

高度城市化区域洪涝孕灾环境敏感性时空演变分析

高玉琴,曹 祥,季孔阳,孙飞雪,李振龙

(河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:针对高度城市化区域洪涝孕灾环境研究不足的问题,基于模糊逻辑方法,构建了洪涝孕灾环境敏感性评估模型,利用 Fuzzy Gamma 与 Fuzzy Sum 算子进行非线性分级叠加,从而评估洪涝孕灾环境的敏感性,结合趋势分析、核密度估计、莫兰指数方法分析其时空演变特征,并应用于秦淮河流域。结果表明:秦淮河流域整体敏感性水平呈上升趋势,子流域之间敏感性差异显著,2020 年 78% 的易积淹水点分布在敏感性大于 0.5 的高敏区域,模型评估结果与实测风险分布高度吻合;提出的方法能较好地评估高度城市化区域洪涝孕灾环境敏感性并反映其时空演变特征。

关键词:洪涝孕灾环境;敏感性评估模型;模糊逻辑;秦淮河流域

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)06-0018-10

Spatial and temporal evolution analysis of sensitivity of flood disaster-prone environment in highly urbanized areas//GAO Yuqin, CAO Xiang, JI Kongyang, SUN Feixue, LI Zhenlong(*College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: In response to the problem of insufficient research on flood disaster-prone environment in highly urbanized area, a sensitivity assessment model for flood disaster-prone environment was constructed based on fuzzy logic methods. Using Fuzzy Gamma and Fuzzy Sum operators for nonlinear hierarchical superposition, the sensitivity of flood disaster-prone environment was evaluated by the model. Trend analysis, kernel density estimation, and Moran's index methods were combined to analyze their spatiotemporal evolution characteristics, and a case study was conducted in the Qinhuai River Basin. The results indicate that the overall sensitivity level of the Qinhuai River Basin showed an increasing trend, with significant differences among sub-basins. In 2020, 78% of flood-prone points were distributed in highly sensitive areas with sensitivity greater than 0.5, demonstrating high consistency between model assessments and measured risk distribution. The proposed method effectively assesses the sensitivity of flood disaster-prone environment in highly urbanized areas and reflects its spatiotemporal evolution characteristics.

Key words: flood disaster-prone environment; sensitivity assessment model; fuzzy logic; the Qinhuai River Basin

我国的灾害学研究中,史培军^[1]较早完善了灾害系统论理论体系,认为灾情是由致灾因子、孕灾环境和承灾体相互作用的结果,其中孕灾环境被认为是孕育和触发灾害的自然环境与人文环境相结合的整体。当前针对孕灾环境的研究主要关注山区地质灾害等领域^[2],而针对洪涝孕灾环境方面的研究较少,且通常是结合致灾因子和承灾体共同评估致灾风险^[3-4]。洪涝孕灾环境是一个包含多要素的整体,现有的相关研究多针对洪涝孕灾环境的部分主要构成要素^[5-6],并且洪涝灾害的致灾因子与孕灾环境常被混淆,对洪涝孕灾环境的内涵界定也尚无定论。洪涝灾害通常与强降雨事件有关,极端降水量、高降雨强度或长降雨历时都可能导致河流、湖泊或

其他水体的水位迅速上升,而城市的高密度建设和不良排水系统使得降雨无法迅速排出,导致洪水或内涝发生。人类和人类活动所聚集的社会是洪水的直接作用对象,承载洪涝灾害进程,洪涝灾害的严重程度最终由承灾体受灾前后的状态变化体现。因此,气象因素是洪涝灾害产生的先决条件,即致灾因子;人类和人类社会是致灾因子所直接作用而导致受灾的对象,即承灾体;洪涝孕灾环境是容易导致洪涝灾害或受灾害影响的环境条件,例如植被、土壤、地形、地质、下垫面条件等,影响洪涝灾害发生的强度。本文将洪涝孕灾环境界定为影响洪灾发展的要素,主要包括地形地势、水文环境、下垫面条件、景观格局和排水能力等。需要指出的是,排水能力(如

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3006501-01)
作者简介:高玉琴(1978—),女,教授,博士,主要从事水利规划与水利经济研究。E-mail: yqgao@hhu.edu.cn

排水管网、泵站等)严格意义上属于承灾体的人为改造与适应能力范畴,但鉴于其在洪涝形成过程中的直接调节作用,本文将作为补充调控因子纳入孕灾环境敏感性评估体系。

孕灾环境敏感性指其构成因素发生变化时对洪灾风险的影响程度。孕灾环境敏感性是洪涝灾害风险形成的前置条件,与承灾体暴露度和脆弱性共同决定最终洪涝风险水平。敏感性较高的区域在遭遇同等致灾因子时更易积水,引发洪涝,暴露度和脆弱性也相应提升,导致灾害风险加大。因此,孕灾环境敏感性不仅是洪涝风险评估的重要因素,也可为识别潜在高风险区域、制定防灾减灾措施提供科学依据。已有关于孕灾环境敏感性的研究多聚焦于数据的非时空属性以及洪涝的水文过程和时间变化^[7],忽略了其空间演变。随着 3S 技术的发展,Kriging 内插、标准差椭圆和空间自相关等时空统计方法^[8-9]被应用于分析洪涝灾害的空间分布和动态变化^[10-11]。目前,洪涝孕灾环境时空变化的研究主要针对土地利用或下垫面的时空变化进行,没有综合考虑洪涝孕灾环境包含的构成要素。

近年来极端降水频发,高度城市化区域的城市建设改变了河网分布^[12]和下垫面性质^[13-14],不透水面增加,自然水循环受影响,其洪涝孕灾环境显著变化,进而导致城市洪水风险加剧^[15]。本文利用模糊逻辑叠加法构建孕灾环境敏感性评估模型,通过收集地形、土壤、河网水系、土地利用、遥感影像等相关数据,选取洪涝孕灾环境敏感性评估因子,研究孕灾环境敏感性的时空演变特征,并在秦淮河流域验证该方法的可行性和适用性。

1 洪涝孕灾环境敏感性评估模型构建

洪涝孕灾环境敏感性涉及地形、地势、水文、气象等要素,在对高度城市化区域洪涝灾害的成灾机理进行分析的基础上,选取合适的评估因子,构造模糊隶属度函数,采用 Fuzzy Gamma 算子和 Fuzzy Sum 算子进行分级非线性叠加,评估洪涝孕灾环境的敏感性。

1.1 评估因子选取

现有的洪涝灾害相关研究^[16-18]主要选取土地利用覆被变化、河网水系变化、下垫面变化等作为评估指标构建评价体系,但该评价视角单一且未考虑洪涝孕灾环境的构成因素。城市洪涝灾害发生的一个重要原因是极端暴雨频发^[19],遭遇强降雨或极端暴雨之后,地表水不能及时排出或河道水位漫过堤顶均会导致洪涝灾害,因此地形地势、水系特征、排水能力都影响洪涝孕灾环境的敏感性。此外,高度

城市化区域剧烈的人类活动对下垫面类型和格局的改造也使得城市区域天然调蓄水体锐减、天然汇水格局被影响、不透水面比例增大,进一步导致地表产流量加大、汇流速度加快,洪涝孕灾环境敏感性大大增加,致灾速度加快。综合以上对于高度城市化区域洪涝灾害成灾机理的分析^[20-21],同时结合景观生态学、地质灾害学等学科的研究视角与方法,选取地形因素、水系环境、下垫面条件、景观格局 4 个方面的评估因子构建洪涝孕灾环境敏感性评估体系,同时引入排水能力这一人为调控因子,以反映城市排水能力对洪涝孕灾环境的直接调节作用。

地形因素包括坡度、地势、水流路径等因素,通过合理规划建设,使洪水能够顺畅排泄,可以减少城市内涝和灾害风险。水系环境指城市周边河流、湖泊等水体及其流域的自然条件与人工干预的综合状况,良好的水系环境可以有效调节雨洪,减少洪水淹没的范围和强度。下垫面条件指城市土地利用类型、地表覆盖物等对雨水渗透和汇流过程的影响,合理的下垫面管理,比如增加透水材料、建设绿地等措施,有助于减少地表径流,降低洪涝灾害的风险。景观格局指城市区域内自然和人工景观的空间分布及其相互作用对洪涝风险的调控能力,通过规划城市景观可以优化雨水管理系统,增加洪水调蓄空间,提升城市防洪韧性。排水能力指城市通过排水管网、泵站等设施将积水排除的能力,完善的排水系统能够在暴雨期间有效排水,减少城市内涝发生的频率和强度,保障城市运行的正常秩序。综合以上 5 个方面,选取地形起伏度 (relief degree of land surface, RDLS)、地形湿润指数 (topographic wetness index, TWI)、河网密度 (drainage density, DD)、离水距离 (distance from water, DW)、植被覆盖率 (fractional vegetation cover, FVC)、归一化建筑指数 (normalized difference built-up index, NDBI)、斑块密度 (patch density, PD)、聚合度指数 (aggregation index, AI)、道路密度 (road density, RD)、土壤孔隙度 (soil porosity, SP) 作为洪涝孕灾环境敏感性的评估因子。其中,景观格局类指标能够反映城市自然与人工景观的空间组成与连通性,对产汇流过程及洪水调蓄能力具有重要调控作用。例如,斑块密度较高表明地表景观破碎化程度大,调蓄能力下降、汇流路径复杂,易导致地表径流快速汇集,增加洪涝孕灾环境敏感性;聚合度指数较大则说明景观斑块空间聚合度大,可能在一定程度上增强下垫面连续性和径流集中性,对洪涝过程产生显著影响。合理的景观格局有助于延缓洪峰、增加蓄水空间、降低洪涝风险,而不合理的景观格局则会加剧洪涝灾害。

1.2 模糊隶属度函数构建

洪涝孕灾环境敏感性评估因子的模糊映射可以表达其与洪涝孕灾环境敏感性的模糊关系,通过模糊隶属度函数可以将评估因子特征值转换为孕灾环境敏感性的隶属度。将洪涝孕灾环境敏感性评估因子集合 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 作为输入变量,将隶属度集合 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ 作为输出变量,其中, u_i 为洪涝孕灾环境敏感性单个评估因子的特征值集, f_i 为评估因子模糊映射后的洪灾孕灾环境敏感性的模糊集, u_i 映射转化至 f_i 的对应法则用隶属度函数 $h_i(x)$ 表示,其模糊映射过程表达式为

$$\begin{cases} h_i(x):u_i \rightarrow f_i & f_i = \{y | y = h_i(x), x \in u_i\} \\ H(x):U \rightarrow F & h_i(x) \in H(x) \end{cases} \quad (1)$$

其中 $H(x) = \{h_1(x), h_2(x), \dots, h_n(x)\}$ 式中: $H(x)$ 为综合隶属度函数集合,包含与所有敏感性评估因子相匹配的隶属度函数,可以反映地区的空间分布特征; x 为洪涝孕灾环境敏感性的评估因子特征值; y 为模糊映射后的隶属度。 y 的取值范围为 0~1, y 值越接近 1,洪涝灾害发生的可能性越大, x 越有利于洪涝灾害的孕育发展,对洪涝孕灾环境敏感性集合的隶属度越高, $y=1$ 表明 x 完全属于该集合; y 值越接近 0,洪涝灾害发生的可能性越小, $y=0$ 表示 x 明确不属于洪涝孕灾环境敏感性集合。

模糊逻辑方法中常见的隶属度函数可分为 3 类,函数曲线形态主要表现为 Z 形、S 形和钟形,如图 1 所示。Z 形曲线呈递减趋势,随着评估因子值增大,发生洪涝灾害的可能性降低,隶属度也逐渐减小,即评估因子为负相关因子。相反,S 形曲线呈递增趋势,洪涝灾害发生可能性随着评估因子值的增大而增加,对应的隶属度也逐渐增大,即评估因子为正相关因子。钟形曲线与正态分布曲线形态相似,在评估因子为特定值时,发生洪涝灾害的可能性较高,此时隶属度最大,为 1;评估因子越偏离该特定值,隶属度越小并趋近于 0,洪涝灾害孕育和发展的可能性也越低,即评估因子为适度型因子。

根据洪涝孕灾环境敏感性评估因子的特征规律,参考王兆礼等^[22-25] 研究中关于评估因子与洪涝风险关系的结论,选取隶属度函数。地形起伏度、地

形湿润指数、不透水面指数、聚合度指数为正相关因子,适用于 S 形隶属度函数,表达式见式(2);河网密度、距水距离、植被覆盖率、斑块密度、道路密度、土壤孔隙度等为负相关因子,适用于 Z 形隶属度函数,表达式见式(3)。

$$h(x) = 1/[1 + (x/b)^{-a}] \quad (2)$$

$$h(x) = 1/[1 + (x/b)^a] \quad (3)$$

式中: a 为散度参数,反映曲线过渡区的宽度和变化速率; b 为中点参数,表示隶属度达到 0.5 时的评估因子取值位置,用于确定曲线的中心位置。

1.3 模糊集分级叠加

常用的模糊集合叠加方法有 Fuzzy And、Fuzzy Or、Fuzzy Product、Fuzzy Sum、Fuzzy Gamma 等^[26]。传统模糊逻辑分析中仅考虑多因子影响的平均水平,多采用单级线性叠加方法生成包含多个敏感性评估因子的敏感性模糊集,没有考虑因子变化特征和贡献度的差异性,导致评价结果缺乏合理性^[27]。针对这一问题,改进的模糊逻辑分析法采用非线性分级叠加方式^[28] 分析敏感性特征,并通过分级非线性叠加调节区域综合敏感性程度。一组输入模糊集的模糊和可用 Fuzzy Sum 算子进行计算,这一算子通过逐点叠加多个输入模糊集的隶属度函数,得到一个能够反映所有输入模糊集综合信息的新模糊集;在模糊逻辑叠加中,Fuzzy Sum 算子通常用于将多个输入图层或信息源进行融合的场景。Fuzzy Product 算子将评估因子的隶属度函数进行逐点相乘,取相应点上的最小值作为输出的隶属度值,得到两个模糊集合的交集,运算结果小于或等于输入变量的最小值。Fuzzy Gamma 算子综合 Fuzzy Product 和 Fuzzy Sum 运算得到组合模糊集,对隶属度值进行参数 γ 的幂运算,输出结果表示经过参数调整后的隶属度,计算公式为

$$G(f_i) = [1 - \prod_{i=1}^n (1 - f_i)]^\gamma (\prod_{i=1}^n f_i)^{1-\gamma} \quad (4)$$

式中 $G(\cdot)$ 为 Fuzzy Gamma 算子。 γ 取值范围为 0~1, $\gamma=1$ 时 $G(\cdot)$ 为 Fuzzy Sum 算子, $\gamma=0$ 时 $G(\cdot)$ 为 Fuzzy Product 算子。

本文所选取的洪涝孕灾环境敏感性评估因子在

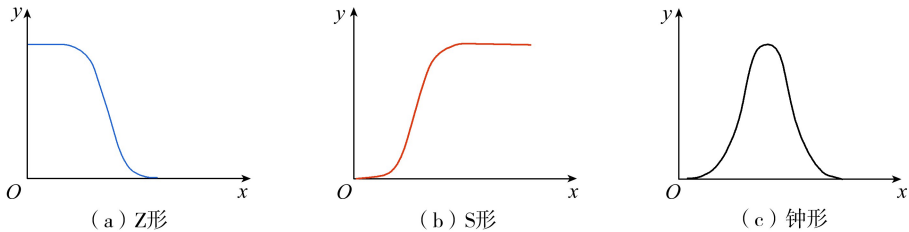


图 1 常见的隶属度函数类型

Fig. 1 Common types of membership functions

研究时段内变化较小,因此采用分级非线性叠加方式,将洪涝孕灾环境敏感性分时段评估因子与非时段变化评估因子的模糊集通过 Fuzzy Gamma 算子分别叠加,再将所得分时段评估因子模糊集与非时段变化评估因子模糊集通过 Fuzzy Sum 算子进行二次叠加,从而得到能够反映综合信息的模糊和。以 0.1 为步长间隔依次增加,对于 Fuzzy Gamma 叠加运算过程中的 γ 参数进行测试,从而得到最优取值。与传统的主客观赋权法相比,模糊分级叠加方法无需人为设定权重,直接通过隶属度函数反映各评估因子对孕灾环境敏感性的影响程度。Fuzzy Gamma 算子结合了 Fuzzy Product 与 Fuzzy Sum 的优点,使不同评估因子间的非线性关系得以合理表达,避免了简单线性加权可能忽视因子间相互影响的问题。与传统方法相比,模糊分级叠加更适合用于存在因子间模糊交互特性且难以精确定量权重的复杂环境系统,尤其适用于城市洪灾这一多因素耦合问题。为实现对洪涝孕灾环境敏感性的有效分类,参考李继清等^[29]的研究,将敏感性划分为两种情况,0~<0.5 为低敏,0.5~1 为高敏。

2 洪涝孕灾环境时空演变分析方法

采用 Theil-Sen 斜率估算与 Mann-Kendall 趋势检验相结合的分析方法以及核密度估计分析法对洪涝灾害孕灾环境敏感性的时间变化特征进行分析^[30-31];利用莫兰指数进行洪涝孕灾环境敏感性的全局自相关分析,结合莫兰指数散点图和 LISA 聚类图进行局部自相关分析,研究洪涝灾害孕灾环境敏感性的空间变化特征。

2.1 时间特性分析方法

一元线性回归趋势分析法是最基本的趋势分析方法,原理清晰、操作简便,但其对数据的线性关系要求较强,且对异常值较为敏感;Hurst 指数分析法可用于衡量时间序列的长期记忆性,但通常要求较长跨度的数据,并且对数据噪声敏感,难以反映趋势的方向性与速率信息。本文研究时段为 1990—2020 年,样本量相对较小,时间序列相对较短,可能存在异常点和非线性变化,因此选择 Theil-Sen 斜率估算和 Mann-Kendall 趋势检验相结合的分析方法^[32]分析洪涝孕灾环境敏感性的时间变化趋势,并根据 Theil-Sen 斜率的均值和标准差,将洪涝孕灾环境敏感性的增长速率划分为高速、中速和低速 3 种类型。

为分析洪涝孕灾环境敏感性值在不同时段分布演化,选择核密度估计方法绘制密度曲线,从而更清晰地展示研究时段内数据的集中程度和分布特

征。该方法不依赖于数据的概率分布形式,能更灵活地反映集中趋势与变异性。

2.2 空间特性分析方法

基于洪涝孕灾环境敏感性数据的空间连续性、无特定分布假设及聚集性探测需求,本文选用莫兰指数作为空间自相关分析工具。莫兰指数通过空间权重矩阵衡量某一变量在空间中是否存在正向或负向的空间聚集,其全局值用于判断整体空间自相关强度,局部值则揭示区域内的局部异常或聚集模式。莫兰指数的取值范围为-1~1,在给定的置信水平 P 的条件下,若莫兰指数显著且为正值,则表示样本数据在空间上集聚;若莫兰指数显著且为负值,则表示样本数据在空间上分散。当且仅当莫兰指数接近 0 时,样本数据在空间上相关性较弱,服从空间随机分布,表现出离散性。此外,在 P 值通过检验的情况下,莫兰指数大于 0.2 或小于-0.2 表明具有明显的空间效应,莫兰指数大于 0.7 表明呈现显著的空间正相关关系。

在具体应用中,本文通过计算各年份敏感性数据的莫兰指数评估其空间分布格局,并结合局部莫兰指数散点图与 LISA 聚类图进行可视化表达。莫兰指数散点图可将研究单元划分为 4 个象限,第一象限表示高-高聚集,第三象限表示低-低聚集,第二象限表示高-低离群,第四象限表示低-高离群。LISA 聚类图进一步标识局部空间结构类型,包括高-高聚集区、低-低聚集区、高-低异常点、低-高异常点,有助于识别敏感性变化的空间异质性。

3 实例应用

3.1 研究区概况

秦淮河流域位于江苏省南京市中心地带,包括南京市所辖的鼓楼区、秦淮区、江宁区、溧水区的部分区域以及句容市的部分区域,具有典型的高度城市化特征。随着城市的快速发展,秦淮河流域内人口密度和建筑密度持续上升,土地利用类型以建设用地为主,硬质下垫面广泛分布,导致地表径流增加,透水能力减弱。城市扩张过程中,道路密度增加,建筑物集中度提升,城市热岛效应和水文调节能力下降的问题日益突出。根据秦淮河南北两源的特征,选择西北村和九龙桥作为分界点,将流域分为上、中、下游。同时,考虑到河流流经的重要城市以及子流域之间的协调性,将上游进一步划分为句容河流域和溧水河流域。根据各二级子流域的水文特性,进一步划分三级子流域,形成秦淮河流域-二级子流域-三级子流域的层级结构,共 14 个子流域,记为 W1~14。子流域划分如图 2 所示。

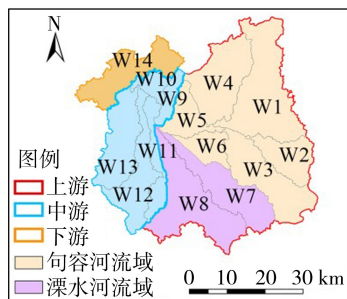


图2 秦淮河流域子流域划分

Fig. 2 Sub-basin division of the Qinhuai River Basin

3.2 数据来源

研究区的流域边界通过 ArcGIS 提取、裁剪获得;空间分辨率为 30 m 的基础遥感影像数据来自 Landsat5、Landsat7 以及 Landsat8;DEM 数据通过 91 卫图助手软件下载,其精度为 30 m;水系数据通过 ArcGIS 平台对 DEM 数据进行水文分析提取并与纸质地图和历史影像图进行对比校正获得;路网矢量数据通过 91 卫图助手软件下载,并与纸质地图和历史影像图进行对比校正获得;土地利用数据、GDP 数据均来自中国科学院地理科学与资源研究所 (<http://www.resdc.cn>);易积淹水点位置根据《南京市、句容市积淹水点整治报告(2020 年)》进行定位并在 ArcGIS 中可视化。各类数据地理坐标系为 GCS_WGS_1984,投影坐标系为 WGS_1984_UTM_Zone_50N。

3.3 秦淮河流域洪涝孕灾环境敏感性评估

使用 Fuzzy Gamma 算子分别叠加分年度因子以及不分年度因子,模糊叠加过程中的参数以 0.1 步长间隔测试取值,分别计算不同 γ 值下的洪涝孕灾环境敏感性结果,并与易积淹水点分布进行比对,以判别模型识别能力和空间匹配度。结果表明,当

$\gamma=0.9$ 时模型模拟的敏感区与实测积淹水点的空间重合度最高,综合判识能力最佳,因此选取 $\gamma=0.9$ 作为最优值。同时,为检验模型对参数 γ 的敏感性,将 γ 在 0.7~1.0 取值,并进行对比分析,发现 γ 在此区间内变化时,洪涝孕灾环境敏感性结果的整体空间格局保持稳定,仅在边缘区域高敏、低敏界限有所微调,表明模型对参数 γ 具有一定稳健性。进而通过 Fuzzy Sum 算子将上述两类因子进行模糊叠加,得到 1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年秦淮河流域洪涝灾害孕灾环境敏感性空间分布,如图 3 所示。

2020 年为研究时段的末端年份,城市化发展水平相对较高,城市空间格局趋于稳定,相关地表要素和规划信息具备较高的完整性与代表性,且 2020 年是研究周期内土地利用、遥感影像、路网结构等多源空间数据最为丰富和一致的年份,有利于实现多因子的空间叠加与敏感性验证分析,选择 2020 年作为易积淹水点与洪涝孕灾环境敏感性模拟结果的对比验证年份。在 ArcGIS 中将收集到的研究区易积淹水点可视化,并与 2020 年研究区洪涝孕灾环境敏感性模拟结果进行叠加对比,如图 4 所示,可见易积淹水点位置基本位于高敏区域。

利用 ArcGIS 中值提取至点工具提取各积淹水点所在位置的敏感性数值,大部分易积淹水点所在位置的洪涝孕灾环境敏感性较大,78% 的易积淹水点敏感性超过 0.5。研究区洪涝孕灾环境敏感性大于 0.8 的易积淹水点数量占比为 37.80%,洪涝孕灾环境敏感性为 0.6~0.8 的易积淹水点数量占比为 32.93%。可见,发生积水淹水较多的区域与洪涝灾害孕灾环境敏感性较高的区域基本一致,匹配度较

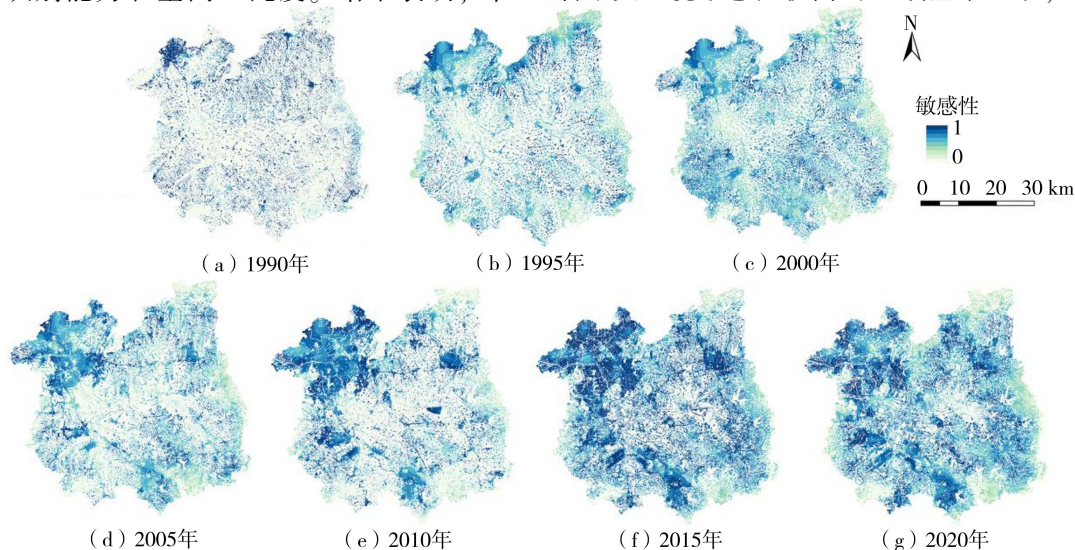


图3 秦淮河流域洪涝孕灾环境敏感性空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of sensitivity of flood disaster-prone environment in the Qinhuai River Basin

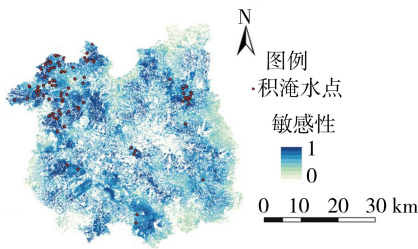
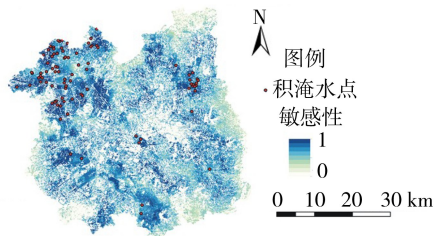


图4 秦淮河流域积淹水点与敏感性模拟结果的叠加对比

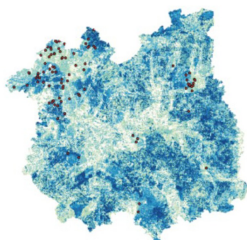
Fig. 4 Comparison of stacked flooding points and sensitivity simulation results in the Qinhuai River Basin

高,洪涝孕灾环境敏感性评估结果与现实情况大致符合,能够为提示城市洪水灾害、评估易淹易涝风险提供依据。

为进一步验证敏感性评估方法的适用性与有效性,对基于模糊逻辑法与传统层次分析赋权法两种方法的评估结果进行对比,以2020年易积淹水点作为实际风险参照进行精度验证,结果如图5所示。由图5可见,在基于模糊逻辑法的敏感性评估结果中,共有78%的易积淹水点位于高敏区域,空间分布与实测数据高度吻合,体现出较强的识别能力与实用价值。而基于层次分析赋权法的敏感性评估结果中,仅有43%的易积淹水点位于高敏区域,明显低于模糊逻辑法的判别精度,部分积水风险区未能被有效识别。造成这种差异的关键在于基于不同方法的评估模型对因子非线性关系与模糊性处理能力的不同。层次分析赋权法基于线性叠加原理,将各因子权重固定后进行统一计算,虽然具有结构清晰、方法成熟等优点,但难以充分反映不同因子在不同



(a) 模糊逻辑法



(b) 层次分析赋权法

图5 基于两种方法的秦淮河流域洪涝孕灾环境敏感性评估对比

Fig. 5 Comparison of sensitivity assessment of flood disaster-prone environment in the Qinhuai River Basin based on two methods

区域或不同值域下对敏感性的复杂影响。而模糊逻辑法通过设定适应实际物理意义的隶属度函数,实现了因子值向敏感性等级的非线性映射,能够更灵活地表达地形、土地利用、人类活动等因素对洪涝孕灾环境的影响强度差异,进而提高了模型对敏感区的识别能力。

3.4 秦淮河流域洪涝孕灾环境敏感性时间变化分析

图6为1990—2020年秦淮河流域各子流域的洪涝孕灾环境敏感性。由图6可见,秦淮河流域各子流域孕灾环境敏感性均呈现先上升后下降的趋势。子流域W5、W6、W9、W10、W11、W12、W13、W14的洪涝孕灾环境敏感性均在2015—2020年有不同程度的下降。1990年各子流域洪涝孕灾环境敏感性均在0.3以下,2015年下游子流域和子流域W10的洪涝孕灾环境敏感性超过0.6,达到研究时段内的最大值,到2020年各子流域孕灾环境敏感性均为0.3~0.6。1990—2010年下游子流域洪涝孕灾环境敏感性显著高于其他子流域,2005年后子流域W10的洪涝孕灾环境敏感性迅速增大,到2015年时超越下游子流域成为敏感性最大的子流域。子流域W3、W6、W7在研究时段内洪涝孕灾环境敏感性始终较低。

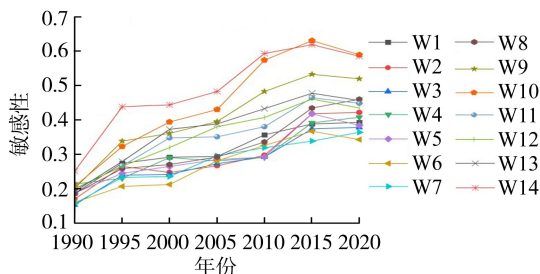


图6 1990—2020年秦淮河流域各子流域的洪涝孕灾环境敏感性

Fig. 6 Sensitivity of flood disaster-prone environment in various sub-basins of the Qinhuai River Basin from 1990 to 2020

3.4.1 变化趋势分析

秦淮河流域各子流域的洪涝孕灾环境敏感性增长趋势均通过了0.01水平的显著性检验,图7为1990—2020年秦淮河流域各子流域洪涝孕灾环境敏感性增长速率。由图7可见,1990—2020年秦淮河流域的洪涝孕灾环境敏感性总体上呈显著增长趋势,但区域差异明显。其中,流域上游仅有子流域W2和W8为中速增长,上游其他子流域均为低速增长。究其原因,子流域W8可能受到溧水区城市扩张的影响,不透水面增长较多,导致洪涝孕灾环境敏感性增长相对较快,子流域W2有较多支流水系在研究时段内退化,河网水系萎缩程度较大,导致洪涝

孕灾环境敏感性增长相对较快。秦淮河下游子流域W14及与其相近的子流域W9、W10为高速增长,子流域W8、W11、W12、W13和W2为中速增长,其余子流域均为低速增长。

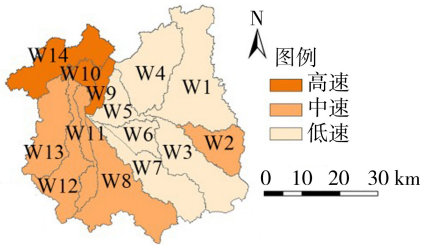


图7 1990—2020年秦淮河流域各子流域洪涝孕灾环境敏感性增长速率

Fig.7 Growth rate of sensitivity of flood disaster-prone environment in various sub-basins of Qinhuai River Basin from 1990 to 2020

3.4.2 核密度分析

图8为1990—2020年秦淮河流域洪涝孕灾环境敏感性三维核密度图。由图8可见,从分布位置来看,秦淮河流域洪涝孕灾环境敏感性的核密度曲线呈现随时间整体向右移动的趋势,说明秦淮河流域的洪涝孕灾环境敏感性呈逐年上升的趋势。从分布形态来看,核密度曲线的波峰呈现由陡峭向扁平变化的趋势,1990年和1995年波峰较为陡峭,表明1990—1995年秦淮河流域各子流域之间的洪涝孕灾环境敏感性差距较小,2000—2010年核密度曲线的波峰较为扁平,且峰宽明显变大,秦淮河流域洪涝孕灾环境敏感性的地区差距呈现逐渐扩大的趋势。2015年的核密度曲线出现一个主峰和一个侧峰,表明2015年秦淮河流域洪涝孕灾环境敏感性在一定程度上出现两极分化的现象。此外,与2010年相比,2015年和2020年核密度曲线的峰值略有增大而峰宽略有减小,即2015—2020年秦淮河流域各子流域洪涝孕灾环境敏感性增加而地区差距缩小。

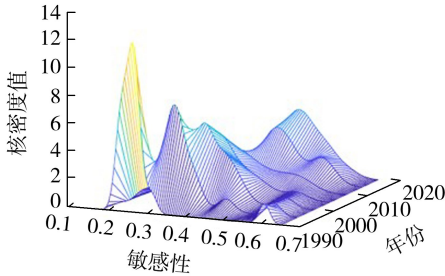


图8 1990—2020年秦淮河流域洪涝孕灾环境敏感性三维核密度图

Fig.8 Three-dimensional kernel density map of sensitivity of flood disaster-prone environment in the Qinhuai River Basin from 1990 to 2020

3.5 秦淮河流域洪涝孕灾环境敏感性空间变化分析

3.5.1 全局空间自相关

利用全局莫兰指数反映1990—2020年秦淮河流域洪涝孕灾环境敏感性的空间相关趋势和集聚特征,计算结果如表1所示,其中I为莫兰指数值,Z为Mann-Kendall趋势检验值。1990—2020年秦淮河流域洪涝孕灾环境敏感性空间相关性检验结果的P值均小于0.01,数据可靠性高。由表1可见,全局莫兰指数均大于0.6,具有一定的空间正相关性;Z值均远远大于2.58,表明秦淮河流域洪灾孕灾环境敏感性数据呈现显著的集聚特征。

表1 秦淮河流域洪涝孕灾环境敏感性全局莫兰指数

Table 1 Global Moran's I of sensitivity of flood disaster-prone environment in the Qinhuai River Basin		
年份	I	Z
1990	0.608	64.750
1995	0.668	68.919
2000	0.635	66.390
2005	0.672	71.923
2010	0.765	79.551
2015	0.687	71.154
2020	0.658	68.004

图9为秦淮河流域洪涝孕灾环境敏感性全局莫兰指数散点图。由图9可见,数据点大部分位于第一象限和第三象限,表明秦淮河流域洪涝孕灾环境敏感性在空间分布上呈集聚特征,整体看来是较显著的正向空间自相关性,即高值区域与高值区域相关联,低值区域与低值区域相关联。说明在秦淮河流域各子流域之间洪涝孕灾环境敏感性高低并不是随机和离散分布的,具有较强的集聚特征,洪涝孕灾环境敏感性的空间同质性较高。1990—2010年的洪涝孕灾环境敏感性集聚程度逐年增加,2010年后集聚程度逐年下降,可能与部分区域在城市化发展后期更关注环境保护与基础排水设施建设改造,从而使洪涝孕灾环境敏感性降低有一定相关性。

3.5.2 局部空间自相关

将1990—2020年秦淮河流域洪涝孕灾环境敏感性数据导入Geoda软件,以1 km×1 km的网格作为评价单元进行局部空间自相关分析,结果如图10所示。由图10可见,1990—2020年秦淮河流域大部分为高-高集聚区和低-低集聚区。1990—2010年下游高-高集聚区逐渐增多,2010年后下游高-高集聚区减少,中上游高-高集聚区增多,表明高洪涝孕灾环境敏感性区域逐渐由流域下游转移至江宁、溧水、句容等后发城市化区域。这一变化与秦淮河流域的城市空间结构调整和土地利用变化密切相关。江宁、溧水在此期间经历了快速城市化和产业布局

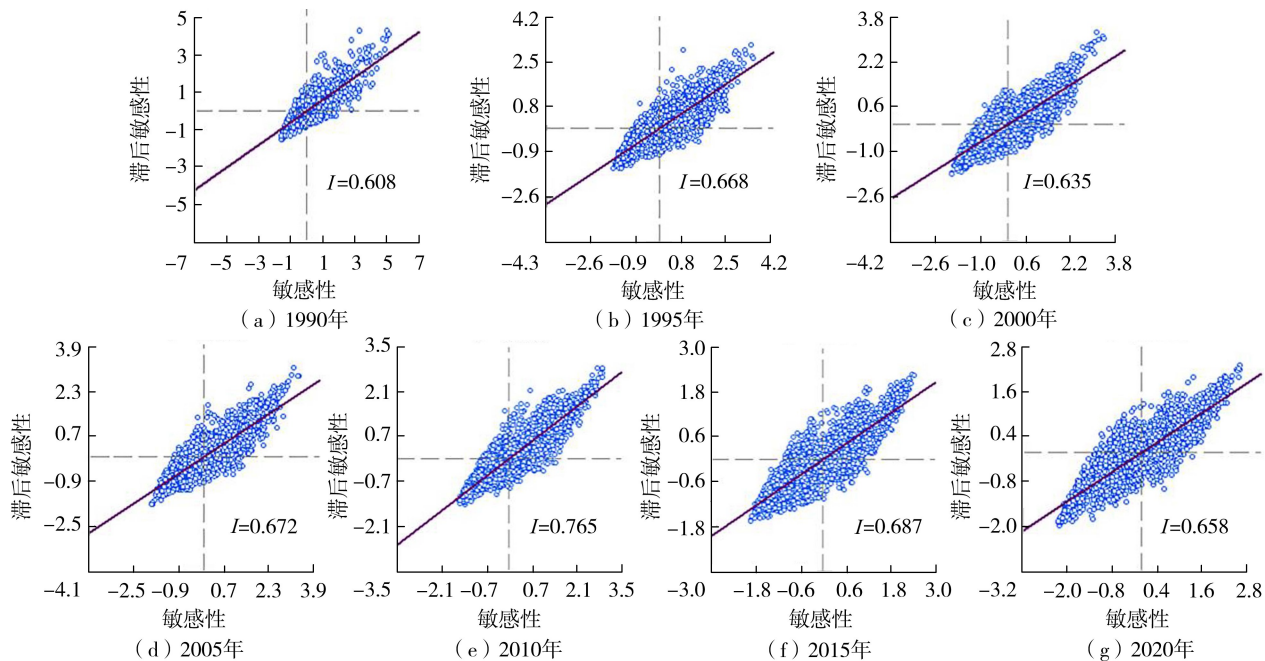


图 9 秦淮河流域洪涝孕灾环境敏感性全局莫兰指数散点图

Fig. 9 Global Moran's I scatter plot of sensitivity of flood disaster-prone environment in the Qinhuai River Basin

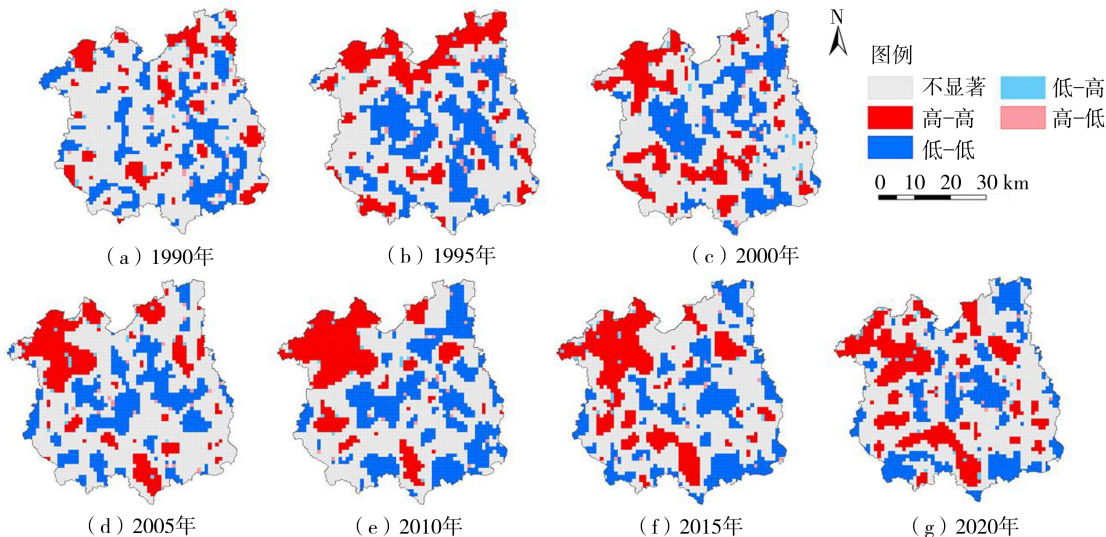


图 10 秦淮河流域洪涝孕灾环境敏感性局部自相关 LISA 图

Fig. 10 LISA map of local spatial autocorrelation of flood disaster-prone environment in the Qinhuai River Basin

调整,建设用地扩张、不透水面增加及排水设施滞后的问题使得下垫面产流能力增强、调蓄能力下降,从而导致孕灾环境敏感性显著提高。此外,河道整治和湿地填占等对水文连通性的改变也在一定程度上促进了高敏区的外扩。低-低聚集区主要分布在秦淮河流域边界以及流域中部,秦淮河流域边界距离河网水系较远且地势较高,而流域中部为行政区划交界区域,城市发展相对较慢,人类活动对下垫面环境的改造程度较低,因而低洪涝孕灾环境敏感性区较多。1990 年聚类关系不显著的格网最多,表明流域内洪涝孕灾环境敏感性聚类特征较不显著。1995 年后高-高聚集和低-低聚集的网格数整体上处

于上升趋势,表明流域内洪涝孕灾环境敏感性聚类特征的显著性逐年增加,集聚效应越来越强。

4 结 语

本文构建了基于模糊逻辑叠加方法的洪涝孕灾环境敏感性评估模型,界定了洪灾孕灾环境的内涵,探索高度城市化区域洪涝孕灾环境敏感性的时空分布特征,并在秦淮河流域进行了实例应用。结果表明,基于模糊逻辑叠加方法的洪涝孕灾环境敏感性评估模型能够有效整合多源空间因子及其非线性影响关系,提升洪涝孕灾环境敏感区域识别的准确性。实例应用中,从时间变化来看,秦淮河流域整体的洪

涝孕灾环境敏感性水平呈现上升趋势,敏感区面积不断扩大,敏感性值的分布向高值方向演化;从空间格局来看,秦淮河流域洪涝孕灾环境敏感性高值区逐渐由城市边缘向主城区集聚,呈现明显的高-高集聚特征。在对秦淮河流域 2020 年实际易积淹水点的验证中,模型评估结果显示有 78% 的易积淹水点位于高敏区,与传统层次分析赋权法相比准确性提高,空间匹配度良好,在高度城市化区域有较好的适用性。

参考文献:

[1] 史培军. 三论灾害研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报,2002,11(3):1-9. (SHI Peijun. Theory on disaster science and disaster dynamics [J]. Journal of Natural Disasters,2002,11(3):1-9. (in Chinese))

[2] 王然,连芳,余瀚,等. 基于孕灾环境的全球台风灾害链分类与区域特征分析[J]. 地理研究,2016,35(5):836-850. (WANG Ran, LIAN Fang, YU Han, et al. Classification and regional features analysis of global typhoon disaster chains based on hazard-formative environment [J]. Geographical Research, 2016, 35 (5) : 836-850. (in Chinese))

[3] 郑德凤,高敏,李钰,等. 基于 GIS 的大连市暴雨洪涝灾害综合风险评估[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):1-8. (ZHENG Defeng, GAO Min, LI Yu, et al. Comprehensive risk assessment of rainstorm-flood disaster in Dalian City based on GIS [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50 (3) : 1-8. (in Chinese))

[4] 季孔阳,李学明,高见,等. 城市暴雨洪涝灾害脆弱性评价[J]. 水利水电科技进展,2024,44(3):13-20. (JI Kongyang, LI Xueming, GAO Jian, et al. Assessment of urban vulnerability to heavy rain and flood disasters [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024,44(3):13-20. (in Chinese))

[5] 莫建飞,陆甲,李艳兰,等. 基于 GIS 的广西洪涝灾害孕灾环境敏感性评估[J]. 灾害学,2010,25(4):33-37. (MO Jianfei, LU Jia, LI Yanlan, et al. GIS-based sensitivity assessment on environment of developing flood hazards in Guangxi Province [J]. Journal of Catastrophology,2010,25(4):33-37. (in Chinese))

[6] 程娅娅,高玉琴,刘云苹,等. 极端暴雨情景下的城市脆弱性评价[J]. 灾害学,2024,39(1):222-227. (CHENG Yaya, GAO Yuqin, LIU Yunping, et al. Assessment of urban vulnerability in extreme rainstorm scenarios [J]. Journal of Catastrophology, 2024, 39 (1) : 222-227. (in Chinese))

[7] 徐宗学,卢兴超,施奇妙. 城市暴雨洪涝灾害特征与风险评估研究进展[J]. 水利水电科技进展,2025,45(1):1-9. (XU Zongxue, LU Xingchao, SHI Qimiao. Research progress on urban flooding disaster characteristics and risk assessment [J]. Advances in

Science and Technology of Water Resources, 2025, 45 (1) : 1-9. (in Chinese))

[8] 王劲峰,葛咏,李连发,等. 地理学时空数据分析方法[J]. 地理学报,2014,69(9):1326-1345. (WANG Jinfeng, GE Yong, LI Lianfa, et al. Spatiotemporal data analysis in geography [J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69 (9) : 1326-1345. (in Chinese))

[9] 谈灿灿,张润润,邓志民,等. 基于暴雨空间自相关性的降水量插值方法比较[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(6):8-14. (TAN Cancan, ZHANG Runrun, DENG Zhimin, et al. Comparison of precipitation interpolation methods considering spatial autocorrelation of rainstorm precipitation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52 (6) : 8-14. (in Chinese))

[10] 王雨潇,孙营营,张天宇,等. 1998—2020 年三峡库区最大 1h 降水的时空变化特征[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):10-18. (WANG Yuxiao, SUN Yingying, ZHANG Tianyu, et al. Temporal and spatial variations of maximum one-hour precipitation in the Three Gorges Reservoir Region from 1998 to 2020 [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51 (1) : 10-18. (in Chinese))

[11] 黄建雄,冶运涛,曹引,等. 黄河北干流水沙时空变化特征及协调性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(3):25-33. (HUANG Jianxiong, YE Yuntao, CAO Yin, et al. Analysis of spatial and temporal variation characteristics and coordination of water-sediment in the north main reach of Yellow River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52 (3) : 25-33. (in Chinese))

[12] 田壮壮,关燕宁,郭杉,等. 城市化背景下建成区扩展及其对河网变化的影响:以苏州市为例[J]. 长江流域资源与环境,2021,30(4):915-924. (TIAN Zhuangzhuang, GUAN Yanning, GUO Shan, et al. River network changes over Suzhou China; an insight from urban expansion [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30 (4) : 915-924. (in Chinese))

[13] 梅超,刘家宏,王浩,等. 城市下垫面空间特征对地表产汇流过程的影响研究综述[J]. 水科学进展,2021,32(5):791-800. (MEI Chao, LIU Jiahong, WANG Hao, et al. Comprehensive review on the impact of spatial features of urban underlying surface on runoff processes [J]. Advances in Water Science, 2021, 32 (5) : 791-800. (in Chinese))

[14] 肖雪玲,向小华,吴晓玲. 嘉兴市城市防洪包围圈下垫面变化对洪水风险的影响[J]. 水利水电科技进展,2025,45(1):26-31. (XIAO Xueling, XIANG Xiaohua, WU Xiaoling. Impact of underlying surface changes of urban flood control encirclement of Jiaxing City on flood risk [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45 (1) : 26-31. (in Chinese))

[15] 高玉琴,王慧,刘钺,等. 基于空间信息格网的南京市洪

- 水风险评估[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(6): 6-12. (GAO Yuqin, WANG Hui, LIU Yue, et al. Flood disaster risk assessment in Nanjing City based on spatial information grids[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(6): 6-12. (in Chinese))
- [16] 连悦辰, 高路, 马苗苗, 等. 基于自然灾害系统理论的2020年鄱阳湖流域1号洪水灾害分析[J]. 人民珠江, 2022, 43(1): 19-27. (LIAN Yuechen, GAO Lu, MA Miaomiao, et al. Analysis of No. 1 flood disaster in Poyang Lake basin in 2020 based on natural disaster system theory[J]. Pearl River, 2022, 43(1): 19-27. (in Chinese))
- [17] 徐峥辉, 王伟, 宋月, 等. 粤港澳大湾区并发复合灾害敏感性评估[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(4): 99-107. (XU Zhenghui, WANG Wei, SONG Yue, et al. Sensitivity assessment of parallel complex disaster in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(4): 99-107. (in Chinese))
- [18] 李孟泽, 褚俊英, 周祖昊, 等. 基于多智能体系统的城市极端暴雨内涝风险动态评估[J]. 水资源保护, 2025, 41(2): 95-105. (LI Mengze, CHU Junying, ZHOU Zuhao, et al. Dynamic assessment of urban extreme rainstorm waterlogging risk based on multi-agent system[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(2): 95-105. (in Chinese))
- [19] 侯春生. 城市洪涝灾害的形成及防治措施[J]. 环境与发展, 2017, 29(3): 101-102. (HOU Chunsheng. Study on urban flood disaster formation and prevention and control measures[J]. Environment and Development, 2017, 29(3): 101-102. (in Chinese))
- [20] 林凯荣, 欧阳佳娜, 马旭民, 等. 基于深度学习的城市内涝积水水深预测模型[J]. 水资源保护, 2025, 41(1): 56-63. (LIN Kairong, OUYANG Jiana, MA Xumin, et al. Prediction model of urban waterlogging water depth based on deep learning[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(1): 56-63. (in Chinese))
- [21] 高玉琴, 汪键, 高见, 等. 基于组合赋权-云模型的城市洪涝灾害韧性评价方法[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(2): 22-29. (GAO Yuqin, WANG Jian, GAO Jian, et al. Evaluation method of urban flood disaster resilience based on combined weighting-cloud model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(2): 22-29. (in Chinese))
- [22] 王兆礼, 孟德胜, 廖耀星, 等. 快速城市化对城市内涝特征的影响分析[J]. 水资源保护, 2025, 41(5): 41-51. (WANG Zhaoli, MENG Desheng, LIAO Yaoxing, et al. Analysis of impact of rapid urbanization on characteristics of urban waterlogging[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(5): 41-51. (in Chinese))
- [23] 郑自琪, 庞博, 李钰, 等. 有效不透水面分布对城市雨水径流的影响[J]. 水力发电学报, 2024, 43(1): 35-46. (ZHENG Ziqi, PANG Bo, LI Yu, et al. Impact of directly connected impervious area distribution on urban stormwater runoff process[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2024, 43(1): 35-46. (in Chinese))
- [24] 陈燕. 不透水面空间格局变化对城市内涝的影响与模拟研究[D]. 杭州: 杭州师范大学, 2023.
- [25] 宋兰兰, 沈懿, 陈星, 等. 南京都市圈城市洪涝韧性时空演化与障碍因素分析[J]. 安全与环境学报, 2025, 25(2): 646-655. (SONG Lanlan, SHEN Yi, CHEN Xing, et al. Analysis of the spatio-temporal evolution and obstacles to urban flood resilience in the Nanjing Metropolitan Area[J]. Journal of Safety and Environment, 2025, 25(2): 646-655. (in Chinese))
- [26] PRADHAN B. Use of GIS-based fuzzy logic relations and its cross application to produce landslide susceptibility maps in three test areas in Malaysia[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 63(2): 329-349.
- [27] BALAMURUGAN G, RAMESH V, TOUTHANG M. Landslide susceptibility zonation mapping using frequency ratio and fuzzy gamma operator models in part of NH-39, Manipur, India[J]. Natural Hazards, 2016, 84(1): 465-488.
- [28] STANLEY T, KIRSCHBAUM D B. A heuristic approach to global landslide susceptibility mapping[J]. Natural Hazards, 2017, 87(1): 145-164.
- [29] 李继清, 陈景, 谢宇韬, 等. 基于改进模糊集分析法和Copula函数的水库分期设计洪水推求[J]. 水资源保护, 2025, 41(5): 61-72. (LI Jiqing, CHEN Jing, XIE Yutao, et al. Staged design flood calculation for reservoir using improved fuzzy set analysis method and Copula function[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(5): 61-72. (in Chinese))
- [30] 古丽扎尔·莫明, 杨莲梅, 刘艳, 等. 伊犁河流域近30a洪水灾害时空分布及孕灾环境特征研究[J]. 干旱区地理, 2024, 47(8): 1314-1326. (GULIZAR Moming, YANG Lianmei, LIU Yan, et al. Spatial and temporal distribution of flood disasters and characteristics of disaster-prone environment in Ili River Basin in recent 30 years[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(8): 1314-1326. (in Chinese))
- [31] WANG Huiliang, XU Shanlun, XU Hongshi, et al. Rapid prediction of urban flood based on disaster-breeding environment clustering and Bayesian optimized deep learning model in the coastal city[J]. Sustainable Cities and Society, 2023, 99: 104898.
- [32] 张姣, 胡庆芳, 黄璟胜, 等. 基于ITA法和Mann-Kendall法的漓江流域极端降水变化解析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(6): 15-22. (ZHANG Jiao, HU Qingfang, HUANG Jingsheng, et al. Analysis of extreme precipitation changes in Lijiang River Basin based on ITA and Mann-Kendall methods[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(6): 15-22. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-02-27 编辑: 王芳)