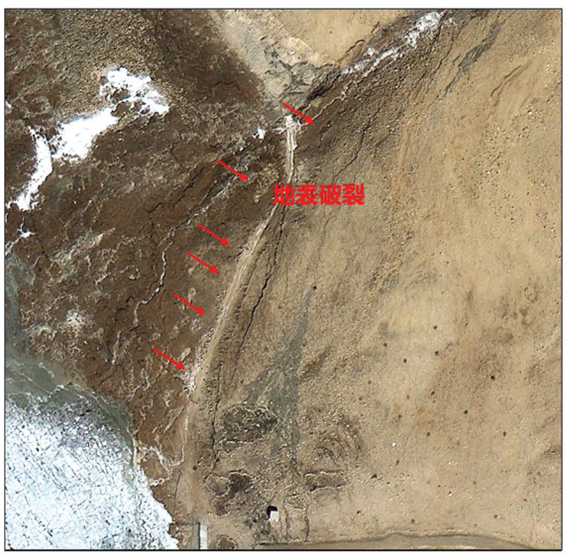
Fig. 7　Seismic Intensity Results Estimated with the Constraint of Focal Mechanism Parameters

4　地表破裂光学影像解译

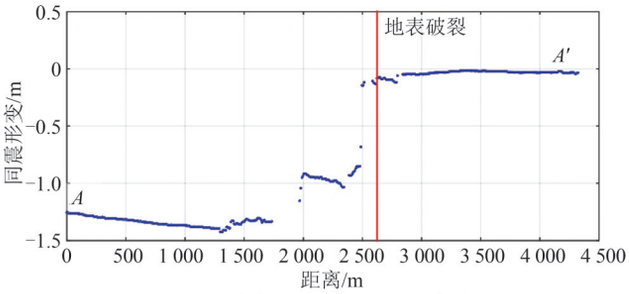
InSAR 技术能够在广域空间尺度上获取中强地震震中附近地壳运动的整体图像和面状连续的变化趋势，弥补地面定点观测盲区，并用于辅助极震区的确定。从图 2 中可以看出地表变形最大的位置为本次地震的发震断层位置，属于地表破裂极容易出现的区域。图 8(a)为对震后北京 3 号光学影像解译发现的尼辖错湖以北发育的一段位于地表同震位错量较大区域的地表破裂带。地震烈度结果显示该区域的烈度达到Ⅸ度(图 7)，因而具有较大破坏性。垂直该破裂带在图 2(a)中设置 A-A' 剖面，沿剖面线绘制 LT-1 InSAR 形变结果(图 8(b))，可见地震后该剖面的 LOS 向最大同震位错量接近 1.5 m。图 8(c)为中国地震局相关团队在该位置附近区域的震后现场考察照片[13]，发现该处变形量达到了 2 m。而 InSAR 获取的该处 LOS 向形变量投影至地表垂直向约为 1.6 m，两者结果较为吻合。InSAR 同震形变场可直接展示地表变形最大位置，清晰刻画出地表破裂带位置，这些位置通常地震灾害较严重，为地震应急救援重点区域，因此 InSAR 变形场可以直接用于指导现场应急救援。

5　结　语

本文利用国产 LT-1 SAR 卫星数据和欧洲空间局 Sentinel-1 卫星数据快速获取了 2025-01-07 日喀则定日 Ms 6.8 地震同震形变场，并以 InSAR 结果为约束资料，对发震断层几何参数和断层滑动分布进行快速反演。结果显示，此次地震为正断层为主导的破裂模式，发震断层走向为 187°，倾角为 40°，断层最大位错量可达 6 m，地表最大同震形变超过 2 m，反演的矩震级达到 Mw 7.1。经随机振动有限断层模型正演表明，极震区地震烈度可达Ⅸ度。本文快速获取的形变和模拟烈度



(a) 北京3号光学影像



(b) 图2(a)中剖面*A*-*A*′的InSAR形变结果



(c) 中国地震局相关团队实地考察照片

图 8 InSAR形变结果与地表破裂光学影像解译及实地考察结果对比验证

Fig. 8 InSAR Deformation Results and Optical Image Interpretation of Surface Rupture and Field Investigation Results

结果与实地考察数据和地震烈度调查结果具有很好的吻合度,可以有效地支撑地震应急救援工作。

地震灾害突发性高和SAR卫星数据获取的滞后性使得地震同震形变获取时效性较差。如此次地震发生后,常用的欧洲空间局Sentinel-1卫星在震区的震后成像时间偏晚(12 d的重访周期),在地震应急监测方面能力稍显不足,而国产LT-1 SAR卫星星座4 d重访周期的优势明显。此外,拥有较长波长的L波段SAR卫星传感器可以有效避免地表破裂过大而导致的失相干效应,从而有效获取真实的地震同震变形信号。未来充分发挥国产SAR卫星在数据获取主动性、时效性和数据覆盖完整性等方面的优势,可以有效支撑地震应急救援和科学研究。

参 考 文 献

[1] 中国新闻网. 最新:西藏定日县地震已致126人遇难[OL]. https://mp.weixin.qq.com/s/htgnfCsmDhQwYeztT8mrIA, 2025.
China News Service. Latest: Earthquake in Dingri County, Xizang has Resulted in 126 Fatalities[OL]. https://mp.weixin.qq.com/s/htgnfCsmDhQwYeztT8mrIA, 2025.

[2] 中国地震局地球物理研究所. 2025年1月7日西藏定日6.8级地震的震源特征[OL]. https://mp.weixin.qq.com/s/-nRSfgMCb5b6UU_OqDoB2w,2025.
Institute of Geophysics, China Earthquake Administration. Source Characteristics of the Ms 6.8 Earthquake in Dingri, Xizang on January 7, 2025[OL]. https://mp.weixin.qq.com/s/-nRSfgMCb5b6UU_OqDoB2w2025.

[3] 中国地震灾害防御中心. 2025年1月7日西藏定日6.8级地震发生的地质构造背景[OL]. https://mp.weixin.qq.com/s/R98iqfLIwW_fAEjb5roe7g,2025.
China Earthquake Disaster Prevention Center. Geological Structural Background of the Ms 6.8 Earthquake in Dingri, Xizang on January 7, 2025[OL]. https://mp.weixin.qq.com/s/R98iqfLIwW_fAEjb5roe7g,2025.

[4] ZEBKER H A, ROSEN P A, Goldstein R M, et al. On the Derivation of Coseismic Displacement Fields Using Differential Radar Interferometry: The Landers Earthquake[C]// *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1994, 99(B10): 19617-19634.

[5] BAMLER R, HARTL P. Synthetic Aperture Radar Interferometry[J]. *Inverse Problems*, 1998, 14(4): R1.

[6] LI Z H, ELLIOTT J R, FENG W P, et al. The 2010 Mw 6.8 Yushu (Qinghai, China) Earthquake: Constraints Provided by InSAR and Body Wave Seismology[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2011, 116(B10): B10302.

[7] 李永生, 申文豪, 温扬茂, 等. 2015年尼泊尔Mw 7.8地震震源机制InSAR反演及强地面运动模拟[J]. 地球物理学报, 2016, 59(4): 1359-1370.
LI Yongsheng, SHEN Wenhao, WEN Yangmao, et al. Source Parameters for the 2015 Nepal Earthquake Revealed by InSAR Observations and Strong Ground Motion Simulation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(4): 1359-1370.

[8] 李振洪, 韩炳权, 刘振江, 等. InSAR数据约束下2016年和2022年青海门源地震震源参数及其滑动分布[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47

(6): 887-897.
LI Zhenhong, HAN Bingquan, LIU Zhenjiang, et al. Source Parameters and Slip Distributions of the 2016 and 2022 Menyuan, Qinghai Earthquakes Constrained by InSAR Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(6): 887-897.

[9] 吴珍汉, 胡道功, 吴中海, 等. 青藏高原中段活动断层运动速度及驱动机理[J]. 地球学报, 2005, 26(2): 99-104.
WU Zhenhan, HU Daogong, WU Zhonghai, et al. Slip Rates and Driving Mechanism of Active Faults in Middle Tibetan Plateau[J]. *Acta Geosicientia Sinica*, 2005, 26(2): 99-104.

[10] 黄婷, 吴中海, 韩帅, 等. 西藏日喀则地区的活断层基本特征及地震灾害潜在风险评估[J]. 地震科学进展, 2024, 54(10): 696-711.
HUANG Ting, WU Zhonghai, HAN Shuai, et al. The Basic Characteristics of Active Faults in the Region of Xigaze, Xizang and the Assessment of Potential Earthquake Disaster Risks [J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2024, 54(10): 696-711.

[11] LIN H Y, DENG Y K, ZHANG H, et al. On the Processing of Dual-Channel Receiving Signals of the Lutan-1 SAR System[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(3): 515.

[12] 李永生, 李强, 焦其松, 等. 陆地探测一号 SAR 卫星星座在地震行业的应用与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(10): 1741-1752.
LI Yongsheng, LI Qiang, JIAO Qisong, et al. Application of Lutan-1 SAR Satellite Constellation to Earthquake Industry and Its Prospect[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(10): 1741-1752.

[13] 中国地震局. 地质所、四川局、西藏局联合调查团队发现定日地震的同震垂直位错量达 3 m[OL]. https://mp.weixin.qq.com/s/qtB9yU9E6TlfQ4HrF5Hybw, 2025.
China Earthquake Administration. The Joint Investigation Team from the Institute of Geology, Sichuan Bureau, and Xizang Bureau Found that the Coseismic Vertical Displacement of the Dingri Earthquake Reached 3 m[OL]. https://mp.weixin.qq.com/s/qtB9yU9E6TlfQ4HrF5Hybw, 2025.

[14] 冯万鹏, 李振洪. InSAR 资料约束下震源参数的 PSO 混合算法反演策略[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(4): 1189-1196.
FENG Wanpeng, LI Zhenhong. A Novel Hybrid PSO/Simplex Algorithm for Determining Earthquake Source Parameters Using InSAR Data[J]. *Progress in Geophysics*, 2010, 25(4): 1189-1196.

[15] 张庆云, 李永生, 罗毅, 等. 2016 年意大利阿马特里切 Mw 6.2 地震震源机制 InSAR 反演[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(1): 118-124.
ZHANG Qingyun, LI Yongsheng, LUO Yi, et al. Source Parameters for the 2016 Mw 6.2 Italy Amatrice Earthquake Revealed by InSAR Observations [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(1): 118-124.

[16] OKADA Y. Surface Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1985, 75(4): 1135-1154.

[17] HANKS T C, MCGUIRE R K. The Character of High-Frequency Strong Ground Motion[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1981, 71(6): 2071-2095.

[18] BOORE D. Stochastic Simulation of High-Frequency Ground Motions Based on Seismological Models of the Radiated Spectra[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1983, 73: 1865-1894.

[19] 陈刚, 李茂峰, 李克华,等. 基于随机振动模型的强地面运动数值模拟及其在广西灵山 M $6\frac{3}{4}$ 地震中的应用[J]. 中国地震, 2023, 39(4): 832-844.
CHEN Gang, LI Maofeng, LI Kehua, et al. Strong Ground Motion Simulation of the M $6\frac{3}{4}$ Lingshan Guangxi Earthquake Base on Stochastic Finite Fault Modeling [J]. *Earthquake Research in China*, 2023, 39(4): 832-844.

[20] ALLEN T I, WALD D J. Topographic Slope as a Proxy for Seismic Site-Conditions (V_s^{30}) and Amplification Aaround the Globe[R]. Open-File Report 2007-1357, Reston, Virginia, USA, 2007.

[21] 丁宝荣, 孙景江, 杜轲, 等. 地震烈度与峰值加速度、峰值速度相关性研究[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(2): 26-36.
DING Baorong, SUN Jingjiang, DU Ke, et al. Study on Relationships Between Seismic Intensity and Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2017, 37(2): 26-36.

[22] 中国地震局地球物理研究所. 应急管理部中国地震局发布西藏定日 6.8 级地震烈度图[OL]. https://mp.weixin.qq.com/s/YQO_rz—HYH9s3lRhdmGeg, 2025.
Institute of Geophysics, China Earthquake Administration. The Ministry of Emergency Management and China Earthquake Administration Released the Intensity Map of the Ms 6.8 Earthquake in Dingri, Xizang[OL]. https://mp.weixin.qq.com/s/YQO_rz—HYH9s3lRhdmGeg, 2025.