

云南鲁甸 M_s 6.5级地震震后滑坡的时空分异特征

字汝芬, 刘佳佳, 王宇鸿, 段平, 李佳

Spatio-temporal differentiation of landslide after the M_s 6.5 Ludian earthquake in Yunnan Province

ZI Rufen, LIU Jiajia, WANG Yuhong, DUAN Ping, and LI Jia

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202310029>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

辽宁抚顺西露天矿地质灾害时空分布特征及影响因素分析

Spatial-temporal distribution characteristics and influencing factors of geological disasters in the open-pit mining area of western Fushun, Liaoning Province

靳鹏, 申力, 韩晓极, 郭霁, 王毛毛 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(3): 68-76

云南鲁甸地震红石岩堰塞湖右岸特高边坡综合监测及变形特征分析

Comprehensive monitoring and deformation analysis of extra high slope on the right bank of Hongshiyen Dammed Lake in Ludian Earthquake

郭延辉, 杨溢, 高才坤, 杨志全 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 30-37

广东佛山市高明区三洲盆地岩溶塌陷发育特征与时空分布规律

Characteristics and spatial-temporal distribution law of karst collapse in Sanzhou basin in Gaoming District of Foshan City, Guangdong Province

韩庆定, 罗锡宜, 易守勇, 邹杰 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 131-139

青海省滑坡崩塌泥石流灾害时空分布特征

Temporal and spatial characteristics of landslide, rockfall and debris flow disasters in Qinghai Province during the period

魏正发, 曹小岩, 张俊才, 应忠敏, 严慧, 魏赛拉加 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 134-142

甘肃积石山 M_s 6.2级地震的同震地质灾害基本特征及风险防控建议

Basic characteristics of co-seismic geological hazards induced by Jishishan M_s 6.2 earthquake and suggestions for their risk control

王立朝, 侯圣山, 董英, 铁永波, 张鸣之, 杨旭东, 肖锐铨, 刘明学, 冯振, 张永军, 王仲复 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(3): 108-118

四川长宁“6·17”地震诱发的次生地质灾害类型及其发育特征

Types and their characteristics of geological hazards triggered by “6·17” earthquake in Changning, Sichuan Province

廖勇, 徐闯, 陈军, 周世文 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 77-83



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202310029

字汝芬, 刘佳佳, 王宇鸿, 等. 云南鲁甸 $M_s6.5$ 级地震震后滑坡的时空分异特征[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(1): 73-83.
ZI Rufen, LIU Jiajia, WANG Yuhong, et al. Spatio-temporal differentiation of landslide after the $M_s6.5$ Ludian earthquake in Yunnan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(1): 73-83.

云南鲁甸 $M_s6.5$ 级地震震后滑坡的时空分异特征

字汝芬¹, 刘佳佳², 王宇鸿³, 段 平¹, 李 佳¹

(1. 云南师范大学地理学部, 云南 昆明 650500; 2. 中国能源建设集团云南省电力设计院有限公司, 云南 昆明 650051; 3. 滇西应用技术大学地球科学与工程学院, 云南 大理 671009)

摘要: 2014 年 8 月 3 日云南鲁甸发生的 $M_s6.5$ 级地震触发了大量滑坡, 受强烈地震触发的滑坡震后恢复速度慢、恢复难度大且具有扩大复发的可能, 会对道路、水体、生态环境造成长期影响, 因此, 探究其长时间时空分异具有必要性。以受地震影响的 314 km² 为研究区域, 首先基于 ENVI 深度学习方法提取震后滑坡并编制其多时相数据清单, 在此基础上, 从滑坡时空分布特征、滑坡时空面积变化特征以及滑坡活动演化进行时空分异分析。结果表明: (1) 地震后, 滑坡数量和面积急剧增加, 在随后的 8 a 时间内, 总体呈现逐渐减少趋势, 地震触发滑坡以面积小于 0.01 km² 的小型滑坡为主, 集中分布于河谷两侧, 同时距震中 2 000 m、地震烈度 IX 级范围内分布较为明显; (2) 随时间推移, 震后滑坡活动率总体表现为逐渐减弱趋势, 截至 2022 年 7 月, 地震触发滑坡只有 6.08% 的滑坡仍处于活动状态, 表明地震对滑坡的影响已经逐渐减弱; (3) 地震后滑坡的活动演化可以分为 3 个阶段: 滑坡强活动期 (2014 年 8 月—2016 年 7 月)、中等活动期 (2016 年 8 月—2021 年 8 月)、弱活动期 (2021 年 9 月—2022 年 7 月)。

关键词: 鲁甸地震; 震后滑坡; 时空分布; 面积变化; 演化特征

中图分类号: P642.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2025)01-0073-11

Spatio-temporal differentiation of landslide after the $M_s6.5$ Ludian earthquake in Yunnan Province

ZI Rufen¹, LIU Jiajia², WANG Yuhong³, DUAN Ping¹, LI Jia¹

(1. Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China; 2. China Energy Engineering Group Yunnan Electric Power Design Institute Co. Ltd., Kunming, Yunnan 650051, China; 3. College of Geosciences and Engineering, West Yunnan University of Applied Sciences, Dali, Yunnan 671009, China)

Abstract: A large number of landslides were triggered by the $M_s6.5$ magnitude earthquake that occurred in Ludian, Yunnan Province, on August 3, 2014. Landslides triggered by strong earthquakes exhibit slow post-earthquake recovery, high recovery difficulty, and tend to recur and expand, which can have long-term impacts on roads, water bodies, and ecological environments. Therefore, it is necessary to explore their long-time spatial and temporal variability. Taking the 314 km² area affected by the earthquake as the study area, post-earthquake landslides were first extracted and a multi-temporal data list was

收稿日期: 2023-10-22; 修订日期: 2024-03-13

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41961061); “兴滇英才支持计划”项目 (YNWR-QNBJ-2020-048; YNWR-QNBJ-2020-103); 云南省地方本科高校基础研究联合专项 (202101BA070001-075)

第一作者: 字汝芬 (1997—), 女, 云南鹤庆人, 地图学与地理信息系统专业, 硕士, 主要从事滑坡灾害遥感监测与评估。

E-mail: 18387279905@163.com

通讯作者: 李 佳 (1984—), 女, 湖北公安人, 地图学与地理信息系统专业, 博士, 教授, 主要从事滑坡灾害遥感监测与评估。

E-mail: keguigiser@163.com

compiled using the ENVI deep learning method. Based on this, the spatial-temporal differentiation analysis was carried out focusing on the spatio-temporal distribution characteristics of landslides, changes in spatio-temporal area, and the evolution of landslide activities. The results show that: (1) following the earthquake, the number and area of landslides increased dramatically, gradually decreasing over the subsequent 8 years. Earthquake-triggered landslides were primarily small-scale, with an area of less than 0.01 km^2 , concentrated on both sides of the river valley, and distributed more prominently within 2 000 meters from the epicenter and within seismic intensity IX; (2) over time, the post-earthquake landslide activity rate generally showed a gradual weakening trend, with only 6.08% of the earthquake-triggered landslides still active as of July 2022, indicating a gradual weakening of the earthquake's impact on landslides; (3) the activity evolution of post-earthquake landslides can be divided into three phases: the period of strong landslide activity (August 2014-July 2016), the period of moderate activity (August 2016-August 2021), and the period of weak activity (September 2021-July 2022).

Keywords: Ludian earthquake; post-earthquake landslide; spatio-temporal distribution; area change; evolutionary characteristics

0 引言

地震震动会导致地表裂缝、土壤疏松,在降水、人类活动等因素影响下,震后极易发生滑坡。通常情况下,震后滑坡数量显著增多的现象要延续相当长的一段时间,直到随着地震灾区生态和地质环境的逐渐恢复,才会显著降低并恢复到震前水平^[1-2]。因此,对地震后滑坡的长时序时空分异特征进行分析,对于震后长期恢复、土地规划以及地震灾害防治可以起到一定的指示作用。

众多学者对地震触发的同震滑坡进行了研究,如汶川地震^[3]、鲁甸地震^[4-6]、2015年尼泊尔地震^[7]、九寨沟地震^[8-9]、泸定地震^[10-12]等,研究多关注同震滑坡数据清单建立、同震滑坡空间分布、易发性预测、影响因子敏感性研究等。虽然同震滑坡相关研究取得了一定的进展,但不能全方位地描述震后滑坡的整体变化情况。受地震触发的滑坡会表现出不同的特征^[13],如滑坡数量、强度、分布特征变化等,地震引起的岩体松动、地表破裂、植被破坏等都影响着滑坡的时空分布规律^[14],因此,在关注同震滑坡灾害的同时更应该关注地震后滑坡的长期分异规律^[15]。目前,震后滑坡的时空分异规律相关研究还不丰富,仍处于案例累计阶段且主要以强震滑坡案例为主,如1999年台湾集集地震^[16]、2005年克什米尔地震^[17]、2008年汶川地震^[18]等。同时,由于历史强震典型案例的局限性以及滑坡数据清单的缺乏,导致地震后滑坡的长时序时空分异规律研究还未形成完整体系,因此,为了更深入地了解地震后滑坡随时间、空间的长期分异规律,探究地震及震后滑坡的时空分异特征,还需要积累更多的地震案例和研究经验。综上所述,加强震后滑坡的时空分异特征研究对进一步了解震

后滑坡活动效应和稳定性具有重要意义。

2014年8月3日,中国云南省鲁甸县发生 $M_s 6.5$ 级地震,地震以 $27.1^\circ\text{N}, 103.3^\circ\text{E}$ 为震源中心,造成617人死亡,112人失踪,3 143人受伤,22.97万人紧急转移安置,同时,地震至少触发了1 024处面积大于 100 m^2 的滑坡。震级虽为6.5级,但其触发的大量滑坡造成的损失甚至超过了很多大于7.0级的地震^[19]。基于此,本文以鲁甸 $M_s 6.5$ 级地震为研究对象,以多时相高分遥感影像为数据源,首先构建长时序的震后滑坡数据清单,在此基础上,从滑坡数量及规模对滑坡时空分布特征角度进行探索;再以2014年8月3日鲁甸 $M_s 6.5$ 级地震触发的同震滑坡为比较基线,以扩大滑坡、新增滑坡和恢复区域为研究指标进行震后滑坡时空面积变化的分析;最后,对震后8 a时间内震后滑坡的活动演化进行分析^[20-21]。

1 研究区与数据

1.1 研究区

2014年8月3日的鲁甸 $M_s 6.5$ 级地震是近年来云南省危害较高的一次地震,不仅造成极大的人员伤亡,而且触发了大量的滑坡。鲁甸地震发生于包谷垭—小河断裂带(BXF)以及西鱼河—昭通断裂带(XZF),地震灾区最高烈度为IX度,涉及IX级、VIII级、VII级、VI级共4个等级,等震线长轴总体呈北北西走向。根据地震烈度及以往研究成果,以鲁甸地震后长时序序列滑坡为研究对象,选取共 314 km^2 作为本次研究区范围(图1)。研究区涉及鲁甸县及巧家县的部分区域,包括玄武岩、白云岩、石灰岩等不同类型的岩石类型,海拔范围852~2 812 m,震中位置海拔为2 087 m,同时内有牛栏江、龙泉河、沙坝河3条河流,河谷地形突出,沿河流区域海

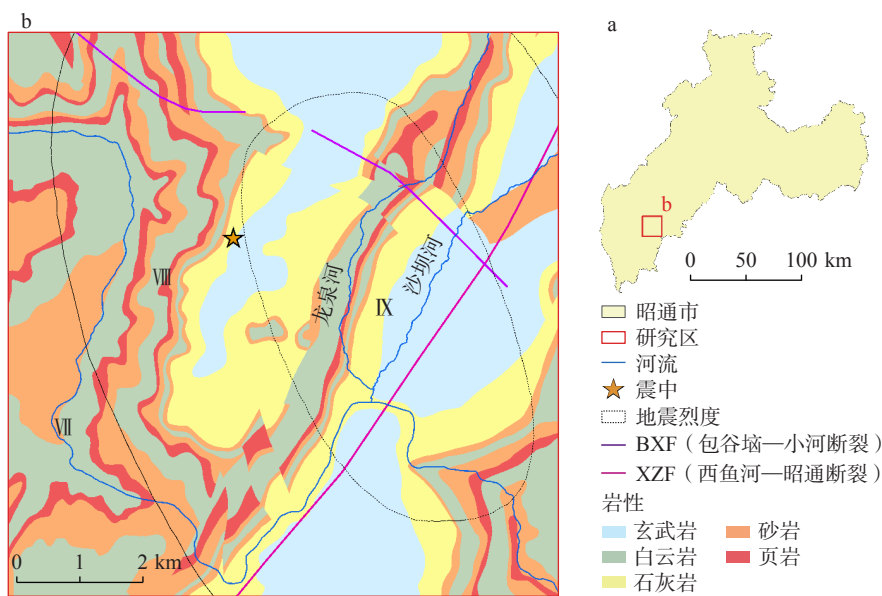


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Diagram of study area

拔较低。

1.2 数据来源与数据处理

研究数据主要包括遥感影像数据、滑坡数据以及降水数据 3 类。

(1)遥感影像数据: 震前 1 期和震后 14 期的遥感影像如表 1 所示。影像均通过正射校正、图像配准、图像融合、地理配准等数据处理, 将所有影像统一重采样为 2 m。

表 1 影像数据信息

Table 1 Image data information

日期	2014年 4月13日	2014年 10月26日	2015年 10月29日	2016年 7月11日	2017年 5月13日	2018年 8月24日	2019年 8月18日	2020年 8月27日	2021年 8月2日	2022年 7月16日
数据 来源	资源3号 (ZY3)	高分1号 (GF1)	高分1号 (GF1)	高分2号 (GF2)	资源3号 (ZY3)	高分1号 (GF1)	高分2号 (GF2)	高分1号 (GF1)	高分2号 (GF2)	高分1号B卫星 (GF1B)
数量/景	1	1	1	2	1	1	1	1	4	2
分辨率/m	2.1	2	2	0.8	2.1	2	0.8	2	0.8	2

(2)震前滑坡清单。由于 2014 年 8 月 3 日鲁甸 $M_s6.5$ 级地震震前影像缺乏, 选择较为接近的 2014 年 4 月 13 日 ZY3 影像进行震前滑坡清单的建立。此时植被稀少, 地物相似度极高, 滑坡数量较少并且震前滑坡与裸地等较为相似, 为有效排除震前滑坡, 进行人工解译得到震前滑坡清单。

(3)同震滑坡清单。文章使用许冲团队建立的滑坡清单, 下载于 USGS 官网(<https://www.sciencebase.gov/catalog/item/594428d4e4b062508e32319f>), 选择的研究区边界范围内, 鲁甸 $M_s6.5$ 级地震共造成 1 014 个滑坡, 面积达 5.16 km²。

2 研究方法

为探究鲁甸 $M_s6.5$ 级地震震后滑坡的时空分异特

征, 首先基于 ENVI 深度学习模块构建多时期震后滑坡数据清单, 在此基础上从地震后滑坡数量规模、同震滑坡面积变化类型、不同阶段滑坡活动期 3 个方面对震后滑坡时空分布特征、时空面积变化、活动期演化进行分析, 具体技术路线如图 2 所示。

2.1 多时期震后滑坡数据清单构建

对不同时期高分辨率遥感影像进行滑坡识别, 构建鲁甸 $M_s6.5$ 级地震震后多时期滑坡数据清单。如图 3 所示, 构建过程分为 5 个部分。(1)滑坡样本构建。选择 GF1、ZY3、GF2 影像中 2014 年 10 月 26 日、2017 年 5 月 13 日、2019 年 8 月 18 日 3 景影像共绘制了 586 个滑坡样本进行训练和验证。(2)震后滑坡粗提取。基于 ENVI 深度学习模块, 以“模型训练-执行分类-分类后处理”为流程, 进行震后滑坡粗提取。(3)滑坡精识别。

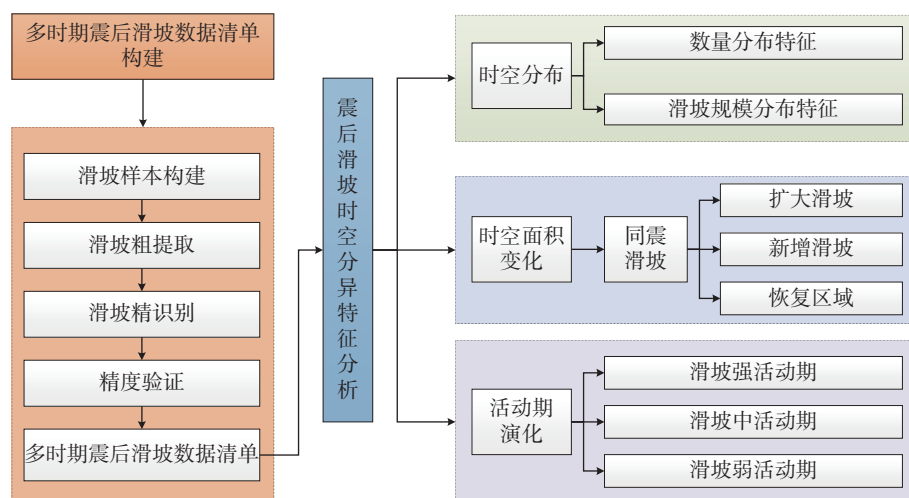


图 2 技术路线图

Fig. 2 Technology roadmap

利用地形坡度特征排除少部分低坡度区域的影响; 基于几何特征中的长宽比和密度, 排除道路、河流等长条形地物对滑坡识别结果的干扰; 通过纹理对比度, 排除建筑及人工地物对滑坡解译结果的影响; 最后对精识别结

果与震前滑坡进行差值得到最终的震后滑坡。(4)精度验证。对震后滑坡进行识别并进行精度验证与评估。(5)多时期震后滑坡数据清单。将整个滑坡识别流程应用于整个长时间序列, 构建多时期震后滑坡数据清单。

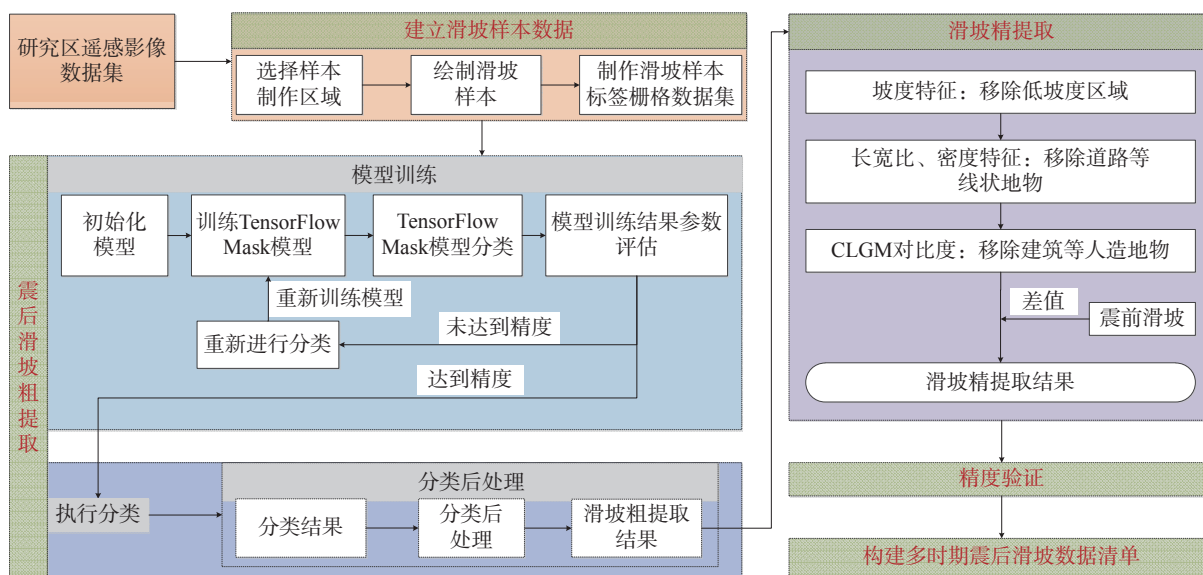


图 3 构建震后滑坡数据清单

Fig. 3 Build post-earthquake landslide database

2.2 震后滑坡时空面积变化分析

为了分析鲁甸 $M_s 6.5$ 级地震触发滑坡后续的变化情况, 以 2014 年 8 月 3 日地震触发的同震滑坡为基线, 与后续年份做比较, 根据滑坡的变化情况分为同震滑坡、扩大滑坡、新增滑坡和恢复区 4 种不同类型。同震滑坡为 2014 年 8 月地震触发的滑坡; 扩大滑坡是指原本存在同震滑坡且在现有同震滑坡面积基础上继续增

大的区域; 新增滑坡是指本来某区域内没有滑坡但后来出现了滑坡; 恢复区即原来存在的同震滑坡区域表现为已恢复状态。为了对震后滑坡面积变化程度进行量化, 理清同震滑坡后续时间的持续变化情况, 将 2014 年 8 月的滑坡活动率设定为 100%, 作为研究滑坡活动变化的基线, 通过滑坡活动率进行更有力的定量评价, 计算方式如式(1)所示。

$$P=\frac{S_a}{S_c}\times 100\%$$

(1)

式中: P ——活动滑坡活动率/%, 表示同震滑坡的活动强度, 将扩大滑坡和新增滑坡定义为活动滑坡;
 S_a ——滑坡活动面积/ km^2 ;
 S_c ——同震滑坡面积/ km^2 。

2.3 震后滑坡活动期演化分析

地震后较长时间内, 滑坡存在不同程度的复发新增阶段, 有着较长时间的活动期, 而地震后滑坡活动程度

对评估震后滑坡时空演化评估至关重要。为了定量分析地震震后滑坡的活动过程, 以地震触发滑坡变化类型即扩大滑坡、新增滑坡以及滑坡活动率为活动期的分类标准, 若起始年份满足表 2 所示滑坡活动期分类标准中的规则, 则以起始年份为分割节点, 将包含起始年份及其范围内的所有年份归为 3 个活动期中的一个, 将震后滑坡的整个活动过程分为 3 个时期, 以此对滑坡活动过程进行分析。具体的分类标准如表 2 所示。

表 2 滑坡活动期分类标准
Table 2 Classification standard of landslide activity period

滑坡活动期	滑坡活动率/%	扩大滑坡面积/ km^2	新增滑坡面积/ km^2
震后滑坡强活动期	$P>50$	>1.5	>1
震后滑坡中等活动期	$10<P\leq 50$	>0.2 且 ≤ 1.5	>0.2 且 ≤ 1
震后滑坡弱活动期	$P\leq 10$	≤ 0.2	≤ 0.2

3 计算结果与分析

3.1 滑坡识别结果精度验证

完成模型训练及试验后, 对滑坡识别结果进行精度评估。考虑到研究区域滑坡数量和分布, 选择地物相对复杂的 4 个子区域(区域 1—4)对滑坡识别结果进行精度验证(图 4)。精确率、召回率、 $F1$ 、错分率(commission error, CE)、漏分率(omission error, OE)是滑坡提

取中常用的精确度量标准, 由于研究中的滑坡提取是一个二值分类问题, 即对于每个像素, 只有 2 种情况: 滑坡或背景, 因此, 如图 4(a)(b), 验证基于 4 种提取结果, 即 TP (真阳性, 表示被正确识别的滑坡, 即预测为滑坡且识别为滑坡)、 FP (假阳性, 表示预测滑坡但实际为背景)、 TN (真阴性, 即预测为背景且识别为背景)和 FN (假阴性, 即预测为背景但识别为滑坡)进行 5 个指标计算完成精度验证, 具体计算方程式如式(2)—(6)。

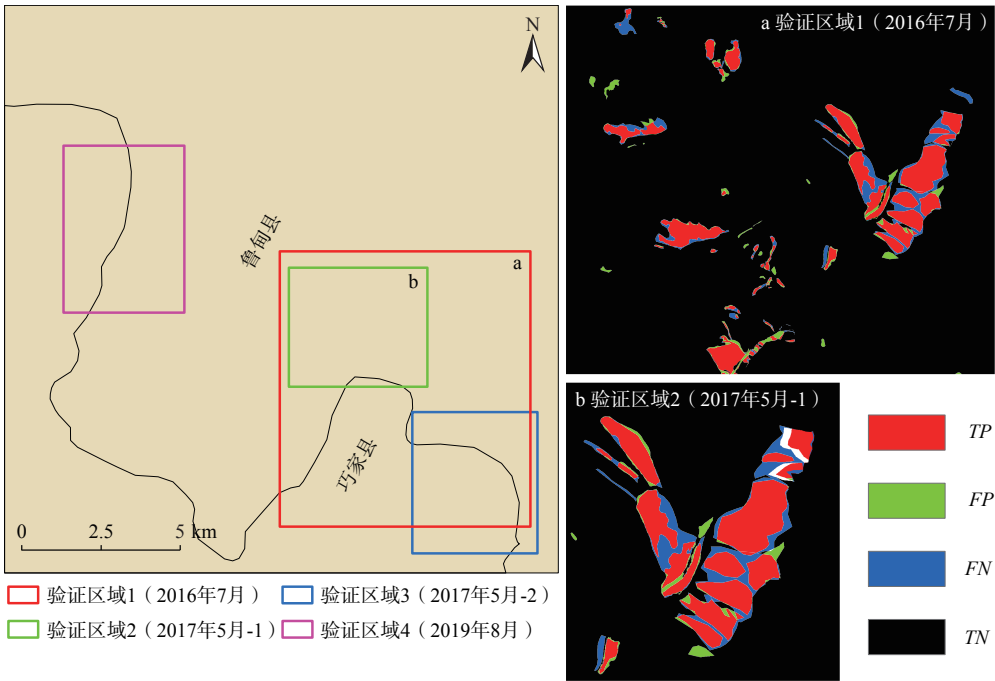


图 4 精度验证
Fig. 4 Accuracy verification

精确率(*Precision*)评估的是作为滑坡被提取的区域有多少是真正的滑坡:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

式中: *TP*——真阳性滑坡面积/km²;

FP——假阳性滑坡面积/km²。

召回率(*Recall*)用于计算正确提取了多少滑坡:

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

式中: *FN*——假阴性滑坡面积/km²。

F1 则以更平衡的方式评估模型分类精度, 其范围为[0, 1], 越接近 1, 则代表效果越好:

$$F1 = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (4)$$

式中: *Precision*——精确率, 评估的是作为滑坡被提取的区域有多少是真正的滑坡;

Recall——召回率, 用于计算正确提取了多少滑坡。
错分率(*CE*)是指实际为背景, 但被分为了滑坡:

$$CE = \frac{FP}{TP + FP} \quad (5)$$

漏分率(*OE*)则是指实际为滑坡, 但被分为背景的区域:

$$OE = \frac{FN}{TP + FN} \quad (6)$$

表 3 为子区域精度验证结果, 滑坡识别精确率为 85% 以上, 召回率 74% 以上, *F1* 在 80% 以上, 错分率(*CE*)在 15% 以下, 而漏分率(*OE*)在 25% 以下, 漏分现象主要发生于边界处, 即有部分滑坡边界被分为了背景, 但总体而言, 滑坡识别流程可以识别出滑坡的主体和主要区域, 具有较高的可靠性, 可以应用于研究区域和整个研究时期(2014 年 10 月—2022 年 7 月)。

表 3 精度验证结果

Table 3 Accuracy verification results

区域	影像类型	<i>Precision</i>	<i>Recall</i>	<i>CE</i>	<i>OE</i>	<i>F1</i>
验证区域1	GF2	0.861 4	0.828 1	0.138 6	0.171 9	0.844 4
验证区域2	ZY3	0.857 3	0.843 9	0.142 7	0.156 1	0.850 6
验证区域3	ZY3	0.865 0	0.749 9	0.135 0	0.249 0	0.803 4
验证区域4	GF2	0.863 4	0.756 1	0.136 6	0.243 9	0.806 2

3.2 震后滑坡时空分布特征分析

根据 2.1 节滑坡识别流程得到震后多时期滑坡清单, 将其进行可视化得到如图 5(a)—(k)所示的分布图。总体上, 2014 年 8 月至 2022 年 7 月期间, 地震后触发滑坡主要沿牛栏江、沙坝河以及龙泉河河谷两侧分布。距震中距离越近, 越易触发滑坡, 然而, 此次距震中距离 2 000 m 的范围内, 滑坡分布较少, 主要分布在大于 2 000 m 范围的区域内, 原因是此次震中区域在龙头山一个平坦的盆地。同震及震后滑坡主要分布于地震烈度为Ⅸ级的区域内, 地震烈度Ⅷ级范围同样分布着一个滑坡严重区域, 位于震源中心西侧。

如图 5 和表 4, 根据滑坡面积大小, 以 0.01 km²、0.02 km² 为分隔点, 将滑坡分为小、中、大滑坡 3 种规模。震后主要以面积小于 0.01 km² 的小型滑坡为主, 其次为面积介于 0.01 km² 和 0.02 km² 的中型滑坡, 数量相对较少的为大于 0.02 km² 的大型滑坡。2014 年 4 月, 地震前, 小型滑坡和中型滑坡数量为 36 个和 25 个, 无大型滑坡, 小中型滑坡主要沿牛栏江分布, 见图 5(a); 2014 年 8 月地震初发后, 小中大型滑坡数量骤增, 大型滑坡

数量达 42 个, 主要沿沙坝河和牛栏江分布, 见图 5(b); 2014 年 10 月, 震后 2 个月时间后, 小型滑坡数量减少明显, 中型滑坡数量变化较小, 大型滑坡数量增多, 见图 5(c); 震后 8a 时间, 小中大型滑坡总体呈现逐期减少的趋势, 截至 2022 年 7 月, 小中大型滑坡数量为 42, 8, 9, 与震前相比, 中型滑坡减少明显, 而大型滑坡由 0 变为 9, 位于Ⅸ级地震烈度范围内, 主要位于沿沙坝河分布的光明村滑坡群和沿牛栏江分布的红石岩滑坡, 见图 5(d)—(k)。

根据多时期震后滑坡数据清单得到的数量和面积, 绘制如图 6 所示的分布情况统计图。鲁甸 *M_s*6.5 级地震震前滑坡数量较少, 面积小于 1 km²; 2014 年 8 月地震发生后, 触发滑坡 1 014 个, 总面积 5.16 km², 滑坡数量和面积急剧增加; 震后 2 个多月时间内, 滑坡数量急剧减少, 但面积呈现略微增加趋势; 震后 8 a 时间内, 滑坡数量及面积总体呈下降趋势, 但年份间存在波动, 2016 年 7 月、2020 年 8 月较上一时期而言滑坡数量和面积略微上升。

在地震后的 2 个月时间内, 滑坡数量急剧减少, 而

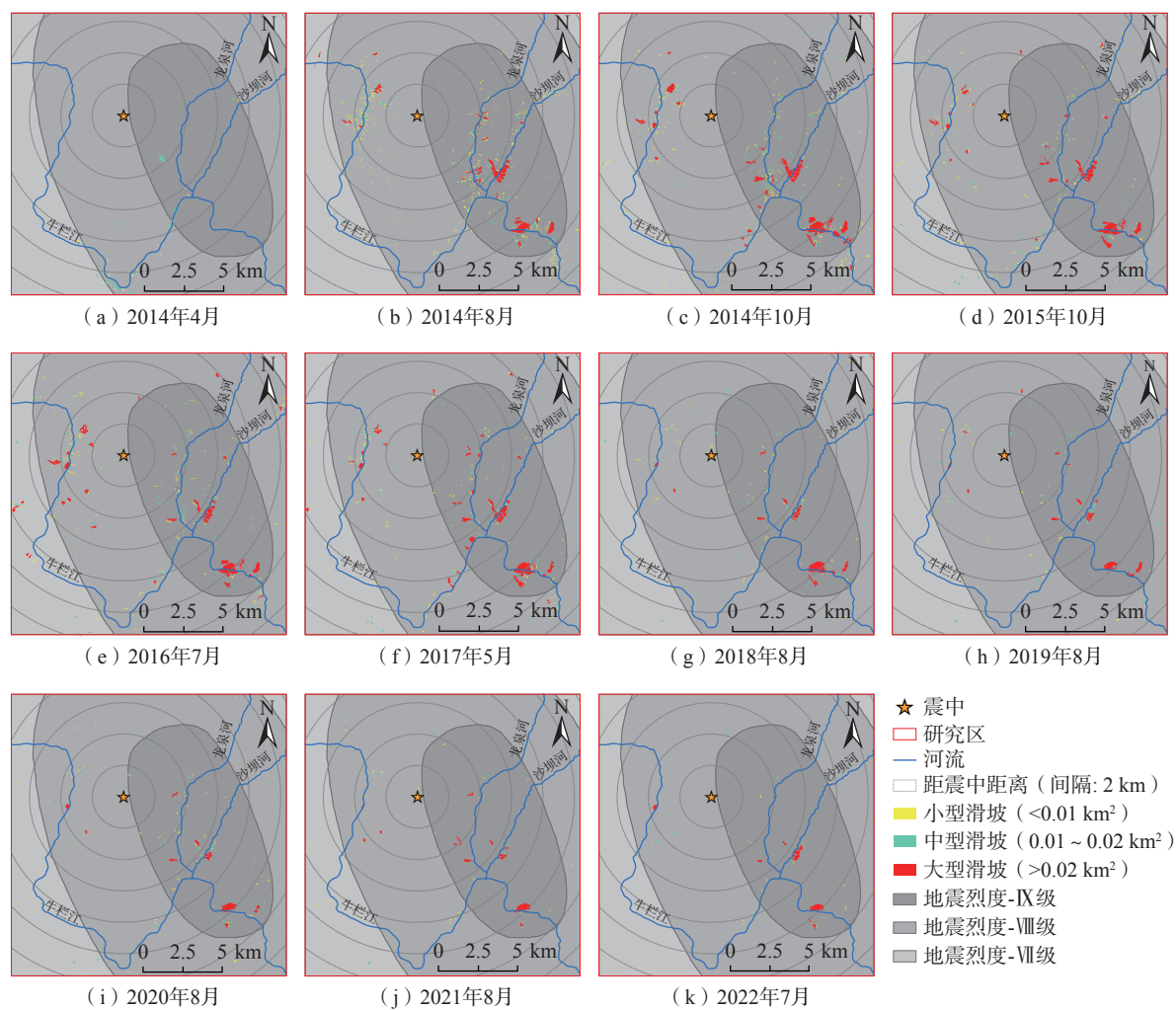


图 5 多时期震后滑坡数据清单

Fig. 5 Multi-period post-earthquake landslide database

表 4 地震震后滑坡规模分布情况统计

	2014年4月	2014年8月	2014年10月	2015年10月	2016年7月	2017年5月	2018年8月	2019年8月	2020年8月	2021年8月	2022年7月
小型滑坡/个	36	908	408	300	367	307	179	107	153	85	42
中型滑坡/个	25	64	56	37	54	37	27	25	24	9	8
大型滑坡/个	0	42	49	37	45	42	16	15	11	13	9

滑坡总面积呈现略微增加趋势。原因是地震初期同震滑坡面积破碎,而在 2 个多月之后,由于人类紧急救援、降水等原因^[22],破碎的小滑坡合并为成片的大面积滑坡,滑坡数量减少,面积则增加。在震后 8a 时间,滑坡数量和面积整体呈下降趋势。但 2016 年 7 月较 2015 年 10 月滑坡数量和面积均略微上升。根据鲁甸气象站降水数据可知(表 5),2016 年年降水总量超过 1 100 mm,远超过其他年份降水总量,而地震后较长一段时间内,土壤等受到长期影响,降水极有可能引发更多的滑坡。文中所使用影像由 2016 年 7 月 11 日和 7

月 25 日构成,统计 2016 年 7 月 25 日前日降水数据,发现日降水大于 25 mm 超过 9 次,而根据降水分级显示,日降水总量大于 25 mm 则为大雨,由此可见,大雨事件可能导致了滑坡的扩大和发生^[23]。2020 年 8 月滑坡数量和面积较 2019 年 8 月有所上升,这与 2020 年 5 月 18 日 21 时 47 分,在云南省昭通市巧家县发生 5.0 级地震具有一定相关性,此次地震震源深度 8 km,可能引发周边区域发生滑坡^[24]。

3.3 震后滑坡时空面积变化

2014 年 8 月,研究区内鲁甸 $M_s6.5$ 级地震共触发同

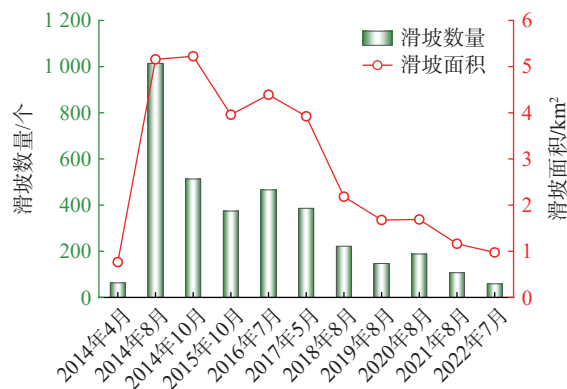


图 6 滑坡数量面积统计

Fig. 6 Landslide number area statistics

表 5 2014—2022 年鲁甸地区降水统计

Table 5 Statistics of precipitation in Ludian area from 2014 to 2022

年份	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
年降水量/mm	941.0	976.4	1 107.1	955.4	879.7	721.9	794.5	742.2	861.4

积分别是 2.88, 2.03, 2.63, 1.97, 1.23, 0.91, 0.80, 0.55, 0.31 km², 滑坡活动面积呈先减少后增加再持续减少的趋势。以 2014 年 8 月的同震滑坡活动率(P)为基线, 滑坡活动性年衰减率分别为 55.78%、39.44%、50.98%、38.28%、23.70%、17.70%、15.48%、10.67%、6.08%, 年衰减率呈现与活动面积同样的规律。根据滑坡类型及活动率, 发现 2016 年 7 月的滑坡扩大和新增面积较上一年有所增加, 同时恢复区域较上一年也呈现增加的现象, 表明此时期范围内活动性滑坡较多, 扩大和新增滑坡明显。总体而言, 随时间推移, 同震滑坡逐渐恢复, 扩大滑坡和新增滑坡面积总体呈现减少趋势, 虽然仍有同震滑坡存在, 但 2022 年只有 6.08% 的滑坡仍处于活动

震滑坡 1 014 个, 总面积 5.157 7 km²。以 2014 年 8 月 3 日鲁甸 $M_s6.5$ 级地震触发的同震滑坡为比较基线, 与 2014 年 10 月滑坡进行相交擦除等操作, 得到如图 7 所示的滑坡时空面积变化分析图。2014 年 10 月, 滑坡集中在 J_1 — J_3 区域, 在原有的同震滑坡基础上进一步恢复的同时出现扩张滑坡, 同时区域内也出现新增的滑坡。表 6 总结了地震后不同时期同震滑坡恢复、扩张和新增的滑坡面积以及活动率。

从表 6 中可以看出, 2014 年 10 月、2015 年 10 月、2016 年 7 月、2017 年 5 月、2018 年 8 月、2019 年 8 月、2020 年 8 月、2021 年 8 月、2022 年 7 月, 滑坡活动面

状态, 这表明地震对滑坡的影响已经逐渐减弱。

3.4 震后滑坡活动期演化分析

根据表 6 所示滑坡活动面积变化及活动率和 2.3 节滑坡活动期分类标准, 对鲁甸 $M_s6.5$ 级地震震后滑坡进行活动期分析。2016 年 7 月的滑坡活动率大于 50%, 扩大面积大于 1.5 km² 且新增滑坡面积大于 1 km², 则将 2016 年 7 月以前称为强活动期; 而 2021 年 8 月的滑坡活动率 10%~50%、扩大滑坡面积 0.2~1.5 km²、新增滑坡面积为 0.2~1 km², 则 2016 年 7 月—2021 年 8 月之间的时期为中等活动期; 2021 年 8 月以后的时间活动率小于 10%、扩大和新增滑坡面积少于 0.2 km² 则为滑坡低活动期。

根据以上规则得出如图 8 所示的变化图。通过 2014 年 8 月—2022 年 7 月不同阶段滑坡面积变化和活动率的定量分析, 将鲁甸地震震后滑坡活动状态分为了强活

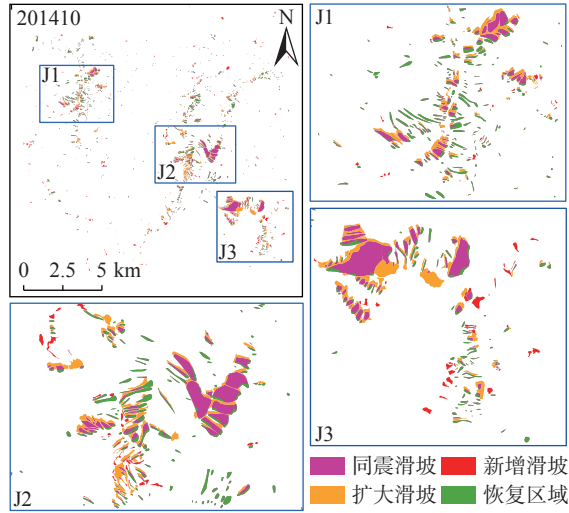


图 7 时空面积变化分析

Fig. 7 Analysis of spatio-temporal area change

表 6 滑坡活动面积变化及活动率统计

Table 6 Landslide activity area change and activity rate statistics

年月	恢复区域 /km ²	扩大面积 /km ²	新增面积 /km ²	活动面积 /km ²	活动率 /%
2014年10月	2.81	2.08	0.80	2.88	55.78
2015年10月	3.23	1.27	0.77	2.03	39.44
2016年7月	3.41	1.52	1.10	2.63	50.98
2017年5月	3.21	1.07	0.90	1.97	38.28
2018年8月	4.20	0.73	0.50	1.23	23.79
2019年8月	4.39	0.48	0.44	0.91	17.70
2020年8月	4.27	0.36	0.44	0.80	15.48
2021年8月	4.55	0.33	0.22	0.55	10.67
2022年7月	4.50	0.20	0.11	0.31	6.08

动期、中等活动期和弱活动期。可见, 随时间推移, 同震滑坡面积逐渐减少, 地震触发滑坡呈现逐渐恢复的趋势, 扩滑坡表现出较为明显的扩张趋势, 而滑坡新增面积相对较少。

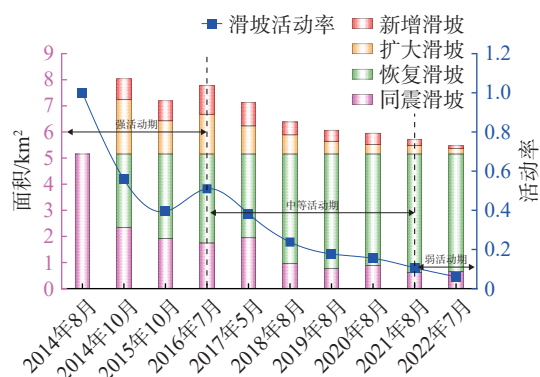


图 8 2014—2022 年地震后滑坡面积及活动期变化图

Fig. 8 The change map of landslide area and activity period after the 2014—2022 earthquake

如图 8 所示, 2016 年 7 月以前为滑坡强活动期, 滑坡活动率先下降而后出现增长, 滑坡扩张和新增趋势也较为明显, 扩张明显的为震后两个月时间内, 而新增明显的为 2015 年 10 月—2016 年 7 月, 主要原因是震后救灾致使滑坡扩张以及大量降雨导致了降雨型新滑坡的

产生。

2016 年 7 月—2021 年 8 月期间为滑坡中等活动期, 随时间推移, 滑坡扩张和新增程度逐渐下降, 滑坡活动率也呈现持续下降趋势, 由 2016 年 7 月的 50.98% 下降为 2021 年的 10.67%。2016 年 8 月—2017 年 5 月期间, 较上一期滑坡数据清单而言, 同震滑坡面积增多, 恢复区域减少, 说明已经恢复的同震滑坡区域再次变为滑坡, 这与 2017 年 2 月 9 日发生在鲁甸县的 $M_s4.9$ 级地震以及 2020 年 5 月 18 日发生在巧家的 $M_s5.0$ 级地震可能具有相关性^[24-25], 2017 年 2 月 9 日鲁甸 $M_s4.9$ 级地震震中 (27.07°N), 位于 2014 年 8 月鲁甸地震震中的南东方向, 二者相距约 4 km。2019 年 9 月至 2020 年 8 月期间, 相较于上一期滑坡, 已经恢复的同震滑坡再次变为滑坡, 这与 2020 年 5 月 18 日巧家 $M_s5.0$ 级地震具有相关性, 此次地震震中为 ($27.18\text{N}, 103.16\text{E}$), 震源深度 8 km。这两次地震为 2014 年 8 月后鲁甸地震周边区域的二次冲击, 会使已经恢复的同震滑坡区域再次被激活。

2021 年 9 月之后为滑坡弱活动期, 此时大部分小型滑坡均已恢复, 依然存在的同震滑坡主要为红石岩滑坡、光明村等大型滑坡残留的滑坡臂以及靠近道路河流的部分滑坡, 如图 9 所示, 存留的大型滑坡内部植被还未明显恢复。

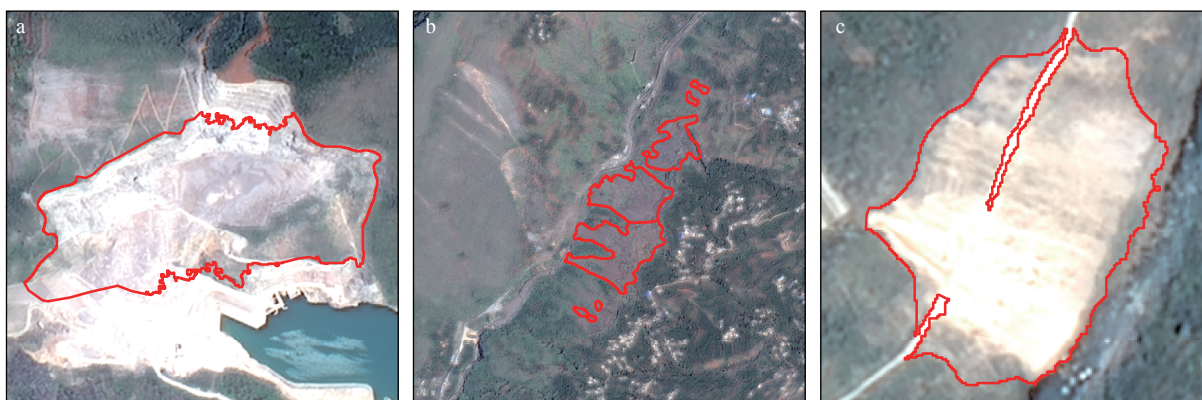


图 9 2022 年现存滑坡

Fig. 9 Existing landslides in 2022

注: a 为红石岩滑坡; b 为光明村滑坡群; c 为靠近道路和河流的残留滑坡。

4 结论

(1) 建立了鲁甸地区多时期震后滑坡数据清单。历年来, 震后滑坡数量面积呈现逐年下降趋势, 2014 年 8 月, 研究区内滑坡数量 1 014 个, 面积为 5.16 km^2 , 截至 2022 年 7 月, 滑坡数量为 59 个, 面积不到 1 km^2 , 震后 8a 时间内, 滑坡数量和面积呈现总体下降趋势。

(2) 震后滑坡主要分布于距断层距离 2 000 m 以上范围, 并且主要集中于河谷两侧, 此外, 地震触发滑坡以小型滑坡为主, 中型滑坡数量相对较少, 而大型滑坡数量少, 但面积多。

(3) 2014 年 8 月 3 日鲁甸 $M_s6.5$ 级地震触发的同震滑坡活动率为 100%, 以此为比较基线, 2014 年 10 月、2015 年 10 月、2016 年 7 月、2017 年 5 月、2018 年

8 月、2019 年 8 月、2020 年 8 月、2021 年 8 月、2022 年 7 月的滑坡活动性年衰减率分别为 55.78%、39.44%、50.98%、38.28%、23.70%、17.70%、15.48%、10.67%、6.08%，总体呈现逐渐下降趋势。截至 2022 年 7 月，只有 6.08% 的滑坡仍处于活动状态，表明地震对滑坡的影响已经逐渐减弱。

(4)震后滑坡存在强活动期(2014 年 8 月—2016 年 7 月)、中等活动期(2016 年 8 月—2021 年 8 月)、弱活动期(2021 年 9 月—2022 年 7 月)，总体而言，截至 2022 年 7 月，地震造成的滑坡以及影响还未完全恢复。

参考文献(References):

- [1] 黄润秋. 汶川地震地质灾害后效应分析 [J]. 工程地质学报, 2011, 19(2): 145 - 151. [HUANG Runqiu. After effect of geohazards induced by the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(2): 145 - 151. (in Chinese with English abstract)]
- [2] KEEFER D K. The importance of earthquake-induced landslides to long-term slope erosion and slope-failure hazards in seismically active regions [M] //Geomorphology and Natural Hazards. Amsterdam: Elsevier, 1994: 265 - 284.
- [3] 祁生文, 许强, 刘春玲, 等. 汶川地震极重灾区地质背景及次生斜坡灾害空间发育规律 [J]. 工程地质学报, 2009, 17(1): 39 - 49. [QI Shengwen, XU Qiang, LIU Chunling, et al. Slope instabilities in the severest disaster areas of 5·12 Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(1): 39 - 49. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 田颖颖, 许冲, 徐锡伟, 等. 2014 年鲁甸 $M_s6.5$ 地震震前与同震滑坡空间分布规律对比分析 [J]. 地震地质, 2015, 37(1): 291 - 306. [TIAN Yingying, XU Chong, XU Xiwei, et al. Spatial distribution analysis of coseismic and pre-earthquake landslides triggered by the 2014 Ludian $M_s6.5$ earthquake [J]. Seismology and Geology, 2015, 37(1): 291 - 306. (in Chinese with English abstract)]
- [5] ZOU Yu, QI Shengwen, GUO Songfeng, et al. Factors controlling the spatial distribution of coseismic landslides triggered by the M_w 6.1 Ludian earthquake in China [J]. Engineering Geology, 2022, 296: 106477.
- [6] 韩征, 方振雄, 傅邦杰, 等. 同震崩塌滑坡的光学遥感影像多特征融合解译方法 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(6): 103 - 113. [HAN Zheng, FANG Zhenxiong, FU Bangjie, et al. Interpretation method for regional co-seismic collapses based on multi-feature fusion of optical remote sensing [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(6): 103 - 113. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 许冲, 田颖颖, 沈玲玲, 等. 2015 年尼泊尔廓尔喀 $M_w7.8$ 地震滑坡数据库 [J]. 地震地质, 2018, 40(5): 1115 - 1128. [XU Chong, TIAN Yingying, SHEN Lingling, et al. Database of landslides triggered by 2015 Gorkha (Nepal) $M_w7.8$ earthquake [J]. Seismology and Geology, 2018, 40(5): 1115 - 1128. (in Chinese with English abstract)]
- [8] GUO Xinyi, FU Bihong, DU Jie, et al. Monitoring and assessment for the susceptibility of landslide changes after the 2017 $M_s7.0$ Jiuzhaigou earthquake using the remote sensing technology [J]. Frontiers in Earth Science, 2021, 9: 43.
- [9] 杨华阳, 许向宁, 杨鸿发. 基于证据权法的九寨沟地震滑坡危险性评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(3): 20 - 29. [YANG Huayang, XU Xiangning, YANG Hongfa. The Jiuzhaigou co-seismic landslide hazard assessment based on weight of evidence method [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(3): 20 - 29. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 陈博, 李振洪, 黄武彪, 等. 2022 年四川泸定 $M_w6.6$ 级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 $M_w6.6$ luding (Sichuan, China) earthquake [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(6): 971 - 985. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 范宣梅, 王欣, 戴岚欣, 等. 2022 年 $M_s6.8$ 级泸定地震诱发地质灾害特征与空间分布规律研究 [J]. 工程地质学报, 2022, 30(5): 1504 - 1516. [FAN Xuanmei, WANG Xin, DAI Lanxin, et al. Characteristics and spatial distribution pattern of $M_s6.8$ Luding earthquake occurred on September 5, 2022 [J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(5): 1504 - 1516. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 刘甲美, 王涛, 杜建军, 等. 四川泸定 $M_6.8$ 级地震诱发崩塌灾害快速评估 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(2): 84 - 94. [LIU Jiamei, WANG Tao, DU Jianjun, et al. Emergency rapid assessment of landslides induced by the Luding $M_s6.8$ earthquake in Sichuan of China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(2): 84 - 94. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 杨志华, 吴瑞安, 郭长宝, 等. 川西巴塘断裂带地质灾害效应与典型滑坡发育特征 [J]. 中国地质, 2022, 49(2): 355 - 368. [YANG Zhihua, WU Ruian, GUO Changbao, et al. Geo-hazard effects and typical landslide characteristics of the Batang fault zone in the western Sichuan [J]. Geology in China, 2022, 49(2): 355 - 368. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 李明威, 熊江, 陈明, 等. 汶川震区植被恢复与同震滑坡活动性动态演化分析 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(3): 182 - 192. [LI Mingwei, XIONG Jiang, CHEN Ming,

- et al. Vegetation restoration and dynamic evolution analysis of landslide activity in the Wenchuan Earthquake area [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(3): 182 – 192. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 龙玉洁, 李为乐, 黄润秋, 等. 汶川地震震后 10 a 绵远河流域滑坡遥感自动提取与演化趋势分析 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2020, 45(11): 1792 – 1800. [LONG Yujie, LI Weile, HUANG Runqiu, et al. Automatic extraction and evolution trend analysis of landslides in Mianyuan River Basin in the 10 years after Wenchuan earthquake [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(11): 1792 – 1800. (in Chinese with English abstract)]
- [16] LIN Ching weei, LIU Shouheng, LEE Senyuan, et al. Impacts of the Chi-Chi earthquake on subsequent rainfall-induced landslides in central Taiwan [J]. *Engineering Geology*, 2006, 86(2): 87 – 101.
- [17] SHAFIQUE M. Spatial and temporal evolution of co-seismic landslides after the 2005 Kashmir earthquake [J]. *Geomorphology*, 2020, 362: 107228.
- [18] CHEN Ming, TANG Chuan, XIONG Jiang, et al. The long-term evolution of landslide activity near the epicentral area of the 2008 Wenchuan earthquake in China [J]. *Geomorphology*, 2020, 367: 107317.
- [19] 许冲, 徐锡伟, 沈玲玲, 等. 2014 年鲁甸 $M_s6.5$ 地震触发滑坡编录及其对一些地震参数的指示 [J]. *地震地质*, 2014, 36(4): 1186 – 1203. [XU Chong, XU Xiwei, SHEN Lingling, et al. Inventory of landslides triggered by the 2014 $M_s6.5$ Ludian earthquake and its implications on several earthquake parameters [J]. *Seismology and Geology*, 2014, 36(4): 1186 – 1203. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 张鹏飞. 地震滑坡的遥感影像自动提取研究 [D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2021. [ZHANG Pengfei. Research on automatic extraction of remote sensing images of co-seismic landslides [D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [21] YANG Ruilin, ZHANG Feng, XIA Junshi, et al. Landslide extraction using mask R-CNN with background-enhancement method [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(9): 2206.
- [22] 蒋涛, 崔圣华, 冉耀. 开挖和降雨耦合诱发滑坡机理分析——以四川万源前进广场滑坡为例 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2023, 34(3): 20 – 30. [JIANG Tao, CUI Shenghua, RAN Yao. Analysis of landslide mechanism induced by excavation and rainfall: A case study of the Qianjin square landslide in Wanyuan City, Sichuan Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2023, 34(3): 20 – 30. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 胡爱国, 周伟. 地震与强降雨作用下堆积体滑坡变形破坏机理及防治方案分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(1): 27 – 34. [HU Aiguo, ZHOU Wei. Deformation and failure mechanism and analysis on prevention measures of colluction landslide under earthquake and heavy rainfall [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(1): 27 – 34. (in Chinese with English abstract)]
- [24] HE Xiangli, XU Chong, QI Wenwen, et al. Landslides triggered by the 2020 Qiaojia $M_w5.1$ earthquake, Yunnan, China: distribution, influence factors and tectonic significance [J]. *Journal of Earth Science*, 2021, 32(5): 1056 – 1068.
- [25] 明小娜, 周洋, 钟玉盛, 等. 2017 年云南鲁甸 $M_s4.9$ 地震房屋震害特征与烈度评定 [J]. *地震研究*, 2017, 40(2): 295 – 302. [MING Xiaona, ZHOU Yang, ZHONG Yusheng, et al. Building damage characteristics and earthquake intensity evaluation of the Ludian $M_s4.9$ earthquake in 2017 [J]. *Journal of Seismological Research*, 2017, 40(2): 295 – 302. (in Chinese with English abstract)]