

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2025.06.039

CSTR:32310.14.stbcbx.2025.06.039

张秋桔,朱平宗,郭逸轩,等.极端降雨条件下三峡库区浅层滑坡发育特征及主控因素[J].水土保持学报,2025,39(6):181-193.

ZHANG Qiuji, ZHU Pingzong, GUO Yixuan, et al. Development characteristics and main controlling factors of shallow landslides in Three Gorges Reservoir area under extreme rainfall conditions[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(6):181-193.

极端降雨条件下三峡库区浅层滑坡发育特征及主控因素

张秋桔^{1,2}, 朱平宗^{1,2}, 郭逸轩², 王定斌^{1,2}, 白毛毛^{1,2}, 陈晓燕^{1,2}

(1.西南大学水土保持生态修复重庆市重点实验室,重庆 400716; 2.西南大学资源环境学院,重庆 400716)

摘要: [目的] 为探究三峡库区极端降雨条件下浅层滑坡的发育特征及主控因素。 [方法] 以重庆忠县双梁小流域为对象,基于2024年7月10-11日极端降雨(累计雨量166.4 mm,最大1 h雨强47.9 mm)诱发的浅层滑坡事件,采用实地调查和无人机航摄,结合ArcGIS软件、频率比模型和地理探测器,系统分析浅层滑坡发育特征及主控因素。 [结果] 1)选取的降雨诱发49处浅层滑坡的厚度、宽度、长度、面积和体积分别为0.48~9.24 m、4.54~74.60 m、7.14~220.19 m、65.20~6 207.12 m²和282.08~90 266.54 m³,且浅层滑坡主要集中在厚度0~6 m、宽度10~50 m、长度0~39 m、面积0~500 m²和体积0~1×10⁴ m³的范围内。2)浅层滑坡集中分布于前期降雨量31.3~33.5 mm、NDVI 0.37~0.49、高程648~759 m、坡向为阳坡/半阳坡、坡度15°~25°、平面和剖面曲率-2.0~-0.5、地形湿度指数2.0~8.0、距河流距离800~1 600 m、距道路距离0~20 m和土地利用类型为林地的区域。3)坡度($q=0.251$)和土地利用类型($q=0.228$)为库区浅层滑坡发生的主要驱动因子,且坡度与坡向($q=0.44$)和土地利用($q=0.42$)的交互作用会显著增加浅层滑坡发生的概率。 [结论] 研究结果可为三峡库区浅层滑坡预警与防治提供科学依据。

关键词: 极端降雨; 浅层滑坡; 主控因素; 地理探测器; 三峡库区

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)06-0181-13

Development Characteristics and Main Controlling Factors of Shallow Landslides in Three Gorges Reservoir Area under Extreme Rainfall Conditions

ZHANG Qiuji^{1,2}, ZHU Pingzong^{1,2}, GUO Yixuan², WANG Dingbin^{1,2}, BAI Maomao^{1,2}, CHEN Xiaoyan^{1,2}

(1.Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration of Chongqing, Southwest University,

Chongqing 400716, China; 2.College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

Abstract: [Objective] To investigate the development characteristics and main controlling factors of shallow landslides under extreme rainfall conditions in the Three Gorges Reservoir area. [Methods] The Shuangliang small watershed in Zhongxian County, Chongqing was selected as the study area. Based on shallow landslides triggered by an extreme rainfall event (total precipitation: 166.4 mm; maximum 1-hour intensity: 47.9 mm) from July 10 to 11, 2024, field investigations and UAV aerial photography were conducted. Combined with ArcGIS software, frequency ratio model, and geodetector, the development characteristics and main controlling factors of the shallow landslides were systematically analyzed. [Results] 1) The thickness, width, length, area, and volume of the 49 shallow landslides induced by this rainfall event ranged from 0.48–9.24 m, 4.54–74.60 m, 7.14–220.19 m, 65.20–6 207.12 m², and 282.08–90 266.54 m³, respectively. Furthermore, these landslides were mainly concentrated within the ranges of 0–6 m in thickness, 10–50 m in width, 0–39 m in length, 0–500 m² in area, and 0–1×10⁴ m³ in volume. 2) Spatially, the shallow landslides were predominantly distributed in areas with antecedent rainfall of 31.3–33.5 mm, NDVI of 0.37–0.49, elevation of 648–759 m, sunny/semi-sunny slope

收稿日期: 2025-08-05

修回日期: 2025-09-22

录用日期: 2025-09-28

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-10-16

资助项目: 国家自然科学基金项目(42177314); 重庆市自然科学基金创新发展联合基金重点项目(CSTB2024NSCQ-LZX0075); 重庆市水利科技项目(CQSLK-2023016); 西南大学研究生科研创新项目(SWUS24120)

第一作者: 张秋桔(2002—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: zqj9738@163.com

通信作者: 陈晓燕(1971—), 女, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀与流域治理研究。E-mail: c400716@126.com

http://stbcbx.alljournal.com.cn

aspects, slope gradient of $15^{\circ} - 25^{\circ}$, planar and profile curvatures of $-2.0 - -0.5$, topographic wetness index of $2.0 - 8.0$, distance to rivers of $800 - 1\ 600$ m, distance to roads of $0 - 20$ m, and land use type of forest land. 3) Slope gradient ($q = 0.251$) and land use type ($q = 0.228$) were the main driving factors for shallow landslide occurrence in the reservoir area, while the interaction between slope gradient and aspect ($q = 0.44$) and between slope gradient and land use ($q = 0.42$) significantly increased shallow landslide probability. [Conclusion] The findings of this study can provide a scientific basis for the early warning and prevention of shallow landslides in the Three Gorges Reservoir area.

Keywords: extreme rainfall; shallow landslides; main controlling factors; geodetector; Three Gorges Reservoir area

Received: 2025-08-05

Revised: 2025-09-22

Accepted: 2025-09-28

Online(www.cnki.net): 2025-10-16

在全球气候变暖的大背景下,极端降水事件的发生频率、降雨强度和降雨量呈明显增加趋势^[1]。降雨作为浅层滑坡最主要的诱发因素之一,短时强降雨或长历时降雨过程显著降低土体抗剪强度,增加孔隙水压力,进而导致浅层土体失稳,发生浅层滑坡^[2]。浅层滑坡不仅会引发土壤侵蚀、河道淤塞、面源污染等次生生态问题,还直接威胁山区居民生命财产安全。因此,研究极端降雨条件下浅层滑坡的发育特征及主控因素,对于开展浅层滑坡的灾害预警、风险评价与防治措施实施等方面具有重要实际意义。

近年来,国内外学者围绕浅层滑坡发育特征与主控因素开展大量研究。在发育特征方面,区域地质背景与环境差异对浅层滑坡的规模与分布具有突出影响。西南山区的研究^[3-4]显示,浅层滑坡厚度和体积主要集中于 $0 \sim 5$ m和 $0 \sim 10 \times 10^4$ m³(四川喜德县),空间集中分布于坡度 $10^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 、岩组为硬质岩、土地利用类型为林地和耕地和距道路距离 $0 \sim 100$ m的环境条件中(云南昭通市)。而黄土高原区的研究^[5]显示,浅层滑坡面积和体积多集中于 $0 \sim 400$ m²和 $0 \sim 500$ m³,空间集中分布于高程 $1\ 100 \sim 1\ 250$ m和坡度 $30^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 的区间,是浅层滑坡的高敏感区(陕西省延安市安塞区坊塔流域)。在东南沿海地区研究^[6]显示,浅层滑坡厚度、面积和体积分别集中于 $1 \sim 3$ m、 $0 \sim 2\ 000$ m²和 $0 \sim 1\ 000$ m³(浙江文成县);空间分布集中在高程 $150 \sim 350$ m、坡度 $16^{\circ} \sim 28^{\circ}$ 、地形湿度指数为 $4 \sim 5$ 和距河流距离 $0 \sim 100$ m(广东韶关市)^[7]。在影响因素方面,现有研究^[8-10]涵盖地形地貌、水文地质、岩土性质、植被、气象条件及人类活动等多维度的关键因子。但不同区域的主控因素存在明显分异,ZWEIFEL等^[11]在瑞士阿尔卑斯山区和侏罗山区的研究表明,坡度、坡向与地表粗糙度是浅层滑坡空间分布的关键影响因素;王鑫盈等^[12]在基于山西吉县蔡家川小流域暴雨事件研究发现,“长历时、低雨强”极端降雨下,前期降雨是影响浅

层滑坡发生的重要因素;CUI等^[13]对浙江“利奇马”台风影响区研究表明,浅层滑坡密度与植被类型、高程、坡度、距断层距离、岩性和距道路距离呈显著正相关。综上可知,尽管前人针对浅层滑坡发育特征及主控因素开展了大量研究,但浅层滑坡的发育特征与影响因素存在明显的区域异质性。

三峡库区作为我国典型的生态敏感和脆弱区,存在土层浅薄、地形破碎、坡度陡峭、集中暴雨频繁和人类活动频繁等问题,是我国浅层滑坡的高发区之一^[14]。明确库区浅层滑坡的发育特征及主控因素是构建该区域浅层滑坡预测模型的重要基础,但目前在三峡库区开展的相关研究较少,且多关注浅层滑坡的单因子调控影响,各影响因素的交互作用机制尚未明晰。因此,本研究以重庆忠县双梁小流域内的浅层滑坡为研究对象,通过无人机低空摄影测量获取浅层滑坡空间分布,借助 ArcGIS 软件和地理探测器分析浅层滑坡形态特征,并综合考虑小流域内浅层滑坡分布与气象、植被、地形地貌、水文及人类活动等多种因子的响应关系,揭示极端降雨条件下三峡库区浅层滑坡发生的主控因素,为库区浅层滑坡预测模型的构建提供科学依据与数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市忠县黄金镇双梁小流域($30^{\circ} 23' 20'' \sim 30^{\circ} 26' 02''$ N, $107^{\circ} 59' 42'' \sim 108^{\circ} 03' 32''$ E)(图 1)。小流域面积 19.71 km²,海拔 $178 \sim 915$ m,地势东高西低,属于低山丘陵地貌。从地质背景来看,忠县境内主要地层有第四系(Q)、侏罗系(J)、二叠系(P)及三叠系(T)等,其中双梁小流域地层主要由侏罗系中统下沙溪庙组(J_{2sx})与新田沟组(J_{2x})组成,约占小流域面积的 33.7% 和 66.3% ,岩性以砂岩与泥岩(页岩)呈互层状分布为主要特征。本研究区属于亚热带湿润季风气候,多年平均降水量 $1\ 200$ mm,多年平

均气温 19.2℃,降雨年内分配不均,主要集中在夏季,多以短历时强降雨为主。受地形与母质影响,小流域境内山高坡陡,土质瘠薄,土壤类型以紫色土为

主,有少部分黄壤、黄棕壤;土壤质地则多属黏壤土。土地利用类型以林地、耕地和园地为主,分别占小流域总面积的 45.99%、23.00% 和 16.55%。

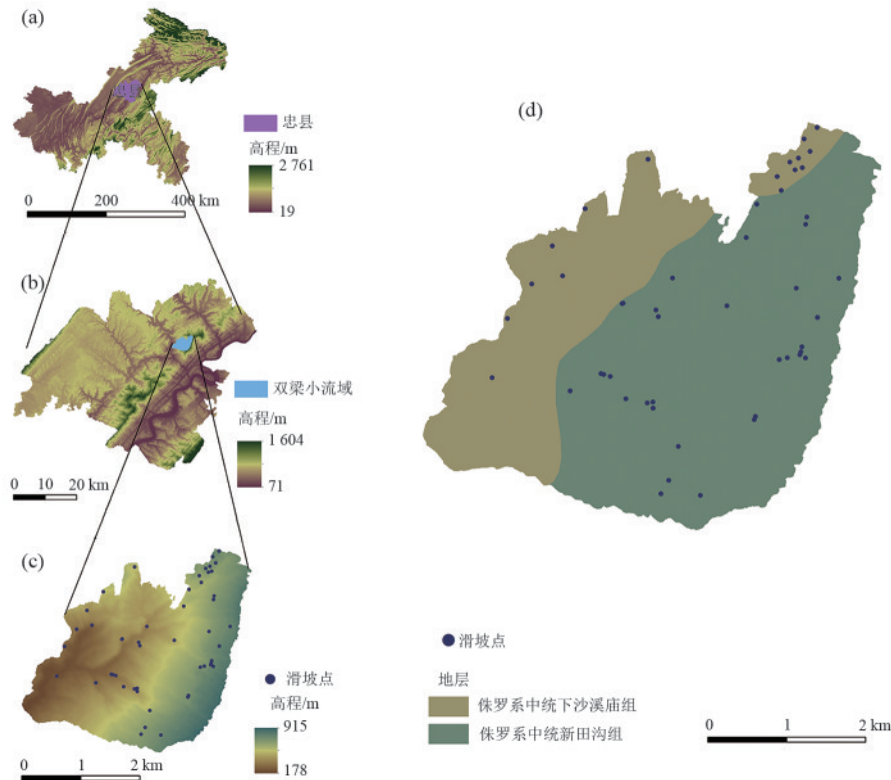


图 1 研究区地理位置及地层分布

Fig. 1 Geographic location and stratigraphic distribution of the study area

2024年7月8-11日重庆西部偏西和东部局地发生暴雨或大暴雨,其中受强降雨影响,重庆忠县数十个乡镇的降雨量在 200 mm 以上。在此期间,位于黄金镇的双梁小流域发生大规模的浅层滑坡,导致居民房屋损毁等自然灾害。根据黄金镇雨量站数据,本次降雨于 7 月 10 日 1:00 开始至 7 月 11 日 11:00 结束,降雨历时 11 h,累计降雨量 166.4 mm,平均降雨强度 16.6 mm/h(图 2)。最大 1 h 降雨、最大 3 h 降雨、最大 6 h 降雨分别为 47.9、83.4、97.4 mm。

1.2 研究方法

1.2.1 数据获取与处理 暴雨结束后,采用 DJI Mavic 3E 无人机对双梁小流域开展航摄作业,获取研究区暴雨发生后的无人机影像,将影像导入三维建模软件 Agisoft Metashape Pro 软件中,通过对齐照片,生成密集点云,生成网格和纹理等流程,合成高分辨率数字正射影像(digital orthophoto map, DOM)和数字高程模型(digital elevation model, DEM)(空间分辨率为 0.18 m),以提取浅层滑坡形态及分布信息。利用 ArcGIS 10.8 软件在 DOM 中解译并勾绘浅层滑坡边界,提取滑坡面要素。浅层滑坡厚度是通过对比降雨前后的 DEM 数据,计算高程差值获取;长度采用测量工具量取滑坡后缘至前缘的最大水平距离确定;宽度则依据垂直于滑动方向的最大宽度进行表征;面积通过 ArcGIS 的要素几何计算功能直接提取浅层滑坡多边形区域的平面投影面积;而浅层滑坡体积可借助栅格计算进行估算。为确保基于 ArcGIS 平台的目视解译结果具有可靠性和准确性,本研究通过野外实地测量(皮尺和激光测距仪测量)获取典型浅层滑坡体的厚度、宽度和长度,并同步计算出浅层滑坡的面积和体积,以此对目视解译结果

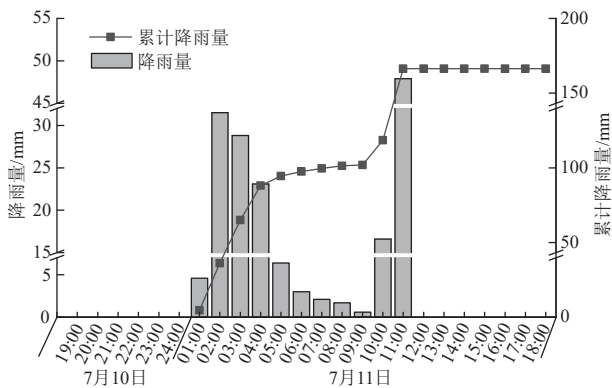


图 2 双梁小流域逐时降雨量及累计降雨量

Fig. 2 Hourly and cumulative rainfall in Shuangliang small watershed

进行空间配准和优化校正。为明确浅层滑坡主控因素,结合研究区自然环境与人类活动特征,筛选出 11 个浅层滑坡影响因素,涵盖气象、植被、地形地貌、水文、和人类活动 5 类要素。地质要素对浅层滑坡发育具有关键作用^[15],然而在本研究中,因小流域尺度有限,区域内地层演化历程相对简单,地层类型较为单

一,缺乏复杂构造运动形成的多样岩性组合,且无断层等构造形迹,所以未将地质要素纳入影响因素筛选范畴。各影响因素的数据类型、分辨率和数据来源等详细信息见表 1,并将浅层滑坡形态参数与影响因素按表 2 进行重分类,统计各分级分类下的浅层滑坡数量及频率比。

表 1 数据来源
Table 1 Data sources

类型	因素	时间	数据类型	空间分辨率/ m	来源
气象因子	前期降雨量	2024 年 7 月 10-11 日	数据表	-	来源于小流域附近 13 个雨量站数据
植被因子	归一化植被指数	2024 年 6 月	栅格	30×30	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)
	降雨前数字高程模型	2024 年	栅格	2×2	重庆地理信息中心提供
	降雨后数字高程模型	2024 年 7 月	栅格	0.18×0.18	由无人机航摄影像生成
地形因子	坡向	2024 年	栅格	2×2	来源于 DEM
	坡度	2024 年	栅格	2×2	来源于 DEM
	平面曲率	2024 年	栅格	2×2	来源于 DEM
	剖面曲率	2024 年	栅格	2×2	来源于 DEM
水文因子	地形湿度指数	2024 年	栅格	2×2	来源于 DEM
	距河流距离	2024 年 10 月	矢量	-	从无人机影像解译
人类活动因子	距道路距离	2024 年 10 月	矢量	-	从无人机影像解译
	土地利用	2024 年 10 月	矢量	-	从无人机影像解译

表 2 影响因素的分级/分类信息
Table 2 Classification information of influencing factors

类型	因子	分级/分类
气象因子	前期降雨量/mm	31.3~32.5、32.5~33.5、33.5~34.5
植被因子	归一化植被指数	0.03~0.14、0.14~0.24、0.24~0.31、0.31~0.37、0.37~0.49
	高程/m	178~310、210~416、416~529、529~648、648~759、759~915
地形地貌因子	坡向/(°)	阴坡(0~45 和 315~360)、半阴坡(45~90 和 270~315)、阳坡(135~225)和半阳坡(90~135 和 225~270)
	坡度/(°)	0~5、5~8、8~15、15~25、25~35、>35
	平面曲率	-5.9~-2、-2~-0.5、-0.5~0.5、0.5~2、2~6.7
	剖面曲率	-6.9~-2、-2~-0.5、-0.5~0.5、0.5~2、2~6.4
水文因子	地形湿度指数	-0.2~2、2~5、5~8、8~11、11~15.8
	距河流距离/m	<50、50~200、200~400、400~800、800~1 600、>1 600
人类活动因子	距道路距离/m	<20、20~50、50~100、100~200、200~400、>400
	土地利用	耕地、园地、林地、草地、水域、居民建设及交通过地等和其他用地

1)气象因子

本研究选取暴雨前 24 h 降雨量作为前期降雨量。研究区的暴雨始于 7 月 11 日 01:00(图 2),据此,基于忠县气象局提供的小流域周边雨量站的逐时降雨监测数据,统计 2024 年 7 月 10 日 01:00 至 7 月 11 日 00:00(即暴雨发生前 24 h)的累计降雨量,提取前期降水量共 1 个气象因子。随后,借助 ArcGIS 工具箱的克里金

插值工具,将离散的雨量站点数据插值生成连续的前期降雨量空间分布图。

2)植被因子

基于暴雨前无云条件下的 Landsat 8 OLI 多光谱遥感数据(30 m 分辨率),借助 ENVI 5.6.2 软件,提取归一化植被覆盖指数(normalized difference vegetation index, NDVI),共 1 个植被因子。NDVI 是一种用于

衡量植被覆盖程度和生长状况的指数,是通过近红外与红外波段反射率标准化差值计算得出,其计算公式^[16]为:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - R}{\text{NIR} + R} \quad (1)$$

式中: NIR 为近红外波段反射值; R 为红外波段反射值。

3) 地形地貌因子

基于地理空间数据云下载暴雨发生前的 2 m 分辨率 DEM, 利用 ArcGIS 工具箱的表面分析和水文分析工具, 提取小流域的高程、平面曲率、剖面曲率、坡向、坡度及地形湿度指数 (topographic wetness index, TWI) 共 7 个地形地貌指标。TWI 是区域地形对径流流向和蓄积影响的物理指标, 有助于识别降雨径流模式、潜在土壤含水量增加区域和积水区域, 其计算公式^[17]为:

$$\text{TWI} = \ln\left(\frac{A}{\tan\theta}\right) \quad (2)$$

式中: TWI 为地形湿度指数; A 为单元栅格汇水面积, m²; θ 为局部坡度, (°)。

4) 水文因子

基于现场航拍的无人机正射影像和 ArcGIS 软件创建河流的矢量图层, 再通过矢量转栅格、创建缓冲区分析、重分类预处理等步骤提取距河流距离, 共 1 个水文因子。

5) 人类活动因子

基于现场航拍的无人机正射影像, 提取 2 个人类活动因子 (距道路距离和土地利用类型)。利用 ArcGIS 软件创建道路的矢量图层, 通过矢量转栅格、创建缓冲区分析和重分类预处理等绘制距道路距离图; 通过目视解译勾绘小流域土地利用分布, 将其划分为耕地、园地、林地、草地、水域、居民建设及交通用地等和其他用地。

1.2.2 数据分析

1) 频率比模型

基于绘制的浅层滑坡影响因子空间分布图, 统计小流域内不同影响因子下各个分级分类的浅层滑坡数量, 使用频率比 (frequency ratio, FR) 探究影响浅层滑坡发生的主控因子及其空间分布特征。频率比是通过计算各个影响因子不同分级区间内的浅层滑坡发生概率来评估其贡献度, 能够量化浅层滑坡影响因素与其发生空间关联性的强弱^[18]。一般认为, FR > 1 表示该分级影响因素有利于浅层滑坡的发生, 反之则表示该分级影响因素对浅层滑坡发生无显著影响。此外, FR 值的大小与该影响

因素对浅层滑坡的发育作用呈正比, FR 值越大, 表明该分级影响因素下浅层滑坡发生的概率越大。FR 计算公式为:

$$\text{FR} = \frac{n_{ij}}{n} \times \frac{N}{N_{ij}} \quad (3)$$

式中: n_{ij} 为影响因素 j 的分类 i 中浅层滑坡栅格数量; n 为研究区内浅层滑坡总栅格数; N_{ij} 为影响因素 j 的分类 i 区间栅格数; N 为研究区域栅格数。

2) 地理探测器

地理探测器 (geodetector) 是一种用于识别空间分异性及其影响因素的统计方法, 其优势在于无需预设变量间的线性关系。该方法的核心原理是: 若自变量对因变量存在显著影响, 则二者的空间分布应具有相似性^[8]。

本研究采用地理探测器的因子探测器与交互作用探测器, 定量分析各影响因素对浅层滑坡发生的影响强度 (q), 以揭示浅层滑坡空间分布的主要影响因素。计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\text{SSW}}{\text{SST}} \quad (4)$$

$$\text{SST} = N\delta^2 \quad (5)$$

$$\text{SSW} = \sum_{h=1}^L N_h \delta_h^2 \quad (6)$$

式中: $h=1, \dots, L$ 为变量 Y 或因子 X 的分层; N_h 和 N 分别为第 h 层单元数和研究区总单元数; δ_h^2 和 δ 分别为第 h 层和研究区 Y 值的方差; SSW 和 SST 分别为层内方差与区域总方差; q 为浅层滑坡分布影响因素探测指标, 其值为 $[0, 1]$, 值越大, 表明影响因素对浅层滑坡空间分异的解释力越强。

2 结果与分析

2.1 三峡库区浅层滑坡发育特征

2.1.1 三峡库区浅层滑坡形态特征 本次极端降雨在双梁小流域内共解译得到 49 处浅层滑坡。由表 3 可知, 滑坡厚度、宽度、长度、面积和体积分别为 0.48~9.24 m、4.54~74.60 m、7.14~220.19 m、65.20~6 207.12 m² 和 282.08~90 266.54 m³, 平均值分别为 4.54 m、29.39 m、51.04 m、1 127.41 m² 和 14 160.03 m³, 变异系数分别为 55.33%、59.64%、4.81%、119.31% 和 152.72%。仅长度表现为弱变异 (<10%), 厚度和宽度表现为中等变异 (10%~100%), 而面积和体积表现为强变异 (>100%)。从形态参数的频率分布来看, 浅层滑坡体的厚度、宽度、长度、面积和体积主要分布在 0~6 m、10~50 m、0~39 m、0~500 m² 和 0~10 000 m³, 占比分别达 73.5%、73.5%、53.1%、49.0% 和 77.6% (图 3)。

表 3 浅层滑坡形态参数描述性统计

Table 3 Descriptive statistics of shallow landslide morphological parameters

描述性统计量	浅层滑坡体形态参数				
	厚度/m	宽度/m	长度/m	面积/m ²	体积/m ³
最小值	0.48	4.54	7.14	65.20	282.08
最大值	9.24	74.60	220.19	6 207.12	90 266.54
平均值	4.54	29.39	51.04	1 127.41	14 160.03
变异系数/%	55.33	59.64	4.81	119.31	152.72

2.1.2 三峡库区浅层滑坡空间分布特征 由图 4 可知,从浅层滑坡的数量上来看,当前期降雨量为 32.5~33.5 mm, NDVI 为 0.37~0.49, 高程为 648~759 m, 坡度为 15~25°, 坡向为半阳坡, 平面曲率为 -2.0~-0.5, 剖面曲率为 -2.0~-0.5, TWI 为 5.0~8.0, 距河流距离 800~1 600 m, 距道路距离为 0~20 m 及土地利用类型为林地时, 浅层滑坡发生数量最密集。

从发生概率上来看, 浅层滑坡数量分布和发生概率并非完全一致。当前期降雨量为 32.5~33.5 mm, NDVI 为 0.31~0.37, 高程为 648~759 m, 坡度为 25°~35°, 坡向为半阳坡, 平面曲率为 -5.9~-2.0, 剖面曲率为 2.0~6.4, TWI 为 11.0~15.8, 距河流距离为 800~1 600 m, 距道路距离为 0~20 m, 以及

土地利用类型为园地时的 FR 最大, 表明该环境条件及人类活动影响下浅层滑坡发生概率最大。各影响因素的 FR 变化规律表现为: 前期降雨量的 FR 随雨量增加而降低; NDVI 的 FR 呈现先增后减的单峰变化趋势, 在低值区间(0.03~0.37)随 NDVI 上升而增加, 而在 NDVI 较高区间(0.37~0.49)FR 开始下降; 高程的 FR 分布整体呈现单峰分布, 在 648~759 m 区间出现明显峰值(FR 为 2.68), 而其他高程区间的 FR 值均低于或接近 1; 坡度的 FR 随坡度变化呈现先增后减的单峰变化趋势, 0~25°区间逐步上升, 25°~35°达到峰值(FR 为 3.38), >35°时 FR 骤降至 0.09; 坡向的 FR 表现为阳坡和半阳坡 FR 明显高于阴坡和半阴坡; 平面曲率的 FR 随平面曲率增加而逐渐降低, 平面凹坡区域(-5.9~-0.5)的 FR 明显高于较平坦区域(-0.5~0.5)和平面凸坡区域(0.5~6.7); 剖面曲率的 FR 随曲率增大而上升, 在剖面凸坡区域(0.5~6.4)的 FR 明显高于剖面凹坡区域(-6.9~-0.5)和较平坦区域(-0.5~0.5); TWI 的 FR 分布随 TWI 增加呈现持续上升趋势, 在 8.0~15.8 内, FR 值 >1; 距河流距离的 FR 分布整体呈现单峰变化, 在 800~1 600 m 出现明显峰值; 距道路距离的 FR 随距离增加呈现波动下降, 在距道路 50 m 内 FR 均 >1.15; 土地利用类型中仅园地和林地 FR >1, 分别为 3.43 和 1.43。

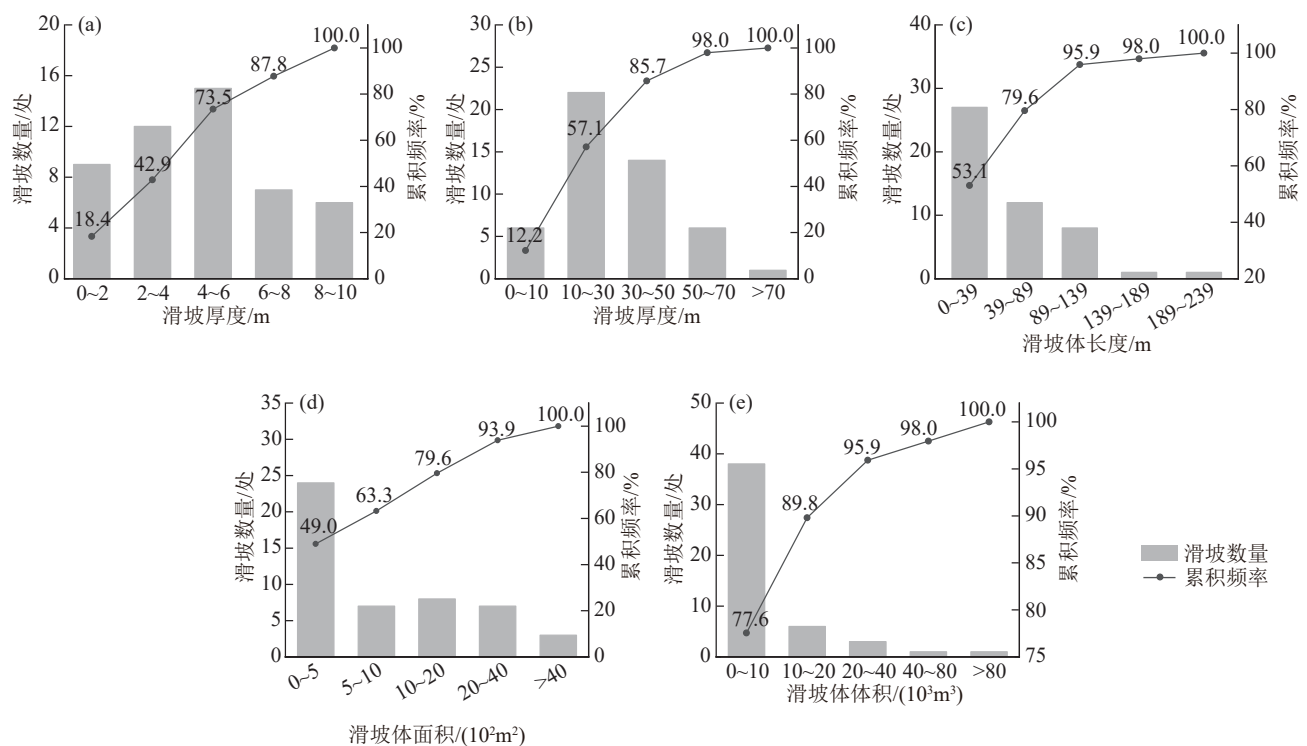
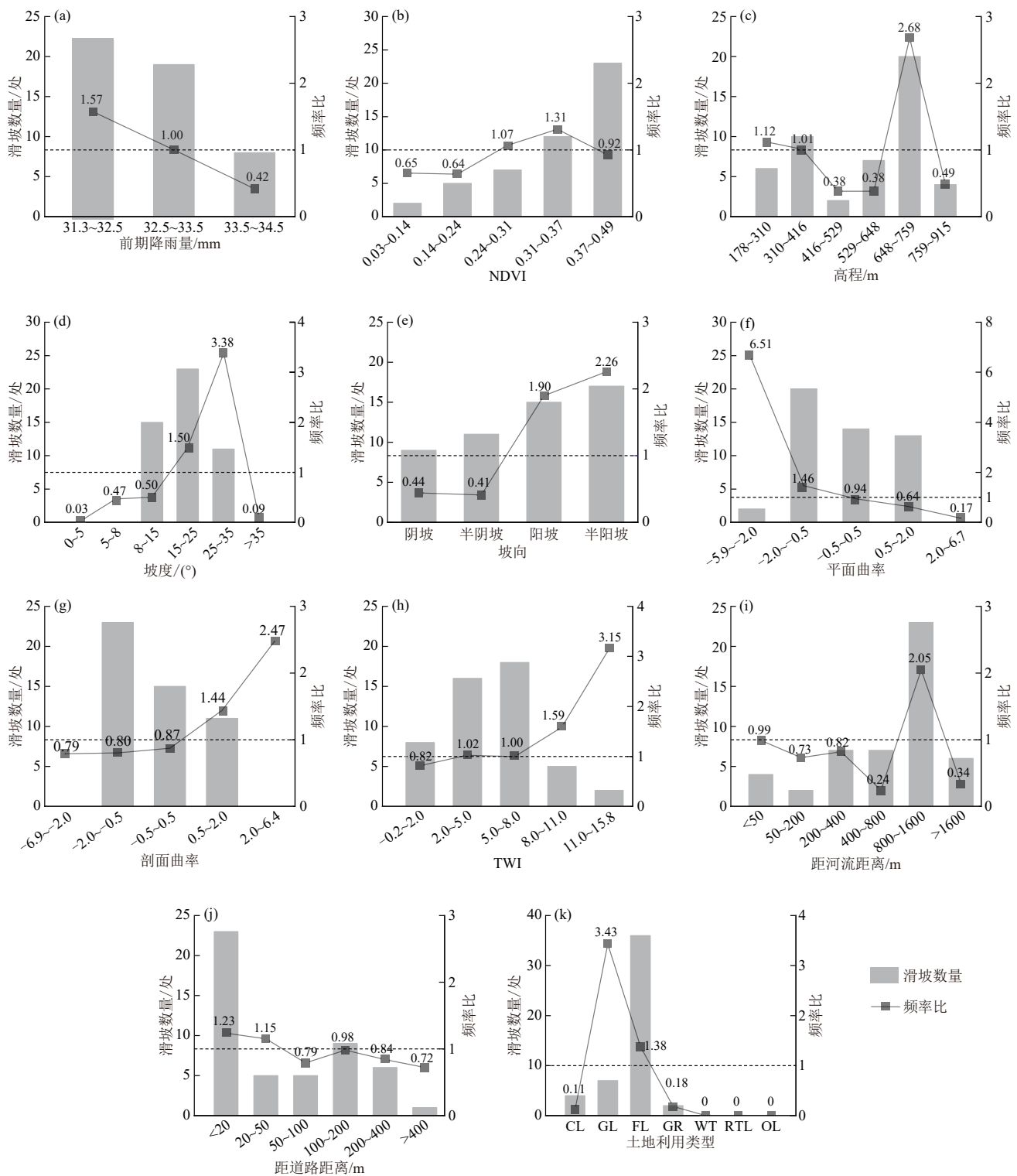


图 3 浅层滑坡形态参数分布

Fig. 3 Distribution of shallow landslide morphological parameters



注:CL为耕地;GL为园地;GR为草地;FL为林地;WT为水域;RTL为居民建设及交用地等;OL为其他用地。

图 4 不同影响因素下浅层滑坡数量及频率比分布

Fig. 4 Distribution of shallow landslide numbers and frequency ratios under different influencing factors

2.2 三峡库区浅层滑坡主控因素分析

基于地理探测器的因子探测模块,本研究评估了 11 个影响因素(图 5)对浅层滑坡的影响(图 6)。各因子对浅层滑坡变异的解释能力可通过 q 表征,与 q 对应的 p 表示该影响因素影响的显著性。结果表明,坡度(q 为 0.251)和土地利用(q 为 0.228)是三峡库区小流域浅层滑

坡发生的主要影响因素,坡向(q 为 0.134)和距河流距离(q 为 0.097)是次要因子。其他因子的 q 均接近于 0,表明这些因子对浅层滑坡空间分布的解释力较差。从影响的显著性来看,11 个影响因素中,仅前期降雨量和地形湿度指数 2 个因素的 $p > 0.05$,表明在本研究区这 2 个因素对浅层滑坡的发生没有显著影响。

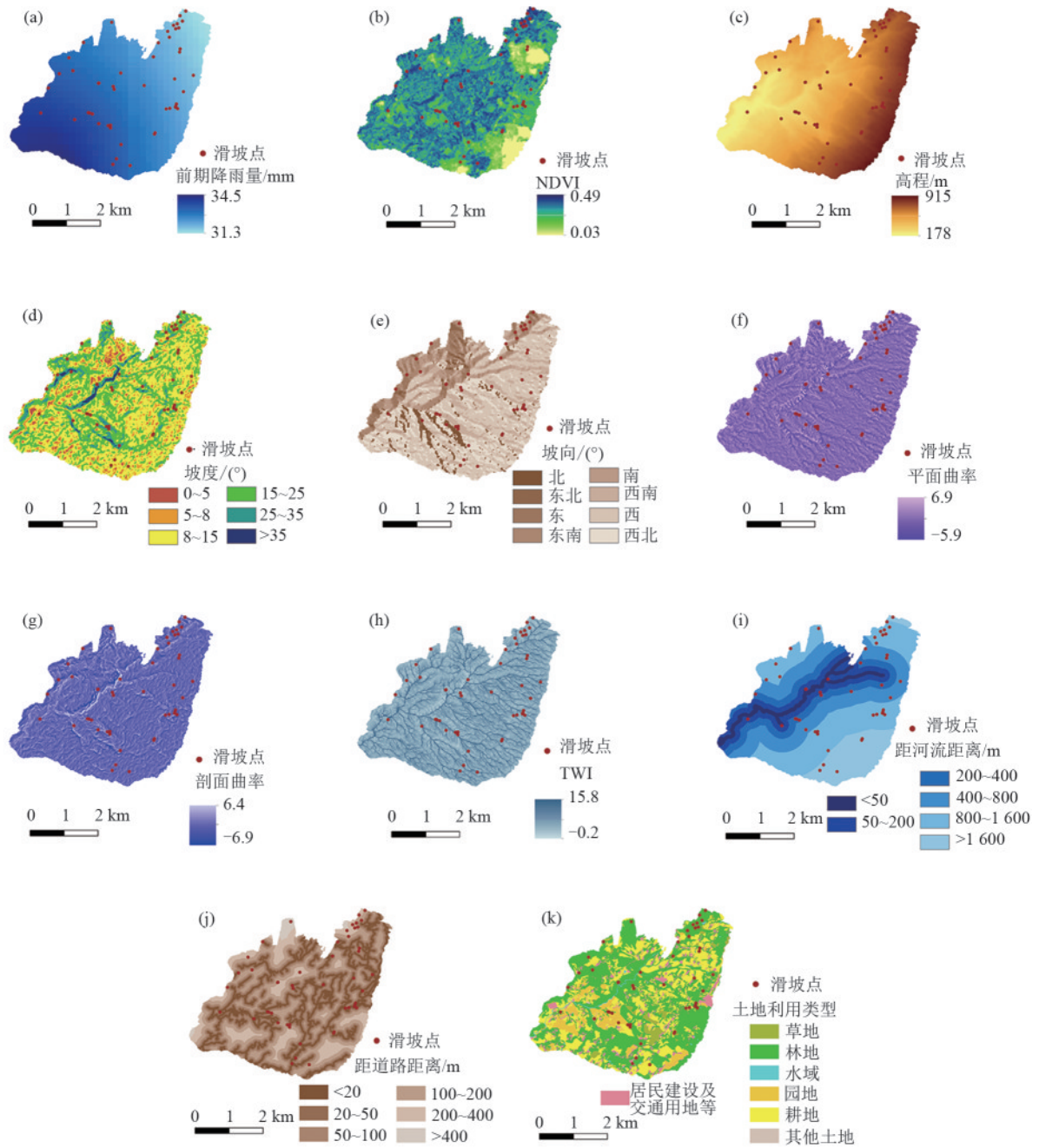


图 5 浅层滑坡影响因素

Fig. 5 Shallow landslide influencing factors

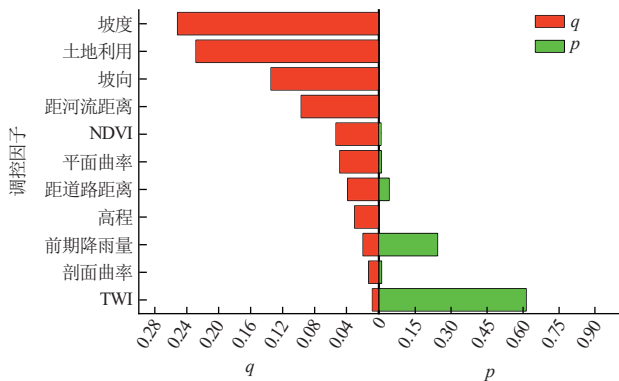


图 6 单调控因子定量分析

Fig. 6 Quantitative analysis of individual controlling factors

根据交互作用探测结果(图 7),浅层滑坡影响因素两两交互作用后均增强了单一因子对浅层滑坡分异的解释力,共呈现 64 对非线性增强效应和 2 对双因子增强效应。坡度对浅层滑坡空间分布解释力为 0.251,但当与其他因子共同作用时,其解释力均 >0.30 ,其中坡度和坡向的交互作用最强(q 为 0.44),坡度和土地利用的交互作用次之(q 为 0.42),而剖面曲率和地形湿度指数、前期降雨量的交互作用最低, q 均为 0.07。因此,研究区内浅层滑坡的空间分布不是各因子独立直接作用的结果,而是通过交互作用共同发挥作用。

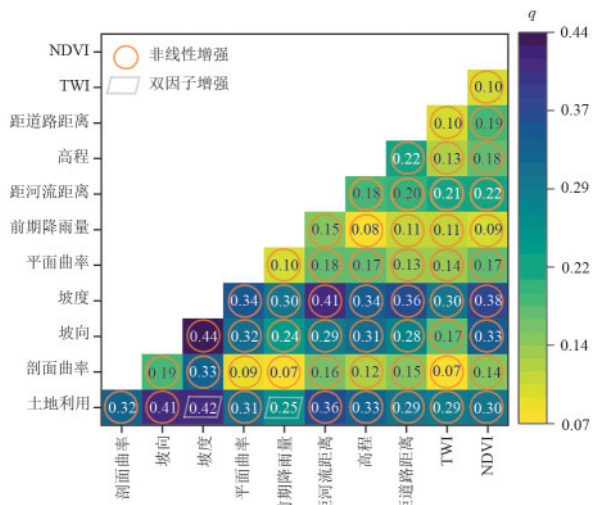


图 7 双调控因子交互作用

Fig. 7 Interaction effects between controlling factors

3 讨论

3.1 三峡库区小流域浅层滑坡分布特征

浅层滑坡形态参数统计分析结果表明,本研究的小流域浅层滑坡发育形态主要集中于厚度 0~6 m、长度 0~39 m、宽度 30~50 m、面积 0~500 m²和体积 0~1×10⁴ m³。该结果与其他地区研究存在一定程度的差异。在西南山区的研究^[3,19]发现,浅层滑坡厚度、面积和体积集中于 0~5 m、100~1 000 m²和 0~10×10⁴ m³,表明与西南山区相比,三峡库区浅层滑坡的厚度没有明显的差异,但浅层滑坡体的体积显著小于西南山区。在东南沿海区的研究^[7,20]发现,浅层滑坡厚度、面积和体积集中分布于 0~3 m、100~1 000 m²、0~1 000 m³,表明三峡库区浅层滑坡体的厚度和体积明显大于东南沿海区,而面积相对接近;而在黄土高原区的研究^[9,21]发现,浅层滑坡厚度、面积和体积集中分布于 0~1 m、0~885 m²和 0~500 m³,表明三峡库区浅层滑坡的厚度和体积明显大于黄土高原地区,而面积则较为接近。不同地理区域的浅层滑坡形态参数之所以存在差异,可能是受区域内地质构造、地形地貌、岩土体性质、植被特性及气象水文等多因素的影响。刘广宁等^[15]通过物理模型试验对珠江-西江经济带降雨诱发滑坡的研究表明,降雨模式和岩性与浅层滑坡的形成和灾害规模呈显著相关。本研究区以侏罗系中统沉积岩(主要为泥岩与砂岩)为主,表层残坡积土层较薄,下伏基岩结构松散,稳定性差。当降雨入渗至地表土层与下伏基岩构成的土-岩混合介质后,孔隙水压力升高,岩土颗粒间的黏结力降低,易沿软弱结构面滑动^[4]。而黄土高原区以第四纪风成黄土为主,疏松多孔且垂直节理发育,具有较强的湿陷性和遇水易软化的特性,土体

抗雨水冲刷能力弱,致使雨季容易发生浅层黄土滑坡^[5,12]。因此,本研究区与黄土高原区浅层滑坡形态特征的不同可能源于区域地层岩性的差异。此外,LI等^[22]以甘肃天水极端暴雨引发的浅层滑坡为研究对象发现,浅层滑坡宽度随坡度增加而减小,随绿红植被指数增加而增大,且较强的根系侧向表观黏聚力可能导致更大浅层滑坡体积。

在浅层滑坡空间分布结果(图 4)来看,浅层滑坡主要发育于前期降雨量为 32.5~33.5 mm,NDVI 为 0.37~0.49,高程为 648~759 m,坡度 15~35°,坡向为阳坡和半阳坡,平面曲率为 -2.0~-0.5,剖面曲率为 -2.0~-0.5,TWI 为 2~8,距河流距离 800~1 600 m,距道路距离 0~20 m 和土地利用类型为林地的区域。其中,部分影响因素(坡向、坡度、曲率、TWI 和距道路距离)下浅层滑坡分布规律与大多数前人得到的结论相似。前人^[7,13,17,23]研究认为,坡向为阳坡(135°~225°)和半阳坡(90°~135°和 225°~270°),坡度为 15°~40°,TWI 为 2~7,地形为凹形坡(平面曲率<-0.5 和剖面曲率<-0.5)以及靠近道路(距道路距离<100 m)是浅层滑坡的易发条件。但与先前研究^[23-24]发现的“低海拔(200~300 m)+近河岸”的浅层滑坡分布模式不同,本研究的浅层滑坡多发生在中高海拔(648~759 m)、靠近道路(0~20 m)、远离河流(800~1 600 m)及土地利用类型为林地的高植被覆盖(NDVI 为 0.37~0.49)区域。该分布模式可能与区域内道路修建有关。本研究区中高海拔的人类活动更为密集(图 5),其中道路修建作为典型的人类扰动行为,直接破坏自然坡体原有稳定性,改变地表径流的自然排泄路径,加剧极端暴雨下浅层滑坡的发生。此外,高植被覆盖区域的植物并非单纯发挥固坡作用,其根系的生长及蒸腾、光合和呼吸等过程引发的水文过程变化也可能提升浅层滑坡的发生风险^[10]。

3.2 三峡库区小流域浅层滑坡主控因素

地理探测器单因子调控作用探测结果表明,浅层滑坡分布主要是由自然和人为因素共同驱动的(图 6)。主要的自然和人为驱动因素分别为坡度和土地利用,二者对浅层滑坡发生的解释率分别为 25.1% 和 22.8%。值得注意的是,单因子调控作用探测结果中,仅前期降雨量与地形湿度指数未表现出显著影响,其原因可能与 2 个方面有关,其一是本研究统一将暴雨发生前 24 h 作为前期降雨量统计时段,而在长历时降雨中,所有浅层滑坡均在降雨结束后调查获取,并不能全部认定为是前期降雨形成的滑坡或是极端降雨过程中形成的滑坡,因此可能弱化前期降雨量对浅层滑坡的影响;其二是受研究区

尺度限制,前期降雨量与TWI的空间异质性较弱,进一步降低其解释力。在解释力较差(q 接近于0)的因子中,剖面曲率($q=0.012$)的解释力虽略低于前期降雨量($q=0.019$),但其影响具有统计显著性($p<0.05$)。可能是剖面曲率在特定区间($-2.0\sim-0.5$)对浅层滑坡具有明显的局部调控作用,虽然独立解释力微弱但统计上表现显著;前期降雨量影响范围更广、解释力稍强,但受研究区域尺度影响,区内降雨空间变异性不足,使其与浅层滑坡空间分布的统计关联未能达到显著水平。

坡度作为浅层滑坡发生的主要调控因素之一,不仅影响坡体内应力分布,决定斜坡体所受剪切力大小,还控制着坡面水文连通性,影响土体土壤水分、抗剪强度,从而影响浅层滑坡的发生概率和规模^[25]。一般来说,坡度较大的区域更容易因降雨而诱发浅层滑坡。然而从本研究结果(图4)来看,研究区域浅层滑坡发育范围在 $8^{\circ}\sim 35^{\circ}$,随坡度增加,浅层滑坡数量呈现先增后减的变化规律,其中 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 的浅层滑坡数量最多(23处)。这一现象的形成可能与区域地形特征和人类活动密切相关。研究区地形以 $8^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 和 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 坡度带为主导,为该坡度范围内浅层滑坡提供充足的发育空间;而其他坡度区间面积占比小,其浅层滑坡数自然受限于该区间的面积(图5d)。同时, $8^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 和 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 坡度带人类活动集中,显著提升浅层滑坡的发生风险(图5)。从力学机制来看, $0\sim 8^{\circ}$ 区域地势相对平缓难以形成有效剪切力,浅层滑坡的发育数量较少;而 $8^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 内,随坡度增大,斜坡体所受剪切力增大,因此在浅层滑坡数量呈现递增趋势;超过 25° 后,尽管坡度继续增大,但受限于区间面积和人类活动密集程度,浅层滑坡数量反而减少。在浅层滑坡坡度分布规律研究中,部分学者^[16,24,26]研究具有类似结论,其结果多集中在 $15^{\circ}\sim 40^{\circ}$,但受区域地质背景、地形特征及测量方法差异等影响,具体临界值存在空间异质性^[26]。

土地利用类型(解释率22.8%)在本研究中是仅次于坡度(25.1%)的浅层滑坡第2主控因子,其中仅林地、园地、耕地和草地4种土地利用类型中存在浅层滑坡,其浅层滑坡发生的主要坡度范围分别为 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 、 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 、 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 和 $8^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 。林地的浅层滑坡集中度最高,占浅层滑坡总数73.5%,而园地、耕地和草地浅层滑坡数量仅占14.3%、8.2%和4.1%。以往研究认为植被根系的加固作用可提高土壤抗剪能力,冠层截留可阻止或者延迟降雨入渗,植物蒸腾、呼吸和光合作用可降低浅层边坡土壤饱和度^[19],这些过程对滑坡发生产生一定的抑制作用。然而,植被引

起的水文过程变化也可能增加浅层滑坡的发生概率。植物根系发育形成的土壤大孔隙会产生优先渗流路径,加速雨水入渗土层^[22],在根系作用下,根土复合体土层与下层土壤的孔隙度、饱和导水率和干密度等方面产生差异,在降雨过程中下层土壤会形成相对不透水层,导致根土复合体土层土壤孔隙水压力骤增,使得植被覆盖较高的坡面在持续强降雨时更易发生浅层滑坡^[27]。除了植被引起的水文过程变化外,部分研究^[28]还发现,植物的自重会影响斜坡的应力分布,蓄积量较大的树木会增加下滑力,从而在外力作用下更容易引发滑坡;根系复杂的植物会扩大浅层滑坡的规模^[22]。因此,在三峡库区积极开展退耕还林还草生态修复工程,提升坡面植被覆盖率的同时,需要采用科学合理的植被调控措施,进一步探究林分类型、平均树龄、林分密度和蓄积量等植被因素对浅层滑坡发育的影响,以优化植被对浅层滑坡的防治效果,构建结构稳定、功能完备的植被防护体系。

地理探测器揭示的66对增强效应(64对非线性增强+2对双因子增强)表明,研究区浅层滑坡的发生是各因素交互促进作用的结果。从核心因子交互效应来看,坡度作为主导因子($q=0.251$)在与坡向($q=0.134$)、土地利用($q=0.228$)交互时 q 值分别增加至0.44和0.42,解释力提升75%~100%。具体而言,坡度作为浅层滑坡的基础控制因子(单一解释力0.251),主要影响潜在滑体的重力势能和应力分布,而坡向则通过调节日照和蒸发差异影响土壤含水率及植被类型的空间分异,二者共同影响地表径流路径和土壤侵蚀强度^[29]。与此同时,土地利用类型通过改变植被覆盖和土体结构,驱动浅层土壤的水文过程发生变化,与坡度形成非线性增强效应^[8,13]。坡度与土地利用的交互机制在林地表现得尤为突出。在本研究解译出的36处林地浅层滑坡中,坡度 $< 8^{\circ}$ 的区域无浅层滑坡发生,而坡度 $> 15^{\circ}$ 的区域有25处,占比达69.4%,反映出坡度对林地中浅层滑坡发生的关键约束作用。在缓坡区域,土体自身重力产生的下滑力较小,植被的冠层截留、根系固土作用可以有效抑制侵蚀和浅层滑动。但在高陡边坡区域,土体的自身重力产生的下滑力明显增大,植被水土保持的正面效应被削弱,而其加剧失稳的潜在负面效应被放大,使得浅层滑坡发生概率显著增大。该结果与陈博等^[23]在福建龙岩市得到的浅层滑坡因子交互作用结果不同(海拔与土地利用交互作用最强烈),可能归因于二者研究区域土地利用-海拔垂直分异格局的差异。前者研究区呈现明显的垂直地带性分布,

低海拔区域以受人为扰动强烈的农田和建设用地为主,而高海拔区域则以自然植被(林地/草地)占优势,这种土地利用随海拔的梯度变化强化了海拔-土地利用的交互效应;相比之下,本研究区土地利用类型随海拔的垂直地带性分布并不明显(图5),因此本研究的交互作用结果与其存在一定差异。值得注意的是,剖面曲率与地表湿度指数、前期降雨量的交互作用较弱($q=0.07$),可能受研究区域尺度影响^[25],研究区降雨空间分布较均匀、地形起伏相对平缓有关(图5)。土壤含水率是控制斜坡稳定性的关键因子,其主要通过降低岩土体抗剪强度和增加剪应力等方式影响边坡稳定性,对滑坡的发生具有重要作用^[30]。但区域尺度实时土壤含水率的获取较为困难,因此本研究采用前期降雨量和地形湿度指数两个指标来间接反映土壤前期降雨导致的土壤含水率差异对浅层滑坡的影响。未来研究应进一步考虑如何获取区域尺度的土壤前期含水率并探究其对浅层滑坡的影响。本研究的结果是基于“前期近饱和”这一特定情境之上得到的三峡库区浅层滑坡形态特征及主控因素。而短历时强降雨条件下,其土壤前期含水量较低时,浅层滑坡特征及影响因素与土壤“前期近饱和”条件下是否存在差异也有待进一步探究。

4 结论

1)本次降雨共诱发49处浅层滑坡,以厚度0~6 m,宽度10~50 m,长度0~39 m,面积0~500 m²和体积0~1×10⁴ m³为主要形态特征。

2)浅层滑坡空间分布特征表现为:在气象因子中,集中分布于前期降雨31.3~33.5 mm区域;在植被因子中,主要发生在NDVI为0.37~0.49区域;在地形地貌因子中,集中分布于高程648~759 m、阳坡/半阳坡、坡度15°~25°、平面和剖面曲率-2.0~-0.5及TWI 2.0~8.0区域;在水文因子中,多发于距河流800~1 600 m范围;在人类活动因子中,集中分布于距道路距离0~20 m和土地利用类型为林地的区域。

3)单因子探测结果显示,坡度和土地利用是驱动研究区浅层滑坡形成的主要影响因素。双因子交互下,各影响因素两两组合均能增强对浅层滑坡分异的解释力,其中坡度与坡向、坡度与土地利用的交互作用最为突出。

参考文献:

[1] MA H, WANG F W. Factors controlling the formation and movement of clustered shallow landslides triggered by the extreme rainstorm in July 2023 in Beijing, China[J].

Geomorphology, 2025, 478: e109728.

- [2] JAKOB M, LAMBERT S. Climate change effects on landslides along the southwest coast of British Columbia[J]. Geomorphology, 2009, 107(3/4): 275-284.
- [3] 徐伟,冯文凯,霍柱北,等.川西南红层区浅层土质滑坡特征和失稳模式研究[J].沉积与特提斯地质, 45(3): 659-670.
- XU W, FENG W K, HUO Z B, et al. Study on characteristics and instability mode of shallow soil landslide in red bed area of southwest Sichuan[J]. China Industrial Economics, 45(3): 659-670.
- [4] 赵鹏,文刚,何展昌,等.基于机器学习的金沙江流域浅层滑坡易发性评价[J].水利水电技术(中英文), 2024, 55(10): 53-70.
- ZHAO P, WEN G, HE Z C, et al. Shallow landslide susceptibility assessment in Jinsha River basin based on Machine Learning models[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(10): 53-70.
- [5] 李萌萌,焦菊英,严晰芹,等.黄土丘陵沟壑区小流域小型浅层滑坡对降雨和下垫面的响应[J].中国水土保持科学(中英文), 2025, 23(1): 31-39.
- LI M M, JIAO J Y, YAN X Q, et al. Responses of small shallow landslide to rainfall and underlying surface of the small watershed in the loess hilly-gully region[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2025, 23(1): 31-39.
- [6] ZENG T R, GUO Z Z, WANG L F, et al. Hazard prediction modeling for typhoon-triggered shallow landslides by integrating physically-based model and extreme rainfall analysis[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2025, 84(7): e356.
- [7] 黄远东,许冲,刘毅,等.2024年4月广东韶关暴雨诱发的浅层滑坡编目与滑坡分布特征分析[J].中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(2): 28-42.
- HUANG Y D, XU C, LIU Y, et al. Inventory and distribution feature of shallow landslides triggered by heavy rain event in Shaoguan, Guangdong Province in April 2024[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(2): 28-42.
- [8] ZHOU X Z, WEN H J, ZHANG Y L, et al. Landslide susceptibility mapping using hybrid random forest with GeoDetector and RFE for factor optimization[J]. Geoscience Frontiers, 2021, 12(5): e101211.
- [9] ZOU Y, QI S W, GUO S F, et al. Factors controlling the spatial distribution of coseismic landslides triggered by the Mw 6.1 Ludian earthquake in China[J]. Engineering Geology, 2022, 296: e106477.
- [10] WANG X H, MA C, WANG Y Q, et al. Effect of root architecture on rainfall threshold for slope stability: Variabilities in saturated hydraulic conductivity and strength of root-soil composite[J]. Landslides, 2020, 17(8): 1965-1977.

- [11] ZWEIFEL L, SAMARIN M, MEUSBURGER K, et al. Investigating causal factors of shallow landslides in grassland regions of Switzerland[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2021, 21(11): 3421-3437.
- [12] 王鑫盈, 马超, 吕立群, 等. 黄土高原不同土地利用类型区浅层滑坡侵蚀特征分析: 以蔡家川滑坡事件为例[J]. *干旱区研究*, 2024, 41(4): 697-705.
WANG X Y, MA C, LYU L Q, et al. Erosion characteristics of shallow landslides under various land-use conditions: An example of the Caijiachuan landslide[J]. *Arid Zone Research*, 2024, 41(4): 697-705.
- [13] CUI Y L, YANG L, XU C, et al. Spatial distribution of shallow landslides caused by Typhoon Lekima in 2019 in Zhejiang Province, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2024, 21(5): 1564-1580.
- [14] LI L, LIANG S Y, QIANG Y, et al. Exploring the impact of introducing the TRIGRS physical model into machine learning model on the rainfall-induced shallow landslide-susceptibility assessment[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2025, 84(5): e218.
- [15] 刘广宁, 李聪, 卢波, 等. 降雨诱发全-强风化岩边坡浅层失稳模型试验研究[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(7): 88-95.
LIU G N, LI C, LU B, et al. Model test on shallow failure of fully and strongly weathered rock slope induced by rainfall[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, 37(7): 88-95.
- [16] 赵美龄, 郝利娜, 许晓露, 等. 土地利用/覆被变化对地质灾害发育的影响研究[J]. *遥感技术与应用*, 2022, 37(2): 399-407.
ZHAO M L, HAO L N, XU X L, et al. Research on the impact of land use/cover change on geological disaster development[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2022, 37(2): 399-407.
- [17] 邢书昆, 张光辉, 王滋贯, 等. 黄土丘陵沟壑区浅层滑坡和崩塌形态特征与发育临界地形[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(2): 106-113.
XING S K, ZHANG G H, WANG Z G, et al. Morphological characteristics and critical topography of shallow landslide and collapse in hilly and gully region of the Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(2): 106-113.
- [18] ZHANG R, CHEN S. Spatiotemporal analysis, simulation, and early warning of landslides based on landslide sensitivity and multisource precipitation products in southwestern China[J]. *Landslides*, 2025, 22(5): 1413-1434.
- [19] HU B L, SU L J, ZHANG C L, et al. Mobility characteristics of rainfall-triggered shallow landslides in a forest area in Mengdong, China[J]. *Landslides*, 2024, 21(9): 2101-2117.
- [20] YU B, CHEN W H, FENG W K, et al. A case study of shallow landslides triggered by rainfall in Sanming, Fujian Province, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2023, 82(18): e426.
- [21] 唐鹏, 张建军, 李阳, 等. 极端降雨对晋西黄土区不同土地利用方式下的浅层滑坡形态特征和空间分布影响[J]. *北京林业大学学报*, 2023, 45(10): 109-117.
TANG P, ZHANG J J, LI Y, et al. Effects of extreme rainfall on the morphological characteristics and spatial distribution of shallow landslides under different land use patterns in the loess region of western Shanxi Province, northern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2023, 45(10): 109-117.
- [22] LI M Y, MA C, DU C, et al. Landslide response to vegetation by example of July 25-26, 2013, extreme rainstorm, Tianshui, Gansu Province, China[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(2): 751-764.
- [23] 陈博, 张灿灿, 李振洪, 等. 福建龙岩市 2024 年“6·16”特大暴雨诱发滑坡发育特征及其调控因子分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2024, 49(11): 2145-2155.
CHEN B, ZHANG C C, LI Z H, et al. Developmental characteristics and controlling factors of landslides triggered by extreme rainfalls on 16 June 2024 in Longyan, Fujian Province[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(11): 2145-2155.
- [24] 许强, 徐繁树, 蒲川豪, 等. 2024 年 4 月广东韶关江湾镇极端降雨诱发群发性滑坡初步分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2024, 49(8): 1264-1274.
XU Q, XU F S, PU C H, et al. Preliminary analysis of extreme rainfall-induced cluster landslides in Jiangwan township, Shaoguan, Guangdong, April 2024[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(8): 1264-1274.
- [25] 余淙蔚, 柳侃, 殷杰, 等. 一种适用于逻辑回归模型评价浅层滑坡易发性的网格尺度划分方法: 以 2019 年福建省三明市群发浅层滑坡为例[J]. *山地学报*, 2022, 40(1): 106-119.
YU C W, LIU K, YIN J, et al. A grid-scale division method applicable to logistic regression models for evaluating the susceptibility of shallow landslides: Taking the 2019 cluster of shallow landslides in Sanming, Fujian as example[J]. *Mountain Research*, 2022, 40(1): 106-119.
- [26] 马煜, 余斌, 何元勋, 等. 降雨激发浅层滑坡发育特征与阈值研究: 以江西省全南县大吉山“2019.6.10”灾害为例[J]. *地质与勘探*, 2023, 59(5): 1065-1073.
MA Y, YU B, HE Y X, et al. Rainfall threshold and development characteristics of shallow landslides induced by rainfall: A case study of the "June 10th, 2019" disaster in the dajishan area, Quannan County, Jiangxi Province

- [J]. *Geology and Exploration*, 2023, 59(5): 1065-1073.
- [27] POLLEN N. Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks: Accounting for soil shear strength and moisture[J]. *Catena*, 2007, 69(3): 197-205.
- [28] LÜ Q, WU J Y, LIU Z H, et al. The Fuyang shallow landslides triggered by an extreme rainstorm on 22 July 2023 in Zhejiang, China[J]. *Landslides*, 2024, 21(11): 2725-2740.
- [29] VILLAÇA C, SANTOS P P, ZÉZERE J L. Modelling the rainfall threshold for shallow landslides considering the landslide predisposing factors in Portugal [J]. *Landslides*, 2024, 21(9): 2119-2133.
- [30] 王中羽, 李素敏, 袁利伟, 等. 考虑影响因子重要性选择和土壤含水率的滑坡易发性评价[J]. *水文地质工程地质*, 2025, 52(3): 211-221.
- WANG Z Y, LI S M, YUAN L W, et al. Landslide susceptibility evaluation considering the importance selection of influencing factors and soil moisture content[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2025, 52(3): 211-221.
- (上接第 180 页)
- [26] DAI F C, XU C, YAO X, et al. Spatial distribution of landslides triggered by the 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquake, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 40(4): 883-895.
- [27] LI N, TANG C, ZHANG X Z, et al. Characteristics of the disastrous debris flow of Chediguan gully in Yinxing town, Sichuan Province, on August 20, 2019 [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): e23666.
- [28] GUZZETTI F, PERUCCACCI S, ROSSI M, et al. The rainfall intensity - duration control of shallow landslides and debris flows: An update[J]. *Landslides*, 2008, 5(1): 3-17.
- [29] OH H J, LEE S, HONG S M. Landslide susceptibility assessment using frequency ratio technique with iterative random sampling[J]. *Journal of Sensors*, 2017, 2017(1): e3730913.
- [30] YANG H J, YANG T Q, ZHANG S J, et al. Rainfall-induced landslides and debris flows in Mengdong Town, Yunnan Province, China [J]. *Landslides*, 2020, 17(4): 931-941.
- [31] MUHAMMAD A P J, FARAJ R. Data normalization and standardization: A technical report[Z]. 2014, DOI: 10.13140/RG.2.2.28948.04489.
- [32] AYALEW L, YAMAGISHI H, UGAWA N. Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japan[J]. *Landslides*, 2004, 1: 73-81.