

长江中下游地区滑坡的易发性评价

——以江西省为例

唐兴港¹, 王慧勇¹, 黄豆², 张金池¹

(1.南京林业大学 南方现代林业协同创新中心 江苏省水土保持与生态修复重点实验室, 江苏 南京 210037; 2.南京林业大学 林学院, 江苏 南京 210037)

摘要: [目的] 预测长江流域滑坡灾害分布情况,旨在开展隐患排查和危险评估,提升灾害的应对能力。[方法] 基于 1 211 个滑坡分布点数据和 15 个环境变量,通过 MaxEnt 模型对江西省的滑坡易发区分布进行预测,同时采用 Jackknife 检验评估 15 个环境变量对预测结果的重要程度,最终确定不同程度滑坡易发区的面积和分布以及影响滑坡灾害发生的主要环境变量。[结果] 江西省内极高、高和中易发区分别占全省总面积的 29.6%,36.5%和 23%。滑坡发生的概率以鄱阳湖平原为中心向四周呈现逐渐增加的趋势,集中分布在西部和南部的山地丘陵地带。海拔、坡度、植被归一化指数 NDVI、年均降雨量和距离水系和道路的距离是影响滑坡发生和分布的主要环境变量,累积贡献率在 83%以上。[结论] 江西省滑坡易发区的分布具有明显的空间差异性,主要分布在海拔较高、地质复杂和岩层节理裂隙发育的地区,降雨是滑坡发生的直接诱导因子。

关键词: 滑坡; MaxEnt 模型; 环境变量; 长江流域; 易发性评价

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)03-0166-07

中图分类号: P642.22

文献参数: 唐兴港, 王慧勇, 黄豆, 等.长江中下游地区滑坡的易发性评价[J].水土保持通报,2021,41(3): 166-172.DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2021.03.023; Tang Xinggang, Wang Huiyong, Huang Dou, et al. Evaluation of landslide susceptibility in middle and lower reaches of Yangtze River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(3):166-172.

Evaluation of Landslide Susceptibility in Middle and Lower Reaches of Yangtze River —Taking Jiangxi Province as a Case Study

Tang Xinggang¹, Wang Huiyong¹, Huang Dou², Zhang Jinchi¹

(1.Co-innovation Center for the Sustainable Forestry in Southern China, Jiangsu Province

Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China; 2.College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China)

Abstract: [Objective] The distribution predicting of landslide disasters in the Yangtze River basin were conducted to strengthen hidden danger investigation and risk assessment, and to improve disaster response capabilities. [Methods] Based on 1 211 landslide distribution points and 15 environmental variables, the MaxEnt model was used to predict the distribution of landslide-prone areas in Jiangxi Province. Then the Jackknife test was used to evaluate the importance of 15 environmental variables to the prediction results. Finally, the area and distribution of landslide prone areas with different risk levels and the main environmental variables affecting the occurrence of landslide disasters were determined. [Results] The extremely high, high, and medium landslide-prone areas in Jiangxi Province accounted for 29.6%, 36.5%, and 23% of the total area of the province, respectively. The probability of landslide occurrence gradually increased from the

收稿日期:2021-02-09

修回日期:2021-02-22

资助项目:江苏省农业科技自主创新项目“典型困难立地生态经济防护林营建技术方案”[CX(17)1004]; 林业公益性行业科研专项“露采石矿植被恢复与重建关键技术研究示范”(201504406); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

第一作者:唐兴港(1997—),男(汉族),山东省聊城市人,硕士研究生,研究方向为水土保持。Email:simaojiu@126.com。

通讯作者:张金池(1962—),男(汉族),山东省安丘市人,教授,博士生导师,主要从事水土保持和林业生态工程方面的研究。Email:zhang8811@njfu.edu.cn。

Poyang Lake plain (as the center) to the surrounding areas, and was concentrated in the western and southern mountainous and hilly areas of Jiangxi Province. Altitude, slope, normalized difference vegetation index (NDVI), average annual rainfall, and distance from rivers and roads were the main environmental variables affecting the occurrence and distribution of landslides, and the cumulative contribution rate was more than 83%. [Conclusion] The distribution of landslide-prone areas in Jiangxi Province has obvious spatial differences, mainly associated with areas of high altitude, complex geology, and developed joints and cracks in rock formations. Rainfall is the direct inducing factor for landslide occurrence.

Keywords: landslides; MaxEnt model; environment variables; the Yangtze River; susceptibility assessment

近期,在自然资源部发布的2020年下半年地质灾害趋势预测中指出防灾减灾形势严峻,在极端气象条件下要预防滑坡和泥石流等灾害的发生。滑坡是世界范围内最具危险性和多发性的地质灾害,在全球变暖背景下,中国西高东低的独特地理环境和日益活跃的经济建设使得滑坡灾害日益频繁^[1]。在2017年近7000起的地质灾害中滑坡灾害占比约75%,经济损失超 4.00×10^9 元,成为中国最具破坏性的地质灾害^[2]。从致灾因子来看,地形、地质和人类活动都会导致斜坡面的物质移动,天气因素尤其是极端降雨是导致滑坡等地质灾害发生的直接诱因^[3]。

20世纪以来,温室效应引发全球气候变暖,地表平均气温升高和极端天气事件频发使得滑坡和泥石流等自然灾害不断加剧^[4-6]。IPCC5预估气候变化的影响可能进一步加剧,未来中国大部分地区降雨量将持续增多,呈现明显的极端化和区域差异^[6-8]。长江流域横跨三级阶梯,总面积 1.80×10^6 km²,既是滑坡等地质灾害的高发区,也是气候变化的敏感区。其中长江中下游地区降雨和地形关系密切,且经济发达,人口密集,在全球变暖的背景下如何合理的预测滑坡灾害潜在分布就变得十分必要^[9-10]。

当前应用于滑坡灾害预测研究的模型和方法主要包括人工神经网络模型、随机森林模型、决策树预测模型和支持向量模型等^[11-14]。机器学习模型作为一种强大的数据驱动工具,能够在分析过程中充分考虑到滑坡发生与环境因子之间的非线性关系,在很大程度上克服了概率统计模型主观性强的局限^[15]。基于机器学习模型和遥感地信技术的滑坡灾害预测已经成为灾害防治领域最为经济有效的工具。MaxEnt是一种在JAVA和最大熵理论的基础上用来评估物种潜在分布的工具,可以用来模拟森林植被潜在分布并合理预测在不同环境条件下物种可能出现的地区^[16]。在物种潜在分布的预测方面,其较强的预测能力和相对较高的预测精度是MaxEnt模型相较于其他模型的优点,同时支持多种不同的变量类型^[17-18]。近年来,MaxEnt模型在滑坡预测领域的应

用逐渐成熟,在多变量回归模型、多元自适应回归、分类回归树和MaxEnt模型预测西班牙德巴河谷滑坡预测的研究中,MaxEnt模型的预测精度明显高于其他模型^[19]。其基于工程类比的思想对目标空间进行建模分析,当预测区域的地质、水文和人类活动等环境变量与滑坡发生区越相似时,该区域发生滑坡的机率也就越高。

作为一种多因素、破坏性的地质现象,滑坡发生机制十分复杂,是多种环境变量相互作用的结果。滑坡的发生位置、破坏强度和后果都与灾害发生区的基础环境条件和即时诱发因素密切相关^[20]。在滑坡灾害的分布预测和风险研究中要有针对性的合理确定环境变量,重点反映所选变量与灾害发生的规律^[21]。本研究以江西省为例,综合滑坡灾害研究中环境变量的作用,选取地形地貌、地质岩性、植被覆盖和人类活动等15个环境指标对江西省境内的滑坡分布情况进行模拟,探究MaxEnt模型在滑坡易发性评价中的适用性,并对模拟结果进行灾害风险的等级划分。同时根据刀切法对参与建模的环境变量进行重要性评估,确定影响滑坡灾害发生的主要环境变量,以期有效指导江西省的土地利用和灾害防治工作。

1 研究区概况

江西省位于中国东南部,属长江中下游流域,面积为 1.669×10^5 km²,地形以山地和丘陵为主。该区三面环山,中部为丘陵与河谷平原交错,北部是鄱阳湖平原。平原隶属于长江中下游平原,其面积约占全省总面积的23.2%,森林覆盖率高,植被以亚热带常绿阔叶林为主。气候上属典型的亚热带季风性湿润气候,夏季雨热同期,冬季温和湿润,全年降雨充沛,是我国多雨省区之一。受地形等因素的影响,降雨季节分配不均且具有明显的区域差异,庐山、武夷山、怀玉山和九岭山一带是全省4个多雨区。红壤和黄壤在江西省广泛分布,土体厚度不一但肥力相对较高。地质构造复杂,地层发育齐全,新构造运动强烈,滑坡等地质灾害频发。

2 数据来源及研究方法

2.1 滑坡数据

江西省滑坡灾害发生点数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心资源环境数据云平台,坐标系为 WGS84,滑坡分布数据经野外实地调查获取,其记录了历年来全国范围内滑坡的发生信息。本研究选取江西省内截至 2017 年的有效滑坡记录 3 652 个,其反映了该省滑坡发生的空间分布状况(图 1)。按照空间筛除法在一定距离内保留有限位点,按照均匀、随机的原则再次进行系统取样,确保将滑坡发生点的地理自相关降至最低^[22]。同时与聚类分组筛选和分组建模的取样结果相比较,在最大程度保留建模数据的同时,确保分布点对江西省滑坡分布的真实反映^[23]。将满足建模要求的 1 211 个滑坡分布点保存为(.csv)文件供后续使用。

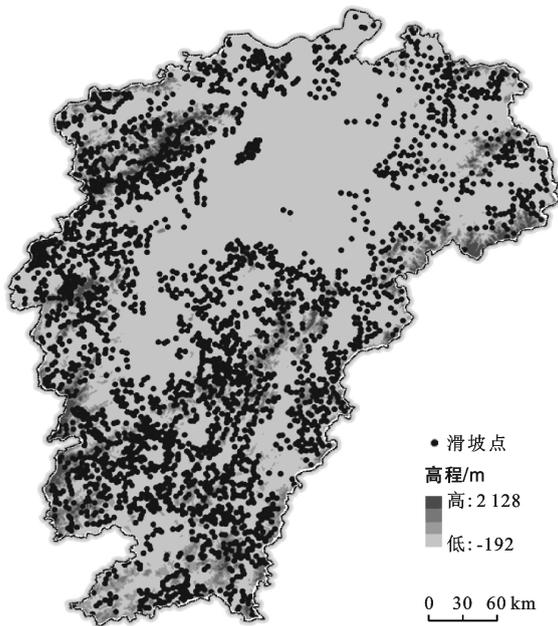


图 1 江西省海拔和滑坡分布点示意图

2.2 指标因子构建及处理

滑坡灾害的发生是多种环境因素共同影响的结果,研究选取海拔、坡度、坡向、植被覆盖、年均降雨量、土地利用和距道路的距离等共计 15 个环境变量建模。变量来源:①海拔数据从地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/search>)的数字高程模型 DEM 栅格数据获取,精度为 30 m。利用 ArcGIS 10.4 的栅格表面分析模块提取江西省的坡度、坡向、平、剖面曲率,综合利用空间分析工具获取江西省的地表粗糙度和地形湿度指数。②地质数据从中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>

Default.aspx)获取,主要包括岩性和断层分布数据。③道路和水系数据从地理国情监测云平台获取,利用 ArcGIS 10.4 的空间分析工具计算道路、水系和断层的欧氏距离并得到距离图层。④多年平均降水数据从 WorldClim (<http://www.worldclim.org/>)数据库获取。⑤植被归一化指数(NDVI)从 Landsat8 遥感影像数据获取,并通过大气校正和波段运算以避免大气和光照对遥感数据的影响,获得较为准确的归一化指数。⑥土地利用数据从中国科学院资源环境科学数据中心获取,包括耕地、林地、草地、水域、居民地和未利用土地 6 个一级类型和 25 个二级类型。利用 ArcGIS 10.4 软件的裁剪、投影和重采样等功能模块,将 15 个环境变量的投影坐标统一为 WGS_1984_UTM_48 N,空间分辨率为 30 m×30 m,对变量进行相关性分析后转为 ASC 格式参与模型构建和滑坡敏感性分析。

2.3 指标因子选取及建模优化

变量的多重共线性会影响 MaxEnt 模型预测结果的精度和准确性,故采用 Pearson 相关性对变量进行检验。首先将 15 个环境变量和 1 211 个滑坡分布点加载到 MaxEnt 模型,利用刀切法确定环境变量的重要性,并按照因子贡献率大小进行排序。然后对 15 个环境变量进行相关性分析,若两个变量的相关系数大于 0.8,应删除两个变量中贡献率较少的,经检验 15 个变量相关性在允许范围内。

特征组合(feature combination, FC)通过数学转换的方式使 MaxEnt 模型利用复杂数学关系来推测滑坡对环境因子的响应。调控倍率(regularization multiplier, RM)作为模型约束可以优化模型的响应曲线,这两个参数对于模型的预测结果十分重要^[24]。在 R 软件中通过调用 ENMeval 数据包来确定这两个参数,从而对 MaxEnt 模型进行优化。模型包括 L, Q, H, P 和 T5 种特征,分别代表了线性(linear)、二次型(quadratic)、片段化(hinge)、乘积型(product)和阈值性(threshold)。为了确定 FC 和 RM 的最佳组合,将 RM 限定在 0.5~4 的范围内以 0.5 递增,特征组合为 L, LQ, H, LQH, LQHP, LQHPT。利用 ENMeval 数据包检验 48 种参数组合, Akaike 信息量准则(AICc)反映了模型的拟合度和复杂性,最小 AICc 值的模型应该被优先考虑^[25]。采用训练集和测试集的 AUC 值之差(AUC.DIFF)和 10% 训练遗漏率(OR10)来评估模型的过拟合程度,利用 AUC 来评估模型的准确性^[26]。

2.4 研究方法

基于江西省 1 211 个滑坡数据和 15 个环境变量,首先将滑坡数据和参与建模的 15 个环境变量加载到模型中,然后将滑坡点的数据按照 3 : 1 的比例分配给训练集(training data)和测试集(testing data)。模型的特征组合和调控倍率由 ENMeval 数据包优化获得,其他参数则保留默认值。模型进行 500 次迭代运算后,结果以 ASCII 文件类型输出,采用敏感度和特异性之和最大的方法来确定滑坡敏感区的分类阈值,同时参考正态分布理论与专家经验法^[27]。ArcGIS 10.4 对滑坡预测结果进行重分类, $p \geq 0.72$ 为极高易发区, $0.53 \leq p < 0.72$ 为高易发区, $0.25 \leq p < 0.53$ 为中易发区, $p < 0.25$ 为低易发区。ROC 曲线下的面积(AUC)被用来评估模型的可靠性,AUC 值在 0.9~1.0 之间时说明预测结果非常优秀。

3 结果与分析

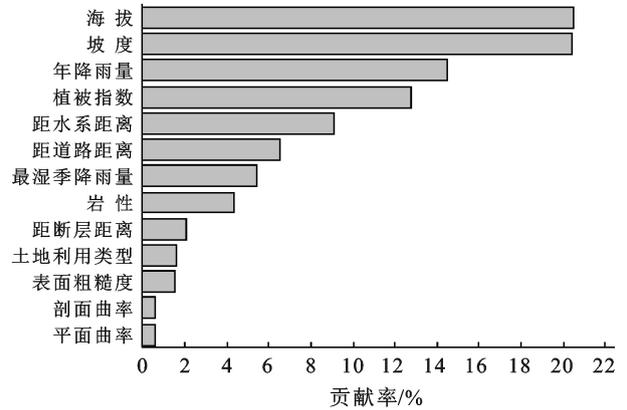
3.1 模型准确性

ROC 曲线是目前认可度较高的模型诊断试验评价指标,该曲线由灵敏度和特异度为坐标轴绘制。ROC 曲线所包围区域的面积为 AUC,其值在 0~1 的范围内,AUC 值与模型的预测精度成正相关,即 AUC 值越高,模型结果的可靠性越高。滑坡数据和环境变量建立的 MaxEnt 模型在匹配发生记录方面表现良好,训练集与测试集的 AUC 平均值分别为 0.932,0.912,表明模型预测达到优秀的水平,可以很

好地模拟江西省滑坡灾害空间分布和确定影响滑坡分布的主要环境因子。

3.2 环境变量对模型的贡献率

环境变量的贡献率是衡量其对预测结果重要性的指标。在本研究中,我们使用百分比贡献率来区分不同变量对滑坡发生的影响。根据模拟结果,影响滑坡易发区分布的主要环境变量依次是海拔(20.5%)、坡度(20.4%)、年降雨量(14.5%)、植被指数(12.8%)、距水系距离(9.1%)和距离道路的距离(6.5%),其累计贡献率为 83.8%,对滑坡分布具有重要影响(图 2)。



注:贡献率低于 1% 的变量未列出。

图 2 长江中下游地区环境变量对滑坡发生的贡献率

3.3 滑坡发生与环境变量的关系

长江中下游地区主要环境变量的响应特征如图 3 所示。

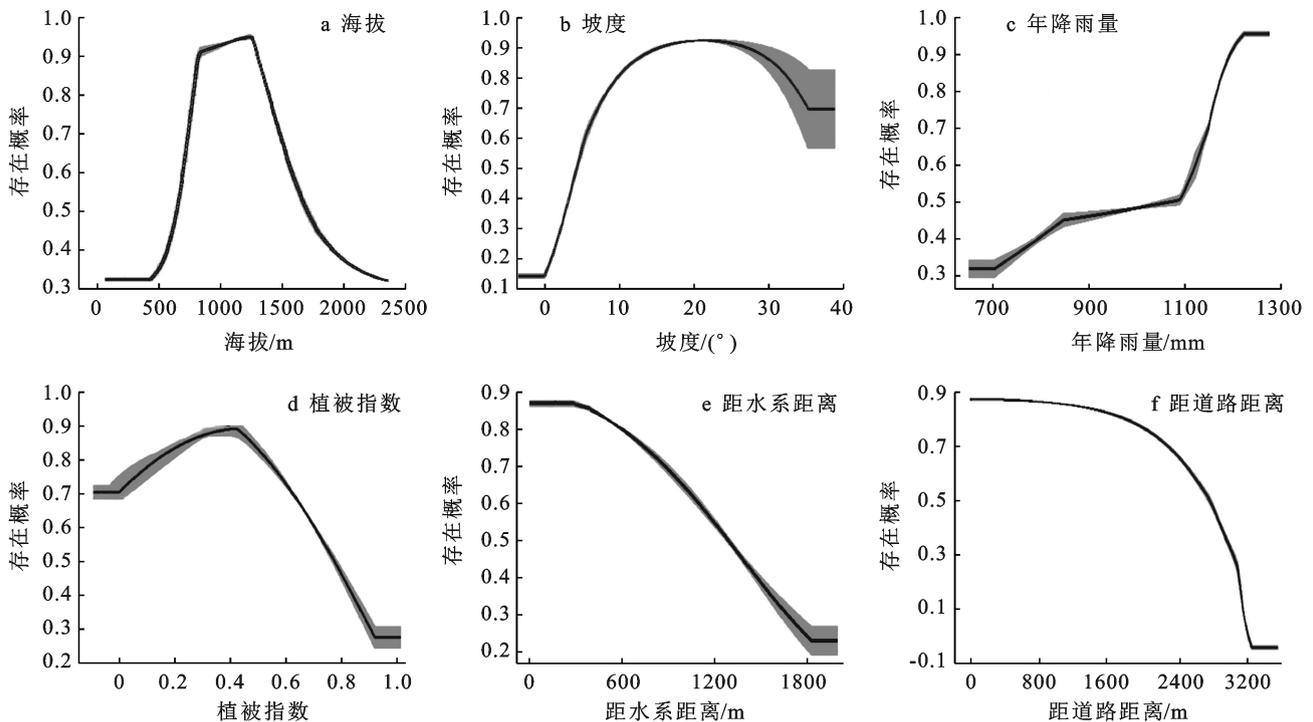
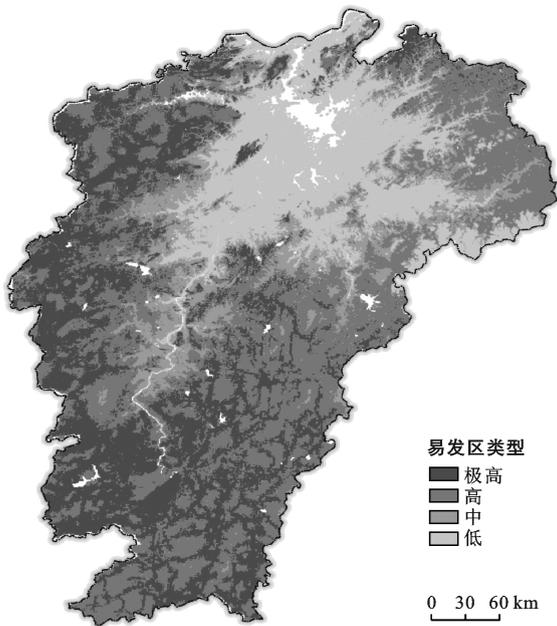


图 3 影响长江中下游地区滑坡发生的主要环境变量响应曲线

由图 3 可知,滑坡发生与多种因素有关,其中海拔无疑是影响滑坡的最主要因素。从海拔与滑坡的响应曲线中可以发现江西省的滑坡主要集中在 800~1 300 m 的范围内。坡度是滑坡的另一个重要影响因子,其与海拔密切相关。坡度与滑坡发生的概率呈正相关,主要集中在 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 之间,坡度过大时滑坡概率降低。降水是滑坡发生的重要诱发因素,其增加了土壤含水量,减弱了剖面的抗滑能力。根据年均降雨量与滑坡的响应曲线,降雨量越多的地区,发生滑坡的风险也就越高。植被指数反映了地表植被覆盖的程度,随着植被指数的增加,江西省滑坡的发生概率总体上呈现不断下降的趋势。在与水系和道路的距离方面,江西省滑坡发生概率均与之呈现负相关,随着与水系和道路之间距离的增加,河流侵蚀和人类活动对滑坡的影响不断降低。

3.4 滑坡地理分布

根据 MaxEnt 模型的预测结果,并按照敏感度和特异性之和最大的方法进行重分类。江西省滑坡分布区分为 4 类,分别为极高易发区、高易发区、中易发区和低易发区(图 4)。



注:地图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)3333 号的标准地图制作,底图无修改。

图 4 基于 MaxEnt 模型的江西省滑坡易发区分布

统计显示极高易发区面积 4.94×10^5 km², 占全省总面积的 29.6%, 主要分布在幕阜山、庐山、浮梁县黄龙尖、婺源县莲花山、怀玉山、九岭山、武夷山和罗霄山等地区。高易发区面积 6.09×10^5 km², 占全省总面积的 36.5%, 主要分布在瑞昌、赣西北山区、大浩山、梅岭、万年县和浮梁—婺源地区。中易发区面积

3.84×10^5 km², 占全省总面积的 23%, 主要分布在鄱阳湖平原与丘陵的交界地带, 例如湖口县和彭泽县等地区。低易发区面积 1.82×10^5 km², 占全省总面积的 10.9%, 主要分布在鄱阳湖及五大河沿岸河谷平原。江西省滑坡易发区的划分具有明显的空间差异, 极高和高易发区的面积占全省总面积的比例较大, 滑坡发生的概率以鄱阳湖平原为中心向四周呈现逐渐增加的趋势。滑坡集中分布在海拔较高的山地丘陵地带, 以西部和南部地区最为严重, 这些地区地质复杂, 岩层节理裂隙发育, 滑坡灾害较为频发。

4 讨论与结论

4.1 讨论

中国地处环太平洋构造带和喜马拉雅构造带交汇处, 构造活跃, 是地质灾害多发国家, 灾害类型多样^[28]。长江流域是中国的经济核心地带, 受到阶级交界和季风的影响, 水土流失和滑坡灾害频发^[29]。预测中国长江流域滑坡灾害发生区, 有利于提升对“隐患”的准确判断, 强化隐患排查和危险评估, 通过国土空间规划和用途管制等措施提升灾害的应对能力。本研究利用 1 211 个滑坡分布点和 15 个环境变量, 通过 MaxEnt 模型和 ArcGIS 软件对江西省的滑坡易发区分布进行预测, 同时采用 Jackknife 检验评估 15 个环境变量对预测结果的重要程度, 确定了影响滑坡灾害发生的主要环境变量。在准确性方面, AUC 值与模型的预测精度成正相关, 本研究中训练集与测试集的 AUC 平均值分别为 0.932, 0.912, 表明模型在对滑坡分布的预测中具有优异的表现, 其结果有较高的精准度。

最大熵理论最早提出于 1957 年, 在机器学习中得到广泛应用。MaxEnt 模型便是基于这一理论和 JAVA 语言发展而来的, 目前已成为最常用的物种分布模型^[16]。其基本思想是利用已知事件对目标空间分布进行建模, 即与已知环境越相似, 物种存在的概率越高。2013 年 MaxEnt 模型被引到滑坡灾害的预测研究中, 相比于常用的信息熵模型, MaxEnt 模型的精度更高, 可有效避免模型过拟合的发生^[19]。Aiding Kornejady 等^[30]利用 MaxEnt 模型评估了伊朗格列斯坦省吉拉特河的滑坡敏感性, AUC 值分别为 0.884, 0.878, 均能较好地模拟研究区滑坡的敏感性。本研究 MaxEnt 模型的 AUC 值大于 0.9, 模拟结果具有更高的可信度。

在模型的因子选择上, 考虑到地形地貌、地质、植被覆盖、水文和人类活动等多种滑坡内在驱动因素的影响作用, 选取了 15 个环境变量参与建模, 并最终确

定了 6 个影响滑坡发生与分布的主要环境变量。随着海拔高度的增加,植被具有垂直地带性,同时岩土体的含水率和人类活动的强度也受到限制^[31]。滑坡在海拔 800~1 300 m 时发生的概率最大,表现出海拔高度的相对集中性,这与金沙江白格滑坡、哈尼梯田滑坡和湘西自治州的滑坡预测结果表现一致^[1,32-33]。这主要是因为海拔过高时,地表无大片的冲洪积物覆盖,同时“山高沟深”的地貌特征使得沉积物难以存留累积,缺少堆积体^[34]。坡度的响应曲线与海拔类似,滑坡主要集中在 15°~30°的较缓坡度区,过陡的坡面滑坡概率相对下降。自然条件下滑坡所处坡体坡度越大,临空面的黏性力越小,斜坡受重力影响越大,滑坡发生可能性越大,但当坡度过大时,滑坡向小型化发展,不同的坡度区间对于相同规模的滑坡作用效果不同^[35]。华宁县滑坡灾害在 10°~30°的坡度范围内易发性较高,与江西省的滑坡灾害相似,集中发育在较缓坡度区^[33]。植被是防治土壤侵蚀和固土护坡的关键,一方面可以减轻雨滴溅蚀和抑制坡面径流冲刷,另一方面利用植物的“锚固加筋”作用增加土质强度,增强斜坡稳定性^[36]。滑坡灾害的发育和发生与河流的特征有密切关系,河流通过其流水活动影响和改变地理环境。在距离河流不同的区域受其影响不同,河流的流量、流速、水位等水情要素等对滑坡的产生有一定的影响^[33]。河流下切和侧蚀之后,由于岸坡脚堆积岩土体的流失,使其对滑体的支撑作用减弱,降低了滑坡的稳定性,随着与河流距离的增加,滑坡的风险性不断降低^[37]。降水是地质灾害发生的主要诱发因素,体现在滑坡和泥石流等灾害多发于降水集中阶段。短时间的强降雨或者连续的阴雨天气使得滑坡体因含水量的增加而出现下滑趋势,这与稳定岩体间的抗拉强度降低密切相关^[38]。相较于雨水较少的地区,年降水量的增多增加了滑坡的风险。在横断山北部地区,极端降水极易诱发滑坡、崩塌和泥石流等山地灾害^[5]。

当前世界处于全球变暖的大背景下,气候变化通过影响气温和降水来间接影响地质灾害的发生。气温上升会改变降雨的频率和强度,影响岩土体的稳定性。气候变化强化了降雨的年际变化和区域分布的不均匀性,引发局部地区的干旱,影响植被的生长和地下水水位^[39]。旱涝急转加剧地质不稳定性的同时,为灾害的发生预报带来新的挑战,使得许多降雨致灾阈值的研究不断涌现^[40]。今后在对地质灾害进行预测预报的同时,还应该关注气候变化下新的灾害发生趋势,及时发现新的灾害易发区,采取合理措施确保人民生命和财产安全。

4.2 结论

(1) 以长江中下游的江西省为研究对象,将 MaxEnt 模型引入滑坡易发性评价体系,选取地形、地质、水文和人类活动等 15 个因子进行建模分析。滑坡易发区分布的模拟结果与实际分布较一致,模型评价指标 AUC 均值达到 0.932,表明模拟结果具有较强的可信度和准确性。

(2) 根据刀切法对参与模型建立的环境变量进行评价,按照变量的贡献率,海拔、坡度、年降雨量、植被归一化指数(NDVI)、距离水系和道路的距离是影响滑坡发生和分布的主要环境变量,其中降雨是滑坡发生的直接诱导因子。

(3) 极高、高和中易发区分别占 29.6%,36.5%和 23%,滑坡易发性的空间分布差异明显,极高易发区和高易发区主要分布在江西省的东、西和南面的山地丘陵地带。气候变化背景下,未来气候将通过影响降水和植被等因素进而改变滑坡发生分布和敏感性,为灾害的发生预报带来新的挑战。

[参 考 文 献]

- [1] 赵冬梅,角媛梅,邱应美,等.基于 MaxEnt 模型的哈尼梯田核心区滑坡易发性评价[J].水土保持研究,2020,27(4):392-399.
- [2] 李晴.基于统计学的川渝地区滑坡影响因子及其危险性评价[D].北京:中国地质大学,2019.
- [3] 张娇艳,李扬,王玥彤,等.未来气候变化对西南地区地质灾害的可能影响[J].高原山地气象研究,2020,40(2):70-77.
- [4] 周莉,兰明才,蔡荣辉,等.21 世纪前期长江中下游流域极端降水预估及不确定性分析[J].气象学报,2018,76(1):47-61.
- [5] 李沁汶,王玉宽,徐佩,等.未来气候变化情景下横断山北部灾害易发区极端降水时空特征[J].山地学报,2019,37(3):400-408.
- [6] Allan R P, Soden B J. Atmospheric Warming and the Amplification of Precipitation Extremes [J]. Science, 2008,321(5895):1123-1138.
- [7] 陈活泼. CMIP5 模式对 21 世纪末中国极端降水事件变化的预估[J].科学通报,2013,58(8):743-752.
- [8] 张天宇,范莉,程炳岩,等.1961—2007 年三峡库区极端降水指数 R5 d 的变化规律及其未来情景预估[J].中国农业气象,2010,31(2):176-182.
- [9] 熊伟,居辉,许吟隆,等.气候变化对中国农业温度阈值影响研究及其不确定性分析[J].地球科学进展,2006,21(1):70-76.
- [10] 李博,周天军.基于 IPCC A1 B 情景的中国未来气候变化预估:多模式集合结果及其不确定性[J].气候变化研究进展,2010,6(4):270-276.

- [11] 高宁,高彩云.基于时序 AR 补偿 RBF 模型的滑坡位移预测[J].人民长江,2020,51(3):119-122.
- [12] 王念秦,郭有金,刘铁铭,等.基于支持向量机模型的滑坡危险性评价[J].科学技术与工程,2019,19(35):70-78.
- [13] 何原荣,傅文杰.模糊支持向量机在滑坡危险性评价中的应用[J].自然灾害学报,2009,18(5):107-112.
- [14] 赵晓萌,卫星君,王娜,等.降雨型滑坡灾害的特征集合决策树预测模型[J].灾害学,2020,35(1):27-31.
- [15] Dickson M E, Perry G. Identifying the controls on coastal cliff landslides using machine-learning approaches [J]. *Environmental Modelling and Software*, 2016,76(4):117-127.
- [16] 张路. MAXENT 最大熵模型在预测物种潜在分布范围方面的应用[J].生物学通报,2015,50(11):9-12.
- [17] 朱耿平,乔慧捷. MaxEnt 模型复杂度对物种潜在分布区预测的影响[J].生物多样性,2016,24(10):1189-1196.
- [18] Elith J, Phillips S J, Hastie T, et al. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists [J]. *Diversity and Distributions*, 2011,17(1):43-57.
- [19] Felicísimo Á, Cuartero A, Remondo J, et al. Mapping landslide susceptibility with logistic regression, multiple adaptive regression splines, classification and regression trees, and maximum entropy methods: A comparative study [J]. *Landslides*, 2013,10(2):175-189.
- [20] Fell R, Corominas J, Bonnard C, et al. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning [J]. *Engineering Geology*, 2008,102(3):99-111.
- [21] 张福浩,朱月月,赵习枝,等.地理因子支持下的滑坡隐患点空间分布特征及识别研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2020,45(8):1233-1244.
- [22] 王国峥,耿其芳,肖孟阳,等.基于 4 种生态位模型的金钱松潜在适生区预测[J].生态学报,2020,40(17):6096-6104.
- [23] 孔维尧,李欣海,邹红菲.最大熵模型在物种分布预测中的优化[J].应用生态学报,2019,30(6):2116-2128.
- [24] 朱耿平,原雪姣,范靖宇,等. MaxEnt 模型参数设置对其所模拟物种地理分布和生态位的影响:以茶翅蝽为例[J].生物安全学报,2018,27(2):118-123.
- [25] 蔡波,黄勇,陈跃英,等.中国蛇类物种丰富度地理格局及其与生态因子的关系[J].动物学研究,2012,33(4):343-353.
- [26] 贾翔,王超,金慧,等.基于优化的 MaxEnt 模型评价红松适宜分布区[J].生态学杂志,2019,38(8):2570-2576.
- [27] Phillips S J, Dudik M, Elith J, et al. Sample selection bias and presence-only distribution models: implications for background and pseudo-absence data [J]. *Ecological Applications*, 2009,19(1):181-197.
- [28] 吴中海,周春景,谭成轩,等.长江经济带地区活动构造与区域地壳稳定性基本特征[J].地质力学学报,2016,22(3):379-411.
- [29] 徐杰,马宗晋,陈国光,等.中国大陆东部新构造期北西向断裂带的初步探讨[J].地学前缘,2003,10(S1):193-198.
- [30] Kornejady A, Ownegh M, Bahremand A. Landslide susceptibility assessment using maximum entropy model with two different data sampling methods [J]. *Catena*, 2017,152(1):112-125.
- [31] 孙艳萍,张苏平,陈文凯,等.汶川地震滑坡危险性评价:以武都区 and 文县为例[J].地震工程学报,2018,40(5):1084-1091.
- [32] 张福浩,朱月月,赵习枝,等.地理因子支持下的滑坡隐患点空间分布特征及识别研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2020,45(8):1233-1244.
- [33] 吴常润,赵冬梅,刘澄静,等.基于 GIS 的华宁县滑坡灾害影响因子分析及易发性评价[J].水土保持研究,2019,26(6):212-218.
- [34] 成永刚,程谦恭.斜坡海拔高度对滑坡贡献率的研究[J].路基工程,2014,32(5):57-60.
- [35] 倪树斌,马超,杨海龙,等.北京山区崩塌、滑坡、泥石流灾害空间分布及其敏感性分析[J].北京林业大学学报,2018,40(6):81-91.
- [36] 杨坪坪,李瑞,盘礼东,等.地表粗糙度及植被盖度对坡面流曼宁阻力系数的影响[J].农业工程学报,2020,36(6):106-114.
- [37] 郭京平.河流侵蚀对滑坡稳定性影响研究[J].甘肃水利水电技术,2019,55(11):38-41.
- [38] 张娇艳,李扬,王玥彤,等.未来气候变化对西南地区地质灾害的可能影响[J].高原山地气象研究,2020,40(2):70-77.
- [39] 魏丽,单九生,朱星球.植被覆盖对暴雨型滑坡影响的初步分析[J].气象与减灾研究,2006,29(1):29-33.
- [40] 刘凤丽,黄国兵.旱涝急转形成机理及城市防涝减灾体系研究进展[J].长江科学院院报,2012,29(11):28-32.