

基于 GIS 的湖南省滑坡灾害风险和损失评估

申怀飞, 杨清洁, 魏亿鑫, 闫旭倩, 闵家森, 吴宇琛

(许昌学院 城市与环境学院, 河南 许昌 461000)

摘要: [目的] 评估湖南省滑坡发生的风险和损失等级, 丰富湖南省滑坡防治理论及方法, 为该地减少滑坡灾害提供科学依据。[方法] 基于 GIS 技术和层次分析法(AHP)以 DEM、遥感、气象、岩性、地震点等数据为支撑, 分别从危险性评价和易损性评价两方面对湖南省滑坡风险进行评估。[结果] ①湖南省滑坡风险等级大多处于中低风险等级, 少部分为较高风险或高风险等级, 中度风险等级最多, 占全省面积的 31.31%, 其余依次为较低、较高、低和高风险等级, 其比例分别是 24.92%, 22.09%, 13.88% 和 7.79%; ②从空间格局来看, 风险性等级整体呈现出中部、东南高, 西南、东北低的空间分布特征; ③湖南省滑坡损失等级整体呈现出东高西低, 局部不均匀的分布特征。[结论] 湖南省滑坡灾害的管理主要应从预防和整治两方面进行, 依据各地区常见滑坡类型, 制定有针对性的区域差异化防治预案。

关键词: 滑坡; GIS 空间分析; 风险评估; AHP 分析法

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)06-0146-07

中图分类号: P954

文献参数: 申怀飞, 杨清洁, 魏亿鑫, 等. 基于 GIS 的湖南省滑坡灾害风险和损失评估[J]. 水土保持通报, 2020, 40(6): 146-152. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2020.06.021; Shen Huaifei, Yang Qingjie, Wei Yixin, et al. A study on risk and vulnerability assessment of landslide in Hunan Province based on GIS [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(6): 146-152.

A Study on Risk and Vulnerability Assessment of Landslide in Hunan Province Based on GIS

Shen Huaifei, Yang Qingjie, Wei Yixin, Yan Xuqian, Min Jiasen, Wu Yuchen

(School of Urban and Environmental Sciences, Xuchang University, Xuchang, He'nan 461000, China)

Abstract: [Objective] The risk and loss of landslides in Hunan Province was evaluated to enrich the theories and methods of landslide prevention in Hunan Province in order to provide a scientific basis for reducing landslide disasters in this area. [Methods] Based on GIS technology and analytic hierarchy process (AHP), with the support of DEM, remote sensing, meteorology, lithology, seismic points and other data, the risk assessment of landslides in Hunan Province was evaluated from two aspects: risk assessment and vulnerability assessment. [Results] ① Most of the landslide risk grades in Hunan Province are in the middle and low risk grades, and a few of them are at high risk level. The medium risk level is the most, accounting for 31.31% of the whole province. The rest are low, moderate, relative high, and high risk levels, accounting for 24.92%, 22.09%, 13.88% and 7.79%, respectively. ② From the perspective of spatial pattern, the characters of the overall risk grade distribution are low in the northeast and southwest, while high in the southeast and middle. ③ The loss level of Hunan Province is generally low in west and high in east, with middle in moderate and uneven distribution locally. [Conclusion] The landslide disaster in Hunan Province should be managed from two aspects of prevention and control, according to the common types of landslide in prefecture-level cities in Hunan Province, targeted regional different prevention and control plan should be formulated.

Keywords: landslide; GIS spatial analysis; risk assessment; analytic hierarchy process

根据 2016 年的《中国地质调查百项成果》显示, 地质灾害造成的人员伤亡和财产损失占据年平均因

灾损失的 30% 以上, 滑坡灾害占地质灾害总量的 1/2 以上, 对人们的生命以及财产安全造成巨大威胁^[1]。

收稿日期: 2020-08-14

修回日期: 2020-09-13

资助项目: 河南省教育厅人文社会科学研究项目(2020-ZZJH-426); 河南省高等学校重点科研项目(21A170019); 许昌学院优秀青年骨干教师项目; 许昌学院重点科研项目(2020ZD004)

第一作者: 申怀飞(1979—), 男(汉族), 河南省淅川县人, 博士, 副教授, 主要从事资源环境遥感及 3S 综合应用研究。Email: hfshen329@163.com。

地形地貌、地质构造、降雨和人类活动是导致滑坡的主要因素^[2],其中,降雨为最活跃多变的自然诱发因素,其诱发的滑坡占滑坡总数的 90%^[3]。随着生态与环境信息逐渐为决策者重视,滑坡危险性评价引起了诸多学者的关注,并取得重要进展。如 1999 年, Pilgrim^[4]指出了滑坡灾害风险评价对于滑坡防治决策的重要性;唐川^[5]提出滑坡灾害评价是全面反映灾情、优化防御措施、进行减灾决策的重要依据;汪敏等^[6]研究了滑坡灾害易损性和破坏损失评价方法,分析了滑坡灾害破坏效应以及受灾体的价值。目前国内学者大都采用层次分析法、人工神经网络模型等方法进行滑坡灾害的评估。如 Lamek Nahayo 等^[7]通过 GIS 技术和 AHP 决策方法对卢旺达滑坡的脆弱性进行评估,并利用 R-index 方法进行验证,加深了对滑坡脆弱性的认识;Guzzetti 等^[8]基于统计的分类模型,选择绘图单元得到意大利中部翁布里亚的滑坡敏感性图,并对其进行了分级和验证。在滑坡因素研究方面,学者采用多学科的知识相互交叉融合对地区滑坡因素进行分析,并逐步由定性研究转变为定量研究。自 1965 年 Garrison 提出“地理信息系统”概念以来,国内外学者已将 GIS 技术广泛应用到地质灾害研究中,Norsuzila Yaa'cob 认为随着遥感(RS)和地理信息系统(GIS)的发展,空间信息处理技术已被广泛应用到滑坡灾害易发性评价中^[9]。龚健雅等^[10]将空间信息处理软件和统计分析工具的相结合,大大提高了数据的获取、处理与分析的效率,也促进了更多评价模型和方法的应用。向喜琼^[11]指出了区域滑坡地质灾害发育规律和成因机制的重要性,建议风险评价时应将评价指标分为内在因素、外在因素、敏感因子和先决性因子;朱良峰等^[12]利用 GIS 技术、信息量模型和专家打分模型得到了中国滑坡危险性和社会经济易损性评价结果;唐绪波等^[13]通过构建信息量模型并结合 ArcGIS 软件得到了神农架林区的危险性、易损性和滑坡风险性结果,为神农架林区的防灾减灾工作提供了一些依据。马慧^[14]根据地质灾害形成的条件,总结了湖南省怀化市地质灾害的发育特征,圈定怀化市地质灾害的高、中、低易发区,并为该地区各种地质灾害提出了不同的防治建议。综上所述,目前的研究主要集中于小区域单体滑坡,不能从整体上把握某个地区的滑坡特征;对滑坡的形成机理研究较少;大多数学者采用定性或定量评价的方法,但带有一定的主观性。鉴于此,本文综合考虑了地形、植被、人口、降水等因素,基于层次分析法,并结合 GIS 空间技术对研究区滑坡发生的风险和损失等级进行了评估,以期丰富滑坡防治理论及方法,提

高人们对滑坡灾害的防护意识,减少滑坡灾害造成的经济及社会损失。

1 研究区概况

湖南省位于中国中南部、长江中游地区,界于 108°47'—114°15'E,24°38'—30°08'N,东西宽 667 km,南北长 774 km,总面积约 2.11×10^5 km²。位于江汉平原向南岭山地和江南丘陵向云贵高原的过渡地带,地貌地形复杂多样,山地集中分布在东、南、西三面,以沉积岩地貌为主。属大陆性亚热带季风湿润气候,年平均降水量约 1 200~1 700 mm,降雨集中且区域差异明显。滑坡灾害的形成受到很多因素的影响,海拔高程、地层岩性和距断层的距离都是影响滑坡的重要因素^[15]。在时间上,滑坡活动与暴雨、大暴雨及特大暴雨的频次相吻合^[16]。据湖南省人民政府统计,2018 年湖南省地质灾害发育隐患点较多,多分布于湖南省的西北部、中部以及南部地区,东北部相对较少,共计 220 处,其中滑坡 150 处、地面塌陷 39 处、泥石流 34 处、崩塌 5 处、不稳定斜坡 4 处,灾害类型以滑坡为主。

2 研究数据和方法

2.1 数据来源及预处理

本文数据主要包括 DEM、归一化植被指数(NDVI)、降水、地震、岩性及其他矢量数据等多个数据集。其中,DEM 数据来自地理空间数据云,空间分辨率 30 m;土地利用数据来自全国地理信息资源目录服务系统的“30 m 地表覆盖数据”,包括耕地、草地、水体、人造地表、裸地等数据类型;降水数据来自中国气象数据网的中国地面累年值/日值数据(1981—2010 年累年 20:00—20:00 日降水量);土壤数据来自于国家地球系统科学数据中心,包括粗砂土、粉土、砂壤土、壤土、粉黏土、壤黏土、黏土等类型;其他矢量数据来自全国地理信息资源目录服务系统的“1:25 万全国基础地理数据库”,数据相对完整,质量良好。

本文对数据的预处理主要利用 ArcGIS 10.5 和 ENVI 5.3 软件平台,包括遥感影像辐射定标、大气校正、几何配准、镶嵌、裁剪;并计算得到坡度、地形起伏度、NDVI、降雨量插值图、地震点核密度、人口密度、距河流距离等多个数据集。

2.2 评价指标体系

滑坡危险性评价不仅分析已发生滑坡,更要对未来可能性滑坡进行评估,旨在采取措施进行预防。开展区域滑坡敏感性研究,首先要确定影响滑坡灾害

发生的关键因子^[17]。本文在收集整理研究区多年滑坡灾害的基础上,选取影响滑坡的多个自然和社会经济因素,例如:降水、岩性、土壤、植被覆盖、人口密度等,通过层次分析模型完成湖南省滑坡风险和损失评价。(1) 风险性评估因子。考虑研究区自然和社会条件,本文综合选取了对滑坡影响的多种因素(图 1,附图 3),结合自然间断点法和实际情况将各因子重分为 5

类,经 ArcGIS 加权运算,最终得到湖南省低风险、较低风险、中度风险、较高风险、高风险 5 个风险等级,并将评价结果导出为专题图。(2) 损失等级评估因子。滑坡灾害损失评估是一门涉及多学科、多领域的研究课题,是灾害防治工作中的重要环节,决定了防灾的具体措施和投入资金的数额。本文选取了人口密度、公路线密度作为损失评估的社会经济因素(图 2)。

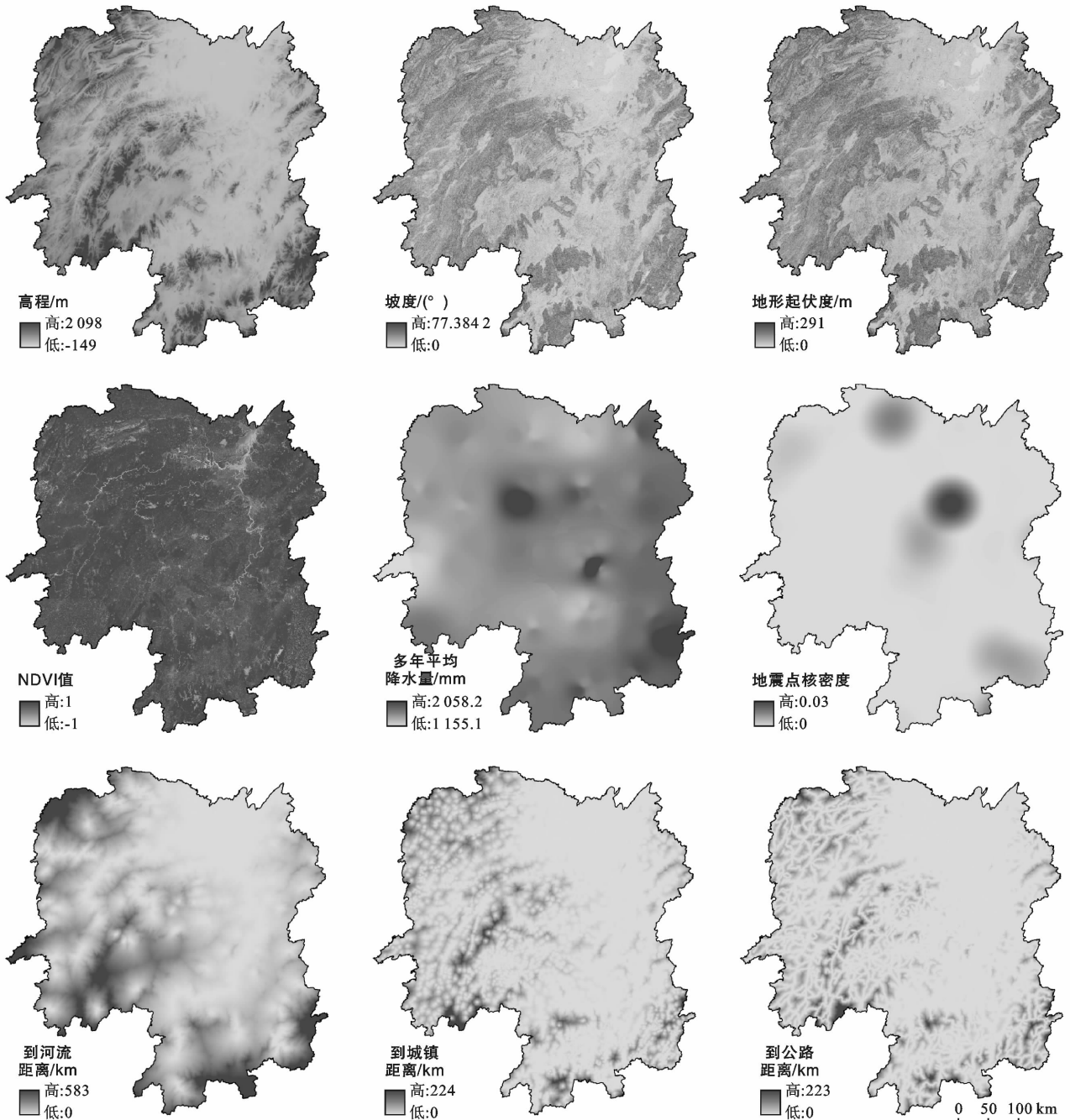


图 1 湖南省滑坡风险评估部分因子

2.3 层次分析法

层次分析法(AHP)是指将某一决策问题按目标层、准则层和方案层 3 个层次进行分析,是研究中常

用的一种定性和定量分析的权重决策方法。本文依次将风险评估体系划分为“目标层:A;准则层B;次指标层C;指标层D”4级评价指标。其中包括2个2级

指标,5 个 3 级指标,12 个 4 级指标。通过建立判断矩阵,找到某一层指标的元素相对于其上一层元素的影响程度,判断两元素之间的重要程度;为判断矩阵

计算出的权重是否有效,进行一致性检验,通过计算得到各层次各指标权重从大到小排序,结果详见表 1。

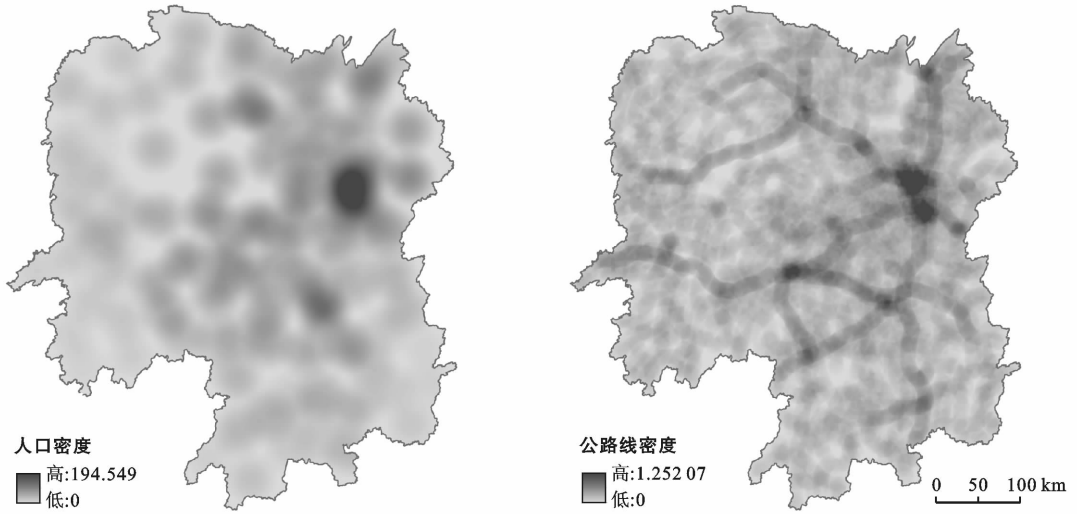


图 2 湖南省损失性风险评估因子

表 1 湖南省滑坡风险评估体系

评价 体系	评价 指标	I 极低 (1 分)	II 低 (2 分)	III 中等 (3 分)	IV 高 (4 分)	V 极高 (5 分)	权重	排序
危险 体系	D_1	$<300, >2\ 000$	300~500	500~1\ 000	1\ 000~1\ 500	1\ 500~2\ 000	0.090	8
	D_2	$<8, >50$	8~15	15~25	25~30	30~50	0.103	5
	D_3	0~50	50~100	100~180	180~250	>250	0.091	7
	D_4	>0.7	0.5~0.7	0.4~0.5	0.3~0.4	<0.3	0.102	6
	D_5	$<1\ 160$	1\ 160~1\ 180	1\ 180~1\ 200	1\ 200~1\ 250	$>1\ 250$	0.106	4
	D_6	>500	300~500	100~300	50~100	<50	0.074	9
	D_7	<0.001	0.001~0.005	0.005~0.01	0.01~0.02	>0.02	0.109	2
	D_8	花岗岩	砾岩	白云岩	砂岩	泥灰岩	0.121	1
	D_9	粗砂土	粉土	砂壤土、壤土、粉黏土	壤黏土	黏土	0.107	3
	D_{10}	>200	150~200	100~1\ 500	50~100	<50	0.054	10
	D_{11}	>200	150~200	100~150	50~100	<50	0.043	11
损失 体系	D_{12}	<20	20~40	40~80	80~160	>160	0.75	1
	D_{13}	<0.1	0.1~0.3	0.3~0.6	0.6~1.0	>1.0	0.25	2

注: C_1 地理环境因素, C_2 地质构造因素, C_3 人类活动因素, C_4 社会损失, C_5 经济损失; D_1 DEM/m, D_2 坡度/ $^\circ$, D_3 地形起伏度/m, D_4 NDVI, D_5 多年平均降雨量/mm, D_6 到河流的距离/km, D_7 地震点密度/(个 \cdot km $^{-2}$), D_8 岩性, D_9 土壤, D_{10} 到城镇距离/km, D_{11} 到公路距离/km, D_{12} 人口密度/(人 \cdot km $^{-2}$), D_{13} 公路线密度/(km \cdot km $^{-2}$)。

3 结果与分析

3.1 风险评估结果及验证

为验证研究区滑坡结果的正确性,本文利用 2018 年湖南省实际发生的 150 处滑坡点与滑坡风险等级图叠加,得到每个等级中滑坡的数量,即检验结果(附图 4,表 2)。检验结果表明,75%以上的验证滑坡点分布在高风险、较高风险及中等风险区,其中,53.33%的滑坡验证点分布在高风险、较高风险区,表明评价结果与滑坡实际发生情况基本吻合。

表 2 湖南省滑坡风险性等级分区检验表

风险等级 分区	面积/ km 2	面积 比例/%	滑坡点 个数	滑坡点 比例/%
高风险区	16 455.52	7.79	41	27.33
较高风险区	46 686.51	22.09	39	26.00
中等风险区	66 164.98	31.31	33	22.00
较低风险区	52 667.57	24.92	24	16.00
低风险区	29 340.13	13.88	13	8.67

3.2 风险等级空间特征

湖南省滑坡风险等级大多处于中低风险等级,少

部分为较高风险或高风险等级。统计表明,以中度风险等级最多,占全省面积的 31.31%,共 66 164.98 km²,其次为较低风险、较高风险、低风险、高风险,占比依次为 24.92%,22.09%,13.88%和 7.79%,各等级面积依次为 52 667.57,46 686.51,29 340.13,16 455.52 km²(表 2)。

滑坡往往以该地区自身条件为基础、诱发因素为主导而产生,其中降雨是普遍诱发因素,与气象变化的时间分布极为一致,由近 5 a 湖南省滑坡灾害统计资料可知,全省 90%以上的自然滑坡发生于夏季暴雨期(4—8 月);地理上主要集中分布在湖南省中部、东南及北部地区。从空间分布格局来看,湖南省滑坡风险等级总体上呈现出中部、东南高,西南、东北低的特征(附图 5)。全省滑坡灾害高风险和较高风险的区域分布在中部的益阳市和西南部的郴州市。结合危险性指标的空间分异,以益阳市、郴州市的东部和长沙市的东部为例,可以得到这些地区大多具备降水量大、地形复杂多山谷、坡地等特征。丘陵—低山区为高发区,即多分布在高程 200~800 m 的区域一带。滑坡的发育大致分为 3 个阶段,大中型滑坡发育的阶段最为明显,其经过长时间的蠕动变形,能够形成大中型滑坡的孕灾环境,经过自然和人为因素的多次作用产生滑动,然后恢复稳定;而小型滑坡一般经过多种因素多次作用即可完成蠕动—滑动—恢复稳定

过程。人为活动引发的滑坡,通常是由于人类的社会工程降低了边坡原有的稳定性,经过暴雨的叠加作用引发滑坡,从而使得公路两侧最为突出^[18]。由各市风险级别统计图(图 3)可知,低风险、较低风险、中度风险、较高风险、高风险 5 类风险等级在 14 个地州市分布中存在差异,益阳市高风险等级面积 2 315.37 km²,占全市面积的 18.79%;较高风险为 3 259.43 km²,占全市面积的 26.45%;中等风险为 2 795.16 km²,占全市面积的 22.68%;较低风险等级面积 1 699.28 km²,占比为 13.79%;低风险面积为 2 254.42 km²,占比为 18.29%;且益阳市为 14 个地州市中高风险等级占比最大的地级市,说明了该市滑坡风险最高。邵阳市低风险等级面积为 5 205.41 km²,占全市面积的 25.04%;较低风险等级面积为 6 454.59 km²,占比为 31.05%;中等等级风险面积为 5 317.56 km²,占全市面积的 25.58%;较高风险等级面积为 3 169.88 km²,占全市面积的 15.25%;高风险等级面积为 637.58 km²,占全市面积的 3.07%,对比分析其他各市 5 类风险等级占比情况,可看出邵阳市是滑坡风险最低的地级市。湖南省滑坡风险系数分布格局总体可以概括为“三四四三”,即风险系数最高的市包括益阳、郴州、长沙;其次为湘潭、娄底、株洲和张家界,怀化、常德、永州和岳阳风险等级为一般;衡阳、邵阳和湘西风险等级最低(附图 5)。

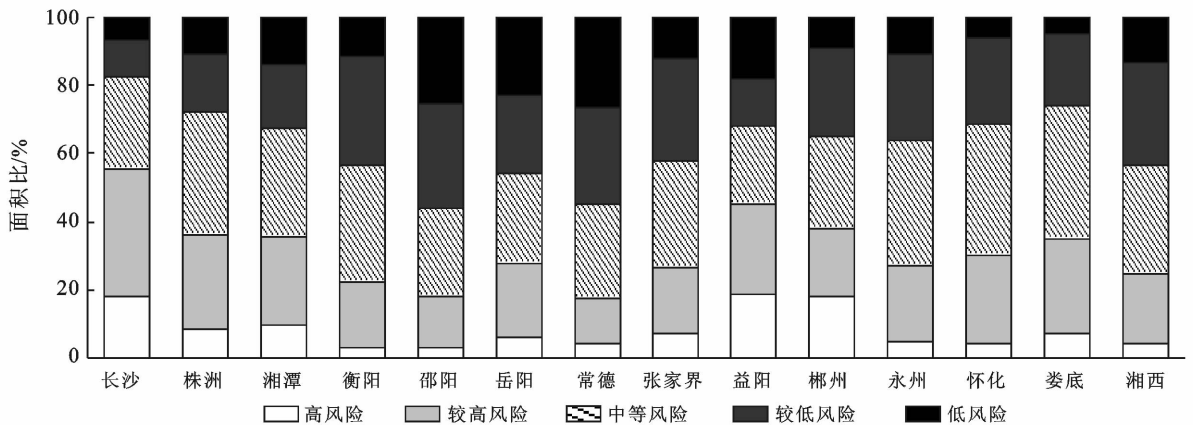


图 3 湖南省各市风险级别统计

3.3 滑坡损失评估

由附图 5 可知,滑坡灾害损失等级整体呈现出东高西低,局部不均匀的分布特征。全省灾害损失等级高的区域分布在东部的长沙市、衡阳市;低风险区以环湖南省外围地级市居多,主要集中在永州市东部、怀化市西南、张家界市等地区;中度损失区域集中在高损失等级周围,主要包括娄底市、湘潭市西南部、邵

阳市东部和东北部。鉴于损失等级分布图依据人口密度和公路线密度计算得到,由此可推测出经济发展水平高、人口较多的地区,相应的损失等级也越高。例如:省会长沙市、衡阳市及湘潭市东北部;而经济发展水平较低的张家界市、怀化市西南部、郴州市东南部损失等级水平则较低,通过对比分析当地自然环境因子数据,确定该地区主要地理特征为:海拔高、

坡度大,地形起伏度也相对于其他州市大。另外,郴州市处于地震带边缘,发生地震较其他地区频繁,导致该地区人口密度较低,基础设施较为落后,因此由滑坡造成的经济社会损失也相对较低。

3.4 湖南省滑坡防控建议

通过对湖南省滑坡灾害的风险与损失评估,结合2015—2019年滑坡灾害实况(表3),针对湖南省3种主要滑坡类型(降雨、地形条件和人为爆破诱发)提出以下防控建议。湖南省滑坡灾害中的高风险区、较高风险区分布的益阳市、娄底市、湘潭市、益阳市、岳阳市、长沙市属降雨型滑坡,其占比高达95%以上,降雨是该区域诱发滑坡的主导因素,且滑坡多伴有水土流失灾害^[19]。因此,这些区域在滑坡灾害防控时,要兴修水利、合理建立排水沟;加大孔隙水压力,降低地下水位,提高斜坡的稳定性;同时还可植树造林提高

植被覆盖度,降低雨水的下渗^[20]。坡面是拦蓄利用降雨径流的主要区域,具有承上启下的作用,也是水土流失产生的主要区域^[21]。湖南省张家界市、常德市、永州市等的交界地带滑坡风险较高,对比评价指标发现坡度、地形起伏度对其影响较大,滑坡发育明显受其分布控制,归属于斜坡型滑坡。研究表明,滑坡监测水平高,群防群测组织好,有利于提前做好防灾减灾准备,如削坡减载、坡脚加固^[22]。湖南省湘西土家族苗族自治州、张家界市两地区近5a由于山体开挖、景区修整等人为因素造成了山体滑坡,因此判定两地人为爆破是诱发滑坡的主要原因。针对此类滑坡灾害要形成以“政府为主导,落实到个人”的防控理念,完善民间资本参与投资水土保持项目机制,抓好重点区域治理,明确山体开挖规格,进一步提高水土保持监测基础能力;在高发区实施人口迁移政策,减少人员的伤亡^[23]。

表3 近5a湖南省部分地级市常见滑坡类型

滑坡类型	降水型	斜坡型	人为爆破诱发
区域(市)	衡阳市、娄底市、湘潭市、益阳市、岳阳市、长沙市	张家界市、常德市、湘西土家族苗族自治州、怀化市、永州市	湘西土家族苗族自治州、张家界市
合计/次	34	5	2

4 讨论与结论

(1) 湖南省滑坡风险等级大多处于中低风险等级,以中度风险等级最多,占全省面积的31.31%,少部分为较高风险或高风险等级分布。从空间格局来看,湖南省滑坡风险系数分布总体可以概括为“三四四三”,即风险系数最高的市包括益阳、郴州、长沙;其次为湘潭、娄底、株洲和张家界,怀化、常德、永州和岳阳风险等级为一般;衡阳、邵阳和湘西风险等级最低。呈现出东北、西南低,东南、中部高的分布特征。

(2) 损失等级整体呈现出东高西低,局部分布不均匀的特征,其中损失等级高的区域主要包括长沙市、衡阳市及湘潭市东北部。

(3) 滑坡防治主要包括预防和治理,即加强滑坡监测预警机制和开展救援工作,依据各地区常见滑坡类型,有针对性地保护滑坡易发区,减少滑坡灾害发生的可能性。

由于数据缺失,滑坡风险性评估未能考虑到当地政府实施救灾的能力和水平。运用层次分析法对湖南省各地区的滑坡灾害进行风险评估,得出的结果比较符合实际,可信度较高;但主观性较强,具有一定的局限性。后续研究可采用耦合的方式,从滑坡的预测监测、形成机制、评估方法和防治措施等方面进行,对

不同的滑坡区域选择不同评价指标,并在此基础上制定评价标准,是滑坡风险评估发展的重要方向。

[参 考 文 献]

- [1] 《中国地质调查百项成果》出版[J]. 地质装备,2017,18(1):9-10.
- [2] Dai F, Lee C. Frequency-volume relation and prediction of rainfall-induced landslides [J]. Engineering Geology, 2001,59(3):253-266.
- [3] 李媛,孟晖,董颖,等. 中国地质灾害类型及其特征:基于全国县市地质灾害调查成果分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2004,15(2):29-34.
- [4] Pilgrim N K. Landslides, risk and decision-making in Kinnaur District: Bridging the gap between science and public opinion [J]. Disasters, 1999,23(1):45-65.
- [5] 唐川, JorgGrunert. 滑坡灾害评价原理和方法研究[J]. 地理学报,1998(S1):3-5.
- [6] 汪敏,刘东燕. 滑坡灾害风险分析中的易损性及破坏损失评价研究[J]. 工程勘察,2001(3):7-11.
- [7] Nahayo L. Estimating landslides vulnerability in Rwanda using analytic hierarchy process and geographic information system [J]. Integrated Environmental Assessment and Management, 2019,15(3):364-373.
- [8] Mirco Galli, Fausto Guzzetti. Landslide vulnerability criteria: A case study from Umbria, Central Italy [J].

- Environmental Management, 2007, 40(4):649-665.
- [9] Norsuzila Yaa'cob, Zarith Nur Atikah, Noraisyah Tajudin, et al. Landslide possibilities using remote sensing and geographical information system (GIS) [J]. IOP Conference, 2020, 540(1):012084.
- [10] 龚健雅. 空间信息资源共享与互操作技术[J]. 国土资源信息化, 2003(5):15-21, 32.
- [11] 向喜琼. 区域滑坡地质灾害危险性评价与风险管理[D]. 四川 成都:成都理工大学, 2005.
- [12] 朱良峰, 吴信才, 殷坤龙, 等. 基于 GIS 的中国滑坡灾害风险分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(S2):221-224.
- [13] 唐绪波. 基于信息量模型的神农架林区滑坡风险评价[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(4):115-119, 169.
- [14] 马慧. 湖南省怀化市地质灾害区划与防治规划研究[D]. 湖南 长沙:中南大学, 2009.
- [15] 任赞松, 李为乐, 王立娟. 攀枝花大河流域仁和街幅地质灾害遥感调查与分布规律分析[J]. 地质灾害与环境
- 保护, 2017, 28(1):12-19.
- [16] 高华喜, 殷坤龙. 降雨与滑坡灾害相关性分析及预警预报阈值之探讨[J]. 岩土力学, 2007, 28(5):1055-1060.
- [17] 李明波, 陈平, 陈植华, 等. 湖南雪峰山地区降雨型滑坡灾害敏感性区划[J]. 地质与资源, 2019, 28(1):78-84.
- [18] 杨顺泉, 李佐海. 湖南省地质灾害分布特征及防治对策[J]. 湖南地质, 1999(Z1):3-5.
- [19] 李敏. 论湖南省“四水”流域水土流失现状与治理对策[J]. 水土保持应用技术, 2001(2):43-45.
- [20] 吕楚江. 论地质勘察中如何防治滑坡问题[J]. 西部资源, 2019(4):117-118.
- [21] 岳自慧, 刘平, 杜辉, 等. 隆德县渝河流域水土保持生态环境治理模式探讨[J]. 世界生态学, 2020, 9(1):32-36.
- [22] 金江军, 潘懋, 李铁锋. 区域滑坡灾害风险评价方法研究[J]. 山地学报, 2007, 25(2):197-201.
- [23] 胡学翔. 湖南省水土保持工作现状与展望[J]. 中国水土保持, 2018, 441(12):67-69.

(上接第 145 页)

- [25] 王凤. 公众参与环保行为影响因素的实证研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2008, 18(6):30-35.
- [26] 周跃. 植被与侵蚀控制: 坡面生态工程基本原理探索[J]. 应用生态学报, 2000, 11(2):297-300.
- [27] 张燕. 农田排水沟渠对氮磷的去除效应及管理措施[D]. 吉林 长春:中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2013.
- [28] 吴要武. 寻找阿基米德的“杠杆”:“出生季度”是个弱工具变量吗? [J]. 经济学(季刊), 2010, 9(2):661-686.
- [29] 刘勇. 环境管制、经济激励、促进绿色购买与环境质量动态响应:基于太湖流域水环境治理中农村面源污染整治的分析[J]. 南京工业大学学报(社会科学版), 2019, 18(4):75-86, 112.
- [30] 黄振华. 新时代农村人居环境治理:执行进展与绩效评价:基于 24 个省 211 个村庄的调查分析[J]. 河南师范大学学报(哲学社会科学版), 2020, 47(3):54-62.
- [31] 肖新成, 何丙辉, 倪九派, 等. 三峡生态屏障区农业面源污染的排放效率及其影响因素[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(11):60-68.
- [32] 汪文雄, 汪萍, 罗冰, 等. 农户有效参与提升农地整治项目绩效的机理研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(7):159-168.
- [33] 汪文雄, 罗冰, 杨帆, 等. 不完全与不确定信息条件下农地整治项目绩效评价研究[J]. 中国土地科学, 2015, 29(6):75-81.