



引文格式:王浩,牛全福,刘博,等.基于MaxEnt结合粒子群优化的陇南市山洪灾害空间分布预测研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(8):1444-1455.DOI:10.13203/j.whugis20230219

Citation: WANG Hao, NIU Quanfu, LIU Bo, et al. Spatial Distribution Prediction of Flash Flood Disaster in Longnan City Based on Particle Swarm Algorithm Combined with MaxEnt Model[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(8):1444-1455. DOI:10.13203/j.whugis20230219

基于MaxEnt结合粒子群优化的陇南市山洪灾害空间分布预测研究

王浩¹ 牛全福^{1,2,3} 刘博¹ 雷姣姣¹ 王刚¹ 张瑞珍¹

¹ 兰州理工大学土木工程学院,甘肃 兰州,730050

² 甘肃省应急测绘工程研究中心,甘肃 兰州,730050

³ 甘肃大禹九州空间信息科技有限责任公司院士专家工作站,甘肃 兰州,730050

摘要:山洪是山区河道水位突然上涨所引发的自然灾害,具有瞬时性、破坏性大等特点。近年来,甘肃省陇南市山洪灾害频发,严重威胁到当地人民的生命财产安全,对该区域进行山洪灾害风险评价刻不容缓。运用MaxEnt结合粒子群优化算法,基于调查的834个山洪灾害点和与灾害相关的32个致灾因子,在探讨主要致灾因子的基础上进行研究区山洪灾害易发性评价,并结合当前(2021—2040年)和未来(2041—2060年、2061—2080年、2081—2100年)4期气候数据的不同情景模式,预测了该区研究期间山洪灾害潜在易发区空间分布格局。结果表明,各期研究结果的受试者工作特征曲线的曲线下面积均大于0.85,表明所提方法的研究结果精度较高;研究区的主要致灾因子为最干月降水量、昼夜温差月均值、降水量变异系数、最暖月最高温、土地利用、距河流的距离、土壤质地、剖面曲率、海拔、地形起伏度;研究区不同时期山洪灾害中高易发区集中分布于武都区、文县和宕昌县部分地区,与当前时期相比,未来3个时期的模拟结果均体现为减少趋势。

关键词:粒子群优化算法;MaxEnt;陇南市;山洪灾害;易发区;致灾因子

中图分类号:P208

文献标识码:A

收稿日期:2023-06-25

DOI:10.13203/j.whugis20230219

文章编号:1671-8860(2024)08-1444-12

Spatial Distribution Prediction of Flash Flood Disaster in Longnan City Based on Particle Swarm Algorithm Combined with MaxEnt Model

WANG Hao¹ NIU Quanfu^{1,2,3} LIU Bo¹ LEI Jiaojiao¹ WANG Gang¹ ZHANG Ruizhen¹

¹ School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

² Emergency Mapping Engineering Research Center of Gansu, Lanzhou 730050, China

³ Academician Expert Workstation of Gansu Dayu Jiuzhou Space Information Technology Co.Ltd, Lanzhou 730050, China

Abstract: Objectives: Flash floods are natural disasters caused by sudden rise in water levels in mountainous rivers, which are characterized by instantaneity and great destructiveness. In recent years, the frequent occurrence of flash floods in Longnan city, Gansu province, has posed a serious threat to the safety of local people's lives and property, thus it is urgent to carry out a risk assessment of flash floods in this region.

Methods: This study takes Longnan city as the study area, and utilizes the MaxEnt model combining with the particle swarm algorithm to evaluate the vulnerability of study area based on 834 flash flood hazard points investigated and 32 disaster-causing factors. It also predicts the spatial pattern changes and potential mass migration trends of the future flash flood vulnerability areas based on three periods of climate data from the current period (2021—2040) and the future period (2041—2060, 2061—2080, 2081—2100).

Results and Conclusions: The area under receiver operating characteristic curve of the results of the study

基金项目:国家自然科学基金(42261069)。

第一作者:王浩,硕士,研究方向为灾害遥感。2190492996@qq.com

通讯作者:牛全福,教授。Niuqf@lut.edu.cn

in each period is above 0.85, which indicates that the precision of the results of the method is good. The main cause factors in this study area are driest month precipitation, monthly mean diurnal temperature difference, coefficient of variation of precipitation, warmest month maximum temperature, land use, distance from the river, soil texture, profile curvature, elevation, and topographic relief. The flash flood-prone areas in the study area varies in different periods, but are mainly distributed in Wudu District, Wen County and Tanchang County, and the simulation results for the three future periods (2041—2060, 2061—2080, 2081—2100) reflected a decreasing trend compared with the current period (2021—2040).

Key words: particle swarm algorithm; MaxEnt; Longnan city; flash flood disaster; flood-prone areas; disaster-causing factors

山洪灾害是山丘区由降雨、融雪等引起的洪水、泥石流和滑坡等自然灾害的总称^[1]。其空间分布具有明显的区域性,时间上具有很强的突发性,是危害较大的自然灾害之一^[2]。中国是山洪灾害发生较多的国家之一^[3-4]。据统计,自1990年以来,约有6万人因山洪灾害死亡或失踪,直接经济损失约4.81万亿元(<http://www.xinhuanet.com>)。甘肃省内属唯一长江流域的陇南市,因其独特的地形地貌和气候条件,极易发生山洪灾害,严重威胁着当地人民的生命和财产安全^[5-7]。为此,开展该区域山洪灾害易发性评价对防洪减灾和保障人民生命财产安全具有现实意义^[8]。

21世纪以来,国内外学者对地质灾害易发性评价做了大量的研究,就研究方法来看,多基于历史山洪灾害,采用经验评价法^[9-10]、统计分析法^[11-14]和数学模型法^[15-16]等进行。经验法易受评价者主观因素的影响;统计分析法又需要大量山洪灾害样本和通过分析样本的分布规律进行预测评价;数学模型法因其评价结果可靠而得到广泛应用,但其难点是致灾因子权重难以确定。随着计算机和机器学习等算法的发展,将机器学习这类非线性算法引入山洪灾害研究中,通过对训练样本点的学习来发现其规律性,可避免致灾因子权重难以确定的问题。例如,徐奎等^[17]基于深度强化学习对海南岛山洪灾害进行易发性研究;赵龙等^[18]基于随机森林回归算法进行山洪灾害临界雨量预估模型研究;Zhao等^[19]与Lee等^[20]均采用多种机器学习算法对山洪灾害风险进行比较研究,结果显示随机森林算法效果显著,且优于支持向量机、神经网络模型等;周超等^[21]基于山洪灾害风险的概念来选取评价指标,比较研究 k 近邻、随机森林、AdaBoost 3种机器学习算法对山洪灾害评价的差异性,得出AdaBoost模型效果显著的结论。MaxEnt模型作为风险评估方法之一,广泛应用于多个领域且取得较好的结果。例如,何珮婷等^[22]基于MaxEnt模型进行深圳市内

涝影响因素分析及内涝风险评估,结果表明,影响内涝的主导环境因子为不透水面比例、绿地比例、人口密度、暴雨峰值雨量和地表起伏度;姚政宇等^[23]利用MaxEnt模型预测新疆有毒杂草的分布,得出有毒杂草表现出较高的适应能力的结论;欧阳泽怡等^[24]利用MaxEnt模型对赤皮青冈在中国的生长模式进行预测,得出赤皮青冈主要受水热条件影响的结论;万洋等^[25]应用MaxEnt模型对中尼交通廊道滑坡进行易发性评估,得出了滑坡易发区空间分布。然而,MaxEnt模型容易造成过拟合现象^[26]。近年来,粒子群优化算法以其简洁易实现且参数较少的特点,已广泛应用到地物分类^[27]、气象灾害^[28]等领域。

上述研究大多采用单一算法,鲜有多种算法结合进行山洪灾害危险的研究。多种算法的结合可降低单一方法因其自身不足带来的缺陷,有利于提高山洪灾害易发性评价可靠性。为此,本文基于已调查的甘肃省陇南市山洪灾害,采用MaxEnt结合粒子群优化算法,利用当前时期(2021—2040年)和未来时期(2041—2060年、2061—2080年、2081—2100年)4期气候数据研究该区域山洪灾害易发性时空分布,为该区域的防洪减灾及保障人民生命财产安全提供参考。

1 研究区域概况与研究数据

1.1 研究区域概况

陇南市地处甘肃省的最南端,地理位置位于 $104^{\circ} 01' 10'' E \sim 106^{\circ} 34' 44'' E$, $32^{\circ} 35' 50'' N \sim 34^{\circ} 32' 07'' N$,包括一区(武都区)七县(康县、文县、成县、徽县、西和县、礼县和宕昌县)地理上为秦巴山、黄土高原和青藏高原的交接带,气候属亚热带向暖温带的过渡区。区内地形地貌多高山峻岭,最大高差为3 596 m,河网密布,地质结构复杂,气候多变,特别是夏季,短时强降雨时有发生,极易形成山洪泥石流等地质灾害^[29]。

1.2 研究数据

1.2.1 历史山洪灾害点数据

本文所用的历史山洪灾害点数据为甘肃省自然资源厅所属部门实地调查和测量所得,采集时间为2016—2022年,包括834个山洪灾害点,其中,绝大多数灾害点集中分布于研究区内的河流两岸(见图1,底图来源于<https://gansu.tianditu.gov.cn/gsstmap/startpg/>,审图号:甘S(2021)91号)。

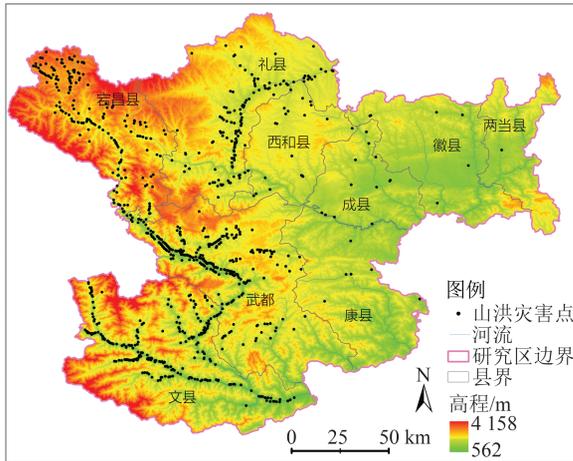


图1 研究区灾害点分布

Fig. 1 Distribution of Disasters of the Study Area

1.2.2 致灾因子数据

本文所用的致灾因子数据主要包括研究区的气候、地形、土壤、土地利用类型和植被类型,具体见表1。

表1 致灾因子

Tab. 1 Disaster-Causing Factors

类型	致灾因子	数据来源
气候变量	bio1~bio19	世界气候数据集(https://www.worldclim.org/)
地形数据	海拔	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/),基于数字高程模型利用地理信息处理平台制作的数据
	坡度	
	坡向	
	坡长	
	平面曲率	
土壤数据	剖面曲率	世界土壤数据库(https://www.fao.org/nr/land/soils/harmonized-world-soil-database/en/)
	距河流的距离	
	土壤质地	
	砂土 粉尘土 黏土	
土地利用	地表覆被	Google Earth Engine(GEE) (https://code.earthengine.google.com/)
植被	归一化植被指数	GEE (https://code.earthengine.google.com/)

1)气候变量数据主要下载自世界气候数据库提供的19个灾害气候因子(见表2)。未来气候

数据为联合国政府间气候变化专门委员会在第六次气候变化评估报告中发表的,选择对夏季多年平均植被碳利用效率空间分布模拟能力优良的CMCC-ESM2模型^[30],利用当前气候数据(2021—2040年)和未来气候数据(2041—2060年、2061—2080年和2081—2100年),采用SSP126、SSP245和SSP370这3种升温模型(见表3),其空间分辨率为30 s(约1 km)。

表2 未来气候变量

Tab. 2 Future Climate Variables

变量	注释	变量	注释
bio1	年均气温	bio11	最冷季度平均温度
bio2	昼夜温差月均值	bio12	年均降水量
bio3	等温性	bio13	最湿月降水量
bio4	温度季节性变化标准差	bio14	最干月降水量
bio5	最暖月最高温	bio15	降水量变异系数
bio6	最冷月最低温	bio16	最湿季度降水量
bio7	气温年较差	bio17	最干季度降水量
bio8	最湿季度平均温度	bio18	最暖季度降水量
bio9	最干季度平均温度	bio19	最冷季度降水量
bio10	最暖季度平均温度		

表3 未来气候变量各场景名称

Tab. 3 Names of Future Climate Variables in Each Scenario

年份	升温模型	场景
2021—2040	SSP126	2050s_SSP126
2021—2040	SSP245	2050s_SSP245
2021—2040	SSP370	2050s_SSP370
2061—2080	SSP126	2070s_SSP126
2061—2080	SSP245	2070s_SSP245
2061—2080	SSP370	2070s_SSP370
2081—2100	SSP126	2090s_SSP126
2081—2100	SSP245	2090s_SSP245
2081—2100	SSP370	2090s_SSP370

2)地形数据中,海拔来自于先进星载热发射和反射辐射仪全球数字高程模型数据,下载自地理空间数据云,其空间分辨率为30 m,并经地理信息平台处理生成其衍生数据,包括地形起伏度、平面曲率、剖面曲率、距河流的距离、坡度和坡向和坡长。

3)土壤数据来自世界土壤数据库,其空间分辨率为1 km,选取了其中的土壤质地、砂土、粉砂土与黏土。

4)土地利用数据。通过GEE平台下载的2020年欧洲航天局中国区10 m地表覆盖数据,其数据源为Sentinel-2遥感影像,其数据包括林地、灌木、草地、耕地、建筑、裸地/稀疏植被地区、

雪和冰、开阔水域和草本湿地。

5) 归一化植被指数下载自 GEE 平台, 数据源为 MODIS13Q1, 其空间分辨率是 250 m。

2 研究方法

1) MaxEnt 结合粒子群优化算法

MaxEnt 模型由 Jaynes 于 1957 年提出, 2004 年由 Phillips 基于 MaxEnt 原理, 以 Java 语言为基础开发了 MaxEnt 软件。本文利用 MaxEnt 模型, 基于研究区调查的灾害点空间分布数据和影响灾害的致灾因子数据来预测山洪灾害的分布概率。其中, 将山洪灾害点分布数据转换为 csv 格式, 将致灾因子数据转换为 ASCII 格式输入, 采用受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC) 和曲线下面积(area under curve, AUC) 来评价其预测结果的精度, 基于 MaxEnt 模型获取山洪灾害空间概率分布, 最后选取精度最高的概率分布结果, 经粒子群算法处理^[31], 得到研究区山洪灾害预测结果。具体流程如图 2 所示, 其中, P_w 表示灾害发生的概率分布; X 、 V 分别表示初始化粒子群的位置和速度; T 表示粒子的目标函数; P_{gd} 表示全局最优的粒子; P_{id} 表示单个粒子本身的历史最优 T 值。

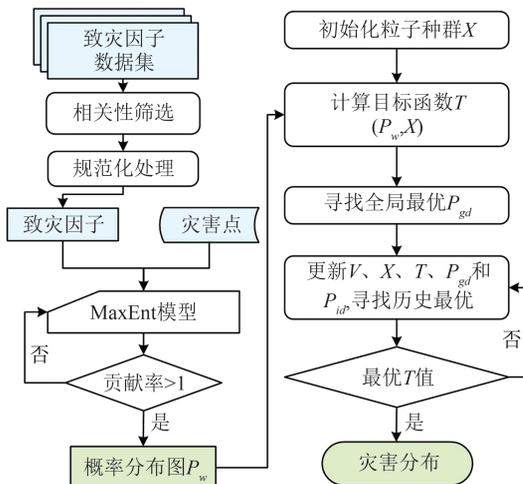


图 2 实验流程图

Fig. 2 Experiment Flowchart

2) 数据预处理

对山洪灾害数据进行预处理, 首先剔除 834 个历史山洪灾害数据点中重复、无效的(比如位置记录模糊)的点; 然后通过地理信息处理平台建立渔网, 并去除渔网中的自相关点; 最后得到 420 个山洪灾害点用于建模。对致灾因子数据进行预处理, 首先利用 MaxEnt 模型预建模得到其贡献率和置换重要性, 然后分别计算致灾因子间

的皮尔逊(Pearson)相关系数, 剔除相关性大于 0.8 且贡献率和置换重要性低的致灾因子^[32]。

3) 模型参数调整

在模型运行前, 需要对模型进行模型参数调整, 选择的输出格式为 cLoglog, 随机测试集设置比例为 30%, 即 30% 用于模型的训练, 70% 用于预测模型的验证。采用 ROC 曲线来评定模型的精度, 并将调控倍频设置为 1, 重复建模次数设置为 10, 以防止精度不够, 使得模型结果达到最佳^[33]。

4) 灾害易发区等级

本文对研究区灾害易发区等级的划分参考已有研究成果^[34-35]并结合已调查灾害点的空间分布, 将易发区等级划分为以下 4 个等级: $[0, 0.4)$ 为极低易发区, $[0.4, 0.5)$ 为低易发区, $[0.5, 0.6)$ 为中易发区, $[0.6, 1]$ 为高易发区, 并统计不同易发区的面积。

5) 山洪灾害空间格局变化

本文通过计算 4 个时期不同易发区等级间的转移矩阵, 获取不同灾害易发区等级下山洪灾害在不同时期的面积变化趋势和质心位置, 并统计灾害扩张、保留、收缩的面积和地理范围。

6) 模型精度评定

对研究模型精度的评定主要通过 ROC 和 AUC 进行评定, ROC 曲线的优劣通过 AUC 来度量, 这是一种用于评估模型的性能的常见指标。AUC 取值的范围为 0~1, 值越大表示模型的性能越好, 具有更高的准确性和稳定性。AUC 越接近 1, 说明分类器性能越好^[36], 当 $AUC < 0.6$ 时, 说明模型精度很差; 当 $0.6 \leq AUC < 0.7$ 时, 说明模型精度较差; 当 $0.7 \leq AUC < 0.8$ 时, 说明模型精度一般; 当 $0.8 \leq AUC < 0.9$ 时, 说明模型精度好; 当 $0.9 \leq AUC < 1$ 时, 说明模型精度极好。

3 山洪灾害易发性评价结果

3.1 模型精度评价

图 3 是利用 MaxEnt 结合粒子群优化算法对当前时期(2021—2040 年)的山洪灾害分布区预测结果的 ROC 验证曲线。AUC 值为 0.905, 精度评价达到了极好水平, 模拟结果比较可信。

3.2 影响山洪空间分布的主要致灾因子

对于 MaxEnt 模型输出的结果, 基于贡献率、置换重要性、Pearson 相关系数以及各个致灾因子响应曲线来选取影响灾害易发区分布的主要致灾因子。首先, 将山洪灾害点和致灾因子数据输

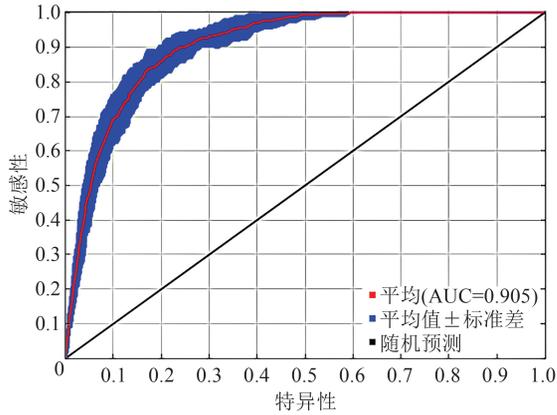


图3 当前时期山洪灾害分布的ROC曲线
Fig. 3 ROC Curve of the Flash Flood Distribution in Current Period

入模型,根据致灾因子的贡献率,直接剔除贡献率小于1的致灾因子;其次,对剩余的致灾因子进行相关性分析,计算 Pearson 相关系数。当两个致灾因子间的相关系数大于等于0.8时,根据致灾因子的贡献率,舍弃贡献率低的致灾因子,剩下的致灾因子为主要致灾因子^[37]。最终选取的

致灾因子有 bio14、bio2、bio15、bio5、土地利用、距河流的距离、土壤质地、剖面曲率、海拔、地形起伏度。主要致灾因子的贡献率和置换重要性如表4所示,相关系数如图4所示。

表4 主要致灾因子贡献率和置换重要性

Tab. 4 Contribution Rate and Permutation Importance of Main Disaster-Causing Factors

序号	变量	贡献率/%	置换重要性/%
1	bio14	46.2	11.3
2	bio2	23.7	1.1
3	bio15	8.1	16
4	bio5	7.1	45.6
5	土地利用	3.9	0.2
6	距河流的距离	3.8	2.9
7	土壤质地	3.2	18.9
8	剖面曲率	1.7	1.6
9	海拔	1.3	1.3
10	地形起伏度	1	1.1

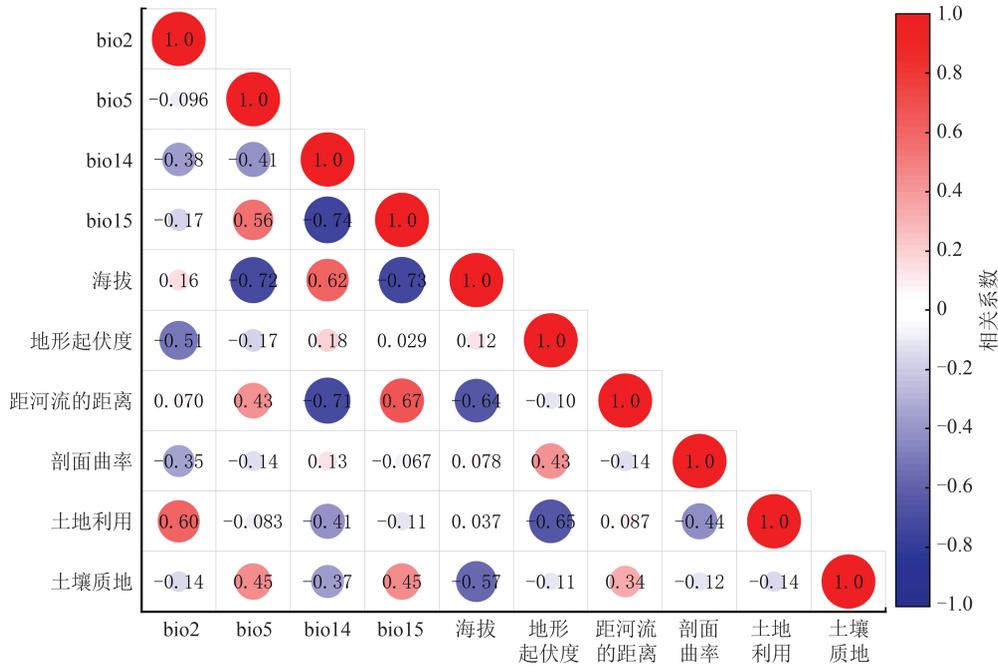


图4 主要致灾因子相关性热力图
Fig. 4 Heat Map of Correlation of the Main Disaster-Causing Factors

对选取的10个主要致灾因子分别进行因子建模,获取主要致灾因子的响应曲线(见图5)和直方图(见图6),图5中纵轴代表山洪灾害发生的概率,横轴代表主要致灾因子的取值范围,通常认为概率大于0.5的因子区间最容易导致灾害发生^[37]。

从图5和图6可知,山洪灾害发生概率随bio14的增加而减小,当bio14大于9mm时,山洪

灾害发生的概率几乎为0,当bio14在0~3.5mm时,极易引起山洪灾害,当bio14为1mm时,山洪灾害发生的概率达到峰值。同时,山洪灾害发生的概率随着海拔、距河流距离的增加而减小,当海拔大于3500m、距河流距离超过100km时,山洪灾害发生的概率接近0;当海拔在300~1700m、距河流距离5~10km区间时,极易引起

灾害发生;当海拔在 585 m、距河流距离为 5 km 时,山洪灾害发生的概率达到峰值。

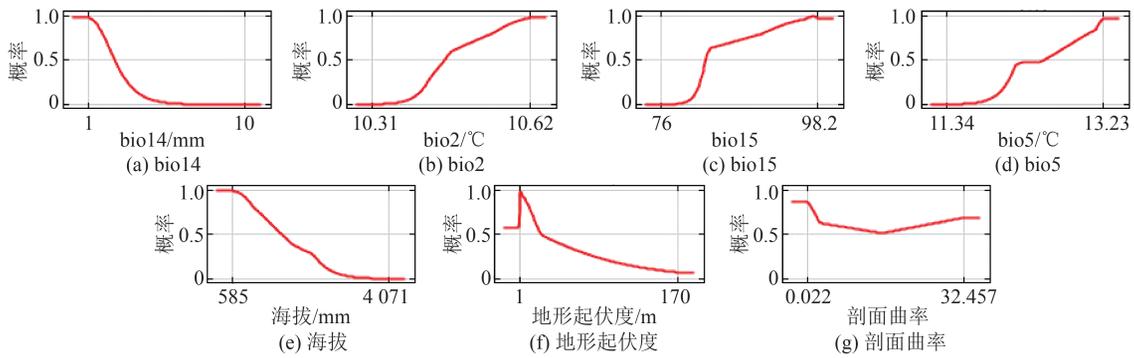


图 5 气候、地形因子响应曲线

Fig. 5 Response Curves of Climate and Terrain Factors

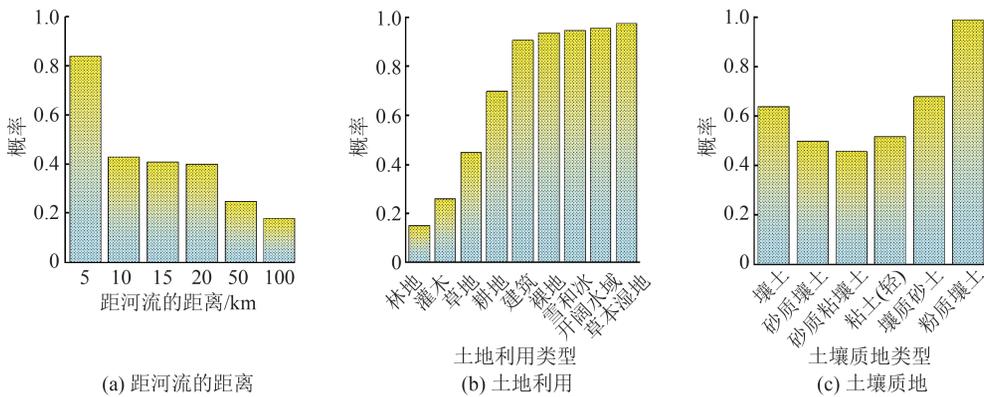


图 6 距河流的距离、土地利用和土壤质地因子响应直方图

Fig. 6 Response Histograms of Distance from River, Land Use and Soil Texture Factors

山洪灾害发生的概率随着 bio2 的增加而增大,当 bio2 小于 10.3 °C 时,山洪灾害发生的概率接近为 0;当 bio2 在 10.45~10.6 °C 范围时,极易引起山洪灾害;当 bio2 值为 10.6 °C 时,灾害发生的概率达到峰值。同时,山洪灾害发生的概率随着 bio5、bio15 的增加而增大,当 bio5 小于 11.4 °C、bio15 低于 77 时,山洪灾害发生的概率接近 0;当 bio5 在 12.5~13.2 °C 区间、bio15 在 83~100 区间时,极易引起灾害的发生;当 bio5 为 13.2 °C、bio15 为 98.2 时,山洪灾害发生的概率达到峰值。

当地形起伏度在 0~1 m 之间时,灾害发生的概率随地形起伏度增加而增大;当地形起伏度在 1 m 时,灾害发生的概率达到峰值;当大于 1 m 时,其随着地形起伏度的增加而减小,当地形起伏度大于 140 m 时,山洪灾害发生的概率接近于 0,当在 0~20 m 时,山洪灾害发生的概率在 0.6 左右,此时极易引起灾害的发生。当剖面曲率在 0~15 时,其灾害发生的概率随剖面曲率增加而减小,当剖面曲率为 15 时,山洪灾害发生的概率达到极小值,此时为最不易发生灾害的条件,当剖面曲率在 15~32 时,其灾害发生的概率随剖面曲率增加而增大,当剖面曲率的范围为 0~5 和

25~35 时,极易引起灾害的发生。

从土地利用类型来看,建筑用地、裸地、雪和冰、开阔水域和草本湿地易造成洪灾的发生,且发生的概率均在 0.85 以上。从土壤质地来看,壤质砂土和粉砂壤土易造成洪灾的发生,且造成洪灾的概率均在 0.7 以上。

3.3 当前气候下山洪灾害的易发区

从当前(2021—2040 年)气候下山洪灾害易发性等级图可知(见图 7),易发区主要分布在武都区、文县和宕昌县,且集中分布在河道两岸。

中、高易发区(灾害危险区)主要集中在武都区的西部、南部,文县北部、中部,宕昌县的中部,礼县的中部、南部,西和县南部部分地区,成县中部部分地区,总面积为 7 521.18 km²。其中,山洪灾害高易发区分布在武都区和文县内的白龙江及其支流白水江两岸、宕昌县岷江两岸、礼县、成县和西和县内西汉水两岸,其面积为 1 150.807 km²,占研究区总面积的 4.134 %;中易发区位置在武都区和文县白龙江及其支流白水江高易发区附近、宕昌县岷江高易发区附近、礼县和西和县的西汉水两岸的高易发区附近、成县中部大部分地区、康县北部少部分区域以及两

当县和徽县中部少部分地区,面积为6 370.371 km²,占总面积的22.88%。

山洪灾害低易发区位置在两当县和徽县中部大部分地区、成县中部部分地区、西和县中部少部分地区、康县南部少部分地区,面积为6 134.06 km²,占总面积的22.04%。

3.4 未来山洪灾害发生易发区模拟

本文共选取了4个时期来进行陇南市山洪灾害易发性评价。从当前时期到未来时期,灾害易发区呈现减小趋势,如表5所示。不同时期灾害潜在易发区空间分布格局如图8所示。

2041—2060年3种情景下,灾害危险区面积平均值为6 729.75 km²。其中,2050s_SSP126情景下(见图8(a)),灾害危险区面积为6 701.79 km²,高易发区面积为1 116.34 km²,相较于当前时期分别减小了819.39 km²和34.47 km²。2050s_SSP245情景下(见图8(b)),灾害危险区面积为6 709.04 km²,高易发区面积为1 021.58 km²,相较于当前时期

分别减小了812.14 km²和129.23 km²。2050s_SSP370(见图8(c))情景下,灾害危险区面积为6 778.42 km²,高易发区面积为1 079.94 km²,相较于当前分别减小了742.76 km²和70.87 km²。

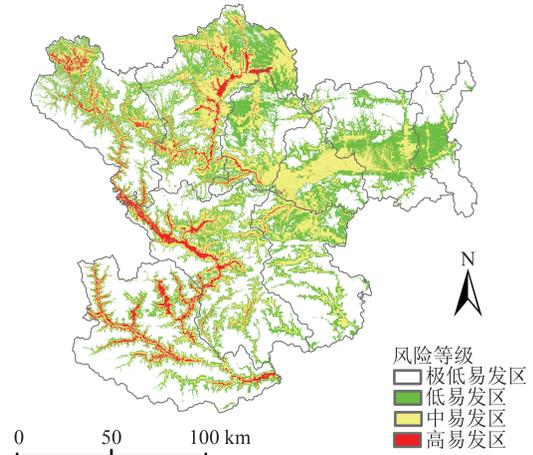


图7 当前时期山洪灾害易发性等级

Fig. 7 Levels of Flash Flood Vulnerability in the Current Period

表5 不同时期山洪灾害各风险等级区域面积/km²

Tab. 5 Area of Each Risk Level for Flash Floods in Different Periods/km²

等级	2021—	2041—2060年			2061—2080年			2081—2100年		
	2040年	SSP126	SSP245	SSP370	SSP126	SSP245	SSP370	SSP126	SSP245	SSP370
极低易发区	14 182.80	15 091.20	14 907.30	14 792.60	14 980.90	15 544.90	14 911.30	14 053.20	14 488.50	14 822.20
低易发区	6 134.06	6 044.92	6 221.63	6 266.94	6 104.43	5 850.57	6 237.59	6 466.49	6 607.37	6 154.47
中易发区	6 370.37	5 585.15	5 687.46	5 698.48	5 737.82	5 416.58	5 658.61	6 168.30	5 816.73	5 810.66
高易发区	1 150.81	1 116.34	1 021.58	1 079.94	1 121.62	1 132.67	1 137.23	1 256.69	1 032.12	1 157.44
灾害危险区	7 521.18	6 701.79	6 709.04	6 778.42	6 859.44	6 549.25	6 795.84	7 424.99	6 848.85	6 968.10

2061—2080年3种情景下,灾害危险区面积平均值为6 734.843 km²。其中2070s_SSP126(见图8(d))情景下,灾害危险区面积6 859.44 km²,高易发区面积为1 121.62 km²,相较于当前分别减小了661.74 km²和29.19 km²。2070s_SSP245(见图8(e))情景下,灾害危险区面积为6 549.25 km²,高易发区面积为1 132.67 km²,相较于当前分别减小了971.93 km²和18.14 km²。2070s_SSP370(图8(f))情景下,灾害危险区面积为6 795.84 km²,高易发区面积为1 137.23 km²,相较于当前分别减小了725.34 km²和13.58 km²。

2081—2100年3种情景下,灾害危险区面积平均值为7 080.65 km²。其中,2090s_SSP126(见图8(g))情景下,灾害危险区面积为7 424.99 km²,高易发区面积为1 256.69 km²,相较于当前分别减小了96.19 km²和增加了105.88 km²。2090s_SSP245(见图8(h))情景下,灾害危险区面积为6 848.85 km²,高易发区面积为1 032.12 km²,相较

于当前分别减小了672.33 km²和118.69 km²。2090s_SSP370(见图8(i))情景下,灾害危险区面积为6 968.10 km²,高易发区面积为1 157.44 km²,相较于当前分别减小了553.08 km²和增加了6.63 km²。

总的来看,未来3个时期不同情景下的灾害危险区与当前时期相比均呈现减少趋势。从图8可以看出,山洪灾害危险区在不同时期略有差异,但主要分布在文县北部和中部、武都区的西部和南部、宕昌县的中部、礼县的中部和南部、西和县南部少部分地区、成县中部少部分地区。

3.5 山洪灾害易发区空间格局变化

表6为不同情景下山洪灾害易发区空间变化,图9为未来时期山洪灾害易发区空间格局变化。从表6和图9可以看出,从当前到未来时期,陇南市山洪灾害易发区域面积呈现减少趋势。2041—2060年,山洪易发区平均缩减面积为3 469.1 km²,平均扩张面积为1 868.0 km²,平均缩

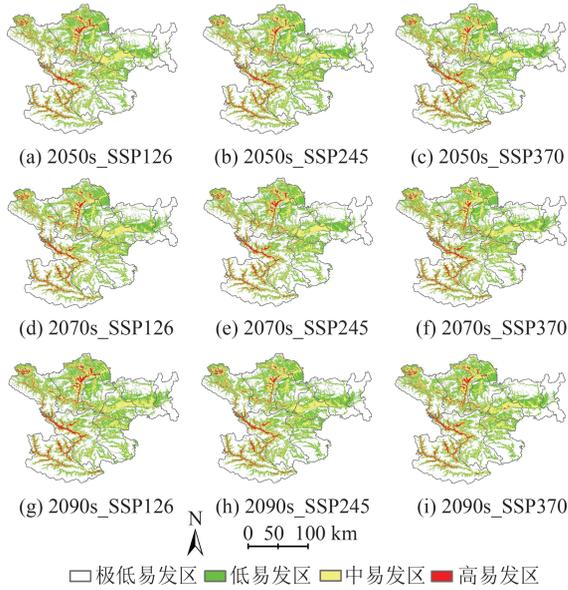


图 8 不同时期山洪灾害潜在易发区空间分布格局

Fig. 8 Spatial Distribution of Patterns of Potential Flash Flood-Prone Areas in Different Periods

减率和平均扩张率分别为 12.5% 和 6.7%;2061—2080 年,山洪易发区平均缩减的面积为 3 172.4 km²,平均扩张面积为 1 436.7 km²,其易发区平均缩减率和平均扩张率分别为 11.4% 和 5.2%;2081—2100 年山洪易发区平均缩减面积为 2 711.2 km²,平均扩张面积为 2 014.2 km²,平均缩减率和平均扩张率分别为 9.7% 和 7.3%。其缩减区域主要集中在武都区东部少部分区域、两当县和徽县中部大部分区域以及礼县北部部分区域;扩张区域主要集中在武都区西部部分地区,武都区、西和县、康县和成县 4 县交界地带,文县白水江两岸以及宕昌县北部地区。

与当前时期相比,2050s_SSP126、2050s_SSP

245 和 2050s_SSP370(见图 9(a)~9(c))情境下,平均缩减面积最大,缩减面积分别为 3 620.1 km²、3 557.4 km²和 3 229.4 km²,缩减率分别为 13.0%、12.8% 和 11.6%,缩减区域主要集中在武都区东部少部分地区、康县和徽县中部大部分地区和礼县北部地区;平均扩张面积一般,扩张面积分别为 1 938.3 km²、1 885.5 km²和 1 780.3 km²,扩张率分别为 6.9%、6.8% 和 6.4%;平均变化面积一般,分别为 1 682.1 km²、1 671.9 km²和 1 449.1 km²,变化率分别为 6.1%、6.0% 和 5.2%。2070s_SSP126、2070s_SSP245 和 2070s_SSP370(见图 9(d)~9(f))情境下,平均缩减面积一般,分别为 2 994.0 km²、3 500.1 km²和 3 023.1 km²,缩减率分别为 10.8%、12.6% 和 10.9%;平均扩张面积最小,分别为 1 528.8 km²、1 211.6 km²和 1 569.8 km²,扩张率分别为 5.5%、4.4% 和 5.6%;平均变化面积最大,分别为 1 465.2 km²、2 288.5 km²和 1 453.3 km²,变化率分别为 5.3%、8.2% 和 5.3%,平均变化面积较大说明对易发区影响较大。2090s_SSP126、2090s_SSP245 和 2090s_SSP370(见图 9(g)~9(i))情境下,平均缩减面积最小,分别为 2 317.1 km²、2 853.2 km²和 2 963.4 km²,缩减率分别为 8.3%、10.2% 和 10.6%;平均扩张面积最大,分别为 2 463.7 km²、1 773.2 km²和 1 805.7 km²,扩张率分别为 8.9%、6.4% 和 6.5%,扩张的主要地区在武都区、西和县、康县和成县 4 县交界地带、康县中南部部分地区、文县白水江两岸以及宕昌县北部地区;平均变化面积最小,分别为 -146.6 km²、1 080.0 km²和 1 157.7 km²,变化率分别为 -0.6%、3.8% 和 4.1%。

表 6 不同情景下山洪灾害易发区空间变化

Tab. 6 Spatial Variation of Flash Flood Risk Areas Under Different Scenarios

不同时期情景下	面积/km ²				变化率/%			
	缩减	保留	扩张	变化	缩减	保留	扩张	变化
2050s_SSP126	3 620.1	22 188.3	1 938.3	1 682.1	13.0	79.7	6.9	6.1
2050s_SSP245	3 557.4	22 395.1	1 885.5	1 671.9	12.8	80.4	6.8	6.0
2050s_SSP370	3 229.4	22 828.3	1 780.3	1 449.1	11.6	82.0	6.4	5.2
2050s 平均	3 469.1	22 470.6	1 868.0	1 601.0	12.5	80.7	6.7	5.8
2070s_SSP126	2 994.0	23 315.2	1 528.8	1 465.2	10.8	83.8	5.5	5.3
2070s_SSP245	3 500.1	23 126.2	1 211.6	2 288.5	12.6	83.1	4.4	8.2
2070s_SSP370	3 023.1	23 245.1	1 569.8	1 453.3	10.9	83.5	5.6	5.3
2070s 平均	3 172.4	23 228.8	1 436.7	1 735.7	11.4	83.6	5.2	6.3
2090s_SSP126	2 317.1	23 057.2	2 463.7	-146.6	8.3	82.8	8.9	-0.6
2090s_SSP245	2 853.2	23 211.6	1 773.2	1 080.0	10.2	83.4	6.4	3.8
2090s_SSP370	2 963.4	23 068.9	1 805.7	1 157.7	10.6	82.9	6.5	4.1
2090s 平均	2 711.2	23 112.6	2 014.2	697.1	9.7	83.1	7.3	2.4

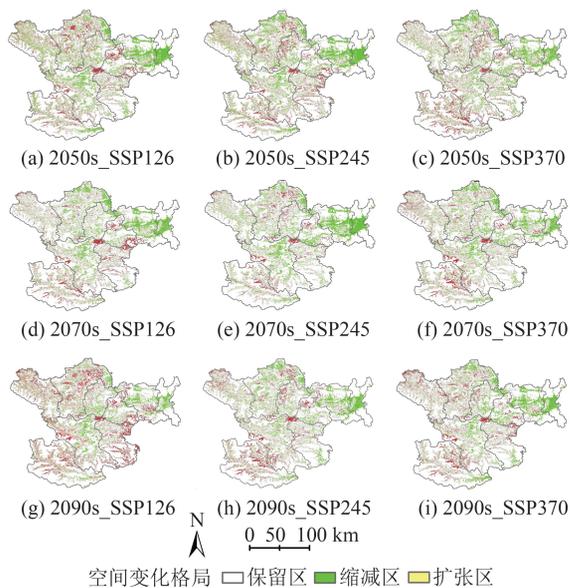


图9 未来时期山洪灾害易发区空间格局变化
Fig. 9 Spatial Pattern Change of Flash Flood-Prone Areas in the Future Periods

总体来看,未来气候下,陇南市山洪灾害易发区分布较为集中,其分布区域主要集中在陇南市河流两岸,武都区、文县和宕昌县是灾害发生的重点区域,并逐步扩张,在未来应予以重视;两当县和徽县灾害易发区面积逐步减少。

4 讨论

4.1 影响山洪灾害的主要致灾因子

本文基于研究区调查的山洪灾害,采用Max-Ent结合粒子群优化算法,利用4期气候数据获取其山洪灾害易发性时空分布,其中影响山洪灾害的致灾因子选择直接影响研究结果的可靠性。本文从山洪灾害的定义出发,综合考虑气候、地形、土壤、土地利用以及植被等方面,初步选取了32个致灾因子。然而,由于部分致灾因子间的相关性,过多的致灾因子不但不能提高灾害预测的可靠性,反而会使得部分区域的预测结果出现夸大现象^[34]。

本文利用MaxEnt模型获取了各致灾因子的贡献率和置换重要性,计算了各因子间的Pearson相关系数,通过剔除相关性大于0.8且贡献率和

置换重要性低的致灾因子,得到影响山洪灾害易发性的主要致灾因子,包括降水(bio14、bio15)、温度(bio2、bio5)、地形(剖面曲率、海拔、地形起伏度)、土地利用、距河流的距离和土壤质地。研究结果经ROC曲线评价,得到各期AUC值均大于0.85,表明本文主要致灾因子的选择具有一定的合理性。分析致灾因子的贡献率,发现降水和温度对山洪灾害易发性的影响较大。由降雨和温度的响应曲线可知(见图5),在最干月降水量为1 mm,降水量变异系数为98.2,昼夜温差月均值和最暖月最高温分别为10.6℃和13.2℃时,研究区山洪灾害易发性最大。该结论与文献[38]所得结论一致。

4.2 山洪灾害潜在易发区空间格局变化

本文在当前和未来的4个时期10种情景下,模拟了研究区山洪灾害潜在风险空间分布格局,发现山洪灾害易发区在不同时期略有差异,与当前时期相比,未来3个时期的模拟结果均表现为减少趋势。为了分析山洪灾害潜在易发区空间格局变化,对预测结果进行灾害危险区质心分析,统计发现(如表7所示),从2041—2060年来看,在SSP370情景下,其质心迁移最远,迁移距离为6.2 km,海拔从1 654 m上升到1 753 m;在SSP126情景下的质心迁移距离最近,为4.8 km,海拔上升到1 709 m。从2061—2080年来看,SSP245情景下的质心迁移最远,距离为6.2 km;SSP370情景下的质心迁移最近,距离为5.4 km,海拔上升到1 939 m。从2081—2100年来看,SSP370情景下的质心迁移最远,距离为6.4 km,海拔上升到1 734 m;SSP126情景下的质心迁移最近,迁移距离为1.8 km。结合各时期不同情境下的质心空间位置发现,山洪灾害危险区的质心格局具有向西南和高海拔方向迁移的趋势,其主要原因为未来情境下的降水和温度变化。

5 结语

本文运用MaxEnt结合粒子群优化算法模拟

表7 不同时期山洪灾害危险区质心位置迁移

Tab. 7 Location of Centroid Shift of Flash Flood Risk Area in Different Periods

统计项	2021—	2041—2060年			2061—2080年			2081—2100年		
	2040年	SSP126	SSP245	SSP370	SSP126	SSP245	SSP370	SSP126	SSP245	SSP370
经度/(°)	105.14	105.10	105.09	105.09	105.10	105.08	105.10	105.13	105.10	105.10
纬度/(°)	33.69	33.68	33.67	33.66	33.65	33.68	33.67	33.68	33.67	33.67
海拔/m	1 654	1 709	1 711	1 753	2 031	1 607	1 939	1 307	1 604	1 734
质心迁移/km	0	4.8	5.9	6.2	5.8	6.2	5.4	1.8	6.1	6.4

了当前(2021—2040年)时期及未来(2041—2060年、2061—2080年、2081—2100年)3个时期10种情境下山洪灾害的易发区空间分布格局,研究结论如下:

1)本文基于调查的山洪灾害点数据,采用MaxEnt模型获取其空间概率分布,并经粒子群优化算法对其进行优化,得到研究区山洪灾害易发性空间分布。研究发现,各时期ROC曲线的AUC值均大于0.85,精度评价达到“好”的水平,表明本文所采用的山洪灾害易发性评价方法可行,能为同类区域山洪灾害易发性评价提供参考。

2)本文对致灾因子的选取,综合考虑研究区的气候、地形、土壤、土地利用以及植被等条件,经MaxEnt获取其贡献率和置换重要性,并计算各因子间的相关系数,剔除相关性大于0.8且贡献率和置换重要性低的致灾因子,得到研究区影响山洪灾害易发性的主要致灾因子。对当前时期的研究结果分析得出,其ROC曲线的AUC值为0.905,表明本文选取的主要致灾因子具有一定的合理性。

3)从研究区的山洪灾害易发性时空分布发现,研究区山洪灾害中高易发区在不同时期有差异,主要分布于文县的北部和中部、武都区的西部和南部、宕昌县中部、礼县的中部和南部、西和县南部以及成县中部部分地区。与当前(2021—2040年)时期相比,未来(2041—2060年、2061—2080年和2081—2100年)3个时期的模拟结果均表现为减少趋势。

参 考 文 献

- [1] Liang Jiyu, Liu Shuguang, Zhou Zhengzheng, et al. A Bayesian Runoff Simulation Method Considering the Influence of Flash Flood Disaster[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2022, 50(4): 545-554. (梁冀雨, 刘曙光, 周正正, 等. 考虑山洪灾害影响的贝叶斯径流模拟方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(4): 545-554.)
- [2] Li Bin, Yan Qin, Zhang Li, et al. Flood Monitoring and Analysis over the Middle Reaches of Yangtze River Basin with MODIS Time-Series Imagery[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(7): 789-793. (李斌, 燕琴, 张丽, 等. 长江中游洪涝灾害特征的MODIS时序监测与分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(7): 789-793.)
- [3] Zhang Xingnan, Luo Jian, Chen Lei, et al. Zoning of Chinese Flood Hazard Risk[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, 31(3): 1-7. (张行南, 罗健, 陈雷, 等. 中国洪水灾害危险程度区划[J]. 水利学报, 2000, 31(3): 1-7.)
- [4] Du Zhiqiang, Li Yu, Zhang Yeting, et al. Knowledge Graph Construction Method on Natural Disaster Emergency[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(9): 1344-1355. (杜志强, 李钰, 张叶廷, 等. 自然灾害应急知识图谱构建方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(9): 1344-1355.)
- [5] Xiong Muqi, Meng Xingmin, Qing Feng, et al. Relationship Between Debris Flow Activities and Precipitation Characteristics in Bailong River Basin of Longnan Region, Gansu Province[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2016, 52(3): 295-300. (熊木齐, 孟兴民, 庆丰, 等. 甘肃省陇南市白龙江流域泥石流灾害事件与降水特征的关系[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2016, 52(3): 295-300.)
- [6] Dang Guofeng, Ji Shuzhi. Ecological Sensitivity Evaluation Based on GIS in Qinba Mountainous Area: A Case Study of Longnan Mountainous Area[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(7): 118-127. (党国锋, 纪树志. 基于GIS的秦巴山区土地生态敏感性评价: 以陇南山区为例[J]. 中国农学通报, 2017, 33(7): 118-127.)
- [7] Niu Quanfu, Feng Zunbin, Zhang Yingxue, et al. Susceptibility Assessment of Disaster Environment for Landslide Hazard Based on GIS in Lanzhou Area[J]. *Journal of Catastrophology*, 2017, 32(3): 29-35. (牛全福, 冯尊斌, 张映雪, 等. 基于GIS的兰州地区滑坡灾害孕灾环境敏感性评价[J]. 灾害学, 2017, 32(3): 29-35.)
- [8] Jiang Jincheng. A Review on Emergency Evacuation Methods for Major Sudden Disasters and Accidents[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(10): 1498-1518. (江锦成. 面向重大突发灾害事故的应急疏散研究综述[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(10): 1498-1518.)
- [9] Tsai H Y, Tsai C, Chang W N. Slope Unit-Based Approach for Assessing Regional Seismic Landslide Displacement for Deep and Shallow Failure[J]. *Engineering Geology*, 2019, 248: 124-139.
- [10] Pang Dongdong, Liu Gang, He Jing, et al. Analysis of Geological Hazard Risk Assessment in Gansu Province Based on Analytic Hierarchy Process[J]. *Land and Resources Informatization*, 2021(6): 41-47. (庞栋栋, 刘刚, 何敬, 等. 基于层次分析法的甘肃省地质灾害风险评估分析[J]. 国土资源信息化, 2021(6): 41-47.)

- [11] Saini S S, Kaushik S P, Jangra R. Flood-Risk Assessment in Urban Environment by Geospatial Approach: A Case Study of Ambala City, India [J]. *Applied Geomatics*, 2016, 8(3): 163-190.
- [12] Jia Lin, Gao Yuan, Zang Xinwei, et al. Risk Assessment of Ecological Secondary Geological Disasters Under Background of Big Data [J]. *Environmental Science and Management*, 2021, 46(10): 190-194. (贾琳, 高源, 臧新伟, 等. 网络大数据背景下生态环境次生地质灾害风险评估方法研究 [J]. *环境科学与管理*, 2021, 46(10): 190-194.)
- [13] Ji Yiwei, Li Cheng, Gao Shuai, et al. Risk Assessment of Geological Hazards of Hancheng City in Shaanxi Province [J]. *Journal of Catastrophology*, 2018, 33(3): 194-200. (姬怡微, 李成, 高帅, 等. 陕西省韩城市地质灾害风险评估 [J]. *灾害学*, 2018, 33(3): 194-200.)
- [14] Park K, Lee M H. The Development and Application of the Urban Flood Risk Assessment Model for Reflecting Upon Urban Planning Elements [J]. *Water*, 2019, 11(5): 920.
- [15] Zhou Chao, Chang Ming, Xu Lu, et al. Risk Assessment of Typical Urban Mine Geological Disasters in Guizhou Province [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(11): 1782-1791. (周超, 常鸣, 徐璐, 等. 贵州省典型城镇矿山地质灾害风险评估 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2020, 45(11): 1782-1791.)
- [16] Shi Shaobin. Geological Hazard Risk Assessment Based on Superposition Weighting and Information Model [D]. Xi'an: Chang'an University, 2022. (史少斌. 基于叠加赋权与信息量模型的地质灾害风险评估: 以宁夏隆德县为例 [D]. 西安: 长安大学, 2022.)
- [17] Xu Kui, Pan Hao, Bin Lingling, et al. Evaluation of Mountain Torrent Disaster Vulnerability in Hainan Island Based on Reinforcement Learning [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(2): 95-100. (徐奎, 潘昊, 宾零陵, 等. 基于强化学习的海南岛山洪灾害易发性评估 [J]. *水资源保护*, 2023, 39(2): 95-100.)
- [18] Zhao Long, Sang Guoqing, Wu Wei, et al. Critical Rainfall Prediction Model for Mountain Torrent Disaster Based on Random Forest Regression Algorithm [J]. *Journal of University of Jinan (Science and Technology)*, 2022, 36(4): 404-411. (赵龙, 桑国庆, 武玮, 等. 基于随机森林回归算法的山洪灾害临界雨量预估模型 [J]. *济南大学学报(自然科学版)*, 2022, 36(4): 404-411.)
- [19] Zhao G, Pang B, Xu Z X, et al. Mapping Flood Susceptibility in Mountainous Areas on a National Scale in China [J]. *The Science of the Total Environment*, 2018, 615: 1133-1142.
- [20] Lee S M, Kim J C, Jung H S, et al. Spatial Prediction of Flood Susceptibility Using Random-Forest and Boosted-Tree Models in Seoul Metropolitan City, Korea [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2017, 8: 1185-1203.
- [21] Zhou Chao, Fang Xiuqin, Wu Xiaojun, et al. Risk Assessment of Mountain Torrents Based on Three Machine Learning Algorithms [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2019, 21(11): 1679-1688. (周超, 方秀琴, 吴小君, 等. 基于三种机器学习算法的山洪灾害风险评价 [J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(11): 1679-1688.)
- [22] He Peiting, Liu Danyuan, Lu Siyan, et al. Influencing Factors of Waterlogging and Waterlogging Risks in Shenzhen City Based on MaxEnt [J]. *Progress in Geography*, 2022, 41(10): 1868-1881. (何珮婷, 刘丹媛, 卢思言, 等. 基于最大熵模型的深圳市内涝影响因素分析及内涝风险评估 [J]. *地理科学进展*, 2022, 41(10): 1868-1881.)
- [23] Yao Zhengyu, Han Qifei, Lin Bin. Prediction of Distribution Area of Main Noxious and Miscellaneous Weeds in Xinjiang Based on MaxEnt Model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(12): 5096-5109. (姚政宇, 韩其飞, 林彬. 基于最大熵模型的新疆主要有毒杂草分布区预测 [J]. *生态学报*, 2023, 43(12): 5096-5109.)
- [24] Ouyang Zeyi, Li Zhihui, Ouyang Shulong, et al. Prediction of the Potential Distribution of *Cyclobalanopsis Gilva* in China Based on the Maxent and ArcGIS Model [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2023, 43(2): 19-26. (欧阳泽怡, 李志辉, 欧阳硕龙, 等. 基于 Maxent 和 ArcGIS 的赤皮青冈在中国的潜在适生区预测 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2023, 43(2): 19-26.)
- [25] Wan Yang, Guo Jie, Ma Fengshan, et al. Landslide Susceptibility Assessment Based on MaxEnt Model of Along Sino-Nepal Traffic Corridor [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(2): 88-95. (万洋, 郭捷, 马凤山, 等. 基于最大熵模型的中尼交通廊道滑坡易发性分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(2): 88-95.)
- [26] Wang Xiaofan, Duan Yuxuan, Jin Lulu, et al. Prediction of Historical, Present and Future Distribution of *Quercus Sect. Heterobalanus* Based on the Optimized MaxEnt Model in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(16): 6590-6604. (王晓帆, 段雨

- 萱, 金露露, 等. 基于优化的最大熵模型预测中国高山栎组植物的历史、现状与未来分布变化[J]. 生态学报, 2023, 43(16): 6590-6604.)
- [27] Chen Binghuang, Miao Xiren, Jiang Hao, et al. A Method for Disaster Status Classification of Transmission Line Towers by Integrating Particle Swarm Optimization and Extreme Learning Machine[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2021, 42(4): 77-83. (陈炳煌, 缪希仁, 江灏, 等. 融合粒子群与极限学习机的输电杆塔灾害分类方法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2021, 42(4): 77-83.)
- [28] Huang Wenxin, Wu Jun, Guo Zihui, et al. Power Grid Resilience Assessment and Differentiated Planning Against Typhoon Disasters[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(5): 84-91. (黄文鑫, 吴军, 郭子辉, 等. 台风灾害下电网韧性评估及差异化规划[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(5): 84-91.)
- [29] Niu Quanfu, Xiong Chao, Lei Jiaojiao, et al. Risk Assessment of Flash Flood Disasters in Longnan Mountain Area of Gansu Province Based on FFPI Model[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2023, 32(4): 36-47. (牛全福, 熊超, 雷姣姣, 等. 基于FFPI模型的甘肃陇南山区山洪灾害风险评价[J]. 自然灾害学报, 2023, 32(4): 36-47.)
- [30] Li Boxin, Jiang Chao, Sun Jianxin. Comprehensive Assessment of Vegetation Carbon Use Efficiency in Southwestern China Simulated by CMIP6 Models[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2023, 47(9): 1211-1224. (李伯新, 姜超, 孙建新. CMIP6模式对中国西南部地区植被碳利用率模拟能力综合评估[J]. 植物生态学报, 2023, 47(9): 1211-1224.)
- [31] Wang Yu, Zhang Wanchang, Li Wangping, et al. Coupling Discrete Particle Swarm Optimization Algorithm with Maximum Entropy Model for Water Extraction from Remote Sensing Image[J]. *Henan Science*, 2020, 38(4): 538-545. (王玉, 张万昌, 李旺平, 等. 耦合最大熵模型的离散粒子群水体提取[J]. 河南科学, 2020, 38(4): 538-545.)
- [32] Liu Mingming, Liu Dandan, Lu Xing, et al. Max-Ent Model-Based Analysis of Distribution of Suitable Habitats of *Ornithodoros* Ticks in Xinjiang Uygur Autonomous Region, China[J]. *Chinese Journal of Vector Biology and Control*, 2023, 34(5): 671-678. (刘明明, 刘丹丹, 芦星, 等. 基于MaxEnt模型的新疆地区钝缘蜱适生区分布研究[J]. 中国媒介生物学及控制杂志, 2023, 34(5): 671-678.)
- [33] Cao Shoutao, Li Jun, Sun Shuaishuai, et al. Prediction Study of the Global Suitable Habitat of Brazilian Tobacco Based on MaxEnt Model[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2023, 38(3): 439-445. (曹守涛, 李军, 孙帅帅, 等. 基于MaxEnt模型的巴西烟草全球适生区预测研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2023, 38(3): 439-445.)
- [34] Niu Q, Dang X, Li Y. et al. Suitability Analysis for Topographic Factors in Loess Landslide Research: A Case Study of Gangu County, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77:294.
- [35] Niu Q F, Cheng W M, Liu Y, et al. Risk Assessment of Secondary Geological Disasters Induced by the Yushu Earthquake[J]. *Journal of Mountain Science*, 2012, 9(2): 232-242.
- [36] Liu Tongtong, Wu Yuekai, Hu Kai. Predicting Potentially Suitable Area of *Hylobitelus Xiaoii* in Guizhou Based on the MaxEnt Model[J]. *South China Forestry Science*, 2023, 51(3): 65-69. (刘童童, 吴跃开, 胡凯. 基于MaxEnt模型的贵州萧氏松茎象适生区预测[J]. 南方林业科学, 2023, 51(3): 65-69.)
- [37] Li Yunfeng, He Ping, Meng Fanyun. Quality Change Analysis of *Epimedium Brevicornu Maxim.* in Taohe River Basin in Southern Gansu Province Based on the MaxEnt Model[J]. *Journal of Sichuan University (Natural Science Edition)*, 2023, 60(2): 156-162. (李云峰, 何平, 孟繁蕴. 基于MaxEnt模型的甘肃省南部洮河流域淫羊藿品质变化分析[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2023, 60(2): 156-162.)
- [38] Ren Hongyu, Du Jun, Ding Wenfeng, et al. Risk Assessment of Mountain Torrents Disaster in China Based on GIS[J]. *Journal of Catastrophology*, 2018, 33(4): 86-92. (任洪玉, 杜俊, 丁文峰, 等. 基于GIS的全国山洪灾害风险评估[J]. 灾害学, 2018, 33(4): 86-92.)