

银川市典型区土地利用格局演变对城市内涝特征的影响

陆科成^{1,2}, 李瑞栋^{1,2}, 倪广恒^{1,2}, 田富强^{1,2}, 邵建³, 杨苑媛³, 马成祥⁴

(1. 清华大学水圈科学与水利工程全国重点实验室, 北京 100084; 2. 清华大学土木水利学院, 北京 100084;
3. 银川市气象局, 宁夏 银川 750002; 4. 甘肃省水利科学研究院, 甘肃 兰州 730000)

摘要:探讨了银川市典型区1990—2020年土地利用类型变化情况, 解析了以不透水面为代表的景观格局演变过程; 基于水文水动力耦合模型和随机森林模型, 识别了不同重现期设计降雨情景下对内涝最大淹没水深和最大淹没面积具有显著影响的景观格局指数, 并从产汇流机制的角度分析了原因。结果表明: 对银川市典型区内涝影响显著的不透水面景观格局指数为斑块密度、分形维数和欧氏最近邻距离; 在较短重现期(5~20 a)设计降雨情景下, 斑块密度对地表淹没影响程度最高, 而在较长重现期(50~200 a)设计降雨情景下分形维数和欧氏最近邻距离的影响更显著。

关键词:城市内涝; 土地利用类型; 景观格局指数; 水文水动力模型; 随机森林模型; 银川市

中图分类号: P333.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2025)04-0051-09

Influence of land use pattern evolution on urban waterlogging characteristics in typical area of Yinchuan City// LU Kecheng^{1,2}, LI Ruidong^{1,2}, NI Guangheng^{1,2}, TIAN Fuqiang^{1,2}, SHAO Jian³, YANG Yuanyuan³, MA Chengxiang⁴
(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Yinchuan Meteorological Bureau, Yinchuan 750002, China; 4. Gansu Water Resources Research Institute, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Changes in land use types in typical areas of Yinchuan City from 1990 to 2020 were explored, and the evolution process of landscape patterns represented by impermeable surfaces was analyzed. Based on the coupling model of hydrology and hydrodynamics and the random forest model, landscape pattern indexes that significantly affect the maximum submergence depth and area of waterlogging under different return period design rainfall scenarios were identified, and the reasons were analyzed from the perspective of runoff generation mechanism. The results indicate that the impervious surface landscape pattern indexes that significantly affect waterlogging in typical areas of Yinchuan City are patch density, fractal dimension, and Euclidean nearest neighbor distance. In the design rainfall scenario with shorter return periods (5-20 a), patch density has the highest impact on surface inundation, while in the design rainfall scenario with longer return periods (50-200 a), the effects of fractal dimension and Euclidean nearest neighbor distance are more significant.

Key words: urban waterlogging; land use type; landscape pattern index; hydrology and hydrodynamics model; random forest model; Yinchuan City

城市内涝是指短时间内连续或强降雨超过城市排水能力, 导致城市地区发生积水灾害的现象^[1]。21世纪以来, 我国城镇化进程明显加速, 城市扩张造成地表不透水面取代了原有的天然下垫面, 下渗量减少^[2], 地表径流量增加, 汇流速度变快^[3], 加剧了低洼地区积水, 城市管网严重负荷, 进而引发了严重的城市内涝现象, 如北京“7·21”^[4]、郑州“7·20”^[5]、深圳“9·7”^[6]等洪涝灾害事件, 严重危

害了人们的人身及财产安全。土地利用类型作为城市发展和自然资源管理的关键因素, 对调节水文周期^[7-8]、控制雨水径流量^[9]以及影响地下水补给^[10-11]等方面起决定性作用, 其空间格局演变对城市水文过程具有显著影响^[12]。在多种土地利用类型中, 已有研究广泛认为不透水面占比与城市内涝风险之间存在显著关联^[13]。Karamage等^[14]利用历史数据解析了城市化对卢旺达境内流域典型降雨-

基金项目:水圈科学与水利工程全国重点实验室项目(sklhse-TD-2024-C01); 清华大学-宁夏银川水联网数字治水联合研究院项目(SKI-IOW-2022TC2010)

作者简介:陆科成(2001—), 男, 博士研究生, 主要从事城市水文研究。E-mail: lkc23@mails.tsinghua.edu.cn

通信作者:马成祥(1965—), 男, 正高级工程师, 主要从事水资源开发利用研究。E-mail: machengxiangdvd@163.com

径流过程的影响,发现不透水面占比是影响涝水过程的关键控制条件,为不透水面占比与内涝风险之间的关联性提供了重要理论支持。

受人类活动影响,道路、建筑物等基础设施建设重塑了区域土地利用格局,使得城市不透水面逐步演变成高度碎片化的空间分布形式,由此伴生的水平和垂向的镶嵌格局导致城市产汇流过程中产生强烈的空间异质性^[15]。有研究表明,不透水面的几何特征和空间连接关系对内涝的产生和发展具有重要影响,如曹雪健^[16]发现透水面地表糙率和次网格汇流比例具有显著的尺度依赖性,城市径流过程会受到透水面-不透水面空间连通关系的影响。为理解不透水面空间分布如何影响内涝特征,河流几何学^[17]、景观建筑学^[18]等学科分析方法将景观形状指数、分形维数、斑块密度等景观格局指数作为不透水面空间特征的表征参数引入城市内涝灾害风险研究。例如:唐钰嫣等^[12]的研究发现不透水面斑块的聚集度和破碎度对内涝灾害风险有重要影响;戴丽等^[19]的研究表明内涝点位的空间分布与土地利用类型的景观格局指数具有显著相关性,不透水面越破碎,越不易发生内涝灾害;袁玉等^[20]通过构建基于景观格局的内涝生态风险指数,发现最大斑块面积比例、分形维数与内涝特征值具有较强相关性;Wang 等^[21-22]通过逐步回归分析和皮尔逊相关分析探讨了景观格局指数在不同尺度下对内涝深度和内涝点数量的影响,发现景观格局指数对内涝特征的影响具有尺度效应,且边界形状复杂、连通性高的绿地有助于改善城市内涝状况。然而,这些研究大多以内涝点数量作为内涝风险评估的主要依据,未能充分考虑不同景观格局指数对内涝水深和淹没范围的影响,也没有对不同降雨重现期下景观格局指数影响城市积涝特征的作用机制进行深入探讨。

鉴于此,本文选取宁夏银川市兴庆、金凤区的典型区,结合 1990—2020 年不透水面的景观格局演变过程,通过多种设计降雨方案驱动城市一二维水文水动力耦合模型,计算内涝点淹没水深和淹没范围,研究不透水面景观格局指数对内涝水深和淹没范围的影响,以期在城市土地利用景观格局的优化和内涝防治提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

银川市位于我国季风区的西缘,地处我国西北内陆干旱地区,由贺兰山山地和银川平原两部分构成,整体呈西南—东北方向倾斜,西部和南部较高,北部和东部较低。多年平均降水量不足 200 mm,但

近年来年降水量呈小幅上升趋势,极端降水频发,2015—2020 年有 2 场总降水量超过 100 mm 的降雨事件。本文选择银川市兴庆、金凤城区部分积涝严重的区域作为典型区(图 1),地处 38°26′09″N~38°30′22″N、106°12′07″E~106°18′20″E,位于丽景街以西,亲水大街以东,贺兰山路以南,宝湖路以北,占地面积约 44.5 km²。典型区地形平坦,属于黄河冲积平原,土壤多为冲积土壤,透水性较差,加剧了暴雨后的积涝现象。植被覆盖率较低,土地利用类型以城市建筑、道路和工业区为主,不透水面占比较高。近年来,随着城市快速扩张,兴庆区和金凤区的不透水面逐年增加,城市土地利用格局发生了显著变化,道路、建筑物等的扩展进一步增加了地表径流,导致积涝问题日益严重。

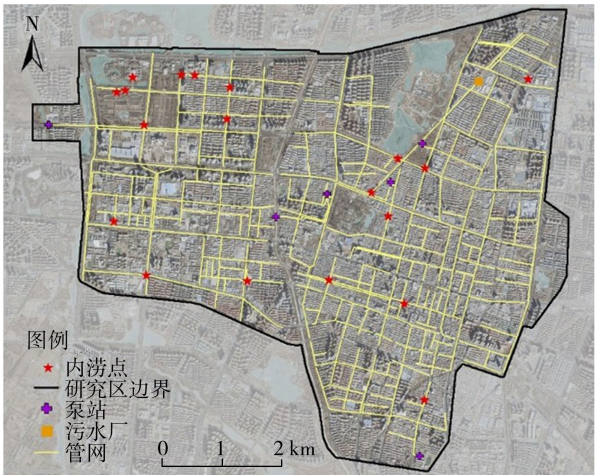


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

1.2 数据来源

内涝点信息由银川市气象局提供,共 19 个,具有较高时空精度;管网数据由银川市市政管理处提供,总长度 17.24 km;高程数据来源于 2017 年资源三号卫星的 5 m 分辨率前后视立体影像对,通过人工目视处理,移除建筑物等地物高程。基于已有研究^[21,23-24],采用中国年度土地覆盖数据集(分辨率为 30m)及 1985—2022 年动态变化数据集^[25],该数据集覆盖时间长,空间分辨率适中。以 5 a 为间隔,选取 1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年 7 期土地利用数据(图 2)进行研究,并参考李东来等^[26]的研究设置下垫面参数,如表 1 所示。

表 1 下垫面参数设置

Table 1 Setting of underlying surface parameters

土地利用类型	不透水面占比/%	曼宁糙率
不透水面	100	0.014
农作物	2.5	0.035
裸土	10.0	0.030
草地	2.5	0.060
水体	100	0.020

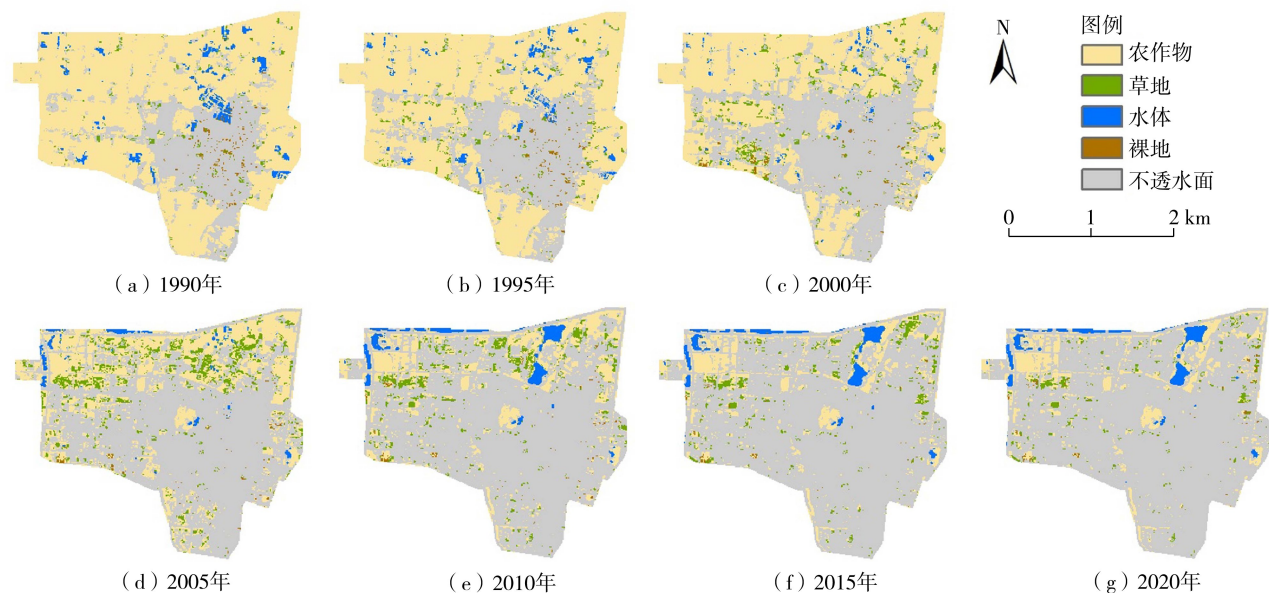


图2 典型区7期土地利用数据

Fig.2 Land use data of seven phases in typical area

2 研究方法

基于水文水动力模型和随机森林模型,识别影响研究区内涝特征(最大淹没水深、最大淹没面积)的关键不透水面景观格局指数,技术路线如图3所示。

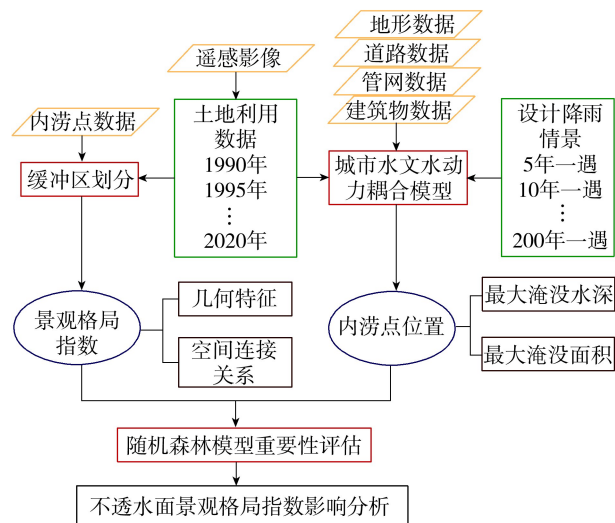


图3 技术路线

Fig.3 Technical route

2.1 不透水面景观格局指数

为探究不透水面景观格局对城市内涝的影响,以内涝点为中心,建立 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的正方形缓冲区^[21],以便捕捉内涝点周围的景观格局特征。参考唐钰嫣等^[12,19]的研究,选用与城市水文过程紧密相关的9种景观格局指数,从几何特征和空间连接关系两方面描述不透水面的分布特征。不透水面几何特征类景观格局指数包括:总面积,即不透水面斑块

的总面积,反映城市化程度及内涝易发区域的扩展;最大斑块面积占比,即不透水面最大斑块占总面积的比例,用于衡量不透水面的集中度,数值越大,集中度越高;斑块比例,即不透水面斑块类型面积占总面积的比例,用于描述不透水面的覆盖程度;分形维数,即不透水面斑块周长与面积的自然对数之比,取值范围为 $1 \sim 2$,值越大说明不透水面形状越复杂、边缘的曲折程度越高;景观形状指数,基于正方形衡量各个斑块的形状复杂性,不透水面斑块越接近正方形或圆形,值越接近 1 m^{-1} 。不透水面空间连接关系类景观格局指数包括:欧氏最近邻距离,即同类不透水斑块之间的距离,反映不透水面的空间分布和连接性边缘密度;边缘密度,即单位面积上不透水面斑块的边缘长度,用于衡量不透水面的破碎程度;斑块密度,即单位面积上不透水面斑块的个数,反映不透水面的密集程度;有效网格尺寸,即各个斑块面积的平方和与总面积的比值,反映不透水面空间结构的连通性,值较大时表明存在较大且连续的不透水面。

2.2 水文水动力耦合模型

基于高分辨率地形数据、排水管网数据、土地利用数据,构建城市一二维水文水动力耦合模型。针对二维地表产汇流过程,将研究区离散为 2345264 个二维三角形单元,并在每个单元根据单元不透水面占比划分不透水面与透水面。

a. 水文产流计算。控制方程为水量平衡方程:

$$P_e = \alpha P_0 + (1 - \alpha)(P_0 - I) \quad (1)$$

式中: P_e 为净雨量; α 为不透水面占比; P_0 为降水量; I 为入渗量,采用沿竖直方向的一维 Richards 方程进行分层^[27]计算。

b. 二维水力汇流计算。控制方程为二维浅水方程,采用半隐式有限体积法求解:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{S} \tag{2}$$

其中

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix} \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + gh^2/2 \\ huv \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} hu \\ huv \\ hv^2 + gh^2/2 \end{bmatrix} \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} P_e/\Delta t \\ -gh(\partial z_b/\partial x + S_{fx}) \\ -gh(\partial z_b/\partial y + S_{fy}) \end{bmatrix}$$

式中: h 为水深; u 、 v 为水流沿 x 、 y 方向的垂向平均速度; z_b 为底部高程; Δt 为计算时间步长,由 Courant-Friedrichs-Lewy 条件控制; S_{fx} 、 S_{fy} 为水流沿 x 、 y 方向的摩擦阻力,通过曼宁公式计算。

c. 一维管网水动力计算。采用由暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM)作为基本求解引擎,添加相应的二次开发接口,在雨水口处实现地表单元水深与管网节点水头间的信息交互,由此确定地表与地下管网间的双向水量交换关系,相关水量交换方程参考栾广学等^[28]的研究。

基于已构建的城市水文水动力耦合模型,对不同设计降雨情景下研究区地表积涝进行模拟,并提取内涝点最大淹没面积和最大淹没水深作为主要积涝特征指标。根据银川市短历时芝加哥暴雨强度公式(式(3))设置降雨情景^[29],重现期分别为 5、10、20、50、100 a,降雨历时为 2 h 的设计降雨过程如图 4 所示。

$$i = \frac{551.4(1 + 0.5841\lg P)}{167(t + 11)^{0.669}} \tag{3}$$

式中: i 为降雨强度; t 为降雨历时; P 为降雨重现期。

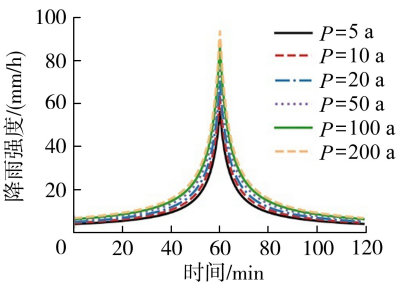


图 4 不同重现期下的设计降雨过程

Fig. 4 Design rainfall process under different return periods

2.3 随机森林模型

采用随机森林模型来解译不同景观格局指数对最大淹没水深、最大淹没面积的相对贡献。随机森林模型通过构建多个决策树并进行集成来预测结果,利用决策树分裂点对模型预测性能改进的重要

性评分来量化各个输入变量的贡献。每当模型在某个节点上使用某个特征进行分裂时,都会计算这次分裂导致的不纯度减少^[30]。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 9 种不透水面景观格局指数作为特征列,将水文水动力模型模拟得到的内涝点所在淹没区域的最大淹没水深和最大淹没面积作为目标变量训练随机森林模型,根据每个景观格局指数对模型预测精度的贡献进行排序,确定对最大淹没水深和最大淹没面积影响最大的指数。由于各变量的数据均为非正态分布,故在回归计算前将变量取自然对数后输入模型训练^[21]。

3 结果与分析

3.1 内涝点验证

利用银川市 2022 年 7 月 11 日降雨场次的实测数据验证水文水动力耦合模型的可靠性。在该场降雨事件中,银川市多地累积降水量超过 50 mm,市区最大降雨强度为 36 mm/h,兴庆、金凤区域内有记录的较大积水点为 23 处。图 5 为水文水动力耦合模型的模拟结果,图中黄色方框表示内涝点位置。将模拟结果与银川市气象局提供的内涝点数据进行对比,发现在积水位置及严重程度上具有较高重合度,模拟结果的内涝点共 19 处,命中率达 82.6%。将其中 5 处程度较严重的内涝点的积水深度模拟值与实测值进行对比,如表 2 所示,可见模拟结果与实测值具有较高的一致性,表明该模型具有较好的适用性,能够有效模拟典型区内不同降雨条件下的内涝过程,可用于后续不透水面景观格局指数对城市积涝特征影响的分析。

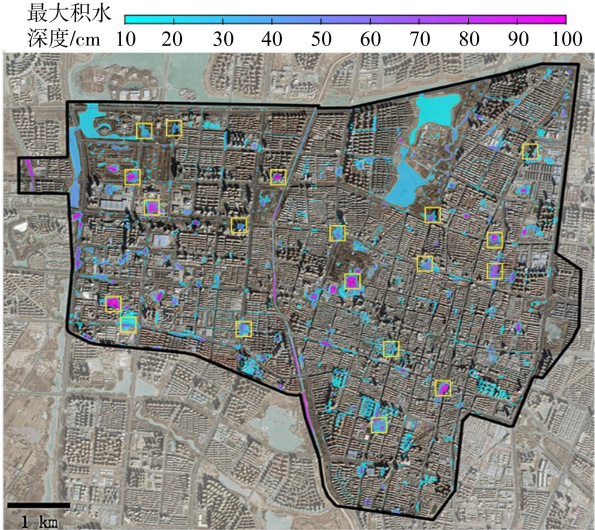


图 5 水文水动力耦合模型模拟结果

Fig. 5 Simulation results of hydrological and hydrodynamic coupling model

表 2 内涝点积水深度模拟值与实测值对比
Table 2 Comparison between simulated and measured values of waterlogging depth at waterlogging points

内涝点	实测值/cm	模拟值/cm	绝对误差/cm	相对误差/%
枕水巷(广场东街至泰康街)	30.00	29.73	0.27	0.90
宁夏回族自治区党委	20.00	17.40	2.60	13.00
富安西巷康亚药业周边	20.00	22.89	2.89	14.45
尹家渠街	40.00	43.04	3.04	7.60
上海路北塔湖	28.00	20.22	7.78	27.78

3.2 典型区土地利用类型变化

银川市典型区土地利用类型主要包括农作物、草地、水体、裸土、不透水面 5 种。经统计,1990—2000 年典型区的土地利用格局发生了显著变化,农作物面积占比从 42.20%逐渐下降至 31.26%;不透水面占比从 17.93%逐渐增加至 29.02%,反映了城市化和工业化的加速进程;草地在此期间也有所增加,从 1.01%增加到 2.19%,表明早期城市发展阶段中建设用地资源较为充足,草地得到了一定程度的保护。2000—2020 年,随着城市化进一步加速,不透水面占比持续增长至 52.66%,农作物面积占比则大幅下降至 7.57%,草地和水体的面积占比在此期间虽然有所波动,但总体保持相对稳定。

为量化典型区土地利用类型之间的相互转化关系,选取 1990 年、2000 年、2020 年作为时间节点,绘制典型区土地利用类型变化的桑基图,如图 6 所示。由图 6 可见,1990—2020 年,草地、水体、裸地向不透水面的转化率分别高达 77.10%、72.01%、95.22%;面积占比最大的农作物向不透水面的转化率达到 76.25%,凸显了耕地向城市建设用地转化的显著趋势。分析其原因,可能是从 20 世纪 90 年代末起,银川市的城市发展战略明显倾向于经济增长,大量企业的引进显著增加了对土地资源的需求^[31],由于农作物用地分布广泛且开发成本较低,

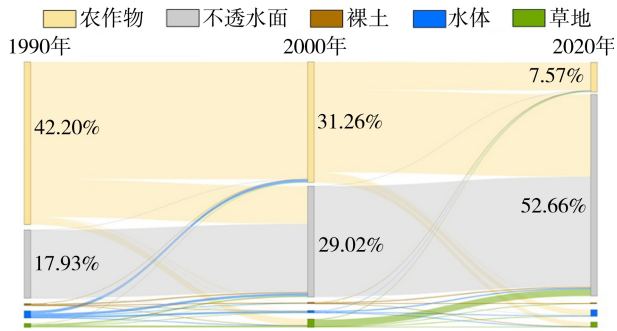


图 6 1990—2020 年典型区土地利用类型转化关系
Fig. 6 Transformation relationship of land use types in typical area from 1990 to 2020

成了城市扩展的主要目标。同时,也有少部分农作物用地转化为水体和草地,反映了随着经济社会发展,银川市逐渐加大了对生态环境保护的投入^[32],实现了部分农作物用地向生态用地的转化,在一定程度上维持了生态环境的稳定。

3.3 不透水面景观格局指数

图 7 为 1990—2020 年典型区内涝点缓冲区内的 9 种不透水面景观格局指数变化,反映了城市化进程对不透水面分布特征的影响。由图 7 可见,1990—2020 年典型区内涝点缓冲区不透水面的总面积、最大斑块指数、有效网格尺寸和斑块比例均呈现出显著的增长态势,在 2000 年达到顶峰后,增速明显放缓,这表明不透水面的扩展接近饱和状态,与前述农作物面积减少和不透水面积增加的过程一致。与此相对,1990—2020 年典型区内涝点缓冲区不透水面的欧氏最近邻距离、景观形状指数和斑块密度整体呈现下降趋势,尤其是在 2010 年后下降幅度逐渐减缓,说明不透水面斑块的分布从零散逐渐变得更加集中,且斑块的边界形状变得更加规则。分形维数从 2005 年起缓慢下降且幅度较小,说明斑块形状复杂度逐渐变小并趋于稳定。这一系列变化揭示了 1990—2020 年典型区内不透水面不断扩张和逐渐饱和的趋势。

选取 5 个影响范围较大的内涝点:尹家渠街、上海东路与民族北街路口、人民广场东街、上海东路北塔街交叉口、上海西路与广场西路路口,记为内涝点 1~5,分析 1990—2020 年内涝点缓冲区的土地利用类型变化情况,结果如图 8 所示。这些内涝点大多位于道路附近及道路交汇处,周边区域以高密度的不透水面为主,主要包括道路、建筑物等基础设施。由图 8 可见,1990 年内涝点附近区域以农作物和水体为主,随着城市化进程加快,农作物逐渐减少,不透水面显著增加,导致地表渗透能力下降。2020 年大部分内涝点缓冲区内不透水面几乎覆盖整个区域,草地和水体显著减少,进一步制约了雨水的有效下渗消纳,导致内涝频发。

3.4 不透水面景观格局指数对内涝特征的影响

图 9 为不同降雨重现期下不透水面景观格局指数对最大淹没水深和最大淹没面积的重要性评分。由图 9(a)可见,降雨重现期为 5、10、20 a 的条件下,斑块密度对最大淹没水深的影响最为显著,究其原因,当不透水面分布密集时,雨水更易积聚在低洼地带,导致局部区域的淹没深度增加;降雨重现期为 50、100、200 a 的条件下,斑块密度的重要性有所下降,反映斑块边界复杂度的分形维数成为重要性评分最高的指标,究其原因,水流运动受水力梯度控

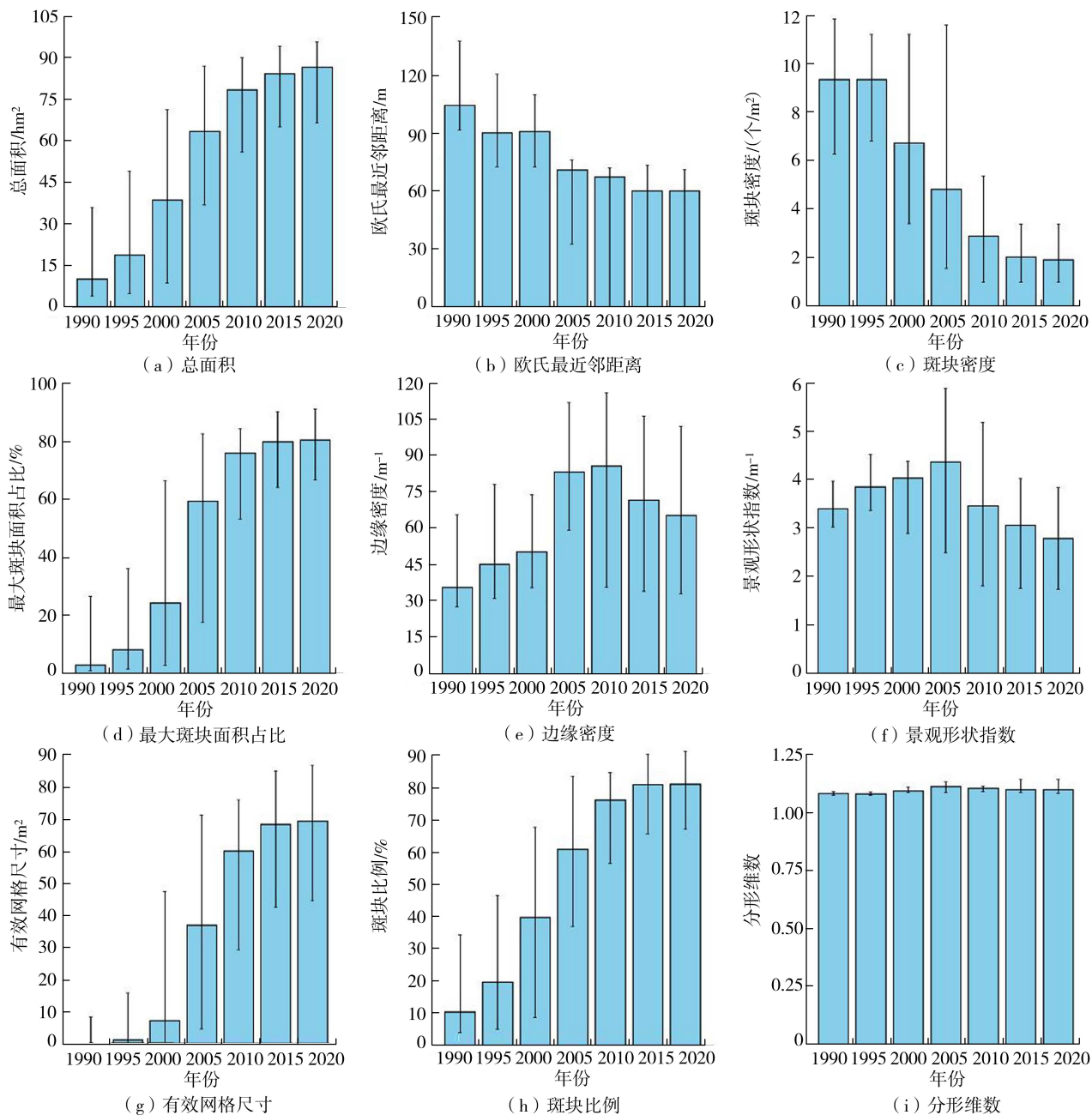


图 7 1990—2020 年典型区内涝点缓冲区不透水面景观格局指数变化

Fig. 7 Changes in impervious surface landscape pattern indexes within buffer zones of waterlogging points in typical area from 1990 to 2020

制,而透水面局地下渗能力强、不易积水,使得在不透水面与透水面交界处易形成更大的地表水力梯度,因此当边界形状复杂且不透水面和透水面交错明显时,水流在地表的扩散更为多样化,进而降低了局部区域的淹没深度。由图 9(b)可见,降雨重现期为 5 a 时,斑块密度为影响最大淹没面积最重要的因素。随着降雨重现期增加到 10 a,欧氏最近邻距离、最大斑块面积占比和有效网格尺寸对最大淹没面积影响的重要性评分迅速上升。在降雨重现期为 20、50、100、200 a 条件下,斑块密度、分形维数和欧氏最近邻距离成为影响最大淹没面积的前 3 个重要

指标,且反映不透水表面斑块之间的空间连接关系的欧氏最近邻距离^[33]逐渐成为最重要的因素。当不透水斑块之间的距离较大时,水流在相邻斑块间透水面的汇流长度^[16]增加,导致地表汇流时间延长,增加了雨水渗透量,减少了地表淹没面积。

不透水面景观格局指数对最大淹没水深与最大淹没面积的影响研究表明,在规划和管理城市内涝风险时,应综合考虑不透水面的几何特征和空间连接特性,以优化城市景观格局规划,降低城市积涝风险。对于短重现期的降雨事件,可以通过铺设透水砖等措施来减小不透水面斑块密度,控制水流的早

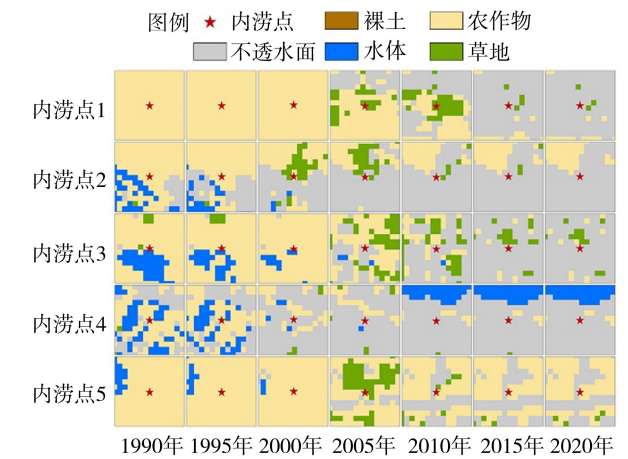


图 8 1990—2020 年内涝点缓冲区土地利用类型变化
Fig. 8 Change in land use type within buffer zones of five waterlogging points from 1990 to 2020

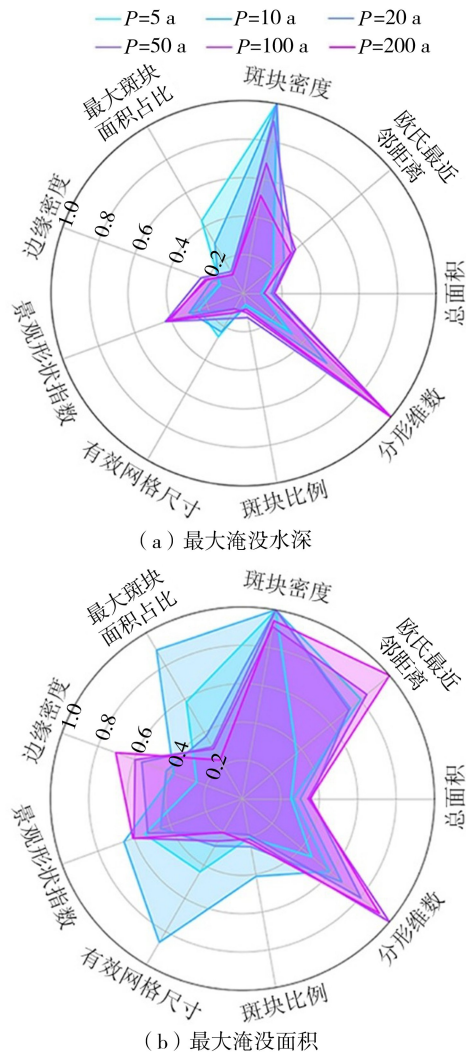


图 9 不同降雨重现期下不透水面景观格局指数对最大淹没深度和最大淹没面积的重要性评分
Fig. 9 Importance score of impervious surface landscape pattern indexes for maximum submergence depth and maximum submergence area under different rainfall return periods

期汇集。对于长重现期的极端降雨事件,建议通过增大欧氏最近邻距离和减小分形维数的方式,在不透水面之间合理布局绿色基础设施,优化斑块边界形态,以增强地表对快速水流的阻滞效果,防止多条水流同时汇集,从而减轻排水系统的负担。

需要指出的是,基于 30 m 分辨率数据的分析虽然能够揭示土地利用类型变化的总体趋势,但由于其难以解析城市建成区内的亚斑块(即小于单个像元的景观要素),一定程度上可能影响对研究区透水面范围的评估。这些小尺度透水区域能在城市雨水循环过程中发挥径流削减与滞蓄调节功能^[34-36]。未来研究可以结合更高分辨率的土地利用数据和地面观测结果,进一步解析包括小尺度透水单元在内的各类透水面(如绿地、农作物用地等)的空间分布特征及其复杂的水文调节机制,以更全面地认识土地利用格局演变对城市内涝的影响。

4 结论与建议

a. 选取宁夏银川市兴庆、金凤区部分积涝严重的区域为典型区,构建了一二维水文水动力耦合模型,经过实测降雨数据与内涝点积水深度的验证,确保了模型在典型区的适用性。

b. 典型区的不透水面在 1990—2020 年经历了显著扩张。2000 年前,不透水面的总面积、最大斑块面积占比和有效网格尺寸等指标持续增长,随后增速放缓。而欧氏最近邻距离、景观形状指数和斑块密度逐渐下降,且下降幅度在 2010 年后趋于稳定,表明不透水面从零散分布逐步转变为集中分布,且斑块的边界形状变得更加规则化。

c. 斑块密度、分形维数和欧氏最近邻距离是影响内涝点最大淹没水深和最大淹没面积的关键景观格局指数。在短重现期(5、10、20 a)的降雨事件中,斑块密度对地表淹没水深的影响最为显著,因为高密度的不透水面斑块会导致雨水迅速汇集于低洼区域,增加局部积水深度。在长重现期(50、100、200 a)的降雨事件中,分形维数和欧氏最近邻距离的重要性则显著上升。分形维数较高时,斑块边界复杂,水流沿多个方向扩散,减小了局部的淹没水深,欧氏最近邻距离增加则延长了汇流时间,增强了雨水的渗透能力,从而减少地表的淹没面积。

d. 在短期降雨频发的区域,建议增加透水性基础设施,如透水砖、绿化带等,减缓不透水面斑块密度的扩展,控制水流的快速汇集。对于应对长重现期极端降雨事件,建议通过增加不透水面之间距离、优化斑块边界形态以及引入更多绿色基础设施等手段延长水流汇流时间,减缓城市积水进程。通过综

合考虑不透水面的几何特征和空间连接特性,能够更好地优化城市景观格局规划,降低内涝风险,确保城市的可持续发展。

参考文献:

[1] SURIYA S, MUDGAL B V. Impact of urbanization on flooding in the Thirusoolam sub watershed; a case study [J]. Journal of Hydrology, 2012, 412-413: 210-219.

[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] 孙延伟,许有鹏,高斌,等. 城镇化下流域不透水面扩张对洪峰的影响:以南京秦淮河为例[J]. 湖泊科学, 2021, 33 (5): 1574-1583. (SUN Yanwei, XU Youpeng, GAO Bin, et al. Influence of impervious surface expansion on flood peak under urbanization; a case study of Qinhuai River in Nanjing [J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33 (5): 1574-1583. (in Chinese))

[4] 茅家华. 基于多源遥感资料同化的北京“7·21”特大暴雨暖区降水机制研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2022.

[5] 任宏昌,张恒德. 郑州“7·20”暴雨的精细化特征及主要成因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(5): 1-9. (REN Hongchang, ZHANG Hengde. Refined features and main causes of “7·20” rainstorm in Zhengzhou [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(5): 1-9. (in Chinese))

[6] 宋利祥,陈嘉雷,刘壮添,等. 深圳市 2023 年“9·7”极端特大暴雨洪涝复盘模拟分析:以深圳龙华区观澜河流域为例[J]. 中国防汛抗旱, 2024, 34 (1): 19-23. (SONG Lixiang, CHEN Jialei, LIU Zhuangtian, et al. Retrospective simulation and analysis on “9·7” extraordinary rainstorm and flood in the Shenzhen City: taking the Guanlan Watershed of the Longhua District as an example [J]. China Flood & Drought Management, 2024, 34(1): 19-23. (in Chinese))

[7] SON N T, HUONG L E, DUC LOC N, et al. Application of SWAT model to assess land use change and climate variability impacts on hydrology of Nam Rom Catchment in Northwestern Vietnam [J]. Environment, Development and Sustainability, 2022, 24(3): 3091-3109.

[8] GETACHEW B, MANJUNATHA B R. Impacts of land-use change on the hydrology of lake Tana Basin, Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia [J]. Global Challenges, 2022, 6 (8): 2200041.

[9] MILKIAS A, TORU T. Assessment of land use land cover change drivers and its impacts on above Ground Biomass

and Regenerations of Woody Plants; a case study at Dire Dawa Administration, Ethiopia [J]. Atmospheric and Climate Sciences, 2018, 8(1): 111-120.

[10] PADBHUSHAN R, KUMAR U, SHARMA S, et al. Impact of land-use changes on soil properties and carbon pools in India; a meta-analysis [J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 9: 794866.

[11] VANACKER V, AMEJEIRAS-MARIÑO Y, SCHOONEJANS J, et al. Land use impacts on soil erosion and rejuvenation in Southern Brazil [J]. Catena, 2019, 178: 256-266.

[12] 唐钰嫣,潘耀忠,范津津,等. 土地利用景观格局对城市内涝灾害风险的影响研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52 (12): 1-11. (TANG Yuyan, PAN Yaozhong, FAN Jinjin, et al. The influence of landscape pattern on the risk of urban wateloggng disaster [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52 (12): 1-11. (in Chinese))

[13] 黄晓东,刘文锴,曹润祥,等. 不透水面扩张对郑州主城区降水特征的影响[J]. 水资源保护, 2022, 38 (6): 22-30. (HUANG Xiaodong, LIU Wenkai, CAO Runxiang, et al. Effects of impervious surface expansion on precipitation characteristics in main urban area of Zhengzhou City [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (6): 22-30. (in Chinese))

[14] KARAMAGE F, ZHANG Chi, FANG Xia, et al. Modeling rainfall-runoff response to land use and land cover change in Rwanda (1990-2016) [J]. Water, 2017, 9(2): 147.

[15] 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))

[16] 曹雪健. 精细化城市雨洪模拟研究[D]. 北京:清华大学, 2022.

[17] ZHOU Junju, LUO Chuyu, MA Dongfeng, et al. The impact of land use landscape pattern on river hydrochemistry at multi-scale in an inland river basin, China [J]. Ecological Indicators, 2022, 143: 109334.

[18] JIA Yuqiu, TANG Lina, XU Min, et al. Landscape pattern indices for evaluating urban spatial morphology: a case study of Chinese cities [J]. Ecological Indicators, 2019, 99: 27-37.

[19] 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))
- [20] 袁玉,方国华,陆承璇,等. 基于景观生态学的城市化背景下洪灾风险评估[J]. 地理学报, 2020, 75 (9): 1921-1933. (YUAN Yu, FANG Guohua, LU Chengxuan, et al. Flood risk assessment under the background of urbanization based on landscape ecology [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75 (9): 1921-1933. (in Chinese))
- [21] WANG Yongheng, LI Chunlin, LIU Miao, et al. Spatial characteristics and driving factors of urban flooding in Chinese megacities[J]. Journal of Hydrology, 2022, 613: 128464.
- [22] WANG Luoyang, LI Yao, HOU Hao, et al. Analyzing spatial variance of urban waterlogging disaster at multiple scales based on a hydrological and hydrodynamic model [J]. Natural Hazards, 2022, 114 (2): 1915-1938.
- [23] YANG Kexin, HOU Hao, LI Yao, et al. Future urban waterlogging simulation based on LULC forecast model; a case study in Haining City, China [J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 87: 104167.
- [24] 张晨钰,王伟,黄莉,等. 高度城镇化背景下深圳市易涝点驱动因子分析[J]. 水资源保护, 2024, 40 (2): 35-45. (ZHANG Chenyu, WANG Wei, HUANG Li, et al. Analysis of driving factors for waterlogging points in Shenzhen City under high urbanization background [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (2): 35-45. (in Chinese))
- [25] YANG Jie, HUANG Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. Earth System Science Data, 2021, 13 (8): 3907-3925.
- [26] 李东来,侯精明,申若竹,等. 基于地块概化和路网精细模拟理念的城市雨洪过程分区自适应模型[J]. 水科学进展, 2023, 34 (2): 197-208. (LI Donglai, HOU Jingming, SHEN Ruozhu, et al. Partition adaptive model of urban rainstorm and flood process based on the simulation concept of plots generalization and road networks fine [J]. Advances in Water Science, 2023, 34 (2): 197-208. (in Chinese))
- [27] 梅超,石虹远,李瑞栋,等. 基于数值试验的降雨径流过程对不透水面空间分布的响应分析[J]. 水资源保护, 2024, 40 (1): 86-92. (MEI Chao, SHI Hongyuan, LI Ruidong, et al. Response analysis of rainfall runoff process to spatial distribution of impervious area based on numerical experiments [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (1): 86-92. (in Chinese))
- [28] 栾广学,侯精明,王添,等. 基于复杂高密度管网结构优化技术的银川城区排水过程高效模拟方法[J]. 水资源保护, 2023, 39 (3): 205-212. (LUAN Guangxue, HOU Jingming, WANG Tian, et al. Efficient simulation method of Yinchuan urban drainage process based on structure optimization technology of complex high-density pipe network [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (3): 205-212. (in Chinese))
- [29] 李欣怡,侯精明,潘占鹏,等. 城市更新的雨洪过程动态响应模拟研究:以银川市为例[J]. 水利学报, 2023, 54 (11): 1347-1358. (LI Xinyi, HOU Jingming, PAN Zhanpeng, et al. Simulation study on dynamic response of rain and flood process in urban renewal: a case study of Yinchuan City [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54 (11): 1347-1358. (in Chinese))
- [30] 曹桃云. 基于随机森林的变量重要性研究[J]. 统计与决策, 2022, 38 (4): 60-63. (CAO Taoyun. Study on the importance of variables based on random forest [J]. Statistics and Decision, 2022, 38 (4): 60-63. (in Chinese))
- [31] 康若荷. 1949 年以来银川城市空间结构演变研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2015.
- [32] 韩立雄. 加快建设黄河流域生态保护和高质量发展先行区示范市的银川思考[J]. 中共银川市委党校学报, 2023 (2): 89-96. (HAN Lixiong. Reflections on accelerating the construction of a demonstration city for ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin in Yinchuan [J]. Journal of the Yinchuan Municipal Party College of C. P. C. , 2023 (2): 89-96. (in Chinese))
- [33] 张东凯,金祺,杨武. 基于 GIS 的贵州贵安新区林地景观格局特征分析[J]. 安徽农业科学, 2019, 47 (13): 103-107. (ZHANG Dongkai, JIN Qi, YANG Wu. Forestry landscape patterns in Gui' an New Area of Guizhou Province Based on GIS [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2019, 47 (13): 103-107. (in Chinese))
- [34] YU Kongjian, GIES E, WOOD W W. To solve climate change, we need to restore our sponge planet [J]. Nature Water, 2025, 3 (1): 4-6.
- [35] 梁鑫,侯精明,王添,等. 基于多源数据融合的城市洪涝模拟高精度地形构建方法[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44 (6): 56-63. (LIANG Xin, HOU Jingming, WANG Tian, et al. A method for constructing high-precision terrain for urban flood simulation based on multi-source data fusion [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 (6): 56-63. (in Chinese))
- [36] 崔瑞君,侯精明,王雁鸿,等. 小区绿色屋顶改造对径流的影响[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45 (4): 94-101. (CUI Ruijun, HOU Jingming, WANG Yanhong, et al. Effects of green roof retrofitting in residential communities on runoff [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45 (4): 94-101. (in Chinese))

(收稿日期: 2024 - 10 - 29 编辑: 王芳)