

三峡库区武隆段滑坡灾害驱动因子演变格局与人类活动的影响

张志兼, 黄 勋, 蔡雨微, 傅镜羽, 朱 悦, 杨 锐, 韩超群

The evolution pattern and influence of human activities of landslide driving factors in Wulong section of the Three Gorges Reservoir area

ZHANG Zhijian, HUANG Xun, CAI Yuwei, FU Jingyu, ZHU Yue, YANG Rui, and HAN Chaoqun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.03-05>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

地理探测器在判别滑坡稳定性影响因素中的应用

Application of geographic detector in identifying influencing factors of landslide stability: A case study of the Jiangda County, Tibet

支泽民, 陈琼, 张强, 周强, 刘峰贵, 赵富昌, 陈永萍 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 19-26

三峡库区巫峡剪刀峰顺层岩质岸坡破坏模式分析

An analysis on the destruction mode of Wuxia scissors peak down the shore slope in the Three-Gorges Reservoir area

王平, 胡明军, 黄波林, 张枝华, 郑涛, 吴坤达, 毛博 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 52-61

三峡库区箭穿洞危岩体变形破坏模式与防治效果分析

Analyses on failure modes and effectiveness of the prevention measures of Jianchuandong dangerous rock mass in the Three Gorges Reservoir area

蒋文明, 王鲁琦, 赵鹏, 黄波林, 张枝华, 胡明军 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 105-112

三峡库区典型顺斜向岩质滑坡变形破坏特征及失稳机制分析

Deformation characteristics and failure mechanism of large-scale obliquely dip rock landslide in the Three Gorges Reservoir Region

蒋先念, 张晨阳 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 36-42

三峡库区大型斜倾顺层滑坡失稳机理分析

Instability mechanism of massive oblique bedding rock landslide in the Three-Gorges Reservoir: A case study of the Longjing landslide in Shizhu County of Chongqing City

王平, 朱赛楠, 张枝华, 吴晓宾, 杨柳, 赵慧 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 24-32

四川金川-小金公路沿线滑坡、崩塌影响因素分析

Influencing factors of landslides and rockfalls along the Jinchuan-Xiaojin highway in Sichuan

谢洪波, 刘正疆, 文广超, 陈红旗, 杨运航 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 10-17



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.03-05

张志兼, 黄勋, 蔡雨微, 等. 三峡库区武隆段滑坡灾害驱动因子演变格局与人类活动的影响 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(3): 39-50.

ZHANG Zhijian, HUANG Xun, CAI Yuwei, *et al.* The evolution pattern and influence of human activities of landslide driving factors in Wulong section of the Three Gorges Reservoir area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(3): 39-50.

三峡库区武隆段滑坡灾害驱动因子演变格局与人类活动的影响

张志兼¹, 黄勋^{1,2}, 蔡雨微¹, 傅镜羽¹, 朱悦¹, 杨锐¹, 韩超群¹

(1. 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331;

2. 三峡库区地表过程与环境遥感重庆市重点实验室, 重庆 401331)

摘要: 在快速城镇化背景下, 人类活动已成为影响滑坡分布的重要因素。文章以重庆武隆区为例, 基于 1991—2015 年 330 处历史滑坡数据, 运用重力模型和标准差椭圆模型, 揭示了武隆区滑坡灾害的时空演变格局; 利用地理探测器分析了 2001—2005、2006—2010 和 2011—2015 三个时段滑坡分布的驱动因子, 解释了滑坡驱动因子演变的机制。结果表明: (1) 在时间分布上, 武隆滑坡累计曲线呈现出“缓-陡-缓”的特征, 2008 年之前, 滑坡发生速率随降雨量的增加而增长, 而后在降雨量保持稳定的情况下, 滑坡发生速率明显减缓; (2) 在空间分布上, 武隆滑坡集聚于西、中、东 3 个高发区, 呈现出由西北—东南方向转向东北—西南方向的变化过程, 并表现出方向性减弱和离散化的趋势; (3) 在驱动因子上, 降雨、地质因子和地形地貌等因子的解释力呈下降趋势, 而人类活动因子的解释力不断增强, 已逐渐成为影响滑坡分布的关键影响因素之一。研究成果可为三峡库区滑坡灾害防灾减灾工作部署提供依据。

关键词: 三峡库区; 滑坡; 地理探测器; 解释力; 人类活动; 驱动因子

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2022)03-0039-12

The evolution pattern and influence of human activities of landslide driving factors in Wulong section of the Three Gorges Reservoir area

ZHANG Zhijian¹, HUANG Xun^{1,2}, CAI Yuwei¹, FU Jingyu¹, ZHU Yue¹, YANG Rui¹, HAN Chaoqun¹

(1. College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 2. Chongqing Key

Laboratory of Earth Surface Process and Environment Remote Sensing in the Three Gorges Reservoir Area,

Chongqing 401331, China)

Abstract: Human activities have play an important role in the spatial distribution of landslides, accompanied by rapid urbanization. This research takes Wulong district of Chongqing as an example, the research data are 330 historical landslides from 1991 to 2015. The spatio-temporal evolution pattern of landslide was revealed, with the aid of gravity model and standard

收稿日期: 2022-02-11; 修订日期: 2022-04-08

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(41907396); 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201900535); 重庆师范大学基金项目(21XWB007); 重庆师范大学大学生创新创业训练计划项目(X20191063707032); 重庆师范大学校级研究生科研创新项目(YKC21047)

第一作者: 张志兼(1998-), 男, 江西宜春人, 硕士研究生, 主要从事自然灾害风险评价方面的研究。E-mail: zhangzhijian21@163.com

通讯作者: 黄勋(1986-), 男, 四川广元人, 博士, 高级工程师, 主要从事泥石流灾害风险评价与管理方面的研究。

E-mail: huangxun@cqnu.edu.cn

deviation ellipse model; and the driving factors of landslide distribution in three time periods, 2001—2005, 2006—2010, and 2011—2015, were analyzed using GeoDetector. The results show that: (1) In terms of temporal distribution, the cumulative landslide curve of Wulong shows the characteristics of slow-steep-slow. Before 2008, the occurrence rate of landslide increased with the increase of rainfall, and then decreased significantly when the rainfall remained stable; (2) In terms of spatial distribution, Wulong's landslides were clustered in three hotspots, and showed a change process from northwest-southeast direction to northeast-southwest direction, with a trend of weakening directionality and dispersion; (3) In terms of driving factors, the explanatory power of factors such as rainfall, geology and geomorphology is decreasing, however, the explanatory power of human activity factors is increasing and has gradually become one of the key influencing factors on landslide distribution. The research results can provide an important support for the landslide disaster prevention and mitigation in the Three Gorges reservoir area.

Keywords: Three Gorges Reservoir area; landslides; GeoDetector; explanatory power; human activity; driving factors

0 引言

一般来讲,滑坡的时空分布受限于内在控制因子和外在诱发因子^[1]。对于三峡库区滑坡的内在控制因子,学界普遍认为滑坡受工程地质岩组影响较大,如侏罗系红层地区滑坡广泛发育^[2-3],也有学者分析了三峡库区滑坡与构造活动的关系^[4-5],以及斜坡结构类型与滑坡成因机制及空间分布的关系^[6-7]。

外在诱发因子主要有降雨、地震、库水位升降以及人类工程活动等。大量案例已表明,随着人类活动对自然环境改造的加剧,滑坡发生频率日渐增高,人类活动已逐渐成为滑坡变形失稳的主要诱因^[8]。例如,三峡库水位升降导致大量涉水老、古滑坡发生变形复活,代表性的有巴东县黄土坡滑坡^[9];大规模采矿导致的滑坡以 2009 年 6 月 5 日重庆武隆鸡尾山发生的大型滑坡-碎屑流为代表,体积 $7.00 \times 10^6 \text{ m}^3$,造成 74 人死亡^[10];还有部分滑坡是由人类工程建设切坡所致^[11-12],2020 年 7 月 13 日发生在重庆武隆 S529 省道旁的白马镇牛儿湾滑坡,体积超过 $1.80 \times 10^6 \text{ m}^3$,造成 4 栋房屋倒塌,93 人紧急撤离。

除了对单体滑坡的研究外,近年来大量学者从区域层面探讨了滑坡时空分布的驱动因子。Froude 等^[13]对 2004—2016 年全球灾难性滑坡的分析发现,在不断增强的城市建设、非法采矿和肆意削坡的扰动下,滑坡数量与日俱增,人类活动极有可能超过降雨成为滑坡的第一诱因;Li 等^[14]研究了 2003—2014 年全国 28 省市土地城市化与滑坡的关系,发现滑坡数量随城市建成区面积和路网密度的增大而增加,尤其以我国西部地区最为显著;王新胜等^[15]针对三峡库区重庆主城段 1 703 个历史滑坡点的研究发现,人口密度位居滑坡影响因素之首。这一观点在 Li 等^[16]的研究中也得到证实,除

库水位升降外,距道路的距离和土地利用类型等人类活动因子,对三峡库区滑坡分布的影响也已超过降雨因子。

不单是针对三峡库区,国内外其他研究也已表明,在快速城镇化的背景下,不断增强的人类活动是控制滑坡分布的关键要素^[17]。这一认识在经济发达的城市区域是适用的,但是在城镇化率较低、人类活动强度较小的农村县城是否可行?为此,文中选择三峡库区腹心的武隆区作为研究区,该区的城镇化率较低(仅为全市的 67.4%,2018 年),人类活动强度位列三峡库区(重庆段)倒数第二^[18]。以重庆武隆 1991—2015 年 330 处历史滑坡为样本点,运用重力模型和标准差椭圆模型描述滑坡的时空分布格局,利用地理探测器进行驱动力分析,试图解释该格局的演化机制,得出欠发达县域内的人类活动也是影响滑坡分布关键性因素的观点,其结论可为三峡库区滑坡灾害减灾防灾规划提供依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

武隆区地处重庆市东南部乌江下游、三峡库区腹心(图 1)。地势东北高、西南低,以山地为主,相对高差 700~1 000 m。气候属亚热带湿润季风气候,雨量丰沛、四季分明,多年平均降水量多在 1 000 mm 以上,雨量在时间分配上不均匀,4—9 月降雨占全年总量的 70% 以上。区内地质构造以 NE-NNE 走向的褶皱为主,断层不发育,属新华夏构造体系和南北经向构造体系——川黔南北构造带。出露地层全为沉积岩,岩性以碳酸盐岩、砂岩、页岩和泥岩为主。

武隆境内地势起伏大、山高谷深、河流密布、降雨量大且时间集中,为滑坡提供了适宜的孕灾环境,武隆一直都是三峡库区地质灾害比较严重的地区,在重庆市

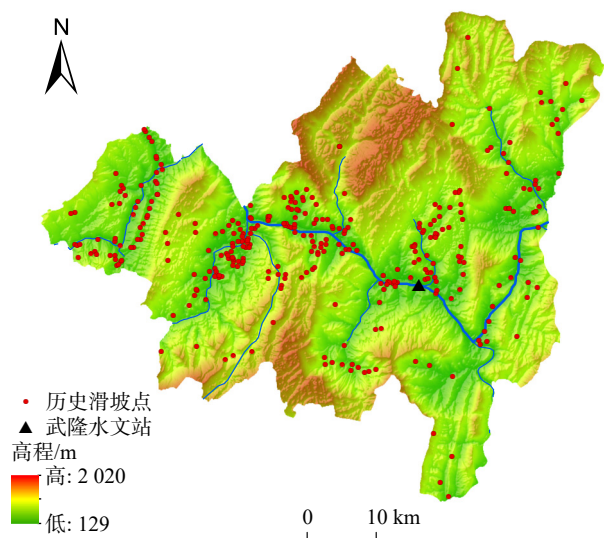


图1 研究区概况

Fig. 1 Research area

注: 滑坡数据来自“重庆市武隆县地质灾害排查项目”; 该图基于国家标准地图服务网的审图号为GS(2020)4630号的标准地图、重庆市标准地图服务网的审图号为渝S(2019)071号的标准地图制作, 底图无修改, 下同。

地质灾害危险性分区中属于武隆—南川重灾带^[19]。加之近年来, 区内社会经济发展水平不断提高、城市建设规模逐步扩大, 人类工程活动如道路开挖、矿山开采和水电站等建设活动日益频繁, 人类对地表环境的干扰程度也不断加强, 导致重大滑坡灾害时有发生。

长江干流库岸滑坡受库水位变动的影响大, 这已是学界的共识^[1,16]。武隆位于长江二级支流乌江的下游

(图1), 三峡蓄水前武隆站水位变化区间约为169~185 m, 蓄水后水位变化区间缩小为169~177 m, 且季节间变动幅度小(图2), 区内滑坡受库水位升降影响较小, 同时文中重在揭示城镇化背景下人类生活生产活动对滑坡分布的影响, 因此可排除库水位升降的干扰。

1.2 影响因子选取

结合武隆区自然环境条件及社会经济发展状况, 文中将影响滑坡分布的多个指标分为降雨、地质条件、地形地貌和人类活动等4个方面共14种因子^[20-21](表1)。

(1)降雨: 降雨往往是滑坡的直接诱发因素, 由于强降雨, 斜坡土体含水量增大, 斜坡岩土体静、动水压力急剧增大, 降低滑动面的抗剪强度^[22], 增大了下滑力, 从而诱发滑坡。

(2)地质条件: 选取工程地质岩组、距背向斜轴区距离、距断层距离3个因子来衡量该区的地质条件。地层岩性影响深部岩土体的物理属性, 斜坡上的岩体往往在软岩、软层的影响下容易出现塑性形变, 不同岩性接触带容易出现片理风化作用, 形成强烈的错动带和风化带^[23]; 背向斜轴区构造应力相对集中^[24], 裂隙分布密集, 层间常有构造滑移面, 且在局部地段存在顺向坡; 断层附近岩土体结构不稳定, 在外力扰动作用下易发生滑坡。

(3)地形地貌: 地表起伏度可反映地面相对高差, 影响着地表物质的侵蚀、搬运、堆积等过程, 在很大程度上决定了滑坡灾害的易发程度; 斜坡的坡度越大, 土体

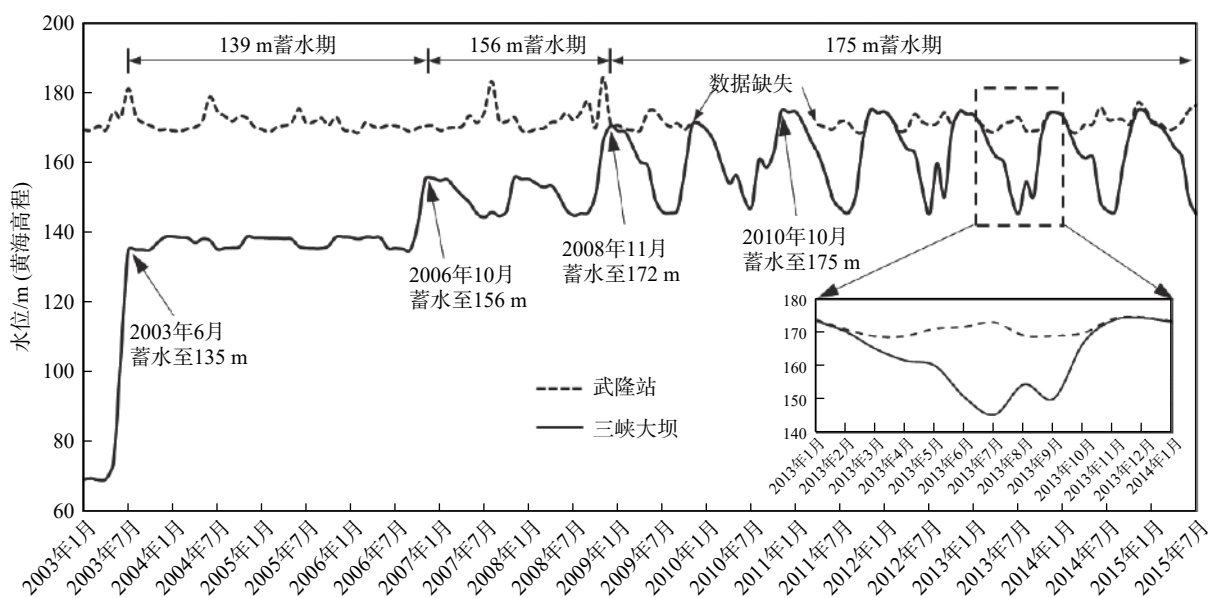


图2 武隆站与三峡大坝(坝前)的水位对比

Fig. 2 Water level comparison between Wulong Station and Three Gorges Dam (before the dam)

注: 数据来自长江水文网。

表 1 滑坡分布的影响因子分类及说明

Table 1 Classification and description of impact factors affecting landslide distribution

类别	名称	年份	来源	描述
降雨	年均降雨量	1990—2015	http://www.resdc.cn	1 km×1 km 格网
地质条件	工程地质岩组	2002	重庆市工程地质图	栅格数据, 1 : 50 万
	距背向斜轴区距离	—	重庆市 1 : 50 万地质图	栅格数据
	距断层距离	—	重庆市 1 : 50 万地质图	栅格数据
地形地貌	土壤类型	2000	http://www.resdc.cn	1 km×1 km 格网
	土壤侵蚀强度	2000	http://www.resdc.cn	1 km×1 km 格网
	地表起伏度	2003	由 DEM 提取	30 m×30 m 格网
	坡度	2003	由 DEM 提取	30 m×30 m 格网
	距河流距离	2014	http://www.geodata.cn	矢量数据
	NDVI	2000—2015	http://www.resdc.cn	1 km×1 km 格网
人类活动	人口密度	2000—2015	http://www.resdc.cn	1 km×1 km 格网
	GDP	2000—2015	http://www.resdc.cn	1 km×1 km 格网
	距道路距离	2000—2015	http://www.geodata.cn	武隆区 1 : 25 万道路交通数据
	距采矿点距离	—	全国矿产地数据库	矢量数据

下滑力越大, 斜坡稳定性越低^[1]; 河流、沟谷的两侧冲刷侵蚀作用强烈, 斜坡前缘土体被带走, 形成临空面, 容易发生滑坡。土壤类型、土壤侵蚀强度和 NDVI 等 6 个因子可以综合衡量该区地表土体的抗蚀性和抗冲性^[25]。

(4) 人类活动

武隆区破坏地质环境的人类工程活动主要体现在不合理切坡、填土、盲目采矿和矿山弃渣不合理堆放以及滥垦滥伐, 因此选取距道路距离、距采矿点距离、人口密度和 GDP 等 4 个因子作为衡量该区人类活动强度的指标^[16,26-27]。

1.3 数据处理

研究区内共有 330 个历史滑坡灾害点, 数据来自“重庆市武隆县地质灾害排查项目”调查成果, 包括 20 世纪 80 年代以来武隆境内滑坡的类型、发生时间、位置、主要诱因、威胁户及财产等信息。文中首先利用 1991—2015 年的 330 处历史滑坡, 分析该时段滑坡的时空分布格局。其次, 考虑到 GDP、人口、道路等相关数据的匹配性, 选取 2001—2015 年的 287 处历史滑坡分析该时间段滑坡空间分布的驱动因子。上述 14 种因子中, 对于连续型因子进行离散化, 并采用自然断点法分成 9 级^[15,28]; 对于离散型因子则保持其原有分级, 部分因子见图 3。

2 研究方法

采用趋势分析、核密度分析、重力模型和标准差椭圆模型分析滑坡的时空分布格局, 利用地理探测器对不同时段滑坡分布的驱动因子进行分析, 揭示其演化机制。

2.1 滑坡时空分布格局分析

2.1.1 重力模型

重心变化是研究海量时空数据演变趋势的有效手段^[29], “重心”可表征地理要素的时空分布特征, 重心移动方向指示了空间现象的“高密度”部位, 而重心移动的距离反映了要素变化幅度的空间差异。定义武隆滑坡的重心坐标分别为:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad \bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (1)$$

式中: $\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$ ——滑坡的重心坐标;

x_i 、 y_i ——第 i 个滑坡的空间坐标;

n ——滑坡总数。

2.1.2 标准差椭圆模型

标准差椭圆可用于度量地理要素的中心趋势、离散和方向趋势等空间分布特征^[30]。标准差椭圆的中心点表示所有要素的中心位置, 长半轴表示地理要素分布的方向性, 短半轴表示地理要素分布的范围。因此通过绘制滑坡空间分布的标准差椭圆, 比较不同时间段的椭圆变化特征, 可以揭示滑坡分布的年代际空间动态过程和总体趋势。计算公式如下:

$$C = \frac{1}{n} \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n \tilde{x}_i^2 & \sum_{i=1}^n \tilde{x}_i \tilde{y}_i \\ \sum_{i=1}^n \tilde{x}_i \tilde{y}_i & \sum_{i=1}^n \tilde{y}_i^2 \end{pmatrix}, \quad \begin{cases} \tilde{x}_i = (x_i - \bar{x}) \\ \tilde{y}_i = (y_i - \bar{y}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: C ——标准差椭圆轴长;

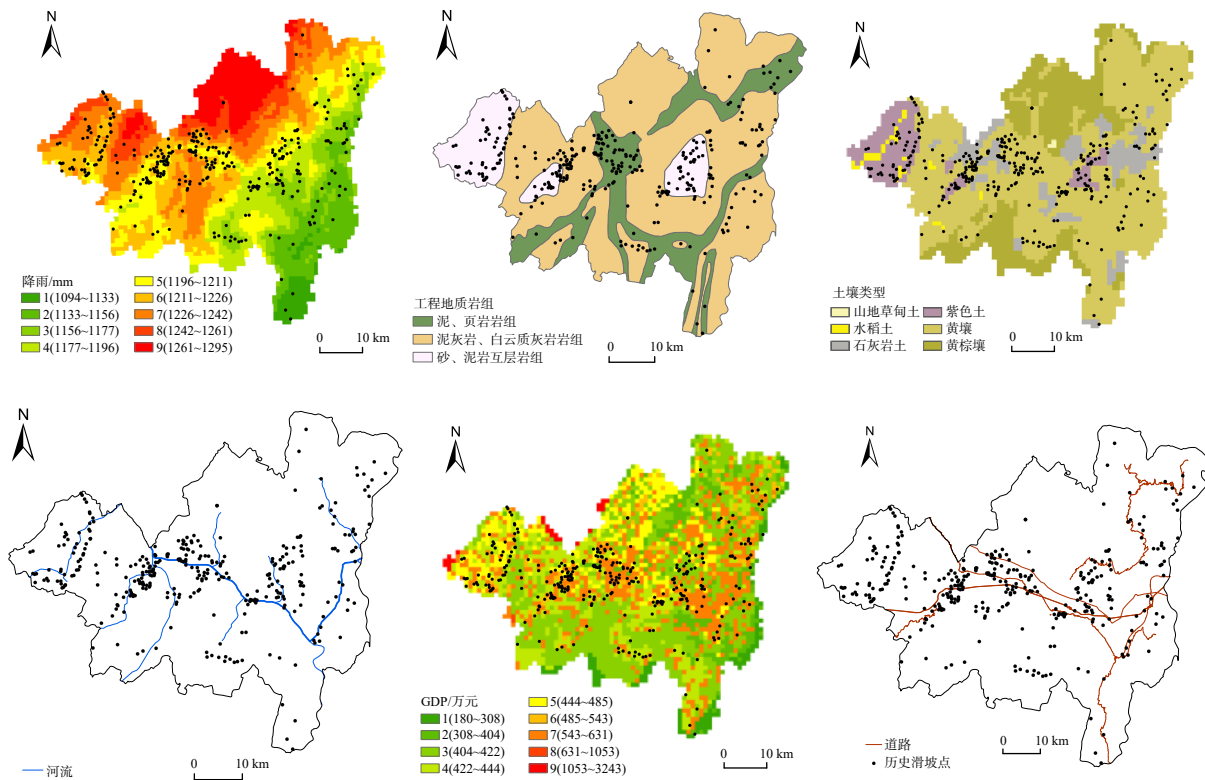


图3 滑坡影响因子

Fig. 3 Landslide impact factors

n ——滑坡总数;

$\bar{x}_i$ 、 $\bar{y}_i$ ——平均中心和 x_i 、 y_i 坐标的差;

x_i 、 y_i ——第 i 起滑坡的坐标;

$\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ ——滑坡分布的平均中心。

2.2 空间分布驱动因素探测

地理探测器是基于地理空间分异立论所提出的探测空间分异性、揭示其背后驱动因子的一种统计学方法^[31]。其核心思想认为:若某个自变量对因变量有重要影响,那么二者在空间分布上应该具有相似性。地理探测器已广泛用于台风^[32]、山洪^[33]、滑坡^[34]和泥石流^[35]等自然灾害领域。地理探测器包括因子探测、风险探测、交互探测和生态探测。

文中采用因子探测和交互探测对滑坡空间分布的驱动因子进行分析,以降雨、地质条件、地形地貌和人类活动等 4 个方面共 14 种因子作为自变量 X ,以滑坡核密度值作为因变量 Y ,利用不同时间段的 q 值来反映驱动力的演化过程,通过探测各变量之间的空间分异程度和交互作用影响,从而找到影响滑坡空间分布的关键影响因子。

(1) 因子探测

因子探测器通过因子解释力衡量自变量对因变量

的贡献大小,进而判断某自变量是否为因变量空间分异性的驱动因子,以及所占权重。通过比较因变量在自变量各类别中的方差与全局方差的关系来计算因子解释力的大小,计算公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (3)$$

式中: q ——解释力,为某影响因子在多大程度上解释了滑坡的空间分布, q 的值域为 $[0, 1]$, q 值越大,表示影响因子对滑坡空间分布的解释力越强;

h ——变量因子分类数, $h = 1, \dots, L$;

N_h 、 N ——类型 h 、全区的样本数;

σ_h^2 、 σ^2 ——类型 h 、全区的方差;

SSW ——类型方差之和;

SST ——全区总方差。

(2) 交互探测

交互探测器分别计算和比较各单因子 q 值及两因子叠加后的 q 值,以判断两因子是否存在交互作用以及交互作用的强度等^[36]。 $X_1 \cap X_2$ 是将 X_1 和 X_2 进行空间叠加后形成的新的空间因子,利用表 2 的判别依据,确定因子间的交互作用类型。

表 2 交互探测关系对应表

Table 2 Interaction detection relationship correspondence table

判据	交互作用
$q(X_1 \cap X_2) < \min(q(X_1), q(X_2))$	非线性减弱
$\min(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < \max(q(X_1), q(X_2))$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \max(q(X_1), q(X_2))$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

3 滑坡灾害的时空演变格局

3.1 时间变化特征

以武隆境内 330 个历史滑坡点数据为基础, 分析

1991—2015 年滑坡逐年变化趋势及其演化过程(图 4)。武隆滑坡发生频次按累积曲线变化特征可划分为 1991—1997 年、1998—2007 年和 2008—2015 年 3 个阶段性变化过程。在 1991—1997 年处于低发阶段, 滑坡发生频次为 0~7 起/年, 平均每年发生 2.28 起; 在 1998—2007 年进入快速增长阶段, 发生滑坡 277 起, 占总数的 83.94%, 滑坡发生频次为 4~84 起/年, 平均每年发生 27.7 起; 在 2008—2015 年处于缓慢增长阶段, 滑坡发生频次为 2~8 起/年, 平均每年发生 4.63 起。3 个异常高值均出现在快速增长阶段, 分别为 1998 年、2003 年和 2007 年, 对应的滑坡数量为 18 起、84 起和 53 起, 共计 155 起, 占总数的 46.97%。

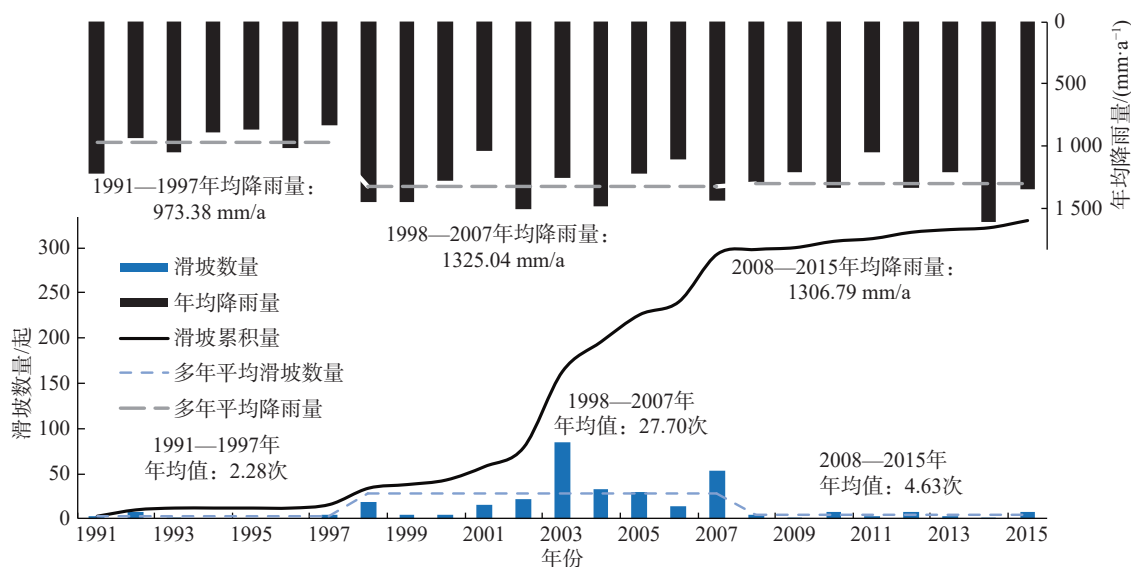


图 4 滑坡累积量与降雨量的对应关系

Fig. 4 Correspondence between landslide accumulation and rainfall

从滑坡累积量与年均降雨量的关系(图 4)来看, 1991—1997 年的年均降雨量仅为 973.38 mm, 1998—2007 年增至 1 325.04 mm, 增幅超过 30%, 滑坡累积曲线斜率较上一阶段明显变大, 与降雨量的变化趋势基本一致, 2008—2015 年间年均降雨量为 1 306.79 mm, 与 1998—2007 年相比波动较小, 然而滑坡累积曲线斜率却明显减缓。有研究表明, 1 300 mm 是三峡库区地质灾害暴发的年降雨量临界值, 在年均降雨量超过 1 300 mm 后, 地质灾害累积数与降雨量关系曲线斜率明显变缓^[37]。因此, 我们初步判断认为, 降雨对于滑坡空间分布的影响在 2007 年以后存在一定程度的降低, 对此还需结合滑坡发生机理和相关数据, 进一步论证分析。

3.2 空间变化特征

3.2.1 滑坡分布密度分析

针对武隆境内 1991—2015 年的历史滑坡点, 使用 ArcGIS 计算核密度估计值以展示其聚集区域与聚集程度。据核密度估计结果(图 5), 滑坡的空间分布存在明显差异, 呈现出西、中、东 3 个聚集区域: (1)西部: 平桥镇—鸭江镇的带状聚集; (2)中部: 羊角镇—白马镇—长坝镇的环形聚集; (3)东部: 巷口镇—火炉镇的带状聚集。其中, 白马镇西北部和巷口镇中部的灾害密度值>1.5, 平桥镇、长坝镇、羊角镇、火炉镇西部和仙女山镇东南部等地的灾害密度值为 1.0~1.5, 鸭江镇、庙垭乡、白云乡、江口镇以及沧沟乡等地的灾害密度值为 0.5~1, 其余地区滑坡发生起数较少。

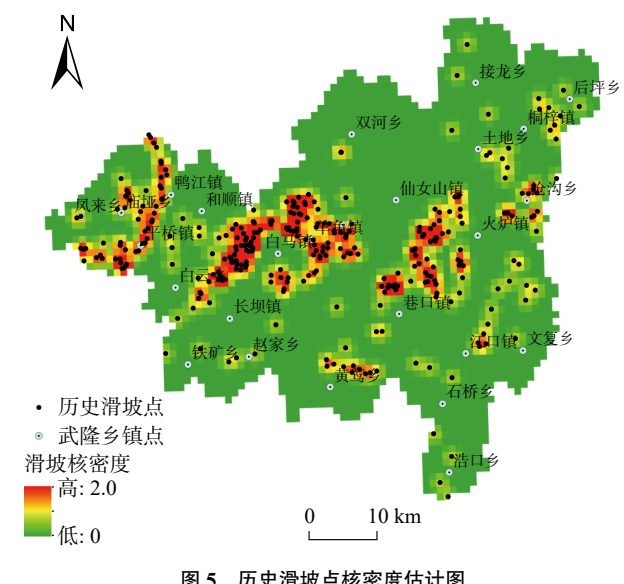


图 5 历史滑坡点核密度估计图

Fig. 5 Estimated nuclear density map of historical landslide sites

3.2.2 滑坡重心及其变化趋势

将 1991—2015 年的武隆滑坡数据以 5 年为间隔, 采用重力模型分析滑坡灾害重心的移动轨迹和移动距离(图 6), 利用标准差椭圆分析滑坡方向及分布(表 3), 以揭示滑坡空间分布的变化特征。

1991—2015 年武隆滑坡的重心在 $29^{\circ}21'N \sim 29^{\circ}23'N$ 、 $107^{\circ}32'E \sim 107^{\circ}43'E$ 之间移动。1996—2000 年滑坡重心由白马镇向西北移动至羊角镇中部, 2001—2005 年向东北方向移动至羊角镇西部, 2006—2010 年由羊角镇向东南方向移动至巷口镇与仙女山镇交界处, 2011—2015 年由巷口镇向西北方向迁回至羊角镇南部。1991—2015 年灾害重心移动 7.6 km, 重心整体向东迁移, 其中 1996—2000 年、2001—2005 年、2006—2010 年和 2011—2015 年移动距离分别为 6.2 km、8.0 km、11.4 km 和 4.8 km, 共计移动 30.4 km, 平均每年移动 1.2 km。

1991—2015 年的标准差椭圆方向在 $77.7^{\circ} \sim 101.4^{\circ}$ 之间, 武隆滑坡的空间分布呈现出由西北—东南方向转向东北—西南方向的变化过程。标准差椭圆的长半轴整体呈先增后减的趋势, 2001—2005 年最长(27.3 km), 2006—2010 年最短(23.1 km); 标准差椭圆的短半轴整体呈增长趋势, 1991—1995 年最短(6.5 km), 2006—2010 年最长(13.4 km)。结合偏心率分析, 武隆滑坡空间分布的方向性呈减弱趋势, 武隆滑坡的空间分布由聚集走向分散。

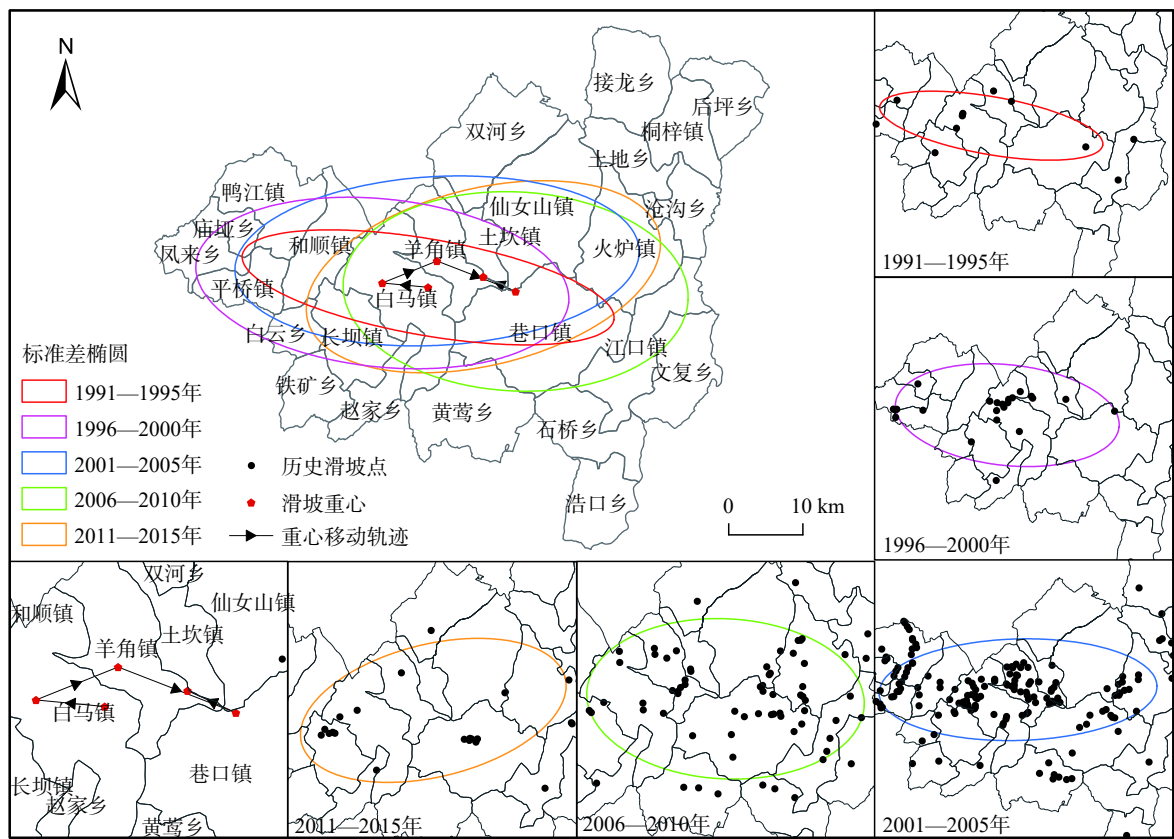


图 6 历史滑坡灾害重心及方向分布特征

Fig. 6 Historical landslide hazard center of gravity and directional distribution characteristics

表 3 1991—2015 年武隆滑坡标准差椭圆参数变化

Table 3 Variation of standard deviation ellipse parameters of Wulong landslide from 1991—2015

年份	1991—1995	1996—2000	2001—2005	2006—2010	2011—2015
重心坐标	107°35'E 29°21'N	107°32'E 29°22'N	107°37'E 29°23'N	107°43'E 29°21'N	107°41'E 29°22'N
移动方向	—	西北	东北	东南	西北
方向角度/(°)	101.4	97.5	88.3	94.4	77.7
长半轴/km	25.4	25.3	27.3	23.1	24.4
短半轴/km	6.5	11.3	11.4	13.4	11.9
偏心率	0.97	0.89	0.91	0.81	0.87

4 滑坡时空分布的驱动力分析

4.1 单因子影响分析

考虑到人口密度、GDP 等数据存在一定滞后性及其与灾害数据的匹配性, 仅选取 2001—2015 年的 287

个历史滑坡点为样本, 将其按 5 年为间隔划分为 3 个时间段, 利用地理探测器定量评价因子对滑坡分布的影响, 实现对武隆滑坡时空格局驱动力的演化分析, 分析结果见图 7。

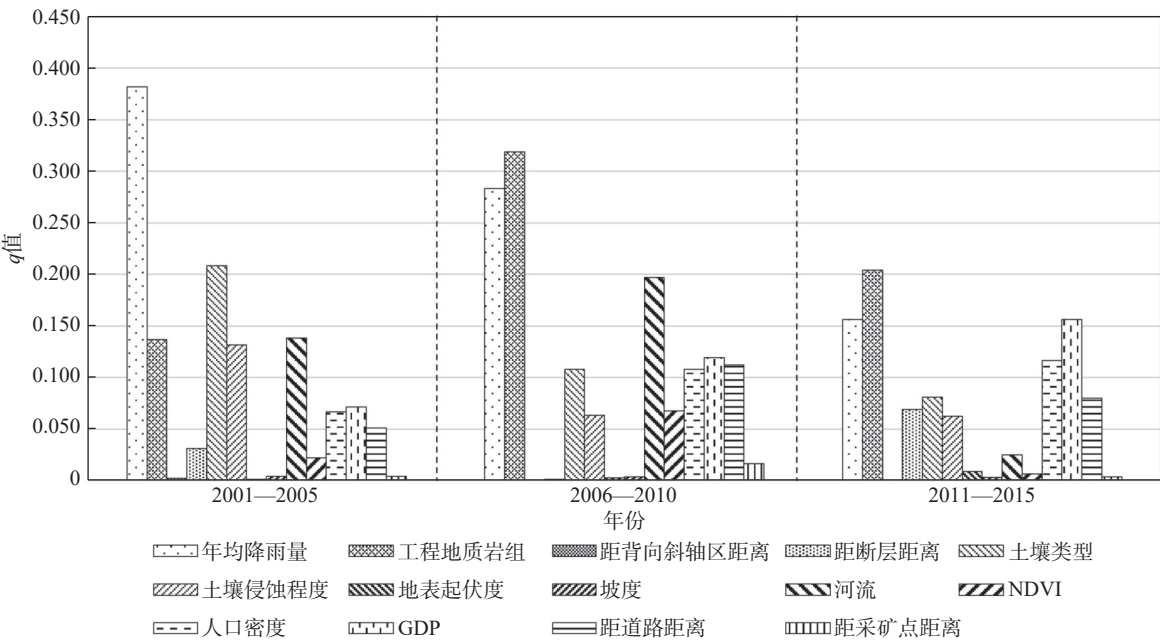


图 7 滑坡分布影响因子 q 值的变化过程

Fig. 7 The process of changing q value of landslide distribution influence factors

从 2001—2015 年来看, 各影响因子对滑坡空间分布的解释力均值最高的前 5 位依次为: 降雨(0.274)、工程地质岩组(0.220)、土壤类型(0.132)、河流(0.120)、GDP(0.116); 而背向斜轴区、断层、NDVI、采矿点、地表起伏度、坡度等因子的解释力均低于 0.05, 对滑坡空间分布的影响不显著。

从不同时间段来看, 2001—2005 年、2006—2010 年和 2011—2015 年解释力最高的因子分别为降雨(0.382)、工程地质岩组(0.319)、工程地质岩组(0.204)。相比于 2001—2010 年, 2011—2015 年降雨、地质条件因子和地形地貌因子对滑坡空间分布的解释力均有不

同程度降低, 其中降雨和河流的降幅最为明显, 而人类活动因子的解释力则逐渐增强。根据前文(图 3、图 6)不难看出, 滑坡高密度区往往也是人类活动密集区, 武隆区 2001—2015 年间各项社会经济指标均呈现不同幅

表 4 武隆区 2005—2015 年社会经济相关统计数据

Table 4 Relevant socio-economic statistics of Wulong from 2005 to 2015

年份	2005	2010	2015
GDP/亿元	29.88	72.42	131.40
人口数量/万人	40.10	41.27	41.43
公路里程/km	1 153	2 795	2 857

度增长(表 4), 表明随着经济的不断发展, 人类对地表环境的改造越来越强烈, 人类不合理的工程建设活动如切坡、填土、采矿和矿山弃渣不合理堆放以及由于经济发展和人口增长, 所带来的人均耕地面积的减少, 植被破坏、水土流失等问题, 使得人类活动对于滑坡空间分布的影响也越来越显著。

4.2 因子交互影响分析

根据地理探测器交互探测结果, 各时间段解释力

最高的前 10 位如表 5 所示, 各因子叠加后其解释力明显提高, 表明滑坡的空间分布是多因素共同作用的结果^[34]。2001—2015 年间, 主要以降雨和工程地质岩组与其它因子的交互作用最为显著, 其中 2001—2005 年降雨与土壤侵蚀的交互结果以及 2006—2010 年工程地质岩组与降雨和河流的交互解释力均超过 0.5, 表明其对研究区 50% 以上的滑坡空间分布具有解释力。

表 5 交互探测后的 q 值
Table 5 q-value after interaction detection

2001—2005		2006—2010		2011—2015	
降雨∩土壤侵蚀	0.505	工程地质岩组∩降雨	0.504	降雨∩工程地质岩组	0.449
降雨∩土壤类型	0.487	工程地质岩组∩河流	0.500	GDP∩工程地质岩组	0.390
降雨∩工程地质岩组	0.462	工程地质岩组∩道路	0.458	GDP∩降雨	0.318
降雨∩NDVI	0.451	工程地质岩组∩人口密度	0.422	人口密度∩工程地质岩组	0.317
降雨∩河流	0.445	工程地质岩组∩GDP	0.416	降雨∩土壤类型	0.310
降雨∩背向斜轴区	0.435	工程地质岩组∩土壤类型	0.402	GDP∩土壤类型	0.302
降雨∩人口密度	0.434	工程地质岩组∩土壤侵蚀	0.396	人口密度∩降雨	0.298
降雨∩GDP	0.431	降雨∩河流	0.392	GDP∩道路	0.293
降雨∩断层	0.403	降雨∩人口密度	0.388	工程地质岩组∩河流	0.288
降雨∩地表起伏度	0.401	工程地质岩组∩NDVI	0.385	降雨∩道路	0.272

该区岩土体均受水力侵蚀影响, 2001—2005 年有 29% 的滑坡分布于强度水力侵蚀区和剧烈水力侵蚀区, 50% 的滑坡分布于中度水力侵蚀区, 在土壤侵蚀作用下, 地表岩、土体等被剥蚀、破坏和搬运的过程加剧。随着降雨的入渗, 土体发生软化形成软滑面, 造成土体失稳进而引发滑坡。同时, 从工程地质岩组分布来看, 区内滑坡点多沿河谷呈带状分布, 河谷地带岩性组合以灰岩与泥、页岩岩组为主, 此类岩性组合往往存在软弱夹层, 因差异风化使斜坡成陡—缓—陡形式, 形成凹腔^[38], 在后缘加载与强降雨触发双重影响下极易发生滑坡, 因而滑坡灾害沿河流走向呈带状密集发育。

需要指出的是人类活动因子与其它因子的交互解释力在 2001—2015 年间比重逐步上升, 其中 2006—2010 年, 工程地质岩组与距道路距离的交互解释力高达 0.458, 同时, 2011—2015 年解释力较高的交互结果也多以人类活动因子为主, 且所有因子交互后的 q 值都超过原因子之和, 其解释力均呈非线性增长, 进一步论证了上述人类活动对于滑坡空间分布的影响越来越明显的观点。

5 讨论

尽管人们对影响滑坡发生的人为作用并不陌生, 但大多属于感性认识, 文中通过对武隆历史滑坡中人类活

动的影响过程进行量化, 有助于理解灾害系统中“人”的地位和作用, 有利于形成合理的人地协调观。基于文中的认识, 在武隆区未来的滑坡减灾防灾工作中, 应当重视人类活动的影响, 重点关注城镇建设、道路开挖等活动对自然坡体的扰动, 同时在这些人类活动密集的区域, 人员、建筑物等承灾体也相对集中, 因此, 灾害造成的损失往往都很大。这也提醒我们在滑坡灾害的风险评价, 尤其是危险性评价中, 需要着重考虑人类活动的相关指标。

同时文中在以下两个方面尚存在不足之处: (1) 本文降雨因子仅采用了年平均降雨数据, 且由于无法获取研究区地层产状数据, 仅以工程地质岩组、断层和背斜向斜轴区作为地质影响因子稍有欠缺, 同时人类活动因子的选取也有一定的局限性。(2) 仅以滑坡密度表征灾害强度, 同时以网格作为评价单元, 忽视了滑坡面的整体性和连续性, 滑坡与各因子间的内在空间关系和影响机制也未得到良好体现。文中仅对武隆区滑坡驱动因子的演变格局和人类活动影响进行了初步的探讨, 上述不足之处将在今后的研究中进一步完善。

6 结论

(1) 武隆 1991—2015 年的滑坡累计曲线在时间分布上呈现出“缓-陡-缓”的特征, 以 2008 年为界, 之前的

滑坡发生速率随降雨量的增加而增长,2008—2015 年,在降雨量保持稳定的情况下,滑坡发生速率明显减缓。

(2)在空间分布上,武隆历史滑坡呈现西、中、东 3 个聚集区域;滑坡分布的重心集中于中部的白马镇、羊角镇和东部的巷口镇等地;标准差椭圆分析表明:武隆滑坡的空间分布呈现出由西北—东南方向转向东北—西南方向的变化过程,同时表现出方向性减弱和离散化的趋势。

(3)针对上述滑坡的时空分布格局,利用地理探测器找寻了 2001—2005、2006—2010 和 2011—2015 三个时段滑坡分布的驱动因子,结果显示,降雨和“软-硬”互层结构岩组与其它因子的交互作用是影响武隆区滑坡分布的主要影响因素;同时降雨、地质因子和地形地貌等因子对滑坡空间分布的解释力均有不同程度降低,而人类活动因子的解释力不断增强,已逐渐成为影响滑坡分布的关键影响因素之一,是未来减灾防灾重点关注的对象。

参考文献 (References) :

- [1] 李松林,许强,汤明高,等.三峡库区滑坡空间发育规律及其关键影响因子[J].地球科学,2020,45(1):341-354. [LI Songlin, XU Qiang, TANG Minggao, et al. Study on spatial distribution and key influencing factors of landslides in Three Gorges Reservoir area [J]. Journal of Earth Science, 2020, 45(1): 341-354. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 殷跃平,胡瑞林.三峡库区巴东组(T_{2b})紫红色泥岩工程地质特征研究[J].工程地质学报,2004,12(2):124-135. [YIN Yueping, HU Ruilin. Engineering geological characteristics of purplish-red mudstone of middle tertiary formation at the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(2): 124-135. (in Chinese with English abstract)]
- [3] BAI S B, WANG J, LV G N, et al. GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping of the Zhongxian segment in the Three Gorges area, China [J]. Geomorphology, 2010, 115(1-2): 23-31.
- [4] 张帆,王孔伟,罗先启,等.长江三峡库区构造特征与滑坡分布关系[J].地质学报,2007,81(1):38-46. [ZHANG Fan, WANG Kongwei, LUO Xianqi, et al. Relationship between landslides and structural feature in Three Gorges Reservoir [J]. Acta Geological Sinica, 2007, 81(1): 38-46. (in Chinese with English abstract)]
- [5] DENG Q, FU M, REN X, et al. Precedent long-term gravitational deformation of large scale landslides in the Three Gorges Reservoir area, China [J]. Engineering Geology, 2017, 221: 170-183.
- [6] 黄润秋.20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J].岩石力学与工程学报,2007,26(3):433-454. [HUANG Runqiu. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in china since the 20th Century [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 433-454. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 李浩,乐琪浪,孙向东,等.巫溪县西溪河北岸高位高危碎屑流滑坡特征与机理研究[J].水文地质工程地质,2019,46(2):13-20. [LI Hao, LE Qilang, SUN Xiangdong, et al. A study of the characteristics and mechanism of high-risk debris flow landslide on the northern bank of the Xixi River in Wuxi County [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(2): 13-20. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 蒋玉冰,曾凯波,丁德民.人类活动对滑坡稳定性的影响研究——以武汉市某滑坡为例[J].资源环境与工程,2020,34(3):69-74. [JIANG Yubing, ZENG Kaibo, DING Demin. Effects of human activities on landslide stability: Taking a landslide in Wuhan as an example [J]. Resources Environment & Engineering, 2020, 34(3): 69-74. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 肖拥军,杨昌才,何惠军.三峡库区黄土坡滑坡体原岩结构特征及演化模式研究[J].水文地质工程地质,2012,39(5):121-125. [XIAO Yongjun, YANG Changcai, HE Huijun. Research on landslide's original rock structure characteristics and evolution model of the Huangtupo landslide in the Three Gorges Reservoir area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(5): 121-125. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 许强,黄润秋,殷跃平,等.2009年6·5重庆武隆鸡尾山崩滑灾害基本特征与成因机理初步研究[J].工程地质学报,2009,17(4):433-444. [XU Qiang, HUANG Runqiu, YIN Yueping, et al. The Jiweishan landslide of June 5, 2009 in Wulong, Chongqing: Characteristics and failure mechanism [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(4): 433-444. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 王家成.巴东高切坡碎石土抗剪强度参数试验研究及工程应用[D].宜昌:三峡大学,2011. [WANG Jiacheng. Experimental research on shear parameter of high cut slope gravel soil in Badong and its engineering application [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2011. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 李华,史文兵,朱要强,等.贵州省水城县“7·23”灾难性滑坡形成机制研究[J].自然灾害学报,2020,29(6):188-198. [LI Hua, SHI Wenbing, ZHU Yaoqiang, et al. Study on the formation mechanism of “7·23” catastrophic landslide in Shuicheng County, Guizhou Province, China [J]. Journal of Natural Disasters, 2020, 29(6): 188-198. (in Chinese with English abstract)]

- [13] FROUDE M J, PETLEY D N. Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016 [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2018, 18(8): 2161–2181.
- [14] LI G, LEI Y, YAO H, et al. The influence of land urbanization on landslides: An empirical estimation based on Chinese provincial panel data [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 595: 681–690.
- [15] 王新胜, 滕德贵, 谢伟, 等. 山地城市滑坡灾害空间分布特征及影响因素分析 [J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2020, 43(8): 87–96. [WANG Xinsheng, TENG Degui, XIE Wei, et al. Spatial distribution characteristics and influencing factors of landslide disasters in mountain cities [J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2020, 43(8): 87–96. (in Chinese with English abstract)]
- [16] LI Y, WANG X, MAO H. Influence of human activity on landslide susceptibility development in the Three Gorges area [J]. *Natural Hazards*, 2020, 104(3): 1–37.
- [17] CUI Y, CHENG D, CHOI C E, et al. The cost of rapid and haphazard urbanization: lessons learned from the Freetown landslide disaster [J]. *Landslides*, 2019, 16(2): 1167–1176.
- [18] 刘睿, 周李磊, 彭瑶, 等. 三峡库区重庆段人类活动时空分布及其类型演变特征 [J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2016, 33(4): 47–56. [LIU Rui, ZHOU Lilei, PENG Yao, et al. Spatio-temporal variations and type evolution of human activity in Three Gorges Reservoir area of Chongqing [J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2016, 33(4): 47–56. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 陆关祥, 李林. 重庆市滑坡、崩塌的发育规律及区域危险性程度区划 [J]. *地质科学*, 2001, 36(3): 335–341. [LU Guanxiang, LI Lin. Developing regularity of landslide, collapse and classification of danger degree of regional geological disaster in Chongqing area [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2001, 36(3): 335–341. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 刘云, 康卉君. 江西崩塌滑坡泥石流灾害空间时间分布特征分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(4): 107–112. [LIU Yun, KANG Huijun. Spatial-temporal distribution of landslide, rockfall and debris flow hazards in Jiangxi Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(4): 107–112. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 吴孝情, 赖成光, 陈晓宏, 等. 基于随机森林权重的滑坡危险性评价: 以东江流域为例 [J]. 自然灾害学报, 2017, 26(5): 119–129. [WU Xiaoping, LAI Chengguang, CHEN Xiaohong, et al. A landslide hazard assessment based on random forest weight: A case study in the Dongjiang River Basin [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2017, 26(5): 119–129. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 黄达, 匡希彬, 罗世林. 三峡库区藕塘滑坡变形特点及复活机制研究 [J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(5): 127–135. [HUANG Da, KUANG Xibin, LUO Shilin. A study of the deformation characteristics and reactivation mechanism of the Outang landslide near the Three Gorges Reservoir of China [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(5): 127–135. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 邓清禄, 柯于义, 郭锋. 长江三峡非正常含炭粘土沉积及其地质灾害意义 [J]. 地球科学, 2008, 33(3): 405–410. [DENG Qinglu, KE Yuyi, GUO Feng. Abnormal carbonic clay and its significance in relation to geological hazards in the Three Gorges Reservoir area, Yangtze River [J]. *Journal of Earth Science*, 2008, 33(3): 405–410. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 杨乐, 卢瑞娜, 李德万, 等. 遥感解译在奉节新城滑坡调查中的应用 [J]. 资源环境与工程, 2012, 26(6): 623–626. [YANG Le, LU Ruina, LI Dewan, et al. Application of remote sensing interpretation in landslide investigation of new town of Fengjie [J]. *Resources Environment & Engineering*, 2012, 26(6): 623–626. (in Chinese with English abstract)]
- [25] LIN Q, YING W. Spatial and temporal analysis of a fatal landslide inventory in China from 1950 to 2016 [J]. *Landslides*, 2018, 15(3): 1–16.
- [26] 吴树仁, 张永双, 石菊松, 等. 三峡库区重庆市丰都县滑坡灾害危险性评价 [J]. *地质通报*, 2007, 26(5): 574–582. [WU Shuren, ZHANG Yongshuang, SHI Jusong, et al. Assessments of landslide hazards in Fengdu County, Chongqing City, Three Gorges reservoir region of the Yangtze River, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(5): 574–582. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 彭丽娟, 吴益平, 王飞, 等. 湖北恩施地区滑坡灾害生成规律 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017, 28(2): 1–9. [PENG Lijuan, WU Yiping, WANG Fei, et al. Development regularity of landslides in Enshi area [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2017, 28(2): 1–9. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 丁明涛, 庙成. 基于GIS的芦山地震灾区滑坡灾害风险评价 [J]. 自然灾害学报, 2014, 23(4): 81–90. [DING Mingtao, MIAO Cheng. GIS-based risk assessment of landslide hazards in Lushan earthquake-stricken areas [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2014, 23(4): 81–90. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 樊杰, 陶岸君, 吕晨. 中国经济与人口重心的耦合态势及其对区域发展的影响 [J]. *地理科学进展*, 2010, 29(1): 87–95. [FAN Jie, TAO Anjun, LYU Chen. The coupling mechanism of the centroids of economic gravity and population gravity and its effect on the regional gap in China [J]. *Progress in Geography*, 2010, 29(1): 87–95. (in Chinese with English abstract)]

- abstract)]
- [30] 熊俊楠, 李进, 程维明, 等. 西南地区山洪灾害时空分布特征及其影响因素 [J]. *地理学报*, 2019, 74(7): 1374 – 1391. [XIONG Junnan, LI Jin, CHENG Weiming, et al. Spatial-temporal distribution and the influencing factors of mountain flood disaster in southwest China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(7): 1374 – 1391. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望 [J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116 – 134. [WANG Jingfeng, XU Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116 – 134. (in Chinese with English abstract)]
- [32] ZHANG X, NIE J, CHENG C, et al. Natural and socioeconomic factors and their interactive effects on house collapse caused by Typhoon Mangkhut [J]. *International Journal of Disaster Risk Science*, 2021, 12(1): 121 – 130.
- [33] LIU Y, YUAN X, LIANG G, et al. Driving force analysis of the temporal and spatial distribution of flash floods in Sichuan Province [J]. *Sustainability*, 2017, 9(9): 1527.
- [34] 支泽民, 陈琼, 张强, 等. 地理探测器在判别滑坡稳定性影响因素中的应用——以西藏江达县为例 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(2): 19 – 26. [ZHI Zemin, CHEN Qiong, ZHANG Qiang, et al. Application of geographic detector in identifying influencing factors of landslide stability: A case study of the Jiangda County, Tibet [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(2): 19 – 26. (in Chinese with English abstract)]
- [35] 胡凯衡, 魏丽, 刘双, 等. 横断山区泥石流空间格局和激发雨量分异性研究 [J]. *地理学报*, 2019, 74(11): 2303 – 2313. [HU Kaiheng, WEI Li, LIU Shuang, et al. Spatial pattern of debris-flow catchments and the rainfall amount of triggering debris flows in the Hengduan Mountains region [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(11): 2303 – 2313. (in Chinese with English abstract)]
- [36] 王正雄, 蒋勇军, 张远瞩, 等. 基于 GIS 与地理探测器的岩溶槽谷石漠化空间分布及驱动因素分析 [J]. *地理学报*, 2019, 74(5): 191 – 205. [WANG Zhengxiong, JIANG Yongjun, ZHANG Yuanzhu, et al. Spatial distribution and driving factors of karst rocky desertification based on GIS and geodetectors [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(5): 191 – 205. (in Chinese with English abstract)]
- [37] 刘传正, 李铁锋, 温铭生, 等. 三峡库区地质灾害空间评价预警研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2004, 31(4): 9 – 19. [LIU Chuanzheng, LI Tiefeng, WEN Mingsheng, et al. Assessment and early warning on geo-hazards in the Three Gorges Reservoir region of Changjiang River [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2004, 31(4): 9 – 19. (in Chinese with English abstract)]
- [38] 董金玉, 杨继红, 伍法权, 等. 三峡库区软硬互层近水平地层高切坡崩塌研究 [J]. *岩土力学*, 2010, 31(1): 151 – 157. [DONG Jinyu, YANG Jihong, WU Faquan, et al. Research on collapse of high cutting slope with horizontal soft-hard alternant strata in Three Gorges reservoir area [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(1): 151 – 157. (in Chinese with English abstract)]