

中国非地震触发滑坡时空分布规律

刘陈^{1,4}, 栗帅², 尹陈^{1,4}, 王文松^{3*}, 曾超^{1,4}, 何大祥^{1,4}

1. 西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳 621010

2. 中国科学院, 水利部成都山地灾害与环境研究所 山地自然灾害与工程安全重点实验室, 四川 成都 610066

3. 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, 四川 成都 610059

4. 西南科技大学 固体废物处理与资源化教育部重点实验室, 四川 绵阳 621010

摘要: 为解决中国非地震触发滑坡多尺度时空分布分析不足、尤其缺乏小时尺度规律研究的问题, 本研究首先构建 1982-2025 年时间精度达小时级的中国非地震触发滑坡数据库 (含 347 起滑坡), 然后采用卡方拟合优度检验、卡方独立性检验、皮尔逊相关系数检验、二项分布检验及单样本 t 检验, 系统开展多尺度时空分布规律分析。结果显示, 空间上单位面积滑坡密度呈现“西南最高、华南及东南次之、西北与华中及华东较低、华北及东北最低”的特征, 以人口密度与 GDP 密度为指标计算的滑坡暴露度指数指示华南及东南为最高风险区, 华中及华东为高风险区, 西南为中风险区, 华北及东北为低风险区, 西北为最低风险区。滑坡频次与平均坡度强线性正相关 ($R^2 \geq 0.49$)、与平均高程中等线性正相关 ($0.09 \leq R^2 < 0.49$), 且受降雨气候显著影响, 即空间分布由地形与气候共同决定; 月尺度上, 全国 5 个区域滑坡均高发于 6-8 月, 滑坡频次与月均降雨量强线性正相关 ($R^2 \geq 0.49$), 即月尺度分布由夏季集中降雨主导; 小时尺度上, 全国滑坡高发时段为 03:00-15:00, 其中降雨触发型高发于 00:00-12:00 (与夜雨水文响应匹配), 非降雨触发型高发于 08:00-20:00 (与人类日间活动关联), 即小时尺度分布受降雨与人类活动双重驱动。本研究表明中国非地震触发滑坡多尺度时空分布特征与区域地形气候条件及人类活动密切相关, 不仅填补了中国非地震触发滑坡精确到小时级时间分布规律的研究空白, 而且为滑坡分时段、分区域预警及风险防控提供了科学参考。

关键词: 中国非地震触发滑坡; 小时级滑坡数据库; 多尺度时空分布

中图分类号: P642.22

收稿日期: 2025-09-30

Study on the Spatiotemporal Distribution Patterns of Non-Earthquake Triggered Landslides in China

LIU Chen^{1,4}, LI Shuai², YIN Chen^{1,4}, WANG Wensong^{3*}, ZENG Chao^{1,4}, HE Daxiang^{1,4}

1. School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China

2. Key Laboratory of Mountain Hazards and Engineering Resilience Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610066, China

3. State Key Laboratory of Geological Hazard Prevention and Geological Environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

4. Key Laboratory of Solid Waste Treatment and Resource Recycling of the Ministry of Education, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China

Abstract: To address the inadequacies in the multi-scale spatiotemporal distribution analysis of non-earthquake triggered landslides in China, particularly the lack of research on hourly-scale patterns, this study first established a 1982-2025 non-earthquake triggered landslide database for China with hourly temporal precision (containing 347 landslides). Subsequently, systematic multi-scale spatiotemporal distribution pattern analysis was conducted using

基金项目: 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项 (2024ZD1000500); 国家自然科学基金项目 (42471094); 四川省自然科学基金 (2024NSFSC0068); 中国科学院青年创新促进会资助项目 (2022379); 中国科学院成都山地所自主部署科研项目 (IMHE-ZYTS-01); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金资助项目 (SKLGP2024K015); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金资助项目 (SKLGP2022K009)

作者简介: 刘陈 (2000—), 男, 硕士. 主要从事滑坡时空分布规律研究. E-mail: 1376610978@qq.com

***通信作者:** 王文松, 研究员, E-mail: wws@cdu.edu.cn

statistical methods including the chi-square goodness-of-fit test, chi-square test of independence, Pearson correlation coefficient test, binomial test, and one-sample t -test. The results show that spatially, the landslide distribution density exhibits the characteristic of "the highest in Southwest China, followed by South and Southeast China, lower in Northwest, Central and East China, and the lowest in North and Northeast China". The landslide exposure index calculated based on population density and GDP density indicates that South and Southeast China are the highest-risk zone, Central and East China are the high-risk zone, Southwest China is the medium-risk zone, North and Northeast China are the low-risk zone, and Northwest China is the lowest-risk zone. Landslide frequency has a strong positive linear correlation with average slope ($R^2 \geq 0.49$) and a moderate positive linear correlation with average elevation ($0.09 \leq R^2 < 0.49$), and is significantly influenced by rainfall and climate conditions—indicating that the spatial distribution is jointly determined by terrain and climate. On the monthly scale, landslides in five regions of China are concentrated in June–August, and landslide frequency has a strong positive linear correlation with monthly average rainfall ($R^2 \geq 0.49$), meaning the monthly-scale distribution is dominated by concentrated summer rainfall. On the hourly scale, national landslides are predominantly concentrated in the 03:00–15:00 period, with rainfall-triggered landslides peaking in 00:00–12:00 (consistent with the hydrological response to nocturnal rainfall) and non-rainfall-triggered landslides peaking in 08:00–20:00 (associated with diurnal human activities)—indicating that the hourly-scale distribution is dually driven by rainfall and human activities. This study demonstrates that the multi-scale spatiotemporal distribution characteristics of non-earthquake triggered landslides in China are closely related to regional terrain, climate conditions, and human activities. It not only fills the research gap in the hourly-scale temporal distribution patterns of non-earthquake triggered landslides in China but also provides scientific references for time-specific and region-specific early warning and risk prevention and control of landslides.

Key Words: non-earthquake triggered landslides in China; hourly-scale landslide database; multi-scale spatiotemporal distribution

0 前言

中国是受滑坡灾害影响最为严重的国家之一,每年因滑坡导致的人员伤亡与经济损失极为惨重(Lin *et al.*, 2017)。中国地质环境监测院发布的《全国地质灾害通报》显示,滑坡与崩塌是主要地质灾害类型,分别占地质灾害总数的70%与10%左右,每年因地质灾害造成的直接经济损失占自然灾害总损失的20%以上(章诗芳等, 2017)。近年来,随着极端降雨事件频发、城市化进程加快及人类活动对地表环境的扰动加剧,滑坡灾害的影响范围逐渐增大,发生频率也呈上升趋势(Zhou *et al.*, 2022)。尤其是非地震触发的致命滑坡,因其突发性强、破坏性大,对社会经济发展构成重大威胁,因此构建并分析数据库对评估中国非地震触发滑坡的空间分布与发生趋势具有重要意义。

建立滑坡数据库是认识、跟踪与分析滑坡灾害的关键基础。当前,全球及中国的滑坡数据库主要分为两类:基于事件的滑坡数据库与历史滑坡数据库(Klose *et al.*, 2015)。基于事件的滑坡数据库主要收集由特定触发事件,如地震、台风、暴雨等造成的滑坡信息,多用于单一灾害事件的成因与后果分析,例如:记录2008年汶川地震引发的15,000余处滑坡、落石、泥石流等地质灾害及10,000余处潜在地质灾害点的数据库(Yin *et al.*, 2009);2011年台风Talas在日本纪伊半岛引发的1,900处含位置、面积、岩性信息的浅层滑坡数据库

(Marc *et al.*, 2019)。相比之下,历史滑坡数据库大多覆盖全球、大陆、国家或某个区域。全球范围内,Kirschbaum等(2015)构建的2007–2013年全球滑坡目录(GLC)包含5,741个降雨触发的滑坡事件,结合TRMM卫星降雨数据分析了滑坡时空分布与极端降雨的关联;David(2012)编制的2004–2010年全球致命滑坡数据库,经运行均值与空间分析发现,致命滑坡集中于中国、南亚、东南亚、拉丁美洲及加勒比区域。大陆尺度上,Monsieurs等(2018)建立的热带非洲区域滑坡清单指出,滑坡主要与年降雨模式及人口压力增加相关;Sepúlveda & Petley(2015)在拉丁美洲及加勒比区域的致命滑坡数据集揭示了滑坡地理分布的高度异质性。国家层面,新西兰、土耳其以及欧洲多国均已建立国家滑坡数据库(Van Den Eeckhaut & Hervás, 2012; Rosser *et al.*, 2017; Görüm & Fidan, 2021)。区域尺度上,包括1915–2021年中国渭河流域滑坡数据集、2010–2022年中巴经济走廊滑坡数据集及香港重大山体滑坡数据集(Slope Information System–CEDD)等(张耀南, 2021; 吴宇宏等, 2022)。

尽管全球尺度研究已明确中国是滑坡高发区(Kirschbaum *et al.*, 2015),但针对中国滑坡数据集的多尺度时空分布分析仍存在明显不足。一方面,受数据可获得性限制、非英语文献语言壁垒及灾害分类标准差异影响,现有全球数据库对中国滑坡事件的记录往往不完整;并且滑坡的蠕变特性使其发生时间难以精确界定,记录中常采用“上午”及“傍晚”等模糊表述,难以支撑高精度时间序列的时空分布分析(Lin & Wang, 2018);另一方面,在滑坡主要触发因素分类上,以往研究的分类方式也存在模糊性,或笼统划分为降雨触发与非降雨触发,或简单归为自然滑坡与人为滑坡,对滑坡的触发因素分类不够清晰(Zhang & Huang, 2018)。

目前国内已构建的非地震触发滑坡数据库,多以风险评估及致命性分析为核心研究方向(Zhang *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2025; Zhang & Huang, 2018)。尽管已有学者针对中国非地震致命滑坡的时空分布规律展开研究,但在空间维度上,现有研究往往聚焦单一维度分析——要么仅关注地形差异或气候差异,要么以滑坡致死性为核心探讨滑坡空间分布规律,尚未结合地形与气候的关键特征指标,对滑坡空间分布规律开展相关性分析;在时间维度上,研究多局限于年尺度或月尺度的时间分布规律总结,缺乏对小时尺度时间分布规律的深入探索。

针对上述问题,本研究旨在:(1)构建时间精度达小时级的中国非地震触发滑坡数据库;

(2)将中国划分为5个地形与气候相近的滑坡聚集区域并结合5个区域滑坡密度,滑坡暴露度指数,滑坡主要触发因素,地形及气候分析滑坡空间分布规律;(3)探究滑坡的月尺度及小时尺度时间分布特征,揭示主要触发因素(降雨)对滑坡不同尺度时间分布的影响。

1 数据

本研究构建了1982–2025年中国非地震触发滑坡数据集(注:数据截止至2025年7月31日,因研究开展时2025年尚未结束,后续数据未纳入统计),共收录347起滑坡事件,其发生时间精度均达到小时级。数据来源具体包括:美国政府开放数据平台收录的全球滑坡目录(链接:<https://catalog.data.gov/dataset/global-landslide-catalog-export>)、国际大地测量与地球物理学联合会旗下的Petley滑坡博客(链接:<https://blogs.agu.org/landslideblog/>)、中国各类权威媒体报道以及已发表的相关学术文献。数据库对多源非地震触发滑坡事件进行整合。每个滑坡事件包含10个字段,包括编号、日期、纬度/经度、省级行政区、滑坡类型、触发因素、滑坡规模、死亡人数、受伤人数及信息来源(表1)。

数据处理流程遵循以下规范:通过多源数据交叉校对进行重复记录判定,只要不同来源记录同时满足四项条件:发生时间差 ≤ 2 小时、经纬度偏差 $\leq 0.1^\circ$ 、省级行政区一致、滑坡规模等级一致,即判定为重复记录,此类记录仅保留信息最完整(如含精确时间、具体伤亡数据)的条目,若信息完整性一致则优先保留政府官方文件或已发表期刊文献记录;针对时

间或经纬度明显异常的记录，需溯源至官方公告、文献原文等原始信息进行验证，确认为记录错误的予以修正，无法验证的需剔除；经纬度通过 Google Earth 在线工具（链接：<http://www.earth.google.com>）获取，选取滑坡主体位置进行标注，确保坐标误差 $\leq 1,000$ m；时间戳校正统一遵循东八区（UTC+8）北京时间标准，格式规范为“*yyyy/mm/dd hh:mm:ss.00*”，因中国无夏令时调整，所有记录均不进行夏令时偏移校正，对于降雨引发的持续性滑动，时间戳以滑坡开始滑动时刻为准。

本研究中“滑坡”采用广义定义，涵盖坍塌、落石、泥石流等；类型无法确定的统一标注为“滑坡”。滑坡触发因素按源头触发因子细化，如表 1 所示，其中台风、季风等天气系统引发的强降雨，按对应天气系统记录；“降雨”特指无特定天气系统背景的正常降雨；复杂因素指无明确源头触发因子的多因素协同作用。死亡与受伤人数统计中，不包含失联或失踪人员，仅记录官方报告的死亡及受伤人数（“/”代表缺失数据），数据库部分示例如表 2。

表 1 滑坡目录中包含的字段摘要

Tab.1 Summary of fields included in the Landslide Catalog

类别	类别信息
编号	每个山体滑坡事件的唯一 ID。
日期	滑坡事件发生的确切时间，记为 <i>yyyy/mm/dd hh:mm:ss.00</i> (24 小时制，UTC+8)
纬度/经度	滑坡事件的经纬度，采用十进制度数 (DD) 格式。
省级行政区	滑坡事件所在中国省份/自治区/直辖市/特别行政区。
滑坡类型	包括广义定义的“滑坡”事件类型，如：滑坡、碎屑流、落石、土流、雪崩、黄土滑坡、垃圾坍塌、河岸坍塌、泥石流或复杂事件(Cruden & Varnes, 1996)。
触发因素	降雨、洪水、冻融、季风、台风、施工、融雪、采矿、热带气旋、复杂因素。
滑坡规模	<p>滑坡规模分类参考 Kirschbaum 等 (2010) 的方法，将原有 1-5 级划分归为以下类别：</p> <ul style="list-style-type: none"> · 小型：体积<10 m³，影响单个山坡或小范围，基础设施轻微受损，无或极少伤亡。 · 中型：10 m³ \leq 体积$<1,000$ m³，可能为单次或多次滑坡，基础设施中度受损，无或少量伤亡。 · 大型：$1,000$ m³ \leq 体积$<100,000$ m³，影响范围较广，基础设施严重受损，可能造成数十至数百人伤亡和流离失所。 · 特大型：$100,000$ m³ \leq 体积$<1,000,000$ m³，影响整个村庄或更大区域，造成大量人员伤亡和数千人流离失所。 · 灾难型：体积$\geq 1,000,000$ m³，影响多个村镇或区域，造成灾难性伤亡和数十万人流离失所，基础设施毁灭性破坏。
死亡人数	滑坡造成的死亡人数，以个为单位。
受伤人数	滑坡造成的受伤人数，以个为单位。
信息来源	指向滑坡相关的新闻报告、中外文献或其他已发布的开源滑坡数据库。

表 2 数据库部分示例

Table.2 Partial examples of the database

编号	日期	纬度	经度	省级行政区	滑坡类型	触发因素	滑坡规模	死亡人数	受伤人数	信息来源
1	1982/07/18 01:15:00.00	30.9292	108.693 5	重庆	滑坡	降雨	灾难型	/	/	Wen <i>et al.</i> , 2004
2	1982/07/18 10:13:12.00	30.3200	108.340 0	重庆	滑坡	降雨	灾难型	/	/	Wen <i>et al.</i> , 2004
3	1983/03/07 16:40:36.00	35.5667	103.583 3	甘肃	滑坡	冻融	灾难型	237	/	Kang <i>et al.</i> , 2018
4	1985/06/12 03:08:24.00	30.9506	110.808 9	湖北	滑坡	降雨	灾难型	/	/	Wen <i>et al.</i> , 2004

5	1991/09/23 17:05:12.00	27.5750	103.853 1	云南	碎屑流	降雨	灾难型	216	8	Petley 滑坡博客
.....										
343	2024/07/28 23:00:00.00	24.5000	105.230 0	广西	滑坡	降雨	中型	0	0	南国早报, 2024-07-29
344	2024/08/12 02:00:00.00	32.3817	108.896 1	陕西	滑坡	复杂因素	大型	0	0	安康市自然资源局, 2024-08-22
345	2025/07/02 14:30:00.00	33.7167	106.233 3	陕西	滑坡	降雨	大型	1	1	宝鸡市水利局, 2025-07-02
346	2025/07/27 05:08:00.00	40.3500	113.883 3	陕西	滑坡	降雨	大型	1	0	新浪财经, 2025-07-30
347	2025/07/27 10:00:00.00	22.5569	99.9320	云南	滑坡	降雨	大型	0	0	新华社, 2025-07-30

2 研究方法

为分析中国非地震触发滑坡的时空分布规律，我们采用多种统计检验方法，包括：

卡方拟合优度检验：适用于分类数据的分布拟合检验，且需满足样本为独立观测值、每个类别理论期望频数 ≥ 5 。该方法可用于判断数据是否符合特定分布（如本研究中月尺度滑坡频次是否符合均匀分布），通过计算卡方统计量与标准残差，量化观测值与理论期望值的偏离程度，进而识别高发月份。卡方统计量计算公式为：

$$\chi^2 = \sum \frac{(O_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}} \quad (1)$$

其中 O_{ij} 为观测值， E_{ij} 为理论期望值。以 0.05 为显著性水平（以下方法均采用此显著性水平），若 $p > 0.05$ 则认为月尺度的滑坡频次符合均匀分布，反之则不符合均匀分布。标准残差计算公式为：

$$z_{ij} = \frac{O_{ij} - E_{ij}}{\sqrt{E_{ij}(1 - \frac{n_i}{N})(1 - \frac{n_j}{N})}} \quad (2)$$

其中 n_i 、 n_j 为边际和， N 为总样本量，残差绝对值越大，实际与理论值的偏差越显著。

卡方独立性检验，适用于检验两个分类变量的独立性；需满足样本量足够（列联表中每个单元格的期望频数 ≥ 5 ）、观测值相互独立。首先构建“ 2×2 ”列联表、计算期望频数与 χ^2 值，再通过 p 值判断，若 $p > 0.05$ 说明这两组数据没有明显关联（相互独立）；反之则表明两组数据存在显著关联。卡方统计量计算公式为：

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \frac{(O_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}} \quad (3)$$

其中 O_{ij} 为观测值， E_{ij} 为理论期望值， r 代表列联表的行数， c 代表列联表的列数。

皮尔逊相关系数检验，适用于判断两个连续型变量的稳定线性关联（非随机波动）；需满足变量呈连续型、数据符合正态分布、观测值相互独立，无异常值（或已完成异常值处理），其核心是计算相关系数 r ，公式为：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

其中 x_i 、 y_i 为变量观测值， \bar{x} 、 \bar{y} 为样本均值， n 为样本量， r 取值 $[-1, 1]$ ，表示关联方向（ $r > 0$

正相关、 $r < 0$ 负相关)；关联强度由 R^2 (取值 $[0, 1]$ ，代表一个变量变异可由另一个变量线性变化解释的比例)量化，分弱相关($R^2 < 0.09$)、中等相关($0.09 \leq R^2 < 0.49$)、强相关($R^2 \geq 0.49$)；需结合 p 值检验可靠性， $p < 0.05$ 则存在统计学意义的线性关联，反之则不存在。

二项分布检验，适用于判断二分类事件(如“成功/失败”)的实际发生概率与理论期望概率是否一致；需满足事件为二分类、每次试验成功概率固定、试验相互独立。该方法可具体应用于小时尺度滑坡高发时段的确定：将一天划分为 12 小时滑动窗口(如 1:00–13:00、2:00–14:00 依次推移)，以窗口内发生滑坡定义为“成功事件”，并计算各窗口的滑坡发生概率，其概率计算公式为：

$$P(X = k) = \binom{n}{k} p^k (1 - p)^{n-k} \quad (5)$$

其中 n 是试验次数， k 是成功次数， p 是单次试验成功的概率，若某 12 小时滑动窗口检验 $p < 0.05$ ，且窗口内滑坡频次呈现明显的集中峰值，则判定该时段为滑坡高发时段。

单样本 t 检验，适用于判断样本所在总体均值与已知总体均值是否存在显著差异；需满足样本来自正态分布总体、观测值相互独立、总体标准差未知、变量为连续型数据。本研究用于判断不同区域小时尺度滑坡高发时段与全国小时尺度滑坡高发时段是否存在明显不同，单样本 t 统计量公式为：

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s/\sqrt{n}} \quad (6)$$

其中 \bar{x} 为样本均值， μ_0 为已知总体均值， s 为样本标准差， n 为样本量。样本标准差 s 计算公式：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (7)$$

其中 x_i 为样本中第 i 个观测值， $\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ 为观测值与样本均值的偏差平方和， $n - 1$ 为自由度。通过该检验，能进一步判断这种“不同”是由偶然的误差导致，还是存在稳定的、有规律的系统偏差。若 $p > 0.05$ ，认为二者无显著差异，说明这种“不同”是由偶然误差导致；反之则认为二者存在显著差异且这种差异是稳定存在的，并非偶然的误差。在衡量不同区域小时尺度滑坡高发时段与全国小时尺度滑坡高发时段偏移情况时，以“时段中点差值”作为计算偏移量的标准。

滑坡暴露度指数是量化区域滑坡灾害中承灾体暴露程度的综合指标，用于评估人口、经济等承灾体与滑坡风险区的重叠水平及潜在损失风险；适用于区域尺度滑坡灾害风险评估，其核心是通过加权求和计算综合指数，公式为：

$$E = \sum_{i=1}^n E^i b^i \quad (8)$$

式中 E 为暴露度指数； E^i 为暴露度评估的第 i 个指标； b^i 为相应指标的权重系数； n 为指标总个数，暴露度指标包括人口密度和 GDP 密度，二者权重系数均取 0.5，公式中涉及的人口密度与 GDP 密度均采用比例归一化处理。指数取值范围为 $[0, 1]$ ，值越大代表区域承灾体暴露程度越高，可结合实际划分高、中、低风险等级，其结果直接反映承灾体在滑坡风险中的暴露水平。

3 结果

3.1 非地震触发滑坡空间分布规律

由图 1b 可见中国非地震触发滑坡的空间分布呈现出显著集聚特征，其高发区域多位于

地质环境复杂且水热条件充沛的叠加地带。地形与气候是影响滑坡发育的关键宏观背景要素，其中地形分区的核心判别指标为海拔高度与地形起伏度（相对高差），气候分区则以热量与水分条件为关键依据。基于此，本研究选取中国大陆各省级行政区的年均降雨量、平均高程、平均坡度及年均气温四项核心指标，结合省级行政区行政边界，采用聚类分析方法对上述指标进行量化归类（图 1a）。遵循“区域内指标特征相近、区域间差异显著”的原则，将中国大陆划分为 5 个非地震触发滑坡聚集区域（图 1b、d）。5 个区域面积及滑坡单位面积密度统计如下（表 3）：西北区域含甘肃、宁夏、新疆、青海、陕西，总面积 304 万 km²，滑坡 62 起，单位面积密度 0.204 起/万 km²，超 75% 滑坡集中于陕西（21 起）与甘肃（26 起）两地；西南区域含四川、重庆、贵州、云南、西藏，总面积 236 万 km²，滑坡 153 起，单位面积密度 0.648 起/万 km²（5 个区域最高），主要分布在四川（50 起）、贵州（35 起）及云南（38 起）；华中及华东区域含河南、湖北、湖南、江西、安徽、江苏、山东、上海，总面积 208 万 km²，滑坡 40 起，单位面积密度 0.192 起/万 km²，主要集中在湖南（15 起）及湖北（18 起）两地；华北及东北区域含山西、河北、北京、天津、吉林、辽宁、黑龙江、内蒙古，总面积 244 万 km²，滑坡 22 起，单位面积密度 0.090 起/万 km²（5 个区域最低），山西省（14 起）滑坡频次显著高于区域内其他省份；华南及东南区域含浙江、福建、广东、广西、海南、台湾、香港、澳门，总面积 268 万 km²，滑坡 70 起，单位面积密度 0.261 起/万 km²，福建（10 起）、广东（10 起）、广西（13 起）、浙江（12 起）分布均匀，台湾（21 起）频次最高。综合来看，中国非地震触发滑坡的空间分布呈现明显区域差异，单位面积密度依次为：西南最高，华南及东南次之，西北与华中及华东较低，华北及东北最低。

我们进一步计算了 5 个区域滑坡暴露度指数，如表 3 所示，5 个区域风险特征差异显著：华南及东南区域暴露度指数达 0.461，为 5 个区域中最高，属最高风险核心区，尽管该区域滑坡单位面积密度低于西南区域，但 0.395 的归一化人口密度与 0.455 的归一化 GDP 密度显著提升了区域暴露水平，加之该区域以低山丘陵为主，夏季台风与梅雨天气易诱发滑坡，且珠三角、长三角产业与人口向丘陵山区延伸，形成人口、经济与滑坡高发区高度重叠格局，大幅增加了滑坡灾害造成的人口与经济损失；华中及华东区域暴露度指数为 0.320，属高风险区，区域滑坡单位面积密度较低，但归一化人口密度（0.407）与 GDP 密度（0.397）处于较高水平，虽然该区域人口与经济核心集中于长江中下游平原，但因基数庞大，鄂西、湘西山区的滑坡仍会对周边产业发展造成明显影响；西南区域暴露度指数 0.167，属中风险区，该区域滑坡单位面积密度为 5 个区域最高，横断山区复杂自然条件叠加交通与水利工程建设、采矿等人为活动干扰，形成“自然+人为”双重风险格局，但由于归一化人口密度（0.074）与 GDP 密度（0.050）较低，且人口与经济活动主要集中于四川盆地，与滑坡高发区空间重合度低，风险得到一定缓冲；华北及东北区域暴露度指数 0.033，属低风险区，该区域滑坡单位面积密度最低，且归一化人口密度（0.095）与 GDP 密度（0.082）偏低，区域以平原为主，气候稳定少雨，仅山西黄土高原有少量滑坡，人口与经济活动集中于平原城市群，滑坡灾害影响较小；西北区域暴露度指数 0.019，为 5 个区域最低，区域滑坡单位面积密度中等，但归一化人口密度（0.029）与 GDP 密度（0.016）极低，75% 的滑坡集中于陕甘黄土高原，而人口与经济活动主要聚集在关中平原、新疆绿洲等区域，与滑坡高发区形成空间错位，整体灾害风险最低。

表 3 5 个区域滑坡暴露度指数统计

Table 3 Landslide exposure index statistics of the five regions

区域	滑坡数量 <i>N</i>	区域面积 (万 km ²)	单位面积密度 (起/万 km ²)	归一化人口密度	归一化 GDP 密度	暴露度指数 <i>E</i>	风险等级
西北	62	304	0.204	0.029	0.016	0.019	最低风险
西南	153	236	0.648	0.074	0.050	0.167	中风险

华中及华东	40	208	0.192	0.407	0.397	0.320	高风险
华北及东北	22	244	0.090	0.095	0.082	0.033	低风险
华南及东南	70	268	0.261	0.395	0.455	0.461	最高风险

注：以上区域面积包括陆地和海域面积，相关数据来源于《中国统计年鉴 2024》以及《中国国土资源统计年鉴 2024》

我们还对滑坡的主要触发因素进行了统计（图 1c），整体来看，中国非地震触发滑坡以气候关联型触发因素（包含降雨、季风、台风、热带气旋等）为主导，非气候关联型触发因素（涵盖施工、采矿、复杂因素等）为补充，深刻体现了气候条件在中国滑坡触发中的核心地位。从 5 个区域具体情况分析：西南区域的滑坡以降雨为首要触发因素，“复杂因素”次之。该区域川西高原、云贵高原兼具高寒陡坡与构造破碎带的地质背景，同时大规模工程建设与采矿活动广泛分布，降雨既可以直接浸润岩土体、降低其抗剪强度诱发滑坡，也能与施工扰动形成叠加效应，共同促成该区域滑坡的高频发生；西北区域降雨仍为主要触发因素，“复杂因素”占比较高，冻融、融雪、采矿、施工为次要因素，该区域黄土层易侵蚀，夏季暴雨与春季冻融交替叠加人类活动，导致触发因素多元化；华南及东南区域的触发因素以降雨为核心，同时台风、热带气旋是其区别于其他区域的标志性触发因子。由于该区域毗邻南海，台风及热带气旋活动频繁，这些活动不仅会带来短时强降雨加快流体入渗，而且伴随的狂风还会加剧坡体表层岩土体的松动，二者协同作用大幅提升了滑坡的发生概率；华中及华东区域以降雨为主、复杂因素次之，丘陵与平原交错的地形，叠加长江中下游水库定期屯水放水，形成独特的库岸滑坡聚集区；华北及东北区域虽样本量较少，但仍以降雨为主要触发因素，融雪、采矿等为次要触发因素，区域特定地形与采矿活动、季节性融雪结合，构成典型触发特征。综合来看，降雨是 5 个区域共有的首要触发因素，凸显了其在滑坡触发因素中的主导地位（全国降雨触发滑坡占总滑坡的 65%）；同时，采矿、施工活动的影响在西南、西北区域尤为突出（长期采矿形成的高陡边坡是滑坡的高度集中区），而华南及东南区域受低缓丘陵地形限制，此类活动扰动触发的滑坡占比极低，以上差异体现了地形条件对滑坡空间分布的影响。

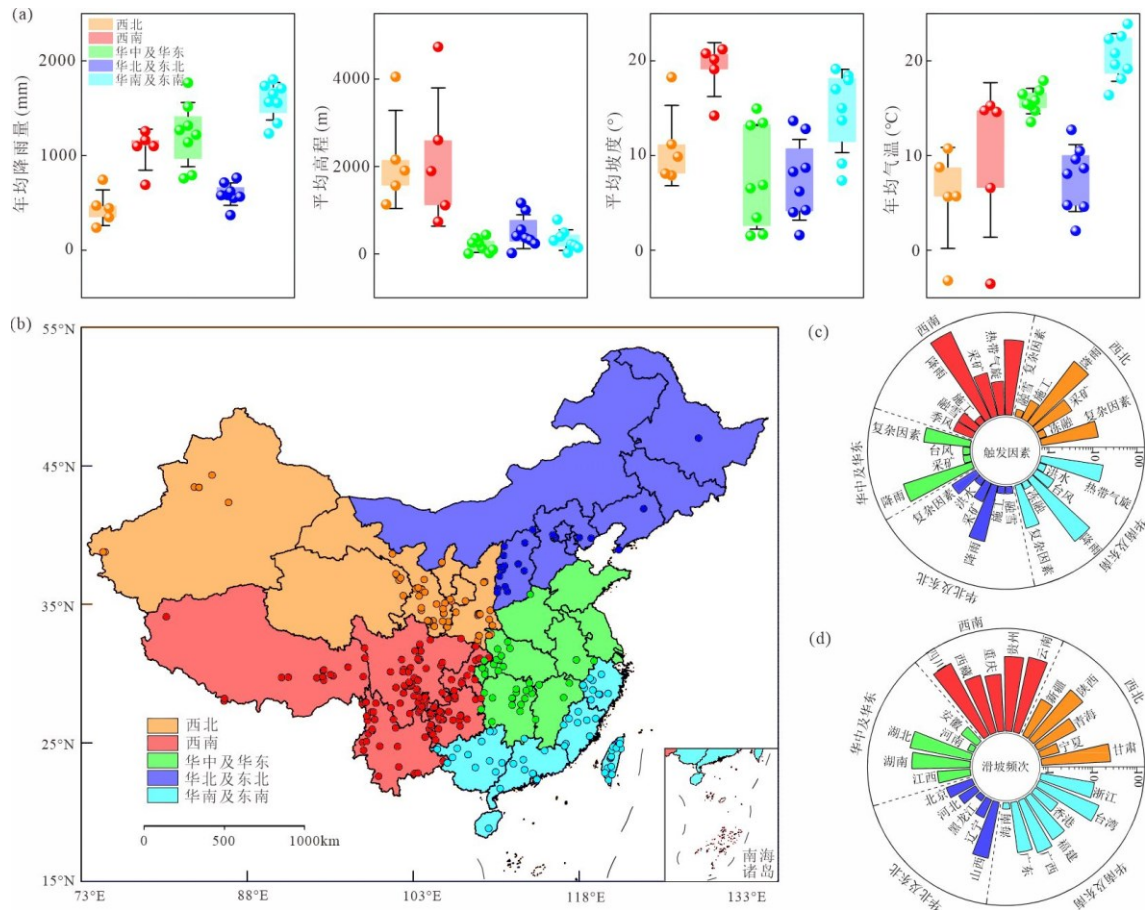


图1 (a) 中国省级行政区在四项地形与气候指标上的分布特征; (b) 中国5个区域非地震触发滑坡空间分布; (c) 滑坡触发因素统计; (d) 滑坡频次统计

Fig.1 (a) Distribution characteristics of China's provincial-level administrative regions in four terrain and climate indicators; (b) Spatial distribution of non-earthquake-triggered landslides in five regions of China; (c) Statistics of landslide-triggering factors; (d) Statistics of landslide frequency

结合以上5个区域滑坡密度、滑坡暴露度指数及主要触发因素统计可初步判定中国非地震触发滑坡的空间分布格局与地形及气候有关,我们进一步选取了中国各省级行政区的年均降雨量、平均高程、平均坡度及年均气温四项指标,结合各省级行政区非地震触发滑坡频次进行相关性分析(图2)。其中滑坡频次与平均高程($p=3.2 \times 10^{-3}$)、平均坡度($p=2.0 \times 10^{-6}$)达到显著性线性相关水平,与年均降雨量($p=5.6 \times 10^{-1}$)、年均气温($p=4.9 \times 10^{-1}$)则未达到显著性线性相关水平。具体来看:平均坡度与滑坡频次呈强线性正相关($R^2=0.56$),平均高程与滑坡频次呈中等强度线性正相关($R^2=0.15$),其关联性弱于平均坡度。这是因为坡度越大,坡体重力的下滑分力越强,越容易克服岩土体的抗滑力,进而因重力失衡失稳;而高程本身不直接导致滑坡,只是高海拔区域常伴随陡峭地形、断裂带发育等致滑地质条件,高程是这些条件的“间接表征”而非直接致滑因素。至于年均降雨量、年均气温与滑坡频次未达显著性线性相关水平,并非说明这两项指标与滑坡频次无关,而是因为降雨对滑坡的触发具有“时效性”(如短时强降雨而非年均总量更易致滑)和“区域性”(如地势平坦的区域缺乏滑坡发育的基本地形条件),气温则需通过冻融循环,夜间降温水汽凝结等间接作用影响岩土体稳定性,仅靠单一年均降雨量或气温指标难以反映其直接关联。

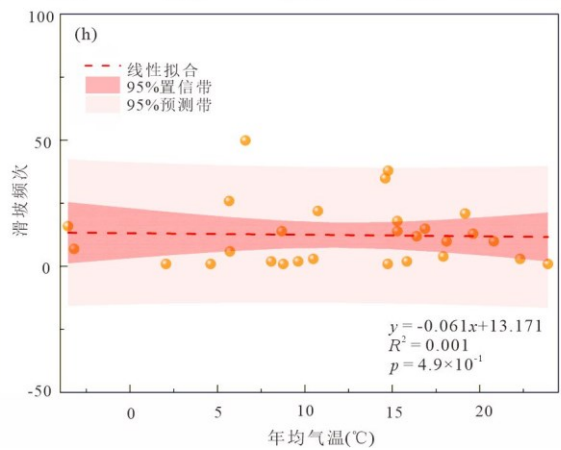
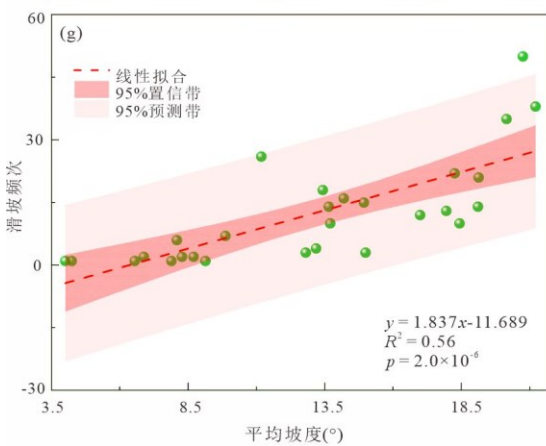
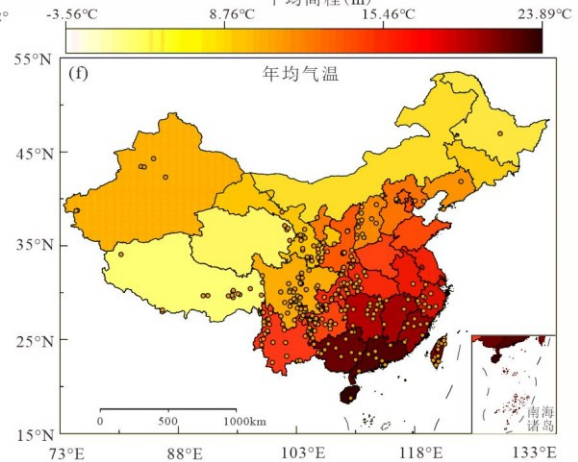
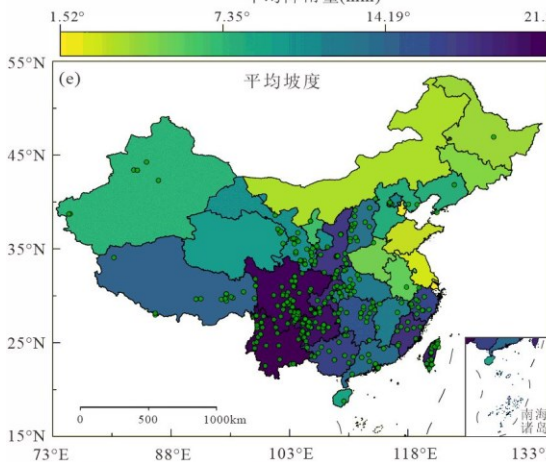
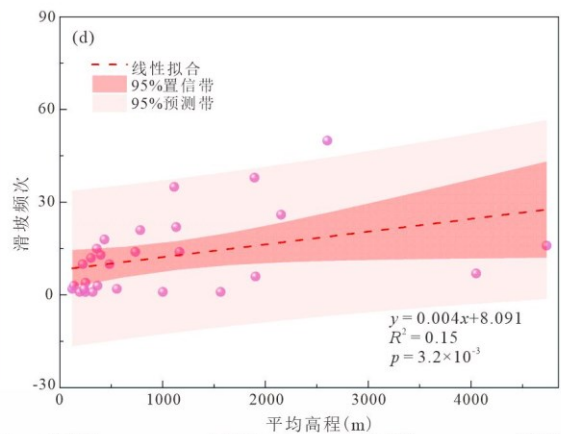
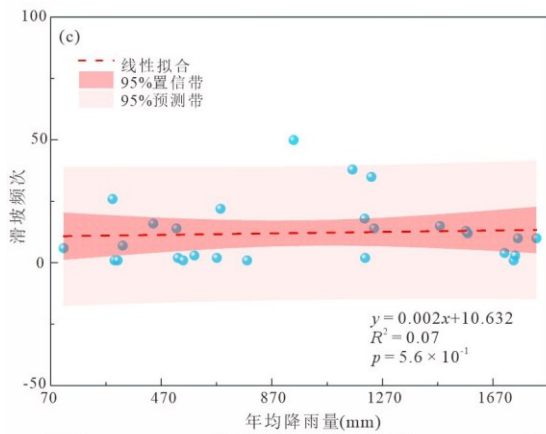
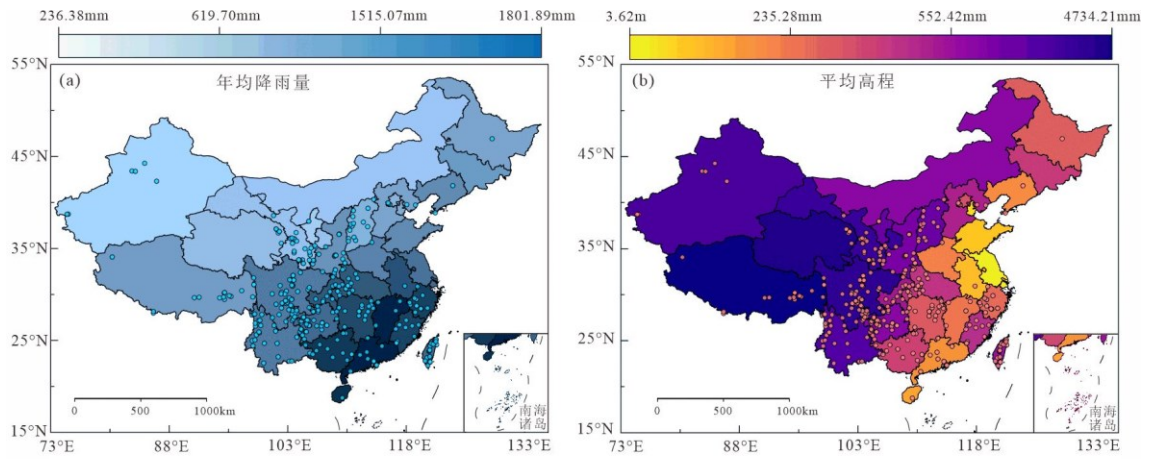


图2 中国各省级行政区非地震触发滑坡与年均降雨量, 平均高程, 平均坡度, 年均气温相关性检验结果
 Fig.2 Correlation test results of non-earthquake triggered landslides with annual average rainfall, average elevation, average slope, and annual average temperature in provincial-level administrative regions of China

总的来说, 中国非地震触发滑坡空间上呈现“西南单位面积滑坡密度最高、华南及东南次之、西北与华中及华东较低、华北及东北最低”的特征, 以人口密度与 GDP 密度为指标计算的暴露度指数指示华南及东南为最高风险区, 华中及华东为高风险区, 西南为中风险区, 华北及东北为低风险区, 西北为最低风险区。对滑坡主要触发因素的统计分析, 以及滑坡频次与年均降雨量、平均高程、平均坡度及年均气温四项核心指标的相关性分析说明其空间分布格局与地形及气候有关。

3.2 非地震触发滑坡月尺度分布规律

我们统计了全国及 5 个区域月尺度滑坡频次 (图 3)。从全国来看, 6-8 月的滑坡频次显著高于其他月份, 5 个区域虽总量规模差异较大, 但均在同期呈现滑坡频次峰值。5 个区域月尺度滑坡频次的卡方拟合优度检验 (表 4) 均满足 $p < 0.05$, 可认为 5 个区域滑坡频次在 12 个月内不是均匀分布的, 而是存在显著的月份差异。

为消除数据规模对滑坡频次高发月份判断的干扰, 研究采用标准化残差进一步分析。标准化残差热图显示 (图 4), 5 个区域残差峰值均集中于 6-8 月, 即 6-8 月为全年滑坡高发时期。此外, 卡方独立性检验显示 (表 4), 5 个区域滑坡高发月份与区域的关联性不满足 $p > 0.05$, 认为二者无显著关联性, 即滑坡高发月份不受区域显著影响, 全国 5 个区域非地震触发滑坡均呈现在 6-8 月高发的趋势, 这与中国 6-8 月全国季节性降雨集中模式吻合, 且全国 5 个区域月平均降雨量与月尺度滑坡频次几乎实现同步涨落, 二者均在 6-8 月达到峰值 (图 3)。

中国 6-8 月受夏季风影响, 全国普遍进入降雨集中期, 为滑坡发生提供良好的雨水条件。为验证季节性降雨的驱动作用, 我们对全国及 5 个区域的月尺度滑坡频次与月平均降雨量进行相关性分析 (图 5), 结果发现: 全国及 5 个区域月尺度滑坡频次与月平均降雨量线性相关性均达到显著性水平 ($p < 0.05$), 并且为强线性正相关 ($R^2 > 0.49$), 证实滑坡高发月份与月平均降雨量存在显著关联, 月尺度滑坡频次随月平均降雨量的增加而升高。6-8 月滑坡频次显著升高与 6-8 月降雨量增大的季节性规律呼应。

表 4 5 个区域月尺度滑坡频次卡方拟合优度/独立性检验汇总

Table 4 Summary of monthly-scale chi-square goodness-of-fit tests and chi-square tests of independence for landslide events in five regions

区域	滑坡数量 N	χ^2 (卡方拟合优度)	p (卡方拟合优度)	χ^2 (高发月份×区域)	p (高发月份×区域)
西北	62	58.4	1.85×10^{-8}		
西南	153	137.1	1.23×10^{-23}		
华中及华东	40	36.8	1.24×10^{-4}	16.2	1.8×10^{-1}
华北及东北	22	22.7	1.93×10^{-2}		
华南及东南	70	41.1	2.33×10^{-5}		

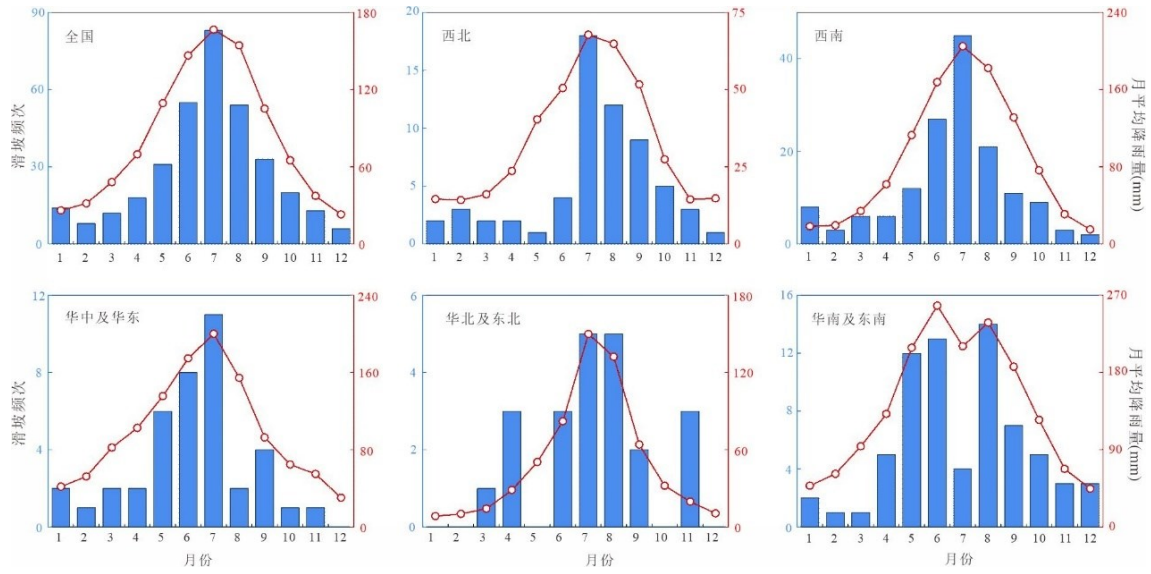


图3 全国及5个区域月平均降雨量与月尺度滑坡频次

Fig.3 Monthly average rainfall and monthly-scale landslide frequency across China and its five regions

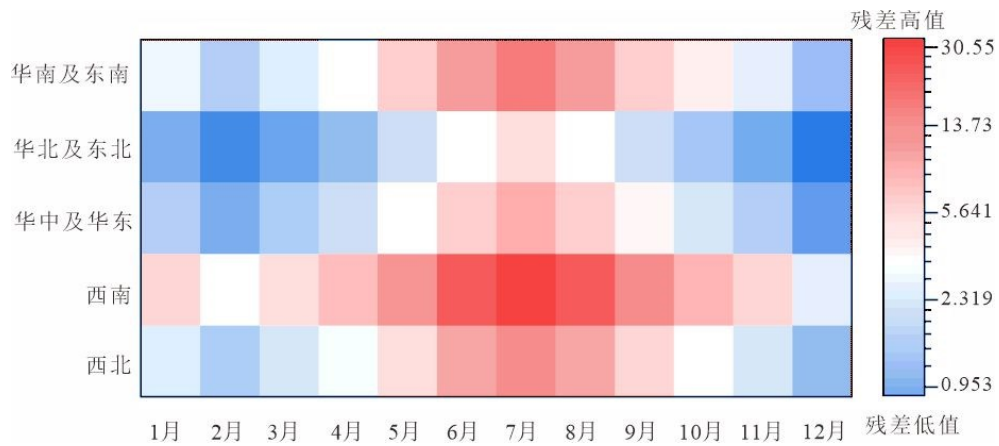


图4 5个区域月尺度滑坡频次标准化残差 heatmap

Fig.4 Heatmap of standardized residuals of monthly-scale landslide frequency in five regions

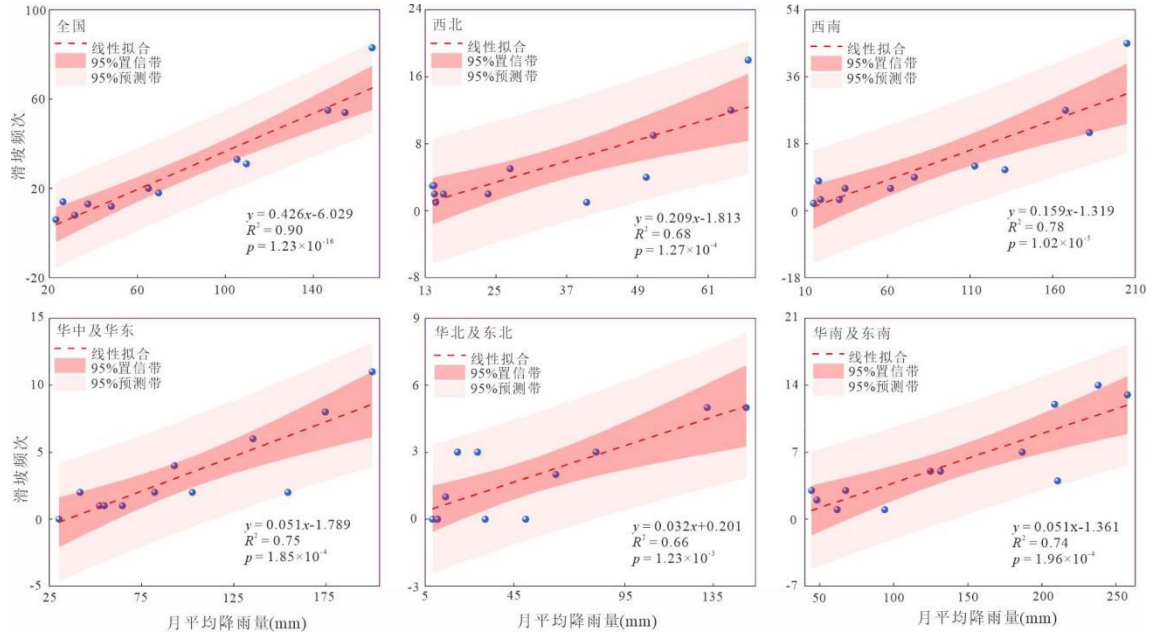


图 5 全国及 5 个区域月度滑坡频次与月平均降雨量相关性检验结果

Fig.5 Results of correlation test between monthly scale landslide frequency and monthly average rainfall in the whole country and five regions

3.3 非地震触发滑坡小时尺度分布规律

为明确小时尺度滑坡高发时段，本研究结合柱状图（图 6a）、概率密度曲线（图 6b）与统计检验（表 5），对全国及 5 个区域的小时尺度滑坡分布展开分析：全国滑坡高发时段为 03:00–15:00 ($p=7.18 \times 10^{-3}$ ，达显著性水平)，除华中及华东区域 ($p=2.68 \times 10^{-1}$) 未达显著性水平外，其余区域均存在明确高发时段，西南、华北及东北与全国时段一致，西北（12:00–00:00）、华南及东南（06:00–18:00）呈现客观的时段差异。从滑坡事件的时段集中性特征分析，5 个区域高发时段内发生的滑坡事件占该区域滑坡总数量的比例均超过 60%，其中华北及东北区域的占比高达 82%；这一滑坡高发时段集中分布特征可通过图 6b 中 5 个区域概率密度曲线的峰值区间与形态特征得到直观验证。

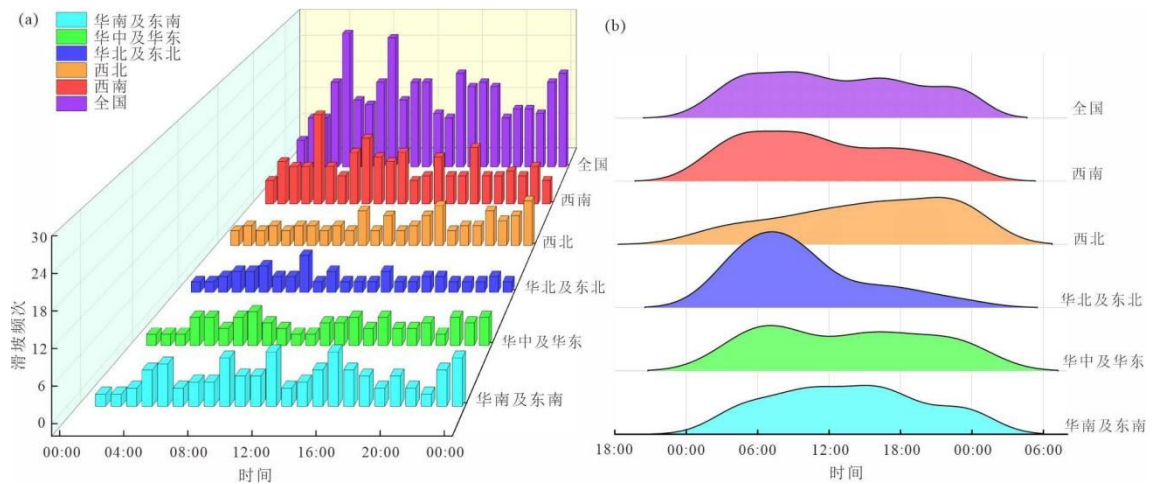


图 6 (a) 全国及 5 个区域小时尺度滑坡频次统计；(b) 全国及 5 个区域小时尺度滑坡概率密度分布

Fig.6 (a) Hour-scale landslide frequency statistics for the whole country and five regions; (b) Hour-scale probability density distribution of landslides for the whole country and five regions

表 5 全国及 5 个区域小时尺度滑坡频次二项分布检验汇总

Table 5 Summary of hourly-scale binomial distribution tests for landslides at national and regional levels

区域	高发时间段	p (二项分布)	95%置信区间	标准误差 SE	高发时段滑坡占比
全国	03:00-15:00	7.18×10^{-3}	[52.15%, 62.55%]	2.65%	57%
西南	03:00-15:00	9.45×10^{-3}	[53.05%, 68.52%]	3.95%	61%
西北	12:00-00:00	1.51×10^{-2}	[54.35%, 77.91%]	6.01%	66%
华北及东北	03:00-15:00	4.34×10^{-3}	[65.70%, 97.94%]	8.22%	82%
华中及华东	03:00-15:00	2.68×10^{-1}	[44.82%, 75.18%]	7.75%	60%
华南及东南	06:00-18:00	4.14×10^{-2}	[51.54%, 74.18%]	5.78%	63%

为探究滑坡小时尺度高发时段的核心驱动机制,结合降雨触发型滑坡在全国非地震触发滑坡中的主导地位(全国降雨触发滑坡占总滑坡的 65%),本研究将滑坡划分为降雨与非降雨触发型开展小时尺度分析。从全国层面看(图 7a、b),降雨触发型滑坡的高发时段集中于 00:00-12:00,这与中国广泛存在的“夜雨”现象密切相关:夜间地形抬升气流与大气对流易促成降雨集中于夜间至凌晨(20:00-08:00),而坡体岩土体从降雨入渗到饱和失稳通常存在数小时的水文响应滞后效应,使得滑坡多集中发生在降雨结束后的凌晨至上午时段(王诗敬等, 2022; 冯文凯等, 2025)。从图 7b 的分布曲线及统计结果可知,西南($p=5.7 \times 10^{-3}$)、华南及东南($p=2.7 \times 10^{-2}$)的 p 值均小于 0.05,达到统计显著性水平,其时段特征具有较高可信度。其中,西南区域以高山峡谷为主要地形,地质构造破碎,岩土体多为破碎变质岩,自身稳定性较差;叠加该区域典型的夜雨特征,雨水入渗后进一步削弱本就不稳定的岩土体抗滑能力,在水文响应滞后效应作用下,滑坡集中高发于 00:00-12:00,与全国核心规律高度契合。华南及东南区域以低山丘陵为主,山坡土层浅薄、坡度较陡,岩土多为风化后的红层碎屑岩;该区域常受台风/季风影响,降雨多在凌晨开始且强度大,大量的雨水让坡体快速被冲刷浸透,进而诱发滑坡,使得高发时段集中在 04:00-16:00。西北、华北及东北、华中及华东区域的 p 值大于 0.05,未达显著性水平,推测是样本量不足所致;但单样本 t 检验($p=2.5 \times 10^{-1} > 0.05$)显示,这些区域与全国时段的差异属于随机误差,并非稳定的地域特有规律。综上,尽管部分区域因样本量未达统计显著,但 00:00-12:00 这一全国降雨触发型滑坡高发时段,是中国夜雨现象与坡体水文响应滞后效应共同作用的结果,并且这一核心规律对中国 5 个区域均具备普适性。

非降雨触发型滑坡未呈现统一且显著的集中高发时段:图 7d 的概率密度曲线形态平缓,无明显峰值,全国尺度二项分布检验的 p 值为 5.5×10^{-2} (接近但未达到 0.05 的显著性水平),5 个区域的二项分布 p 值也均未满足显著性要求。这种分散性分布特征,主要是由施工、采矿等非降雨型触发因素本身的随机性所导致的;也正因如此,由这类因素诱发的滑坡,在时间分布上难以形成明显的集中高发时段。但从曲线趋势可明确,全国及大部分区域非降雨触发滑坡的概率分布峰值仍集中于 08:00-20:00,且图 8a 中全国 5 个区域非降雨触发滑坡高发时段差异的单样本 t 检验 p 值为 7.9×10^{-1} (远大于 0.05 的显著性水平),表明 5 个区域间的高发时段差异并不显著,为随机误差,而 08:00-20:00 这一时段的高发特征具有全国普适性。这一规律与人类日间高强度活动的时间特征高度契合:根据《建筑施工场界环境噪声排放标准》,全国建筑工程、矿山开采等作业的法定主要时段为 06:00-22:00;其中 89% 的露天采矿开挖、76% 的山区边坡扰动作业集中在 08:00-18:00(何晓锐等, 2022),与非降

雨触发滑坡高发时段的重叠度达 83%，且该时段内非降雨触发滑坡占比为 55%，高于降雨触发滑坡占比。同时，山区矿区运输、公路货运的日均流量峰值集中在早高峰 08:00-10:00 和晚高峰 17:00-19:00，这一特征也得到图 8b 支持，全国非降雨触发滑坡时段频次统计显示，早高峰及晚高峰滑坡频次明显增加。此外，区域尺度数据进一步佐证了人类活动对非降雨触发滑坡高峰时段的决定作用：西南、西北等矿产资源富集区域的统计显示，采矿区边坡开挖日均作业时长为 8.2 小时，其中 6.5 小时落在 08:00-20:00；华中及华东山区公路基建项目中，72%的路基开挖、边坡支护作业集中在 08:00-19:00，与该区域非降雨触发滑坡高发时段的重合率达 92%（张玉芳等，2023）。

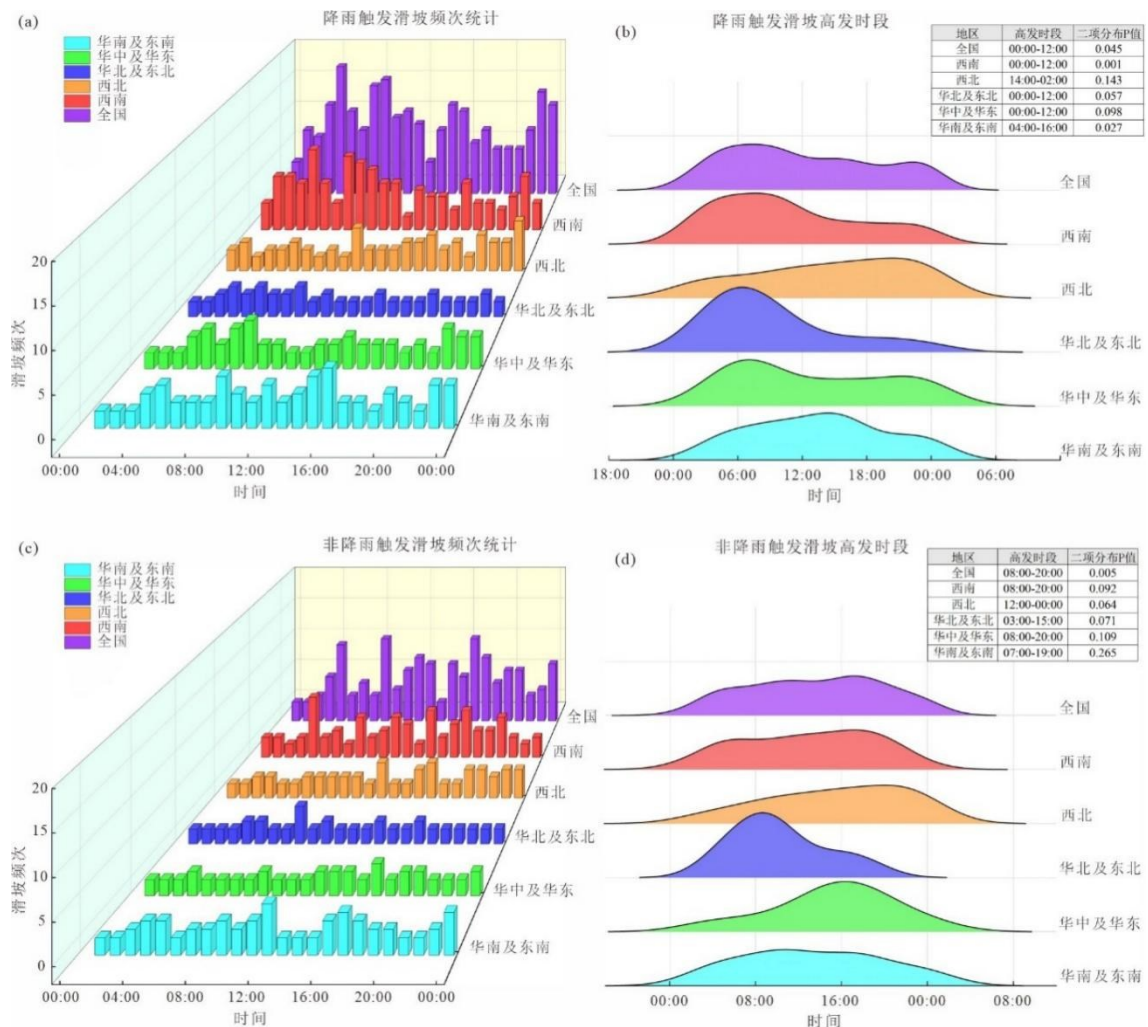


图 7 全国及 5 个区域小时尺度滑坡频次统计及小时尺度滑坡概率密度分布；(a)(b)降雨触发型滑坡；(c)(d)非降雨触发型滑坡

Fig.7 Statistics of hour scale landslide frequency and hour scale probability density distribution of landslides in the whole country and five regions; (a) (b) Rainfall triggered landslides; (c) (d) Non rainfall triggered landslides

从图 8b 的小时尺度滑坡频次叠加图可进一步明确总体滑坡高发时段的形成逻辑：全国总体滑坡高发时段（03:00-15:00），是降雨触发型滑坡高发时段（00:00-12:00）与非降雨触发型滑坡高发时段（08:00-20:00）形成的重叠区间；同时，由于降雨触发型滑坡的时段集中性更强（曲线峰值更尖锐），其对总体时段的分布贡献度更高，最终使得总体高发时段更偏向降雨触发型的集中区间。

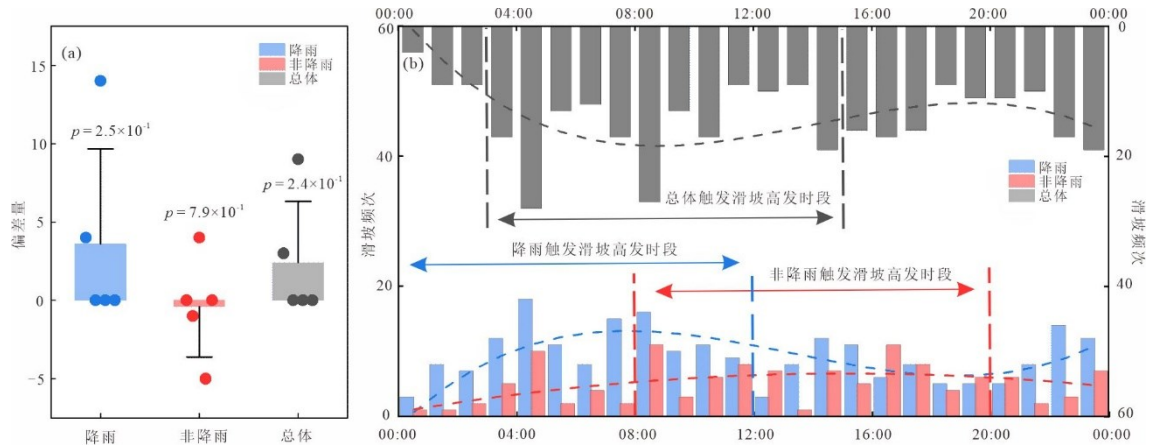


图 8 (a) 全国及 5 个区域滑坡高发时段的偏差量统计和单样本 t 检验结果; (b) 全国总体、降雨触发型、非降雨触发型滑坡高发时段分布

Fig.8 (a) Statistics of deviation values and results of one-sample t -test for high-incidence periods of landslides at national and five regional levels; (b) Distribution of high-incidence periods for national overall、rainfall-triggered、non-rainfall-triggered landslides

4 讨论

空间上, 中国非地震触发滑坡呈现“西南单位面积滑坡密度最高、华南及东南次之、西北与华中及华东较低、华北及东北最低”的区域梯度格局。其中, 西南区域作为滑坡高发核心区, 汇集了横断山区、青藏高原东缘等地形陡峭区域, 且地质构造复杂, 为滑坡发生提供了有利的地形与地质条件; 华南及东南区域紧随其后, 以广泛分布的丘陵地貌为主要特征, 构成滑坡次高发梯队; 西北区域 (含黄土高原及内陆山地) 与华中及华东区域 (以低山丘陵与平原交错为主), 因地形起伏程度相对缓和, 滑坡频次处于较低水平, 同属第三梯队; 华北及东北区域则以平原、草原为主要地形, 地势平缓, 成为滑坡频次最低的区域。值得注意的是, 滑坡密度与灾害风险并非线性对应, 人口与经济的空间分布通过暴露度指数重构了风险格局, 使人口经济密集区即便滑坡密度不高, 仍呈现高风险特征。在触发因素方面, 5 个区域均以降雨为主要驱动, 契合“降雨是中国滑坡首要自然触发因子”的共识 (徐辉, 2023), 且区域差异显著: 华南及东南因沿海台风频发, 热带气旋成为次触发因素; 华中及华东地处亚热带、无常年积雪, 不满足融雪/冻融触发条件, 故无此类触发因素造成的滑坡; 西南 (喜马拉雅山脉)、西北 (天山、祁连山脉)、华北及东北 (太行山、大兴安岭等)、华南及东南 (玉山山脉) 有常年积雪分布, 易发生由融雪/冻融触发的滑坡; 此外, 西南与西北矿产资源丰富, 采矿、施工触发的滑坡相对较多。

月尺度上, 全国及 5 个区域滑坡高发于 6-8 月, 且与月平均降雨量呈强线性正相关 ($R^2 > 0.49$), 这是中国夏季集中降雨与广泛山地地形结合的结果。夏季风进退控制全国降雨分布, 6-8 月暖湿气流活跃形成大范围集中降雨带, 短时降雨强度常超过岩土体入渗阈值 (徐祥德等, 2024)。同时, 我国山地与低山丘陵面积广阔, 其中山地占比 64.89%、低山丘陵占比 25.90% (文安邦等, 2023), 为滑坡发育提供了有利的地貌条件。在持续降雨作用下, 坡体内部孔隙水压力不断升高, 岩土体抗剪强度急剧降低, 最终引发边坡失稳破坏。尽管 6-8 月高发是全国共性, 但区域“降雨-滑坡响应”存在差异: 华南及东南 6-8 月滑坡还受台风突发性暴雨影响, 西北则与黄土高原局地暴雨相关, 未来可结合降雨类型细化月尺度机制。

小时尺度上, 全国非地震触发滑坡总体高发时段为 03:00-15:00, 且表现出明显的触发类型分异特征: 降雨触发型滑坡高发于 00:00-12:00, 其时间规律符合夜雨时空分布及坡体水文响应过程。已有研究证实, 中国 5 个区域普遍存在夜间至凌晨 (20:00-08:00) 持续降

雨(王诗敬等, 2022), 此类降雨通过岩土体孔隙持续渗透, 受水文滞后效应影响, 历经数小时后坡体水分在凌晨至上午时段达到饱和状态; 此时坡体内孔隙水压力显著升高, 直接削弱岩土体抗剪强度, 当坡体剪应力超过抗剪强度临界值时, 滑坡极易失稳(黄发明等, 2024; 刘清等, 2024; 吴庆华和王珂, 2025)。此外, 夜间低温环境进一步加剧滑坡风险: 低温可抑制土壤水分蒸发, 延长雨水在坡体内的滞留时长, 促使水分向深层岩土体渗透, 进一步削弱抗剪强度, 降低滑坡稳定性(Wu *et al.*, 2021; Shibasaki, *et al.*, 2016)。非降雨触发型滑坡高发于 08:00-20:00, 与人类日间活动(如采矿、施工等)时段高度重合, 而其在高发时段内分布相对分散, 源于人类活动的随机性, 因此需结合具体人类活动细化滑坡风险时段。

本研究得出的规律可信度呈现显著的区域与时段分异特征: 西南、西北、华南及东南区域样本量合计占比超 80%, 其空间分布梯度、月尺度 6-8 月高发规律及小时尺度触发类型分异特征(降雨触发型 00:00-12:00、非降雨触发型 08:00-20:00)具有充分的数据支撑, 代表性与可信度较高, 可为这些区域的滑坡预警防控提供科学参考; 华北及东北区域样本量仅占 6.3%, 其低发特征及相关时间规律可能受样本量不足影响, 区域外推需保持谨慎; “复杂因素”分类口径的宽泛性导致自然与人为因子贡献权重难以精准量化, 基于该类因素的相关结论需结合具体区域触发场景进一步验证后再推广; 小时尺度非降雨触发型滑坡受人为活动随机性影响, 本研究仅根据数据推算出大致时间窗口, 其时段规律的区域应用需匹配当地工程作业、交通流量等具体特征。而这些可信度分异的背后, 与本研究的固有限制密切相关: 数据库样本量区域分布不均, 华北及东北样本占比偏低直接影响该区域结果代表性; “复杂因素”分类体系不够细化, 制约了自然与人为影响因子的量化分析; 未纳入岩土体类型这一关键变量, 未能充分揭示其对滑坡时间规律的调控作用, 针对上述局限, 未来可通过扩充样本数据库并结合遥感技术弥补区域样本分布不均的短板、引入贡献率量化模型细化触发因素分类体系以明确各因子权重、融合岩土体类型与气象数据构建三维响应模型深化滑坡时空规律机制解析这三方面优化, 进一步提升研究的科学性与应用价值。

5 结论

本研究构建了 1982-2025 年时间精度达小时级的中国非地震触发滑坡数据库, 通过多尺度(空间-月-小时)系统分析, 得到如下结论:

(1) 从空间分布来看, 中国非地震触发滑坡呈现“西南单位面积滑坡密度最高、华南及东南次之、西北与华中及华东较低、华北及东北最低”的特征, 以人口密度与 GDP 密度为指标计算的暴露度指数指示华南及东南为最高风险区, 华中及华东为高风险区, 西南为中风险区, 华北及东北为低风险区, 西北为最低风险区。对滑坡主要触发因素的统计分析, 以及滑坡频次与年均降雨量、平均高程、平均坡度及年均气温四项核心指标的相关性分析说明其空间分布格局与地形及气候有关。

(2) 在月尺度上, 全国非地震触发滑坡高发期集中于 6-8 月, 并且月尺度滑坡频次与月平均降雨量强线性正相关, 体现夏季风驱动的集中降雨对全国滑坡高发月份的主导调控作用。

(3) 在小时尺度上, 全国非地震触发滑坡总体高发时段为 03:00-15:00, 且表现出明显的触发类型分异: 降雨触发型滑坡高发于 00:00-12:00, 与夜间降雨后的坡体水文响应过程(雨水渗透-孔隙水压力升高-岩土体抗剪强度下降)相匹配; 非降雨触发型滑坡高发于 08:00-20:00, 与人类日间活动的时间特征相关。

References

- Ankang Municipal Bureau of Natural Resources, (2024-08-22) [2025-09-13]. Ankang Successfully Forecasts a Geological Disaster. <https://zrzy.ankang.gov.cn/Content-2739645.html>.
- Baoji Municipal Water Resources Bureau, Baoji Municipal Meteorological Bureau, (2025-07-02) [2025-09-13]. Meteorological Early Warning for Flash Flood Disasters. http://www.baoji.gov.cn/co19816/co19818/co19857/co19865/202507/t20250702_1164049.html.
- Chen, X. B., (2025-07-27) [2025-09-13]. 5 People Confirmed Dead After Being Buried in a Car in a Landslide in Pu'er, Yunnan Province. Xinhua News Agency. <https://www.news.cn/politics/20250727/bba0e2a6a76942b387f59f1bae6dc426/c.html>.
- Cruden, D. M., Varnes, D. J., 1996. Landslide Types and Processes, Special Report, Transportation Research Board, *National Academy of Sciences*, 247: 36-75.
- David, P., 2012. Global patterns of loss of life from landslides. *Geology*, 40(10): 927-930. <https://doi.org/10.1130/G33217.1>
- Feng, W. K., Zhao, J. C., Yi, X. Y., et al., 2025. Characteristics and Driving Factors of "6·16" Rainfall-Induced Group Landslides in the Fujian-Guangdong-Jiangxi Border Region. *Earth Science*, 50(10): 4111-4124 (in Chinese with English abstract).
- Görüm, T., Fidan, S., 2021. Spatiotemporal variations of fatal landslides in Turkey. *Landslides*, 18: 1691-1705. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01580-7>
- He, X. R., Liao, X. H., Zhang, L. Q., et al., 2022. Clustering Zoning of Landslide-Prone Factors and Analysis of Road Engineering Disturbance Effects in the Bailongjiang River Basin. *Journal of Engineering Geology*, 30(3): 672-687 (in Chinese with English abstract).
- Huang, F. M., Ouyang, W. P., Jiang, S. H., et al., 2024. Landslide Susceptibility Prediction Modeling Considering the Spatiotemporal Partition Principle of Training/Testing Sets in Machine Learning. *Earth Science*, 49(5): 1607-1618 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, W. Y., (2024-07-29) [2025-09-18]. Sudden Landslide Geological Disaster in Xilin County, Baise City, with No Casualties. Nanguo Morning Post. <https://www.ngzb.com.cn/news/2024/07/29/baise-linxian-tufa-huapo-dizhi-zaihai-renyuan-shangwang.html>.
- Kang, C., Zhang, F. Y., Pan, F. Z., et al., 2018. Characteristics and dynamic runout analyses of 1983 Saleshan landslide. *Engineering Geology*, 243: 181-195. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.07.006>
- Kirschbaum, D. B., Adler, R., Hong, Y., et al., 2010. A global landslide catalog for hazard applications: method, results, and limitations. *Natural Hazards*, 52: 561-575. <https://doi.org/10.1007/s11069-009-9401-4>
- Kirschbaum, D., Stanley, T., Zhou, Y., 2015. Spatial and temporal analysis of a global landslide catalog. *Geomorphology*, 249: 4-15. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.016>
- Klose, M., Damm, B., Highland, L. M., 2015. Databases in geohazard science: An introduction. *Geomorphology*, 249: 1-3. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.06.029>
- Li, Z., Yang, M., Qiu, H., et al., 2025. Spatiotemporal patterns of non-seismic fatal landslides in China from 2010 to 2022. *Landslides*, 22: 221-233. <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02362-1>
- Lin, Q., Wang, Y., 2018. Spatial and temporal analysis of a fatal landslide inventory in China from 1950 to 2016. *Landslides*, 15: 2357-2372. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-1037-6>

- Lin, Q., Wang, Y., Liu, T., et al., 2017. The Vulnerability of People to Landslides: A Case Study on the Relationship between the Casualties and Volume of Landslides in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(2):212. <https://doi.org/10.3390/ijerph14020212>
- Liu, Q., Gan, J. J., Chen, H., et al., 2024. Formation Mechanism and Rainfall Factor Stability Evaluation of Small-Scale Soil Landslides in Eastern Jiangxi. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 43(6): 235-243 (in Chinese with English abstract).
- Marc, O., Gosset, M., Saito, H., et al., 2019. Spatial patterns of storm-induced landslides and their relation to rainfall anomaly maps. *Geophysical Research Letters*, 46: 11167 - 11177. <https://doi.org/10.1029/2019GL083173>
- Monsieurs, E., Jacobs, L., Michellier, C., et al., 2018. Landslide inventory for hazard assessment in a data-poor context: a regional-scale approach in a tropical African environment. *Landslides*, 15, 2195 - 2209. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-1008-y>
- Rosser, B., Dellow, S., Haubrock, S., et al., 2017. New Zealand's National Landslide Database. *Landslides*, 2017, 14: 1949 - 1959. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0843-6>
- Sepúlveda, S. A., Petley, D. N., 2015. Regional trends and controlling factors of fatal landslides in Latin America and the Caribbean, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15: 1821 - 1833. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-1821-2015>
- Shibasaki, T., Matsuura, S., Okamoto, T., 2016. Experimental evidence for shallow, slow-moving landslides activated by a decrease in ground temperature. *Geophysical Research Letters*, 43: 6975 - 6984. <https://doi.org/10.1002/2016GL069604>
- Van Den Eeckhaut, M., Hervás, J., 2012. State of the art of national landslide databases in Europe and their potential for assessing landslide susceptibility, hazard and risk. *Geomorphology*, 139 - 140: 545 - 558. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.12.006>
- Wang, J. S., Jiang, X., Zhang, X. D., 2022. Study on Spatiotemporal Variation Characteristics of Night Rain in China. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 58(5): 750-765 (in Chinese with English abstract).
- Wen, A. B., Tang, Q., Ouyang, C. J., et al., 2023. Protection and Development of Mountains in China: Review and Prospect. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 38(3): 376-384 (in Chinese with English abstract).
- Wen, B., Wang, S., Wang, E., et al., 2004. Characteristics of rapid giant landslides in China. *Landslides*, 1: 247 - 261. <https://doi.org/10.1007/s10346-004-0022-4>
- Wu, K., Chen, N., Hu, G., et al., 2021. Failure mechanism of the Yaoba loess landslide on March 5, 2020: the early-spring dry spell in Southwest China. *Landslides*, 18: 3183 - 3195. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01703-8>
- Wu, Q. H., Wang, K., 2025. Influence of Slope Angle and Lithological Characteristics of Fine/Coarse Binary Structure Slopes on Their Rainfall Infiltration Barrier Effect. *Earth Science*, 50(1): 311-321 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. H., Nie, Y., Han, L. Q., 2024. Landslide Event Dataset of the China-Pakistan Economic Corridor (2010-2022). National Cryosphere Desert Data Center. <http://www.ncdc.ac.cn>.
- Xin, Y., (2025-07-30) [2025-09-13]. Rescue Continues for Missing Bus in Tianzhen County, Shanxi Province: 10 Missing Persons Found, All Deceased. Sina Finance. <https://finance.sina.com.cn/jjxw/2025-07-30/doc-infifzsr3724785.shtml>.

- Xu, H., 2023. Extreme Characteristics of Precipitation and Variation Trends for Landslide Induction in China. *Journal of Mountain Science*, 41(4): 545-553 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. D., Qi, D. M., Li, Y. Q., et al., 2024. Spatio-Temporal Characteristics of Floods and Landslide-Debris Flow Disasters in China and the Advancement Process of the East Asian Summer Monsoon under Multi-Scale Topographical Background. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 44(4): 1-10 (in Chinese with English abstract).
- Yin, Y., Wang, F., Sun, P., 2009. Landslide hazards triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China. *Landslides*, 6: 139 - 152. <https://doi.org/10.1007/s10346-009-0148-5>
- Zhang, F., Huang, X., 2018. Trend and spatiotemporal distribution of fatal landslides triggered by non-seismic effects in China. *Landslides*, 15: 1663 - 1674. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-1007-z>
- Zhang, S. F., Wang, Y. F., Jia, B., et al., 2017. Spatiotemporal Variations and Influencing Factors of Geological Disasters in China from 2005 to 2016. *Journal of Geo-Information Science*, 19(12): 1567-1574 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S., Li, C., Peng, J., et al., 2023. Fatal landslides in China from 1940 to 2020: occurrences and vulnerabilities. *Landslides*, 20: 1243 - 1264. <https://doi.org/10.1007/s10346-023-02034-6>
- Zhang, Y. F., Liao, X. P., Li, J., et al., 2023. Prevention and Control of Landslide Disasters in Mountain Road Engineering. *China Science and Technology Achievements*, 24(23): 51-53, 74 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. N., 2021. Landslide Point Data of the Weihe River Basin (1915-2021). National Cryosphere Desert Data Center. <http://www.ncdc.ac.cn>.
- Zhou, W., Qiu, H., Wang, L., et al., 2022. Combining rainfall-induced shallow landslides and subsequent debris flows for hazard chain prediction. *Catena*, 213: 106199. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106199>

中文参考文献

- 安康市自然资源局, (2024-08-22) [2025-09-13]. 安康成功预报一起地质灾害. <https://zrzy.ankang.gov.cn/Content-2739645.html>.
- 宝鸡市水利局, 宝鸡市气象局, (2025-07-02) [2025-09-13]. 山洪灾害气象预警. http://www.baoji.gov.cn/co19816/co19818/co19857/co19865/202507/t20250702_1164049.html.
- 陈欣波, (2025-07-27) [2025-09-13]. 云南普洱山体滑坡被埋车内 5 人确认遇难. 新华社. <https://www.news.cn/politics/20250727/bba0e2a6a76942b387f59f1bae6dc426/c.html>.
- 冯文凯, 赵家琛, 易小宇, 等, 2025. 闽粤赣边区“6·16”强降雨诱发群发滑坡特征与驱动因素. *地球科学*, 50(10): 4111-4124.
- 何晓锐, 廖小辉, 张路青, 等, 2022. 白龙江流域崩滑灾害孕灾因子聚类分区与道路工程扰动效应分析. *工程地质学报*, 30(3): 672-687.
- 黄发明, 欧阳慰平, 蒋水华, 等, 2024. 考虑机器学习建模中训练/测试集时空划分原则的滑坡易发性预测建模. *地球科学*, 49(5): 1607-1618.
- 蒋文跃, (2024-07-29) [2025-09-18]. 百色西林县突发滑坡地质灾害, 无人员伤亡. 南国早报. <https://www.ngzb.com.cn/news/2024/07/29/baise-linxian-tufa-huapo-dizhi-zaihai-renyuan-shangwang.html>.

- 刘清, 甘建军, 陈浩, 等, 2024. 赣东小型土质滑坡形成机理及降雨因子稳定性评价. 地质科技通报, 43(6): 235-243.
- 王敬诗, 蒋熹, 张夕迪, 2022. 中国夜雨的时空变化特征研究. 南京大学学报(自然科学), 58(5): 750-765.
- 文安邦, 汤青, 欧阳朝军, 等, 2023. 中国山地保护与山区发展:回顾与展望. 中国科学院院刊, 38(3): 376-384.
- 吴庆华, 王珂, 2025. 细/粗二元结构边坡角度与岩性特征对其阻隔降雨入渗的影响规律. 地球科学, 50(1): 311-321.
- 吴宇宏, 聂勇, 韩立钦, 2024. 中巴经济走廊滑坡事件数据集(2010-2022年). 国家冰川冻土沙漠科学数据中心. <http://www.ncdc.ac.cn>.
- 辛圆, (2025-07-30) [2025-09-13]. 山西省天镇县客车失联救援继续: 已发现 10 名失联人员, 均已遇难. 新浪财经. <https://finance.sina.com.cn/jjxw/2025-07-30/doc-infifzsr3724785.shtml>.
- 徐辉, 2023. 中国诱发滑坡的降水极端性特征及变化趋势. 山地学报, 41(4): 545-553.
- 徐祥德, 齐冬梅, 李跃清, 等, 2024. 多尺度地形背景下东亚夏季风推进过程与我国洪涝和滑坡泥石流灾害时空特征. 高原山地气象研究, 44(4): 1-10.
- 张耀南, 2021. 渭河流域滑坡点数据(1915-2021年). 国家冰川冻土沙漠科学数据中心. <http://www.ncdc.ac.cn>.
- 张玉芳, 廖小平, 李健, 等, 2023. 山区道路工程滑坡灾害防治. 中国科技成果, 24(23): 51-53, 74.
- 章诗芳, 王玉芬, 贾蓓, 等, 2017. 中国 2005-2016 年地质灾害的时空变化及影响因素分析. 地球信息科学学报, 19(12): 1567-1574.