

# 海绵措施空间布局优化下的晋城市洪涝水深-流速联合分布特征

舒心怡<sup>1,2</sup>, 徐宗学<sup>1,2</sup>, 叶陈雷<sup>1,2</sup>, 廖如婷<sup>1,2</sup>, 贾书惠<sup>3</sup>

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875; 3. 中国城市规划设计研究院城镇水务与工程研究院, 北京 100037)

**摘要:**为探究海绵措施对洪涝的治理效果,解析暴雨洪涝下海绵城市地表淹没要素的关联性,以山西省晋城市西河排水片区为例,综合考虑海绵措施的径流削减效益与建设成本效益,基于多目标方法优化海绵措施布设方案,采用水文水动力耦合模型模拟地表淹没特征,构建适用于不同场景的洪涝多特征多元联合概率分布。研究表明:海绵措施对径流的削减效果随降雨重现期的增大而逐渐减弱,当海绵措施建设成本为4.11亿元,降雨重现期为10、20、50、100 a时,径流削减率分别为0.34、0.33、0.31、0.30;同一降雨重现期下水深-流速的联合风险率随着水深和流速的增大呈现出明显的非线性下降趋势,水深为0.4 m,降雨重现期为10、20、50、100 a,对应流速分别小于0.36、0.39、0.46、0.49 m/s时的联合风险率大于0.8;水深-流速协同风险率与联合风险率相比整体较低,且高风险区域更加集中于低水深和低流速区域,水深为0.4 m时,水深-流速的协同风险率随流速变化的取值范围为0~0.34。

**关键词:**城市洪涝;水文水动力耦合模型;海绵措施;NSGA-II;Copula;晋城市

**中图分类号:**TV122.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)01-0076-09

**Flood depth-flow velocity joint distribution characteristics of Jincheng City under spatial layout optimization of sponge facilities//SHU Xinyi<sup>1,2</sup>, XU Zongxue<sup>1,2</sup>, YE Chenlei<sup>1,2</sup>, LIAO Ruting<sup>1,2</sup>, JIA Shuhui<sup>3</sup> (1. College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China; 3. Urban Water Affairs and Engineering Research Institute, China Urban Planning and Design Institute, Beijing 100037, China)**

**Abstract:** In order to explore the effectiveness of sponge facilities in flood control and analyze the correlation of surface inundation elements in sponge cities under heavy rainfall, this paper takes the Xihe Drainage Area in Jincheng City, Shanxi Province, as a case study. In comprehensive consideration of the runoff reduction benefits and construction cost-effectiveness of sponge facilities, the layout optimization of sponge facilities was conducted by using a multi-objective method. A hydrological and hydrodynamic coupling model was employed to simulate surface inundation characteristics and to construct a joint probability distribution of flood features under different scenarios. The research findings indicate that the runoff reduction effect of sponge facilities gradually decreases as the rainfall return period increases. When the construction cost of low-impact development measures is 411 million yuan, the runoff reduction rates for the rainfall return periods of 10, 20, 50, and 100 years are 0.34, 0.33, 0.31, and 0.30, respectively. Under the same rainfall return period, the water depth-flow velocity joint risk rate shows a significantly nonlinear decreasing trend as the water depth and flow velocity increase. For a water depth of 0.4 m, with the rainfall return periods of 10, 20, 50, and 100 years, and the corresponding flow velocities being lower than 0.36, 0.39, 0.46, and 0.49 m/s, respectively, the water depth-flow velocity joint risk rate is above 0.8. The water depth-flow velocity cooperative risk rate is generally lower than the joint risk rate, and high-risk areas are more concentrated in regions with low water depths and flow velocities. When the water depth reaches 0.4 m, the water depth-flow velocity cooperative risk rate changes with flow velocity from 0 to 0.34.

**Key words:** urban flooding and waterlogging; hydrological and hydrodynamic coupling model; sponge facilities; NSGA-II; Copula; Jincheng City

**基金项目:**国家自然科学基金重点项目(52239003,52409005);中国博士后基金面上项目(2024M750224);粤港水安全保障联合实验室开放基金项目(CHJLWS-08)

**作者简介:**舒心怡(1998—),女,博士研究生,主要从事城市水文学研究。E-mail:shuxinyi@mail.bnu.edu.cn

**通信作者:**徐宗学(1962—),男,教授,博士,主要从事城市水文学研究。E-mail:zxxu@bnu.edu.cn

在城市化进程中,下垫面渗透能力降低,透水面比例减少,导致自然生态系统对雨水径流的调蓄能力减弱<sup>[1]</sup>。自2013年以来,我国大力推动海绵城市建设,其核心目标是充分发挥自然界对水体的调节作用,通过一系列措施减少城市内涝和水污染,同时综合利用雨水资源,实现城市水循环对环境变化的弹性适应<sup>[2]</sup>。海绵城市措施通过“渗、滞、蓄、净、用、排”六大功能,从源头削减雨水径流量,充分发挥生态系统对雨水的吸纳、蓄渗和缓释作用,有效控制雨水径流,缓解城市内涝,提高排水防涝的安全性,并增强防灾减灾能力<sup>[3]</sup>。通过这些措施,海绵城市建设不仅能够提升城市应对自然灾害的韧性,还能促进城市环境的可持续发展。

海绵城市是缓解城市洪涝问题的重要举措,强调因地制宜实施或改造多种低影响开发(low-impact development, LID)措施实现雨水的源头治理。目前最为常见的LID措施类型主要包括绿色屋顶、雨水花园和透水铺装<sup>[4]</sup>。以往研究结果表明组合措施布设方案的洪涝治理效果优于单一措施布设方案,如吴盈盈等<sup>[5]</sup>分析了单一LID措施及组合LID措施对深圳市光明区某小区雨洪过程的影响,发现组合布设方案对径流的调控效果优于单独布设方案;刘心可<sup>[6]</sup>对LID单一措施(透水铺装、绿色屋顶、生物滞留池)布设方案和组合布设方案共8种工况进行了对比,发现组合措施布设方案对水量和水质的控制效果最好。不同LID组合措施的布设方案会对地表径流产生不同的削减效果,田敏等<sup>[7]</sup>以西北师范大学校园作为研究区,设置了4种LID布设方案,基于成本-效益分析了不同降雨重现期的径流削减效果,结果发现布设面积越大的方案径流削减率越高;刘波等<sup>[8]</sup>选取4种LID措施,对比分析了措施布设在上下游不同位置共7种方案下水量与水质的减排效益,发现各布设方案削减效果中全区方案最优。许多研究中,通过设置多种情景进行组合LID措施空间布局优化,以期达到较好的洪涝治理效果。然而,采用几种固定方案进行对比无法涵盖所有的布设参数,难以找到最优解,还会消耗较多的计算资源。采取多目标优化方式能够兼顾应用需求,生成多种最优方案,同时能够提高计算效率,适应复杂、动态的优化环境,如李江云等<sup>[9]</sup>基于非支配排序遗传算法(nondominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)以中山市某开发区为例进行了灰绿耦合措施方案优化,发现绿色LID措施的径流系数和节点总溢流削减量均随其成本的增加呈近似线性下降的趋势。

城市雨洪模型是研究城市雨洪特性的重要工

具,是用于评估海绵措施治理效果、制定城市防洪减灾策略的一项关键技术。在城市雨洪研究中最具代表性的模型包括暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM)、InfoWorks ICM(integrated catchment management)以及MIKE系列模型<sup>[10]</sup>。其中,SWMM模型目前在城市排水管网设计、雨洪过程模拟、水质模拟及海绵措施模拟等方面应用最为广泛<sup>[11-12]</sup>。然而SWMM模型仅能对水文过程和一维管流过程进行计算,无法得到地表淹没情况,为此,相关学者通过构建水文水动力耦合模型,实现了地表洪水演进过程的模拟,如王兆礼等<sup>[13]</sup>耦合SWMM与TELEMAC-2D模型模拟了极端暴雨下的城区内涝情况。对于二维水动力模块,常见的InfoWorks ICM和MIKE模型<sup>[14-15]</sup>为商业软件,功能较为齐全,但模型不开源,无法扩展功能实现二次开发与算法嵌套;且这类模型通常需要较高精度的数据支撑,易消耗大量的计算资源,模拟时间较长。开源的LISFLOOD-FP模型可以通过编码与算法结合,耦合SWMM模型获取动态流量边界,实现地表淹没要素的高效快速模拟与关联度解析,其8.1版本还引入了GPU并行的计算方式,能够有效提高计算效率<sup>[16]</sup>。大量研究证明了LISFLOOD-FP模型的模拟结果具有较好的精度与合理性,赖成光等<sup>[17]</sup>基于SWMM与LISFLOOD-FP耦合内涝模型,模拟了广州长湴地区不同暴雨雨型与集中度条件下的内涝响应特征;Wu等<sup>[18]</sup>构建SWMM与LISFLOOD-FP耦合模型,将东莞市石桥溪区洪涝模拟结果与历史资料进行对比,证明了LISFLOOD-FP模型能够较好地模拟地表洪涝特征。

城市洪涝特征主要通过淹没面积、淹没水深、流速来表征<sup>[19-20]</sup>,许多研究针对洪涝风险对象进行水深、流速分析,如叶陈雷等<sup>[21]</sup>采用水文水动力耦合模型模拟了福州白马河片区不同情景不同工况下的洪水风险率,在设计降雨重现期为10a的条件下,模拟最大水深达到0.402m。现有研究大部分侧重于单独分析水深或流速,而较少考虑二者的相互作用和联合分布。构建Copula联合分布是描述变量之间相关性的一种有效方法,石赟赟等<sup>[22]</sup>采用Copula函数构建了年最大1d降水量与其相应潮位的联合分布模型,分析了深圳市雨潮遭遇风险,得出未发生超标准降雨时,遭遇超标准潮位的组合风险概率较小;冯平等<sup>[23]</sup>构建了入库年洪峰与年最大6d洪量的二维Copula联合分布,分析了大清河河南支沙河上游王快水库不同降雨重现期及特定条件下的洪峰和洪量条件频率。基于地表洪涝特征模拟构建水深与流速的二维Copula联合分布,能够有效地反映地表

洪涝要素之间的依赖性,有助于更加全面地评估极端暴雨下的海绵措施治理效果与洪涝风险。

本文以山西省晋城市西河排水片区为例,以地表径流削减率与海绵措施建设成本为目标函数,基于SWMM模型,采用NSGA-II算法进行不同重现期下的海绵措施空间布局寻优;基于海绵措施布设最优方案,通过SWMM与LISFLOOD-FP耦合模型模拟地表淹没要素;基于二维Copula函数构建水深-流速的联合风险率与协同风险率,量化不同降雨情景下水深与流速的相关关系,为海绵城市建设背景下城市防洪减灾与韧性提升提供一定的参考。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

晋城市(35°11'N~36°04'N,111°55'E~113°37'E)位于山西省东南部,属暖温带半湿润大陆性气候区,具有四季分明、昼夜温差大、降水集中的气候特征。西河排水片区面积约11.39 km<sup>2</sup>,高程范围690.5~832.4 m。区内地势西高东低、北高南低。市域受渤海高压和西太平洋副高的影响,形成了一些极端天气,如暴雨、雷雨、大风等。近年来,山西省晋城市暴雨洪涝问题严重。2022年7月16日,横河镇遭遇了强降雨,横河、杨柏两站累计降水超过100 mm,最大雨强达到91.2 mm/h,造成的经济损失约为2.08亿元。2022年5月底,晋城市正式开始实施系统化全域海绵城市建设。本文以晋城市西河排水片区为研究区,概况见图1。

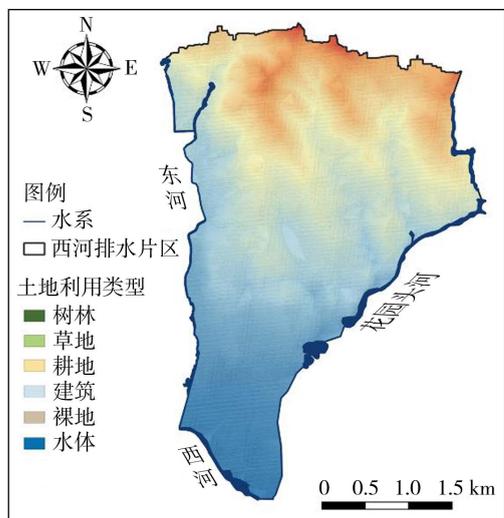


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

### 1.2 基础数据与来源

a. 空间数据。①排水管网数据由中国城市规划设计研究院提供,包括管网布局、管网拓扑结构、管道及雨水井间的连接关系与流向规则、排水管道

物理特征和雨水井参数。其中,排水管道物理特征包括长度、管径(最大直径为1.8 m)、管渠形状(多为圆管)、进水偏移、出水偏移等,雨水井参数包括井底标高、最大深度、进出口直径等。②DEM数字高程来源于中国城市规划设计研究院,网格精度为5 m。③土地利用数据采用2021年欧洲航天局WorldCover 10 m土地覆盖数据集,包括林地、草地、不透水面等多种下垫面类型,用于计算地表不透水率。④易涝点数据包括实测易涝点位置和水深数据,来源于中国城市规划设计研究院,通过实地调查和监测获得,用于率定模型参数,验证模拟结果的准确性。

b. 设计降雨。通过查阅GB/T50805—2012《城市防洪工程设计规范》、GB50318—2017《城市排水工程规划规范》和GB50014—2021《室外排水设计标准》,根据晋城市暴雨强度公式,采用芝加哥雨型(式(1))分别推求降雨重现期为1、5、10、20、50、100 a,历时120 min的设计降雨,雨峰系数采用0.398<sup>[24]</sup>。

$$q = \frac{2437.198(1 + 0.846 \lg P)}{(t + 15.503)^{0.769}} \quad (1)$$

式中: $q$ 为暴雨强度; $P$ 为降雨重现期; $t$ 为降雨历时。

## 2 研究方法

### 2.1 城市暴雨洪涝过程模拟

#### 2.1.1 管网排水过程模拟

SWMM模型将研究区划分为一系列相似的子汇水区,通过模拟降雨、地面填洼、下渗、地表汇流与管网汇流等水文过程来反映产生城市径流的各种水文过程的空间变异性。每个子区域具有各自的透水与不透水面积比,地表径流可以在子区域内或者子区域之间输送。本文选用可描述下渗率随降雨时间变化的Horton模型模拟降雨入渗过程。将城市下垫面划分为若干个由透水面与不透水面组成的汇水单元,采用非线性水库方法,实现降雨经坡面汇流进入地下管网的水量模拟。节点与管渠连通而成的环状网络中,水流状态具有复杂的动态变化过程,本文采用动力波方法考虑管段水头损失和有压流情况,模拟汇流流量的不稳定流态<sup>[25]</sup>。

SWMM模型需要设置一系列参数模拟水文过程和城市排水系统的特性。对于SWMM模型中的地表与管道曼宁系数、洼地蓄水相关参数以及Horton模型参数,需要结合研究区实际情况,确定较为合理的参数组合。本文采用一、二维耦合洪涝模型模拟地表漫流过程,识别易涝点位置。城市建筑物的位置及分布对地表内涝特征的模拟结果影响较

大,在对模型参数率定和验证时将建筑物图层作为边界条件,认为建筑物内部无水流流路径。将二维模拟结果与实测易涝点位置进行比对,从而完成对 SWMM 模型的参数率定。采用率定的参数组合模拟易涝点水深,并与实测值比较,进行参数验证。结果表明易涝点水深误差均在 20% 以内,模型具有适用性<sup>[26]</sup>。

### 2.1.2 地表内涝演进模拟

LISFLOOD-FP 模型由英国布里斯托大学开发,是一个基于栅格的开源水动力模型,能够模拟城市水文水动力过程<sup>[27]</sup>。模型考虑了空间均匀的降水、渗透和蒸发过程,剖分结构性网格,采用自适应步长模拟地表水流演进过程。LISFLOOD-FP 模型采用二维洪泛区求解器处理网格单元间动量的连续性和每个单元内质量的连续性<sup>[28]</sup>。

本文将 LISFLOOD-FP 与 SWMM 模型进行耦合,综合考虑地表与地下排水管网之间的相互作用,利用 SWMM 模型模拟地下排水管网水流过程,利用 LISFLOOD-FP 模型模拟地表洪水演进过程。将节点溢流量作为二维动态点源边界的输入条件<sup>[11]</sup>,通过这种耦合机制模拟不同情景下的地表淹没情况。

## 2.2 LID 措施组合方案优化

以地表径流削减率、LID 措施建设总成本为目标函数,以各子汇水区 LID 措施布设面积为决策变量,以最大布设面积作为约束条件,构建多目标优化模型。LID 方案措施不仅考虑了成本和效益的平衡,还考虑了各个子汇水区的具体地理和环境条件。

### 2.2.1 决策变量

将每个子汇区内绿色屋顶布设面积( $A_G$ )、雨水花园布设面积( $A_R$ )和透水铺装布设面积( $A_P$ )作为决策变量,通过调节布设面积,选取成本、治理效益较优的布设方案。

### 2.2.2 目标函数

a. 地表径流削减率。计算公式为

$$R_s = (Q_{NL} - Q_L) / Q_{NL} \quad (2)$$

式中: $R_s$  为地表径流削减率; $Q_{NL}$  为未采用 LID 措施时的地表径流量; $Q_L$  为采用 LID 措施后的地表径流量。

b. LID 措施建设成本。根据住房和城乡建设部颁布的《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建》、DBJ04/T344—2017《海绵城市技术标准》等相关资料,进行 LID 措施建设单价的估算,绿色屋顶、雨水花园、透水铺装建设成本单价分别取 150、150、100 元/ $m^2$ 。根据区域用地类型,对每个子汇水区是否布设 LID 措施、LID 措施组合和各类 LID 最大布设面积分别进行设置。LID 组合措施总建设

成本为

$$E_L = 150 \sum_{i=1}^n A_{Gi} + 150 \sum_{i=1}^n A_{Ri} + 100 \sum_{i=1}^n A_{Pi} \quad (3)$$

式中: $E_L$  为 LID 组合措施总建设成本; $n$  为子汇水区个数; $A_{Gi}$  为第  $i$  个子汇水区绿色屋顶的面积; $A_{Ri}$  为第  $i$  个子汇水区雨水花园的面积; $A_{Pi}$  为第  $i$  个子汇水区透水铺装的面积。

c. 约束条件。海绵措施优化方案的约束条件为各类 LID 措施在研究区的空间位置,以子汇水区实际下垫面类型为条件进行筛选。约束条件可表示为

$$\begin{cases} 0 \leq A_{Gi} \leq A_{Gi,max} \\ 0 \leq A_{Ri} \leq A_{Ri,max} \\ 0 \leq A_{Pi} \leq A_{Pi,max} \end{cases} \quad (4)$$

式中  $A_{Gi,max}$ 、 $A_{Ri,max}$ 、 $A_{Pi,max}$  分别为第  $i$  个子汇区内绿色屋顶、雨水花园、透水铺装的最大布设面积,根据子汇水区内的实际土地利用情况确定。

### 2.2.3 计算流程

采用自适应 NSGA-II 算法<sup>[29]</sup>对 LID 组合措施空间布局进行自动寻优,求解目标函数导向的最优 LID 措施方案集。设置种群规模为 50,最大进化代数为 100,交叉概率为 0.8,变异概率为 0.4。对初代父代进行非支配排序,选择优良个体进行交叉和变异操作产生子代种群,并利用 SWMM 模型进行模拟和评估。父代与子代种群进行重复迭代,分级对个体进行拥挤度计算并排序,根据精英选择策略选取新的父代进行重复的种群更新。迭代过程持续进行,直至达到设定的最大进化代数。通过这种方式,NSGA-II 算法嵌套 SWMM 模型不断优化 LID 措施的布局,最终得到满足地表径流削减率最大和 LID 措施建设成本最低的多目标优化方案。NSGA-II 算法求解流程见图 2。

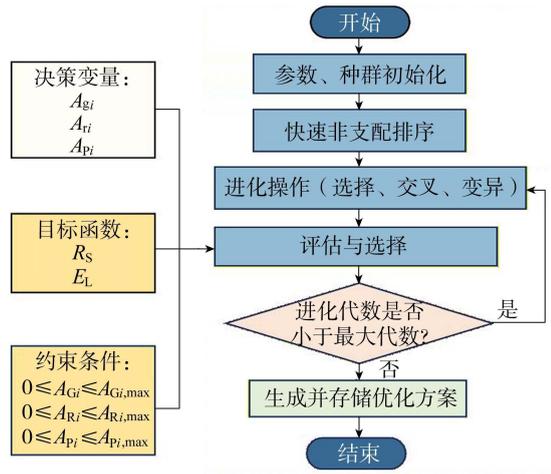


图 2 NSGA-II 算法求解流程

Fig. 2 Solving process of NSGA-II algorithm

## 2.3 基于 LID 措施优化的风险率联合分布

极端降水事件导致城市洪涝风险增大。对于部分城市,在遭遇短历时强降雨时还易受山区快速汇流与马路行洪的影响。为详细刻画城市洪涝风险概率,识别水深、流速间相互关联的风险率,本文通过构建水深-流速风险率联合分布,量化不同降雨情景下地表淹没要素的关联度。Copula 函数可通过单一变量的边缘累积概率密度函数构造联合分布,量化多元变量的相关关系。因此,本文基于核密度估计法拟合各降雨重现期下水深、流速的边缘分布,进而采用 Copula 函数构建变量之间的二维联合分布。采用联合风险率和协同风险率作为水深-流速关系的度量指标,分别表示为

$$S_{CS}(X > x \text{ 或 } Y > y) = 1 - C(u, v) \quad (5)$$

$$S_{CJ}(X > x, Y > y) = 1 - u - v + C(u, v) \quad (6)$$

式中: $X$  为水深; $Y$  为流速; $u, v$  分别为水深和流速的累积边缘分布函数; $S_{CS}(X > x \text{ 或 } Y > y)$  为水深-流速的联合风险率; $S_{CJ}(X > x, Y > y)$  为水深-流速的协同风险率; $C(u, v)$  为水深-流速的联合概率密度函数。

## 3 结果与分析

### 3.1 SWMM 模型率定与验证

子汇水区边界基于泰森多边形,根据排水片区边界、雨水井节点分布、房屋建筑位置、排水管道流向和 DEM 高程数据进行优化。排水片区共包括 636 个子汇水区、636 个节点、641 根管道<sup>[30]</sup>。

基于构建完成的 SWMM 模型,提取节点溢流量作为 LISFLOOD-FP 模型的二维输入,模拟 10、20、50、100 a 降雨重现期下的地表淹没情况。由图 3 可见,随着重现期的增大,积水范围和深度均显著增加。10 a 降雨重现期下对应于水深  $>0 \sim 0.15 \text{ m}$ 、 $>0.15 \sim 0.4 \text{ m}$ 、 $>0.4 \text{ m}$  的面积分别为  $1.76$ 、 $0.18$ 、 $0.40 \text{ km}^2$ ;而 100 a 降雨重现期下各水深范围对应面积分别增加为  $1.77$ 、 $0.24$ 、 $0.55 \text{ km}^2$ 。

参考《晋城市海绵城市设计导则》、DBJ04/T344—2017《海绵城市技术标准》和文献[31-33],确定 LID 措施参数取值。绿色屋顶表层蓄水深度为  $60 \text{ mm}$ ,植被覆盖率为  $0.8$ ,表面粗糙度为  $0.1$ ;土壤层厚度为  $120 \text{ mm}$ ,孔隙率为  $0.5$ ,田间持水率为  $0.2$ ,导水率为  $0.5 \text{ mm/h}$ ;排水层厚度为  $3 \text{ mm}$ ,孔隙率为  $0.5$ ,表面粗糙度为  $0.1$ 。雨水花园表层蓄水深度为  $300 \text{ mm}$ ,植被覆盖率为  $0.2$ ,表面粗糙度为  $0.1$ ,地表坡度为  $1\%$ ;土壤层厚度为  $250 \text{ mm}$ ,导水率为  $10 \text{ mm/h}$ ,吸水坡头为  $140 \text{ mm}$ ,导水坡度为  $4\%$ ;蓄水层厚度为  $250 \text{ mm}$ ,孔隙比为  $0.75$ ,渗透率为  $210 \text{ mm/h}$ 。透水铺装表层蓄水深度为  $5 \text{ mm}$ ,表面粗

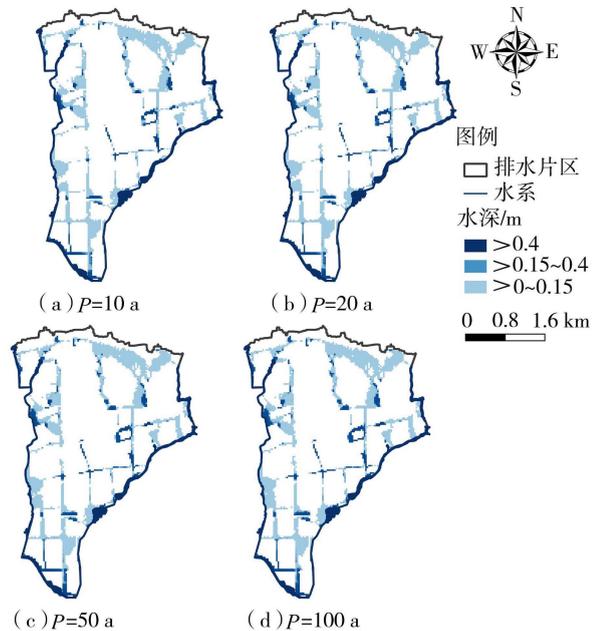


图 3 不同降雨情景下地表淹没情况

Fig. 3 Surface inundation conditions under different rainfall scenarios

糙度为  $0.1$ ;路面层厚度为  $150 \text{ mm}$ ,孔隙率为  $0.5$ ,渗透率为  $100 \text{ mm/h}$ ;蓄水层厚度为  $300 \text{ mm}$ ,孔隙率为  $0.75$ ,渗透率为  $0.5 \text{ mm/h}$ ;排水层排水系数为  $25$ 。

### 3.2 海绵措施空间布局优化

采用 NSGA-II 算法与 SWMM 模型进行嵌套,以地表径流削减率与 LID 措施建设成本为目标函数,以各子汇水区的 LID 布置面积为决策变量,加以最大面积约束,进行 LID 措施方案寻优,分别得到不同降雨情景下针对目标函数的 LID 布置方案最优解集,见图 4。

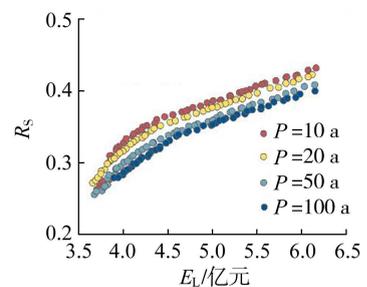


图 4 不同降雨情景下的  $R_s$ - $E_L$  帕累托前沿

Fig. 4  $R_s$ - $E_L$  Pareto frontier under different rainfall scenarios

由图 4 可知,当  $R_s$  取值不变时,随着降雨重现期的增大,最优方案对应的  $E_L$  值逐渐增大;而当  $E_L$  取值一定时,随着降雨重现期的增大,最优方案对应的  $R_s$  值逐渐减小。随降雨重现期的增大,LID 措施对于径流削减的效果逐渐减弱, $E_L$  为  $4.11$  亿元时,10、20、50 和 100 a 降雨重现期下, $R_s$  分别为  $0.34$ 、 $0.33$ 、 $0.31$  和  $0.30$ ;LID 措施对于重现期较小的降

雨作用较大,相同径流削减效果下,降雨重现期越小,LID措施所需的建设成本越低,降雨重现期越大,帕累托前沿中的值更加集中,分布范围更小。10 a 降雨重现期下,在帕累托前沿中选择  $R_s$  尽可能大且  $E_L$  尽可能小的方案,即 LID 最优布设方案中,对应的  $E_L$  为 4.78 亿元,  $R_s$  为 0.38; 选择  $R_s$  最大方案中,对应的  $E_L$  为 6.16 亿元,  $R_s$  为 0.43; 选择  $E_L$  最小方案中,对应的  $E_L$  为 3.70 亿元,  $R_s$  为 0.26。20 a 降雨重现期下, LID 最优布设方案中,对应的  $E_L$  为 4.81 亿元,  $R_s$  为 0.37; 选择  $R_s$  最大方案中,对应的  $E_L$  为 6.12 亿元,  $R_s$  为 0.42; 选择  $E_L$  最小方案中,对应的  $E_L$  为 3.65 亿元,  $R_s$  为 0.27。50 a 降雨重现期, LID 最优布设方案中,对应的  $E_L$  为 4.95 亿元,  $R_s$  为 0.36; 选择  $R_s$  最大方案中,对应的  $E_L$  为 6.14 亿元,  $R_s$  为 0.41; 选择  $E_L$  最小方案中,对应的  $E_L$  为 3.67 亿元,  $R_s$  为 0.26。100 a 降雨重现期下, LID 最优布设方案中,对应的  $E_L$  为 4.99 亿元,  $R_s$  为 0.35; 选择  $R_s$  最大方案中,对应的  $E_L$  为 6.15 亿元,  $R_s$  为 0.40; 选择  $E_L$  最小方案中,对应的  $E_L$  为 3.89 亿元,  $R_s$  为 0.28。

### 3.3 地表淹没要素联合分布

洪涝风险不仅对居民的人身、财产安全造成威胁,也会破坏公共环境和基础设施。量化淹没水深与流速之间的相关关系,可为城市制定防洪排涝以及洪涝风险管理策略提供依据。基于 LID 措施最优布设方案的帕累托前沿,选取  $R_s$  尽可能大且  $E_L$  尽可能小的海绵布设方案,通过耦合 SWMM 与 LISFLOOD-FP 模型,统计不同降雨情景下栅格单元

水深与流速值,构建西河排水片区的水深-流速风险率联合分布。

根据累积分布函数计算地表淹没要素的频率值,绘制经验频率与理论频率分布,见图 5。Copula 函数计算的理论频率和经验频率均分布于 45° 线附近,说明采用非参数核密度检验方法的拟合效果较好。

基于赤池信息准则对比 Frank Copula 函数、Clayton Copula 函数和 Gumbel Copula 函数,选择拟合效果最优的 Clayton Copula 函数,得到水深-流速联合累积概率和联合概率密度分布(图 6、图 7)。由图 6、图 7 可见,不同重现期下,联合累积概率随水深和流速的增大而增大;联合概率密度表示水深和流速的局部变化率,随水深和流速的增大呈现先增大后减小的趋势;当水深和流速取值很小时,联合概率密度存在一个峰值,此时水深和流速的组合较多,表明排水片区中大部分区域水深和流速均较小。

分别计算 10、20、50、100 a 降雨重现期下的水深-流速的联合风险率与协同风险率,绘制等值线图(图 8)。等值线的稀疏程度反映水深与流速的变化幅度,等值线越密集意味着变量的变化幅度越大,相反则表明参数波动越小,联合分布趋势线会偏向等值线密集的一侧。

从图 8(a)~(d)可以看出,随着水深和流速增加,水深-流速的联合风险率  $S_{CS}$  呈现非线性下降趋势。如 20 a 降雨重现期下,当水深小于 0.34 m、流速小于 0.44 m/s 时,  $S_{CS}$  维持在较高水平(>0.8);当水深大于 1.08 m、流速大于 1.26 m/s 时,  $S_{CS}$  < 0.3。

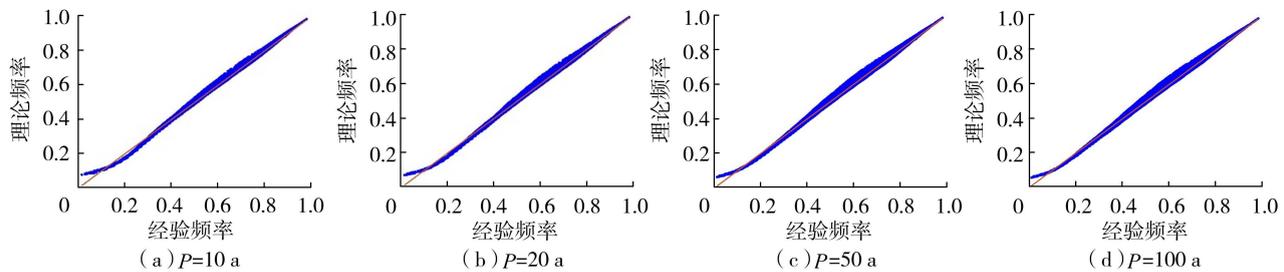


图 5 经验频率与理论频率分布

Fig. 5 Empirical frequency and theoretical frequency distributions

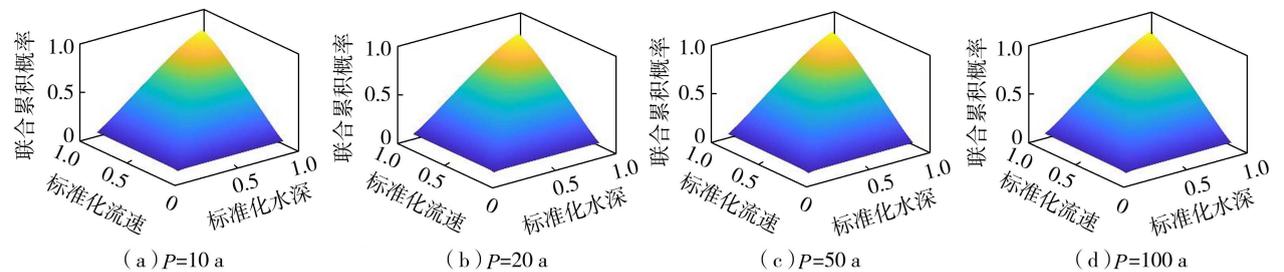


图 6 联合累积概率分布

Fig. 6 Distribution of joint cumulative probability

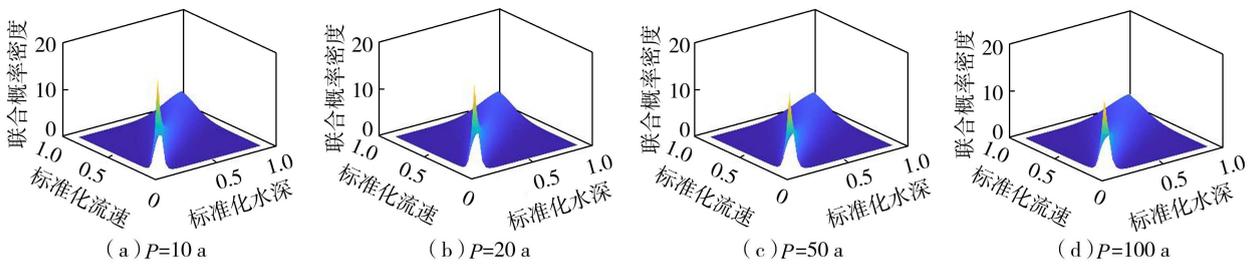


图7 联合概率密度分布

Fig.7 Distribution of joint probability density

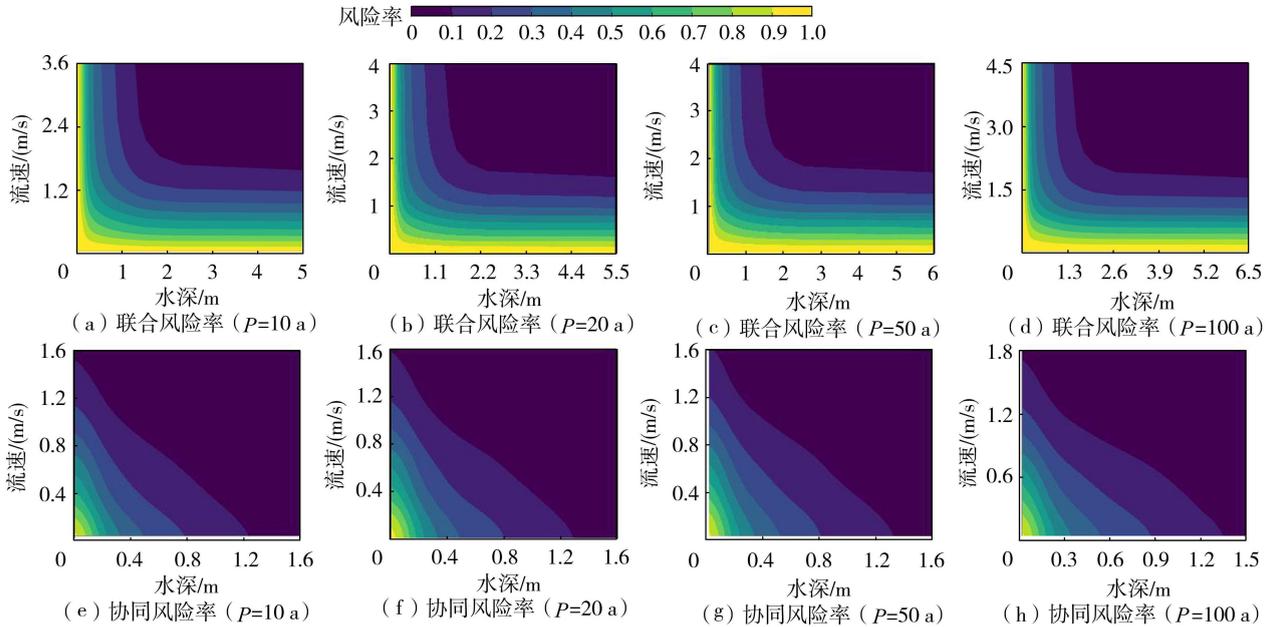


图8 不同降雨情景下的水深-流速风险率分布

Fig.8 Water depth-flow velocity risk rate distributions under different rainfall scenarios

当水深达到 0.40 m、流速小于 0.39 m/s 时,  $S_{CS} > 0.8$ ; 流速提升至 0.60 m/s 时,  $S_{CS}$  降低为 0.7; 而当流速大于 0.85 m/s 时,  $S_{CS} < 0.6$ 。当水深达到 0.40 m, 降雨重现期为 10、20、50、100 a, 对应流速分别小于 0.36、0.39、0.46、0.49 m/s 时,  $S_{CS} > 0.8$ 。

从图 8(e)~(h) 可以看出, 与  $S_{CS}$  相比, 水深-流速的协同风险率  $S_{CJ}$  整体较低, 且高风险区域更加集中, 主要出现在水深和流速都较小的区域。随着水流动能和势能的增加, 系统中的不确定性和混乱度加大, 协同效应减弱。如 20a 降雨重现期下, 当水深小于 0.07 m、流速小于 0.11 m/s 时,  $S_{CJ}$  处于较高水平 ( $> 0.8$ ); 当水深为 0.13~0.21 m、流速为 0.22~0.31 m/s 时,  $S_{CJ}$  处于中等水平 (0.4~0.6); 当水深大于 0.29 m、流速大于 0.35 m/s 时,  $S_{CJ} < 0.3$ 。当水深达到 0.4 m, 降雨重现期为 10、20、50、100 a 时,  $S_{CJ}$  随流速变化的范围分别为 0~0.35、0~0.34、0~0.36、0~0.36。

## 4 结论

a.  $R_s$  取值不变时, 降雨重现期越大, 帕累托前

沿中方案对应的  $E_L$  值越大;  $E_L$  一定时, 降雨重现期越大, 对应的  $R_s$  值越小。随降雨重现期的增大, LID 措施对于径流削减的效果逐渐减弱,  $E_L$  为 4.11 亿元时, 10、20、50 和 100 a 降雨重现期下,  $R_s$  分别为 0.34、0.33、0.31 和 0.30。

b. 同一降雨重现期下, 水深-流速的联合风险率随着水深和流速的增大呈现出明显的非线性下降趋势。当水深达到 0.40 m, 降雨重现期为 10、20、50、100 a, 对应流速分别小于 0.36、0.39、0.46、0.49 m/s 时, 水深-流速的联合风险率大于 0.8。

c. 同一降雨重现期下, 水深-流速的协同风险率与联合风险率相比整体较低, 且高风险区域更加集中于低水深与低流速区域。当水深达到 0.40 m, 降雨重现期为 10、20、50、100 a 时, 水深-流速的协同风险率随流速变化的范围分别为 0~0.35、0~0.34、0~0.36、0~0.36。

## 参考文献:

[1] 张建云, 宋晓猛, 王国庆, 等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战: I. 城市水文效应[J]. 水科学进展, 2014,

- 25(4): 594-605. (ZHANG Jianyun, SONG Xiaomeng, WANG Guoqing, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: I. hydrological response to urbanization[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(4): 594-605. (in Chinese))
- [2] 张金良, 罗秋实, 王冰洁, 等. 城市极端暴雨洪涝灾害成因及对策研究进展[J]. 水资源保护, 2024, 40(1): 6-15. (ZHANG Jinliang, LUO Qiushi, WANG Bingjie, et al. Research progress on causes and countermeasures for extreme rainstorm-induced urban flood disasters [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(1): 6-15. (in Chinese))
- [3] 叶陈雷, 徐宗学. 水工程调度与低影响开发协同作用下典型城市片区洪涝过程模拟: 以福州市为例[J]. 水利学报, 2022, 53(7): 833-844. (YE Chenlei, XU Zongxue. Simulation of fluvial/pluvial flooding processes in a typical urban area considering role of low impact development (LID) measures and joint operation for hydraulic structures: case study in Fuzhou City [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(7): 833-844. (in Chinese))
- [4] 付恒阳, 李榜晏. 4种常用低影响开发雨水管理技术研究进展[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版), 2020, 36(1): 56-64. (FU Hengyang, LI Bangyan. Research progress of four commonly used low impact development on rainwater management [J]. Journal of Shaanxi University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 36(1): 56-64. (in Chinese))
- [5] 吴盈盈, 余敦先, 夏军, 等. 典型LID措施对城市降雨径流过程影响[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(5): 833-842. (WU Yingying, SHE Dunxian, XIA Jun, et al. Impact of LID on urban rainfall and runoff process [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(5): 833-842. (in Chinese))
- [6] 刘心可. 基于城市水量水质耦合模拟的LID方案研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
- [7] 田敏, 任建民, 刘碧云, 等. 基于SWMM模型与成本效益的LID径流控制效果研究[J]. 水文, 2023, 43(5): 89-94. (TIAN Min, REN Jianmin, LIU Biyun, et al. Study on LID runoff control effect based on SWMM model and cost effectiveness [J]. Journal of China Hydrology, 2023, 43(5): 89-94. (in Chinese))
- [8] 刘波, 戎贵文, 陈情情, 等. 基于SWMM的LID设施分区布局及减排效益[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(5): 930-939. (LIU Bo, RONG Guiwen, CHEN Qingqing, et al. Regional distribution and mitigation benefit of LID facility based on SWMM [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(5): 930-939. (in Chinese))
- [9] 李江云, 李瑶, 胡子欣. 灰绿耦合雨洪系统多目标优化建模与应用[J]. 水资源保护, 2022, 38(6): 49-55. (LI Jiangyun, LI Yao, HU Zixin. Multi-objective optimization modeling and application of grey-green coupling stormwater system [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6): 49-55. (in Chinese))
- [10] 卢兴超, 徐宗学, 李永坤, 等. 基于SWMM与LISFLOOD-FP耦合模型的城市街区内涝模拟研究[J]. 水资源保护, 2024, 40(3): 98-105. (LU Xingchao, XU Zongxue, LI Yongkun, et al. Research on urban block waterlogging simulation based on coupling model of SWMM and LISFLOOD-FP [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(3): 98-105. (in Chinese))
- [11] 叶陈雷, 徐宗学, 雷晓辉, 等. 基于SWMM和InfoWorks ICM的城市街区洪涝模拟与分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 87-94. (YE Chenlei, XU Zongxue, LEI Xiaohui, et al. Flood simulation and risk analysis on urban block scale based on SWMM and InfoWorks ICM [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 87-94. (in Chinese))
- [12] 叶陈雷, 徐宗学, 雷晓辉, 等. 基于SWMM的城市社区尺度管网排水模拟: 以福州市某排水小区为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(2): 271-280. (YE Chenlei, XU Zongxue, LEI Xiaohui, et al. Simulation of pipeline network drainage at urban community scales based on SWMM: a case study in Fuzhou City [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(2): 271-280. (in Chinese))
- [13] 王兆礼, 陈昱宏, 赖成光. 基于TELEMAC-2D和SWMM模型的城市内涝数值模拟[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 117-124. (WANG Zhaoli, CHEN Yuhong, LAI Chengguang. Numerical simulation of urban waterlogging based on TELEMAC-2D and SWMM model [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 117-124. (in Chinese))
- [14] 叶陈雷, 徐宗学, 雷晓辉, 等. 基于InfoWorks的城市水系水文水动力过程耦合模拟: 以福州市江北城区及东北部山区为例[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, 55(5): 609-616. (YE Chenlei, XU Zongxue, LEI Xiaohui, et al. Coupling simulation of hydrological and hydrodynamics processes for urban river networks based on InfoWorks: case of the urban area and the northeast mountainous area in Fuzhou City [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2019, 55(5): 609-616. (in Chinese))
- [15] 廖如婷, 徐宗学, 叶陈雷, 等. 基于SWMM和InfoWorks ICM模型的大红门排水区暴雨内涝模拟[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 109-117. (LIAO Ruting, XU Zongxue, YE Chenlei, et al. Simulation of rainstorm waterlogging in Dahongmen Drainage Area based on SWMM and InfoWorks ICM models [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 109-117. (in Chinese))

- [16] SHARIFIAN M K, KESSERWANI G, CHOWDHURY A A, et al. LISFLOOD-FP 8.1: new GPU-accelerated solvers for faster fluvial/pluvial flood simulations [J]. *Geoscientific Model Development*, 2023, 16 (9): 2391-2413.
- [17] 赖成光, 廖耀星, 王兆礼. 不同暴雨情景下的城市内涝响应特征分析[J]. *水资源保护*, 2023, 39(3): 101-108. (LAI Chengguang, LIAO Yaoxing, WANG Zhaoli. Analysis of urban waterlogging response characteristics under different rainstorm rainfall scenarios[J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(3): 101-108. (in Chinese))
- [18] WU Xushu, WANG Zhaoli, GUO Shenglian, et al. A simplified approach for flood modeling in urban environments [J]. *Hydrology Research*, 2018, 49 (6): 1804-1816.
- [19] 姜仁贵, 韩浩, 解建仓, 等. 变化环境下城市暴雨洪涝研究进展[J]. *水资源与水工程学报*, 2016, 27(3): 11-17. (JIANG Rengui, HAN Hao, XIE Jiancang, et al. Research progress of urban storm flood under changing environment [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2016, 27(3): 11-17. (in Chinese))
- [20] 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))
- [21] 叶陈雷, 徐宗学, 雷晓辉, 等. 基于 InfoWorks ICM 的城市洪涝模拟及其风险分析: 以福州市白马河片区为例 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 57(6): 784-793. (YE Chenlei, XU Zongxue, LEI Xiaohui, et al. InfoWorks ICM flood simulation and risk analysis: case of Baima River district, Fuzhou [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2021, 57(6): 784-793. (in Chinese))
- [22] 石赟赟, 姚航斌, 万东辉, 等. 基于 Copula 函数的深圳市雨潮遭遇风险分析[J]. *人民珠江*, 2021, 42(12): 24-29. (SHI Yunyun, YAO Hangbin, WAN Donghui, et al. Encounter risk analysis of rainfall and tide in Shenzhen based on copula function [J]. *Pearl River*, 2021, 42(12): 24-29. (in Chinese))
- [23] 冯平, 李新. 基于 Copula 函数的非一致性洪水峰量联合分析 [J]. *水利学报*, 2013, 44 (10): 1137-1147. (FENG Ping, LI Xin. Bivariate frequency analysis of non-stationary flood time series based on Copula methods [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44 (10): 1137-1147. (in Chinese))
- [24] 舒心怡, 徐宗学, 叶陈雷, 等. 晋城市片区洪涝过程响应分析与马路行洪模拟 [J]. *水资源保护*, 2023, 39(4): 176-186. (SHU Xinyi, XU Zongxue, YE Chenlei, et al. Flooding/waterlogging process response analysis and road flooding simulation in urban area of Jincheng City [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(4): 176-186. (in Chinese))
- [25] YE Chenlei, XU Zongxue, LEI Xiaohui, et al. Assessment of the impact of urban water system scheduling on urban flooding by using coupled hydrological and hydrodynamic model in Fuzhou City, China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 321: 115935.
- [26] 舒心怡. 面向城市韧性的洪涝过程模拟与风险分析: 以山西省晋城市为例 [D]. 北京: 北京师范大学, 2023.
- [27] MOGHIM S, GHAREHTORAGH M A, SAFAIE A. Performance of the flood models in different topographies [J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 620: 129446.
- [28] KESSERWANI G, AYOUB J L, BAU D. Discontinuous Galerkin formulation for 2D hydrodynamic modelling: trade-offs between theoretical complexity and practical convenience [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2018, 342: 710-741.
- [29] 程麒铭, 尹超, 陈垚, 等. 基于多目标进化算法和 SWMM 的 LID 设施空间布局优化研究 [J]. *水资源保护*, 2024, 40(1): 108-116. (CHENG Qiming, YIN Chao, CHEN Yao, et al. Spatial layout optimization of LID facilities based on multi-objective evolutionary algorithm and SWMM [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(1): 108-116. (in Chinese))
- [30] 舒心怡, 徐宗学, 叶陈雷, 等. 晋城市不同区域洪涝驱动要素分析 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2024, 60(2): 203-217. (SHU Xinyi, XU Zongxue, YE Chenlei, et al. Driving factors for urban flooding/waterlogging in different zones in Jincheng City [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2024, 60(2): 203-217. (in Chinese))
- [31] 金梦潇, 田勇, LANCIA M, 等. 基于 Morris、Sobol 和 EFAST 的 LID 设施模型参数全局敏感性分析 [J]. *中国农村水利水电*, 2022(6): 104-110. (JIN Mengxiao, TIAN Yong, LANCIA M, et al. Global sensitivity analysis of LID facility model parameters based on Morris, Sobol and EFAST [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022 (6): 104-110. (in Chinese))
- [32] 康得军, 邱福杰, 温儒杰, 等. 基于 SWMM 的 LID 参数局部与全局敏感性分析 [J]. *中国给水排水*, 2023, 39 (17): 131-138. (KANG Dejun, QIU Fujie, WEN Rujie, et al. Analysis on local and global sensitivity of LID parameters based on SWMM [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(17): 131-138. (in Chinese))
- [33] 李瑶. 城市雨洪灰绿耦合排水系统多目标优化研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2021.

(收稿日期: 2024-04-18 编辑: 施业)