

郑州市建筑格局与内涝积水特征关系研究

张金萍^{1,2}, 石聪聪¹, 李学淳¹, 杨沂荣¹, 王 尧¹

(1. 郑州大学水利与交通学院; 2. 黄河生态保护与区域协调发展研究院)

摘要:为衡量郑州市建筑格局与内涝积水特征的关系,采用城市建筑格局指数表征城市建筑格局,考虑城市建筑的基本形态特征、空间分布特征、关联特征和距离特征,建立了城市建筑格局评价指标体系。构建城市内涝模型模拟了不同降雨重现期下郑州市金水区老城区的内涝过程,分析了不同建筑格局等级下的内涝积水特征;识别了不同降雨重现期下对内涝积水具有显著影响的指标,并进一步分析了建筑立体特征对内涝积水的影响。结果表明:郑州市金水区老城区的城市建筑格局的空间分布呈现北高南低的特征,建筑格局等级提高对降低内涝积水风险起到积极作用,但也存在效能边界;降雨重现期为 3 a 是排水系统压力的突变点;在低降雨重现期(1 a)下,邻近建筑距离是影响内涝总溢流量和总溢流历时的关键指标;随着降雨重现期的增大(3、5、10 a),斑块连接指数和建筑密度对总溢流量的影响更明显,分离度指数和斑块连接指数对总溢流历时的重要性显著提升;建筑错落度与总溢流量、总溢流历时之间呈显著的正相关关系。

关键词:城市建筑格局;内涝积水特征;溢流量;溢流历时;郑州市

Research on relationship between building patterns and waterlogging inundation characteristics in Zhengzhou City//Zhang Jinping^{1,2}, Shi Congcong¹, Li Xuechun¹, Yang Yirong¹, Wang Yao¹ (1. School of Hydraulic and Transportation Engineering, Zhengzhou University; 2. Yellow River Ecological Protection and Regional Coordinated Development Research Institute)

Abstract: To measure the relationship between building patterns and waterlogging inundation characteristics in Zhengzhou City, using the urban architectural pattern index to characterize the urban architectural pattern, an evaluation index system for urban building patterns was developed considering basic morphological features, spatial distribution features, correlation features, and distance-related features. The urban waterlogging model was established to simulate waterlogging processes in the old urban area of Jinshui District, Zhengzhou City under different return periods and waterlogging characteristics under different building pattern levels were analyzed. The indicators that significantly affect waterlogging characteristics under different rainfall return periods were identified, and the impact of three-dimensional building features on waterlogging was further explored. The results indicate that the building pattern in the old urban area of Jinshui District, Zhengzhou City presents a spatial pattern of high in the north and low in the south. Enhancing the building pattern level contributes positively to inundation mitigation, whereas such effectiveness has a threshold limit. Rainfall with a 3 a return period serves as the critical breakpoint triggering abrupt pressure rise of urban drainage systems. Under low-return-period rainfall (1 a), the spacing between adjacent buildings dominates the total overflow volume and total overflow duration. With the increase of rainfall return periods (3, 5, 10 a), patch connectivity index and building density exert the most prominent effects on total overflow volume. Separation index and patch connectivity index show a remarkable rise in their importance to total overflow duration. Additionally, outline irregularity has a significant positive correlation with both total overflow volume and total overflow duration.

Key words: urban building pattern; waterlogging inundation characteristics; overflow volume; overflow duration; Zhengzhou City

近年来,快速城市化进程使得城市下垫面类型发生了深刻变化,土地利用类型从林地、草地等向建筑用地加速转化,城市建成区规模剧增,建筑密度与高度显著提升,城市建筑格局显著改变^[1]。城市建

筑格局不仅影响城市产流模式,还会改变地表径流的汇流路径,从而对城市水文过程产生了重要影响^[2]。同时,全球气候变化背景下极端天气事件频繁发生,导致城市洪涝灾害呈现趋多、趋频、趋强、趋

基金项目:河南省自然科学基金项目(242300421007);国家自然科学基金项目(52379028)
作者简介:张金萍(1979—),女,教授,博士,主要从事水资源开发利用与管理研究。E-mail:jinpings2000_zh@163.com

广的特性^[3],城市建筑格局对城市内涝过程的影响,成为我国城市规划建设和城市雨洪管理中迫切需要解决的问题。

近年来,国内外学者针对城市建筑格局对城市内涝的影响开展了大量研究。例如:Huang等^[4]采用1~5 km 网格尺度,结合皮尔逊相关分析、随机森林等方法,研究了深圳市水平与垂直建筑格局对内涝点密度的多尺度影响及尺度效应;Brewier等^[5]通过生成2000种合成城市格局,结合孔隙度水力模型及回归分析,研究了低地河流洪泛区城市格局对淹没流量的影响;Li等^[6]在子流域尺度用增强回归树及地理探测器,研究了二维和三维建筑格局对内涝的影响及因素贡献与交互效应;Lin等^[7]采用皮尔逊相关分析及随机森林模型,分析了三维建筑格局对内涝点密度的影响;宋奇珂等^[8]采用SWMM在郑州市的12个典型区域进行内涝过程模拟,基于模拟结果,量化了不同城市建筑格局分布对峰值流量、排水口进流量过程和径流特征值的影响。这些研究主要集中在水平方向上城市建筑格局对城市内涝的影响,对建筑立体特征的作用分析不足,对垂直格局的关注也多限于建筑密度、覆盖率等指标,对建筑高度异质性、建筑分布特征等探讨较少,难以全面量化建筑格局对内涝特征的影响。

鉴于此,本文在分析城市建筑格局对城市内涝的影响机理基础上,构建基于城市内涝的城市建筑格局评价指标体系,提出城市建筑格局指数用以评价城市建筑格局水平;采用SWMM对城市暴雨内涝过程进行模拟,量化不同城市建筑格局下郑州市内涝积水特征,识别不同降雨重现期情景下内涝积水特征对城市建筑格局的响应,解析郑州市建筑格局对内涝积水特征的影响,以期在城市建筑格局优化与城市雨洪管理提供技术支撑。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

郑州市作为全国14个特大城市、31个重点防洪城市之一,是典型的高密度城市^[9]。金水区老城区地处郑州市东北部,是郑州市核心区域,既具有城市扩张的一般性,又兼具新老建筑格局耦合的复杂性。2021年“7·20”暴雨和2023年“7·20”暴雨均给金水区老城区带来了严重的洪涝灾害损失^[10],因此该区域一直以来都是内涝防控的重点区域。本文以金水区老城区为研究区,总面积约为74.44 km²,整体地势由西南向东北倾斜,属温带季风气候,四季分明,年均降水量为640.9 mm。研究区内有贾鲁

河、东风渠、金水河、魏河、熊耳河5条河流,泄洪排涝骨干河道的洪涝水均排入贾鲁河(图1)。现有排水管道中,设计标准不足3年一遇的排水管道占比为58.54%,管道排水能力亟须改善。

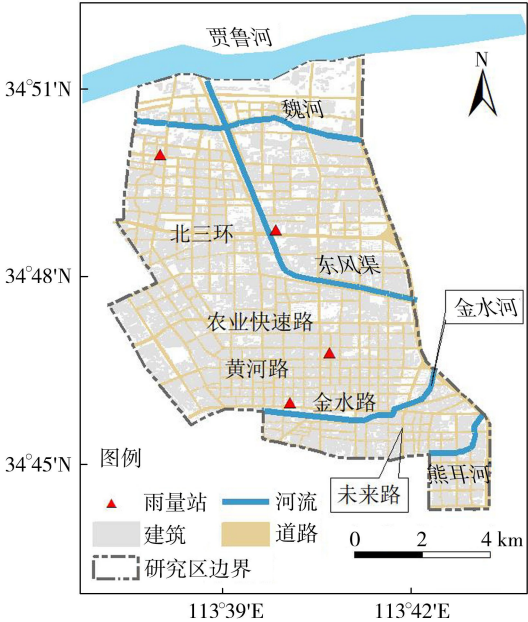


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

1.2 数据来源

本文所用数据包括降雨数据、管网数据、高程数据、建筑矢量数据、土地利用数据等。降雨数据采用2011—2021年的实测降雨数据;管网数据来源于郑州市城市管理局,管道断面形式有矩形和圆形;高程数据来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>),数据年份为2020年,精度为12.5 m(图2);建筑矢量数据来源于地理遥感生态网科学数据平台(<https://gisrs.cn/>),数据年份为2020年,数据含有建筑轮廓和建筑层数两种属性信息;土地利用数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/home>),数据年份为2022年,空间分辨率为1 m(图3)。

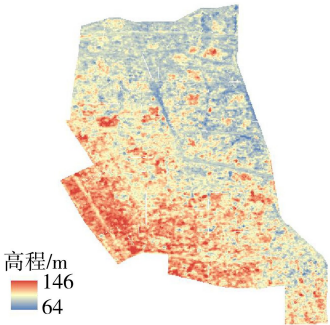


图2 研究区地面高程

Fig. 2 Ground elevation of study area

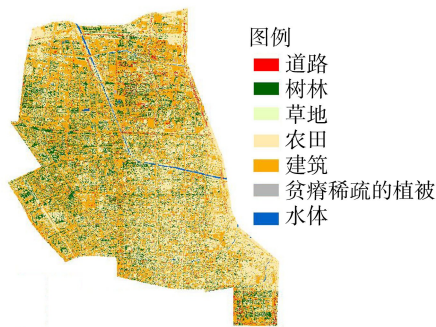


图3 研究区土地利用类型

Fig.3 Land use types of study area

2 研究方法

2.1 城市建筑格局评价方法

2.1.1 评价指标体系构建

根据城市形态研究中的分形理论^[11],建筑是城市形态中的关键要素,其面积、高度、空间格局等会显著影响城市生态环境和产汇流过程。现有城市三维形态研究中,高度、密度指标常用于构建城市形态量化指标体系^[12],其中高度是城市三维空间最直接的指标,是衡量地区城市三维扩张和垂直发展最直观的指标;密度影响城市三维空间的显著特征,具体表现为建筑分布越密集,城市三维空间越拥挤^[13]。

建筑立体特征常见指标包括平均建筑高度和错落度^[14]。高希超等^[15-16]的研究表明建筑高度对建筑区产汇流的影响随风速、风向而变化,建筑物对降雨存在截留作用和遮挡作用,会改变建筑区的产流特点,影响产流面积;建筑错落度可通过改变区域日照条件、通风效率及太阳辐射吸收量,间接作用于城市微气候与热环境^[17],Zu 等^[18-20]的研究表明高错落度的建筑往往对应较大的迎风面积指数和不规则的分布密度,会大幅增强建筑对气流的阻挡作用,这种气流变化会阻碍雨水扩散,间接提升局部积水的风险;建筑密度的增加往往会导致区域内不透水面积占比上升,压缩雨水下渗空间,改变汇流方向,且建筑聚集易干扰气流、加剧雨岛热岛效应,增加内涝风险^[21-22]。

景观格局指数能够高度浓缩景观格局信息,反映景观空间组成和结构特征^[23]。本文借助景观格局的思想,将城市建筑物看作斑块,以此来反映城市建筑空间分布特征和关联特征对内涝的影响^[24-25]。高聚集度区域因不透水集中、排水受阻放大内涝风险;低聚集度区域则通过均衡分布和预留生态空间缓解压力^[26]。引入景观生态学中的源汇理论^[11],以建筑单元为“源”,以排水系统为“汇”,采用建筑质心到雨水口的距离表征汇流效率^[27-28]。合理的建筑间距可保障汇流通畅与渗透空间,能有效降低

雨水滞留风险。

综上所述,本文基于城市建筑单体属性、建筑分布及其与排水设施的空间关系,从基本形态特征、空间分布特征、关联特征、距离特征 4 个方面,选取 10 个指标构建基于城市内涝的城市建筑格局评价指标体系(图 4),指标数据采用 Arcgis10.8 和 Fragstats4.2 进行分析。

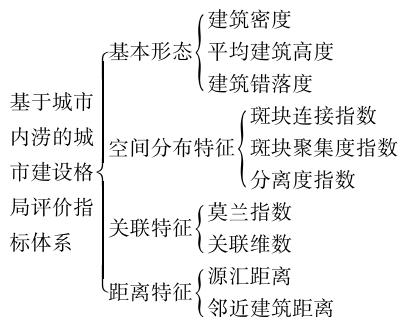


图4 基于城市内涝的城市建筑格局评价指标体系

Fig.4 Evaluation index system of urban building layout based on urban waterlogging

基于城市内涝的城市建筑格局评价指标体系中,建筑密度为单位面积上的建筑数量^[29];平均建筑高度为某一区域内所有建筑的高度平均值^[14];建筑错落度为建筑高度在垂直空间中的相对差异,错落度越大,建筑群体的高低错落程度越明显^[14];斑块连接指数表示建筑斑块间的连通性,数值越大连通性越好^[29];斑块聚集度指数表示建筑斑块间的聚集程度,值越大,聚集度越高^[29];分离度指数表示建筑斑块之间分离程度,取值范围为 0~1,值越大,建筑在空间分布的越破碎^[29];莫兰指数表示建筑间的空间自相关性^[24];关联维数表示建筑斑块连通程度以及空间分布的相关性^[25];源汇距离为建筑几何中心至雨水口的距离^[27];邻近建筑距离为邻近建筑单体质心之间的几何距离^[30]。

2.1.2 指标权重的确定

本文采用主客观结合^[31]的方法完成指标的赋权:①采用层次分析法(AHP)将城市建筑格局的相关要素分解为目标层、准则层和指标层,采用 1~9 标度法构建判断矩阵,确定各指标的主观权重;②利用熵权法^[32]计算指标的信息熵,推导信息效用值并归一化,得到各指标的客观权重;③通过主观权重与客观权重的距离函数计算得到城市建筑格局指标的综合权重。

2.1.3 城市建筑格局指数计算

采用城市建筑格局指数表征城市建筑格局水平,反映区域内建筑布局、形态、空间关系及其与排水系统适配性,其数值越高,表明区域建筑在布局有序性、形态协调性、功能适配性及排水响应能力等方

面的综合水平越优,越能有效缓解内涝风险;反之,表明建筑格局水平越低,将会提高内涝风险。计算公式为:

$$I_{BP} = \sum_j w_j S_j \quad (1)$$

式中: I_{BP} 为城市建筑格局指数; S_j 为指标 j 归一化处理后的标准值; w_j 为指标 j 的综合权重。采用等距法^[33]根据城市建筑格局指数进行城市建筑格局等级划分: $>80 \sim 100$ 、 $>60 \sim 80$ 、 $>40 \sim 60$ 、 $>20 \sim 40$ 、 $0 \sim 20$ 分别表示高、较高、一般、较低、低等级。

2.2 城市内涝模型构建

2.2.1 设计降雨

本文采用芝加哥雨型,2023 年郑州市暴雨强度公式作为设计降雨,表达式为:

$$i = 2001.829(1 + 3.264 \lg P)/(t + 24.8)^{0.856} \quad (2)$$

式中: i 为平均暴雨强度; P 为降雨重现期; t 为降雨历时。根据郑州市短历时降雨特征,雨峰系数 $r = 0.433$,降雨历时为 90 min。

2.2.2 SWMM 构建

SWMM 是动态的降雨-径流模型,适用于水文水力条件比较复杂、以管渠排水为主的城市区域^[34]。模型包括子汇水区划分、地表产流计算、地表汇流演算、管网汇流计算 4 部分,其中产流过程的下渗模型采用霍顿下渗公式,汇流过程采用非线性水库法,管网汇流计算采用动力波法^[35]。结合地形数据、河流水系、管网分布等数据,对研究区进行子汇水区划分和排水管网概化,得到 160 个子汇水区、202 根排水管道、196 个雨水井和 5 个出水口。

SWMM 参数主要分为确定性参数和不确定性参数^[8],参考马丽君等^[36-37]的研究及 SWMM 模型手册^[38]确定参数值。根据河南省第二次土壤普查数据集和相关文献^[36],郑州市的土壤类别主要为 C 类潮土,稳渗率为 1.27~3.81 mm/h,研究区的土壤质地为砂黏壤土。基于研究区的土壤类型确定模型参数值:透水片区洼地蓄水量设为 6.5 mm,不透水片区洼地蓄水量设为 3.5 mm,透水地表曼宁糙率取 0.18,不透水地表与管道内壁的曼宁糙率均取 0.015,初始下渗速率设为 76.2 mm/h,稳定下渗速率设为 3.5 mm/h,下渗衰减系数设为 3 h⁻¹。

2.2.3 模型合理性检验

基于“20150722”“20170807”“20210720”3 场不同降雨重现期的实测资料对 SWMM 进行参数率定,得到地表径流量连续性误差分别为-0.09%、0.04%、-0.36%,流量演算连续性误差分别为 0.01%、0.02%、0.09%,均小于 SWMM 手册规定的

2%,模型模拟结果可靠。以“20210720”场次降雨为例,对比实测积水点与模拟积水点位置,结果如图 5 所示。由图 5 可见,积水点匹配率为 84.2%,漏判率为 15.8%,表明模型模拟的效果较好。

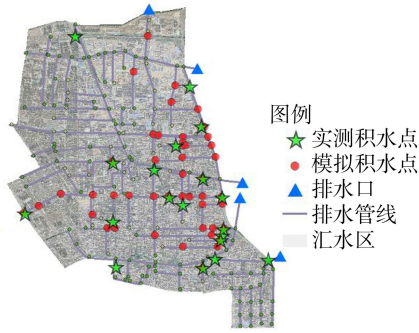


图 5 “20210720”场次降雨实测积水点与模拟积水点对比
Fig. 5 Comparison between measured and simulated water accumulation points of “20210720” rainfall

2.3 内涝积水影响因素分析

2.3.1 随机森林模型

采用随机森林模型分析建筑格局指数对内涝积水的相对贡献^[39]。随机森林是一种基于分治法原理的集成学习策略,是若干决策树集成的分类器,其通过随机选择向量生成决策树,每棵树都会完全生长,在生成决策树时,每个节点都是从随机选出的几个变量中最优分裂产生;生成所有决策树之后,用投票的方法对所有决策树的分类结果进行综合,得出最终结果^[40]。作为分裂变量的左右子节点的平均不纯度下降越大,说明该变量越重要。本文将城市建筑格局评价指标体系中的 10 个指标作为特征列,将模拟得到的内涝积水特征作为目标变量,训练随机森林模型,根据指标对模型预测精度的贡献进行排序,确定对内涝积水特征影响最大的指标^[39]。

2.3.2 相关性分析

Spearman 相关性分析是一种非参数统计方法^[41],用于衡量两个变量之间的单调相关性,依靠秩相关系数 R 量化关联强弱。 R 的绝对值越接近 1 表明线性相关性越强, $R=1$ 表示完全正相关, $R=-1$ 表示完全负相关, $R=0$ 表示没有线性相关关系。利用 Spearman 相关性分析量化不同降雨重现期下(1、3、5、10 a)下建筑立体特征与内涝特征的关系。

3 结果与分析

3.1 城市建筑格局评价

研究区的城市建筑格局等级分析结果表明,处于较低、低等级的子汇水区占 68.12%,处于较高、高等级的子汇水区仅占 20.63%,处于一般等级的子汇水区占 11.25%。基于此,得到研究区建筑格局特征,如图 6 所示。由图 6(a)可见,建筑格局指

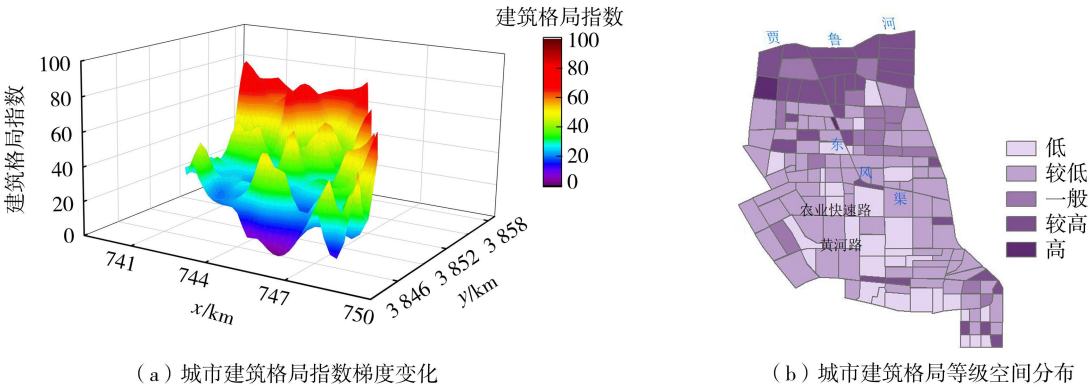


图 6 研究区建筑格局特征

Fig. 6 Urban building pattern characteristics of study area

数从低值到高值形成明显的空间梯度,其中低值区在曲面形态上多为凹陷、下沉区域,呈面状连续分布;中值区曲面从凹陷向凸起过渡;高值区曲面形态多为凸起、高耸区域,往往集中出现。由图 6(b)可见,城市建筑格局等级的分布呈现显著的空间异质性,整体上呈现北高南低的特征,低等级主要集中在北部黄河路和农业快速路附近,高等级主要集中在南部东风渠和贾鲁河附近,实测数据表明北部确实相较于南部内涝风险更小。

3.2 内涝积水特征

3.2.1 溢流点数量和溢流量

表 1 为不同降雨重现期下溢流点统计结果。由表 1 可见,随着降雨重现期的增大,溢流点数量呈持续上升趋势,由 1 a 增至 3 a 时,溢流点数量增长了 5 倍,可以看出降雨重现期为 3 a 是排水系统压力的突变点。

图 7 为不同降雨重现期下溢流点的空间分布。由图 7 可见,溢流点整体呈现出由点及面扩张的特征。 $P=1$ a 时溢流点分布零散稀疏; $P=3$ a 时溢流点数量陡增,多集中在管网交汇处; $P=5$ a 时节点溢流量大幅上升; $P=10$ a 时溢流点广泛分布,溢流量

表 1 不同降雨重现期下溢流点统计结果

Table 1 Statistical of overflow points under different rainfall return periods

P/a	降水量/mm	溢流点数量	溢流占比/%
1	18.69	20	10.20
3	47.79	120	61.22
5	61.33	132	67.35
10	79.69	143	72.96

持续增大。

图 8 为不同降雨重现期下溢流点数量的核密度分布。由图 8 可见,溢流点数量的核密度值在空间上并非均匀分布,高核密度区由局部孤立集中向多中心演变;降雨重现期越大,区域内溢流点的空间聚集效应越显著。

3.2.2 总溢流量和总溢流历时

随着降雨重现期增大,总溢流量和总溢流历时整体持续上升,增速呈现“快-缓-快”的特征。 $P=1$ a 时总溢流量和总溢流历时均处于最低水平; $P=3$ a 时出现明显跃升,总溢流量约 49.2 万 m^3 ,总溢流历时为 451 h; $P=5$ a、 $P=10$ a 时总溢流量分别增至 78.1 万、135.8 万 m^3 ,总溢流历时分别增至 532、709 h。低降雨重现期下(1a)总溢流量与总溢流历

节点溢流量/ $10^3 m^3$ ● 0 ● 0.03~5.0 ● >5.0~10.0 ● >10.0~15.0 ● >15.0~25.0 ● >25.0~40.3

图例 ▲ 排水口 — 排水管线 □ 汇水区

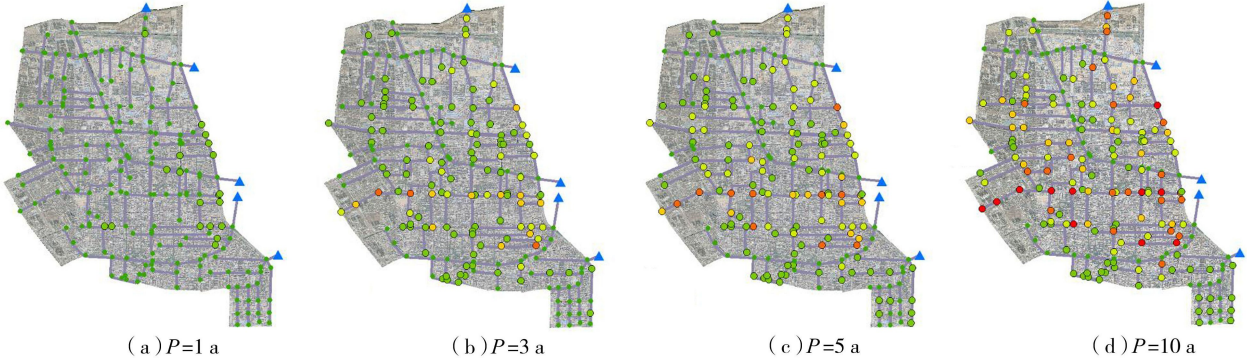


图 7 不同降雨重现期下溢流点的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of overflow points under different rainfall return periods

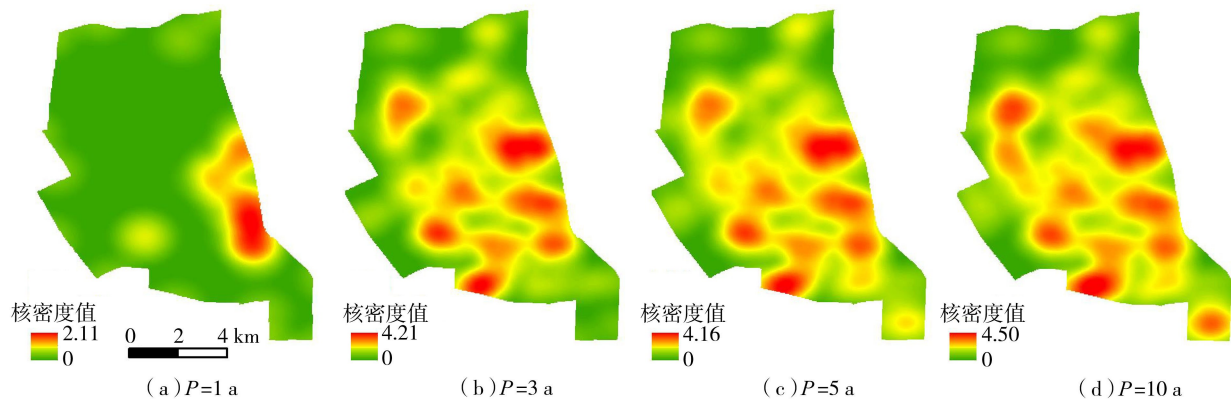


图 8 不同降雨重现期下溢流点数量的核密度分布

Fig. 8 Kernel density distribution of overflow point number under different rainfall return periods

时增速基本一致,高降雨重现期下(3、5、10 a)总溢流量增速更显著。

不同降雨重现期下总溢流量和总溢流历时的核密度分布见图 9、图 10。可见,随着降雨重现期增大,总溢流量和总溢流历时的核密度高值区域呈现出“从无到有、从少到多、从分散到集中”的演变趋势,且总溢流量大的区域往往总溢流历时也 longer,区域更集中,排水压力更大。

3.3 城市建筑格局与内涝积水特征的关系

3.3.1 内涝积水特征对城市建筑格局差异的响应

图 11 为不同城市建筑格局等级下的内涝积水

特征。由图 11 可见,当建筑格局处于低、较低等级时,内涝积水特征指标随建筑格局等级的提高而增大;当建筑格局超过较低等级时,内涝特征指标均随建筑格局水平的提高而减小,高等级建筑格局下无内涝积水。 $P=1$ a 时,3 个内涝特征指标整体变化态势平缓。受局部微地形和排水管网布设的影响,建筑格局较低等级的节点大多分布在排水区域中部,在承担自身排水任务的同时,还需应对上游建筑格局低等级区域的超额径流。当降雨重现期由 1 a 增至 3 a 时,溢流点数量、总溢流量、总溢流历时分别增长 5、48、13 倍;相比于 1 a 的情况,当降雨重现

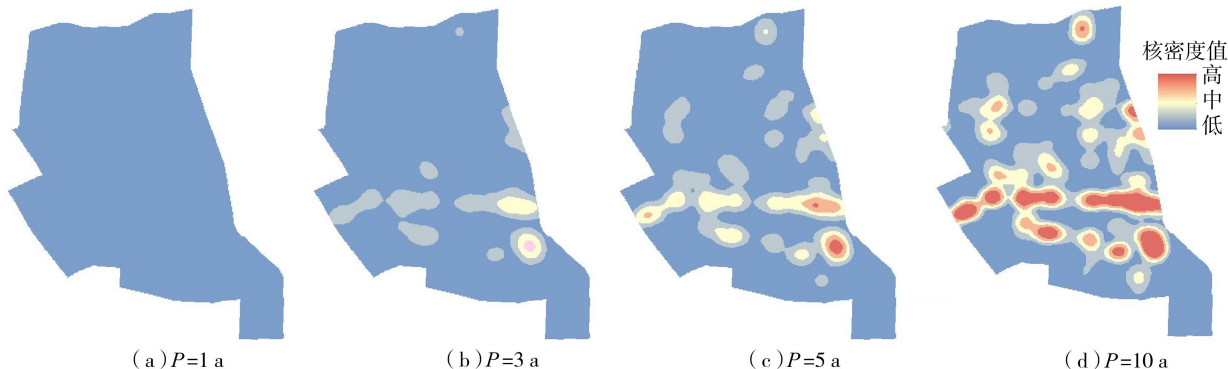


图 9 不同降雨重现期下总溢流量的核密度分布

Fig. 9 Kernel density distribution of total overflow volume under different rainfall return periods

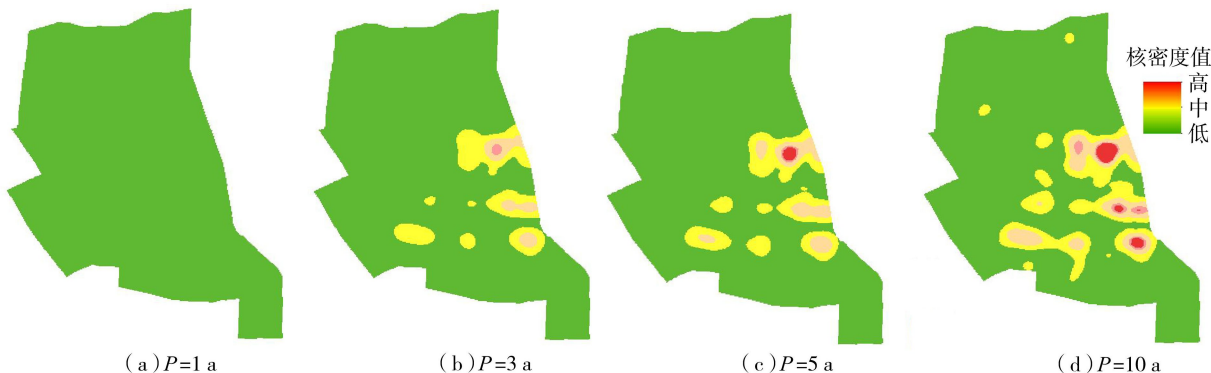


图 10 不同降雨重现期下总溢流历时的核密度分布

Fig. 10 Kernel density distribution of total overflow duration under different rainfall return periods

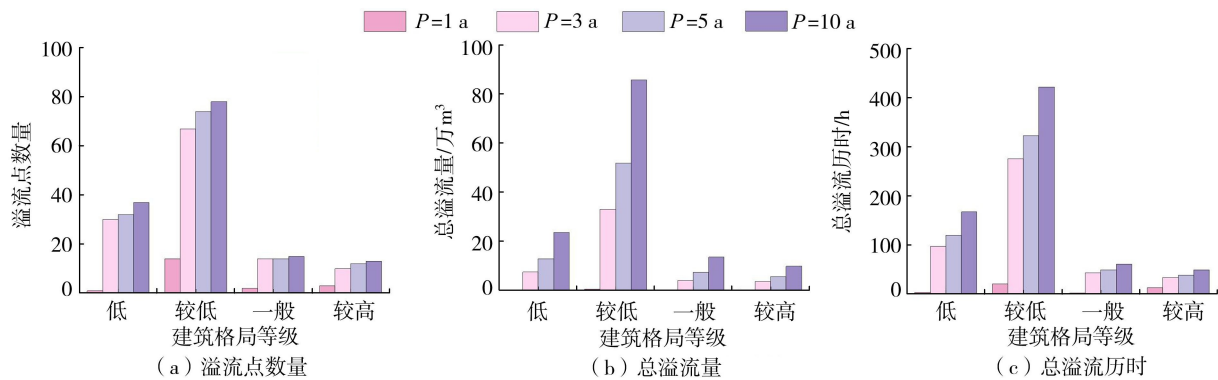


图 11 不同城市建筑格局等级下的内涝积水特征指标

Fig. 11 Characteristics indicators of waterlogging inundation under different levels of urban building pattern

期为 3、5、10 a 时,建筑格局等级从较低到一般时,溢流点数量、总溢流量、总溢流历时最大降幅分别为 81.08%、85.56%、85.45%。

图 12 为不同城市建筑格局等级下的节点溢流过程。由图 12 可见, $P=1$ a 时,不同城市建筑格局等级下的节点溢流量随时间的变化无明显规律;随着降雨重现期的增大,节点溢流量随着时间先增大到峰值再减小,降雨重现期越大,峰值越大;建筑格局等级越高,退水阶段下降速率更平缓。

3.3.2 建筑格局指数对内涝积水特征的影响

总溢流量和总溢流历时能够反映溢流规模和溢流持续影响,故选择二者作为典型内涝积水特征指标,计算不同降雨重现期下建筑格局指数对总溢流量和总溢流历时的重要性评分,结果如图 13 所示。由图 13(a)可见, $P=1$ a 时,邻近建筑距离为影响总溢流量最重要的因素。随着降雨重现期从 3 a 增加到 10 a,斑块链接指数、建筑密度、源汇距离对总溢流量影响的重要性评分迅速上升,斑块链接指数逐渐成为最重要的因素。连通性越高,水流在相邻斑块间的汇流时间缩短,易形成集中汇流。由图 13(b)可见,邻近建筑距离对总溢流历时的影响最为显著。建筑距离过近会压缩地表汇流空间,减少雨水下渗,增加径流量,同时管网被快速填满并持

续承压,导致总溢流历时延长。随着降雨重现期的增大,空间形态特征的重要性提升更大,当排水能力不足时,高密度、连通性强的区域易形成集中径流,导致管网快速满管,溢流时间延长。平均建筑高度和建筑错落度对总溢流历时的重要性明显高于总溢流量,建筑错落度对总溢流历时的影响随着降雨重现期的增大而显著增加。究其原因,建筑屋顶承接了部分降雨,且建筑高度延迟了雨水的降落和汇流时间;建筑错落度高意味着城市地表的三维形态更复杂,地表粗糙度大幅提升。降雨时,水流原本顺畅的漫流路径会被不同高度、不同位置的建筑频繁阻挡,不仅让街道内部水流变得更加掺混,还会在建筑周边形成壅水区域。并且,错落排列的建筑会使流场变得极为复杂,局部易产生涡流,减缓雨水整体流动速度,导致雨水无法快速向排水口汇集,进而在多个区域形成积水,且这种建筑群造成的壅水位往往比单个建筑更高。

进一步对建筑立体特征指标与总溢流量、总溢流历时的相关性进行分析,结果如表 2 所示。由表 2 可见,在相同降雨重现期下,平均建筑高度与总溢流量、总溢流历时的相关系数为负,表明建筑高度对于内涝积水特征仍存在负向影响,但在统计学上无显著关联,可知建筑高度并非内涝发生与否及严

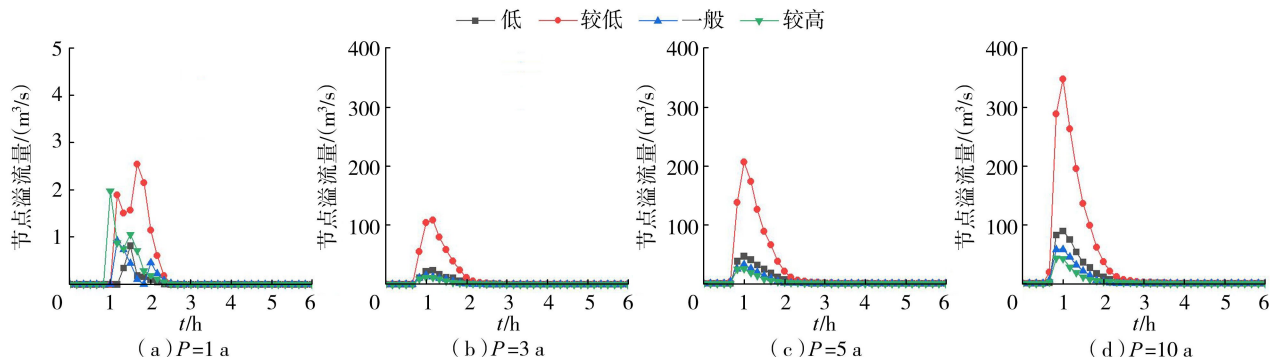


图 12 不同城市建筑格局等级下的节点溢流过程

Fig. 12 Process of node overflow under different levels of urban building pattern

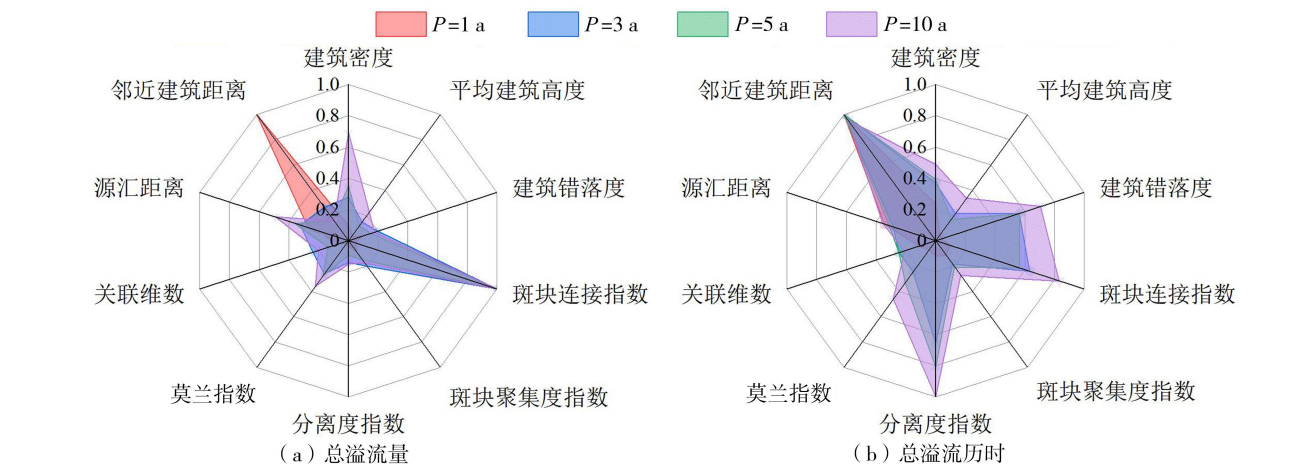


图 13 不同建筑格局指标对总溢流量和总溢流历时的重要性评分

Fig. 13 Importance scores of different building pattern indexes for total overflow volume and total overflow duration

重程度的决定性因素;建筑错落度与总溢流量、总溢流历时呈显著的正相关关系,随着降雨重现期的增大,建筑错落度对内涝持续时间的放大作用更突出,是驱动总溢流历时延长的关键因素。

表 2 建筑立体特征指标与总溢流量、总溢流历时的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between architectural three-dimensional characteristic indicators, total overflow volume, and total overflow duration				
指标	总溢流量			
	$P=1\text{ a}$	$P=3\text{ a}$	$P=5\text{ a}$	$P=10\text{ a}$
平均建筑高度	-0.061	-0.068	-0.050	-0.047
建筑错落度	0.258 ***	0.247 ***	0.225 **	0.198 **

指标	总溢流历时			
	$P=1\text{ a}$	$P=3\text{ a}$	$P=5\text{ a}$	$P=10\text{ a}$
平均建筑高度	-0.059	-0.022	-0.008	-0.015
建筑错落度	0.257 ***	0.345 ***	0.361 ***	0.369 ***

注:***、**、* 分别表示达到 1%、5%、10% 的显著性水平。

4 结 论

针对郑州市金水区老城区的城市建筑格局与城市内涝积水特征的关系研究,构建了城市建筑格局评价体系,开展了 4 个重现期设计降雨下的数值模拟,模拟结果验证了不同城市建筑格局对内涝积水特征有一定影响。主要结论如下:

a. 从基本形态特征、空间分布特征、关联特征、距离特征 4 个方面,选取 10 个指标构建了基于城市内涝的城市建筑格局评价指标体系。利用 SWMM 对郑州市金水区老城区的内涝积水情况进行模拟,积水点匹配率为 84.2%,漏判率为 15.8%,模拟效果较好。

b. 郑州市金水区老城区城市建筑格局的空间分布存在空间异质性。整体上呈现北高南低的分布特征,局部存在明显的区域聚集,高等级有利于减轻内涝风险,低等级增加内涝风险,与实际情况相符。

c. 溢流点数量、总溢流量、总溢流历时随着降雨重现期的增大呈上升趋势。降雨重现期为 3 a 是排水系统压力的突变点,总溢流量大的区域总溢流历时通常也更长。

d. 城市建筑格局对内涝积水特征影响明显。降雨重现期为 1 a 时,邻近建筑距离是影响内涝总溢流量和总溢流历时的关键指标;建筑格局等级提高对降低内涝积水起到积极作用,但存在效能边界;斑块连接指数、建筑密度对总溢流量的影响最明显;建筑错落度是驱动总溢流历时延长的关键因素。

参考文献:

[1] 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))

[2] 徐宗学,李鹏. 城市化水文效应研究进展:机理、方法与应对措施[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 7-17. (Xu Zongxue, Li Peng. Progress on hydrological response to urbanization: mechanisms, methods and solutions [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 7-17. (in Chinese))

[3] 刘丁蓉,杨凯,孙仕. 珠三角城市群内涝灾害韧性综合评估及障碍因子识别[J]. 水利经济, 2024, 42(4): 23-29. (Liu Dingrong, Yang Kai, Sun Shi. Comprehensive assessment and obstacle factor recognition of waterlogging disaster resilience in Pearl River Delta urban agglomeration [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42(4): 23-29. (in Chinese))

[4] Huang Yuqin, Lin Jinyao, He Xiaoyu, et al. Assessing the scale effect of urban vertical patterns on urban waterlogging: an empirical study in Shenzhen [J].

- Environmental Impact Assessment Review, 2024, 106: 107486.
- [5] Bruwier M, Mustafa A, Aliaga D G, et al. Influence of urban pattern on inundation flow in floodplains of lowland rivers[J]. Science of The Total Environment, 2018, 622-623:446-458.
- [6] Li Zhen, Wang Zhuowei, Wu Leixiang, et al. Evaluating the effect of building patterns on urban flooding based on a boosted regression tree; a case study of Beijing, China[J]. Hydrological Processes, 2023, 37(8): e14932.
- [7] Lin Jinyao, He Xiaoyu, Lu Siyan, et al. Investigating the influence of three-dimensional building configuration on urban pluvial flooding using random forest algorithm[J]. Environmental Research, 2021, 196: 110438.
- [8] 宋奇珂, 刘成帅, 赵晨晨, 等. 城市建筑格局对雨洪过程的影响[J]. 中国农村水利水电, 2025(4): 169-175. (Song Qike, Liu Chengshuai, Zhao Chencheng, et al. The impact of urban architectural pattern on rainfall and flood processes[J]. China Rural Water and Hydropower, 2025(4): 169-175. (in Chinese))
- [9] 张金萍, 张朝阳, 左其亭. 极端暴雨下城市内涝模拟与应急响应能力评估[J]. 郑州大学学报(工学版), 2023, 44(2): 30-37. (Zhang Jinping, Zhang Chaoyang, Zuo Qiting. Urban waterlogging simulation and emergency response capacity evaluation with extreme rainstorms[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2023, 44(2): 30-37. (in Chinese))
- [10] 王振亚, 姚成, 董俊玲, 等. 郑州“7·20”特大暴雨降水特征及其内涝影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 17-22. (Wang Zhenya, Yao Cheng, Dong Junling, et al. Precipitation characteristic and urban flooding influence of “7·20” extreme rainstorm in Zhengzhou[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(3): 17-22. (in Chinese))
- [11] 李月嫦. 城市街区热岛强度的规划影响因素研究: 以西安市中心城区为例[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2023.
- [12] 梅雪健. 基于建筑布局的城市空间形态分析: 以郑州市为例[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2023.
- [13] 杨陵. 基于建筑群体的城市三维空间结构探索: 以平原城市为例[D]. 南京: 南京师范大学, 2022.
- [14] 张培峰. 城市建筑空间起伏特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(2): 51-57. (Zhang Peifeng. Spatial fluctuation of urban architecture[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(2): 51-57. (in Chinese))
- [15] 高希超, 王浩, 杨志勇, 等. 考虑风场影响的城市建筑区产流计算方法[J]. 水科学进展, 2023, 34(1): 88-101. (Gao Xichao, Wang Hao, Yang Zhiyong, et al. Runoff calculation method of urban built-up areas considering the impact of wind? [J]. Advances in Water Science, 2023, 34(1): 88-101. (in Chinese))
- [16] 罗渝复, 林凯荣, 方煜铭, 等. 考虑风场作用的城市建筑区产流特征[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(4): 728-735. (Luo Yufu, Lin Kairong, Fang Yuming, et al. Runoff generation characteristics of urban building areas considering the effect of wind fields[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(4): 728-735. (in Chinese))
- [17] 谭磊琪, 周亮, 李丽, 等. 基于梯度视角的城市建筑形态对地表温度的影响[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(6): 1492-1503. (Tan Leiqi, Zhou Liang, Li Li, et al. Influence of urban buildings forms on land surface temperature: from a gradient perspective [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(6): 1492-1503. (in Chinese))
- [18] Zu Gongbo, Lam K M. LES and wind tunnel test of flow around two tall buildings in staggered arrangement[J]. Computation, 2018, 6(2): 28.
- [19] 李彪. 城市建筑群不均匀性对大气动力特性影响的风洞实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [20] 关吉平, 陈伟, 朱乐东. 建筑群风环境干扰效应研究[J]. 结构工程师, 2010, 26(3): 82-88. (Guan Jiping, Chen Wei, Zhu Ledong. Study of interference effects on wind environment around buildings [J]. Structural Engineers, 2010, 26(3): 82-88. (in Chinese))
- [21] 刘家宏, 石虹远, 梅超, 等. 城市下垫面空间格局对社区尺度内涝过程的影响模拟[J]. 水科学进展, 2022, 33(6): 881-893. (Liu Jiahong, Shi Hongyuan, Mei Chao, et al. Effect of urban subsurface spatial pattern on community-scale flooding processes via numerical simulation[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(6): 881-893. (in Chinese))
- [22] 刘坤. 基于密度的城市空间形态研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [23] 戴丽, 尹昌应, 毛春艳, 等. 喀斯特山地城市景观格局对城市内涝的影响研究: 以贵阳市为例[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2024, 42(2): 53-61. (Dai Li, Yin Changying, Mao Chunyan, et al. The influence of the landscape pattern on urban waterlogging in Karst mountains: take Guiyang as an example [J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2024, 42(2): 53-61. (in Chinese))
- [24] 何文文. 城市建筑三维形态的时空自相关特征研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2018.
- [25] 王利成. 基于分形理论的羌族传统村落空间形态演变规律研究: 以岷江上游杂谷脑河流域为例[D]. 雅安: 四川农业大学, 2024.
- [26] 王心禹, 马建刚, 赵彤晖, 等. 城市绿地景观格局对雨水径流的影响[J]. 人民珠江, 2025, 46(9): 32-42. (Wang Xinyu, Ma Jiangang, Zhao Tonghui, et al. Influence of urban green space landscape pattern on rainfall runoff

- [J]. Pearl River, 2025, 46(9): 32-42. (in Chinese))
- [27] 解文龙. 寒地城市形态韧性的规划协同调控研究: 以长春市为例[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- [28] 邵典. 基于建筑体量的城市形态复杂性建构机理与测度研究[D]. 南京: 东南大学, 2022.
- [29] 张海博. 听水河流域景观格局与水土流失的关联分析及优化配置[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [30] 印舜尧. 基于建筑形态关联网络的城市肌理分布特征及内在机制研究: 以南京老城为例[D]. 南京: 东南大学, 2022.
- [31] 吴佳瑶, 张煜洲, 陈柯, 等. 基于 AHP-熵权法的城市内涝风险评估: 以杭州市滨江区为例[J]. 浙江水利水电学院学报, 2024, 36(1): 38-45. (Wu Jiayao, Zhang Yuzhou, Chen Ke, et al. Urban waterlogging risk assessment based on AHP-entropy method: case study of Binjiang District [J]. Journal of Zhejiang Water Conservancy and Hydropower College, 2024, 36(1): 38-45. (in Chinese))
- [32] 段亭亭, 李鹏峰, 邱顺添, 等. 基于多源数据的长春市洪涝灾害应对能力评估与提升[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(6): 41-48. (Duan Tingting, Li Pengfeng, Khu Shuntian, et al. Assessment and enhancement of flood disaster response capability in Changchun City based on multi-source data[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(6): 41-48. (in Chinese))
- [33] 黄曦涛, 李怀恩, 张瑜, 等. 基于 PSR 和 AHP 方法的西安市城市内涝脆弱性评价体系构建与脆弱度评估[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(6): 167-175. (Huang Xitao, Li Huaen, Zhang Yu, et al. Construction of urban waterlogging vulnerability assessment system and vulnerability assessment based on PSR & AHP method in Xi'an city[J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28(6): 167-175. (in Chinese))
- [34] 王小杰, 夏军强, 董柏良, 等. 基于汇水区分级划分的城市洪涝模拟[J]. 水科学进展, 2022, 33(2): 196-207. (Wang Xiaojie, Xia Junqiang, Dong Bailiang, et al. Simulation of urban flood using the SWMM with the hierarchical catchment partition method[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(2): 196-207. (in Chinese))
- [35] 宋耘, 李琼芳, 牛铭媛, 等. 基于 SWMM 模型的南京典型易涝区暴雨内涝模拟[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(6): 56-61. (Song Yun, Li Qiongfang, Niu Mingyuan, et al. Rainstorm and waterlogging simulation in typical inundated districts of Nanjing based on SWMM [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(6): 56-61. (in Chinese))
- [36] 马丽君, 王传涛, 王雯军, 等. 基于 SCS-CN 模型的郑州市区域产流特征研究[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 203-209. (Ma Lijun, Wang Chuantao, Wang Wenjun, et al. Regional runoff characteristics in Zhengzhou City based on SCS-CN model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 203-209. (in Chinese))
- [37] 李世豪. 郑州市区洪涝风险分析及内涝积水模拟研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2016.
- [38] Gironás J, Roesner L A, Rossman L A, et al. A new applications manual for the Storm Water Management Model (SWMM) [J]. Environmental Modelling & Software, 2010, 25(6): 813-814.
- [39] 陆科成, 李瑞栋, 倪广恒, 等. 银川市典型区土地利用格局演变对城市内涝特征的影响[J]. 水资源保护, 2025, 41(4): 51-59. (Lu Kecheng, Li Ruidong, Ni Guangheng, et al. Influence of land use pattern evolution on urban waterlogging characteristics in typical area of Yinchuan City [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(4): 51-59. (in Chinese))
- [40] 盛志军, 周雨, 孟明华, 等. 基于随机森林算法的城市内涝风险预估方法及应用: 以南昌市为例[J]. 暴雨. 灾害, 2025, 44(1): 93-101. (Sheng Zhijun, Zhou Yu, Meng Minghua, et al. Method and application of urban waterlogging risk prediction based on the random forest algorithm-taking Nanchang as an example [J]. Torrential Rain and Disasters, 2025, 44(1): 93-101. (in Chinese))
- [41] 刘万新, 刘洋, 王瑶. 南水北调中线受水区 2001-2023 年水资源量与用水量变化分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(5): 18-25. (Liu Wanxin, Liu Yang, Wang Yao. Changes in water resources and water consumption in receiving areas along the Middle route of the South-to-North Water Diversion Project from 2001 to 2023 [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(5): 18-25. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-10-09 编辑: 王芳)

