

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2026. 09. 018

基于熵权-TOPSIS模型评价LID设施组合效益

郑静宜, 张万权, 陈荣荣, 刘帅哲, 宋雅馨, 许俊鸽
(福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108)

摘要: 以福州市某高校为研究对象,结合暴雨洪水管理模型(SWMM),选用透水铺装、植草沟、雨水花园、下凹式绿地4种低影响开发(LID)设施,设计4种不同的LID设施组合,并基于熵权法与TOPSIS模型进行综合评价,从雨水调控、水质改善及经济成本3个维度分析其效益。结果表明,4种组合均能减小地表径流量、降低总溢流量及削减污染物排放,其中以透水铺装为主、雨水花园与下凹式绿地交替使用的组合效果最佳。

关键词: 低影响开发(LID)设施; 暴雨洪水管理模型(SWMM); 熵权法; TOPSIS模型; 海绵校园

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)09-0123-06

Evaluating Benefits of LID Facility Combinations Based on Entropy Weight-TOPSIS Model

ZHENG Jingyi, ZHANG Wanquan, CHEN Rongrong, LIU Shuaizhe, SONG Yaxin,
XU Junge

(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Taking a university in Fuzhou as the research object, combined with the storm water management model (SWMM), four different low impact development (LID) facility combinations were designed using four types of LID facilities: permeable pavement, grass swales, rain gardens, and recessed green spaces. A comprehensive evaluation was conducted based on the entropy weight method and the TOPSIS model, analyzing their benefits from three dimensions: rainwater regulation, water quality improvement, and economic cost. The results showed that all four combinations could reduce surface runoff, lower total overflow, and reduce pollutant discharge. Among them, the combination that primarily uses permeable pavement, with rain gardens and recessed green spaces used alternately, achieves the best effect.

Keywords: low impact development (LID) facility; storm water management model (SWMM); entropy weight method; TOPSIS model; sponge campus

随着城市化进程的加快,土地资源显著减少,且地面硬化率居高不下。若遇暴雨,“城市看海”现

象屡见不鲜。为应对城市内涝和水污染问题,我国提出了以低影响开发(LID)为核心的“海绵城市”理

基金项目:福建省高校科研重点项目(S202310386087)

通信作者:许俊鸽 E-mail: xujunge@163.com

念,通过分散式绿色设施实现“渗、滞、蓄、净、用、排”,尽可能保持原始水文特征。

我国日益增长的教育需求迫使高校不断扩招,进而导致高校基础设施不足,故教学楼、宿舍等建筑不断建设,使得不透水面积持续增加,在强降雨下地表径流剧增,排水不畅,易引发内涝,从而威胁交通及师生人身安全。目前,高校规划多关注景观设计,忽略雨水管理整体布局,导致绿色设施配置不合理。因此,亟须将“海绵城市”理念融入校园建设中。

现阶段,国内对海绵校园的建设如火如荼。国小伟等^[1]采用InfoWorks模型与在线监测相结合的评估方法发现,校园经LID措施改造,年径流总量和污染物控制率均显著提升;吴洁等^[2]以湖北某学校为研究对象,建立暴雨洪水管理模型(SWMM),并利用层次分析法评价LID设施;曹万春等^[3]分区改造昆山市某校园,并采用SWMM模型校核方案的合理性。既有研究从不同角度提出“海绵校园”建设思路,但仍存在一些不足,例如评价模型主观性强、计算较复杂、缺乏对指标关系的综合考虑等。而熵权法可以客观量化指标,TOPSIS模型则可以从横、纵向对比数据且计算简单快速。鉴于此,本研究以福州某高校片区为例,设计不同的LID设施组合,基于熵权-TOPSIS模型分析其在经济和环境效益上的表现,筛选出最佳组合,以期为南方海绵校园建设与改造提供参考。

1 LID设施组合方案设计

1.1 研究区域概况

研究区域位于福州市闽侯县,属亚热带季风气候,年均气温约为19.5℃,年降雨量为900~2100 mm^[4],总面积为33586.3 m²,其中不透水面积为22431.4 m²。下垫面主要包括建筑屋面、道路及绿地三类。土壤表层为砂质壤土,孔隙率较高,适合布设渗透型LID设施;中层为粉质黏土,渗透系数介于 $1.78 \times 10^{-5} \sim 1.80 \times 10^{-3}$ mm/s之间,需结合蓄水池或排水层设计;深层为风化花岗岩残积土,渗透性较强。

1.2 SWMM模型构建

研究区域面积较小且管网布局相对简单,故人工划分子汇水区,分为136个子汇水区,生成1个雨量站、91根管段、93个节点和2个排放口的SWMM

模型,具体见图1。

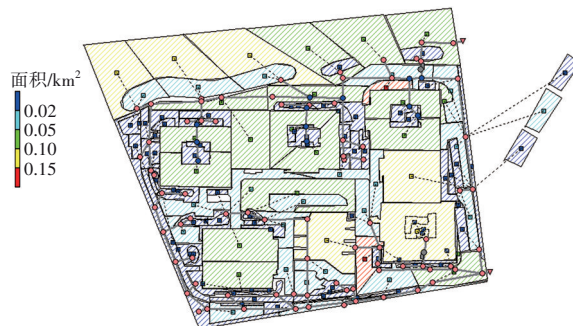


图1 研究区域SWMM模型概化

Fig.1 SWMM model generalization for study area

1.3 设计暴雨

根据《福建省城市及部分县城暴雨强度公式》(DBJ/T 13—52—2021),暴雨强度计算公式如下:

$$q = \frac{5019.517(1 + 0.81 \lg P)}{(t + 21.9)^{0.882}} \quad (1)$$

式中: q 为降雨强度,L/(s·hm²); P 为暴雨重现期,年; t 为设计降雨历时,min。

由于极端天气频发,传统低重现期设计不足以应对突发性灾害,如“海葵”台风期间福州闽侯24 h累计降雨量超过300 mm,属于特大暴雨量级,研究区域因地形低洼而导致积水深度超过1400 mm。因此需要评估LID设施在极端天气条件下的表现。

采用芝加哥雨型设计暴雨,设定6种重现期情景(P 为3、5、10、20、50和100年),雨峰系数 r 取0.4,降雨历时 t 取120 min。

1.4 模型参数选取

模型参数依据实测资料和相关文献^[5-6]确定。子汇水区面积、特征宽度、坡度等数据来源于现场调查和设计图纸;其他参数结合汇水分区特征设置。选择Horton方程模拟地表径流生成过程;透水区与不透水区的地表曼宁系数分别取0.300和0.012,地表洼蓄量分别取3.0、1.5 mm;初期排干时间取7 d。

参照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002),选取TSS、TN、TP、COD四种非点源污染物作为水质模拟的主要指标,较全面反映LID设施的水质调控能力。污染物累积与冲刷过程采用指数函数进行模拟。

1.5 LID设施及组合设置

常见的LID设施有绿色屋顶、生物滞留池、下凹式绿地、透水铺装、雨水花园、植草沟等。鉴于研究

区域的建筑屋面承重能力与成本考量,决定不采用绿色屋顶;但研究区域有大片相连的绿地,适合改造为雨水花园或下凹式绿地;另外,由于研究区域的不透水面积占比较高,可考虑优先布设透水铺装。因此,初步选用透水铺装、植草沟、雨水花园和下凹式绿地,探究不同LID设施之间的协同作用。为实现雨水的循环利用,减少水资源的浪费,在每种组合中增设蓄水池,以收集溢流雨水作为非常规水源。

组合1:采用透水铺装(沥青透水砖+陶瓷透水砖)、植草沟、下凹式绿地3种LID设施,面积分别设为1.05(0.83+0.22)、0.85、0.11 hm²。在人行道、广场和停车场等负重小的区域布设透水铺装,并配置植草沟过滤杂质,以提高透水铺装的使用寿命。在地势低洼处设置下凹式绿地,用于提升径流调控和雨水存蓄能力。

组合2:以雨水花园替代下凹式绿地,其余设施的布置方式和面积同组合1。

组合3:相较组合1和2,去掉了植草沟,同时设置雨水花园与下凹式绿地,并优化两者的配置比例(面积分别为0.24、0.65 hm²),进一步提升雨水控制与景观功能的协同效益。

组合4:为避免对原有路面及广场的破坏,该组合未设置透水铺装,仅设置雨水花园、下凹式绿地和植草沟,面积分别为0.24、0.65、0.11 hm²。

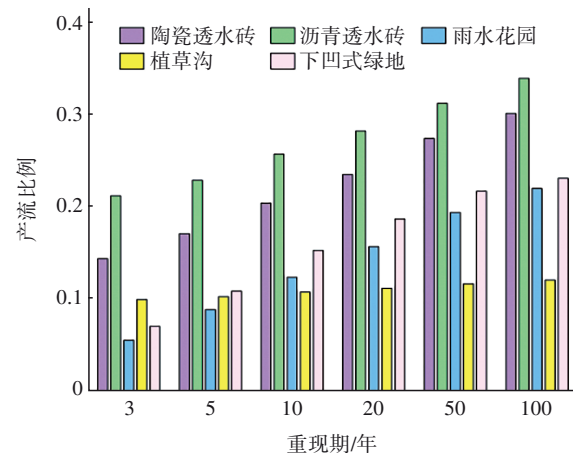
2 SWMM模拟结果

基于SWMM模型,从地表径流变化和污染物削减效果两个方面,探讨不同LID设施组合在不同重现期下对水文和水质的影响。

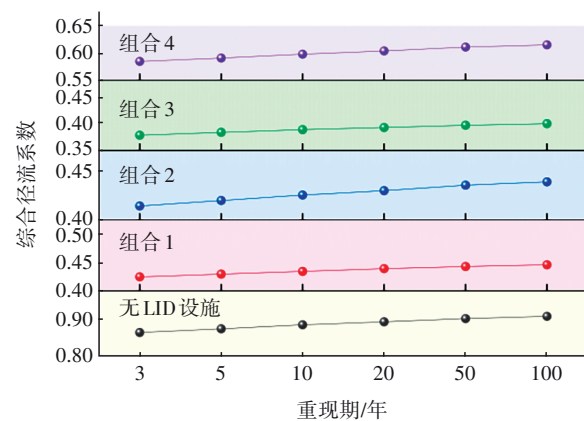
2.1 地表径流变化

不同重现期下各设施产流比例和各组合综合径流系数见图2。可知,各类LID设施的产流比例均随重现期的增加而呈上升趋势,说明在降雨强度增大的情况下各设施的径流控制能力被削弱。以此为基础,采用各设施产流比例替代各下垫面种类的径流系数,得到各重现期下的模拟综合径流系数,并计算相关系数 R^2 ,发现4种LID设施组合的 R^2 值均高于0.9,表明模型具有合理性。从图2(b)可以看出,在其余设施相同的条件下,以雨水花园替代下凹式绿地后,各重现期下的综合径流系数均下降,说明雨水花园的综合控流效果略优于下凹式绿

地。相比之下,组合4的综合径流系数最高,表明不配置透水铺装而仅通过植草沟、雨水花园和下凹式绿地进行调控,难以满足强降雨下的排水需求。



a. 各设施产流比例



b. 各组合综合径流系数

图2 不同重现期下各LID设施的产流比例以及各组合的综合径流系数

Fig.2 Runoff ratio of each LID facility and comprehensive runoff coefficients of each combination under different return periods

在不同重现期条件下,4种LID设施组合对地表径流量和总溢流量均表现出显著的削减效果(见图3),效果排序为组合3>组合2>组合1>组合4。其原因是下凹式绿地的汇水面积大,增加了雨水的滞留时间;雨水花园通过多层次结构和植物根系作用可有效调节流量和流速。而植草沟主要是线状结构,雨水停留时间较短,滞留能力有限。随着重现期的增大,LID设施的调蓄能力逐渐降低。当 $P=3$ 年时,组合3相较于无LID情景下径流量减少了56.3%,总溢流量削减了77.0%。在 $P=100$ 年的极端情景下,组合3对地表径流量和总溢流量的削减率有所

下降,但仍最优,表明了其在应对高强度降雨方面的稳定性和适应性。

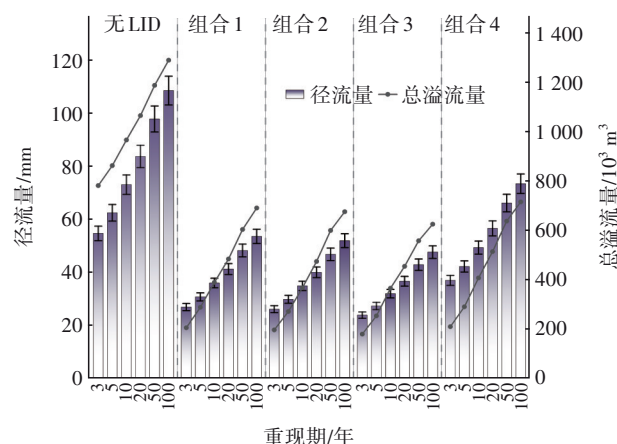


图3 不同LID设施组合在各重现期下的水文特征

Fig.3 Hydrologic characteristics of different LID combinations under each return period

2.2 径流污染物削减效果

不同重现期下各组合对径流污染物的削减效果见图4。

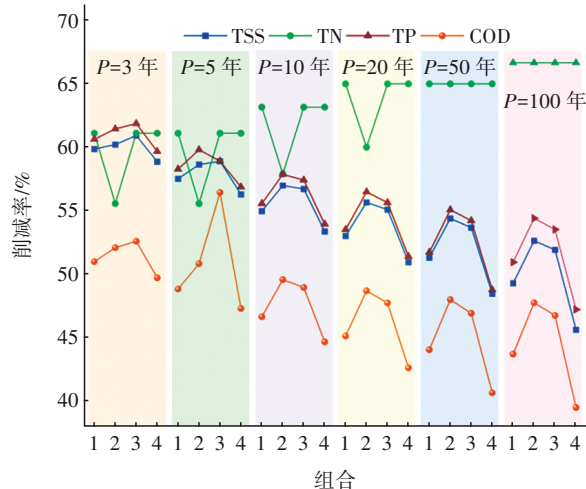


图4 不同重现期下各组合对径流污染物的削减效果

Fig.4 Reduction effect of runoff pollutants in different combinations under various return periods

从图4可以看出,各LID设施组合因受到污染物类型和降雨重现期的双重影响,表现出不同的径流污染物削减能力。对于TSS、TP和COD削减率而言,总体上均呈现随重现期增加而下降的趋势。这反映出在特大暴雨下,由于流入负荷增大、冲刷效应加剧及调蓄空间有限,LID设施对悬浮颗粒及相关污染物的控制能力有所减弱。而TN削减率的变化特征相反,其随重现期增加而小幅度波动上升,

说明TN的迁移转化机制与下渗过滤、介质吸附及植物-微生物作用等过程密切相关。与其他组合相比,组合2对TN的去除率更具区分度。但在50年和100年重现期条件下,各组合的TN削减率则逐渐趋于一致。总体而言,各组合在极端降雨条件下仍保持较高的污染物削减水平,表明LID系统具有较好的污染控制韧性。

3 方案综合评价

为客观准确地比选出最佳LID设施设置方案,采用熵权-TOPSIS模型,从雨洪调控、水质改善和经济成本三个方面进行定量综合评价,具体指标体系见图5。

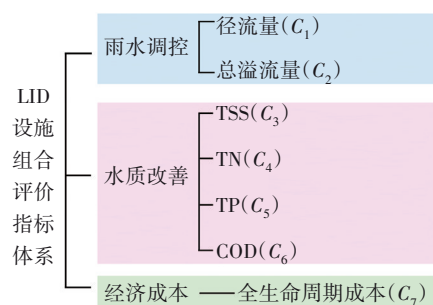


图5 LID设施组合评价指标体系

Fig.5 Evaluation indicator system for LID facility combinations

3.1 熵权法

熵权法根据指标变异性的确定权重,某个指标的信息熵越小,表明指标值在综合评价中所起的作用越大,其权重也越大。首先通过数据标准化消除量纲和数量级的差异,再计算各指标下样本值的比重分布,据此求解熵值。

3.2 改进TOPSIS法

传统TOPSIS法中权重的确定主要靠专家意见定夺,人为因素评价结果可能偏离实际值^[7]。为了精确反映各评价方案间的差距,本研究结合熵权法,计算各方案到正负理想解的欧氏距离,通过相对贴近度(S_j)量化方案优劣。改进TOPSIS法所得的贴近度取值介于0~1之间,数值越接近1,表示评价指标越接近正向理想最优解;反之则接近负向理想最优解。

3.3 评价结果分析

LID设施全生命周期成本包括建设成本和运行维护成本,通常计算30年生命周期内的成本,公式如下^[8]:

$$P_v = \frac{30}{n} \left[E + O_m \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] \quad (2)$$

$$L_{cc} = \sum_{k=1}^4 (P_v \cdot A_k) \quad (3)$$

式中: P_v 为单位面积LID设施30年生命周期的现值, 10^4 元/ m^2 ; E 为单位面积LID设施的建设成本, 10^4 元/ m^2 ; O_m 为单位面积LID设施的运行维护成本, 10^4 元/ m^2 ; i 为折现率, 取5%; n 为服务年限, 年; L_{cc} 为LID设施组合30年生命周期的成本, 10^4 元; A_k 为第 k 种LID设施的布置面积, m^2 ; k 为组合选用的不同LID设施。

单位面积LID设施成本^[9]和 L_{cc} 计算结果见图6。

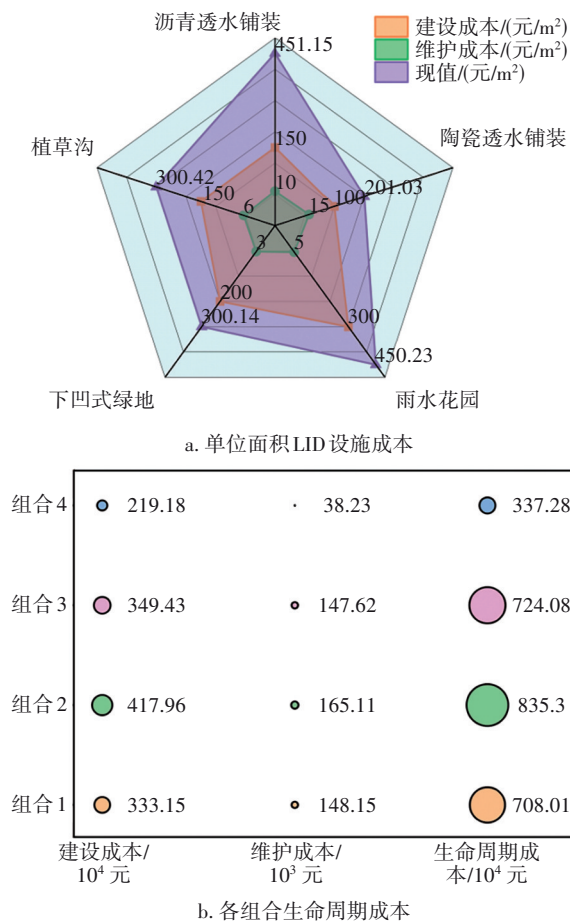


图6 单位面积LID设施成本和各组合生命周期成本

Fig.6 LID facility cost per unit area and life cycle costs for each combination

分别取 $P=3$ 年和 $P=20$ 年时模拟所得数据, 利用熵权法计算权重后, 再采用改进TOPSIS模型对4种LID设施组合的综合效益进行评价, 结果见图7。选

取的指标均为负向指标, 经正向化后, 相对贴近度 S_j 越大, 方案的综合效益越好。由图7可知, 在不同重现期条件下, 组合3的得分均最高, 综合效益最优。组合2的得分位列第二, 但其生命周期成本最高, 经济效益较差。相比之下, 组合4虽能够避免破坏原有铺装, 具有一定工程实施优势, 但其综合得分与组合1接近, 且均低于组合2和组合3。

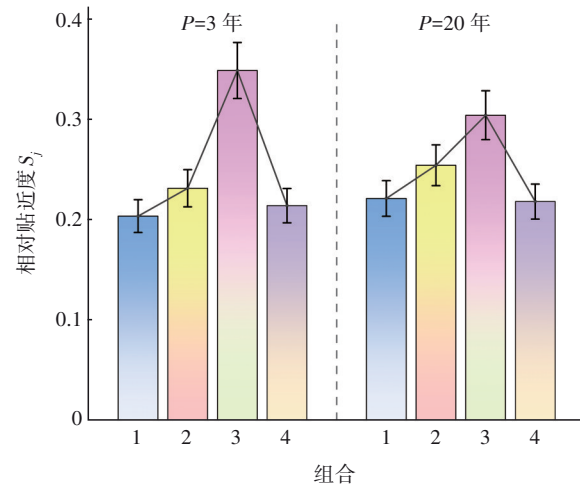


Fig.7 Relative proximity of different scenarios in entropy weight method and TOPSIS model

4 结论

① LID设施在不同降雨强度下的雨洪调控能力存在阈值效应。模拟结果显示, 透水铺装、雨水花园和下凹式绿地相结合的方案(组合3)在极端降雨下对径流污染物的削减率依旧保持在40%以上, 但对径流量的控制能力随降雨强度的增加呈现非线性衰减趋势。这揭示了当降雨强度超过设施渗蓄能力的临界值时, 系统效能将迅速下降。通过引入蓄水池增强系统的韧性, 可为南方高校的雨水管理提供参考。

② 熵权-TOPSIS模型综合评价结果表明, 同等预算下不同LID设施组合的成本效益差异明显, 如组合3通过减少使用高成本设施, 实现了效益与投资的平衡; 组合4提供了在不破坏现有铺装情况下的可行方案, 更适用于轻度雨水管理。因此, 各高校应因地制宜地选择LID设施组合。

③ 本研究聚焦于雨水调控和水质改善, 忽略了LID设施对生态系统服务的潜在贡献, 未来可纳入生态效益指标。另外, 尽管熵权法减少了主观偏差, 但对指标变异性的敏感性可能导致权重分配向

极端值。后续可引入动态权重模型或机器学习技术,优化设施布局与配置策略。

参考文献:

- [1] 国小伟,张海行,赵晨辰,等. 基于模型及在线监测的校园海绵改造项目效果评估[J]. 中国给水排水, 2020, 36(16): 1-5, 11.
GUO X W, ZHANG H X, ZHAO C C, et al. Effect assessment of campus sponge construction project based on model and online monitoring [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(16): 1-5, 11 (in Chinese).
- [2] 吴洁,汪恂,李燕萍. 基于LID的海绵校园设计模拟研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(8): 128-132.
WU J, WANG X, LI Y P. Simulation research of sponge campus design based on LID [J]. Water Resources and Power, 2021, 39 (8): 128-132 (in Chinese).
- [3] 曹万春,张彬,黄克虎. 基于SWMM模型的校园海绵化改造方案研究[J]. 中国给水排水, 2018, 34(15): 122-126.
CAO W C, ZHANG B, HUANG K H. Campus sponge transformation scheme based on SWMM model [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34 (15): 122-126 (in Chinese).
- [4] 林中立,徐涵秋. 基于局地气候分区体系的福州城市热环境研究[J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(1): 189-200.
LIN Z L, XU H Q. A study of urban thermal environmental of Fuzhou based on "local climate zones" [J]. Journal of Geo-information Science, 2022, 24(1): 189-200 (in Chinese).
- [5] 肖婉婷,宋聚生,马翔,等. 基于SWMM的校园海绵城市布局优化研究:以深圳市某中学校园为例[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(9): 48-60.
XIAO W T, SONG J S, MA X, et al. Optimization of LID facilities planning strategy based on PSO algorithm and SWMM model: a case study of middle school campus in Shenzhen [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54 (9): 48-60 (in Chinese).
- [6] 周昕,高玉琴,吴迪. 不同LID设施组合对区域雨洪控制效果的影响模拟[J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 26-31, 73.
ZHOU X, GAO Y Q, WU D. Simulation on influence of regional rain-flood control effect under different combinations of LID measures [J]. Water Resource Protection, 2021, 37(3): 26-31, 73 (in Chinese).
- [7] 尹萌萌,刘梦婷,朱伟,等. 城市内涝灾害韧性评估及影响因子分析:以福州市为例[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(10): 61-66.
YIN M M, LIU M T, ZHU W, et al. Resilience assessment and influencing factors analysis of urban waterlogging disaster: a case study of Fuzhou City [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2024, 20 (10): 61-66 (in Chinese).
- [8] 李军,刘学峰,王德淇,等. 基于InfoWorks ICM模型的城市小区LID组合方案成本效益研究[J]. 水资源与水工程学报, 2024, 35(4): 66-75.
LI J, LIU X F, WANG D Q, et al. Cost-effectiveness of LID combination schemes for city area based on InfoWorks ICM model [J]. Journal of Water Resource & Water Engineering, 2024, 35(4): 66-75 (in Chinese).
- [9] 高玉琴,陈佳慧,王冬冬,等. 海绵城市低影响开发措施综合效益评价体系及应用[J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 13-19.
GAO Y Q, CHEN J H, WANG D D, et al. Comprehensive benefits evaluation system and application of low impact development measures in sponge city [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (3): 13-19 (in Chinese).

作者简介:郑静宜(2003—),女,福建泉州人,本科,主要研究方向为海绵城市。

E-mail:jingyizheng24@163.com

收稿日期:2025-01-06

修回日期:2025-02-20

(编辑:刘贵春)