

中国科技核心期刊 《中国科学引用文数据库》来源期刊 Caj-cd规范获奖期刊

THE CHINESE JOURNAL OF GEOLOGICAL HAZARD AND CONTROL

基于不同统计模型的肯尼亚滑坡危险性评价

周苏华,付宇航,邢静康,彭爱泉,蒋明奕

Assessment of landslide hazard risk in Kenya based on different statistical models

ZHOU Suhua, FU Yuhang, XING Jingkang, PENG Aiquan, and JIANG Mingyi

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202206006

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于机器学习的滑坡崩塌地质灾害气象风险预警研究

Exploring early warning and forecasting of meteorological risk of landslide and rockfall induced by meteorological factors by the approach of machine learning

李阳春, 刘黔云, 李潇, 顾天红, 张楠 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 118-123

基于RBF神经网络信息量耦合模型的滑坡易发性评价

Landslide susceptibility assessment by the coupling method of RBF neural network and information value: A case study in Min Xian, Gansu Province 黄立鑫, 郝君明, 李旺平, 周兆叶, 贾佩钱 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 116–126

基于不同评价单元和灾害熵的泥石流危险性分析

Hazard analysis of debris flows based on different evaluation units and disaster entropy: A case study in Wudu section of the Bailong river basin

李小龙, 宋国虎, 向灵芝, 罗亮, 唐良琴, 沈娜, 梁梦辉 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 107-115

肯尼亚滑坡灾害分布特征及敏感性区划

\${suggestArticle.titleEn} 杨先全,周苏华,邢静康,朱生龙 中国地质灾害与防治学报.2019,30(5):65-74

机器学习模型在滑坡易发性评价中的应用

Application of machine learning model in landslide susceptibility evaluation 刘福臻, 王灵, 肖东升 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 98-106

基于数值模拟的群发性泥石流危险性评价

Risk assessment of mass debris flow based on numerical simulation: An example from the Malu River basin in Min County 曹鹏, 侯圣山, 陈亮, 冯振, 王立朝, 李昂, 刘军友 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 100–109



关注微信公众号,获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202206006

周苏华, 付宇航, 邢静康, 等. 基于不同统计模型的肯尼亚滑坡危险性评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(4): 114-124. ZHOU Suhua, FU Yuhang, XING Jingkang, et al. Assessment of landslide hazard risk in Kenya based on different statistical models[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(4): 114-124.

基于不同统计模型的肯尼亚滑坡危险性评价

周苏华1,2,付宇航1,邢静康1,彭爱泉3,蒋明奕1

 (1. 湖南大学土木工程学院,湖南长沙 410006; 2. 湖南大学建筑安全与节能教育部重点实验室, 湖南长沙 410006; 3. 贵州交通职业技术学院机械电子工程系,贵州贵阳 550081)

摘要:肯尼亚是我国"一带一路"倡议在东非重要支点。受高原裂谷地形和显著的雨旱季节影响,肯尼亚地质灾害频发。 本文以肯尼亚的历史滑坡数据为样本,选取高度、坡度、坡向、地貌、平面曲率、土壤类型、年平均降雨量、水流强度指 数、地形湿度指数及土地利用类型作为评价指标,分别基于信息量模型(IV)、逻辑回归模型(LR)和极限学习机模型 (ELM)对肯尼亚滑坡灾害进行危险性区划,其中ELM分别考虑了 sigmoid 函数、正弦函数和对称阈值型传输函数作为激 活函数进行讨论。主要结论如下:(1)肯尼亚滑坡灾害高危险性及以上等级区域集中分布在西南部的高原和高原—裂谷 过渡地带;(2)采用 ROC 曲线对模型精度进行评价,各模型的 AUC 值分别为 0.977(IV)、0.965(LR)、0.859(ELM-SIG)、0.900 (ELM-SIN)、0.941(ELM-HARDLIM),评价结果有效;(3)综合 PR 曲线结果判定,LR 模型的召回率和精确率都处于较高的 水平,优于其他模型;(4)肯尼亚内罗毕省(Nairobi)、中部省(Central)、尼扬扎省(Nyanza)和西部省(Western)四个省份高危 险性区域占比较大。

关键词:肯尼亚;危险性;信息量;逻辑回归;机器学习 中图分类号: P642.22; 文献标志码: A 文章编号: 1003-8035(2023)04-0114-11

Assessment of landslide hazard risk in Kenya based on different statistical models

ZHOU Suhua^{1,2}, FU Yuhang¹, XING Jingkang¹, PENG Aiquan³, JIANG Mingyi¹

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410006, China; 2. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of the Ministry of Education, Changsha, Hunan 410006, China; 3. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Guizhou Communications Polytechnic, Guiyang, Guizhou 550081, China)

Abstract: Kenya is an important fulcrum of China's Belt and Road initiative in east Africa. However, due to its plateau rift terrain and aboriginal rain and drought season, geological disasters occur frequently in Kenya. The study used historical landslide data in Kenya as samples and selected several evaluation indexes, including elevation, slope, aspect, landform, plane curvature, soil type, annual average rainfall, stream power index, terrain witness index, and land use type. The landslide risk in Kenya was evaluated based on the information value model (IV), logistic regression model (LR), and extreme learning machine model (ELM), with the ELM model considering SIG, SIN, and HARDLIM functions as activation functions for discussion. The main findings are as follows: (1) The high-risk and above-grade areas of landslide disasters in Kenya are mainly concentrated in

收稿日期: 2022-06-07; 修订日期: 2022-10-10

投稿网址: https://www.zgdzzhyfzxb.com/

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51708199);贵州省科技支撑计划项目(2020-4Y047);贵州省交通运输厅科技项目(2017-143-054);福建省地质灾害重点实验室自主课题(KLGHZ202104);创新平台与人才计划-湖湘高层次人才聚集工程-创新团队 (2019RS1030);长沙市自然科学基金项目(kq2208031);湖南省自然科学基金(2023JJ30135)

第一作者:周苏华(1987-),男,江苏盐城人,副教授,博士,从事岩土工程风险评价研究。E-mail: zhousuhua@hnu.edu.cn

the plateau and plateau-rift transition zone in the southwest. (2) The ROC curve was used to evaluate the accuracy of the models, and the *AUC* values of the 0.977(IV), 0.965(LR), 0.859(ELM-SIG), 0.900(ELM-SIN), and 0.941(ELM-HARDLIM) models illustrate their validity. (3) Considering the PR curve results comprehensively, the recall rate and precision rate of the LR model are at a high level, marking it better than other models. (4) Nairobi, Central, Nyanza and Western provinces in Kenya account for a significant proportion of the high-risk and above-grade areas of landslide disasters.

Keywords: Kenya; risk; information value; logistic regression; machine learning

0 引言

肯尼亚位于非洲东部,是我国"一带一路"倡议的重要沿线国家,地形以高原山地为主,东非大裂谷纵贯南北。肯尼亚大部分地区分布在赤道附近,以热带草原性 气候为主,降水分为明显的旱雨两季,受地形和雨季气 候影响,境内滑坡、泥石流等地质灾害频发^[1]。

国内外学者在地质灾害风险评估方面开展了一系 列研究。早在18世纪70年代,如Coulomb等^[2], Terzaghi 等^[3], Janbu 等^[4]最先基于极限平衡方法对边坡的稳定性 问题进行了探索。自20世纪60年代以来,借助计算机 技术,以有限元法^[5]为代表的数值分析方法在边坡稳定 性分析中得到广泛应用。然而,这类方法严重依赖于详 细的边坡物理力学参数,且计算过程非常耗时。因此, 虽然二者在分析边坡时具有明确的物理意义,但多用于 单个边坡的详细分析。随着计算机技术的进一步发展, Roger 等^[6]于 1962 年首次提出了"地理信息系统"(GIS) 概念,在此基础上,频率比^[7]、逻辑回归^[8]、神经网络^[9]、 支持向量机[10]、层次分析法[11-12]等方法逐渐被应用 于区域尺度上的地质灾害风险评价研究中。如张俊 等[13]以重庆市万州区为研究对象,建立了信息量和逻 辑回归的组合模型并得到了全区滑坡易发性区划图; Chen 等^[14]以宝鸡市的滑坡灾害为分析对象建立了确定 性系数和层次分析法的组合模型,从灾害分布等角度出 发对模型效果进行了论证;刘璐瑶等[15]建立了确定性系 数和逻辑回归的组合模型并对永嘉县滑坡灾害易发性 进行了评价,从准确率等角度出发验证了组合模型的优 2021)^[16]中根据项目重要性和地质复杂程度针对建设场 地范围内不同种类的地质灾害的防治对策进行了划分, 建议采用定性和半定量组合的方法进行地质灾害危险 性评价。尽管相关研究已经形成了丰硕成果,但在分析 方法上多从参数优化、模型组合的角度进行考虑,对不 同统计模型间对比研究的关注则相对较少,同时研究对 象常选取为经济较发达的地区。像肯尼亚这类落后发 展中国家的地质灾害防治工作往往很少得到学者关 注。近年来,我国在肯尼亚援建了"蒙内铁路"、"内马 铁路"等多项重大工程。随着肯尼亚基础设施建设的大 力开展,人工对山体的扰动逐渐加剧,滑坡等地质灾害 发生风险也逐渐上升,给肯尼亚人民的生命财产安全造 成严重威胁的同时也直接影响我国"一带一路"战略的 顺利开展。

基于此,本文以肯尼亚地区为研究对象,以历史滑 坡数据为样本,分别运用信息量(双变量模型)、逻辑回 归(多变量模型)、和极限学习机(机器学习模型)对肯 尼亚滑坡灾害进行危险性评价,并依据 ROC 曲线和 PR 曲线对评价效果进行讨论。

1 研究区域概况

肯尼亚地处东非地区,陆地面积约 58.26×104 km², 东部地区以平原地形为主,而西部尤其是西南部地区主 要为高原山地地带,同时夹杂着裂谷等其他复杂地貌。 北部地区同样以海拔较低的平原为主,其中沙漠和半沙 漠覆盖面积广,约占肯尼亚国土面积的一半左右。区内 东非大裂谷控制了全区的地形走势,山脉主要展布方向 为南--北和西北--东南走向,在山脉之间和沿海地带分 布着大量高原和荒漠,地势由内陆山地向沿海地带倾 斜,西高东低,地形起伏大,地貌类型复杂(图1)。肯尼 亚地处赤道附近的沿海地带,大部分地区属于热带草原 性气候,降水分为明显的干湿两季,年降雨量1400~ 2 200 mm, 且降水多集中于 3—5 月及 10—12 月^[17]。受 地形和降水影响,区内河流和湖泊众多,但流域面积较 为有限,长度很少超过 200 km。肯尼亚位于非洲板块 和印度洋板块的交接地区,受地质构造运动影响,发育 着大量呈南北方向展布的多期构造,区内断裂和褶皱分 布较广。肯尼亚地层发育较为齐全,主要由沉积地层与 火成岩地层组成,其中沉积地层自太古代至第四系均有 不同程度的出露,火成岩地层则主要分布于东非大裂谷 附近的火山地区。复杂的地质条件和雨季的大量降水 为肯尼亚滑坡灾害的发生创造了客观条件[18]。肯尼亚 地形分布情况如图1所示。

第4期



图 1 肯尼亚概况 Fig. 1 Distribution map of geological hazards in Kenya

2 评价模型及指标

2.1 数据来源

本文以肯尼亚滑坡灾害为研究对象,采用 50 m× 50 m分辨率的基本评价单元。主要的数据来源包括: (1)肯尼亚历史滑坡数据集共包含 425 处历史滑坡,其 中滑坡数据集 1 来源于肯尼亚信息、通信和技术部的 公开数据^[19],包含肯尼亚 1999—2013 年间的 39 次滑 坡。滑坡数据集 2 来自全球毁灭性滑坡数据集库^[20],包 含 63 处滑坡。滑坡数据集 3 由 Broeckx 等^[21]编制的非 洲滑坡列表中提取获得,共包含 323 处滑坡。(2)数据 高程模型(DEM)数据来自 ASTERGDEMV2 卫星的全 球高程数据^[22],坡度、平面曲率提取于 DEM 数据;年平 均降雨量、土地利用类型、地貌等其他数据来自开放非 洲资源库^[23]和世界资源研究所^[24]。肯尼亚历史滑坡灾 害分布情况如图 1 所示。

由图 1 可知,肯尼亚的历史滑坡灾害点主要分布在 西南部的高原山地地区,尤其是在东非大裂谷附近,而 东部和南部的平原地区相对分布较少,侧面说明了地形 地貌对肯尼亚滑坡灾害的发生具有重大影响。杨先全 等^[17]对肯尼亚地区的灾害记录进行了分析并采用层次 分析法进行了易发性区划,发现洪水、极端降雨和滑坡 是肯尼亚的主要灾害类型,且当地的自然灾害主要发生 在每年的雨季期间(3—5月及 10—12月),但其评价方 法较为主观,且灾害样本数量较少(39例)。

2.2 评价指标

地质灾害是在一定的地质环境的条件下发生的。 在进行地质灾害风险研究之前,有必要对研究区域内所 有可能影响地质灾害发生的地理信息数据进行收集、 整理和分类。在广泛阅读相关文献的基础上,基于数据 的可用性、研究区域的特征等因素,共选取高度、坡 度、坡向、地貌、平面曲率、土壤类型、年平均降雨量、 水流强度指数、地形湿度指数及土地利用类型共10个 因素作为分析的评价指标对模型进行讨论,评价因子概 况如图 2 所示。

2.2.1 高程

高程即某点沿垂直方向至某点的绝对距离,是影响 滑坡等地质灾害发生、发展及其形态特征的重要因素 之一。肯尼亚地势西高东低,东部为广阔的沿海平原, 而西部地区受板块构造活动影响,平均海拔在1500 m 以上。在不同的高程范围内,地区的植被覆盖率、降雨 量、水热条件、温差变化及人类工程活动强度均具有明 显差异性,而这些因素也会直接或间接地影响着地质灾 害的发生。肯尼亚高程数据分布如图 2(a)所示。

2.2.2 坡度

坡度表征了崩塌灾害点和潜在危险边坡的地表陡 缓程度,一般以坡面某点到坡脚的垂直距离和水平距离 之比来表示。坡度越陡,其坡内水分和可溶性盐会逐渐 向下方堆积,会直接影响坡面植被分布。不同坡度位置,其坡体内水分的运动、坡面岩土体的剥蚀作用和物质分布、坡体内部的应力特征等情况也会有所不同,发 生滑坡的概率也会随之变化。肯尼亚坡度数据的分布 如图 2(b)所示。

2.2.3 坡向

坡向表示为坡面法线方向在平面上的投影和正北 方向的夹角。坡向对坡体所受的日照天数和总辐射量 都有影响,尤其是在肯尼亚这类热带草原气候影响强烈 的区域。由于所得到的太阳辐射量有所差异,不同坡向 的坡体表面水分蒸发、坡面植物分布、孔隙水压力和坡 体的干湿循环周期也会有所不同。肯尼亚坡向数据的 分布如图 2(c)所示。

2.2.4 地貌

地貌是地形因素的最直观表现,是影响坡体稳定性的另一个重要指标。不同地貌的坡体在临空面、植被覆盖率、受日照和风化程度以及人类活动影响等方面都具有一定的差异,是一个综合性的滑坡影响因子。肯尼亚境内涵盖着丰富的地貌类型,包含洼地、山麓、高原、平原等等。复杂的地形条件为肯尼亚地质灾害的发生提供更大的可能性。肯尼亚地形分布如图 2(d) 所示。

2.2.5 曲率

曲率表现为坡体表面的凹凸状况。曲率对坡体 表面的风化剥蚀和地表径流都有影响,是坡体临空面 最直观的体现。相对于其他曲率的斜坡体而言,平坦 地区的斜坡体要更加稳定。肯尼亚曲率分布如图 2(e) 所示。

2.2.6 土壤类型

依据土壤的各成分的含量不同,肯尼亚境内的土壤 可分为黏土、壤土等类型。其中砂土砂粒含量高,颗粒 间的空隙率较大,渗透性较强;黏土主要由黏粒构成,颗 粒间的空隙率较小,保水能力强;壤土中砂粒、粉粒以 及黏粒的比例相当,物理力学性质也介于黏土和砂土之 间。肯尼亚境内存在大量的黏土,许多地区黏土中黏粒 的含量更是超过 60%,被划分为高含量黏土。肯尼亚土 壤分布如图 2(f)所示。

2.2.7 年平均降雨量

肯尼亚的气候属于热带季风气候,降水具有明显的 季风气候特点,每年的2到5月为大雨季,10到12月为 小雨季,其余则为旱季。雨季期间,丰富的降水可以给 地表径流带来了大量水源补充,同时也提高了坡体的含 水率,劣化了其物理力学指标,滑坡等地质灾害发生的 概率也会随之升高。肯尼亚年平均降雨量空间分布情况如图 2(g)所示。

2.2.8 水流能力指数及地形湿度指数

水体的存在会对沿岸的岩土体产生相当大的侵蚀。土体的含水率越高,其抗剪强度就越低,在自然营力作用下的稳定性也就越差,会更易发生滑坡等地质灾害。水流能力指数(stream power index, SPI)和地形湿度指数(topographic wetness index, TWI)是衡量岩土体受水体影响程度的重要指标,其计算公式如下:

$$TWI = \ln\left(\frac{A}{\tan\beta}\right) \tag{1}$$

$$SPI = \ln(A \cdot \tan\beta) \tag{2}$$

式中:A——上游汇水区面积/km²;

 β ——对应位置的坡度/(°)。

肯尼亚 TWI 和 SPI 分布情况如图 2(h)和(i)所示。

2.2.9 土地利用类型

肯尼亚的土地利用类型包含农业用地、荒地、灌木 丛、林地、草地、沼泽、城镇用地,其他部分则为水体 (湖泊等)。一方面,土地利用类型能反映出人类活动的 影响程度,人类活动影响越强的地方对地质灾害发生所 造成的直接损失可能越严重,且人类活动的影响在一定 程度会影响到岩土体稳定性。另一方面,土地利用类型 也会影响当地的植被分布,而植被分布对滑坡等灾害具 有明显的防护作用。肯尼亚土地利用类型分布如图 2(j) 所示。

2.3 评价模型

根据计算方式的不同,滑坡等地质灾害的评价方法 可分为定性和定量两种,其中定性分析方法模型建立较 为简便,计算过程相对简单,但其主要根据专家的经验 打分确定权重,主观性较强;定量分析方法依据客观数 据进行计算,不受决策者主观因素的影响,在实践中得 到了广泛应用。根据分析模型的不同,定量分析方法可 进一步划分为双变量模型、多变量模型及机器学习模 型等,其中双变量模型着重于分析单个评价因素和目标 变量之间的关系,侧重单因素对目标变量的解释能力。 多变量模型则涉及研究两个或两个以上评价因素对目 标变量的影响,可反映目标变量对多种评价因素的变动 规律。机器学习是一门多领域交叉学科确定的计算方 法,调节过程依靠程序驱动,可根据评价结果不断改善 自身的性能。尽管国内外已经对区域性地质灾害危险 性问题做出过大量探索,但对于不同模型的对比研究相 对较少。基于此,本文结合收集到的历史灾害记录和矢



Fig. 2 Classification chart of each evaluation factor in Kenya

量数据,选取信息量(双变量模型)、逻辑回归(多变量 模型)、极限学习机(机器学习模型)分别对肯尼亚滑坡 灾害进行危险性评价。

2.3.1 信息量模型

信息量(information value, IV)模型是描述目标变量

和单个影响因素之间相关程度的定量分析方法。IV 可 以基于灾害点在因素各分级区间的分布比例,分别计算 各区间的信息量,进而对肯尼亚滑坡灾害危险性做出评 价。各分级区间的信息量是由滑坡灾害点在区间的分 布情况确定的,具体计算公式如下:

$$I = \sum_{i=1}^{l} I_{ij} = \sum_{i=1}^{l} \log_2 \frac{M_0/M}{N_0/N}$$
(3)

式中: /——评价单元的总信息量;

$$I_{ij}$$
——第 i 个因素中第 j 个分级区间的信息量;

l——评价因素的个数;

N₀——第*j*个分级区间的面积;

N——研究区域的总面积;

M0——发生在第j个分级区间的滑坡灾害数量;

M——研究区域内的滑坡灾害样本总数。

2.3.2 逻辑回归模型

逻辑回归(logistic regression, LR)模型是一种广义的线性回归预测方法,可用于分析目标变量和多个影响因素之间的具体数值关系,进而对滑坡灾害的危险性做出评价。LR模型各因素的权重主要由其对目标变量的影响程度确定,训练速度较快,可解释性好,非常适用于危险性评价等二分类问题。LR模型表达式如下:

$$P = 1/[1 + e^{-(\alpha + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_i x_i)}]$$
(4)

式中:P——评价单元滑坡灾害的发生概率;

α——逻辑回归计算出的常数项;

 β_i ——逻辑回归计算得到的第i个因素的回归权重; x_i ——第i个自变量。

2.3.3 极限学习机模型

极限学习机(extreme learning machine, ELM)是一种机器学习领域的神经网络模型。ELM 的结构包含输入层、隐含层和输出层 3 个部分, 各层之间依靠神经元联系, 其结构如图 3 所示。与传统的前馈神经网络模型不同, 极限学习机模型不涉及到隐含层各个节点的改变和调试, 输入层与隐含层之间的连接权重、隐含神经元的阈值等参数都是采取随机的方式进行设置。





对于有*l*个输入神经元,*m*个隐含神经元,对应*n*个输出神经元的极限学习机模型,表达式如下:

$$y_{k} = \sum_{j=1}^{m} \beta_{jk} g\left(\sum_{i=1}^{l} w_{ij} x_{i} + b_{ij}\right)$$
(5)

式中: y_k——第k个输出层神经元的计算结果;

β_{jk}——第j个隐含神经元与第k个输出神经元的连 接权重;

wij——i个输入神经元与j个隐含神经元的连接权重;

x_i——第i个输入神经元的输入向量;

*b*_{ij}——隐含层神经元的偏移阈值;

g(x)——隐含层神经元的激活函数。

为了处理一些非线性的数据集,可以使用一些激活 函数为原数据集进行换算,来让数据集变得线性可分 离,不同的激活函数可以对原数据集达成不同的操作。 在分析时分别选取 sigmoid 函数(SIG)、正弦函数(SIN) 和对称阈值型传输函数(HARDLIM)作为激活函数对极 限学习机模型进行讨论。评价流程如图 4 所示。



3 结果分析和精度评价

3.1 结果分析

将历史滑坡点和随机选取的相同数量的非灾害点 进行组合,形成评价数据集,随机抽取 70% 的样本作为 训练集,剩下 30% 的样本作为测试集进行评价。LR 和 IV 模型系数结果如表 1 和表 2 所示。信息量可以表征 评价因素不同分级区间对滑坡灾害的影响程度,其值 越大,说明在该区间下发生滑坡的概率越高。如果某个 分级区间对应的频率值为 0,则可说明在该区间内没有 灾害记录,滑坡灾害的发生和该因素区间无关,该区间 对滑坡灾害的发生没有影响。由表 1 中可知,高程在 >2 000 m、坡度在>45°时的区间信息量最高,且信息量

2023 年

Table 1 Summary table for coefficients of the IV model						
因素	因子分级	信息量	因素	因子分级	信息量	
高程 /m	0 ~ 50	-1.341		0 ~ 5	-2.212	
	50 ~ 200	0.000		5 ~ 15	0.315	
	$200\sim 500$	-1.941		15 ~ 25	1.552	
	500 ~ 1 000	-2.813		25 ~ 35	3.671	
	$1\ 000 \sim 2\ 000$	0.452		35 ~ 45	4.889	
	>2 000	2.316		>45	5.356	
	¥.	0.000		洼地	1.547	
	네비	0.282		山麓	0.340	
	东北	0.322		高原	1.389	
	东北	0.183		平原	-2.277	
坡向	东南	-0.032	枷約	谷底	0.000	
	南	-0.215	中国初元	悬崖	1.062	
	西南	-0.707		丘陵	0.913	
	西	-0.089		山谷	2.353	
	西北	0.052		山脊	1.476	
	黏土	-0.124	-	水体	0.000	
土壤	壤土	0.115		<400	-1.762	
类型	砂土	-1.948		$400 \sim 800$	-0.729	
	高含量黏土	0.450	年平均	800 ~ 1 200	0.850	
	7 ~ 12	1.666	降雨量 1200~1600		2.240	
地形	12 ~ 14	-1.423	/mm	$1\ 600 \sim 2\ 000$	0.503	
湿度	14-16	-2.041		$2\ 000 \sim 2\ 400$	0.607	
指数	16 ~ 20	-1.785		>2 400	0.000	
	20 ~ 32	-2.319		2 ~ 5	-2.889	
	农业用地	0.800	水流	5 ~ 7	-1.562	
	荒地 -1.365		能力	7~9	0.972	
土地 利用	灌木丛	-1.570	指数	9 ~ 12	1.107	
	林地	2.043		12 ~ 23	0.250	
类型	草地	0.000		凸	-0.089	
	沼泽	0.000	半 由 曲 家	平	-1.026	
	城镇	2.148	ш十	凹	0.187	

表 1 信息量模型系数

随着分区等级的上升呈递增趋势,表明在高程和坡度因 子对滑坡灾害具有明显的正相关性;坡向对滑坡的影响 主要体现在东北方位(22.5°~67.5°);土壤类型为高含 量黏土时对滑坡影响最大,也印证了 CHENG 等^[25]的研 究结论;年平均降雨量在1200~1600 mm,地形湿度指 数在7~12,水流能力指数在9~12 时的信息量最高,

表 2 逻辑回归模型系数 Table 2 Summary table for coefficients of the LR model

_	因素	系数	因素	系数
	高程	1.683	土壤类型	-0.048
	坡度	0.754	地形湿度指数	-1.125
	坡向	-0.097	水流能力指数	1.481
	地貌	0.229	年平均降雨量	1.466
	平面曲率	0.047	土地利用类型	0.026

对滑坡的影响表现在一定的范围内,但其也保持了一定 程度的正相关性;其余因子中,地貌为山谷、平面曲率 为凹、土地利用类型为城镇时的要素单元和滑坡的相 关性最高。逻辑回归系数代表了因素对滑坡灾害发生 的影响程度,其值越大,说明该因素对滑坡危险性的影 响越大。由表2可知,高程、水流能力指数、年平均降 雨量、地形湿度指数等因素对肯尼亚滑坡灾害发生的 影响程度较大(权重>1),而土壤类型、平面曲率和土地 利用类型等因素影响程度较小(权重<0.05)。相关研究 中^[8-11,13-15],为进一步对地质灾害危险性进行细致划 分,主要将危险性划分为5类进行分析,本文参考相关 文献进行划分,利用自然间断法对各模型的计算结果进 行划分可得到肯尼亚滑坡危险性分区图,如图5所示。 3.2 精度评价

结合受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic, ROC)对各模型计算结果进行精度验证。ROC 曲线以假阴性率(false positive rate, FPR,又称特异性) 为横轴,以真阳性率(true positive rate, TPR,又称敏感 性)为纵轴,其中 TPR 为正样本中预测正确的比率, FPR 为负样本中预测错误的比率。ROC 曲线和x轴围成的 面积为 AUC(area under curve)值, AUC 值越高, ROC 曲 线越偏离对角线,分类模型的性能越好。Swets 等^[26]对 AUC 值表征的模型评价效果进行了划分,认定当 AUC 值在 0.5~0.7 时模型评价效果较为有限,当 AUC 值在 0.7~0.9 时模型评价效果较好,当 AUC 值在 0.9 以上时 说明评价效果最好。各模型 ROC 曲线如图 6(a)所示。

由图 6(a)可知,不同模型下的 AUC 面积分别为: 0.965(LR)、0.977(IV)、0.859(ELM-SIG)、0.900(ELM-SIN)、0.941(ELM-HARDLIM),除了 ELM-SIG 方法以 外,其他模型的 AUC 面积均大于 0.9,各模型评价结果 有效。PR 曲线即精确-召回曲线(precision recall, PR), 同样是评价模型效果的常用检验依据之一。PR 曲线以 召回率为横轴,精确率为纵轴,其中召回率是指正样本 中被正确预测比率,其计算方式和真阳性率相同。精确 率是指预测为正的样本中真正正样本所占的比率。理 想情况下,精确率和召回率越高, PR 曲线越靠近右上 角,则表征模型评价效果越好。各模型的 PR 曲线如 图 6(b)所示。

从图中可以看出,除 ELM-SIG 的评价结果以外,其 他方法的 PR 曲线均靠近右上角。LR 模型的召回率和 精确率都处于较高的水平,虽然 IV 模型 AUC 面积最 大,但是从 PR 曲线来看评价效果要略低于 LR 模型。 综合考虑 ROC 曲线和 PR 曲线的对比结果,相对于其



Fig. 5 Risk mapping evaluation results of the ELM model

他模型而言,LR模型具有更高的评价精度。由图 5 中 LR模型的评价结果可以看出,肯尼亚高危险性及极高 危险性区域集中分布在肯尼亚西南部的高原和高原-裂 谷过渡地带,尤其是靠近东非大裂谷附近,这与肯尼亚 历史滑坡数据的分布情况相吻合;高原外侧向平原的过 渡地区是中危险性区域的集中地带;而东部、南部地区 则以低危险性和极低危险性区域为主。

统计各个模型危险性分区的面积占比和滑坡灾害 数量如表3所示。其中,灾害比重表示为发生在该危险 性分区滑坡数量占比和分区面积占比之间的比值。由 表3可知,随着分区等级的上升,各模型分区下的灾害 比重总体上在逐渐增大,且主要分布在高危险性及极高 危险性区域,说明各模型的分区效果良好。但对于 ELM 模型而言,SIG 函数下的结果相对欠缺客观性,大 量的滑坡点都分布在中危险性分区,在灾害比重上存在 "中间高,两边低"的现象,虽然其 ROC 曲线和 PR 曲线 结果较为合理,但是实用性仍有待讨论。

在 LR 模型评价结果基础上,依据肯尼亚的省级行政区划对模型评价结果进一步划分,统计肯尼亚各省份的危险性分区面积占比,如图 7 所示。

可以看出,肯尼亚境内内罗毕省(Nairobi)和中部省 (Central)分别有 47.40% 和 49.90% 位于高危险性及以 上分区,其次是尼扬扎省(Nyanzs)和西部省(Western), 高危险性及以上分区占比分别为 34.70% 和 37.00%,其



图 6 不同模型 ROC 曲线和 PR 曲线



表 3 不同模型灾害分布统计结果

Table 3	Statistical	results of	disasters	distribution	for	different models

危险性分区评估模型		极低危险性	低危险性	中危险性	高危险性	极高危险性
	面积占比/%	72.700	11.900	5.500	4.400	5.400
LR模型	数量占比/%	2.570	0.930	1.170	10.510	84.810
	灾害比重	0.035	0.078	0.213	2.389	15.705
	面积占比/%	35.300	29.800	16.900 0	11.000	6.900
IV模型	数量占比/%	0.930	0.930	2.800 0	17.520	77.800
	灾害比重	0.026	0.031	0.165 7	1.593	11.275
	面积占比/%	1.300	76.300	19.400	1.100	1.900
ELM-SIG	数量占比/%	1.870	8.410	88.080	1.170	0.470
	灾害比重	1.438	0.110	4.540	1.064	0.247
	面积占比/%	1.100	38.300	43.600	12.800	4.200
ELM-SIN	数量占比/%	0.700	2.800	9.110	33.880	53.500
	灾害比重	0.636	0.073	0.208	2.647	12.738
	面积占比/%	5.200	34.300	34.500	18.000	8.000
ELM-HARDLIM	数量占比/%	0.930	0.930	2.800	17.520	77.800
	灾害比重	0.178	0.027	0.081	0.973	9.725

余省份的占比都位于 20% 以下。依据评价结果,建议 相关部门将内罗毕省、中部省、尼扬扎省和西部省作为 肯尼亚滑坡灾害防治的重点,同时在肯尼亚雨季期间 (3—5月及 10—12月)做好相关区域的灾害预警工作, 减少滑坡灾害可能造成的损失。

4 结论

本文以肯尼亚地区为研究对象,以历史滑坡数据为 样本,选取高度、坡度、坡向、地貌、平面曲率、土壤类 型、年平均降雨量、水流能力指数、地形湿度指数和土 地利用类型作为评价指标,分别采用 IV、LR 和 ELM 模 型对肯尼亚滑坡灾害进行危险性评价,主要结论如下:

(1)高程>2000m、坡度在>45°、坡向为东北(22.5°~ 67.5°)、土壤类型为高含量黏土、平面曲率为凹、年平 均降雨量在1200~1600mm、地形湿度指数在7~12、 地貌为山谷、水流能力指数在9~12、土地利用类型为 城镇时的要素单元和滑坡的相关性最高;高程、水流能 力指数、年平均降雨量、地形湿度指数等因素对肯尼亚 滑坡灾害发生影响程度较大,而土壤类型、平面曲率和 土地利用类型等因素影响程度较小。

(2)各模型的 AUC 面积分别为 0.977(IV)、0.965 (LR)、0.859(ELM-SIG)、0.900(ELM-SIN)、0.941(ELM-



HARDLIM),而结合 PR曲线结果综合考虑,相对于其 他模型而言,LR模型评价效果较好;随着危险区等级的 上升,各模型分区下的灾害比重总体上在逐渐增加,说 明各模型的分区效果良好;但对于 ELM模型而言,SIG 激活函数下的结果在灾害比重上存在"中间高,两边 低"的现象,实用性仍有待讨论。

(3) 肯尼亚高危险性及极高危险性区域集中分布 在肯尼亚西南部的高原和高原-裂谷过渡地带,尤其是 靠近东非大裂谷附近,这与肯尼亚历史滑坡数据的分布 情况相吻合;高原外侧向平原的过渡地区是中危险性 区域的集中地带,而东部、南部地区则以低危险性和极 低危险性区域为主;将肯尼亚各个省份在 LR 模型下的 滑坡危险性区域分布情况进行统计,发现内罗毕省、中 部省、尼扬扎省和西部省在高危险性及以上分区占比 较多。

限于数据获取的难度和评价因素的可用性,本文的 评价过程仍然存在部分不足。在评估滑坡灾害时,搜集 了 425 例历史地质灾害点,尽管从数量上看已经较为充 足,但实际上其基本信息未提及滑坡发生的时间和滑体 类型等信息,导致对肯尼亚滑坡灾害概括的普遍性相对 不足。此外,虽然本文选取的因素有一定的代表性,但 在评估时并未考虑可能影响地质灾害发生的其他因素 (如构造、岩性等),而这种忽视实际上和现实之间仍存 在偏离,因此有赖于进行更深一步的研究。

参考文献(References):

[1] BATALA L K, YU Wangxing, KHAN A, et al. Natural disasters' influence on industrial growth, foreign direct investment, and export performance in the South Asian region of Belt and road

initiative [J]. Natural Hazards, 2021, 108(2): 1853 – 1876.

- [2] BAI Yuanli, WIERZBICKI T. Application of extended Mohr-Coulomb criterion to ductile fracture [J]. International Journal of Fracture, 2010, 161(1): 1 – 20.
- [3] ROGERS J D, CHUNG J. Applying Terzaghi's method of slope characterization to the recognition of Holocene land slippage [J]. Geomorphology, 2016, 265: 24 – 44.
- [4] AHMED A, UGAI K, YANG Qing qing. Assessment of 3D slope stability analysis methods based on 3D simplified janbu and hovland methods [J]. International Journal of Geomechanics, 2012, 12(2): 81 89.
- [5] WANG Chun ming, LIU Chun yuan, WU Mai, et al. Research on soil-like slope instability based on FEM strength reduction [J].
 Applied Mechanics and Materials, 2013, 438/439: 1244 1248.
- [6] 吴信才,白玉琪,郭玲玲.地理信息系统(GIS)发展现状及展望[J].计算机工程与应用,2000,36(4):8-9.[WU Xincai, BAI Yuqi, GUO Lingling. Development and prospect of geographic information system [J]. Computer Engineering and Applications, 2000, 36(4):8-9. (in Chinese with English abstract)]
- [7] SON J, SUH J, PARK H D. GIS-based landslide susceptibility assessment in Seoul, South Korea, applying the radius of influence to frequency ratio analysis [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(4): 310.
- [8] 屠水云,张钟远,付弘流,等.基于CF与CF-LR模型的地质灾害易发性评价[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(2):96-104. [TU Shuiyun, ZHANG Zhongyuan, FU Hongliu, et al. Geological hazard susceptibility evaluation based on CF and CF-LR model [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(2):96-104. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 刘福臻,王灵,肖东升.机器学习模型在滑坡易发性评价中的应用[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(6): 98-106. [LIU Fuzhen, WANG Ling, XIAO Dongsheng. Application of machine learning model in landslide susceptibility evaluation [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(6): 98-106. (in Chinese with English abstract)]
- [10] LIU Rui, LI Luyao, PIRASTEH S, et al. The performance quality of LR, SVM, and RF for earthquake-induced landslides susceptibility mapping incorporating remote sensing imagery [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(4): 1 – 15.
- [11] WANG Xi, WANG Shuangyin, QI Jiashuo. Open-channel landslide hazard assessment based on AHP and fuzzy comprehensive evaluation [J]. Water Supply, 2020, 20(8): 3687 - 3696.
- [12] 商冬凡, 唐梦芸, 苗雷强, 等. 城市道路空洞隐患风险评

估方法应用研究 [J]. 市政技术, 2022, 40(11): 37-42. [SHANG Dongfan, TANG Mengyun, MIAO Leiqiang, et al. Risk Assessment of Operation and Maintenance Stage of Utility Tunnel based on Combination Weighting-Improved Risk Matrix Method [J]. Journal of Municipal Technology, 2022, 40(11): 37-42. (in Chinese with English abstract)]

- [13] 张俊,殷坤龙,王佳佳,等.三峡库区万州区滑坡灾害易发性评价研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(2): 284-296. [ZHANG Jun, YIN Kunlong, WANG Jiajia, et al. Evaluation of landslide susceptibility for Wanzhou district of Three Gorges Reservoir [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(2): 284-296. (in Chinese with English abstract)]
- [14] CHEN Wei, LI Wenping, CHAI Huichan, et al. GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process (AHP) and certainty factor (CF) models for the Baozhong region of Baoji City, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(1): 63.
- [15] 刘璐瑶,高惠瑛,李照.基于CF与Logistic回归模型耦合的永嘉县滑坡易发性评价[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2021,51(10):121-129.
 [LIU Luyao, GAO Huiying, LI Zhao. Landslide susceptibility assessment based on coupling of CF model and logistic regression model in Yongjia County [J]. Periodical of Ocean University of China, 2021, 51(10):121-129. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.地质 灾害危险性评估规范:GB/T 40112—2021 [S].北 京:中国标准出版社,2021. [Standardization Administration of the People's Republic of China. Specifications for risk assessment of geological hazard: GB/T 40112—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)]
- [17] 杨先全,周苏华,邢静康,等.肯尼亚滑坡灾害分布特征及敏感性区划[J].中国地质灾害与防治学报,2019,30(5):65-74.[YANG Xianquan, ZHOU Suhua, XING Jingkang, et al. Distribution patterns and susceptibility mapping of landslides in Kenya [J]. The Chinese Journal of Geological

Hazard and Control, 2019, 30(5): 65 - 74. (in Chinese with English abstract)]

- [18] 朱丛瑞.肯尼亚建国后的环境问题研究[D].昆明:云 南师范大学, 2021. [ZHU Congrui. Research on environmental problems after the founding of Kenya [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 肯尼亚信息、通信和技术部.滑坡统计资料[M/OL].
 [2015-5-18].https://www.ict.go.ke/wp-content/uploadsKenya.
 [Ministry of Information, Communication and Technology of Kenya. Landslide Statistics [M/OL]. [2015-5-18]. (in Chinese)]
- [20] 全球毁灭性滑坡数据库.肯尼亚地区滑坡数据[M/OL].
 [2019-6-18]. https://blogs.agu.org/landslideblog/. [Global Database of Fatal Landslides.Kenya Historical Landslide Data [M/OL]. [2019-6-18]. (in Chinese)]
- [21] BROECKX J, VANMAERCKE M, DUCHATEAU R, et al. A data-based landslide susceptibility map of Africa [J]. Earth-Science Reviews, 2018, 185: 102 – 121.
- [22] NASA地球公开数据. ASTERGDEMV2卫星全球高程公开 共享数据[M/OL].[2013-11-30].https://visibleearth.nasa. gov/.[NASA Earth Open Data. ASTERGDEMV2 satellite global elevation data [M/OL].[2013-11-30].(in Chinese)]
- [23] 开放非洲数据库.肯尼亚地区地表径流、地貌、年降雨量等共享数据[M/OL].[2014-1-20].www.Openafrica. org.[Open Africa Database. Shared data on surface runoff, landforms, and annual rainfall in Kenya [M/OL].[2014-1-20].(in Chinese)]
- [24] 世界资源研究所公开数据. 肯尼亚地区土地利用类型 共享数据 [M/OL]. [2014-1-20]. www.wri.org. [World Resources Institute Open Data. Shared data on land use types in Kenya [M/OL]. [2014-1-20]. (in Chinese)]
- [25] CHENG Yongzhen, HUANG Xiaoming. Effect of mineral additives on the behavior of an expansive soil for use in highway subgrade soils [J]. Applied Sciences, 2018, 9(1): 30.
- [26] SWETS J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems [J]. Science, 1988, 240(4857): 1285 – 1293.