引文格式:陈鹏,邱梁才,姚宜斌,等.基于InSAR和光学影像解译的2023年甘肃积石山Ms 6.2震后地表形变和灾害分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(2):257-270.DOI:10.13203/j.whugis20240074

Citation:CHEN Peng,QIU Liangcai,YAO Yibin,et al.Surface Deformation and Hazard Analysis After the 2023 Ms 6.2 Earthquake in Jishishan,Gansu Province Based on InSAR and Optical Imagery Interpretation[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(2):257-270.DOI:10.13203/j.whugis20240074

基于InSAR和光学影像解译的2023年甘肃积石山Ms 6.2震后地表形变和灾害分析

陈 鹏[1,2] 邱梁才[1] 姚宜斌[3,4] 朱成昌[1] 鲁杰瑞[1]
关星瑶[1] 洪 扬[1] 孙世峥[1]

1 西安科技大学测绘科学与技术学院,陕西 西安,710054
2 中国科学院精密测量科学技术创新研究院大地测量与地球动力学国家重点实验室,湖北 武汉,430077
3 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079
4 武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,湖北 武汉,430079

摘 要:2023-12-18甘肃省临夏回族自治州积石山发生了Ms 6.2地震,导致建筑物被损毁并诱发了大量的同震滑坡,造成了严重的人员伤亡和社会经济损失。首先通过合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar,InSAR)技术获取了地表同震形变信息,并利用高分辨率光学影像对震中区域进行目视解译。然后,基于InSAR同震形变信息和高分辨率光学目视解译信息进行地灾提取;最后,对提取的地灾信息进行统计,并简要分析其形成的潜在因素。结果表明,地震导致震中东北侧两个断层间形成一处近似椭圆的隆起,其长、短轴分别约22.5 km和15 km,最大隆起接近8 cm,符合逆冲型地震运动特征。地震造成震中附近1 506处房屋损毁,震中距主要分布在5~25 km范围内,方位角主要在0°~30°和330°~360°之间,以砖木和土木结构的农村自建房为主;震中附近共解译出同震滑坡4 996处,震中距主要分布在5~30 km范围内,方位角在0°~60°和330°~360°之间,以小型黄土滑坡为主;其中寨子村大型滑坡体表面存在裂缝208条,滑坡和崩塌共计73处,存在重大安全隐患;中川乡滑坡-泥流受灾面积达456 982.10 m^2,导致158间房屋损毁,道路损毁4 569 m。此次地震在震中5 km内未造成严重的地表灾害,说明受灾最严重的地区并不一定会集中在微观震中,这与地震波传递方向和区域地质状况有密切的关系。

关键词:积石山地震;合成孔径雷达干涉测量;地表同震形变;建筑物损毁;同震滑坡

中图分类号:P227 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-03-06

DOI:10.13203/j.whugis20240074 **文章编号**:1671-8860(2025)02-0257-14

Surface Deformation and Hazard Analysis After the 2023 Ms 6.2 Earthquake in Jishishan, Gansu Province Based on InSAR and Optical Imagery Interpretation

CHEN Peng[1,2] *QIU Liangcai*[1] *YAO Yibin*[3,4] *ZHU Chengchang*[1] *LU Jierui*[1]
GUAN Xingyao[1] *HONG Yang*[1] *SUN Shizheng*[1]

1 College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China
2 State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China
3 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China
4 Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: **Objective**: On 18th December 2023, an Ms 6.2 earthquake struck Jishishan County, Linxia Hui Autonomous Prefecture, Gansu Province, China. It triggered significant building damage and induced nu-

基金项目:国家自然科学基金(42374037);大地测量与地球动力学国家重点实验室开放基金(SKLGED2022-3-5)。

共同第一作者:陈鹏,博士,副教授,主要从事GNSS近地空间环境、InSAR数据处理与应用研究。chenpeng0123@gmail.com
邱梁才,硕士生,主要从事InSAR数据处理与应用研究。lcqiu98@163.com

merous coseismic landslides, resulting in severe casualties and substantial socio-economic losses. The acquisition of post-earthquake surface deformation and disaster distribution information is of great guiding significance for disaster assessment and post-disaster reconstruction. **Methods:** First, surface coseismic deformation information was obtained using interferometric synthetic aperture radar (InSAR). And, high-resolution optical imagery was employed for visual interpretation near the epicenter. Second, seismic disaster extraction was performed based on coseismic deformation information from InSAR and visual interpretation information from high-resolution optical images. Finally, the extracted seismic disaster information was statistically analyzed, and potential factors contributing to its formation were briefly analyzed. **Results and Conclusions:** The earthquake resulted in an approximately elliptical uplift between two faults to the northeast of the epicenter, with long and short axes measuring approximately 22.5 km and 15 km, respectively. The maximum uplift approached 8 cm, consistent with characteristics of thrust-type seismic motion. The earthquake destroyed 1 506 buildings near the epicenter, mainly affecting self-built rural houses made of brick, wood, and earth structures. The epicentral distance was primarily distributed within a range of 5 to 25 km, and the azimuths were predominantly between 0° to 30° and 330° to 360°. A total of 4 996 coseismic landslides were interpreted near the epicenter, primarily distributed within a range of 5 to 30 km distance to the epicenter, with azimuths between 0° to 60° and 330° to 360°, predominantly comprising small-scale loess landslides. Among these, the surface of the large landslide in Zhaizi Village exhibited 208 cracks and 73 landslides and collapses, posing significant safety hazards. The area affected by the flowslide in Zhongchuan Township was about 456 982.10 m^2, destroying 158 buildings and 4 569 m of roads. The earthquake did not cause severe surface disasters within 5 km of the epicenter, indicating that the most severely affected areas may not necessarily concentrate around the micro-epicenter, which is closely related to the direction of seismic wave propagation and regional geological conditions.

Key words: Jishishan earthquake; interferometric synthetic aperture radar(InSAR); surface coseismic deformation; building damage; coseismic landslide

据中国地震台网测定(https://news.ceic.ac.cn/),北京时间2023-12-18T23:59:30在甘肃省临夏回族自治州积石山县发生Ms 6.2级地震,震中位置为35.70°N,102.79°E,震源深度10 km。此次地震造成了重大人员伤亡,各部门全力开展搜救,积极配合抢险救灾,并加强震情监测,防范各类次生灾害,切实保障群众生命财产安全(http://www.news.cn/politics/2023-12/19/c_1130034088.htm)。根据中国地震局初步震源机制解结果显示,此次地震为逆冲型破裂[1]。相对于走滑型和正断型地震,逆冲型地震具有更强的地表作用[2],会产生更为强烈的地面震动,导致房屋倒塌和严重的地质灾害以及人员伤亡,并对地表基础设施造成严重破坏。从区域构造背景来看,本次地震位于拉脊山断裂带,该断裂带由拉脊山北缘断裂带和拉脊山南缘断裂带两条向NE凸出的弧形断裂组成,右侧是NNW向的右旋走滑日月山断裂带,左侧是左旋走滑西秦岭北缘断裂带,该断裂带存在发生中强地震的构造条件[3],发震区域地震构造背景见图1[4-5]。根据国家地震科学数据中心公布(https://data.earthquake.cn/),截至2023-12-21 14时共记录到余震512次,其中3.0级及以上余震11次。截至2024-01-14,3.0级以上地

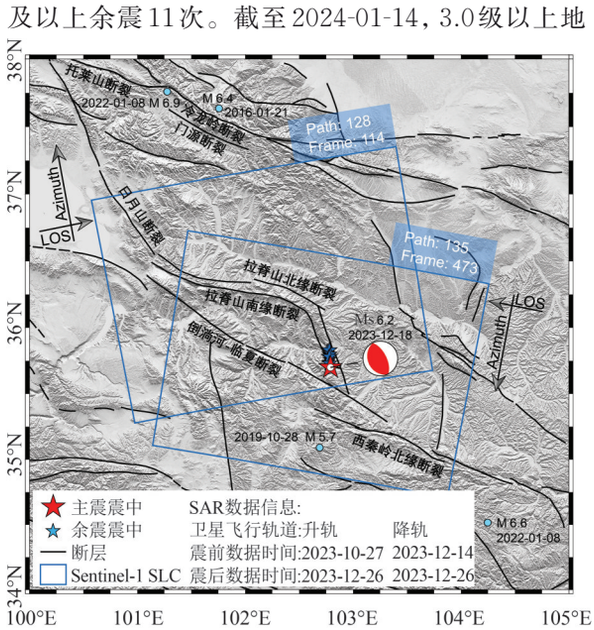


图1 2023-12-18甘肃积石山Ms 6.2地震区域地震构造背景

Fig. 1 Regional Seismotectonic Background of the Ms 6.2 Jishishan Earthquake in Gansu on December 18, 2023

震达16次,其中4.0级以上余震为3次,余震最大震级为4.1级,从余震情况来看,该地震应为主震-余震型,统计信息见表1。应急管理部于2023-12-22发布了甘肃积石山Ms 6.2地震烈度图(https://www.mem.gov.cn/),最大烈度为Ⅷ度,等震线长轴呈NNW走向,长、短轴分别为124 km和85 km,烈度图覆盖了甘肃省5 232 km^{2}以及青海省3 132 km^2,详细信息见表2。

表1　截至2024-01-14甘肃积石山3.0级以上地震统计列表(来源于中国地震台网)

Table 1　Statistical Information on Earthquakes of Ms 3.0 and Above in Jishishan, Gansu Province, as of January 14, 2024

发震时刻	震级	纬度/(°)	经度/(°)	震源深度/km
2024-01-13T13:25:05	3.1	35.75	102.78	8
2024-01-10T22:46:58	3.1	35.77	102.77	10
2023-12-27T00:08:16	3.3	35.73	102.82	10
2023-12-22T14:43:13	3.0	35.73	102.81	8
2023-12-21T04:02:14	4.1	35.77	102.80	8
2023-12-20T00:32:52	3.4	35.76	102.78	9
2023-12-19T02:10:06	3.2	35.83	102.76	10
2023-12-19T01:20:12	3.2	35.80	102.77	10
2023-12-19T01:10:31	3.2	35.80	102.78	10
2023-12-19T00:59:39	4.1	35.83	102.78	10
2023-12-19T00:59:11	3.1	35.74	102.77	10
2023-12-19T00:56:51	3.4	35.80	102.79	10
2023-12-19T00:43:12	3.4	35.78	102.77	10
2023-12-19T00:36:18	4.0	35.78	102.78	10
2023-12-19T00:24:49	3.9	35.73	102.78	10
2023-12-18T23:59:30	**6.2**	**35.70**	**102.79**	**10**

地震发生后,各机构快速展开了相关研究工作。王勤彩等[1]使用区域台网资料,通过主成分分析方法反演了此次地震的震源机制解,结果显示该地震为逆冲型地震,与全球质心矩张量、德国地学中心和美国地质调查局的解算结果基本一致,节面Ⅱ的走向与积石山东缘断裂大致相同。王运生等[6]通过对文献资料、遥感数据和野外调查对震后灾害特征进行分析,结果表明地震为逆冲型事件,并推测发震断层为拉脊山北缘断裂带东段。王立朝等[7]在震后对甘肃青海两省快速展开地质灾害隐患排查,对积石山地震诱发的地质灾害特征、控制因素、发展趋势进行了分析,并提出防灾减灾措施建议。黄观文等[8]收集了距震中不同距离下的4处滑坡隐患点的全球卫星导航系统(global navigation satellite system,GNSS)和加速度计实时监测数据,处理结果表明64 km处的黑方台滑坡体存在永久形变,距离240 km的舟曲滑坡体监测到明显的加速度冲击。陈博等[9]通过对震前、震后高分辨率光学卫星影像识别了3 767处同震滑坡,并实地确认了59处,同时根据合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar,InSAR)相干性的变化获取了建筑损害代理图,表明大河家镇和官亭镇建筑损毁最为严重。杨九元等[10]利用哨兵1A卫星数据提取了同震形变,并调查了该地震的发震断层结构,结果显示西南倾和东北倾发震断层模型均能很好地拟合同震InSAR观测数据,经综合分析认为此次地震破裂发生于拉脊山南缘断裂带的一个隐伏分支断层。刘振江等[11]使用哨兵1A数据获取了同震形变场,以此为约束反演了地震断层几何和精细滑动分布,并结合库仑失稳准则分析了地震危险性。李志才等[12]通过对高频GNSS观测数据的动态解算发现此次地震造成的永久变形在震中30 km以内,并提出地震破裂主要是向西北传递。许强等[13]对地震触发的青海中川乡液化型滑坡-泥流进行了成因机理分析,指出该现象并不是传统意义上的“砂涌”,而是地震导致黄土层液化形成了滑坡并转化为泥流。上述学者已经从地震性质、发震机理以及地震影响范围等多个角度进行了研究,但对于地震灾害的提取和分析还可以进一步完善,例如灾害提取使用的基础数据分辨率相对较低,这可能导致解译结果不详细;此外,目前学者们还尚未对损毁房屋情况进行详细的提取。因此,本文通过InSAR技术和解译更高分辨率的光学影像,以获取地表同震形变信息和震中附近详细的同震滑坡以及建筑损毁信息,并根据提取的信息进一步对2023年甘肃积石山Ms 6.2震后的地表形变和灾害进行分析,这对震后的灾情评估以及灾区重建工作有着重要参考价值。

为获取本次地震的同震形变场,本文首先对震前、震后的Sentinel-1A卫星升降轨数据进行了差分干涉处理,获取了积石山Ms 6.2地震同震形变;然后结合遥感影像对震中附近区域进行了目视解译,汇总统计了此次地震对附近地表建筑和设施的损坏,为灾后影响评估和重建工作提供数据支撑,所采用的数据信息见表3。

表2 甘肃积石山Ms 6.2地震烈度信息统计(来源于应急管理部)

Table 2 Statistics of Ms 6.2 Earthquake Intensity in Jishishan, Gansu Province

烈度/度	范围面积/km²	涉及地区	烈度等级指标
Ⅵ	6 519	甘肃省临夏回族自治州积石山保安族东乡族撒拉族自治县4个乡镇、永靖县13个乡镇、临夏县25个乡镇、临夏市11个乡镇(街道)、东乡族自治县8个乡镇、和政县4个乡镇,甘南藏族自治州合作市1个乡、夏河县7个乡镇,兰州市红古区2个镇,太子山天然林保护区;青海省海东市民和回族土族自治县13个乡镇、循化撒拉族自治县7个乡镇、化隆回族自治县4个乡镇,黄南藏族自治州同仁市1个乡;共计100个乡镇(街道)和1个自然保护区。	少数土木、砖木房屋中等破坏,少数不设防砖混房屋轻微破坏,多数框架房屋基本完好。
Ⅶ	1 514	甘肃省临夏回族自治州积石山保安族东乡族撒拉族自治县17个乡镇和盖新坪林场、永靖县3个乡镇、临夏县3个乡,青海省海东市民和回族土族自治县8个乡镇、循化撒拉族自治县3个乡镇、化隆回族自治县1个乡,共计35个乡镇和1个林场。	多数土木、砖木房屋中等破坏,多数砖混房屋轻微破坏,个别框架房屋轻微破坏,部分斜坡失稳,出现崩塌、滑坡等次生灾害。
Ⅷ	331	甘肃省临夏回族自治州积石山保安族东乡族撒拉族自治县吹麻滩镇、大河家镇、石塬镇、刘集乡、柳沟乡、关家川乡、胡林家乡、寨子沟乡、盖新坪林场,青海省海东市民和回族土族自治县官亭镇、甘沟乡、中川乡、杏儿藏族乡,共计12个乡镇和1个林场。	多数土木、砖木房屋严重破坏,少数不设防砖混房屋严重破坏,少量框架房屋中等破坏。

表3 本文使用的数据情况

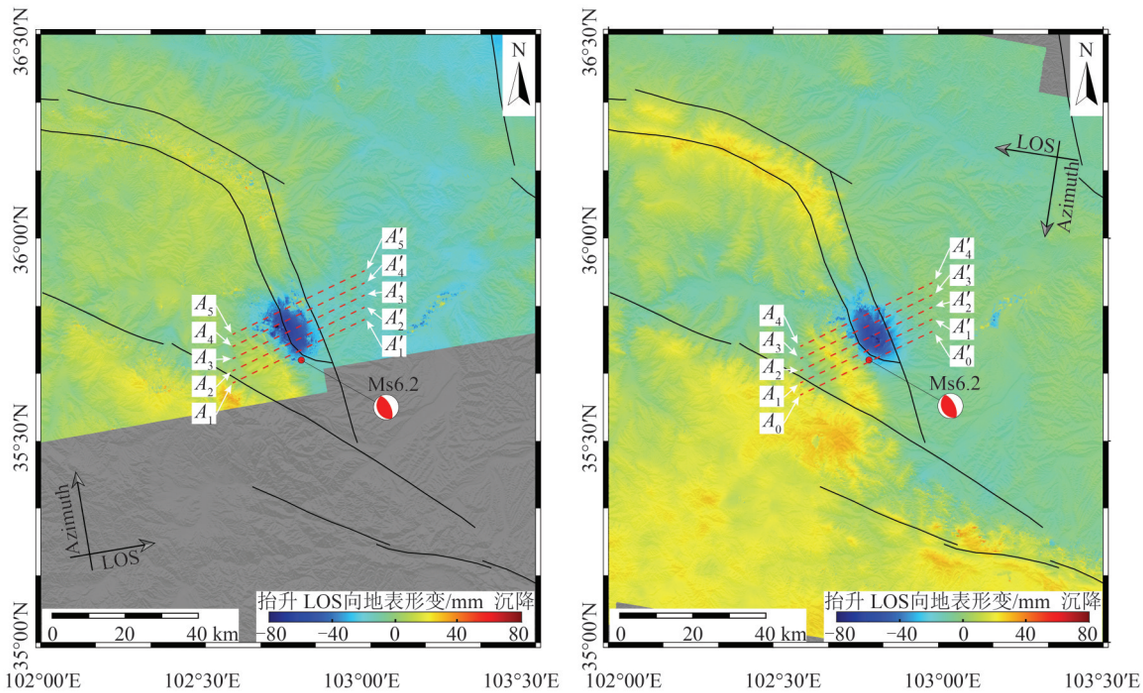
Table 3 Introduction of the Data Used in this Study

数据类型	数据名称	数据获取时间	空间分辨率	数据来源
震前	Sentinel-1A SLC(升轨)	2023-10-27	5 m×20 m	https://dataspace.copernicus.eu/
	Sentinel-1A SLC(降轨)	2023-12-14	5 m×20 m	
	北京三号(BJ:-3A1、-B1、-N1)	2023-05-24	0.5 m	高分甘肃中心
		2023-04-11	0.3 m	
		2023-02-23	0.3 m	
震后	Sentinel-1A SLC(升轨)	2023-12-26	5 m×20 m	https://dataspace.copernicus.eu/
	Sentinel-1A SLC(降轨)	2023-12-26	5 m×20 m	
	北京三号(BJ:-3A1、-N2、-N3)	2023-12-20	0.5 m	高分甘肃中心
		2023-12-20	0.3 m	
		2023-12-21	0.3 m	
	吉林系列(JLGF03:-D06、-D07、-D09、-D12、-D16、-D34)	2023-12-19	0.75 m	高分甘肃中心
		2023-12-20		
		2023-12-21		
	无人机影像	2023-12-24	0.1 m	无人机航空摄影测量
辅助数据	DEM(SRTMGL1)	—	30 m	https://step.esa.int/
	Sentinel-1A POEORB	2023-22-16	—	
		2024-01-03		
		2024-01-15		

1 InSAR数据处理获取同震形变场

为获取积石山Ms 6.2地震InSAR同震形变场,本文从哥白尼数据空间生态系统获取了震前、震后Sentinel-1A卫星的升、降轨SLC(single look complex)数据,并基于ISCE软件对升、降轨数据分别进行差分InSAR处理[14],利用欧洲空间局提供的精密星历数据进行轨道校正,引入空间分辨率为30 m的航天飞机雷达地形测绘任务数字高程模型去除地形效应[15],并使用Snaphu模块进行相位解缠[16],然后通过地理编码得到地表形变场,方向定义为靠近卫星(隆起)为负,远离卫星(沉降)为正(图2)。结果表明,形变区域主要位于拉脊山北缘断裂带和南缘断裂带之间,基本都处于地震烈度为Ⅷ度的区域内,其形变特征表现为隆起,视线向(line of sight,LOS)最大隆起接近8 cm,主要位于震中北侧,且地表无明显沉降表现,符合逆冲型地震形变特征,与中国地震局反演的震源机制解吻合[1]。形变区域近似为椭圆形,其长轴长约22.5 km,并平行于区域断裂带呈现NNW走向,短轴长约15 km。为进一步观察InSAR形变场在拉脊山南缘断裂和拉脊山北缘

断裂的变化,在形变场中选取6条近似垂直于两断层的剖线,并提取出剖线上的LOS向形变结果(图3),发现断层处并未发现明显错位形变,符合逆冲型地震特征。

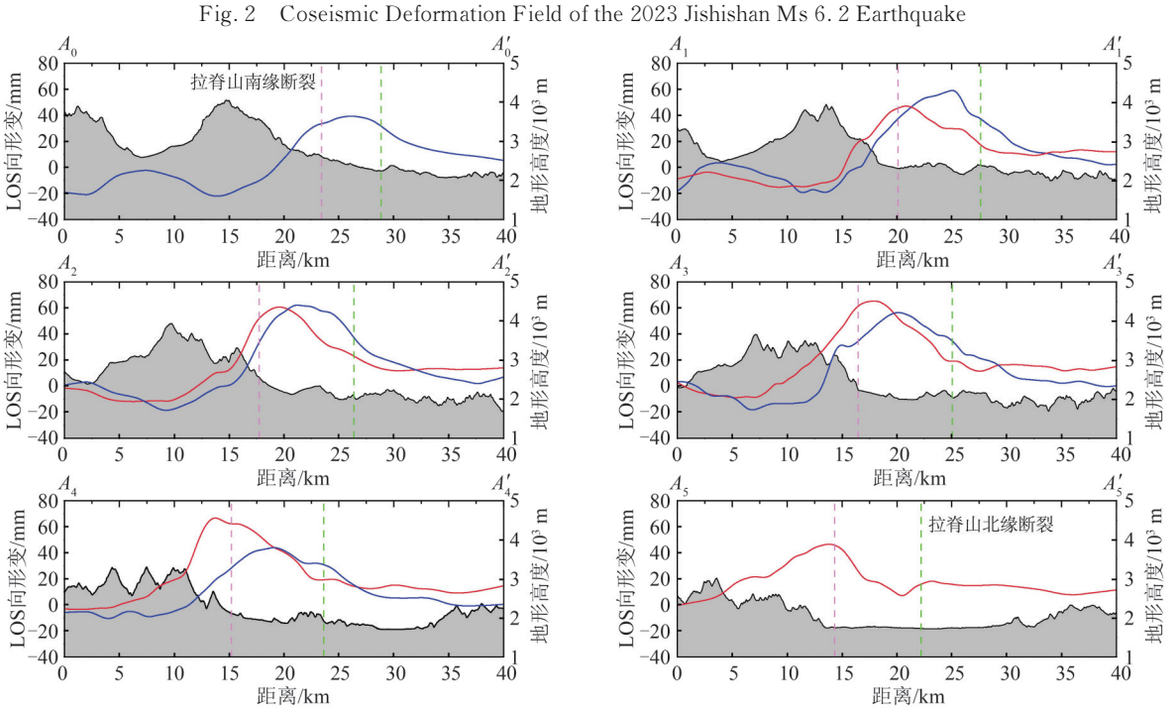


(a) Sentinel-1升轨(2023-10-27—2023-12-26)同震形变场　　(b) 降轨(2023-12-14—2023-12-26)同震形变场

注:黑色实线表示断层,红色虚线代表剖面线。

图2　2023年积石山Ms 6.2地震同震形变场

Fig. 2　Coseismic Deformation Field of the 2023 Jishishan Ms 6.2 Earthquake



注:隆起为正,红色为升轨剖线形变曲线,蓝色为降轨剖线形变曲线,灰色填充为剖线地形高度。

图3　高程剖面及其LOS向形变

Fig. 3　Elevation Profile and Its LOS Deformation

2　震后地表建筑物损毁和同震滑坡情况

上文的InSAR同震形变特征和已有研究表明此次地震为逆冲型,其往往会产生更加剧烈的地表震动,且此次地震震源深度较浅,地震能量波集中,因此加剧了对地表的破坏。从地理位置上看,积石山县西侧紧邻青藏高原,并且处于黄

土高原地区,相关研究表明在黄土覆盖地区会出现显著的地震波放大效应,增强地震烈度,加重对地表的破坏[17]。当地的房屋多半是砖木或砖土结构,抗震能力较差,因此震后出现了大面积的房屋倒塌,造成大量人员伤亡和财产损失。同时由于人为活动和自然侵蚀而形成大量不稳定的黄土边坡,在受到地震波作用效应后出现大量滑坡和崩塌。本节基于震前、震后0.3 m、0.5 m和0.75 m的高分辨率卫星影像数据和分辨率优于0.1 m的局部无人机影像对地震烈度达到Ⅷ度的地区进行了灾情普查,主要是对同震滑坡和震后房屋损毁进行识别提取,并分析了其空间分布情况。在地表灾害数据提取过程中,为保证结果的准确性,采取以影像质量为第一的原则,优先使用高分辨率的全色波段影像,当高分辨率数据出现缺失或者目标被遮挡时,按照分辨率从高到低递减的顺序更换数据,直至目标目视解译完成。为了更好地对比震前、震后数据,将震前、震后数据分别放置在左右两个平行窗口中进行目视解译,并将两个窗口进行联接,实现同步移动。数据判别提取时采取多个人员进行独立判读的方法,并在结果提取完成之后进行区域交换检查,以避免单个人员解译出现的遗漏和错判。最后进行重点区域的现场近景对比验证,以确保提取结果与现场相符合,现场近景数据主要来源于媒体报道和网络视频平台。

2.1 建筑物损毁情况

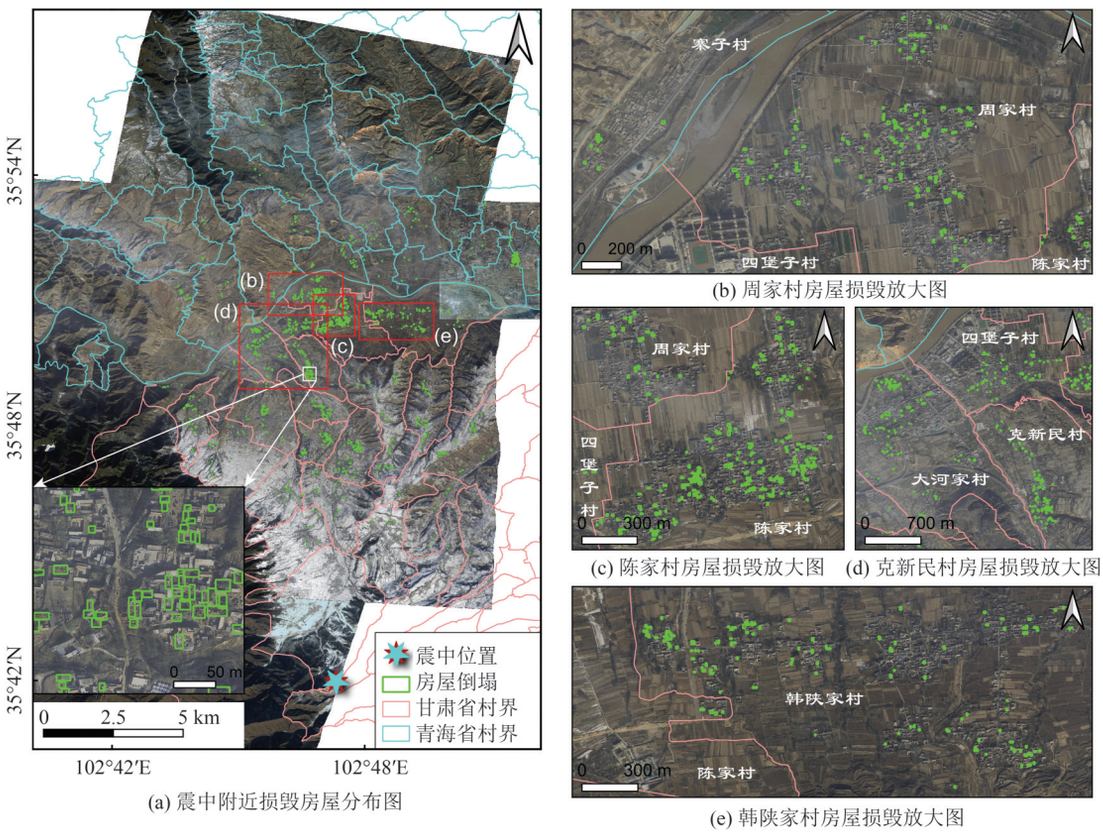
在地震直接灾害中建筑物的破坏或倒塌往往是导致人员伤亡的主要原因,同时对社会经济造成巨大损失。因此,对建筑物损毁信息的提取是评估震后损失的重要工作之一,这对及时了解灾情并开展灾害应急响应以及后期的灾区重建等都具有重要意义[18]。随着基于图像的变化检测技术的发展,联合高分辨率卫星影像和机器学习对灾后建筑损毁信息的提取成为了可能。但结合本次震后影像的情况来看,基于机器学习对房屋损毁信息进行自动提取是较为困难的,因为房屋倒塌基本发生在乡村地区,房屋形状不规则,部分房屋被附近树木遮挡,还有一部分房屋被阴影遮挡,这些实际条件给房屋损毁信息的提取造成了较大干扰。

为了获取本次地震的房屋损毁信息,本文利用ENVI(environment for visualizing images)和QGIS(quantum GIS)对比震前/震后影像对损毁房屋进行目视解译。本次共解译出房屋损毁1 506处,从结果来看,房屋损毁严重的区域涉及大河家镇(908处)、刘集乡(300处)和石塬镇(114处)等,其中陈家村(232处)、周家村(131处)、克新民村(111处)、大河家村(93处)和团结村(82处)受灾严重,结果与相关新闻报道基本一致(图4)。为了验证解译的准确度,从网络上搜集了大量现场房屋倒塌图片和视频与解译的损毁房屋进行对比,经验证后发现解译结果基本与现场情况相符,在部分紧靠的房屋倒塌混合时,无法区分到单间房屋,只能提取整体边界(图5)。损毁的房屋以房龄较久的农村自建房为主,这类房屋大多为砖木或土木结构,抗震能力较差(图6),这对既有建筑的抗震鉴定以及震后重建具有指导意义。从损毁房屋的空间分布上看,震中距5 km以内房屋情况较好,损毁房屋在距离上集中在5~25 km的范围内,其中15~18 km范围内的大河家镇损毁最为严重,说明本次地震损毁最为严重的地方并不是在微观震中附近,这可能是因为区域土质松软放大了地震效应,同时与区域地势平坦且房屋密集以及地震伴有少量走滑分量有关[11]。从损毁房屋与震中的方位角信息来看,其主要集中在0°~30°和330°~360°的范围内(图7),其中最严重的区域均集中于震中正北方向上(图4(a)),这可能与地震波传播方向有关,也进一步说明此次地震波主要向北传播。

2.2 积石山地震同震滑坡及其分布情况

快速获取同震地质灾害的分布信息对指导震后救援、灾民安置和后期灾区重建工作具有重要意义[19]。本文通过对震前、震后北京三号和吉林一号的高分辨率遥感影像的目视判读,获取了震中附近较为详细的滑坡清单。如图8(a)所示,共计4 996处同震滑坡(部分阴影处的滑坡未能解译),整体分布近似为长轴NNW走向的椭圆,其长轴与拉脊山北缘断裂基本重合,分布面积达725 km^2(白色椭圆范围)。从图8(c)来看,滑坡面积主要集中在0~5 000 m^2范围内,说明此次同震滑坡以小型滑坡为主。其中最大滑坡是面积为4.6×10^5 m^2的青海省官亭镇塞子村大型滑坡体,次之的就是面积为1.2×10^5 m^2的中川乡滑坡-泥流,这两个大型滑坡将在§2.3和§3单独分析。由图8(b)可见,滑坡主要分布于5~30 km范围内,根据滑坡分布规律将距离进行细分为4个区间,统计出各距区间滑坡数量占比如下:[0,5) km,滑坡60处,占比1.20%;[5,15) km,滑坡2 273处,占比45.50%;[15,20) km,滑坡1 268处,占

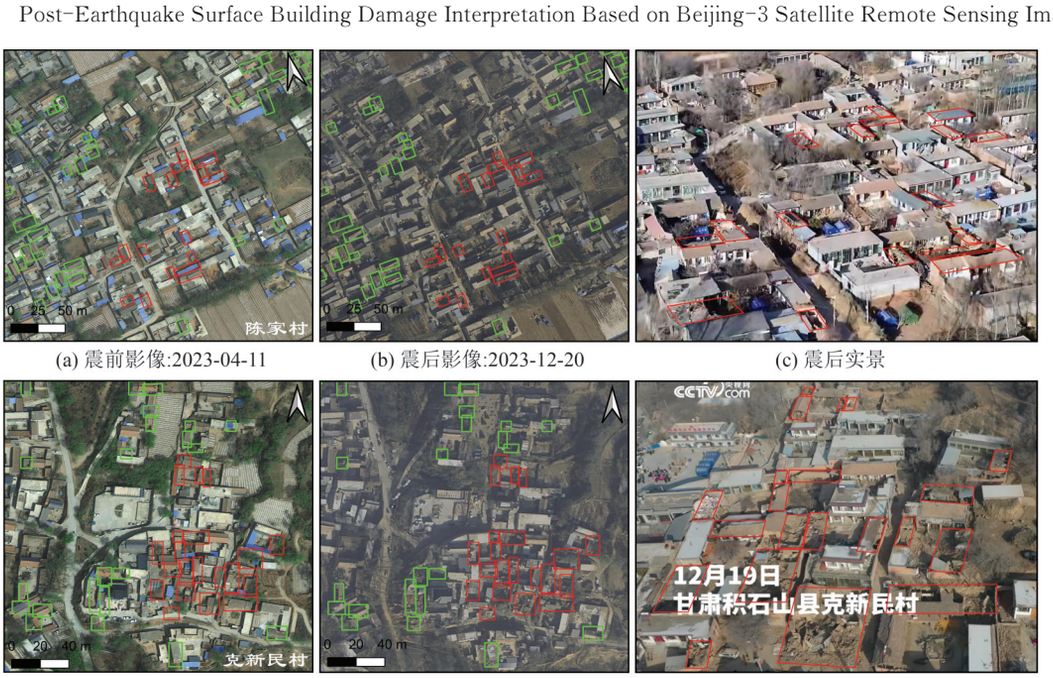
比 25.38%;[20, 30] km,滑坡 1 395 处,占比 27.92%。可见 5 km 以内滑坡数量较少,初步分析是因为该范围内基本为山地,植被覆盖情况较好,对于避免滑坡起到较为明显的作用,并且该范围内旧址滑坡较少,减少了二次诱发的情况。70.88% 的滑坡集中在 5~20 km 的区间内,这与 InSAR 解算的同震形变范围较为符合(图 2),主要是因为该范围内存在大量的黄土塬,在人为活



(a) 震中附近损毁房屋分布图　(b) 周家村房屋损毁放大图　(c) 陈家村房屋损毁放大图　(d) 克新民村房屋损毁放大图　(e) 韩陕家村房屋损毁放大图

图 4　基于北京三号卫星遥感影像解译的震后地表房屋损毁情况

Fig. 4　Post-Earthquake Surface Building Damage Interpretation Based on Beijing-3 Satellite Remote Sensing Imagery



(a) 震前影像:2023-04-11　(b) 震后影像:2023-12-20　(c) 震后实景

(d) 震前影像:2023-04-11　(e) 震后影像:2023-12-20　(f) 震后实景

注:绿色方框表示实景区域及周围地区被损毁的房屋,其中颜色被修改为红色的边框与实景中红色边框标记的损毁房屋相对应。

图 5　基于震后近景对卫星影像解译的房屋损毁情况进行验证

Fig. 5　Verification of Satellite Imagery Interpreted Building Damage Using Post-Earthquake Close-Up Photographs



图6 震后房屋损毁实景

Fig. 6 Actual Scene of Post-Earthquake Building Damage

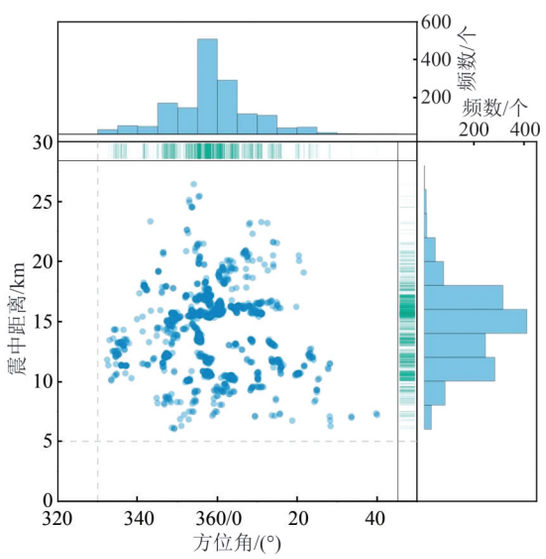


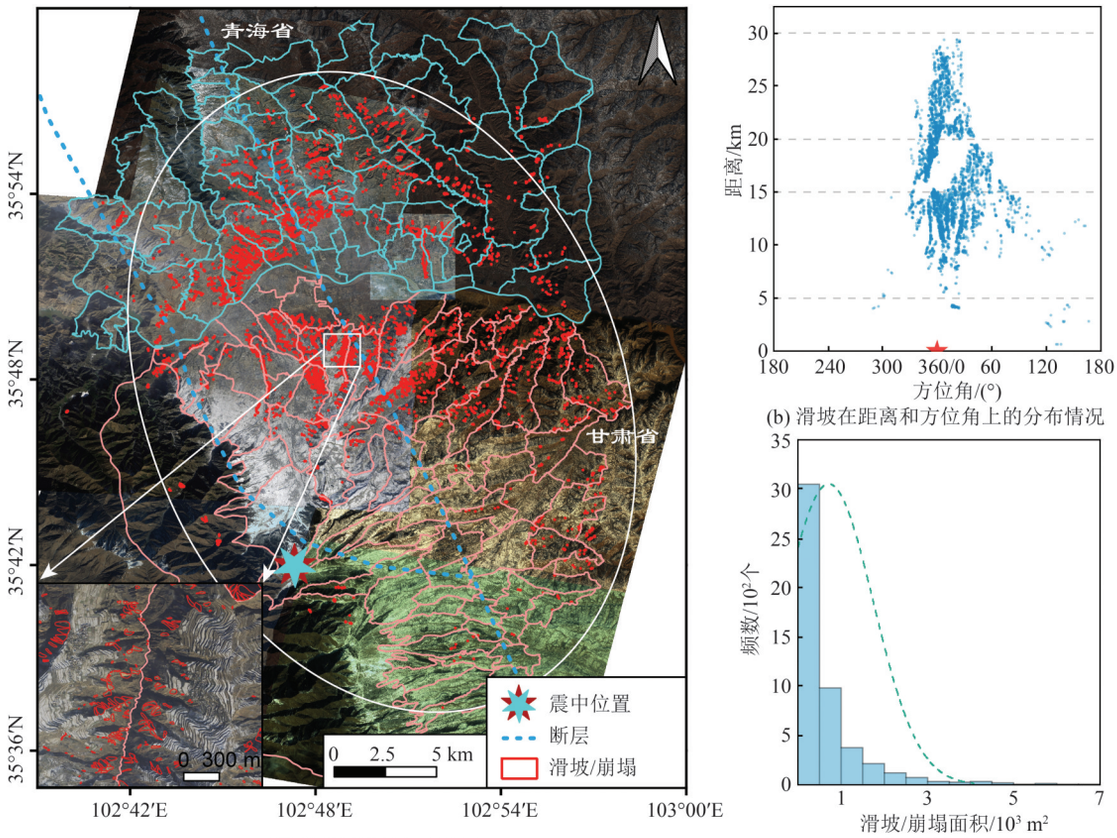
图7 震后房屋损毁的空间分布情况

Fig. 7 Spatial Distribution of Post-Earthquake Building Damage

动和降雨侵蚀下使得台塬边缘陡峭甚至是悬空,这为滑坡的生成孕育了地理条件,当地震发生时由于地震波作用效应而出现大面积黄土滑坡和崩塌[20](图9)。从滑坡与震中的方位角信息来看,滑坡主要分布在0°~60°以及330°~360°的范围内,说明本次地震对地表的破坏主要在北方向上,这与李志才等[12]通过高频GNSS反演的结果和中国地震局地球物理研究所的地震波反演结果基本相符。

2.3 青海省官亭镇塞子村大型滑坡体

青海省官亭镇寨子村与赵木川村交界处(临近川亭路北侧)存在一处大型滑坡体,积石山地震发生后坡体表面出现大面积崩塌,泥土和碎石滑落导致下侧道路被掩埋。本文收集了震后分辨率优于0.1 m的无人机正射影像,提取了坡体表面裂缝以及滑坡/崩塌边界。据统计,目前坡体表面存在裂缝约208条,累计长度约2 324 m,最长裂缝超40 m。坡体滑坡/崩塌共计约73处,累积面积约为43 962 m^2(图10)。其中滑坡为15处,数量占比约为21%;滑坡总面积约为22 402 m^2,面积占比约为51%,可见滑坡灾害影响范围往往要大于崩塌。同时本文发现该坡体顶部存在一个较大滑坡体(面积约为11 492 m^2,图10(d)),并且该滑坡体表面存在大量裂缝并与坡体运动方向垂直,说明坡体可能存在向东的滑动。坡脚东侧是一条深土沟,为斜坡失稳创造了有利的地形条件,此外雨水沿坡顶和坡面的渗入也会加速坡

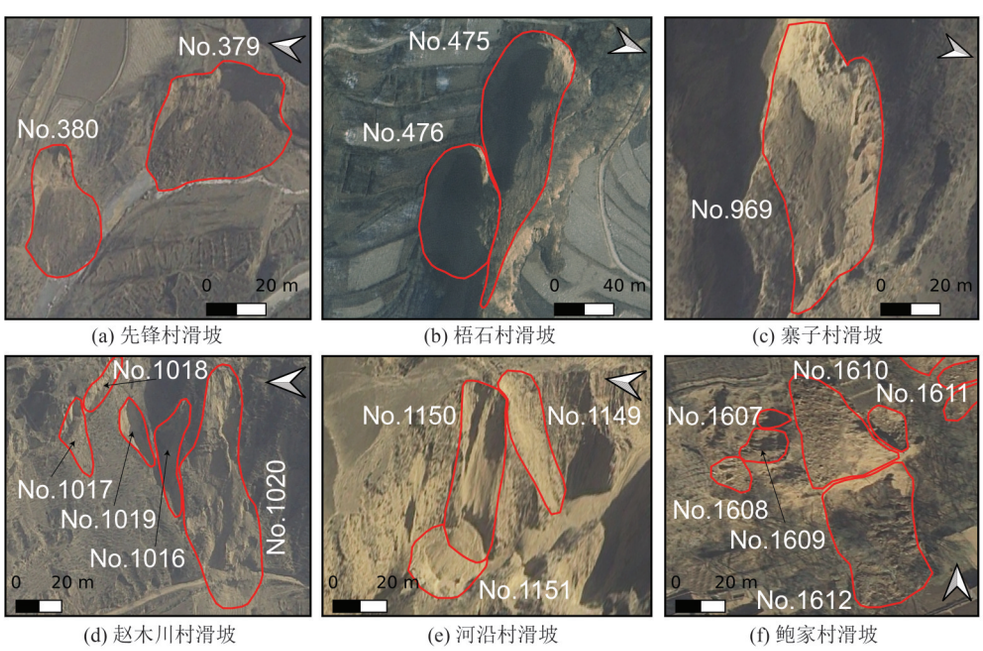


(a) 震中附近滑坡分布情况　(b) 滑坡在距离和方位角上的分布情况　(c) 滑坡面积分布直方图

注:红色矢量边界表示滑坡/崩塌区域,白色椭圆为滑坡分布范围边界。

图 8　积石山地震同震滑坡清单及分布情况

Fig. 8　List and Distribution of Coseismic Landslides in Jishishan Earthquake



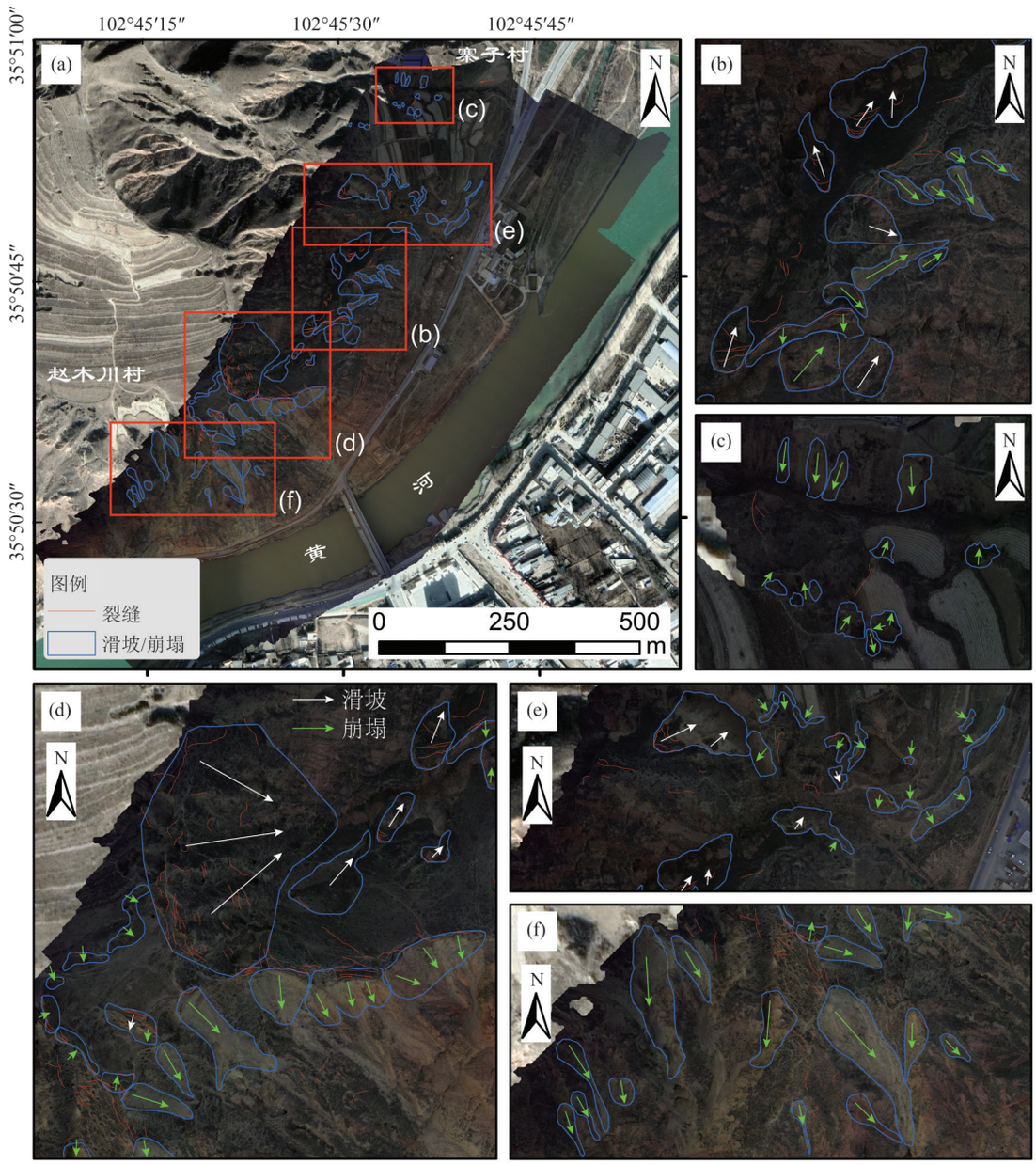
(a) 先锋村滑坡　(b) 梧石村滑坡　(c) 寨子村滑坡

(d) 赵木川村滑坡　(e) 河沿村滑坡　(f) 鲍家村滑坡

图 9　北京三号卫星拍摄的震后滑坡遥感影像

Fig. 9　Remote Sensing Images of Post-Earthquake Landslides Captured by Beijing-3 Satellite

体失稳。因此本文认为该滑坡体存在较大的滑动隐患,后期需要重点排查。本次地震诱发的崩塌主要集中在坡体前侧较陡的坡面上,根据影像显示,目前坡体前侧表面依然存在大量不稳定的土块和碎石,后期存在崩塌和滚落的风险,对下侧的川亭公路、国道 310 和大河家黄河大桥的行人、车辆和建筑设施产生较大安全隐患,后期需要进行安全清理和安装防护装备。



注:白色箭头代表滑坡,绿色箭头代表崩塌,箭头方向表示滑坡/崩塌方向。

图10 青海省官亭镇寨子村滑坡体震后滑坡/崩塌与裂缝情况

(a)坡体全景及滑坡/崩塌和裂缝分布情况;(b)、(c)、(d)、(e)、(f)是区域放大图

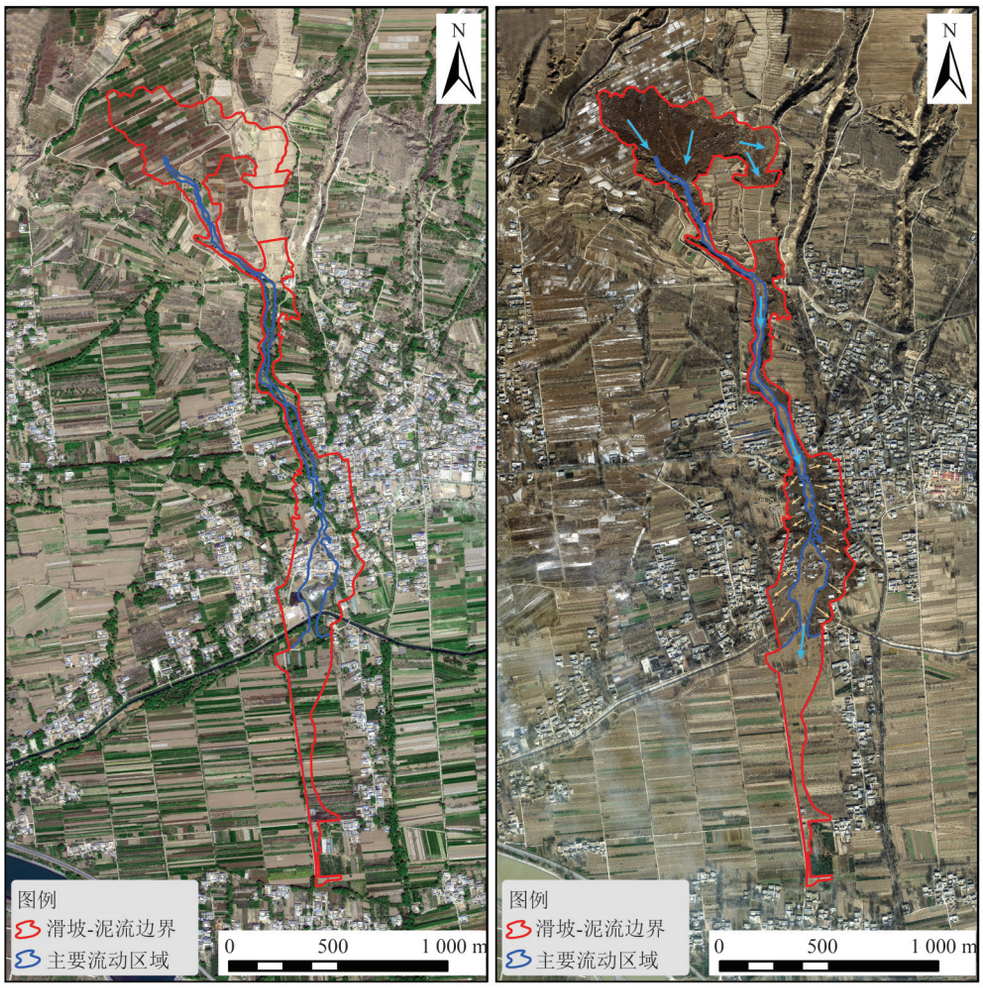
Fig. 10 Post-Earthquake Landslide/Collapse and Crack Distribution of Zhaizi Village Landslide in Guanting Town, Qinghai Province

(a)Panorama of the Landslide and the Spatial Distribution of Landslides/Collapses and Cracks; (b), (c), (d), (e), and (f) are Enlarged Views of Specific Regions

3 中川乡滑坡泥流受灾分析

黄土由于大孔隙亚稳定微结构以及强烈的水敏感性使其具有独特的动力性质,表现出较高的地震易损性和震陷性。黄土地区历史上发生过多次强烈地震,引发了大量的地震滑坡、震陷和液化等黄土地震灾害,造成了严重的人员伤亡和财产损失[21]。继甘肃省积石山发生Ms 6.2地震之后,距震中约19.6 km处的青海省海东市中川乡发生了震后次生灾害,主要是一处地震引起的大型滑坡-泥流事件。其成灾机理是在地震过程中富含地下水的黄土台塬因震动导致土壤液化,从而使得土层失稳导致滑坡,产生的土水混合物在重力的作用下沿沟谷流动形成泥流[13]。此次滑坡泥流导致中川乡金田村和草滩村大量建筑被泥土掩埋,基础设施被损毁,20名群众失联,灾前、灾后对比见图11。

为了对比统计滑坡-泥流灾害前后影响范围以及具体地表受损情况,本文收集了灾前、灾后北



(a) 灾前影像　　(b) 灾后影像

图 11　青海省海东市中川乡震前震后滑坡-泥流影像对比

Fig. 11　Comparison of Pre-Earthquake and Post-Earthquake Flowslide Image in Zhongchuan Township, Haidong City, Qinghai Province

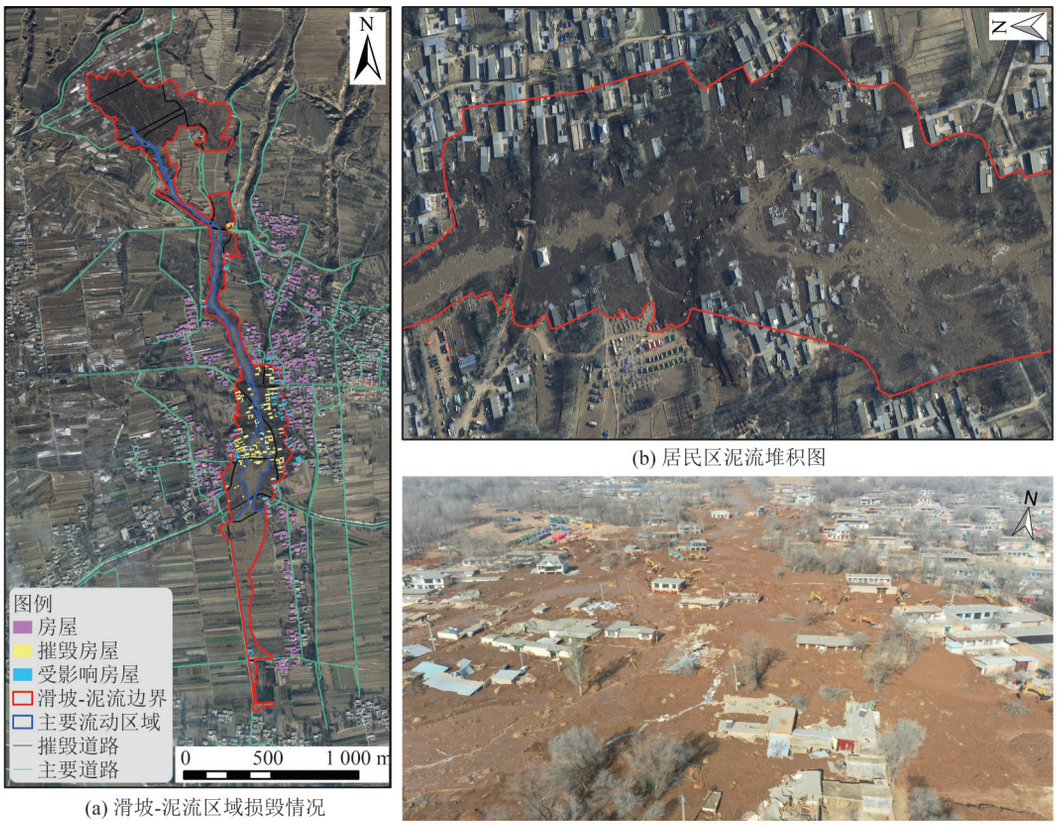
京三号卫星0.3 m分辨率的高清遥感影像,通过目视解译对村庄受灾情况进行了识别汇总。从整体来看,本次泥流-滑坡受灾区域东西跨度约为947 m,南北跨度约为2 965 m,总受灾面积达456 982.10 m^2,其中124 680.9 m^2为流动区域(图12(a)中蓝色边界)。主要滑坡发生在北端农田区域,泥土经沟渠流动约1 200 m后因沟渠变窄而向外溢出,在下侧村庄形成堆积层,区域内损毁高压线塔1座,房屋建筑被摧毁158间,边缘受影响建筑74间,道路损毁28段,总计4 569 m(图12)。

造成此次滑坡-泥流次生灾害的可能原因包括:(1)滑缘区主要为耕地,常年的地下水积累、日常降雨入渗和耕地灌溉渗漏导致区域土层处于高含水状态,容易在受地震震动情况下导致液化加速失稳导致滑坡。(2)滑坡-泥流两头存在约80 m的地形高差,为滑坡物创造了形成泥流的地形条件;(3)高含水的滑坡物涌入既有沟道并向下游发生移动,随着下游沟道变窄,大量泥土淤积并向前涌出沟道进入村庄,村庄附近地形开阔平坦,导致泥土向两侧蔓延淤积掩埋房屋,从而造成重大人员伤亡和财产损失。

4　结　语

北京时间2023-12-18甘肃积石山县发生Ms 6.2地震,此次地震是中国2023年除东海海域Ms 6.4地震外的最大地震,在当地造成了严重的地震灾害。本文收集了震前、震后的合成孔径雷达数据、高分辨率卫星影像数据和局部无人机影像数据,对各类数据进行处理分析,获得了地表同震形变、建筑物损毁和同震滑坡分布信息。主要结果如下:

1)利用震前、震后的Sentinel-1A的升、降轨SLC数据进行差分干涉处理,获取了震后地表LOS向形变场。结果显示,地表形变主要发生在拉脊山北缘断裂和南缘断裂之间,整体呈现为长



(a) 滑坡-泥流区域损毁情况

(b) 居民区泥流堆积图

(c) 无人机于2023-12-21拍摄的现场图

图12 中川乡滑坡-泥流损毁居民房屋情况

Fig. 12 Buildings Damaged by Flowslide in Zhongchuan Township

轴NNW走向的隆起椭圆(最大隆起接近8 cm),长轴长约22.5 km,短轴长约15 km,并且无明显沉降区域。从剖面形变信息来看本次地震未造成明显的地表破裂,符合逆冲型地震特征。

2)本次地震造成30 km内房屋损毁1 506处,从距离上看,其主要集中在震中距为5~25 km范围内,震中5 km内房屋情况良好。从方位上看,主要集中在震中北侧方位角为0°~30°和330°~360°区间内,并且损毁最为严重的区域均集中在震中正北方向上,大河家镇房屋损毁最为严重(908处房屋损毁,占比60.29%),从结构上看,损毁房屋以砖木和土木结构为主。该结果与相关报道和现场房屋损毁情况较为吻合,可为后期灾区房屋重建工作提供参考。

3)本次地震在震中附近725 km^{2}范围内共诱发滑坡4 996处,这些滑坡以小型黄土滑坡为主,震中距主要分布在5~30 km范围内,震中方位角主要分布在0°~60°和330°~360°之间。其中包括一处位于青海省官亭镇塞子村的大型滑坡体,坡体表面存在裂缝208条(累计长度约2 324 m,单条最长超40 m),滑坡/崩塌共计73处(累计面积约为43 962 m^2),该坡体存在严重安全隐患,后期需要重点监控。

4)本次地震在中川乡引起次生灾害导致当地受灾严重,受灾区域的东西跨度约947 m,南北跨度约为2 965 m,受灾面积达456 982.10 m^2。此次灾害摧毁房屋158间,周围受影响房屋74间,损毁道路28段,共计4 569 m,并损毁高压线塔1座。值得注意的是,本次灾害的性质并非早期预测的"沙涌",而是由地震引起土层液化而形成的滑坡-泥流事件[13],这可为当地早期类似灾害事件成因的评估提供一定的参考。

本次地震造成震中附近超1 500处房屋被损毁,诱发了近5 000处滑坡,包括寨子村一处大型滑坡体和中川乡一处滑坡-泥流事件,造成了重大人员伤亡和社会经济损失。本文通过对雷达数据的差分干涉和对光学影像的目视判读,获取了震后地表形变和灾害信息,并通过网络平台快速搜集了大量震后现场图片和视频对结果进行了检验。值得一提的是,本文使用的0.3 m和0.5 m的高分辨率全色影像是确保解译结果准确性的关键,在后续的研究中可实地对高分辨影像的解译能力进行验证。获取的震中附近较为详细的灾害信息可为灾区重建和预防次生灾害提供支撑,同时可为相关研究的进一步探索提供参考。

致谢:感谢高分辨率对地观测系统甘肃数据与应用中心提供的震前、震后高分辨率卫星影像数据和基础地理数据,以及感谢该中心徐瑱在数据获取方面提供的重要帮助;感谢哥白尼数据空间生态系统提供的Sentinel-1雷达影像;本文绘图使用GMT软件[22]。

参 考 文 献

[1] 王勤彩, 罗钧, 陈翰林, 等. 2023年12月18日甘肃积石山6.2级地震震源机制解[J]. 地震, 2024, 44(1): 185-188.
WANG Qincai, LUO Jun, CHEN Hanlin, et al. Focal Mechanism for the December 18, 2023, Jishishan Ms 6.2 Earthquake in Gansu Province [J]. *Earthquake*, 2024, 44(1): 185-188.

[2] 黄蓓. 逆冲型地震强地面运动特性的研究: 以1999年台湾集集地震和2008年汶川地震为例[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2014.
HUANG Bei. Characteristics of Strong Ground Motion of Thrusting Earthquakes-Case Studies from 1999 Chi-Chi and 2008 Wenchuan Earthquakes[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration,2014.

[3] 袁道阳, 张培震, 雷中生, 等. 青海拉脊山断裂带新活动特征的初步研究[J]. 中国地震, 2005, 21(1): 93-102.
YUAN Daoyang, ZHANG Peizhen, LEI Zhongsheng, et al. A Preliminary Study on the New Activity Features of the Lajishan Mountain Fault Zone in Qinghai Province [J]. *Earthquake Research in China*, 2005, 21(1): 93-102.

[4] 张培震, 邓起东, 张国民, 等. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2003, 33(S1): 12-20.
ZHANG Peizhen, DENG Qidong, ZHANG Guomin, et al. Strong Earthquake Activity and Active Blocks in Chinese Mainland[J]. *Scientia Sinica* (*Terrae*), 2003, 33(S1): 12-20.

[5] 邵志刚, 武艳强, 季灵运, 等. 中国大陆活动地块边界带主要断层的强震震间晚期综合判定[J]. 地球物理学报, 2022, 65(12): 4643-4658.
SHAO Zhigang, WU Yanqiang, JI Lingyun, et al. Comprehensive Determination for the Late Stage of the Interseismic Period of Major Faults in the Boundary Zone of Active Tectonic Blocks in Chinese Mainland[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(12): 4643-4658.

[6] 王运生, 赵波, 吉锋, 等. 2023年甘肃积石山Ms 6.2级地震震害异常的启示[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2024, 51(1): 1-8.
WANG Yunsheng, ZHAO Bo, JI Feng, et al. Preliminary Insights into the Hazards Triggered by the 2023 Jishishan Ms 6.2 Earthquake in Gansu Province[J]. *Journal of Chengdu University of Technology* (*Science & Technology Edition*), 2024, 51(1): 1-8.

[7] 王立朝, 侯圣山, 董英, 等. 甘肃积石山Ms 6.2级地震的同震地质灾害基本特征及风险防控建议[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(3): 108-118.
WANG Lichao, HOU Shengshan, DONG Ying, et al. Basic Characteristics of Co-Seismic Geological Hazards Induced by Jishishan Ms 6.2 Earthquake and Suggestions for Their Risk Control[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2024, 35(3): 108-118.

[8] 黄观文, 景策, 李东旭, 等. 甘肃积石山Ms 6.2地震对滑坡易发区的变形影响分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI: 10.13203/J. whugis20230490.
HUANG Guanwen, JING Ce, LI Dongxu, et al. Deformation Analysis of the Ms 6.2 Jishishan Earthquake on the Landslide Hazard Areas[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI:10.13203/J. whugis20230490.

[9] 陈博,宋闯,陈毅, 等. 2023年甘肃积石山Ms 6.2地震同震滑坡和建筑物损毁情况应急识别与影响因素研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI:10.13203/J. whugis2023 0497.
CHEN Bo, SONG Chuang, CHEN Yi, et al. Emergency Identification and Influencing Factor Analysis of Coseismic Landslides and Building Damages Induced by the 2023 Ms 6.2 Jishishan (Gansu, China) Earthquake[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI: 10.13203/J. whugis20230497.

[10] 杨九元, 温扬茂, 许才军. InSAR观测揭示的2023年甘肃积石山Ms 6.2地震发震构造[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI:10.13203/J. whugis20230501.
YANG Jiuyuan, WEN Yangmao, XU Caijun. Seismogenic Fault Structure of the 2023 Ms 6.2 Jishishan (Gansu,China) Earthquake Revealed by InSAR Observations [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI:10.13203/J. whugis20230501.

[11] 刘振江, 韩炳权, 能懿菡, 等. InSAR观测约束下的2023年甘肃积石山地震震源参数及其滑动分布[J]. 武汉大学学报(信息科学 版), 2024, DOI:10.13203/J.whugis20240008.

LIU Zhenjiang, HAN Bingquan, NAI Yihan, et al. Source Parameters and Slip Distribution of the 2023 Mw 6.0 Jishishan (Gansu, China) Earthquake Constrained by InSAR Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI:10.13203/J.whugis20240008.

[12] 李志才, 陈智, 武军郦, 等. 基于高频GNSS观测的甘肃积石山Ms 6.2地震同震形变[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI:10.13203/J.whugis20240004.
LI Zhicai, CHEN Zhi, WU Junli, et al. Coseismic Deformation of the Ms 6.2 Jishishan Earthquake in Gansu Province Based on High-Frequency GNSS Observation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI: 10.13203/J.whugis20240004.

[13] 许强, 彭大雷, 范宣梅, 等. 甘肃积石山Ms 6.2地震触发青海中川乡液化型滑坡-泥流特征与成因机理[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI: 10.13203/J.whugis20240007.
XU Qiang, PENG Dalei, FAN Xuanmei, et al. Preliminary Study on the Characteristics and Initiation Mechanism of Zhongchuan Town Flowslide Triggered by the Ms 6.2 Jishishan Earthquake in Gansu Province[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI:10.13203/J.whugis20240007.

[14] ROSEN P A, GURROLA E, SACCO G F, et al. The InSAR Scientific Computing Environment[C]//The 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Nuremberg, Germany, 2012.

[15] FARR T G, ROSEN P A, CARO E, Et al. The Shuttle Radar Topography Mission[J]. *Reviews of Geophy-sics*, 2007, 45(2): 559-565.

[16] CHEN C W, ZEBKER H A. Phase Unwrapping for Large SAR Interferograms: Statistical Segmentation and Generalized Network Models[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(8): 1709-1719.

[17] 王会娟, 王平, 于一帆, 等. 基于振动台试验的黄土场地效应研究[J]. 地震工程学报, 2020, 42(5): 1187-1193.
WANG Huijuan, WANG Ping, YU Yifan, et al. Loess Site Effect Based on Shaking Table Test[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2020, 42(5): 1187-1193.

[18] 眭海刚, 刘超贤, 黄立洪, 等. 遥感技术在震后建筑物损毁检测中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 1008-1019.
SUI Haigang, LIU Chaoxian, HUANG Lihong, et al. Application of Remote Sensing Technology in Earthquake-Induced Building Damage Detection[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 1008-1019.

[19] 王欣, 方成勇, 唐小川, 等. 泸定Ms 6.8地震诱发滑坡应急评价研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(1): 25-35.
WANG Xin, FANG Chengyong, TANG Xiaochuan, et al. Research on Emergency Evaluation of Landslides Induced by the Luding Ms 6.8 Earthquake[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(1): 25-35.

[20] 冯文凯, 黄润秋, 许强. 地震波效应与山体斜坡震裂机理深入分析[J]. 西北地震学报, 2011, 33(1): 20-25.
FENG Wenkai, HUANG Runqiu, XU Qiang. In-Depth Analysis of the Seismic Wave Effect and Slope Shattered Mechanism[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2011, 33(1): 20-25.

[21] 宋丙辉. 兰州黄土的动力特性及其场地地震动反应[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
SONG Binghui. Dynamic Characteristics of Lanzhou Loess and Its Site Ground Motion Response[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.

[22] WESSEL P, LUIS J F, UIEDA L, et al. The Generic Mapping Tools Version 6[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2019, 20(11): 5556-5564.