引文格式: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),2025,50(2):322-332.DOI:10.13203/j.whugis20230497

Citation: 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, 2025, 50(2):322-332.DOI:10.13203/j.whugis20230497

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

陈 博[1,2,3] 宋 闯[1,2,4] 陈 毅[1,2,3] 李振洪[1,2,4] 余 琛[1,2,4] 刘海辉[1,2,3]
江 辉[1,2,3] 刘振江[1,2,3] 蔡兴敏[1,2,3] 能懿菡[1,2,3] 朱 双[1,2,3] 杜建涛[1,2,3]
李祖锋[5] 赵志祥[5] 李素菊[6] 朱 武[1,2,4] 彭建兵[1,2,7]

1 长安大学地质工程与测绘学院,陕西 西安,710054
2 黄土科学全国重点实验室,陕西 西安,710054
3 长安大学地学与卫星大数据研究中心,陕西 西安,710054
4 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室,陕西 西安,710054
5 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司,陕西 西安,710065
6 应急管理部国家减灾中心,北京,100124
7 自然资源部生态地质与灾害防控重点实验室,陕西 西安,710054

摘 要:2023-12-18,甘肃积石山县发生Ms 6.2地震,地震诱发了大量的同震滑坡,并导致建筑物不同程度损毁,造成了严重的人员伤亡和经济损失。及时获取同震滑坡易发性、应急识别同震滑坡并分析其影响因素以及定量评估建筑物损毁情况,对灾后的应急救援和恢复重建至关重要。基于支持向量机算法获取了积石山地震同震滑坡易发性空间分布,同时通过震前、震后的高分辨率光学卫星影像对同震滑坡进行了应急识别,并探讨了地震、地形地貌和人类活动等因素对同震滑坡的影响。此外,利用多时相合成孔径雷达干涉测量相干性变化方法获取了地震建筑物损毁代理图(building damage proxy map, BDPM)。结果表明,此次积石山Ms 6.2地震通过卫星遥感解译出同震滑坡共3 767处,总面积9.67 km^2,多为黄土滑坡,主要分布在高程1 900~2 200 m、坡度20°~40°、坡向SE、距断层10 km和距水系2.2 km之内,黄土放大效应明显。研究团队震后第一时间开展野外考察,实地确认了59处同震滑坡,验证了遥感识别结果的准确性;BDPM结果表明,震区大河家镇和官亭镇建筑物损毁最为严重。上述研究成果为震后恢复重建和地震次生灾害评估提供了重要的数据支撑。

关键词:2023年积石山地震;黄土同震滑坡;地震建筑物损毁代理图;滑坡易发性;滑坡影响因子

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2023-12-30

DOI:10.13203/j.whugis20230497 **文章编号**:1671-8860(2025)02-0322-11

Emergency Identification and Influencing Factor Analysis of Coseismic Landslides and Building Damages Induced by the 2023 Ms 6.2 Jishishan (Gansu, China) Earthquake

CHEN Bo[1,2,3] *SONG Chuang*[1,2,4] *CHEN Yi*[1,2,3] *LI Zhenhong*[1,2,4] *YU Chen*[1,2,4] *LIU Haihui*[1,2,3]
JIANG Hui[1,2,3] *LIU Zhenjiang*[1,2,3] *CAI Xingmin*[1,2,3] *NAI Yihan*[1,2,3] *ZHU Shuang*[1,2,3]
DU Jiantao[1,2,3] *LI Zufeng*[5] *ZHAO Zhixiang*[5] *LI Suju*[6] *ZHU Wu*[1,2,4] *PENG Jianbing*[1,2,7]

1 College of Geological Engineering and Geomatics, Chang' an University, Xi' an 710054, China
2 Key Laboratory of Loess, Xi' an 710054, China
3 Big Data Center for Geosciences and Satellites (BDCGS), Chang' an University, Xi' an 710054, China
4 Key Laboratory of Western China' s Mineral Resource and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi' an 710054, China
5 PowerChina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi' an 710065, China
6 National Disaster Reduction Center of China, Beijing 100124, China
7 Key Laboratory of Ecological Geology and Disaster Prevention, Ministry of Natural Resources, Xi' an 710054, China

Abstract: **Objective**: On 18th December 2023, an Ms 6.2 earthquake struck Jishishan County, Gansu

基金项目:国家重点研发计划(2020YFC1512000);陕西省科技创新团队(2021TD-51);陕西省地学大数据与地质灾害防治创新团队(2022);中央高校基本科研业务费专项(300102260301,300102261108);国家自然科学基金(42304029)。

共同第一作者:陈博,博士生,主要从事综合遥感的滑坡广域探测研究。bo.chen@chd.edu.cn
宋闯,博士,副教授,主要从事影像大地测量和地震地质灾害研究。chuang.song@chd.edu.cn
通信作者:李振洪,博士,教授。Zhenhong.Li@chd.edu.cn

Province, China, which triggered a large number of coseismic landslides and caused varying degrees of buildings damage, leading to serious casualties and economic losses. Timely acquisition of the coseismic landslide susceptibility, emergency identification of coseismic landslides and building damage, as well as analysis of influencing factors related to coseismic landslides, are crucial for post-disaster emergency rescue and recovery efforts. **Methods:** The support vector machine algorithm was employed to acquire the spatial probability distribution of coseismic landslide susceptibility in the Jishishan earthquake. Emergency identification of coseismic landslides was conducted using high-resolution optical satellite imagery before and after the earthquake. Furthermore, a comprehensive analysis was undertaken by analyzing the impact of seismic, topographic, geomorphic, and human activity factors on coseismic landslides. Additionally, by using the multi-temporal interferometric synthetic aperture radar coherence change method, a building damage proxy map (BDPM) was generated to assess earthquake-induced structural damage. **Results:** The Ms 6.2 Jishishan Earthquake triggered 3 767 coseismic landslides in the region with an area of 9.67 km^2. The majority of these landslides were composed of loess and were predominantly occurred in the region with an elevations range of 1 900-2 200 m, slope range of 20°-40°, southeast orientation, locating approximately 10 km from faults and 2.2 km from the river. The huge number of loess coseismic landslides reflects the evident amplification effect of loess. We conducted a field trip following the earthquake and confirmed 59 of those coseismic landslides, which verified the accuracy of the remote sensing identification results. In addition, BDPM results indicate that the towns of Dahejia and Guanting within the seismic zone experienced the most severe structural damage. **Conclusions:** These findings of this study provide crucial data support for post-earthquake rehabilitation and reconstruction as well as assessment of secondary seismic hazards.

Key words: 2023 Jishishan earthquake; loess coseismic landslides; building damage proxy map(BDPM); landslide susceptibility; landslide influencing factor

据中国地震台网中心测定,2023-12-18 23时59分甘肃省临夏回族自治州积石山县(震中35.70°N,102.79°E)发生Ms 6.2地震,震源深度10 km,最高烈度达Ⅷ度,受灾范围近6 000 km^2。截至2023-12-22 8时,此次地震已造成甘肃和青海两省共计148人遇难、3人失联、979人受伤。震中及周边民房以及水、电和路等基础设施不同程度损坏。截至2023-12-20,共记录余震423次,其中3.0级及以上余震10次,最大余震为4.1级。

地震是造成地质灾害的重要因素之一,强烈的地震动不仅诱发大量同震滑坡,而且降低山体斜坡抗剪强度,对人民生命财产安全造成巨大威胁[1]。中国属于构造活跃地区,地质灾害频发、地震灾害风险高,常导致大量人员伤亡和严重经济损失[2]。如1920年宁夏海原M 8.5地震诱发5 384处滑坡,滑坡总面积为218.78 km^2,造成23.4万人遇难[3-4]。2008年汶川Mw 7.9地震诱发197 481处滑坡,地震滑坡直接导致25 000~30 000人死亡[5-6]。2010年青海玉树Mw 6.9地震诱发2 036处滑坡,致2 698人死亡,270人失踪[7]。本次积石山地震震源浅,造成地表破坏严重,震区属于青藏高原和黄土高原的过渡地带,加之区内土层较厚,海拔相对较高,故地震动能量放大效应极为明显,导致此次地震影响范围较广。此外,该区历史上地质灾害频发,据相关资料统计,1989—2010年,积石山地区发生滑坡灾害50余次,致不同程度的损害[8]。如1989-10-06,白家坪和安家坪沟施工区发生山体滑坡,造成4人死亡。1992-08-01,银川乡张家村魏家阴山社遭暴雨袭击,发生山体滑坡,毁坏耕地257亩。2007年9月3日和12日,吹麻滩镇团结新村阳山住宅区地坝滑塌,1户房屋倒塌,2人死亡。因此,对地质灾害易发区、特别是经历地震后,快速准确获取地震同震滑坡的分布,及时获取地震造成建筑物损毁情况,对指导震后应急救援、灾民安置和恢复重建工作具有重要意义。

为快速摸清甘肃积石山地震同震滑坡分布和建筑物损毁情况,本文采用机器学习、遥感解译和多时相合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)相干性变化等方法,开展了此次地震同震滑坡易发性评估、同震滑坡快速识别和震后房屋损毁情况,并进行了野外验证。在此基础上分析了此次地震同震滑坡的影响因素,为震后救援和灾后重建工作提供重

要的数据支撑。

1 研究区域地质构造背景

2023-12-18甘肃积石山Ms 6.2地震位于甘东南地区,震中100 km范围内平均海拔2 864 m,最大海拔4 987 m(图1)。根据历史资料的震源机制解显示,此次地震为逆冲型破裂。甘东南活动构造区位于中国南北地震带北部,是青藏高原东北缘的一个重要组成区域。受欧亚板块与印度板块的长期挤压作用,该区构造活动强烈,发育着东昆仑断裂、西秦岭北缘断裂、临潭-宕昌断裂、光盖山-迭山断裂、迭部-白龙江断裂、塔藏断裂、岷江断裂、雪山断裂和虎牙断裂等多条深大断裂。

本次地震所处拉脊山断裂带体现为向北东方向突出的弧形断裂,是左旋走滑的西秦岭北缘断裂和右旋走滑的日月山断裂之间的挤压构造区和构造转换带[9]。拉脊山断裂在上述挤压构造背景和青藏高原北东向扩展影响下,活动性质体现为向盆地内的挤压逆冲为主,拉脊山西段受日月山断裂右旋挤压影响,具有一定的走滑分量。断裂活动时代以晚更新世为主,仅局部地段为全新世活动。历史上沿拉脊山南北两侧发生了20余次5级左右中等破坏性地震[9]。此外,震中附近200 km范围内,1900年以来共发生6级以上3次,均为孤立型或主震-余震型地震(图1)。1991—2015年GPS速度场资料显示,拉脊山北缘断裂右旋走滑速率为1~3 mm/a,也有研究表明,拉脊山断裂带存在发生中强地震的构造条件[9]。

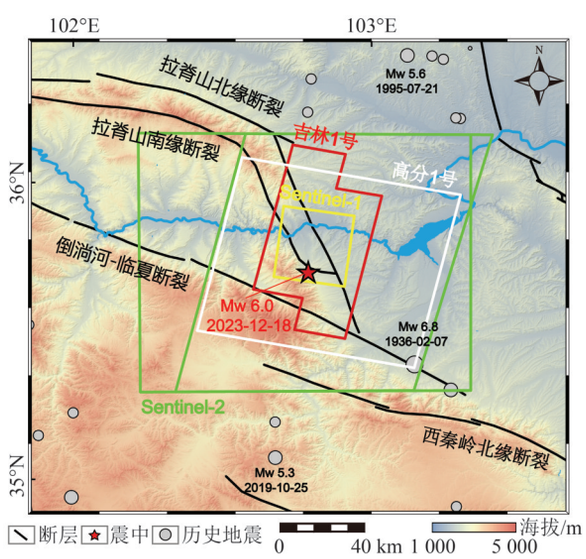


图1 积石山Ms 6.2地震区域构造背景

Fig. 1 Regional Tectonic Setting Map of the Ms 6.2 Jishishan Earthquake

2 数据处理与研究方法

2.1 同震滑坡易发性的快速获取

地震发生后,快速获取地震同震滑坡的空间易发性结果对灾后救援具有重要的应急参考意义。本文滑坡易发性估计采用的滑坡编目包含InSAR探测的活动性滑坡和历史存档滑坡,输入的12个诱发滑坡因子包含高程、坡度、坡向、平面曲率、坡面曲率、地形湿度指数、距断层距离、距河流距离、距道路距离、土地利用、植被归一化指数(normalized difference vegetation index,NDVI)和地震峰值加速度(peak ground acceleration,PGA)。为便于机器学习算法学习高维数据特征,首先利用ArcGIS处理各因子数据,将处理后的因子通过“波段合成”组成多通道数据。然后基于多通道数据,利用支持向量机模型建模训练[10],使用训练好的模型对震区逐像元进行预测,最终得到覆盖整个震区的同震滑坡易发性结果。

2.2 基于光学卫星影像的同震滑坡遥感解译

2023-12-18积石山Ms 6.2地震发生后,中国资源卫星应用中心第一时间提供覆盖灾区的高分一号和高分六号影像,长光卫星技术有限公司提供0.75 m吉林一号影像。获取的卫星影像均需预处理,其中高分一号光学卫星影像的处理流程为:首先对多光谱影像进行辐射定标、大气校正和正射校正(使用12.5 m的数字高程模型(digital elevation model,DEM)进行校正),随后利用相同方法对全色波段影像进行辐射定标和正射校正,然后利用Gram-Schmidt全色锐化图像融合算法对正射校正后的全色波段和多光谱波段进行融合[11],最终获得含4个波段、空间分辨率为2 m的光学卫星影像,充分发挥了高空间分辨率和多波段的优势。吉林一号卫星的处理过程与高分一号卫星预处理过程一致,经处理后最终获得空间分辨率为0.75 m的光学卫星影像。哨兵2号卫星数据下载于Google Earth Engine平台,影像经过了大气改正。使用经过预处理的震前、震后光学卫星影像,在ArcGIS平台通过对比震前、震后影像,对同震滑坡进行人机交互解译,可准确圈定出地震同震滑坡边界。本文解译同震滑坡使用光学卫星影像的原则为:以区域范围内最高空间分辨率影像为主,若出现云层遮挡或地形阴影现象,将采取空间分辨率从高到低的顺序原则,直到光学影像清晰可见为止。震前、震后影像进行对比时,

需选择空间分辨率相近的影像[12]。此次地震发生前,大面积区域被积雪覆盖,地震发生后同震滑坡将搬运积雪覆盖层,产生新的裸土,利用纹理差异,能够有效识别此次地震的同震滑坡。本文使用的震前和震后卫星影像具体信息如表1所示。

表1 本文所使用的数据集

Table 1 Datasets Used in This paper

类型	影像名称	时间	空间分辨率
震前	高分一号	2023-12-18	2 m
	吉林一号	2023-12-18	0.75 m
	Sentinel-2	2023-12-18	10 m
	Sentinel-1 SLC	2022-12-13—2023-12-14	4 m×20 m
震后	高分一号	2023-12-19	2 m
	吉林一号	2023-12-19	0.75 m
	Sentinel-2	2023-12-20	10 m
	Sentinel-1 SLC	2023-12-26	4 m×20 m
DEM	ALOS	2006年	12.5 m

注:SLC(single look complex)即单视复数数据;ALOS(advanced land observing satellite)即先进陆地观测卫星。

2.3 建筑物损毁分析

建筑物损毁是地震导致人员伤亡最主要的因素之一[13-14]。因此,震后及时获取建筑物损毁的分布信息和损毁程度可有效指导地震救援以及灾后重建工作[15-17]。为及时获取震区地震导致的建筑物损毁情况,即建筑物损毁代理图(building damage proxy map, BDPM),本研究采用融合同质合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)像素的相干性评估[18-20]和直方图匹配技术[21]的多时相相干性变化检测方法[22]。首先,获取了震后1景和震前30景Sentinel-1 SAR数据作为数据源;然后利用同质SAR像素的相干性评估和直方图匹配技术获取震前和震后影像对的相干性(前者用于保持相干性图分辨率,降低评估偏差;后者用于削弱相邻基线不一致产生的误差),并求取同震相干差(最靠近震前与包含地震影响的同震相干性之差)及震前相干差[20];接着,基于处理所得震前相干差,采用统计分析方式获取非地震因素导致的相干性变化,并将其从同震相干差中掩膜去除[23];最后,采用世界人类居住点足迹2019建筑物边界数据[24]掩膜提取建筑物区域信息,获取此次地震的BDPM。

3 结 果

3.1 同震滑坡易发性空间分布

积石山地震发生后,基于距震中50 km范围内的164处活动性滑坡[25]、222处历史存档滑坡数据和美国地质调查局提供的2023年积石山地震的PGA(见图2),利用支持向量机模型获取了此次地震同震滑坡易发性的空间分布。通过自然间断法将积石山Ms 6.2地震同震滑坡空间分布概率划分为极高、高、中等、低和极低5个等级(见图3)。经统计发现,此次地震同震滑坡的极高、高、中等、低和极低易发区面积分别为290.01 km^2、276.80 km^2、412.72 km^2、891.43 km^{2}和7495.01 km^2,分别占研究区域总面积的3.10%、2.96%、4.41%、9.52%和80.02%。如图3所示,积石山Ms 6.2地震同震滑坡在震中东北方向和东南方向(包括黄河区段两岸)易发性概率最大,特别是积石山县刘集村、柳沟村、寨子沟村、关家川乡和官亭镇等区域。需要说明的是,本文滑坡易发性结果仅作为斜坡稳定性整体变化的应急参考。

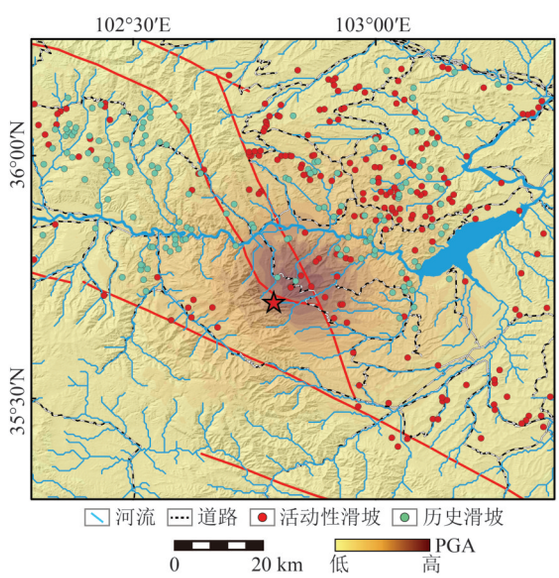


图2 积石山Ms 6.2 PGA和已有滑坡编目分布

Fig. 2 PGA of the Ms 6.2 Jishishan Earthquake and Distribution of Catalogued Landslides

3.2 积石山地震同震滑坡编目

基于震前和震后的吉林一号、高分一号、Sentinel-2光学卫星影像,对积石山地震的同震滑坡开展了人机交互解译工作。如图4所示,共解译地震同震滑坡3 767处,多为黄土滑坡。由于光学卫星影像分辨率的局限性和山体阴影的遮挡,部分小规模滑坡和阴影遮挡区域滑坡未能解译。同震滑坡空间分布特征显示(见图4),此次地震同震滑坡整体分布在震中东北方向,大多集中在柳沟村、关家川乡、中川乡、何家岭和峡口村的沟壑两侧,多为小型的黄土崩塌和滑坡。此外,统计滑坡面积(图4)发现,滑坡面积基本分布在0~0.02 km^{2}范围内,最大面积为0.5 km^2,总面积约为

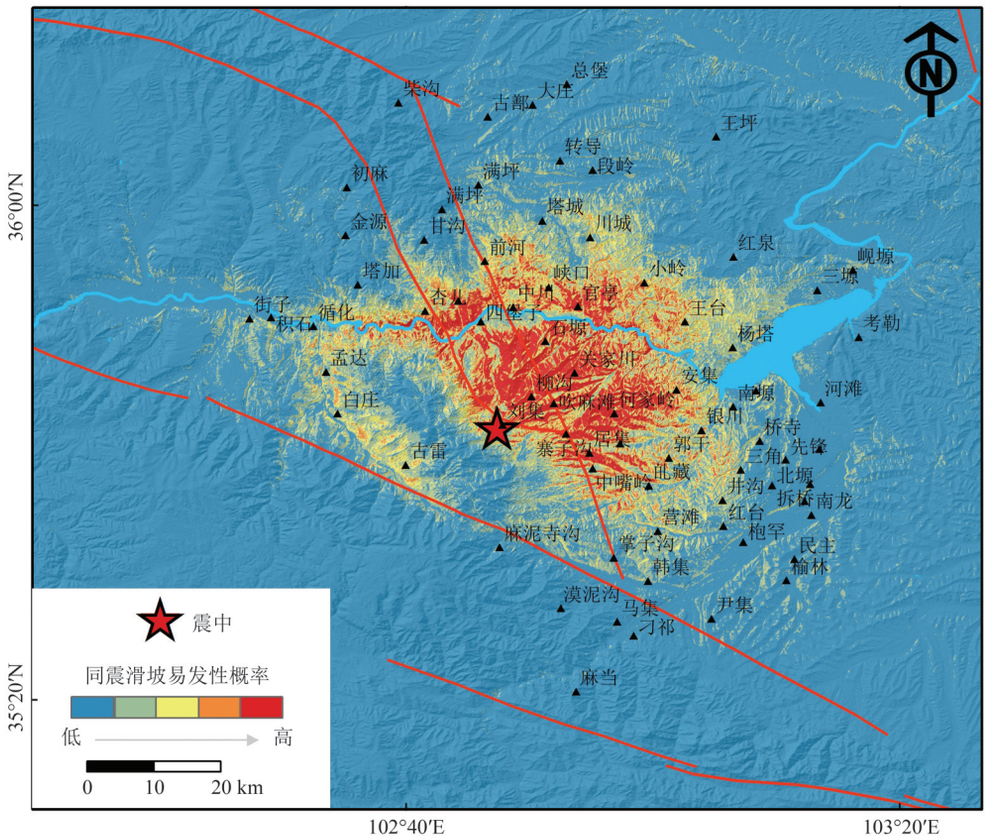


图3 积石山Ms 6.2地震同震滑坡易发性概率图

Fig. 3 Landslide Susceptibility Map of the Ms 6.2 Jishishan Earthquake

9.67 km^2,表明此次地震同震滑坡主要以小滑坡为主。积石山县降雨时间主要集中在7月—9月,加之农田灌溉和耕种等原因使得黄土侵蚀严重,台塬周边形成很多沟壑且地形临空,在地震的影响下则易发生失稳,典型的例子是中川乡的同震滑坡大多集中在沟壑两侧。

值得注意的是,除了地震造成的大量小规模滑坡外,此次地震在青海省海东市民和县中川乡金田村和草滩村引发了地震滑坡-泥流,大量房屋被厚达数米的淤泥包围掩埋(见图5),导致多人伤亡、失联。为追溯该滑坡-泥流区域的历史形变,本文基于震前2016年9月至2022年3月的升、降轨Sentinel-1数据,利用通用型大气改正在线服务辅助下的InSAR Stacking方法获取滑坡-泥流区域年形变速率。如图5所示,升、降轨年形变速率结果表明,滑坡-泥流区域在2016年9月至2022年3月整体呈稳定状态,仅在物源区探测到局部形变,形变速率约20 mm/a。初步判断,发生这一泥流灾害的可能原因是地震动过程导致该区域富含地下水的黄土台塬液化。据野外考察和光学卫星影像解译可知,中川乡地震滑坡-泥流的物源区面积约12万m^2,流通堆积区面积约31万m^2,泥流最远运动距离达3.1 km。

3.3 同震滑坡野外考察验证

快速获取积石山地震的同震滑坡编目后,研究团队积极组织成员进行野外考察,以验证同震滑坡的解译精度。此次实地考察共验证同震滑坡59处(如图6所示),滑坡区域与基于光学遥感建立的滑坡编目(如图4所示)一致。值得注意的是,考察途中还发现了多处小规模黄土滑坡,属于漏检的同震滑坡,漏检的主要原因为:(1)光学卫星影像受限于空间分辨率不足以识别这种小型滑坡;(2)山体阴影区影像无纹理特征,因而无法识别阴影遮挡区域的滑坡。

3.4 地震建筑物损毁识别结果

积石山地震震区的BDPM如图7所示,图中由绿到红表示建筑物受损程度越严重。BDPM结果显示距震中较近的刘集乡、石塬镇、柳沟乡和吹麻滩镇建筑物存在不同程度损毁,但建筑物损毁最为严重区域为震中以北15 km的大河家镇和19 km的官亭镇,这可能与地震波传播方向和黄土放大效应有关。

研究团队通过实地调查获取震区建筑物损毁情况,对BDMP结果的准确性进行验证。图8展示了5处建筑物的BDMP结果和野外核查照片,结果表明BDPM结果与实际建筑物损毁相吻

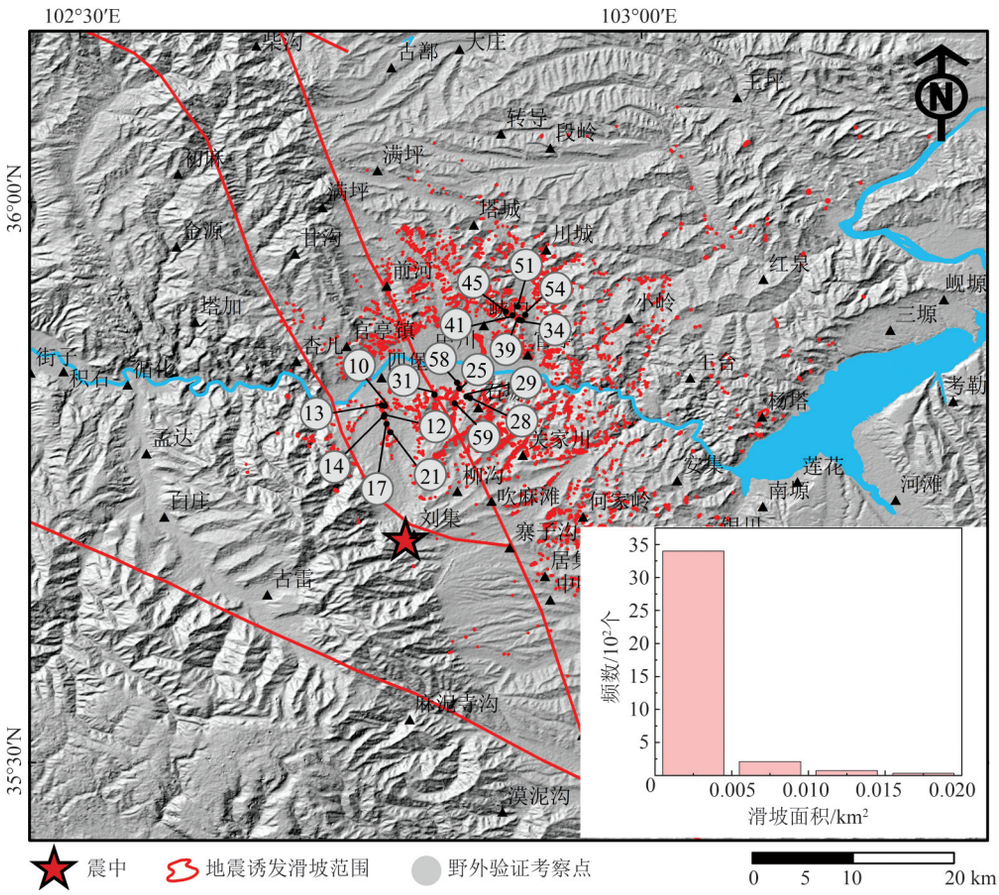


图 4　积石山 Ms 6.2 地震同震滑坡分布

Fig. 4　Distribution of Coseismic Landslides of the Ms 6.2 Jishishan Earthquake

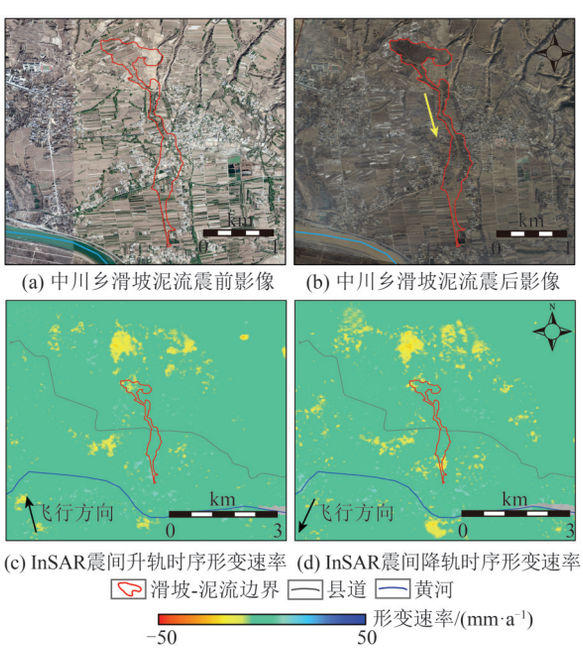


图 5　中川乡滑坡泥流特征和 InSAR 震间时序形变速率结果

Fig. 5　Geomorphic Characteristics and InSAR Derived Interseismic Deformation Rate Maps of Zhongchuan Liquefied Earthflow

合,该技术可作为辅助决策信息应用于应急救援和灾后重建工作。

4　讨　论

此次积石山地震诱发了大量黄土同震滑坡,这类滑坡主要受地震、地形地貌和人类活动等因素作用。本文收集了地震烈度、距断层距离、高程、坡度、坡向、地表粗糙度、NDVI、距水系距离和距道路距离 9 个因子,通过统计各因子中同震滑坡面积与滑坡分级面密度(因子分级内滑坡面积/因子分级面积),探讨分析了地震、地形地貌和人类活动这 3 类因素的影响。此外,讨论了遥感/野外识别的真实同震滑坡与基于历史滑坡库和 PGA 快速模拟数据的同震滑坡易发性预测结果的符合程度,以阐明同震滑坡易发性预测在地震地质灾害应急响应中的作用。

4.1　地震因素对积石山地震同震滑坡的影响

距断层距离和地震烈度均与地震破裂和能量传播特征有关,影响着同震滑坡的分布,因此选取距断层距离和地震烈度为地震因素。本文在断层沿线设置间隔 1 km 的缓冲带;采用应急管理部发布的地震烈度图,地震烈度分为Ⅷ度、Ⅶ度和Ⅵ度。如图 9 所示,距断层距离的滑坡分级面密度可以清晰地发现此次同震滑坡随着距断

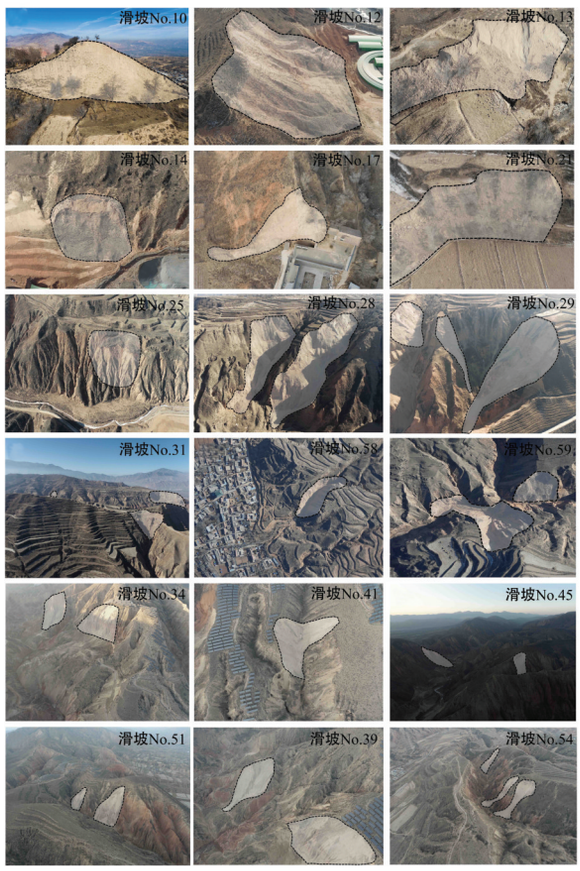


图6 积石山Ms 6.2地震同震滑坡野外考察结果

Fig. 6 Field Investigation Results of Coseismic Landslides After the Ms 6.2 Jishishan Earthquake

层距离的增加而减少;通过地震烈度与同震滑坡之间的统计分析发现,同震滑坡主要集中发生在Ⅷ烈度区,且随着地震烈度的减弱,同震滑坡的分级面密度也随之降低。

4.2 地形地貌和人类活动因素对积石山地震同震滑坡的影响

本文选取高程、坡度、坡向、地表粗糙度、NDVI和距水系距离6个因子作为地形地貌因子,距道路距离作为人类活动因子,其中高程、坡度、坡向、地表粗糙度均由12.5 m的DEM数据产生。采用空间统计分析方法将高程分为8类,间隔100 m;坡度分为10类,间隔5°;坡向分为8类,间隔45°;地表粗糙度分为8类,间隔0.1;NDVI分为11类,间隔0.02;距水系距离分为16类,间隔200 m;距道路距离分为9类,间隔1 km。

如图10所示,此次地震同震滑坡主要集中分布在1 900~2 200 m的高程范围内,面积约为6.73 km^2,占总面积的69.7%;坡度主要集中在20°~40°,面积约为6.79 km^2,占滑坡总面积的70.2%。坡向玫瑰图(图10(c))显示同震滑坡主要集中在SE方向,面积约为4.22 km^2,占滑坡总面积的43.7%。此次积石山地震的同震滑坡方向大致平行于发震断层走向,即与断层的滑动方向垂直,这一方向效应与玉树和九寨沟震例类似[26-27]。图10(d)显示地表粗糙度为1~1.3范围内同震滑坡面积(9.01 km^2)占滑坡总面积的93.2%,表明地表粗糙度越低,反而滑坡易于发生。图10(e)显示NDVI为0.09~0.15范围内同震滑坡面积约为8.06 km^2,占滑坡总面积的83.4%。低NDVI表明积石山区域植被覆盖较少,土壤水分稀疏,土质疏松,加之积石山地区以黄土为主,导致地震动过程中容易诱发滑坡。如图10(f)所示,距水系距离0~2.2 km范围内同震滑坡面积(8.81 km^2)占滑坡总面积的91.1%,说明积石山地区河流侵蚀作用对同震滑坡的影响显著。如图11所示,距离道路越近,同震滑坡的数量越多,表明人类活动对黄土同震滑坡的影响越大。此次地震同震滑坡大部分集中在距道路距离0~5 km范围,滑坡面积约为8.37 km^2,占滑坡总面积的86.6%。综上所述,此次积石山地震的同震滑坡在被地震动直接触发的过程中同时受到地形地貌和人类活动的综合影响。

4.3 同震滑坡易发性结果精度分析

在通过遥感解译识别同震滑坡之后,可以对同震滑坡易发性结果进行精度分析。如图12所示,通过提取此次地震同震滑坡对应的易发性概率值,发现极高易发区和高易发区分布2 431处同震滑坡,占同震滑坡总数的64.5%。这说明将此次地震PGA作为关键因素约束同震滑坡易发性模型保障了同震滑坡易发性概率的准确度,这对此后类似地震应急响应和应急决策具有重要应用意义。

5 结 语

2023-12-18,甘肃积石山发生的Ms 6.2地震诱发了大量黄土同震滑坡。本文首先利用支持向量机算法获取了滑坡易发性概率分布图,同时基于多源光学卫星影像实现了积石山地震同震滑坡的应急识别,并结合地震、地形地貌和人类活动因素进行了同震滑坡影响因素研究。此外,利用多时相InSAR相干性变化探测了此次地震的BDPM。取得的主要研究成果如下:

1)利用支持向量机快速获取了2023年积石山地震同震滑坡易发性概率,结果表明积石山地震同震滑坡在震中东北方向和东南方向(包括黄河区段两岸)易发性概率最大,特别是积石山县刘集村、柳沟村、寨子沟村、关家川乡和官亭镇等区域。现场调查结果证明,该易发性概率结果与实际情况较为吻合。

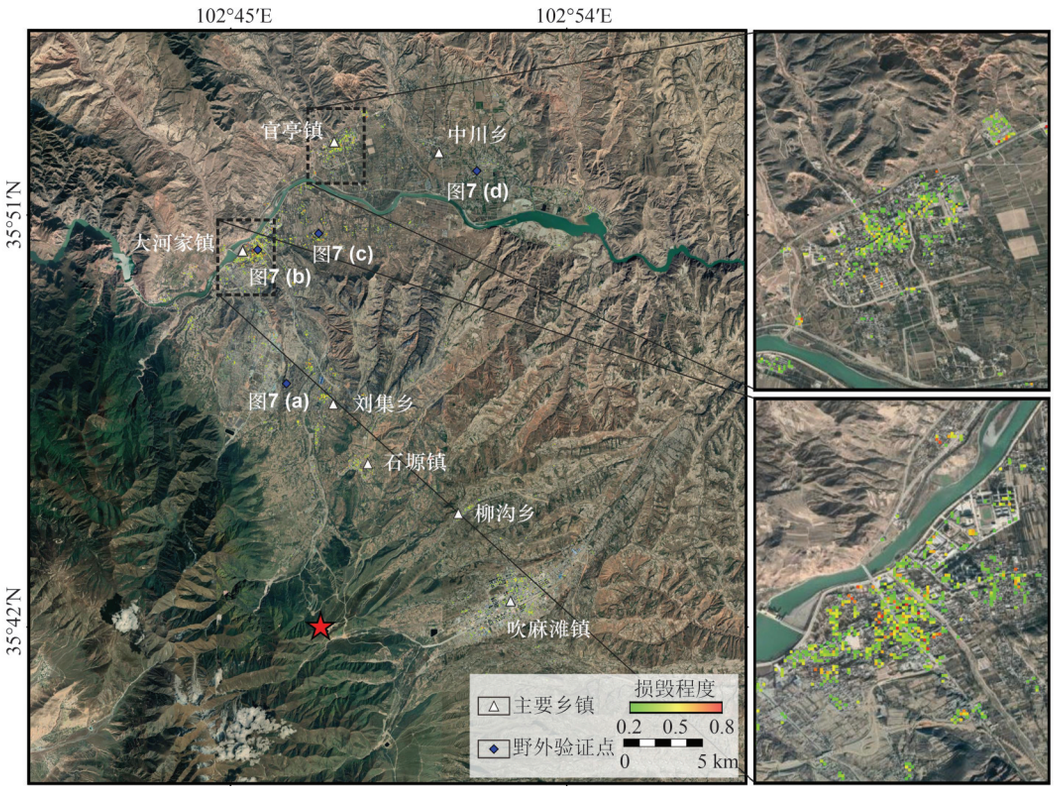


图 7　积石山 Ms 6.2 地震建筑物损毁代理图

Fig. 7　BDPM Results of the Ms 6.2 Jishishan Earthquake



(a) 建筑物1　(b) 建筑物2　(c) 建筑物3　(d) 建筑物4

图 8　积石山 Ms 6.2 地震建筑物损毁野外核查结果

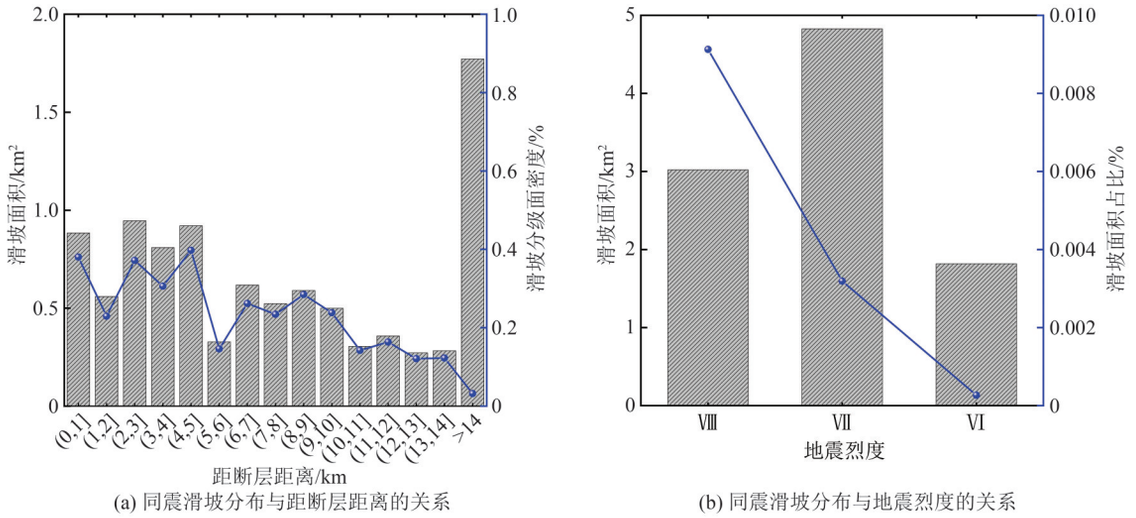
Fig. 8　Results of Field Inspection of Earthquake Damage Buildings in the Ms 6.2 Jishishan Earthquake

2)对震后光学卫星影像进行同震滑坡识别,共解译同震滑坡3 767处,总面积9.67 km^2。大多集中在柳沟村、关家川乡、中川乡、何家岭和峡口村的沟壑两侧,多为黄土滑坡。通过第一时间野外考察其中59处同震滑坡,验证了遥感解译滑坡的准确性。

3)同震滑坡影响因子的空间分析结果表明,此次地震的同震滑坡受地震动大小、地形地貌和人类活动的综合影响,主要发育在高程1 900～2 200 m范围,坡度在20°～40°之间,坡向主要集中在SE方向,与发震断层的滑动方向垂直。

4)BDPM结果表明,距震中较近的刘集乡、石塬镇、柳沟乡和吹麻滩镇建筑物存在不同程度损毁,但损毁最严重的区域位于震中以北15 km的大河家镇和19 km的官亭镇。该结果与野外核查结果较为吻合,可作为辅助决策信息应用于灾后重建工作。

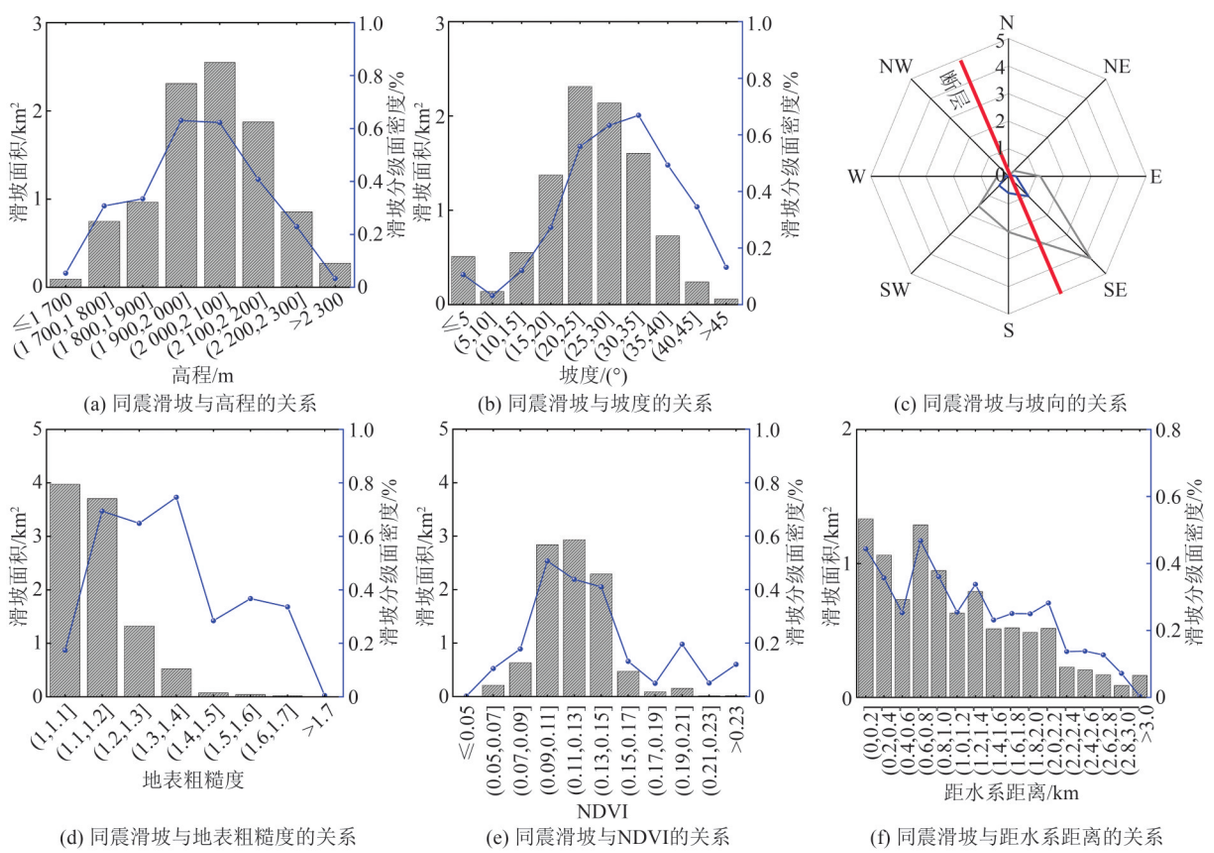
此次积石山地震造成了严重的地表破坏和人民生命财产损失,以6.2震级触发了超过3 700处滑坡,与2022年四川泸定6.8级地震地质灾害情况相当。同震滑坡多为黄土滑坡,体现了明显的黄土放大效应。本文通过综合使用机器学习、多源遥感



(a) 同震滑坡分布与距断层距离的关系　　(b) 同震滑坡分布与地震烈度的关系

图9　积石山Ms 6.2地震同震滑坡分布与地震因素的关系

Fig. 9　Relationships Between the Distribution of Coseismic Landslides and Earthquake Factors Induced by the Ms 6.2 Jishishan Earthquake



(a) 同震滑坡与高程的关系　(b) 同震滑坡与坡度的关系　(c) 同震滑坡与坡向的关系

(d) 同震滑坡与地表粗糙度的关系　(e) 同震滑坡与NDVI的关系　(f) 同震滑坡与距水系距离的关系

图10　积石山Ms 6.2地震同震滑坡分布与地形地貌的关系

Fig. 10　Relationship Between the Distribution of Coseismic Landslides and Multiple Terrain Factors Induced by the Ms 6.2 Jishishan Earthquake

解译、野外考察和InSAR相干性变化检测等方法开展了应急响应,详细勘察了同震滑坡和建筑物损毁的情况,为震区灾后重建工作提供了基础数据支撑,对黄土地区地震地质灾害的研究具有重要的意义。

致谢:感谢中国资源卫星应用中心提供的高分1号卫星影像,长光卫星技术有限公司提供的吉林1号卫星影像,以及美国地质调查局提供的PGA数据,同时感谢欧洲空间局提供的Sentinel-1雷达影像、Sentinel-2光学影像和国家冰川冻土沙漠科学数据中心提供的12.5 m的DEM数据和历史存档滑坡数据。

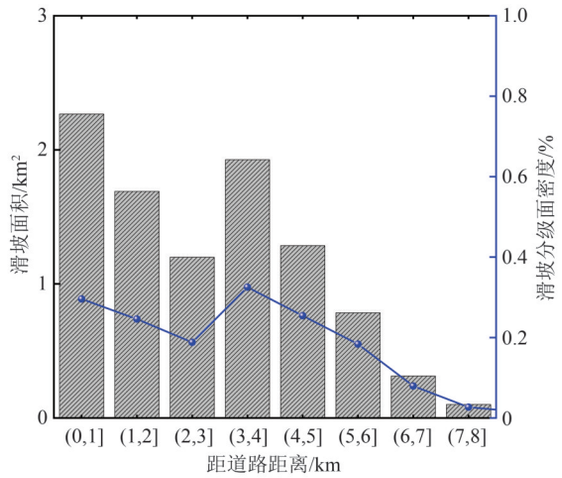


图 11　积石山 Ms 6.2 地震同震滑坡分布与人类活动因素的关系

Fig. 11　Relationship Between the Distribution of Coseismic Landslides and Human Activity Factors Induced by the Ms 6.2 Jishishan Earthquake

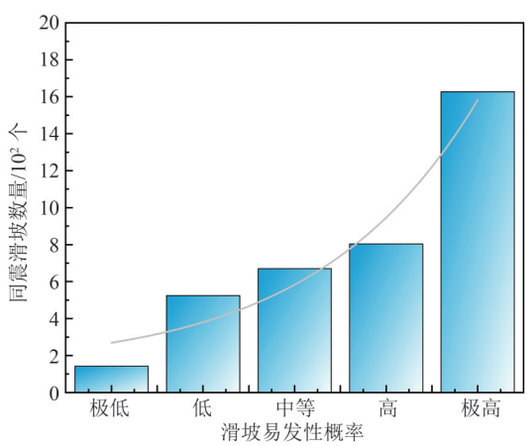


图 12　积石山地震同震滑坡易发性等级对应的同震滑坡数量

Fig. 12　Number of Coseismic Landslides Corresponding to the Susceptibility Level of the Ms 6.2 Jishishan Earthquake

参　考　文　献

[1] 许强, 黄润秋. 5.12汶川大地震诱发大型崩滑灾害动力特征初探[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 721-729.
XU Qiang, HUANG Runqiu. Kinetics Charateristics of Large Landlides Triggered by May 12th Wenchuan Earthquake[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2008, 16(6): 721-729.

[2] 黄润秋. 汶川8.0级地震触发崩滑灾害机制及其地质力学模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1239-1249.
HUANG Runqiu. Mechanism and Geomechanical Modes of Landslide Hazards Triggered by Wenchuan 8.0 Earthquake[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(6): 1239-1249.

[3] 许冲, 田颖颖, 马思远, 等. 1920年海原8.5级地震高烈度区滑坡编录与分布规律[J]. 工程地质学报, 2018, 26(5): 1188-1195.
XU Chong, TIAN Yingying, MA Siyuan, et al. Inventory and Spatial Distribution of Landslides in Ⅸ-Ⅺ High Intensity Areas of 1920 Haiyuan(China) M 8.5 Earthquake[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(5): 1188-1195. ()

[4] 王兰民, 郭安宁, 王平, 等. 1920年海原大地震震害特征与启示[J]. 城市与减灾, 2020, (6): 43-53.
WANG Lanmin, GUO Anning, WANG Ping, et al. Characteristics and Revelation of Great Haiyuan Earthquake Disaster[J]. *City and Disaster Reduction*, 2020, (6): 43-53.

[5] XU C, XU X W, YAO X, et al. Three (Nearly) Complete Inventories of Landslides Triggered by the May 12, 2008 Wenchuan Mw 7.9 Earthquake of China and Their Spatial Distribution Statistical Analysis[J]. *Landslides*, 2014, 11(3): 441-461.

[6] 殷跃平. 汶川八级地震地质灾害研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(4): 433-444.
YIN Yueping. Researches on the Geo-Hazards Triggered by Wenchuan Earthquake, Sichuan[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2008, 16(4): 433-444.

[7] LAN H X, LI L P, ZHANG Y S, et al. Risk Assessment of Debris Flow in Yushu Seismic Area in China: A Perspective for the Reconstruction[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2013, 13(11): 2957-2968.

[8] 甘肃省积石山县志编辑部. 积石山县保安族东乡族撒拉族自治县志1989—2010年[M]. 北京:红旗出版社, 2019.
Jishishan County Annals Editorial Department of Gansu Province. Annals of Baoan Dongxiang Salar Autonomous County, Jishishan County, 1989—2010[M]. Beijing: Hongqi Press, 2019.

[9] 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.

[10] HUANG W B, DING M T, Li Z H, et al. Landslide Susceptibility Mapping and Dynamic Response Along the Sichuan-Tibet Transportation Corridor Using Deep Learning Algorithms[J]. *Catena*, 2023, 222: 106866.

[11] AIAZZI B, BARONTI S, SELVA M, et al. Enhanced Gram-Schmidt Spectral Sharpening Based

on Multivariate Regression of MS and Pan Data [C]//IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing, Denver, USA, 2006.

[12] 陈博, 李振洪, 黄武彪, 等. 2022年四川泸定Mw 6.6地震诱发地质灾害空间分布及影响因素[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(6): 971-985.
CHEN Bo, LI Zhenhong, HUANG Wubiao, et al. Spatial Distribution and Influencing Factors of Geohazards Induced by the 2022 Mw 6.6 Luding(Sichuan, China) Earthquake [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2022, 44(6): 971-985.

[13] DAL ZILIO L, AMPUERO J P. Earthquake Doublet in Türkiye and Syria [J]. *Communications Earth & Environment*, 2023, 4(71): 1-4.

[14] NADDAF M. Türkiye - Syria Earthquake: What ScientistsKnow[J]. *Nature*, 2023, 614(7948): 398-399.

[15] HASANLOU M, SHAH-HOSSEINI R, SEYDI S T, et al. Earthquake Damage Region Detection by Multitemporal Coherence Map Analysis of Radar and Multispectral Imagery [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(6): 1195.

[16] GE P L, GOKON H, MEGURO K. A Review on Synthetic Aperture Radar-Based Building Damage Assessment in Disasters[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 240(6): 111693.

[17] DONG L G, SHAN J. A Comprehensive Review of Earthquake-Induced Building Damage Detection with Remote Sensing Techniques[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, 84: 85-99.

[18] JIANG M, DING X L, HANSSEN R F, et al. Fast Statistically Homogeneous Pixel Selection for Covariance Matrix Estimation for Multitemporal InSAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(3): 1213-1224.

[19] JIANG M, YONG B, TIAN X, et al. The Potential of More Accurate InSAR Covariance Matrix Estimation for Land Cover Mapping[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 126: 120-128.

[20] PARIZZI A, BRCIC R. Adaptive InSAR Stack Multilooking Exploiting Amplitude Statistics: A Comparison Between Different Techniques and Practical Results[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(3): 441-445.

[21] YUN S H, FIELDING E J, WEBB F H, et al. Damage Proxy Map from Interferometric Synthetic Aperture Radar Coherence: US9207318B2[P]. 2015-12-08.

[22] LIU H H, SONG C, LI Z H, et al. A New Method for the Identification of Earthquake-Damaged Buildings Using Sentinel-1 Multitemporal Coherence Optimized by Homogeneous SAR Pixels and Histogram Matching[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2024, 17: 7124-7143.

[23] 刘振江, 韩炳权, 刘海辉, 等. InSAR数据约束下的2023年赫拉特地震序列发震断层探讨及其建筑物损毁评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(5): 722-733.
LIU Zhenjiang, HAN Bingquan, LIU Haihui, et al. Discussion of the Seismogenic Fault of the 2023 Herat Earthquake Sequence and Its Building Damage Assessment Constrained by Radar Interferometry [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(5): 722-733.

[24] MARCONCINI M, METZ- MARCONCINI A, ESCH T, et al. Understanding Current Trends in Global Urbanisation—The World Settlement Footprint Suite[J]. *GI_Forum*, 2021,(1): 33-38.

[25] DU J T, LI Z H, SONG C, et al. InSAR-Based Active Landslide Detection and Characterization Along the Upper Reaches of the Yellow River[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2023, 16: 3819-3830.

[26] XU C, XU X W, YU G H. Landslides Triggered by Slipping-Fault-Generated Earthquake on a Plateau: An Example of the 14 April 2010, Ms 7.1, Yushu Earthquake, China[J]. *Landslides*, 2013, 10(4): 421-431.

[27] FAN X M, SCARINGI G, XU Q, et al. Coseismic Landslides Triggered by the 8th August 2017 Ms 7.0 Jiuzhaigou Earthquake (Sichuan, China): Factors Controlling Their Spatial Distribution and Implications for the Seismogenic Blind Fault Identification[J]. *Landslides*, 2018, 15(5): 967-983.