Study on the Dynamic Evolution Patterns of Landslides in Northwestern Sichuan Based on Dynamic Influencing Factors

Yu Zhu[1] Huajin Li[1,*], Ran Tang[1], Shenghua Cui[2]

[1] *School of Architecture and Civil Engineering, Chengdu University, Chengdu, 610106*

[2] *State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China*

[*] *Corresponding author. Email: lihuajin@cdu.edu.cn*

ABSTRACT

Clarifying the dynamic evolution patterns of landslides is crucial for landslide disaster prevention. Focusing on the northwestern region of Sichuan, analyzing 240 typical cases of actively deforming landslides over the past twenty years, examining the impact of various environmental factors such as vegetation, and rainfall on the dynamic development of landslides. Research indicates that vegetation coverage is a crucial factor influencing the development of landslides. Areas with high vegetation coverage tend to contribute more significantly to landslide activity. This phenomenon may be attributed to the excessive weight of root systems and increased rainfall interception, which negatively impact slope stability. In contrast, regions with high rainfall experience a more considerable increase in both the area and frequency of landslides. However, the annual average rainfall over a 20-year period shows minimal correlation with the frequency of landslide activity. This suggests that short-term intense rainfall events may play a more critical role in triggering landslide occurrences. By integrating the dynamic evolution patterns of landslides, targeted disaster prevention measures formulated can effectively enhance the region's proactive disaster prevention capabilities.

Keywords: *Active Landslides; Dynamic Evolution Patterns; Environmental Factors; Disaster Prevention*

基于动态影响因素的川西北滑坡动态演化规律研究

朱宇 [1], 李骅锦 [1,*], 唐然 [1], 崔圣华 [2]

[1] *成都大学 建筑与土木工程学院，成都 610106*

[2] *成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室， 成都 610059*

[*] *通讯作者.电子邮箱：lihuajin@cdu.edu.cn*

© The Author(s) 2025

S. Qiao et al. (eds.), *Proceedings of the 11th Annual Meeting of Risk Analysis Council of China Association for Disaster Prevention (RAC 2024)*, Advances in Economics, Business and Management Research 367,
https://doi.org/10.2991/978-94-6463-946-9_24

摘要:

明确滑坡的动态发展规律对于防范滑坡灾害至关重要。选择川西北地区作为研究对象，专注于分析过去二十年中变形活跃的 240 个典型滑坡案例，考察了植被、降雨等多种环境因素对滑坡动态发展的影响。研究发现，植被覆盖度是控制滑坡发展过程中的一个关键因素，植被覆盖度高的区域对于滑坡活动的贡献更高，可能是过高的植被覆盖会增加根系重量和降雨截留，对坡体稳定性产生负面影响。相比之下，高降雨量的区域滑坡面积增长幅度更大，数量更多，但是 20 年的年平均降雨量对于滑坡的活动次数并没有很大的相关性，可能短时间尺度的强降雨事件可能对滑坡活动起到更为重要的作用。研究成果能指导制定针对性的灾害防范措施，能够有效提升该区域主动防灾能力。

关键词：*活跃滑坡；动态演化规律；环境影响因子；灾害防范*

1. 引言

滑坡作为一种全球性的自然灾害，对人类生命财产安全和社会经济发展构成严重威胁。我国是全球受地质灾害威胁最为严重的国家之一，滑坡灾害的比例超过 70%，每年因灾死亡人数达上百人，造成的经济损失数十亿元[1-5]。深入研究滑坡动态演化机制，对于有效预防和减轻滑坡灾害，促进受影响地区的可持续发展具有至关重要的意义。

研究滑坡的长期的时空演化可以增进我们对其发展过程的理解，有助于减轻滑坡灾害的风险[6]，对于有效预测和防治滑坡灾害具有至关重要的意义。中国滑坡演化研究可以追溯到上世纪 50 年代初，早期研究以经验总结和定性分析为主；到了 20 世纪 60—70 年代，滑坡稳定性分析方法开始尝试建立，但研究方法仍以经验性分析为主；20 世纪 80—90 年代，随着经济发展，滑坡研究领域不断扩展，研究方法也更加先进。

进入 21 世纪，GIS、遥感、数值模拟等技术被广泛应用，研究成果更加注重实际应用，并有效地指导了滑坡防治实践。大量研究人员对滑坡演化开展研究，解明礼等[7]采用多源数据融合方法，利用各类数据源在滑坡体中不同的特征和适用性研究黄泥坝子滑坡在滑前、滑中和滑后动态演变过程中的变形破坏特征和时空演化规律；任娟等[8]分析了 80 期山梁子滑坡 Sentinel-1 雷达卫星数据，揭示山梁子滑坡的蠕滑变形分布规律；李明威等[9]利用多时相、长时间序列高精度遥感影像，测算汶川地震强震区不同时段的植被恢复率，并同时探讨植被恢复与滑坡活动强度变化之间的关联；万飞鹏等[10]通过实地野外调查和遥感图像解译，澄清了纳古呢沟灾害的发育特征，分析了该小流域内受断裂活动影响下滑坡—泥石流灾害链的演化过程。这些研究都取得了相当的成果，但由于滑坡发生过程的复杂性和多变性，其动态演化规律研究仍存在许多挑战，川西北地区，地质构造复杂，新构造运动强烈，降雨集中，形成了独特的脆弱地质生态环境。因此，深入研究该地区滑坡演化规律具有重要的科学意义和现实价值。

本文旨在通过对收集到的川西北的典型滑坡进行深入研究，探讨滑坡演化过程中动态驱动因素的作用机制，探究出该区域的滑坡动态演化规律，为本区域的滑坡监测和治理提供依据。

2. 研究区概况及数据收集

川西北的地质构造复杂，属于多地震带区域，地震活动频繁不仅直接触发滑坡，还

通过改变地下水位和地表水流模式间接诱发滑坡；此外，川西北年降水量较大，尤其是在夏季，强降水事件频发，大量的降雨迅速渗透土壤，增加了山坡的饱和度，从而减少了土壤和岩石的抗剪切强度，使得原本稳定的斜坡发生滑动，增加滑坡发生的风险。遥感技术能够实现在大范围内快速获取高分辨率的地表影像，而实地调查则提供了可靠、真实信息，两者相结合可以大大提升滑坡识别的效率和准确性。为了更好地研究和防控四川省的滑坡灾害，本研究结合了遥感技术和实地考察的优势，在四川省西北部地区获取了 1629 个滑坡案例，空间分布上，典型滑坡主要沿河流和断层分布。四川省的地理位置及滑坡研究点的地理空间分布位置如图 1 所示。

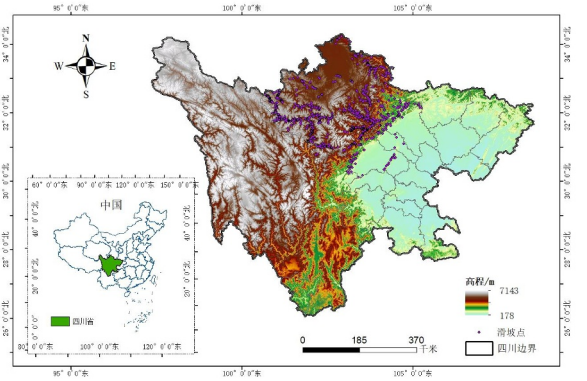

图 1 川西北滑坡分布位置

遥感影像数据方面，采用 Google Earth 平台提供的遥感影像，平台提供的遥感影像具有覆盖广、多时相、高分辨率等特点，可以提供更为详细的地形信息和变形特征，有助于精确定位滑坡的位置和边界。动态影响因素中，降雨方面，采用国家青藏高原科学数据中心提供的中国逐月降水量数据，空间分辨率为 1km，时间跨度为 2003 年-2022 年；归一化植被指数（NDVI）采用的是地球资源数据云中空间分辨率为 1km 的数据集，时间跨度同样为 2003-2022 年。本研究所使用的数据如表 1 所示。

表 1 所使用的数据

序号	数据类型	数据来源	空间分辨率/m
1	降雨	国家青藏高原科学数据中心	1000
2	四川省数字高程模型	SRTMSLOPE	90
3	遥感影像	Google Earth	0.5
4	归一化植被指数（NDVI）	地球资源数据云	1000

3. 研究方法及技术路线

在滑坡的遥感影像中，各种地物呈现出独特的光谱特征[11, 12]，高分辨率的卫星影像能够让我们观察到山体的细微变化，例如裂缝、植被的异常变化、土体堆积等迹象，研究通过目视解译 Google Earth 多时相高分辨率影像来识别滑坡并判断滑坡边界在不同时间尺度的位置，解译方法如下：

（1）光谱特征：滑坡体由于裸露的土壤和岩石较周围植被或未受扰动的土壤有明显的光谱差异，可以利用这一特性在影像上进行识别；

（2）影像形态特征：遥感影像上的滑坡

往往表现为特定的几何形状，如扇形、舌形或梯形，并且能看到裂缝，根据这些形态特征可以初步判断潜在的滑坡区域；

（3）水文特征：沿河流沿岸区域，注意河流有没有不正常弯道或者突然变窄，这也是识别滑坡的一个重要方法；

（4）地形地貌特征：滑坡多发生在陡坡上，并且滑坡下方会有堆积体，堆积体通常呈现出不规则的形状；

图 2 为滑坡边界的识别方法，图中可以看到明显的光谱、形态、水文、地貌等特征。。本研究通过目视解译 Google Earth 多时相高分辨率影像来识别滑坡并判断滑坡边界在不同时间尺度的位置。

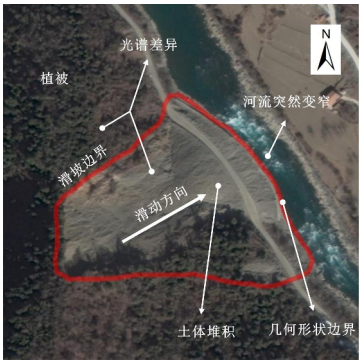

图 2 滑坡边界及滑坡识别方法

在收集到的滑坡案例的支持下，筛选出了 240 个在近二十年内边界变化最为明显的典型滑坡作为研究对象，典型滑坡的位置分布如图 3 所示，从图中可以看出，这些滑坡呈现出一定的空间聚集性，反映了区域内地质构造、降水分布和地形特征对滑坡发生的潜在影响。

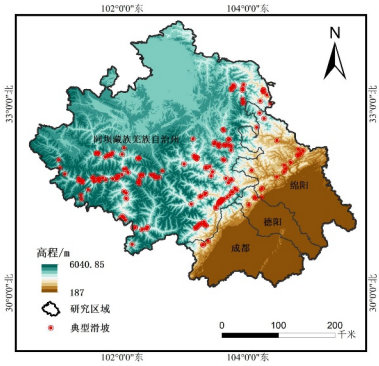

图 3 典型滑坡的分布位置

根据以上方法，圈出典型滑坡在不同时间序列的边界，计算出滑坡面积，并以滑坡面积变化和变化次数为其动态演化指标。基于已得出的动态演化指标，本文利用影响滑坡演化的动态因素对滑坡的动态演化进行了分析，分别讨论了降雨量、NDVI 和滑坡活动的相关性，总结滑坡活动演化的一般规律。

4. 滑坡演化情况分析

如图 4 所示，基于 240 个典型滑坡共 335 次活动记录，我们发现滑坡体面积增长幅度呈现明显的规律性。大多数滑坡体的面积增长幅度集中在 10-50%区间，占比超过 60%，说明滑坡体活动以小幅度增长为主。而超过 100%的高增长率区间，滑坡数量仅为 16 次，占比不到 5%。

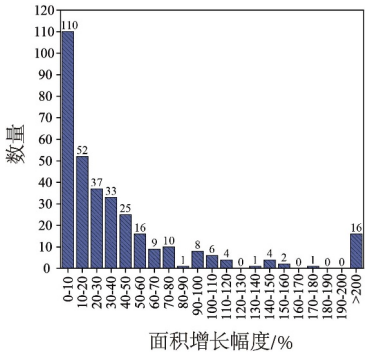

图 4 滑坡面积变化情况

5. 滑坡动态演化规律

5.1NDVI 变化对滑坡演化的影响

图 5a 展示了滑坡活动次数与 20 年平均 NDVI 的关系，大部分滑坡的活动次数集中在 1~2 次，且在 NDVI 为 0.7~0.9 之间时，滑坡的活动性增强，出现了更高次数的活动，表明过高的植被覆盖也可能增加根系重量和降雨截留，对坡体稳定性产生负面影响，并增加滑坡活动的可能性。图 5b 展示了滑坡面积增长幅度与相邻两次活动之间年平均 NDVI 的关系，从图中可以看出，滑坡数量最多的区域集中在平均 NDVI 为 0.7~0.91、面积增长幅度为 0%~75%的范围内，表明在该 NDVI 范围内，滑坡更易发生，且面积增长幅度也相对较大。这可能是因为此时植被根系对土壤的加固作用有一定作用，但同时也会利于雨水侵蚀土壤，增加土壤含水率，且植被覆盖的变化更容易影响坡体的稳定性，从而导致滑坡的发生和发展。

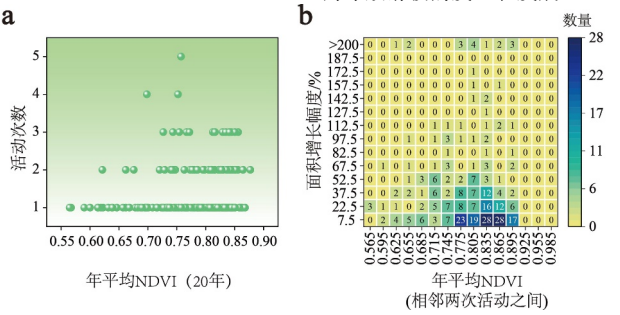

图 5 NDVI 对滑坡的影响

5.2 降雨量变化对滑坡演化的影响

图 6a 展示了滑坡活动次数与 20 年平均年降雨量的关系，大多数滑坡的活动次数集中在 1~2 次，并且滑坡活动次数与 20 年平均年降雨量之间没有明显的相关性，可能短时间尺度的强降雨事件可能对滑坡活动起到更为重要的作用。图 6b 展示了滑坡面积增长幅度与相邻两次活动之间平均年降雨量的关系，从图中可以看出，滑坡数量最多的区域集中在平均年降雨量为 525~900mm、面积增长幅度为 0%~60%的范围内，在这个范围的降雨量条件下，滑坡更容易发生，且滑坡面积增长幅度也相对较大。值得注意的是，在高降雨量区域（>825mm），滑坡数量相对较少，这是因为在选择典型滑坡时，位于高降雨量的区域的滑坡已被治理，故并未选择。

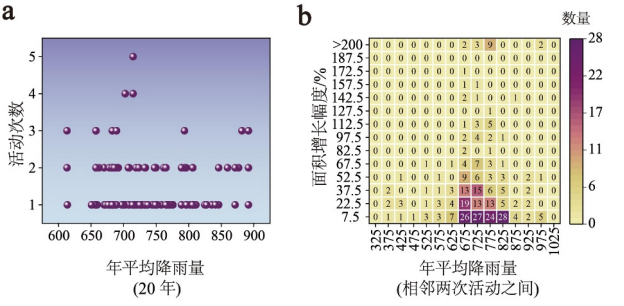

图 6 降雨量对滑坡的影响

6. 结论

本研究基于 NDVI 和降雨数据，分析了研究区滑坡活动的影响因素。可以得出以下结论：

（1）适度的植被覆盖可能有利于降低滑坡活动次数，而过高或过低的植被覆盖则可能增加滑坡活动的风险。

（2）在 NDVI 值（0.7~0.91）范围内，滑坡更易发生，且面积增长幅度也相对较大，这可能与该 NDVI 范围下植被覆盖对坡体稳定性的复杂影响有关。

（3）20 年平均年降雨量与滑坡活动次数之间没有明显的相关性，短时间尺度的强降雨事件可能对滑坡活动起到更为重要的作用。

（4）在降雨量高条件下，滑坡更容易发生，且滑坡面积增长幅度也相对较大。

在后续的研究中，需要进一步结合不同植被类型、降雨等因素，深入分析植被-土壤-坡体相互作用机制，以研究滑坡在多种因素耦合下的演化规律。

致谢：

本文章由国家自然科学基金（No. 42407239）；四川省自然科学基金（No. 2023NSFSC0789）支持。

参考文献

[1] 孙建霖. 时序 InSAR 技术及其在滑坡形变监测中的应用[D], 兰州大学, 2019.
Sun, J. L., Time-Series InSAR Technology and Its Application in Landslide Deformation Monitoring: A Case Study of Gaojiawan Landslide. Lanzhou University, 2019

[2] 张玉芳, 宋国壮, 袁坤, 邓胜, 范家玮. 反倾层状软岩切层滑坡空间形态与演化机制研究[J]. 中国铁道科学, 2023, 44(06): 1-12.
Zhang, Y. F., Song, G. Z., Yuan, K. Deng, S. Fan, J. W., Research on Spatial Morphology and Evolution Mechanism of Cutting-Layer Landslide in Anti-Dip Stratified Soft Rock. CHINA RAILWAY SCIENCE, 2023, 44(06): 1-12.

[3] 谢媛华, 张国伟, 曹宗伟, 苗发盛. 三峡库区白水河滑坡位移与裂缝分形特征[J]. 地质科技通报, 2024 43(4): 244-251.
XIE Yuanhua,ZHAN Guowei,CAO Zongwei,et al. Fractal characteristics of displacement and cracks in the Baishuihe landslide in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Bulletin of Geological Science and Technology,2024,43(4):244-251.

[4] 王涛, 刘甲美, 栗泽桐, 辛鹏, 石菊松,中国地震滑坡危险性评估及其对国土空间规划的影响研究[J]. 中国地质, 2021, 48(1): 21-39.
Wang Tao, Liu Jiamei, Li Zetong, Xin Peng, Shi Jusong, Wu Shuren. 2021. Seismic landslide hazard assessment of China and its impact on national territory spatial planning[J]. Geology in China, 48(1):21-39.

[5] 简小婷, 赵康, 左小清, 朱琪, 朱文. 基于 Faster R-CNN 目标检测的滑坡隐患识别——以福贡县城区为例[J]. 化工矿物与加工, 2022, 51(12): 19-24+29.
JIANXT,ZHAO K,ZUO X Q,etal.Landslidesriskidentificationbasedon FasterR-CNN-acasestudyinFugong county[J].IndustrialMinerals& Processing,2022,51(12):19-24+29.

[6] Zhu Y, Qiu H, Yang D, Liu Z, Ma S, Pei Y, He J, Du C, Sun H J L. Pre-and post-failure spatiotemporal evolution of loess landslides: A case study of the Jiangou landslide in Ledu, China[J]. 2021, 18(10): 3475-3484.

[7] 解明礼, 赵建军, 巨能攀, 何朝阳, 多源数据滑坡时空演化规律研究——以黄泥坝子滑坡为例[J]. 武汉大学学报, 2020, 45(6): 923-932.
XIE Mingli,ZHAO Jianjun,JU Nengpan,et al.Research on Temporal and Spatial Evolution of Landslide Based on Multisource Data: A Case Study of Huangnibazi Landslide[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(6): 923-932.

[8] 任娟, 曾帅, 文艳, 付豪, 冉港雄. 基于综合遥感技术的滑坡形变监测与成因机制分析 [J]. 四川地质学报, 2023, 43(03): 553-557.
Ren, J., Zeng, S., Wen, Y., Fu, H., Ran, G. X., Landslide Deformation Monitoring and Genetic Mechanism Analysis Based on Integrated Remote Sensing Technology. Sichuan Geology Journal, 2023, 43(03): 553-557.

[9] 李明威, 熊江, 陈明, 唐川. 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(03): 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.

[10] 万飞鹏, 杨为民, 邱占林, 向灵芝, 渠敬凯, 吴季寰, 张田田. 甘肃岷县纳古呢沟滑坡-泥石流灾害链成灾机制及其演化[J]. 中国地质, 2023, 50(03): 911-925.
Wan Feipeng, Yang Weimin, Qiu Zhanlin, Xiang Lingzhi, Qu Jingkai, Wu Jihuan, Zhang Tiantian. 2023. Disaster mechanism and evolution of Nagune Gully landslide-debris flow disaster chain in Minxian County, Gansu Province[J]. Geology in China, 50(3): 911-925

[11] 李昕娟, 林家元, 胡桂胜, 赵伟. 西南山地典型流域地震前后泥石流物源遥感精细识别[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(3): 638-648.
Li Xinjuan，Lin Jiayuan，Hu Guisheng，et al.Remote Sensing-based Debris Flow Source Area Extrac- tion before and after Earthquake for a Typical Mountain Basin in Southwest China：A Case Study in the Shuzheng Vil- lage Basin［J］.Remote Sensing Technology and Application，2021，36（3）：638-648.

[12] Martha T R, Kerle N, Jetten V, van Westen C J, Kumar K V. Characterising spectral, spatial and morphometric properties of landslides for semi-automatic detection using object-oriented methods[J]. Geomorphology, 2010, 116(1): 24-36.

Open Access This chapter is licensed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), which permits any noncommercial use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license and indicate if changes were made.

The images or other third party material in this chapter are included in the chapter's Creative Commons license, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the chapter's Creative Commons license and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder.