

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.102

引用格式: 钟林君, 王继祥, 赵双林, 等. 湖南省汨罗市滑坡风险评价[J]. 中国地质调查, 2024, 11(4): 114–123. (Zhong L J, Wang J X, Zhao S L, et al. Landslide risk assessment in Miluo City of Hunan Province [J]. Geological Survey of China, 2024, 11(4): 114–123.)

湖南省汨罗市滑坡风险评价

钟林君¹, 王继祥¹, 赵双林¹, 代聪², 张帅²

(1. 湖南省地质灾害调查监测所, 湖南长沙 410000; 2. 浙江大学软土与岩土环境工程教育部重点实验室, 浙江杭州 310030)

摘要: 湖南省汨罗市地形多样复杂、地貌丰富、人类活动频繁, 滑坡频发, 应及时开展滑坡风险评价, 并提出相应风险管控措施。首先, 收集汨罗市最新滑坡数据, 综合考虑高程、坡度、坡面等评价因子, 结合确定性系数(certainty factors, CF)模型和神经网络多层感知机(multi-layer perceptron, MLP)方法对汨罗市滑坡易发性进行评价; 其次, 考虑降雨工况对汨罗市滑坡危险性进行评价; 然后, 收集汨罗市建筑物、道路及滑坡威胁人口分布数据对汨罗市滑坡易损性进行评价; 最后, 采用矩阵等级划分法获取汨罗市滑坡风险评价结果并进行了滑坡风险管控探讨。结果表明: 川山坪镇西部及东部地区、弼时镇西部及东部地区, 以及三江镇东部地区和长乐镇东部地区为滑坡高风险区, 面积约为239.56 km², 覆盖103个滑坡点, 占滑坡总个数的72.54%。滑坡风险管控需进行“点控”和“面控”的有效结合, 开展“人防+技防”的有效措施。研究成果有助于开展科学合理的防灾减灾和灾后救援工作, 对于提高社会安全稳定和经济发展具有重要的现实意义。

关键词: 滑坡; 危险性评价; 易损性评价; 风险评价; 汨罗市

中图分类号: P694

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2024)04-0114-10

0 引言

湖南省汨罗市历史上发生过多起重大滑坡事件。如2010年6月, 汨罗市遭遇特大暴雨洪灾, 诱发222处滑坡、620处泥石流、360处塌陷, 导致28万人受困, 163栋房屋倒塌, 经济损失高达3.1亿元^[1]。区内存在众多古滑坡, 如308公路旁大型岩土滑坡, 自1999年因路基开挖大范围复活后, 便不断向前滑行, 对周边居民造成重大影响^[2], 全域滑坡风险评价迫在眉睫。陈芯宇等^[3]采用确定性系数(certainty factors, CF)模型与支撑向量机对略阳县进行滑坡易发性评价并取得了较好成果; 王芳等^[4]利用逻辑回归、支持向量机及决策树方法对三峡库区进行滑坡易发性评价, 并考虑3种降雨工况, 获得了不同的滑坡危险性分布图。然而, 风险评价包括易发性、危险性、易

损性和风险评价, 相关研究大多只涉及风险评价的一部分^[5-6], 并较少考虑滑坡后果。Xiao^[7]与He等^[8]强调了滑坡风险中考虑滑坡后果的重要性; Lu等^[9]也在开展滑坡风险评价时考虑了滑坡后果, 但研究方法只适用于单体滑坡; Zhang等^[10]对震后滑坡进行定量风险评价以进行土地利用规划, 但其研究结果只关注现有滑坡, 其他区域滑坡风险仍处于未知状态。汨罗市相关研究仅使用打分法判断国土资源环境承载力和土地适宜性^[11-12], 误差大, 对政府防灾减灾效益产生很大影响。因此, 亟需建立考虑滑坡后果的区域性全流程滑坡风险评价框架, 以预防和降低滑坡损失, 助力国家可持续发展。

本文收集汨罗市最新滑坡数据, 综合考虑高程、坡度、坡面等评价因子, 结合确定性系数模型和神经网络多层感知机(multi-layer perceptron, MLP)方法对汨罗市滑坡进行易发性评价; 在该

收稿日期: 2024-01-05; 修订日期: 2024-07-02。

基金项目: 湖南省科学技术厅项目“深大基坑中心岛顺逆工法(编号: 2012SK3280)”资助。

第一作者简介: 钟林君(1984—), 女, 高级工程师, 主要从事地质灾害防治与地质环境保护工作。Email: 114864389@qq.com。

基础上考虑降雨工况下的时间概率及事件概率对汨罗市滑坡危险性进行评价;通过资料收集获取汨罗市建筑物、道路及滑坡威胁人口信息,对汨罗市滑坡易损性进行评价;最后采用矩阵等级划分法获取汨罗市滑坡风险评价结果。研究预期获取汨罗市全域滑坡风险分区图,探知滑坡高风险区域,为汨罗市滑坡防治及土地利用规划提供科学依据和决策支持。

1 研究区概况

汨罗市位于中国湖南省东北部,处于幕阜山脉与洞庭湖平原过度地带,属中亚热带季风潮湿气候区,面积约 1 562 km²。据汨罗市气象站 1955—2017 年观察资料,区内年平均温度为 16.7 ~ 17.4 °C,多年平均降雨量为 1 482.1 mm。地貌为北、西、南三面环山。地形多样复杂,岗地、阶地、平原、丘陵、山地、湖泊交错,区内最高峰玉池山达摩岭海拔为 759 m,区内相对高差为 753.2 m,坡降为 1.46%。地貌类型依据其成因可分为侵蚀构造地貌、剥蚀构造地貌、构造剥蚀地貌、侵蚀堆积地貌和堆积地貌 5 种类型。境内有湘江(段)以及其他河流长度共 4 km,流域面积 6.5 km² 以上的河流有 44 条,流域面积 100 km² 以上的河流有 10 条。据汨

罗市滑坡调查数据统计(湖南国土局提供),滑坡隐患点共 142 处(图 1),主要分布在县域中南部和东北部,多发生于 5—8 月雨季。滑坡对周边居民及建筑物、道路等基础设施造成严重损害(图 2)。因此对该市进行滑坡风险评价对保护人民生命财产安全具有重大意义。

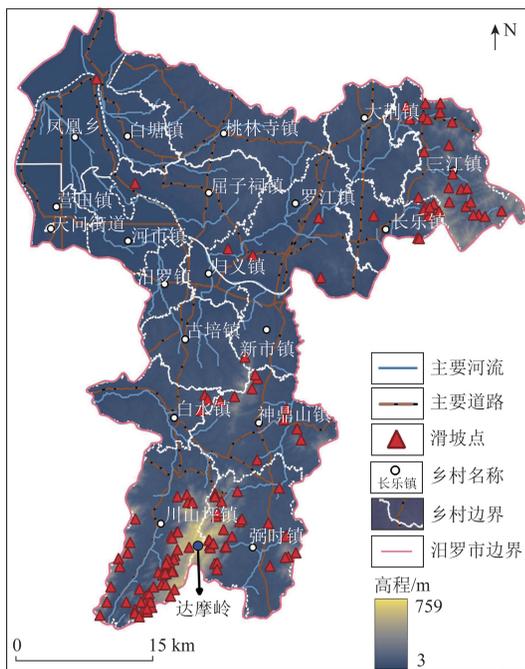


图 1 汨罗市滑坡分布图

Fig. 1 Distribution of the landslides in Miluo City



(a) 被掩埋的房屋



(b) 道路挤压裂缝



(c) 墙体裂缝



(d) 房屋裂缝

图 2 典型滑坡灾害威胁对象

Fig. 2 Typical objects threatened by landslide

境内出露地层岩性简单,第四系和古近系紫红色砂岩和泥岩较发育,境内由新到老为第四系、古近系、元古界冷家溪群等,分布最广的地层为第四系。研究区位于新华夏系巨型第二次沉降带的次一级隆起带,最明显的构造为新华夏构造体系及 NE 向断裂。区内近期新构造运动较为强烈,具有继承性特点,其表现形式以振荡运动为特色,大部分地区以抬升作用为主。区内第四系沉积分布、地貌景观特征、湖泊河流变迁等均与新构造运动的强度和分布有密切关系。

2 风险评价方法

2.1 易发性评价

CF 模型是由 Shortliffe 等^[13]于 1975 年提出并经过 Heckerman^[14]改进的统计模型,其假设未来出现滑坡的条件与过去出现条件相同,计算公式为

$$CF = \begin{cases} \frac{PP_a - PP_s}{PP_a(1 - PP_s)}, PP_a \geq PP_s \\ \frac{PP_a - PP_s}{PP_s(1 - PP_a)}, PP_a < PP_s \end{cases} \quad (1)$$

式中： PP_a 为因子分类数据 a 中发生滑坡事件的条件概率，通常用 a 中滑坡面积与数据分类 a 面积比值来表示； PP_s 表示滑坡总面积与研究区总面积的比值； CF 值的取值范围是 $[-1, 1]$ ，表示因子与滑坡相关性，正值表示滑坡概率较高，即地质环境条件很大概率导致滑坡发生，负值表示滑坡概率较低，即地质环境条件不太可能导致滑坡发生。

神经网络 MLP 为神经网络模型中的一种，可对复杂问题设置多层隐含层转变为深度神经网络而准确解决问题，灵活多用，且应用较广^[15]。本文使用 SPSS 软件神经网络 MLP 进行滑坡易发性评价。

2.2 危险性评价

滑坡危险性评价是在地质灾害易发性评价基础上，考虑易于滑坡发生的相关因素，进一步刻画和预测滑坡影响范围以及发生概率^[16]。本研究主要考虑降雨诱发滑坡的危险程度，考虑其事件概率、空间概率以及时间概率。其危险性值计算公式^[17]为

$$H = P_E \times P_S \times P_T \quad (2)$$

式中： H 为危险性值； P_E 为事件概率，定义为各易发性分级中滑坡点数量所占比例； P_S 为空间概率，定义为滑坡易发性结果； P_T 为时间概率，主要考虑触发因素，定义为暴雨出现概率。

2.3 易损性评价

本次滑坡易损性评价采用赋值法，即根据建筑物、道路交通和人员密度分布 3 个评价指标的重要性，对每个类别易损性进行赋值，考虑了滑坡后果，是滑坡风险评价中的重要环节。通过湖南省国土局提供的遥感影像及统计资料，获取汨罗市建筑物、人员以及道路分布情况。建筑物易损性根据建筑物面积，采用自然间断法进行分级获取。人员易损性根据统计的滑坡影响人员数量，采用核密度分析方法获取。由于灾害点主要位于人员稀少的南部地区，根据汨罗市自身情况进行赋值， $[0, 4)$ 人赋值为 0.1， $[4, 8)$ 人赋值为 0.2， $[8, 12)$ 人赋值为 0.3， $[12, 16)$ 人赋值为 0.4， ≥ 16 人赋值为 0.5。交通易损性根据不同道路类型进行赋值，高速公路赋值为 0.9，国家级公路赋值为 0.8，省级道路赋值为 0.5，县级道路赋值为 0.3。

2.4 风险评价

本次滑坡风险评价选择矩阵等级划分法，将滑坡危险性和易损性结果结合起来，以获取滑坡风险评价结果。滑坡风险等级划分具体内容见表 1。

表 1 滑坡风险等级划分

Tab. 1 Landslide risk classification

易损性	危险性			
	极高	高	中	低
极高	高	高	高	中
高	高	高	中	中
中	高	高	中	低
低	高	中	低	低

3 滑坡易发性影响因素分析

汨罗市滑坡分布广泛，不同地区诱发因子不完全相同，分析研究综合确定汨罗市滑坡易发性 7 个评价因子，即高程、坡度、坡向、工程地质岩组、距断层距离、距水系距离和距道路距离（图 3），数据均由湖南省国土局提供。

高程是表征区域宏观地貌的重要地形信息，不同高程范围内植被类型、降雨量、人类活动、温度等都具有明显差异^[18]。汨罗市境内呈现出越往高处滑坡发育密度越高的趋势。根据汨罗市实际情况，将高程按 $[0, 50)$ m、 $[50, 100)$ m、 $[100, 150)$ m、 $[150, 200)$ m、 $[200, 250)$ m、 $[250, 300)$ m、 $[300, 350)$ m、 ≥ 350 m 划分为 8 个等级。

坡度影响斜坡体应力大小和方向，同时影响着不同地层之间的稳定性^[19]。基于斜坡坡度特征和滑坡发育情况将地形坡度划分为 $[0^\circ, 10^\circ)$ 、 $[10^\circ, 20^\circ)$ 、 $[20^\circ, 30^\circ)$ 、 $[30^\circ, 40^\circ)$ 、 $[40^\circ, 50^\circ)$ 、 $\geq 50^\circ$ 共 6 个区间。

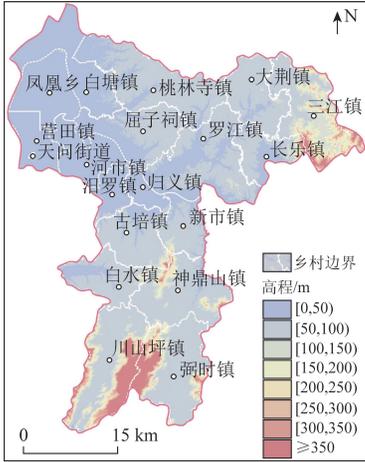
在山地地形中，不同朝向山坡受到的太阳辐射、日照时间等环境因素存在明显差异，特别是山地的方位对日照时数和太阳辐射强度影响非常明显，决定着植被类型及其覆盖度、地表水蒸发量等信息^[6]，因此，将汨罗市全域内坡向分成 9 个方位。

岩性是组成坡体重要的物质基础，不同岩性具有不同工程地质特征，同时不同岩性坡体抗剪强度之间也存在差异^[20]。抗风化能力、坚硬度、结构完整性等方面表现出色的抗剪强度较大的坡体，相对于其他坡体更加不容易发生滑坡；反之，性质松软、结构不完整、裂隙发育、抗剪强度低的坡体，更易失稳变形，甚至发生滑坡。本文根据汨罗市岩性成分及性质分成了 4 类：双层结构粉质黏土 - 砂砾石层岩组、较坚硬至较软浅变质岩组、坚硬块状岩浆岩组和较软“红层”砂

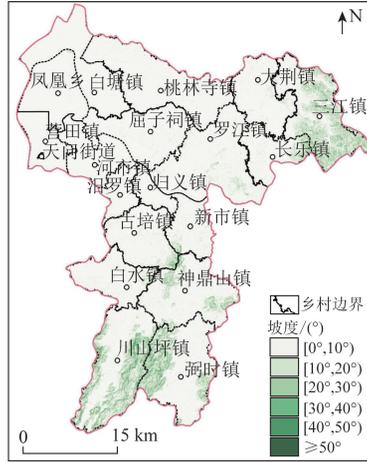
砾岩、黏土岩组。

滑坡发生与断裂构造密切相关,特别是区域性断裂构造交叉复合部位,更易形成滑坡。水系发育程度及分布直接关系到地表侵蚀能力,对地表的侵

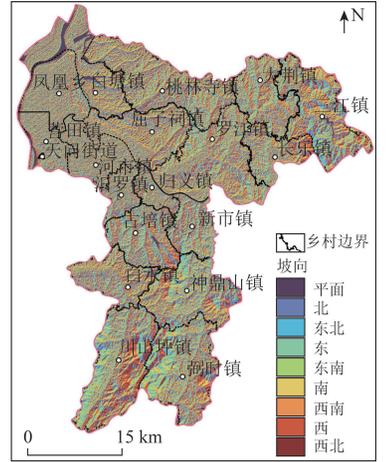
蚀能力越大,发生滑坡的可能性越高。随着社会经济 发展,人类活动日益增强,对山体斜坡破坏趋势也 逐渐加深。根据统计资料及汨罗市实际情况将区内 距断层、距水系和距道路的距离均划分为8个等级。



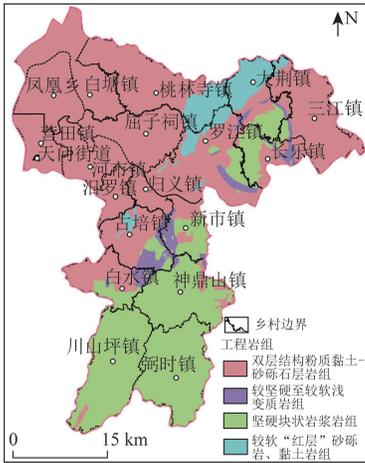
(a) 高程



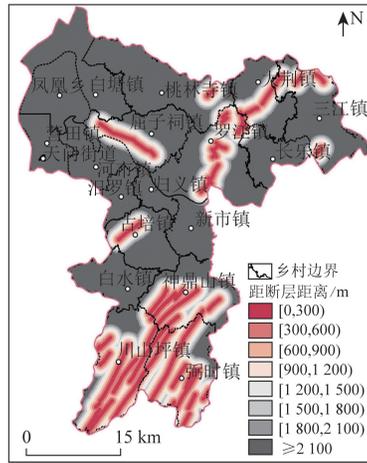
(b) 坡度



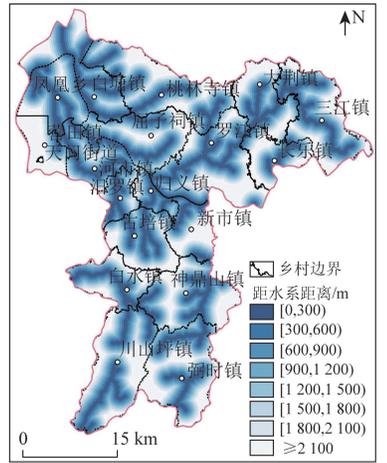
(c) 坡向



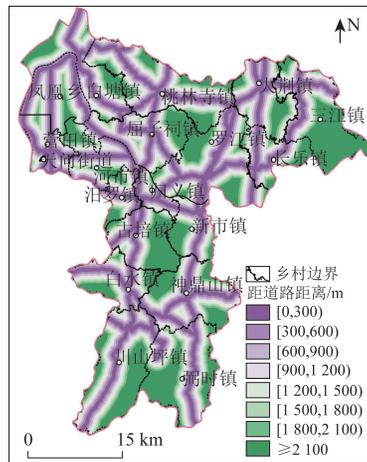
(d) 工程地质岩组



(e) 距断层距离



(f) 距水系距离



(g) 距道路距离

图3 汨罗市滑坡易发性评价因子

Fig.3 Landslide susceptibility evaluation factors in Miluo City

续表

4 汨罗市滑坡风险评价

4.1 滑坡易发性评价结果与检验

首先采用 CF 模型计算出各评价因子各分类级别权重(即 CF 值)作为自变量,是否发生滑坡作为因变量(1 表示发生滑坡,0 表示没有发生滑坡)。利用 SPSS 软件神经网络 MLP 方法进行训练,将预测值应用到汨罗市全域,获取滑坡易发性评价结果。研究区单元格大小均按照 30 m × 30 m 进行重采样。具体计算步骤如下。

(1)利用 CF 模型计算各评价因子各分类级别对应 CF 值(表 2)。将 142 个滑坡点在不同因子分类级别中的分布信息输入到 CF 模型中获取各分类级别在因子中的相对权重,用于比较该分类级别的相对重要性。

表 2 评价因子分级

Tab. 2 Evaluation factors classification

评价因子	分类级别	类别面积/km ²	滑坡点/个	CF 值
高程/m	[0,50)	580.04	6	-0.054 9
	[50,100)	826.36	37	0.566 6
	[100,150)	81.12	22	0.890 1
	[150,200)	46.35	14	0.902 2
	[200,250)	36.15	18	0.931 5
	[250,300)	27.78	15	0.963 1
	[300,350)	19.87	11	0.917 9
	≥350	47.18	19	0.922 2
	坡度/(°)	[0°,10°)	1 401.99	36
[10°,20°)		160.87	64	0.926 0
[20°,30°)		77.14	29	0.898 9
[30°,40°)		15.82	11	0.888 8
[40°,50°)		1.36	2	0.975 5
≥50°		0.72	0	-1.000 0
坡向	平面	33.76	0	-1
	北	188.64	12	0.533 9
	东北	180.71	9	0.454 0
	东	212.72	19	0.666 4
	东南	214.42	33	0.776 5
	南	194.74	19	0.654 4
	西南	194.84	13	0.626 6
	西	222.45	18	0.636 1
工程地质岩组	西北	214.97	19	0.662 2
	双层结构粉质黏土-砂砾石层岩组	989.16	42	0.433 9
	较坚硬至较软浅变质岩组	514.87	90	0.798 8
	坚硬块状岩浆岩组	59.52	9	0.700 3
	较软“红层”砂砾岩、黏土岩组	102.41	1	0.658 6

评价因子	分类级别	类别面积/km ²	滑坡点/个	CF 值
距断层距离/m	[0,300)	109.41	23	0.867 0
	[300,600)	113.03	12	0.734 0
	[600,900)	100.35	18	0.815 4
	[900,1 200)	88.15	24	0.861 4
	[1 200,1 500)	77.92	13	0.773 8
	[1 500,1 800)	66.63	7	0.744 6
	[1 800,2 100)	60.76	6	0.838 6
≥2 100	1 049.59	39	0.340 2	
距水系距离/m	[0,300)	247.24	20	0.637 2
	[300,600)	228.79	18	0.679 3
	[600,900)	217.41	12	0.520 8
	[900,1 200)	200.99	22	0.750 3
	[1 200,1 500)	181.32	11	0.594 1
	[1 500,1 800)	155.42	8	0.407 9
	[1 800,2 100)	126.08	16	0.660 0
≥2 100	308.68	35	0.664 6	
距道路距离/m	[0,300)	271.55	13	0.431 7
	[300,600)	237.71	4	0.421 9
	[600,900)	207.20	4	0.428 0
	[900,1 200)	181.50	9	0.554 1
	[1 200,1 500)	155.82	10	0.563 8
	[1 500,1 800)	132.21	8	0.506 5
	[1 800,2 100)	109.26	9	0.714 4
≥2 100	370.64	85	0.830 4	

(2)为提高模型预测精度,随机选取 70% 滑坡点作为训练样本,即选取 100 个发生滑坡及 100 个未发生滑坡的单元(均匀分布选取)共同组成因变量样本,根据数据样本利用 SPSS 软件神经网络 MLP 进行分析,剩下 30% 样本进行验证。在获得较好训练模型时,将之应用于汨罗市全流域 30 m × 30 m 的栅格,即获取汨罗市滑坡易发性评价结果(表 3,图 4)。其中滑坡高易发区面积约 191.56 km²,覆盖 86 个滑坡点,占滑坡点总数的 60.6%。采用接收者操作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC)进行精度评定,曲线下面积(area under the receiver operating characteristic curve, AUC)值为 0.963 > 0.5,训练结果精度较为优异(图 5)。

表 3 易发性各分级滑坡点分布情况

Tab. 3 Landslides distribution for each susceptibility classification

易发性分级	面积/km ²	滑坡点/个	所占比例/%
非易发区	538.06	4	2.8
低易发区	562.00	16	11.3
中易发区	366.82	36	25.3
高易发区	191.56	86	60.6
合计	1 658.44	142	100.0

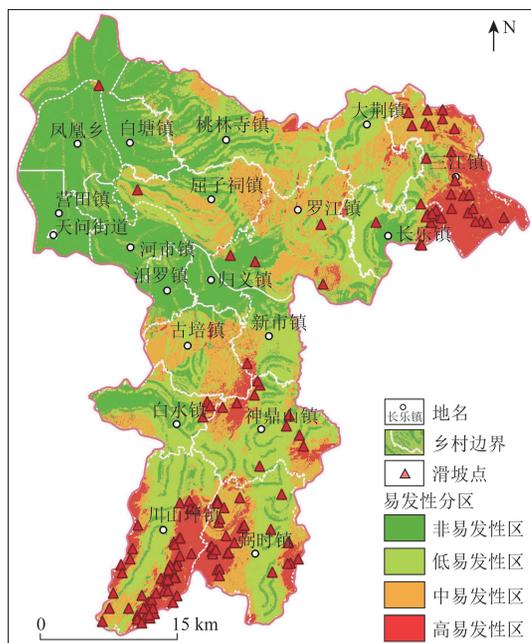


图4 汨罗市滑坡易发性评价结果

Fig.4 Landslide susceptibility assessment result for Miluo City

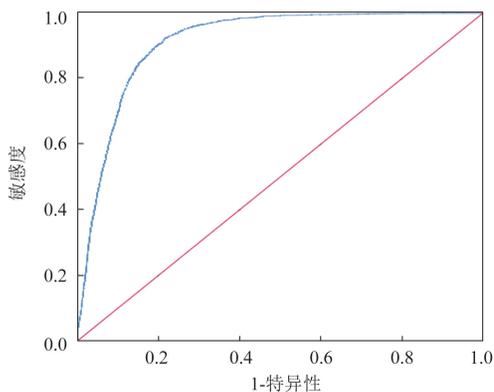


图5 ROC 曲线结果

Fig.5 ROC curve result

4.2 滑坡危险性评价结果

汨罗市滑坡危险性评价中滑坡诱发因素以降雨为主。据统计资料显示,降雨直接影响汨罗市内滑坡发生频率。通过对区内滑坡数据收集,选取规模较大的滑坡,并记录其发生时间(表4)。

由表4可知,诱发滑坡的最低月降雨量为115.7 mm,最大为309.5 mm。通过对研究区1980—2017年月降雨量统计,大于115.7 mm降雨量的降雨次数为196次,出现概率为0.43,即时间概率 P_T 值为0.43。事件概率 P_E 为各易发性分级

表4 研究区内规模较大滑坡发生时间及对应降雨量
Tab.4 Occurrence time of large landslides in the study area and the corresponding rainfall

行政位置	发生时间	2月降雨量/mm	5月降雨量/mm	7月降雨量/mm
川山坪镇	1995.07.01	109.9	191.3	163.1
弼时镇	2002.07.06	89.1	359.2	309.5
弼时镇	2006.07.06	134.8	109.8	115.7
弼时镇	2009.05.13	95.6	129.3	132.2
弼时镇	2014.02.20	149.3	350.6	381.6
川山坪镇	2016.07.04	41.7	232.9	305.8

中滑坡点数量所占比例(表3)。按照2.2中方法计算获取汨罗市滑坡危险性评价结果(图6,表5)。极高危险区、高危险区、中危险区及低危险区面积分别为197.61 km²、377.80 km²、586.05 km²、496.98 km²,其中极高危险区覆盖88处滑坡,占滑坡点总数的62%。

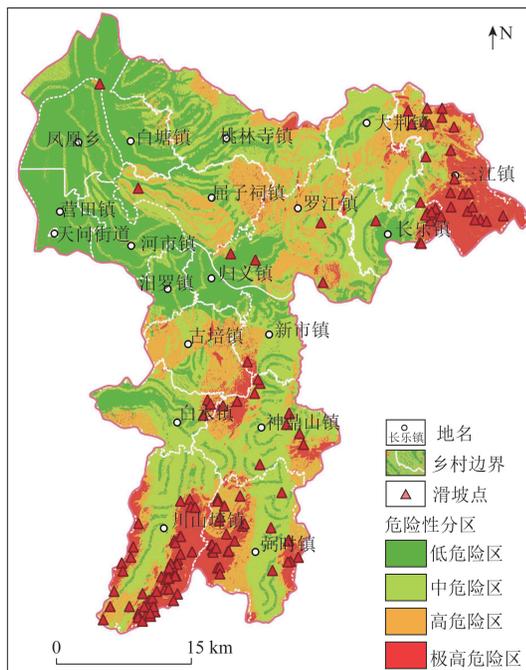


图6 汨罗市滑坡危险性评价结果

Fig.6 Landslide hazard assessment result for Miluo City

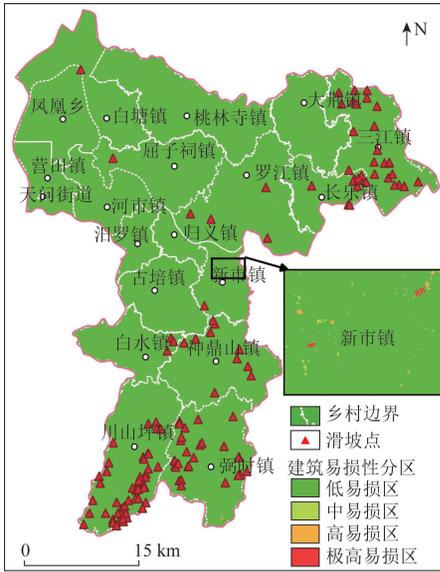
表5 危险性各分级滑坡点分布情况

危险性分级	面积/km ²	滑坡点/个	所占比例/%
低危险区	496.98	1	0.7
中危险区	586.05	19	13.4
高危险区	377.80	34	23.9
极高危险区	197.61	88	62.0
合计	1 658.44	142	100.0

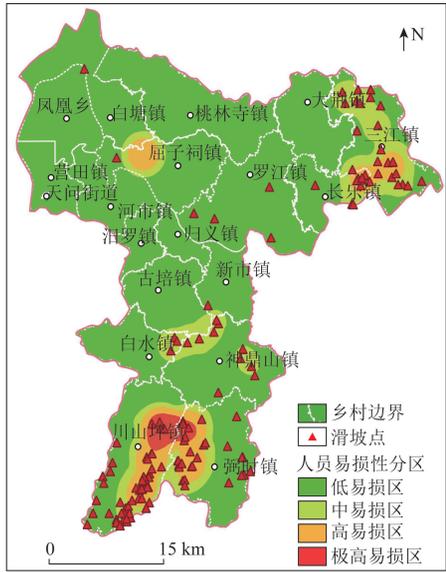
4.3 滑坡易损性评价结果

根据汨罗市建筑(图7(a))、人员(图7(b))、交通(图7(c))易损性结果,将三者叠加获取汨罗市易

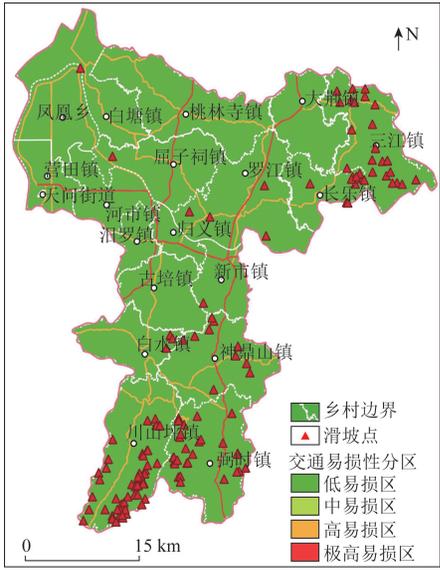
损性评价结果(图7(d),表6)。其中,极高易损区面积约为18.48 km²,覆盖3处滑坡,占灾害点个数的2.1%,表示汨罗市大部分地区未受到滑坡威胁。



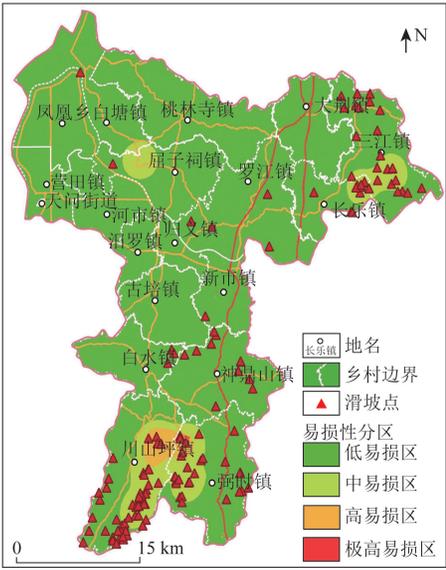
(a) 建筑



(b) 人员



(c) 交通



(d) 汨罗市

图7 汨罗市滑坡易损性评价结果

Fig.7 Landslide vulnerability assessment result for Miluo City

表6 易损性各分级滑坡点分布情况

Tab.6 Landslides distribution for each vulnerability classification

易损性分级	面积/km ²	灾害点/个	所占比例/%
低易损区	1 423.02	68	47.9
中易损区	119.36	58	40.8
高易损区	97.58	13	9.2
极高易损区	18.48	3	2.1
合计	1 658.44	142	100.0

4.4 滑坡风险评价结果

通过矩阵等级划分法将滑坡危险性与易损性评价结果进行叠加运算,获取汨罗市滑坡风险评价结果,如图8所示。汨罗市川山坪镇西部及东部地区、弼时镇西部及东部地区,以及三江镇东部地区和长乐镇东部地区为滑坡高风险区,面积约为239.56 km²,覆盖103个滑坡点,占滑坡点总数的72.54%。高风险区主要为山地地形,滑坡多,风险

也随之较大。川山坪镇中北部地区、弼时镇东部及西部地区、神鼎山镇中部地区、新市镇和古培镇部分地区、三江镇南部大部分地区以及桃林寺镇、大荆镇、罗江镇、屈子祠镇部分地区为滑坡中风险区,面积约为 397.82 km²,覆盖 22 个滑坡点,占滑坡点总数的 15.49%。其他区域为滑坡低风险区,面积为 1 020.94 km²,覆盖 17 个滑坡点,占滑坡点总数的 11.97%。具体情况如表 7 所示。

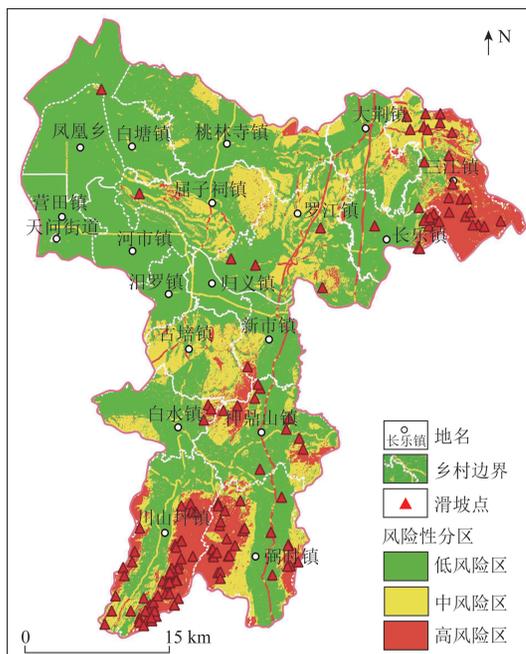


图 8 汨罗市滑坡风险评价结果

Fig. 8 Landslide risk assessment result for Miluo City

表 7 风险各分级滑坡点分布情况

Tab. 7 Landslides distribution for each risk classification

风险分级	面积/km ²	滑坡点/个	所占比例/%
低风险区	1 021.06	17	11.97
中风险区	397.82	22	15.49
高风险区	239.56	103	72.54
合计	1 658.44	142	100.00

5 滑坡风险管控探讨

滑坡风险评价与区划是风险管控体系建立及实施的重要基础,滑坡风险评价后需开展相应滑坡风险管控措施。风险管控是技术体系、管理能力、经济发展及防灾减灾需求的重要体现,且正向滑坡预防和减轻风险转变^[21]。滑坡风险管控主要是滑坡隐患点(点)与滑坡风险区(面)的“点控”与“面控”的有效结合,可以有效降低滑坡风险、人员及经

济的可能性损失。经过数年探索,关于滑坡隐患点的“点控”已经因群测群防体系及预警系统建立而卓有成效,但繁琐的滑坡数据库建立流程以及滑坡发生和人员流动的不确定性仍会导致人员伤亡和经济损失情况的发生。并且在进行区域性滑坡风险评价时,或多或少存在高风险区域面积过大,或部分风险区实际为不易发生滑坡的平坦地形区的现象,这就需要在进行滑坡风险管控时,根据风险评价结果科学灵活处理。本文针对滑坡风险“点控”及“面控”进行讨论分析。

(1) 滑坡风险“点控”。滑坡隐患点存在各自影响范围,因此滑坡风险“点控”是“面控”的前提,且相互关联。首先,需进行风险源精细化识别调查,从源头控制滑坡风险。随着光学遥感、InSAR、LiDAR 及三维激光扫描仪等“天空地”多源遥感技术手段高速发展,滑坡定位精度及准确性得到迅速提升,有利于滑坡数据库建立。其次,通过多源遥感技术可获取滑坡形变信息,即可在进行滑坡风险评价时,以滑坡单体为目标,将不同时期滑坡形变速率添加到滑坡风险评价流程中,获取单个滑坡风险值并进行排序。最后,可有针对性地开展滑坡防治及预警系统布置,使滑坡风险“点控”更具效率。考虑不同时期形变速率的滑坡风险评价是后续的研究规划。

(2) 滑坡风险“面控”。在进行“面控”时,应以乡镇为单位开展滑坡风险管控。根据滑坡风险评价结果将高风险区域划分为禁建区和缓冲区^[22],有效进行土地利用。也可借鉴“点控”的“人防+技防”等经验,对居住于高风险区内居民进行群测群防宣传,完善滑坡防治培训体系,掌握滑坡发生前兆识别知识。如汨罗市高风险区主要位于川山坪镇、弼时镇、三江镇的山区区域,应以镇为单位,开展滑坡防灾减灾宣传活动和培训。在技术方面,可将多源遥感技术运用其中,进行区域性形变监测,探测不同时期(雨季、非雨季)的形变信息,加强市、镇、乡之间的沟通,及时反馈预警系统监测结果,并采取相应的防控措施。

6 结论

(1) 本文结合 CF 模型和神经网络 MLP 方法对汨罗市滑坡易发程度进行评价,其中滑坡高易发区面积约 191.56 km²。采用 ROC 曲线对评价模型精

度进行检验,得到 0.963 的检验结果,表明较高的模型评价精度,证明利用 CF 模型及神经网络 MLP 方法可较客观、准确地对湖南省汨罗市滑坡易发性进行评价。在易发性评价结果基础上,考虑降雨工况下的时间概率、事件概率对滑坡危险性进行评价,危险性评价结果显示滑坡极高危险区面积约 197.61 km²。

(2)结合汨罗市建筑物、道路及滑坡威胁人口分布数据进行滑坡易损性评价,并采用矩阵等级划分法综合评估滑坡风险。结果显示,汨罗市川山坪镇西部及东部地区、弼时镇西部及东部地区,以及三江镇东部地区和长乐镇东部地区,为滑坡高风险区,总面积约 239.56 km²。为有效管控滑坡风险,建议结合“点控”和“面控”实施人防和技防措施,以提高管控效果和实用性。

参考文献 (References):

[1] 刘克宏,高赛.成功预警造就“零伤亡”奇迹[N].岳阳晚报,2010-06-25(003).
Liu K H, Gao S. Successful warning creates a miracle of “zero casualties”[N]. Yueyang Evening News, 2010-06-25(003).

[2] 张奎,李高祥,郑良飞.汨罗市 308 线公路某滑坡变形监测及预测研究[J].中国新技术新产品,2009(13):42-43.
Zhang K, Li G X, Zheng L F. Monitoring and prediction of landslide deformation on highway 308 in Miluo City[J]. New Technology & New Products of China, 2009(13):42-43.

[3] 陈芯宇,师芸,温永啸,等.基于确定性系数与支持向量机的滑坡易发性评价[J].科学技术与工程,2023,23(2):518-527.
Chen X Y, Shi Y, Wen Y X, et al. Landslide susceptibility evaluation based on certainty factor and support vector machines[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(2):518-527.

[4] 王芳,殷坤龙,桂蕾,等.不同日降雨工况下万州区滑坡灾害危险性分析[J].地质科技情报,2018,37(1):190-195,203.
Wang F, Yin K L, Gui L, et al. Landslide hazard analysis under different daily rainfall conditions in Wanzhou district[J]. Geological Science and Technology Information, 2018, 37(1):190-195 203.

[5] 田春山,刘希林,汪佳.基于 CF 和 Logistic 回归模型的广东省地质灾害易发性评价[J].水文地质工程地质,2016,43(6):154-161,170.
Tian C S, Liu X L, Wang J. Geohazard susceptibility assessment based on CF model and logistic regression models in Guangdong[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(6):154-161, 170.

[6] 王娅美,张紫昭,张艳阳,等.基于多种组合模型的新疆巩留县滑坡危险性评价研究[J].工程地质学报,2023,31(4):1375-1393.

Wang Y M, Zhang Z Z, Zhang Y Y, et al. Landslide risk assessment of Gongliu County in Xinjiang based on multiple combination models[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(4):1375-1393.

[7] Xiao T, Zhang L M, Cheung R W M, et al. Predicting spatio-temporal man-made slope failures induced by rainfall in Hong Kong using machine learning techniques[J]. Géotechnique, 2023, 73(9):749-765.

[8] He J, Zhang L M, Xiao T, et al. Prompt quantitative risk assessment for rain-induced landslides[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2023, 149(5):04023023.

[9] Lu M, Zhang J, Zhang L L, et al. Assessing the annual risk of vehicles being hit by a rainfall-induced landslide: a case study on Kennedy Road in Wan Chai, Hong Kong[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2020, 20(6):1833-1846.

[10] Zhang S, Zhang L M, Peng M, et al. Assessment of risks of loose landslide deposits formed by the 2008 Wenchuan earthquake[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2012, 12(5):1381-1392.

[11] 李慎鹏,张建新,项广鑫,等.生态文明建设背景下的国土资源环境承载力评价技术[J].中国农学通报,2018,34(24):82-87.
Li S P, Zhang J X, Xiang G X, et al. Evaluation techniques of environmental carrying capacity of land and resources in the context of ecological civilization construction[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(24):82-87.

[12] 李慎鹏,项广鑫,曾毅,等.面向空间规划的土地适宜性评价——以汨罗市为例[J].亚热带资源与环境学报,2019,14(2):74-82.
Li S P, Xiang G X, Zeng Y, et al. Suitability evaluation of land for space planning: A case study of Miluo city[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2019, 14(2):74-82.

[13] Shortliffe E H, Buchanan B G. A model of inexact reasoning in medicine[J]. Mathematical Biosciences, 1975, 23(3-4):351-379.

[14] Handwerger A L, Huang M H, Fielding E J, et al. A shift from drought to extreme rainfall drives a stable landslide to catastrophic failure[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1):1569.

[15] 罗金.基于各类机器学习方法的滑坡易发性评价及软件系统开发[D].西安:长安大学,2021.
Luo J. Evaluation of Landslide Susceptibility and Software System Development Based on Various Machine Learning Methods[D]. Xi'an:Chang'an University, 2021.

[16] Dai C, Li W L, Lu H Y, et al. Landslide hazard assessment method considering the deformation factor: A case study of Zhouqu, Gansu Province, northwest China[J]. Remote Sensing, 2023, 15(3):596.

[17] 陈成名.西南山区城镇地质灾害易损性评价理论与实践——以汶川县为例[D].成都:成都理工大学,2010.
Chen C M. Study on Vulnerability Assessment of Geological Hazards in Southwest Mountainous Towns: Taking Wenchuan County Town as An Example[D]. Chengdu: Chengdu University of Tech-

nology,2010.

- [18] 杨盼盼,王念秦,郭有金,等. 基于加权信息量模型的临潼区滑坡易发性评价[J]. 长江科学院院报,2020,37(9):50-56.
Yang P P, Wang N Q, Guo Y J, et al. Assessment of landslide susceptibility in Lintong district using weighted information value model[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020,37(9):50-56.
- [19] 冷洋洋,向喜琼,陶小郎,等. 基于CF-AHP法的风险斜坡识别方法研究[J]. 科学技术与工程,2022,22(32):14137-14147.
Leng Y Y, Xiang X Q, Tao X L, et al. Risk slope identification method based on CF-AHP[J]. Science Technology and Engineering, 2022,22(32):14137-14147.
- [20] 张春慧,陈美招,郑荣宝. 基于“3S”技术和LR-WSVM模型的广州市花都区滑坡灾害风险评估与区划[J]. 生态与环境学报,2015,31(6):955-962.
Zhang C H, Chen M Z, Zheng R B. Landslide hazard risk assessment and zoning of Huadu district of Guangzhou based on “3S”

technique and logistic regress-weighted SVM model[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015,31(6):955-962.

- [21] 铁永波,徐伟,向炳霖,等. 西南地区地质灾害风险“点面双控”体系构建与思考[J]. 中国地质灾害与防治学报,2022,33(3):106-113.
Tie Y B, Xu W, Xiang B L, et al. The thoughts on construction of “double-control of point and zone” system of geological hazard risk in southwest China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022,33(3):106-113.
- [22] 王高峰,李刚,孙向东,等. 甘肃南部山区城镇地质灾害风险双控模式初探[J/OL]. 中国地质,2023:1-21. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.p.20230505.0935.004.html>.
Wang G F, Li G, Sun X D, et al. Preliminary study on the “point-surface dual control” model of geological hazard risk in typical mountainous towns in Gansu Province[J/OL]. Geology in China, 2023:1-21. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.p.20230505.0935.004.html>.

Landslide risk assessment in Miluo City of Hunan Province

ZHONG Linjun¹, WANG Jixiang¹, ZHAO Shuanglin¹, DAI Cong², ZHANG Shuai²

(1. Hunan Province Geological Disaster Survey and Monitoring Institute, Hunan Changsha 410000, China; 2. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geo-Environmental Engineering, Zhejiang University, Zhejiang Hangzhou 310030, China)

Abstract: Miluo City of Hunan Province features diverse and complex topography, rich landforms, and frequent human activities, resulting in a relatively high incidence of landslides. In order to prevent the casualties caused by landslides, the authors conducted landslide risk assessment and proposed corresponding risk control measures. Firstly, the latest landslide data for Miluo City were collected, and susceptibility of landslides in Miluo City was assessed using certainty factors and a neural network multi-layer perceptron approach, on the basis of factors such as elevation, slope, and face of slope. Then, the landslide hazard under rainfall conditions was evaluated. And the data of buildings, roads, and the population distribution threatened by landslide were collected to assess the landslides vulnerability in Miluo City. Finally, landslide risk assessments results were obtained through matrix degree division and risk control strategies were discussed. The results indicated that the western and eastern part of Chuanshanping Town, the western and eastern part of Bishi Town, the eastern part of Sanjiang Town and the eastern part of Changle Town were in high risk of landslides. The areas cover approximately 239.56 km² and encompassed 103 landslides, accounting for 72.54% of the total landslides. Effective landslide risk control requires a combination of point control and area control, implementing both people-oriented and technical preventive measures. The research findings could contribute to the scientific and rational implementation of disaster prevention, reduction, and post-disaster rescue efforts, holding significant practical importance in enhancing social safety, stability, and economic development.

Keywords: landslides; hazard assessment; vulnerability assessment; risk assessment; Miluo City

(责任编辑:刘丹)