2026 年第 41 卷 第 5 期
2026,41(5):1979-1987
地球物理学进展 Progress in Geophysics
http://www.progeophys.cn
ISSN 1004-2903
CN 11-2982/P

龚博为,李伟,王一敏,等.2026.2025 年阿富汗东部兴都库什山地区 M_W6.1 地震的灾害特征研究.地球物理学进展,41(5):1979-1987,doi:10.6038/pg2026KK0046.

GONG BoWei, LI Wei, WANG YiMin, *et al*. 2026. Research on the disaster characteristics of the M_W6.1 earthquake in the Hindu Kush region of eastern Afghanistan in 2025. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41(5):1979-1987,doi:10.6038/pg2026KK0046.

2025 年阿富汗东部兴都库什山地区 M_W6.1 地震的灾害特征研究

Research on the disaster characteristics of the M_W6.1 earthquake in the Hindu Kush region of eastern Afghanistan in 2025

龚博为[1],李伟[1,2,3*],王一敏[1],张德成[4]

GONG BoWei[1], LI Wei[1,2,3*], WANG YiMin[1], ZHANG DeChen[4]

1. 兰州交通大学测绘与地理信息学院,兰州 730070
2. 地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心,兰州 730070
3. 甘肃省测绘科学与技术重点实验室,兰州 730070
4. 自然资源部第一大地测量队,西安 710054

1. *Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou* 730070, *China*
2. *National and Local Joint Engineering Research Center for Geographic Monitoring Technology Application, Lanzhou* 730070, *China*
3. *Key Laboratory of Science and Technology in Surveying & Mapping, Gansu Province, Lanzhou* 730070, *China*
4. *First Geodetic Survey Team of the Ministry of Natural Resources, Xi'an* 710054, *China*

摘 要 2025 年 8 月 31 日阿富汗东部兴都库什山地区,靠近库纳尔省与楠格哈尔省,发生了 M_W6.1 级地震,造成大量人员伤亡与财产损失.由于阿富汗地处欧亚板块与印度板块交界的陆内变形带,构造活动活跃,且该国长期面临人道主义危机、基础设施薄弱,此次地震进一步加剧了该区域的灾难风险.为了揭示此次地震的灾害特征,本文基于 Sentinel-1 卫星数据,利用合成孔径雷达干涉测量技术(Interferometric Synthetic Aperture Radar,InSAR)开展同震形变监测,以同震形变场作为约束,反演震源参数和静态滑动分布,结果表明,此次地震的破裂深度较浅,主要集中在地下 8 km 内,破裂以逆冲运动为主兼具少量倾滑分量,最大滑动量为 2.5 m.与此同时,该地震震后多次发生强余震,震

Abstract On August 31, 2025, a magnitude M_W6.1 earthquake occurred in the Hindu Kush Mountains region of eastern Afghanistan, near Kunar and Nangarhar provinces, causing a large number of casualties and property damage. The earthquake further exacerbated the risk of disaster in the region due to Afghanistan's location in the intra-continental deformation zone at the junction of the Eurasian and Indian plates, with active tectonic activity, and the country has long faced a humanitarian crisis and weak infrastructure. In order to reveal the disaster characteristics of this earthquake, based on the Sentinel-1 satellite data, this paper uses Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) to carry out coseismic deformation monitoring, and uses the coseismic deformation field as the constraint to invert the source parameters and static sliding distribution. The results show that the rupture depth of the earthquake is shallow, mainly

收稿日期 2026-01-30; **修回日期** 2026-06-16. **投稿网址** http://www.progeophys.cn

基金项目 国家自然科学基金(42664001,42661037,41930101)、甘肃省生态文明建设重点研发专项(24YFFA054)、中国博士后科学基金(2019M660091XB)、甘肃省联合科研基金重点项目(26JRRA1178,26JRRA1176,25JRRA1104)、2024 年度自然资源部部省合作项目(2024ZRBSHZ169)、武汉引力与固体潮国家野外科学观测研究站开放基金(WHYWZ202403)、青海省地理空间信息技术与应用重点实验室开放基金(QHDX-2025-06)、兰州市人才创新创业项目(2022-RC-73)和甘肃省"青年科技人才托举工程"项目(李伟)联合资助.

第一作者简介 龚博为,男,2001 年生,硕士研究生,研究方向为地球物理数据处理与分析.E-mail:12252283@stu.lzjtu.edu.cn

***通讯作者** 李伟,男,1989 年生,博士,副教授,研究方向为多源数据处理、自然灾害监测.E-mail:geosci.wli@lzjtu.edu.cn

区地形陡峭,震后发生多次山体滑坡,大量泥砖房坍塌.截至2025年9月4日,此次地震造成3073人死亡、3640人受伤,为近年阿富汗伤亡最严重的地震事件.针对此次地震局部地区地形复杂、建筑质量差和人员密集等因素,本文开展了人员伤亡与空间分布规律的研究,结果表明,伤亡人员高度集中于库纳尔省南部及楠格哈尔省北部的河谷与城镇区域,这一分布与当地人员沿河谷聚集的特征及传统泥砖、土坯房屋抗震性能极差密切相关,遥感评估显示库纳尔省22.59%的建筑损毁率远高于楠格哈尔省贾拉拉巴德市的8.61%,印证了建筑质量的关键影响.所以,需要持续关注震区的次生灾情危害,进行多维度区域灾情风险评估,以减少阿富汗系统性危机.

关键词 阿富汗地震;InSAR;同震形变;人员伤亡;西构造结

中图分类号 P315

文献标识码 A

doi:10.6038/pg2026KK0046

CSTR:32085.14.pg2026KK0046

concentrated within 8 km underground. The rupture is dominated by thrust motion and has a small tilt-slip component, with a maximum sliding amount of 2.5 m. At the same time, there were many strong aftershocks after the earthquake, the terrain of the earthquake area was steep, and many landslides occurred after the earthquake, and a large number of mud brick houses collapsed. As of September 4, 2025, the Afghan Red Crescent Society confirmed that the earthquake killed 3,073 people and injured 3,640, making it the deadliest earthquake event in Afghanistan in recent years. In view of the complex topography, poor building quality and dense population in the local area of the earthquake, this paper studies the population casualties and spatial distribution laws. The results show that the casualty population is highly concentrated in the river valleys and towns in the southern part of Kunar province and the northern part of Nangarhar province, which is closely related to the characteristics of local population aggregation along the river valley and the extremely poor seismic performance of traditional mud brick and adobe houses. Therefore, it is necessary to continue to pay attention to the secondary disaster hazards in the earthquake area and conduct multi-dimensional regional disaster risk assessment to reduce the systemic crisis in Afghanistan.

Keywords Afghanistan earthquake; InSAR; Coseismic deformation; Casualties; Western Himalayan syntaxis (WHS)

0 引 言

据中国地震台网正式测定,2025年9月1日3时17分在阿富汗发生6.1级地震,震源深度20 km,震中位于北纬34.50°,东经70.80°.阿富汗的地震活跃性主要源于向北移动的印度板块与欧亚大陆的汇聚碰撞(Tapponnier *et al*., 1986; Waseem *et al*., 2019; Luo *et al*., 2025; Zhong *et al*., 2026),以及南部阿拉伯板块的影响,持续碰撞形成了构造带,最西端向北突出形成了弧形帕米尔高原,亦称"西构造结"区域(Western Himalayan Syntaxis, WHS)(图1a).该地区位于喜马拉雅山脉、喀喇昆仑山脉、帕米尔高原、兴都库什山脉和昆仑山脉等几座主要山脉的交汇处.这些构造活动在区域内产生了多条深层活动断裂带(Verma and Sekhar, 1985; Royden *et al*., 2008; Rehman *et al*., 2017; Waseem *et al*., 2019),北部的特点是高度折叠结构,主要断层遵循这些构造的走向.虽然许多断层具有走滑性质,但有一些断层是逆冲断层或逆冲断层.兴都库什—帕米尔地区属于全球最活跃的陆内造山地震带,其地震活动与构造的关系,震源机制解的性质及其在板块构造方面的背景促使该区域地震危险性评估成为了重点工作(Danciu *et al*., 2018; Mallapaty, 2022; Kufner *et al*., 2023; Akhundzadah, 2025; Luo *et al*., 2025; Zhao *et al*., 2025; Xu *et al*., 2026).

地震作为破坏性极强的地质灾害,其引发的地表形变、建筑物损毁及人员伤亡不仅与震源特性直接相关,还受区域地质背景、城乡建设水平等多重因素影响,深入解析灾害的致灾特征与诱发成因,能够为震灾风险评估、城乡韧性规划以及抗震设防标准优化提供关键科学依据.本文整合影像大地测量技术,研究此次地震的震源机制及灾害特征.首先,利用差分干涉合成孔径雷达(Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar, D-InSAR)技术,从欧洲航天局(European Space Agency, ESA)发射的哨兵1号(Sentinel-1)卫星雷达影像中提取了2025年8月31日阿富汗M_W6.1级地震的同震变形.随后,基于弹性半空间位错模型,对此次地震的震源参数及断层平面上的滑动分布进行定量反演.此外,针对此次地震局部地区地形复杂、建筑质量差和人员密集等因素,进行了雷视影像分析,重点关注楠格哈尔省贾拉拉巴德市及附近村庄等关键区域,开展了人员伤亡与空间分布规律的研究.本研究围绕"震源-形变-灾害"的逻辑链条,旨在深入解析地震构造机制、科学评估区域地震风险和制定针对性灾害防治策略,为同类型区域的灾害风险风控提供科学参考.

1　数据与方法

1.1　震源参数

震源参数是理解地震破裂机制和预测灾害影响范围的核心基础,其准确性直接决定后续形变反演与灾害分析的可靠性. 2025 年 8 月 31 日阿富汗东部兴都库什山地区 M_W6.1 级地震发生后,美国地质勘探局(United States Geological Survey,USGS)①、哈佛大学全球矩心矩张量目录(Global Centroid-Moment-Tensor Project,GCMT)②、德国地学研究中心(Helmholtz-Centre Potsdam-German Research Centre for Geosciences,GFZ)③和中国地震台网中心(China Earthquake Networks Center,CENC)④等全球多家权威地质研究机构快速计算并发布此次地震的震源机制解. 各机构公布的参数可参见表 1,其中,走向、倾角和滑动角中的双数值是为了完整定义一个断层在空间中的姿态以及发生错动时的运动方向. 由于使用的观测数据和方法均不同,目前的结果存在较大的差异. 比如,CENC 使用的是近台数据,而 USGS 使用的是远震数据(Fang *et al*., 2013;万永革, 2019). 综合多机构数据交叉验证可知,此次地震以逆冲运动为主要特征,同时伴随少量倾滑分量.

表 1　不同机构公布的地震震源参数

Table 1　Seismic focal parameters released by different institutions

研究来源	经度/(°)	纬度/(°)	震源深度/km	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	矩心深度/km	震级/M_W
USGS[2]	70.81	34.71	8	251/48	41/52	108/75	11.5	6.0
GCMT[3]	70.71	34.66	8	235/63	41/49	84/95	12	6.0
GFZ[4]	70.86	34.73	14	232/52	31/58	90/89	12	6.0
CENC[5]	70.80	34.50	20	未公布	未公布	未公布	未公布	6.1
本研究	70.71	34.69	10	33.87	51.56	77.10	12	6.15

基于 USGS 和 GCMT 目录统计,震中 100 km 范围内已发生 12 次 5 级以上地震(Ambraseys and Biham, 2003; Rehman *et al*., 2017; Waseem *et al*., 2019; Kufner *et al*., 2023). 尤为值得关注的是,在主震发生后的 12 h 内,震中 20 km 范围内又接连发生 13 次 4 级以上余震(图 1b),充分凸显该区域极高的地震活动水平. 此次地震的发生,不仅为深入理解该区域构造运动特征和明晰地震发生内在成因提供了全新的实测案例,也为后续开展地震风险评估与灾害防治工作提供了重要科学依据.

1.2　同震形变

在确定震源参数的基础上,同震形变场是量化地表位移和刻画断层活动影响范围的关键数据支撑. 为了获取 2025 年 8 月 31 日阿富汗 M_W6.1 级地震的同震形变场,本文采用 InSAR 技术,从阿拉斯加卫星数据中心(Alaska Satellite Facility,ASF)⑤下载了地震前后的 Sentinel-1A 卫星渐进式扫描地形观测(Terrain Observation by Progressive Scans,TOPS)模式下单视复数(Single Look Complex,SLC)卫星雷达影像数据,它涵盖升轨与降轨两种观测方式(Qi *et al*., 2023;李琦等, 2025;Luo *et al*., 2025; Zhao *et al*., 2025; Xu *et al*., 2026; Zhong *et al*., 2026). 图 1a 中红色实线框为不同轨道影像的覆盖范围,其中升轨影像轨道编号为 A173 和 A071,降轨影像轨道编号为 D005 和 D078,所有影像均完整覆盖震中区域,可有效支撑同震形变场的构建. 具体影像参数如表 2 所示,升轨影像包含两组时间对,分别为 2025 年 8 月 20 日与 2025 年 9 月 1 日、2025 年 8 月 25 日与 2025 年 9 月 6 日;降轨影像同样包含两组时间对,分别为 2025 年 8 月 21 日与 2025 年 9 月 2 日、2025 年 8 月 26 日与 2025 年 9 月 7 日,时间基线均与地震事件时间窗口高度匹配,可有效排除非地震因素对形变信号的干扰.

表 2　Sentinel-1A 升轨和降轨数据信息

Table 2　Data information of Sentinel-1A ascending and descending orbits

轨道	轨道编号	震前影像日期	震后影像日期	时间基线/天
升轨	173	2025 年 8 月 20 日	2025 年 9 月 1 日	12
降轨	005	2025 年 8 月 21 日	2025 年 9 月 2 日	12
升轨	071	2025 年 8 月 25 日	2025 年 9 月 6 日	12
降轨	078	2025 年 8 月 26 日	2025 年 9 月 7 日	12

① https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards,访问于 2025 年 9 月 1 日.

② https://www.globalcmt.org/,访问于 2025 年 9 月 1 日.

③ https://www.gfz.de/,访问于 2025 年 9 月 1 日.

④ https://data.earthquake.cn/,访问于 2025 年 9 月 1 日.

⑤ ASF. 2025. Data Search [EB/OL], https://search.asf.alaska.edu/#/,访问于:2025 年 9 月 7 日.

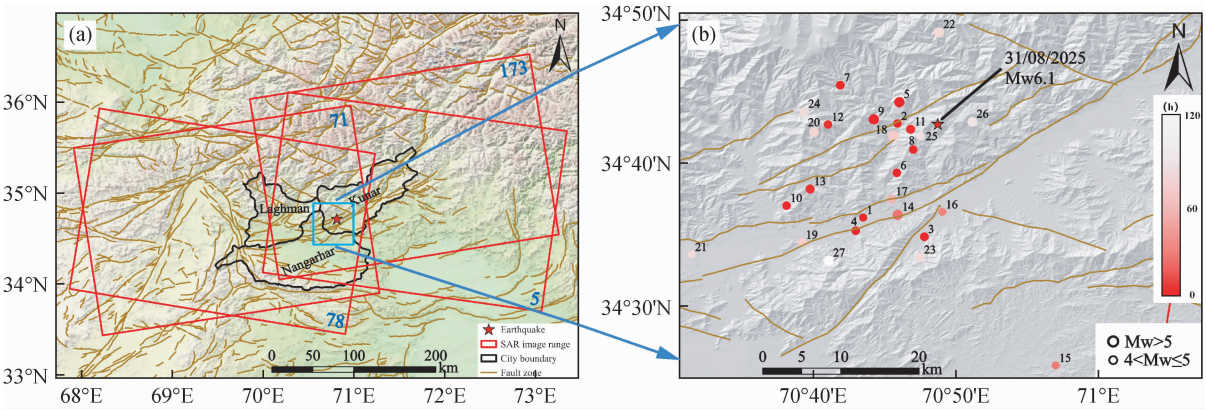


图 1 2025 年 8 月 31 日阿富汗 M_W6.1 级地震的区域构造

Fig. 1 Tectonic setting map of the M_W6.1 Afghanistan earthquake on August 31, 2025

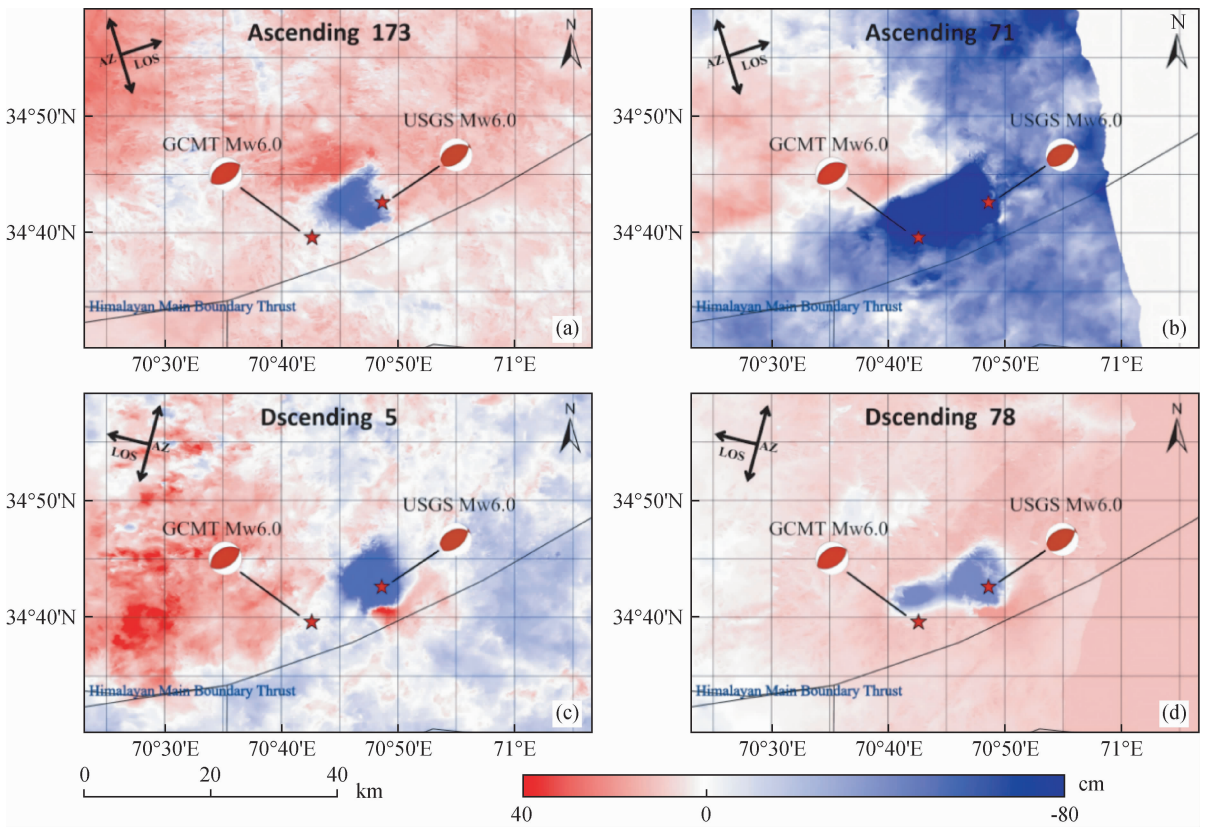


图 2 2025 年 8 月 31 日阿富汗 M_W6.1 级地震的同震形变场

Fig. 2 The coseismic deformation field of the M_W6.1 magnitude earthquake in Afghanistan on August 31, 2025

我们基于 InSAR 科学环境开源软件(InSAR Scientific Computing Environment, ISCE)对升、降轨 SAR 影像进行差分干涉测量处理(Rosen *et al.*, 2012). 首先,采用 ESA 提供的精密轨道数据和航天飞机雷达地形测绘任务(the Shuttle RadarTopography Mission, SRTM)发布的 30 m 分辨率的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)来去除地形效应;其次,设置距离向视数和方位向视数分别为 7 和 3,进行多视处理,通过自适应稳健卡尔曼滤波器(滤波强度为 0.4)对多视后的干涉图进行滤波处理以提高干涉图的信号质量(Liu *et al.*, 2026);然后,采用统计成本网络流算法(Snaphu)进行相位解缠(Chen and Zebker, 2000);最终,对解缠后的相位结果进行地理编码,将其转换为基于 WGS84 坐标系的地理空间数据,生成可直接用于分析的视线向(Line of Sight, LOS)同震形变场,结果如图 2 所示.

2025 年阿富汗 M_W6.1 级地震发生在喜马拉雅主边界冲逆断层(Himalayan Main Boundary Thrust, HMBT)北侧(图 1a)(Tapponnier *et al*., 1986; Fayyaz *et al*., 2024),考虑到主震和余震的震级较小(图 1b),从图 2 可以看出,InSAR 形变结果揭示了强烈的地表变形响应,与浅源地震的活动特征相吻合. 同震形变区域沿着断层分布,亦说明本次地震与该断层的活动存在显著且强烈的相关性. 余震形变区位于主震形变的左侧,推测是主震破裂后向左侧传播,激发了余震的响应⑥. 图 2a 为升轨 173 的 InSAR 同震形变场,可以看出,形变场区域在震中区域连续光滑,断层东南侧区域形变较为显著,沿 LOS 向以下降为主,而西北侧形变相对不显著;沿 LOS 向下降区域最大值为 54.5 cm,沿 LOS 向抬升区域最大值为 28.6 cm;图 2b 为升轨 071 的 InSAR 同震形变场,形变模式与图 2a 相近,沿 LOS 向下降区域最大值为 80.7 cm,沿 LOS 向抬升区域最大值为 24.7 cm;图 2c 和图 2d 分别为降轨 005 和 078 的 InSAR 同震形变场,与图 2b 相似,沿 LOS 向下降、抬升区域最大值分别为 54.2 cm、39.5 cm 和 42.6 cm、17.9 cm. 该结果同样印证了 2025 年阿富汗 M_W6.1 级地震以逆冲运动为主要特征,同时伴随少量倾滑分量.

1.3　滑动分布

同震形变场的形成本质是断层内部滑动的外部表现,精准反演断层滑动分布是揭示地震能量释放过程与灾害成因的核心环节(王帅等,2014). 本文以阿富汗地震主震为对象,先以均匀滑动为初始模型,基于 InSAR 同震形变场约束开展非线性反演,采用 Okada 均匀弹性半空间位错模型(Okada, 1985),得到断层非均匀滑动分布特征. 在反演过程中,采用规则格网算法对 InSAR 同震形变场进行降采样以提高反演效率(Chen and Zhou, 2024),对升轨 173 和降轨 005 进行降采样,采样点数量分别为 861 和 862 个. 假设断层面上发生均匀滑动,通过非线性反演求出待估计的几何参数,包括断层中心点位置(经度、纬度和深度)、走向、倾角、长度、宽度、滑动角以及滑动量,根据 USGS 发布的震源机制解(表 1),进行线性反演(黄禄渊等, 2019). 图 3 为同震滑动分布结果,在深度 4.9 km 处,最大滑动量约 2.5 m,能量高度集中在一个核心区域,说明本次地震的破裂模式为单一主破裂型,而非多段破裂.

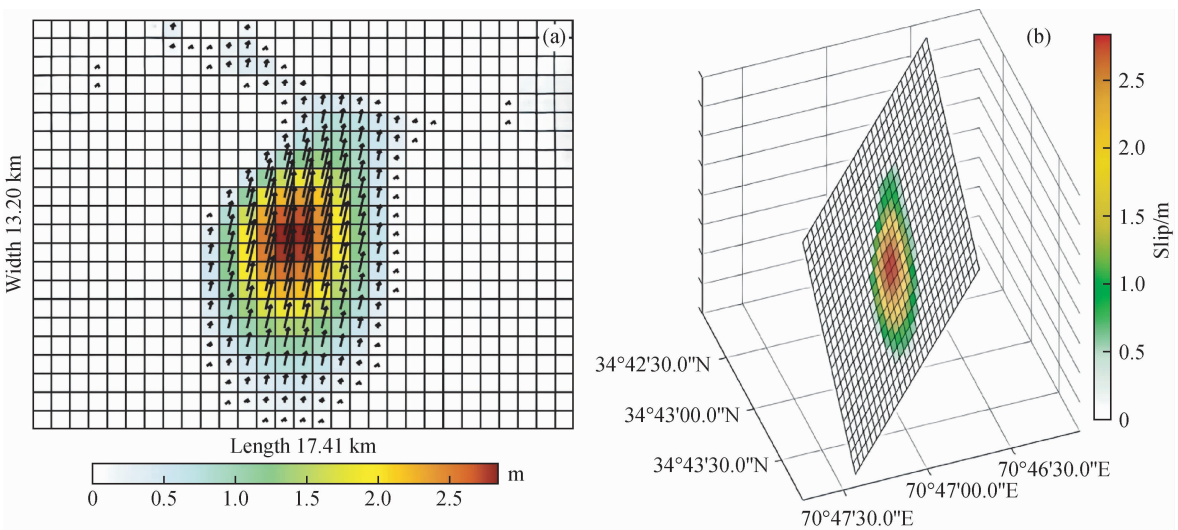


图 3　2025 年 8 月 31 日阿富汗 M_W6.1 级地震的同震滑动分布结果

Fig. 3　Result of coseismic slip distribution of the M_W6.1 magnitude earthquake in Afghanistan on August 31, 2025

2　灾害特征

据有效统计,2025 年 8 月 31 日阿富汗东部兴都库什山地区发生的 M_W6.1 级浅源地震,造成了大量人员伤亡与财产损失. 截至 2025 年 9 月 4 日,阿富汗红新月会[1] 确认此次地震造成共 2205 人死亡、3640 人受伤,伤亡规模在阿富汗近 20 年地震灾害记录中位居前列. 我们知道,人员伤亡是评价地震灾

⑥ 2025 年阿富汗阿萨达巴德 *M*6.0 地震序列 InSAR 形变场, https://mp.weixin.qq.com/s/DlNiIHBG2j20tA2R269KsA, 访问于 2025 年 9 月 8 日.

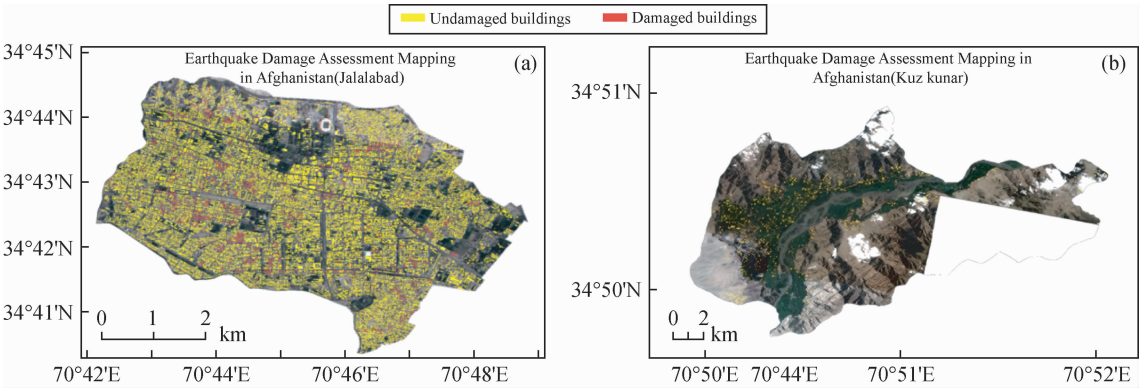


图 4 震后建筑物损毁制图

(a)贾拉拉巴德市震后建筑物损毁制图(损毁占比 8.61%);(b)库兹库纳尔地区震后建筑物损毁制图(损毁占比 22.59%).

Fig. 4 Post-earthquake building damage mapping

(a) Post-earthquake building damage mapping of Jalalabad (damage ratio: 8.61%); (b) Post-earthquake building damage mapping of the Kuz Kunar region (damage ratio: 22.59%).

害程度的一个关键指标,与地质灾害发育、地形地貌特殊、房屋抗震性能、地震强度等有着复杂关联(许娟等, 2023;李伟等, 2025).从空间分布来看,此次震害导致的伤亡人员高度集中于库纳尔省南部及楠格哈尔省北部的偏远山区,这些区域不仅位于地形复杂区域,而且是地震触发山体滑坡和洪水的重灾区.本文考虑区域地形复杂、建筑质量差和人员密集等因素,对人员伤亡空间分布规律的特征进行分析讨论.

2.1 建筑物损毁分布

2025 年 8 月 31 日阿富汗 M_W6.1 级地震震区民居多为泥土、石头、黏土搭建的非永久性建筑,抗震能力极差.据阿富汗临时政府统计,共 6782 栋房屋被毁,楠格哈尔省约 98% 的建筑受损或毁坏.断层滑动引发的地表强形变是导致建筑物损毁的主要诱因,其空间分布与滑动强度、建筑抗震性能密切相关.本研究结合反演的断层滑动分布数据、高分辨率遥感影像及区域建筑类型分布图,通过空间叠加分析与损毁率统计,揭示建筑物损毁的空间集聚特征及与断层活动、地形条件的关联规律,可为人员伤亡复现提供关键的灾害载体基础数据.

从联合国灾害管理与应急反应天基信息平台(UN-SPIDER)官方网站上发布的震后建筑物损毁制图(图 4)中可以看出⑦,楠格哈尔省贾拉拉巴德市的建筑物损毁占比为 8.61%,库纳尔地区的建筑物损毁占比为 22.59%.库纳尔省大多为泥砖建筑,抗震能力极差,在逆冲型地震(表 1)的垂直震动下几乎无抵抗能力;而楠格哈尔省作为震中所在省,省会周边多为民用混凝土建筑,抗震性能更优.

此次地震导致房屋大规模损毁的本质,是地震与区域长期贫困、社会动荡和地震风险防控意识的缺失等共同导致的(Omari and Yaman, 2023),其问题可分为技术规范缺失和建材质量差两方面(Al-Ajmi *et al.*, 2016).同时,考虑到震灾区多为山区,震中 5 km 内平均海拔约 1100 m(图 1b),还出现了短时强降雨引发的山体滑坡与落石,阻断陆路交通;部分区域网络中断,导致灾情传递与救援受阻,造成了多灾害叠加效应,致使严重的伤亡无法得到及时救治.

2.2 人员伤亡复现

建筑物损毁是导致人员伤亡最主要的因素之一(杨哲飚, 2020;李伟等, 2025).人员伤亡是地震灾害最直接的损失表现,其规模与分布受建筑物损毁程度、人员密度及防灾减灾能力等因素共同制约(陈尧,2015).因震区群山环绕着地势相对低平的盆地或河谷这一地形地貌特征(WHS),与我国西北地区相似.基于前文得到的建筑物损毁空间分布结果,结合研究区人员普查数据与居民点分布信息,通过建立“形变强度-损毁率-伤亡概率”的关联模型(朱达邈和王东明,2021)(式(1)),复现地震造成的人员伤亡数量与空间分布特征,为后续灾情的综合

⑦ 马爱龙副教授成果服务于联合国阿富汗地震评估,https://www.un-spider.org/news-and-events/news/un-spider%E2%80%99s-response-november-2025-afghanistan-earthquake,访问于 2025 年 11 月 17 日.

评估提供核心依据. 式(1)为:

$$D = 0.0548 \times Death_1 + 0.9452 \times Death_2, \quad (1)$$

其中,D 表示人员死亡人数,$Death_1$ 表示的是尹之潜模型(尹之潜,1995),以房屋损毁比作为核心参数,建立与人员死亡之间的关系:

$$Death_1 = 10^{12.479 C_p^{0.1}} - 13.3N, \quad (2)$$

其中,C_p 为房屋毁坏率,N 为受灾人数.

$Death_2$ 表示的是刘金龙模型(刘金龙和林均岐,2012),以震中烈度作为核心参数,震级、人员密度作为修正参数,建立与人员死亡之间的关系:

$$Death_2 = e^{12.2\alpha_m\alpha_{den}} e^{-(\ln(lnt)-2.445)^2/0.3^2}, \quad (3)$$

其中,lnt 为震中烈度,α_m 为震级修正系数,α_{den} 为人员密度修正系数.

人员伤亡关联模型模型计算结果显示,楠格哈尔省贾拉拉巴德市人员死亡人数约为 685 人,库纳尔地区人员死亡人数约为 2388 人,人员死亡总人数约为 3073 人,根据世界卫生组织报道的死亡人数约 3000 人,结果得到了验证,说明该模型精度高,验证了从房屋损毁率和烈度角度评估该类区域地震风险的可行性.

2.3　灾情量化评估

灾情评估是对地震灾害综合影响的量化总结,是制定应急救援方案与灾后重建规划的重要支撑(隗永刚和蒋长胜, 2021). 由于 2025 年 8 月 31 日阿富汗 M_W6.1 级地震震区所在的山区地势陡峭,强烈地震引发了大规模山体滑坡与洪水灾害,滑坡体甚至直接掩埋了部分村庄,同时阻断了山区主要进出道路,通讯受阻,致使救援队伍无法与受灾地区进行联系;其次,传统人员分布数据集存在更新周期长、无法反应实时人员流动等局限性,难以支撑震后黄金时间的救援行动. Li 等(2026)在西藏定日 M6.8 地震研究中,采用具有高时空分辨率、覆盖广等特点的手机定位数据,可在震后 30 min 内实现公里级空间分辨率的动态人员分布感知,信号下降区与高烈度区(≥Ⅷ度)空间吻合度高,为重灾区快速识别提供了重要的科学参考. 因此,对于同类型区域的灾害风险风控,我们后期可以结合区域经济发展水平和基础设施分布等数据,从损毁规模、伤亡程度和经济损失等多维度开展灾情量化评估,明确灾害的核心影响区域与损失等级,全面呈现地震的综合灾害效应.

3　结　论

本文以 2025 年 8 月 31 日阿富汗东部兴都库什山地区 M_W6.1 级地震为研究对象,围绕"震源参数-同震形变-滑动分布-灾害特征-灾情评估"的完整技术链条,整合 Sentinel-1 升降轨 SAR 影像数据,通过影像大地测量技术获取 LOS 向与方位向位移信息,结合 Okada 均匀弹性半空间位错模型,完成发震断层几何参数反演与最优精细滑动分布建模,系统揭示了地震的破裂机制、地表形变特征及灾害影响规律,主要结论如下:

(1)震源机制与破裂特征:此次 M_W6.1 地震为逆冲型,与 HMBT 的区域构造背景(WHS)高度契合,是印度板块向欧亚板块俯冲挤压应力场作用的直接体现. 反演结果显示,破裂呈局部集中式逆冲滑动特征,最大滑动量约 2.5 m,滑动强度从断层中部向边缘快速衰减,符合中小型地震的典型破裂模式,为 WHS 区域构造活动规律研究提供了关键观测依据.

(2)同震形变监测结果:通过处理发现,同震形变区域沿着断层分布,亦说明本次地震与该断层的活动存在显著且强烈的相关性. 且受震源较深影响,地表形变整体幅度较小且信噪比较低,需进一步开展大气校正优化. 其中降轨数据形变信号更显著(图 2),形变集中分布于宽约 60 km 的狭长区域;震中区域观测到的离散变形信号,推测与当地脆弱的石灰岩、砂岩地层及陡峭地形引发的地震次生滑坡、崩塌相关.

(3)人员伤亡与空间分布规律:本次地震造成了 3073 人死亡、3640 人受伤,为近年阿富汗伤亡最严重的地震事件. 伤亡人员在空间上呈现高度集中性,主要分布在库纳尔省南部及楠格哈尔省北部的河谷与城镇区域. 遥感评估显示,库纳尔省的建筑损毁率(22.59%)远高于楠格哈尔省贾拉拉巴德市(8.61%),直接印证了建筑质量对伤亡规模的极端重要性. 利用人员伤亡关联模型模型计算结果显示,楠格哈尔省贾拉拉巴德市人员死亡人数约为 685 人,库纳尔地区人员死亡人数约为 2388 人,与官方统计基本吻合,验证了从房屋损毁率和烈度角度评估该类区域地震风险的可行性.

(4)共性启示与防灾减灾反思:结合区域同类地震案例分析,本次灾害进一步凸显阿富汗的双重脆弱性:一方面基础设施薄弱,非抗震房屋普遍存在且医疗资源匮乏;另一方面人道主义危机深重,资金短缺与民众贫困导致灾难应对能力严重不足. 从地质风险角度看,阿富汗地处板块交界高构造活动区,兴都库什山地区及阿尔布兹—穆尔穆尔断裂带等均

为活动断裂,未来需持续强化地震监测网络建设与风险预警能力.

致 谢 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

Akhundzadah N A. 2025. Earthquake risk severity and urgent need for disaster management in Afghanistan. GeoHazards, 6(1): 9, doi: 10.3390/geohazards6010009.

Al-Ajmi F, Abdalla H, Abdelghaffar M, *et al*. 2016. Strength behavior of mud brick in building construction. Open Journal of Civil Engineering, 6(3): 482-494, doi: 10.4236/ojce.2016.63041.

Ambraseys N, Bilham R. 2003. Earthquakes in Afghanistan. Seismological Research Letters, 74(2): 107-123, doi: 10.1785/gssrl.74.2.107.

Chen C W, Zebker H A. 2000. Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: Intractability and two new algorithms. Journal of the Optical Society of America A, 17(3): 401-414, doi: 10.1364/josaa.17.000401.

Chen J L, Zhou Y. 2024. Coseismic slip distribution of the 2023 earthquake doublet in Turkey and Syria from joint inversion of Sentinel-1 and Sentinel-2 data: an iterative modelling method for mapping large earthquake deformation. Geophysical Journal International, 237(1): 636-648, doi: 10.1093/gji/ggae066.

Chen Y. 2015. Study on rapid assessment method for destructive earthquake casualty [Master's thesis] (in Chinese). Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration.

Danciu L, Şeşetyan K, Demircioglu M, *et al*. 2018. The 2014 earthquake model of the Middle East: seismogenic sources. Bulletin of Earthquake Engineering, 16(8): 3465-3496, doi: 10.1007/s10518-017-0096-8.

Fang L H, Wu J P, Wang W L, *et al*. 2013. Relocation of the mainshock and aftershock sequences of M_S7.0 Sichuan Lushan earthquake. Chinese Science Bulletin, 58(28-29): 3451-3459, doi: 10.1007/s11434-013-6000-2.

Fayyaz N, Miraj M A F, Ahsan N. 2024. Geomechanics of tectonic stress path constraints and outcrop deformation analysis of naturally fractured rocks: A case study along main boundary thrust (MBT) and Nathia Gali Thrust (NGT), NW-Himalayas, Pakistan. // International Geomechanics Conference. Kuala Lumpur, Malaysia, ARMA-IGS-2024-0905, doi: 10.56952/igs-2024-0905.

Huang L Y, Cheng H H, Zhang H, *et al*. 2019. Discussion on fault planes of the Alaska M_W7.9 earthquake, Jan 23, 2018. Progress in Geophysics (in Chinese), 34(3): 886-895, doi: 10.6038/pg2019CC0196.

Kufner S K, Bie L, Gao Y, *et al*. 2023. The devastating 2022 M6.2 Afghanistan earthquake: Challenges, processes, and implications. Geophysical Research Letters, 50(11): e2022GL102176, doi: 10.1029/2022GL102176.

Li H Y, Xia C X, Zhang Y Z, *et al*. 2026. Dynamic population distribution and perceived impact area of the Xizang Dingri M_S6.8 earthquake based on mobile phone location data. Sensors, 26(2): 457, doi: 10.3390/s26020457.

Li Q, Li C T, Liu G, *et al*. 2025. Study on the source rupture characteristics of the Afghanistan earthquake swarm in October 2023. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 68(10): 3823-3833, doi: 10.6038/cjg2024S0041.

Li W, Du J C, Zhang C, *et al*. 2025. Spatiotemporal evolution of disaster and population casualties in Jishishan earthquake by fusing multi-source data. Geomatics and Information Science of Wuhan University (in Chinese), 50(2): 271-283, doi: 10.13203/j.whugis20240094.

Liu J L, Lin J Q. 2012. Study on assessment method for earthquake casualty based on epicentral intensity. Journal of Natural Disasters (in Chinese), 21(5): 113-119, doi: 10.13577/j.jnd.2012.0516.

Liu Y, Xu C J, Wen Y M. 2026. Adaptive robust Kalman filter-based InSAR time series analysis for deformation monitoring. Advances in Space Research, 77(4): 4168-4183, doi: 10.1016/j.asr.2025.11.054.

Luo H, Xu D Y, Wang T. 2025. Geodetic source modeling of the destructive 2022 M_W6.2 Afghanistan earthquake: A shallow, moderate-dipping, pure strike-slip event with a relatively high stress drop. Seismological Research Letters, 96(5): 2812-2821, doi: 10.1785/0220240278.

Mallapaty S. 2022. Deadly Afghanistan quake challenges scientists trying to study it. Nature, 607(7919): 433, doi: 10.1038/d41586-022-01858-x.

Okada Y. 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bulletin of the Seismological Society of America, 75(4): 1135-1154.

Omari E S, Yaman Z. 2023. Difficulties in applying lean construction principles within Afghanistan's construction sector. Civil Engineering Beyond Limits, 3: 1870, doi: 10.36937/cebel.2023.1870.

Qi Y H, Feng W P, Zhang Y, *et al*. 2023. Fault geometry, slip distribution, and potential triggering of the 2022 M_W6.2 deadly Afghanistan earthquake revealed from geodetic and weather data. Seismological Research Letters, 94(5): 2154-2166, doi: 10.1785/0220220341.

Rehman K, Ali W, Ali A, *et al*. 2017. Shallow and intermediate depth earthquakes in the Hindu Kush region across the Afghan-Pakistan border. Journal of Asian Earth Sciences, 148: 241-253, doi: 10.1016/j.jseaes.2017.09.005.

Rosen P A, Gurrola E, Sacco G F, *et al*. 2012. The InSAR scientific computing environment. //EUSAR 2012; 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Nuremberg, Germany: VDE, 730-733.

Royden L H, Burchfiel B C, van der Hilst R D. 2008. The geological evolution of the Qinghai-Xizang Plateau. Science, 321(5892): 1054-1058, doi: 10.1126/science.1155371.

Tapponnier P, Peltzer G, Armijo R. 1986. On the mechanics of the collision between India and Asia. Geological Society, London, Special Publications, 19(1): 113-157.

Verma R K, Sekhar C C. 1985. Seismotectonics and focal mechanisms of earthquakes from Pamir-Hindukush regions. Tectonophysics, 112(1-4): 297-324, doi: 10.1016/0040-1951(85)90184-2.

Wan Y G. 2019. Determination of center of several focal mechanisms of the same earthquake. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 62(12): 4718-4728, doi: 10.6038/cjg2019M0553.

Wang S, Zhang Y Z, Jiang Y T, *et al*. 2014. Slip velocity of fault induced by PSO algorithm with dynamical inertial weight and dimension mutation. Progress in Geophysics (in Chinese), 29(4): 1766-1771, doi: 10.6038/pg20140437.

Waseem M, Lateef A, Ahmad I, *et al*. 2019. Seismic hazard assessment of Afghanistan. Journal of Seismology, 23(2): 217-242, doi: 10.1007/s10950-018-9802-5.

Wei Y G, Jiang C S. 2021. Research progress of artificial intelligence technology in the application of earthquake disaster reduction. Progress in Geophysics (in Chinese), 36(2): 516-524, doi: 10.6038/pg2021EE0164.

Xu J, Zhao X H, Zhou Q, *et al*. 2023. Features of the casualty by the 2022 Luding, Sichuan M_S6.8 earthquake. Journal of Seismological Research (in Chinese), 46(4): 603-610, doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0056.

Xu Y H, Diao F Q, Xiong X. 2026. Co-and early post-seismic InSAR observations reveal complex rupture of the 2023 Herat earthquake sequence, NW Afghanistan. Geophysical Journal International, 244(1): ggaf442, doi: 10.1093/gji/ggaf442.

Yang Z B. 2020. Multi-scale scenario simulation and 3D visualization of urban earthquake disaster [Ph. D. thesis] (in Chinese). Beijing: Tsinghua University, doi: 10.27266/d.cnki.gqhau.2020.000010.

Yin Z Q. 1995. Methods for Earthquake Disaster and Loss Prediction (in Chinese). Beijing: Seismological Press.

Zhao L, Nissen E, Xu W B, *et al*. 2025. Variable fault geometry controls the cascading 2023 Herat, Afghanistan multiplet sequence. Communications Earth & Environment, 6(1): 135, doi:. 10.1038/s43247-025-02113-7.

Zhong Y C, Gao H, Lin H, *et al*. 2026. Mechanism and Co-seismic effects of the 2023 Herat earthquake sequence in Afghanistan based on InSAR. Tectonophysics, 920: 231038, doi: 10.1016/j.tecto.2025.231038.

Zhu D M, Wang D M. 2021. The study of earthquake deaths forecasting model based on the earthquake resistance index of the whole country. Journal of Natural Disasters (in Chinese), 30(6): 51-60, doi: 10.13577/j.jnd.2021.0606.

附中文参考文献

陈尧. 2015. 破坏性地震人员伤亡快速评估方法研究[硕士论文]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.

黄禄渊, 程惠红, 张怀, 等. 2019. 2018 年 1 月 23 日阿拉斯加 M_W7.9 地震发震节面讨论. 地球物理学进展, 34(3): 886-895, doi: 10.6038/pg2019CC0196.

李琦, 李承涛, 刘刚, 等. 2025. 2023 年 10 月阿富汗震群震源破裂特征研究. 地球物理学报, 68(10): 3823-3833, doi: 10.6038/cjg2024S0041.

李伟, 杜锦辰, 张超, 等. 2025. 融合多源数据研究积石山地震灾害及人口伤亡时空演化. 武汉大学学报(信息科学版), 50(2): 271-283, doi: 10.13203/j.whugis20240094.

刘金龙, 林均岐. 2012. 基于震中烈度的地震人员伤亡评估方法研究. 自然灾害学报, 21(5): 113-119, doi: 10.13577/j.jnd.2012.0516.

万永革. 2019. 同一地震多个震源机制中心解的确定. 地球物理学报, 62(12): 4718-4728, doi: 10.6038/cjg2019M0553.

王帅, 张永志, 姜永涛, 等. 2014. 维多样性的动态权重粒子群算法反演断层滑动速率. 地球物理学进展, 29(4): 1766-1771, doi: 10.6038/pg20140437.

隗永刚, 蒋长胜. 2021. 人工智能技术在地震减灾应用中的研究进展. 地球物理学进展, 36(2): 516-524, doi: 10.6038/pg2021EE0164.

许娟, 赵雪慧, 周琪, 等. 2023. 2022 年四川泸定 M_S6.8 地震人员震亡特征分析. 地震研究, 46(4): 603-610, doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0056.

杨哲飚. 2020. 城市多尺度地震灾害情境模拟及可视化[博士论文]. 北京: 清华大学, doi: 10.27266/d.cnki.gqhau.2020.000010.

尹之潜. 1995. 地震灾害及损失预测方法. 北京: 地震出版社.

朱达邈, 王东明. 2021. 基于全国建筑抗震能力指数修正的地震人员死亡预测模型研究. 自然灾害学报, 30(6): 51-60, doi: 10.13577/j.jnd.2021.0606.