

海绵城市雨水调蓄设施优化设计与运行调度研究进展

杨 柳¹, 李小英¹, 王 莹¹, 王 兵¹, 朱记伟¹, 荆小龙², 宁 倩²

(1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;
2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要: 聚焦雨水调蓄设施在海绵城市建设中的应用, 从多个角度系统梳理了雨水调蓄设施的分类。基于实践调查分析, 提出了雨水调蓄设施的不同应用场景及流程。重点针对雨水调蓄设施的优化配置与运行调度, 识别出设计标准确定、设施配置优化、调蓄容积计算、运行调度管理 4 个关键的应用环节, 并归纳总结了设计降水量计算、设施配置优化、调蓄容积计算方法及设施运行方式与调度管理现状。未来研究应关注降雨的空间变化特征、差异以及场次降雨对雨水径流控制目标的影响, 研发能够集成雨洪模型与优化算法耦合、嵌套应用的技术平台, 支持设施配置的全过程模拟、在线评价与优化应用, 探索雨水调蓄设施之间梯级滞渗、多级调蓄、联动运行的水量调控增效机制。

关键词: 雨水调蓄设施; 设计降水量; 优化配置; 调蓄容积; 运行调度; 海绵城市

中图分类号: P339 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2025)01-0140-10

Research progress on optimization design and operation dispatch of rainwater storage facilities in sponge cities//
YANG Liu¹, LI Xiaoying¹, WANG Ying¹, WANG Bing¹, ZHU Jiwei¹, JING Xiaolong², NING Qian² (1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. Northwest Engineering Corporation Limited, Power Construction Corporation of China, Xi'an 710065, China)

Abstract: Focusing on the application of rainwater storage facilities in sponge city construction, this paper systematically sorts out the classification of rainwater storage facilities from multiple perspectives. Based on practical investigation and analysis, different application scenarios and processes of rainwater storage facilities have been proposed. The focus is on optimizing the configuration and operation scheduling of rainwater storage facilities, identifying four key application links: determining design standards, optimizing facility configuration, calculating storage capacity, and managing operation scheduling. The methods for calculating design precipitation, optimizing facility configuration, calculating storage capacity, and the current status of facility operation and scheduling management are summarized. Future research should focus on the spatial variation characteristics and differences of rainfall, as well as the impact of rainfall events on the control objectives of rainwater runoff. Develop a technology platform that integrates rainwater and flood models with optimization algorithms, and enables nested applications. This platform supports the full process simulation, online evaluation, and optimization of facility configuration, and explores the water regulation and efficiency improvement mechanism of cascade seepage, multi-level regulation, and linkage operation between rainwater storage facilities.

Key words: rainwater storage facilities; design precipitation; optimization configuration; storage volume; operation dispatch; sponge city

在快速城镇化进程与极端天气影响下, 城市雨洪管理面临极大的压力。海绵城市为适应新型城镇化发展提出了新思路, 是当前我国着力推行的用于破解城市防洪排涝桎梏的雨洪管理思维革命。雨水调蓄设施作为海绵城市建设的重要内容, 通过集蓄、调节雨水在缓解排涝压力、防治初期雨水污染及实现雨水循环利用等方面发挥着综合性功能。

20 世纪 50、60 年代, 国外一些发达国家就开始了雨水调蓄设施的研究与应用。美国比较典型的是采用雨水花园、下凹式绿地、渗渠、湿地等分散式、场地尺度的调节措施结合用地性质优化布局, 从源头控制径流量及污染负荷, 发挥延时滞留和截流调蓄的良好作用^[1-2]。日本因受洪涝灾害及土地资源限制, 广泛建设多功能调蓄设施, 削减洪峰流量以减少

基金项目: 国家自然科学基金项目(52209034); 陕西省教育厅科研计划项目(20JY052); 西安理工大学博士启动金项目(107-451120003)
作者简介: 杨柳(1987—), 女, 讲师, 博士, 主要从事城市雨洪管理及海绵城市规划设计研究。E-mail: yangliu0414@163.com
通信作者: 朱记伟(1982—), 男, 教授, 博士, 主要从事智慧水利与水资源管理研究。E-mail: xautzhu@163.com

洪涝灾害,利用雨水补给地下水及河川基流,并强化雨水资源化教育普及、经济政策支持以推行多种雨水调蓄设施的广泛应用^[3-4]。德国极力主张综合利用洼地、渗渠、雨水调蓄池、公共雨水管等设施收集雨水用于城市杂用、湿地及生态水体补水等,并将调蓄池与污水处理设施进行一体化设计,控制排入水体的负荷量最小^[5-6]。

20 世纪 90 年代,为应对雨水初期污染及溢流污染,我国开始了雨水调蓄池的应用,上海、北京、深圳等地利用雨水调蓄池进行初期雨水削减、城市内涝防治^[7],太原伊通河雨水调蓄池在雨水资源循环利用方面实现了进步^[8]。随之,雨水调蓄设施在城市雨洪管理中被广泛青睐,尤其在海绵城市建设热潮下,雨水调蓄设施的应用更加广泛,功能更加突出。同时,雨水调蓄设施的优化设计和运行调度管理作为雨洪调控增效的重要手段成为研究的热点和难点。设施优化方面的研究主要集中在设施类型的组合、比例的配置以及规模的设计等。通过优化算法与雨洪模型的结合使用可进行特定目标及多目标下的方案寻优,但对于设施之间的关联域及关联关系缺少足够的关注;设施运行调度方面的研究主要集中在设施调蓄容积设计、运行效果模拟以及运行规则等方面,但针对雨水调蓄设施的联动运行、实时调度及集蓄雨水资源化利用等方面缺少深入研究。

基于此,本文着眼于海绵城市建设过程中的雨洪调蓄及利用问题,对雨水调蓄设施进行多角度地分类与描述,明确其不同的应用场景及流程,从其应

用过程的关键环节,即设计标准确定、设施配置优化、调蓄容积计算、运行效果评估、运行调度优化 5 个方面梳理总结雨水调蓄设施配置与运行的研究和实践现状,针对存在的不足与难题展望未来研究趋势,以期为海绵城市建设中雨水调蓄设施的应用提供支持。

1 雨水调蓄设施在海绵城市建设中的应用

1.1 雨水调蓄设施的分类

雨水调蓄是雨水调节和储蓄的统称,用以实现雨水调节与储蓄的设施都属于雨水调蓄设施的广义范畴。从不同的角度出发,雨水调蓄设施可进行不同的分类^[9-12],能够为设施的选用、设计与优化配置提供多方视角,具体如表 1 所示。

1.2 雨水调蓄设施应用场景及流程

雨水调蓄设施的不同分类为其应用提供了多样化的选择路径。新规划城区开展海绵城市建设,在充分调查区域地形地貌、水文地质、用地类型及下垫面条件等要素的基础上,以雨洪调控目标为约束,进行雨水调蓄设施的布局;老城区以区域性海绵化改造为主,需要充分解析区域生态肌理,识别水敏感因子,进行雨水调蓄设施适配分析后开展斑块化的布局与改造。通过大量调研海绵城市建设从试点到推广过程的实践案例,识别出雨水调蓄设施布局的应用流程,将与雨洪系统相关的用地类型作为进行雨水调蓄设施适配与布局的关联域,通过设施适宜性分析、类型筛选、组合应用、选址决策等手段,开展雨

表 1 雨水调蓄设施分类

Table 1 Classification of rainwater storage facilities

分类角度	设施类型	描述
按功能、原理分	储存设施	主要用于雨水的收集利用
	调节设施	主要发挥削减峰值流量、延缓峰现时间的作用
	滞蓄设施	主要用以削减径流排放量、控制水质、收集或补充地下水等
按规模分	微型调蓄设施	在进入大型调蓄设施前的独立单元或者分散式调蓄设施
	小型调蓄设施	包括下沉式绿地、雨水花园等小尺度的具有一定调蓄容积的源头设施
	中型调蓄设施	包括湿塘、蓄水模块、雨水湿地等中尺度的调蓄设施
	大型调蓄设施	具有排水功能的道路、沟渠、大型天然或人工湖泊河湖等调蓄设施
按用途分	调控排放型	从径流量增大到一定值时开始蓄水以调节径流峰值,在流量下降时缓慢排放雨水以调节流量过程及蓄水池中水量,也可以用于储存利用雨水
	收集回用型	从降雨产流后开始蓄水,蓄满后开始外排,集蓄雨水加以回用
按建设形式分	自然型调蓄设施	结合自然地形地貌形成自然的坑塘、湿地等雨水调蓄体
	硬质型调蓄设施	通过混凝土等材料建设的封闭或开放式的地上或地下水池
从规划布局角度分	分散式布局	结合各地块性质,进行渗透、滞蓄设施布局
	集中式布局	从区域或流域视角出发,集中布局雨水调蓄设施
从竖向设计角度分	地上调蓄设施	利用地上空间与地块功能结合或单独设置的调蓄设施
	地下调蓄设施	利用地下、地下空间结合开发或地下单独设置的调蓄设施
	河道调蓄设施	利用河道蓝线及陆域控制线内用地或地下空间,如防汛通道、滨水步道或河道内部空间等设置的调蓄设施

水径流源头削减、过程管控、末端调蓄等关键环节的设施配置与运行管控。聚焦年径流总量控制、径流污染控制以及内涝防治等核心目标,以径流控制率、峰值削减率、污染削减率及雨水利用率等作为雨洪调控效能评估的技术指标,结合投入及运维成本等经济指标,进行雨水调蓄设施的规划布局。其应用流程如图 1 所示。

2 雨水调蓄设施优化设计研究进展

2.1 设计标准确定

《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统建构(试行)》(2014 年)(以下简称《指南》)明确了海绵城市建设规划的控制目标,并提出径流污染控制及雨水资源化利用目标大多可通过径流总量控制实现,一般采用年径流总量控制率作为控制目标,则其对应的降水量即为设计降水量,是海绵城市规划建设的设计标准,也是雨水调蓄设施布置的设计依据。随着雨水调蓄设施类型多样化、功能丰富化及应用广泛化,雨水调蓄设施规划设计的规范化、标准化对于提升调蓄效能至关重要。美国以控制年均 90%~95%场次降雨所产生径流为目标,以降雨场次控制率所对应的设计降水量为设计标准,采用 Percentile 函数统计法对至少 30 a 的 24 h 降水量数据进行分析,获取给定的降雨场次控制率所对应的设计降水量^[13-14]。WQ-COSM(water quality-capture optimization and statistics model)^[15]根据设施的排空时间划分场次降雨间隔时间,将连续降雨数据按照所需降雨间隔(6、12、24 h)进行场次划分,将降水量转换为径流量,以径流污染控制为核心目标,基于对连续性降雨过程的模拟演算,计算径流总量控制率与径流场次控制率,为设计提供依据^[16]。目前,我国海绵城市建设中设计降水量的确定主要依据《指

南》及《海绵城市建设评价标准》(2018 年)给出的方法,即通过统计学方法,对多年日降雨资料(不少于 30 a)扣除小于或等于 2 mm 的降水量数据后,按照由小到大的数值排序,统计小于某一降水量的降雨总量在总降水量中的占比,绘制该比例与降水量的对应关系,该比例(年径流总量控制率)对应的降水量(日值)即为设计降水量^[17]。同时,《指南》明确了我国部分城市年径流总量控制率对应的设计降水量,给出了年径流总量控制率最佳区间为 80%~85%。但目前的计算方法仍存在一定的局限性,如未考虑降雨间隔与设施排空时间关系,与真实的径流控制场景吻合度较低^[18-19]。因此,应进一步探索和优化设计降水量的确定,值得关注以下方面:①针对区域海绵城市建设应对的典型水问题,应以雨水管理的主要目标为导向,选择年径流总量控制率或年降雨场次控制率作为控制目标,开展以年降雨场次控制率为目标的海绵城市效果模拟研究及试点建设,探寻更贴近实际径流控制场景的设计标准确定方法。②关注区域场次降雨特征(总量及时程分配)、降雨序列特征对雨水径流控制目标的影响,探索降雨资料序列的选择方法,进一步优化场次降雨序列年际变化特征的识别与降雨场次的划分方法。③结合近年气候变化特征,考虑极端降雨事件对雨水径流控制目标的影响,尤其是对年降雨场次控制率确定的影响,同时考虑工程投资的经济性,综合确定海绵城市建设的设计标准。④考虑较大区域降雨的空间变化特征及差异,以项目所在地的降水量监测数据开展统计分析,确定出适宜当地的设计降水量标准,因地制宜地指导海绵城市建设工作。

2.2 设施配置优化

雨水调蓄设施优化配置的关键问题在于:不同条件适配哪类设施?设施如何组合、组织?同时应

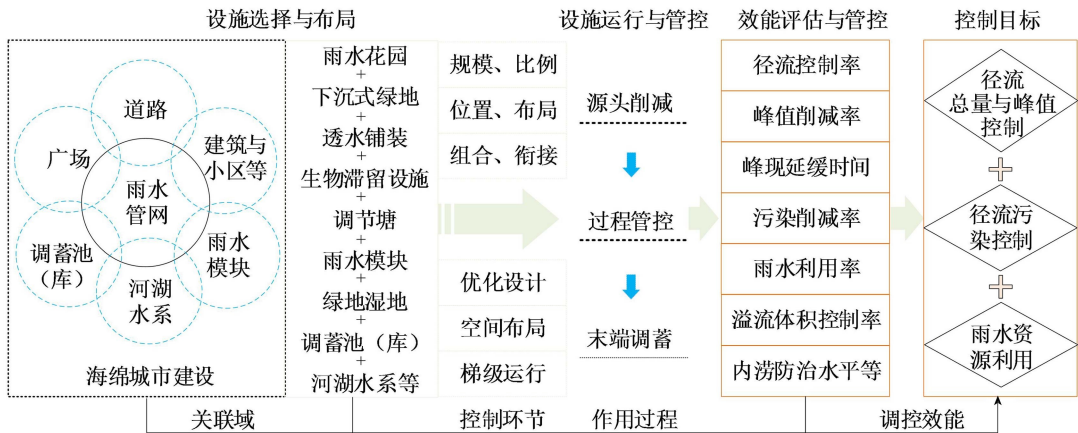


图 1 海绵城市建设雨水调蓄设施的应用流程

Fig. 1 Technical process of rain water storage facilities in sponge city construction

考虑设施建设、运维成本等经济效益,以实现特定目标最优或综合效益最优。优化主要体现在 3 个方面:功能上的组合优化、规模上的配置优化以及效益上的综合优化。此外,国外已有实践更加注重对已有绿地系统、管网系统及公共空间等的自然利用,以及结合生态化改造项目进行雨水调蓄,以发挥更大的综合效益。起初,海绵城市规划设计中以雨水调蓄设施类型、性能等指标数据库为基础,在新区建设及老城改造过程中,通过对现场绿地、道路、建筑及公共空间等用地的调查、勘探,初定具备海绵化改造条件的地块及适宜建设的设施类型,常采用模糊综合评价法^[20]、层次分析法^[21]、主成分分析法^[22]、灰色关联分析法^[23]、人工神经网络法^[24]、数据包络分析法^[25]等进行综合评估,寻找满足设计标准的布局方案。随着海绵城市实证经验及建设需求的不断反馈,相关研究与实践逐渐从设施选址决策、类型筛选、组合应用、比例配置、空间布局向多目标优化决策发展,从设施适宜性分析及评价比选开始探索径流总量控制率与径流场次控制率的关系、径流与污染负荷之间的关系、径流污染削减率评估的代表性污染物选择、雨水利用率的量化方法以及投入降低与功效提升的成本-效益寻优等^[26-28]。如此一来,在多目标优化问题求解时,以计算机辅助决策,采用优化算法结合雨洪模型模拟求解成为研究热点。常用的雨洪模型有:SWMM、MIKE URBAN、InfoWorks ICM、STORM、SUSTAIN,耦合遗传算法、粒子群算法、蚁群算法或基于边际成本理论等开展优化研究。Saniei 等^[29]引入连接函数,将水文水利模型与遗传算法耦合使用,进行多情景方案的寻优模拟,识别出最佳的低影响开发设施布局方案。Eckart 等^[30]借助 SWMM,结合 Borg 多目标进化算法,研发了评估低影响开发设施布局效益的耦合模型。李莹等^[31]采用多元回归法建立了低影响开发布设比例与径流总量及建设成本之间的代理函数,以最低成本削减最多洪量为目标,基于 SWMM 与 NSGA-II 算法进行求解,验证了二者耦合应用的有效性,获得了低影响开发设施的最佳布设比例。陈前虎等^[32]以成本、水量和水质为控制目标建立雨水调控多目标优化模型,运用粒子群算法求解,结合 SWMM 进行低影响开发设施的优化布局,识别了优化模型在规划效率、经济性、水质水量削减率和设施布局优化等方面的显著优势。

尽管雨水调蓄设施优化配置内容愈加丰富,目标愈加完善,模型算法逐渐成熟,我国在雨水调蓄设施优化配置方面的研究仍存在一定的局限性:①在理论层面,已有研究主要关注低影响开发设施的配

置种类、比例与规模,对于设施耦合作用及联动运行的增效作用及调控机制考虑不足;②在方法层面,尽管 SWMM 被广泛用于模拟设施配置的水文效益,但该模型自身没有多目标优化模块,需要与优化算法结合使用,进行手动搭接应用,缺少能将二者直接耦合、自动嵌套的集成平台;③在实践层面,已有研究大多从市政及环境科学的视角出发,主要关注设施的组合应用及效能评估,鲜有从城市规划的角度出发,考虑设施配置与周边建筑分布、道路规划、公共空间设计等的密切衔接。

针对上述研究与实践过程中的不足,未来可以从以下几个方面继续努力:①在功能的组合优化方面,应更加关注设施与设施之间的关联方式、梯级关系及其对雨水径流调控的作用机理,以及设施与管网、建筑、道路等关联域的有效联系,在此基础上开展设施的组合优化以期发挥雨水调控的增效作用;②在规模的配置优化方面,进行海绵城市雨洪管理模型的自主研发和已有模型模块功能的改进,不断提高模型的适用性和模拟精度,自主开发能够集成雨洪模型与优化算法耦合、嵌套应用的技术平台,支持设施配置的比例与规模计算、雨洪径流调控的全过程模拟、方案效果的在线评价与优化应用;③在效益的综合优化方面,增加成本-效益目标函数,同时关注雨水调蓄设施与建筑、道路、公共空间等的衔接,提升设施配置与空间布局的可落地性与雨洪调控效能的增效性,从而最大化地发挥雨水调蓄设施的综合效益。

2.3 调蓄容积的计算

雨水调蓄设施的调蓄容积通常在优化配置过程中得到确定。设施优化配置方案能够输出设施类型、布设比例、建设面积及调蓄容积等关键技术指标,对于以雨水调节功能为主的微小型设施的规模及调蓄空间目前主要通过利用雨洪模型与优化算法结合使用,在设施优化配置过程中寻找最优解。对于像蓄水模块、雨水调蓄池(库)等大中型雨水调蓄设施来说,承担着区域(流域)雨洪管理的关键任务,具有雨水径流拦蓄、削峰、错峰、污染削减及雨水集蓄、存储利用等重要功能,其规模的优化设计应开展有针对性的研究与讨论。常用的调蓄容积计算方法包括脱过系数法、单位面积法、水量平衡法等。随着海绵城市建设中雨水调蓄设施类型、数量的增加,调蓄功能多样化以及追求海绵城市建设成本-效益的多重目标,大量的决策变量与可能的情景组合,依靠有限数量的试验的常用方法在运算效率及多目标寻优方面体现出不足。

近年来,城市雨洪模型不断发展,如 SWMM、

Infoworks ICM、MIKE FLOOD 等水文水动力学模型被广泛应用于调蓄容量的模拟计算中,并逐渐与常用的计算方法及神经网络、遗传算法、粒子群算法等优化算法耦合使用,以提高计算效率及优化设计效果。付潇然等^[33]借助 MIKE FLOOD 模型结合调蓄池容量推理公式法,根据预估结果和模型试算法比选以脱过系数为控制因子制定的调蓄方案,以最大积水深不超过 40cm 和交通影响时间不超过 30 min 为判断指标最终确定各易涝区的最优调蓄容量。薛鹏腾等^[34]针对控制分流制系统径流污染的调蓄设施设计,引入反映径流与污染负荷之间函数关系的质量冲刷曲线,利用 SWMM 计算的同时辅以多属性决策模型,对调蓄设施进行优化设计。彭周洋等^[35]将 SWMM 与 NSGA-III 结合,以截流效率、建设成本、水泵自停次数作为优化目标,实现了合流管网末端截流调蓄设施规模的多目标优化。不难发现,多目标优化已被用作识别雨洪调蓄管理策略的有效方法;一方面是将雨洪管理模型模拟中的各种情景与径流流量之间的关系作为多目标决策的输入条件,执行多次迭代后选择优化场景;另一方面是将优化算法与雨洪管理模型耦合,将优化算法的计算结果

作为雨洪模型的输入模块,模拟输出雨水调蓄设施的优化布局方案。表 2 为雨水调蓄设施调蓄容积常用的计算方法^[36-42]。同时,在实践应用中常用的调蓄容积计算方法也表现出了一定的适用性及明显的局限性:①常用的计算方法往往只适用于单一调蓄功能设施的规模计算;②部分常用方法及模型模拟时对实测数据依赖性较高,尤其对降雨数据的系列长度、时程分配、历时特征等有一定要求;③在使用雨洪模型软件计算调蓄规模时,往往更关注模拟情景和前置输入条件的设置,对于调蓄设施之间的补偿关系及模型输出端排口流量接纳水体的承受能力考虑甚少,使得模拟计算流程不能形成闭环;④目前在使用雨洪模型与传统调蓄容积计算方法及优化算法联系使用时,往往需要分层分步实施,将计算结果作为模型的输入模块,运算的自动性与耦合性有待提升。

针对调蓄设施容积的计算与优化,未来应更加关注以下几个方面:①考虑雨水调蓄设施设计兼顾雨洪调蓄、城市景观、休闲娱乐及停车等多种功能,关注调蓄池(库)之间联动运行、梯级调蓄的补偿作用,在规划设计阶段回答好调蓄设施最优规模的问题

表 2 雨水调蓄设施调蓄容积常用的计算方法

Table 2 Commonly used methods for calculating storage capacity of storage facilities

方法	公式/模型/算法	调蓄目的/适用性	优缺点
脱过系数法	$V = \left[- \left(\frac{0.65}{n^{1.2}} + \frac{b}{t} \frac{0.5}{n + 0.2} + 1.1 \right) \lg(\alpha + 0.3) + \frac{0.215}{n^{0.15}} \right] Q_i t$	当用于削减峰值流量时,适用于缺乏上下游流量过程数据的地区或条件所限时	计算敏捷,可与模型试算法结合应用;但对当地设计暴雨推求计算的依赖程度较大,宜采用较长历时降雨,且应考虑雨型影响
单位面积法 (容积法)	$V = 10DF\psi\beta$	用于年径流总量控制或面源污染调控的情况	资料缺乏时可选用,计算简便;依赖于设计降水量,而降雨的随机性使得设计降水量的合理性有一定偏差
截流倍数法	GB50014—2021《室外排水设计标准》规定宜采用 2~5;实践中可结合当地实际采用经验值	用于污染控制的调蓄设施容量计算,多用于合流制排水系统	计算简便;假设降雨为均匀降雨事件,且对调蓄设施的运行时间、溢流历时、降雨间隔设置假设条件,计算结果往往偏小
水量平衡法	$V = \int_0^T [Q_i(t) - Q_o(t)] dt$	用于削减峰值流量的调蓄情形	求解时必须得到流量过程线或流量随时间变化的方程,但获得多年实测流量资料比较困难
关系曲线法	h - F - V 关系曲线	适用于滞涝区调蓄容积计算	查已有关系曲线成果,便于获取结果;但关系曲线成果形成依赖大量的实测数据及模拟计算分析,过程复杂
模型试算法	SWMM、Infoworks ICM、MIKE FLOOD 模型	用于径流总量控制、污染控制、峰值削减及多功能调蓄设施容积计算时	在模拟和方案比选方面具有较好的灵活性;但模型依赖于实测数据的参数赋值及校核
模型与优化 算法耦合	雨洪管理模型与优化算法耦合应用	用于多功能调蓄设施容积计算,并可进行雨水调蓄设施优化配置与设计 方案寻优	在模型试算的基础上,可进行方案寻优;但目前缺少能够实现模型与优化算法耦合计算的平台及技术支持

注: V 为调蓄容积; n 、 b 为暴雨强度公式参数; t 为设计暴雨历时; α 为脱过系数(上、下游进出口设计流量比); Q_i 为设计雨水流量; Q_o 为调蓄设施出口流量; D 为单位面积调蓄深度; ψ 为径流系数; F 为集水面积; β 为安全系数; T 为总降雨历时; h 为水深。

题;②在使用模型软件工具计算调蓄容积时,除了考虑长系列降雨特征、参数及情景等前置条件外,还应充分考虑研究区与下游关联域的联系以及下游受纳水体对排水水量的承载能力,使得模拟计算流程形成逻辑闭环;③注重长系列实测数据的采集以及常用调蓄容积计算方法、优化算法与模型软件的耦合使用,研发能够实现方法与模型自动嵌套、耦合计算的技术平台。

3 雨水调蓄设施运行调度研究进展

3.1 运行效能评估

目前,关于绿色屋顶、雨水花园、下沉式绿地等小微型设施的雨水调节作用已有丰富的研究成果。有研究表明绿色屋顶平均能够削减 60% 左右的径流量,对于雨水中 SS、COD、NH₃-N 等污染物的去除效果比较明显^[43]。雨水花园设施对水量的削减率为 11.2%~100%,年径流污染物浓度去除率为 11.93%~60.97%,径流污染物年负荷削减率在 70% 以上^[44-46]。生物滞留设施的平均洪峰削减率可达到 85% 以上,对于 NH₃-N 的去除率可达到 60%~80%^[47]。透水铺装路面径流洪峰削减率达到 42%^[48-49],对 NH₃-N 的去除效果可达 91.2%^[50]。关于调蓄池(库)在污染控制方面的效果研究主要集中在对合流制溢流污染控制及分流制雨水面源污染控制方面,多采用 GIS 数据系统与 Infoworks ICM、FLUENT、MIKE URBAN、SWMM 与 SUSTAIN 等模型软件结合^[51-53],构建调蓄池(库)服务范围的排水系统数学模型,以溢流次数削减率、溢流污染去除率、初期雨水控制率等作为评估调蓄设施运行效果的主要指标。已有研究表明,调蓄效益与调蓄池的规模呈正相关关系,针对具体的研究区确定调蓄设施工程效益最佳时的调蓄规模才具有实践指导意义。目前,关于调蓄池(库)建设运行后对雨水径流量控制效果的研究尚不多见,已有研究多是采用模型模拟的手段评估雨水调蓄设施的运行效果。陈前虎等^[54]通过 SWMM 模拟探究不同重现期和积水点之间的关系,以最佳积水节点控制数目约束探索调蓄池合理布局方案。杜佐道等^[55]模拟了雨水调蓄池与渠道不同连接形式工况下的洪峰流量削减效果,提出并联形式雨水调蓄池具有提高洪峰流量削减率的优越性。不难发现,业界已开始关注调蓄设施布设位置、与管网的连接形式、调度运行方式等对调蓄效果的影响,逐渐从重工程向重机理、精细化管控、优化运行等方向发展,但仍存在一定的不足,主要表现在:探寻雨水调蓄设施运行效果时,对于设施之间的联系关注不足,尤其是对大中型调蓄设施在流域

(区域)调蓄系统中的功能定位、梯级关系的分析较为欠缺,同时,缺少长系列运行数据和实践经验的支持。因此,亟须更丰富的实践成果反馈,支持雨水调蓄设施的建设与运行管理。研究过程中应该着重关注以下方面:①在研究不同雨水调蓄设施运行效果时,应更加关注雨水调蓄设施之间的关联关系、雨水调蓄设施与雨水管网等灰色设施的衔接关系,基于此研究揭示设施之间梯级滞渗、多级净化及联动运行的增效机制,进而探寻设施之间的优化配比与组合方式;②更多地关注如雨水调蓄池(库)等大中型设施的实际运行工况,研究其在流域(区域)雨洪调蓄中的功能作用及多池(库)联调的运行经验;③注重地区的差异性,开展本地化的雨水调蓄设施实际运行数据采集,通过设计目标可达性分析量化设施的运行效果,从而有针对性地指导当地的工程实践。

3.2 运行方式研究

运行方式是影响调蓄设施效果发挥的关键因素,进水模式、泵站运行及调蓄池蓄、排、净、用相辅调度规则等对有效发挥雨水调蓄效果具有重要影响^[56]。随着海绵城市建设步伐的加快及雨水调蓄设施的广泛应用,通过优化雨水调蓄设施的运行调度以提高其对雨洪管理调控的效果开始受到关注。设施的运行效率很大程度上取决于对设施运行的管控过程,以往的运行管理大多是静态化的,与实际降雨的随机性不相匹配,实时调控能够显著提升雨水调蓄设施的运行效率。Gaborit 等^[57]建立了雨水收集调蓄池实时管理的多目标混合整数规划模型,提出了大幅度减少储水区溢流、改善溪流基流、满足国内大部分非饮用水需求的策略。程江等^[58]根据气象降雨预测数据,预判调蓄池集蓄水量及过程,采用实时控制方式决定是否提前排空或者排放部分水量,降低溢流风险、增加集蓄水量。李俊德等^[59]应用差分进化算法驱动 SWMM 进行决策值寻优,以获取最优目标值下的决策方案。钟晔等^[60]采用 SWMM 与 SUSTAIN 的模型系统,模拟使用智能实时控制系统通过“及时腾出库容”和“置换”两个机制,以决策提升雨水调蓄池使用效率的方案。总体来看,目前开展实时调控运行管理的研究与实践仍然甚少,同时存在着重建设、轻运行、缺调度等问题,主要表现在以下几个方面:①多数设施的运行管理较为粗放,以设计时的预案设定为调控场景,然而,有限的预案难以完全应对实际发生的不同场次降雨,也难以完全匹配实时降雨的调度时机,使雨水调蓄设施的运行效果打了折扣;②项目建设范围往往限定了雨水调蓄设施的服务范围,设计时设施规模及运行方式的设定受到范围边界的限制,缺少更大排

水分区及流域范围内的联动运行与梯级调度管理;③忽略了集蓄雨水资源化利用问题,虽然在规划设计阶段明确了雨水的利用方向及潜在用户,但对于集蓄后雨水水质标准、存蓄期间的水质演变规律、水力停留时间等研究尚属空白,加之雨水利用配套设施欠缺,致使调蓄池集蓄雨水的利用率低,设施综合效益发挥不足。未来可从以下几个方面开展更加深入的研究与精细化的管理实践:①从区域(流域)角度出发,研究不同尺度雨水调蓄设施在梯级滞渗、补偿调节的相互作用下,末端调蓄池(库)的联动运行与优化调度方式,发挥区域(流域)统筹管理的调控作用;②研究集数据采集、传输、处理模拟为一体的雨水调蓄设施智能实时控制系统与技术,为雨水调蓄池(库)的联合调度、优化运行提供技术手段及平台支持;③关注雨水调蓄池(库)集蓄雨水在其存蓄期间的水质变化规律,研究雨水存蓄期间满足用户水质要求的水力停留时间,揭示雨水集蓄后的利用周期;同时,在雨水调蓄池(库)规划选址与设计时,充分调研周边的潜在用户,探索形式多样的雨水资源化利用方式,做好雨水利用方案规划设计。

4 结 语

低影响开发设施、绿色基础设施、人工池库以及河湖湿地等具有雨水调节和储蓄作用的设施都属于广义的雨水调蓄设施,按照功能原理、规模大小、具体用途及建设形式等可进行不同的分类,适配应用于海绵城市雨水径流源头削减-中途管控-末端调蓄的不同环节与场景。随着设施类型不断多样化、功能丰富化,应建立从设计标准确定、设施配置优化、调蓄容积优化、运行调度联动等多阶段优化的技术路径,开展雨水调蓄设施的优化设计布局与精细化调度运行管理。针对我国海绵城市规划与建设时设计标准确定中对降雨时空差异性及时程分配特征忽视的问题,应进一步探索降雨资料序列的选择方法,开展以场次降雨为系列数据的年径流总量控制率研究以及以年降雨场次控制率为目标的效果模拟评价与试点探索。在雨水调蓄设施配置及调蓄规模确定方面,亟须设施耦合效果、联动作用、增效机制等成果的支撑,以及能够将优化算法与雨洪模型耦合、嵌套应用的技术平台的支持。同时,海绵城市作为一种城市发展理念与方式,应更加关注雨水调蓄设施与建筑、道路、公共空间等的衔接以及设施空间布局的落地性、高效性。聚焦目前存在的重建设、轻管理问题,在规划、设计阶段应更加关注调蓄设施梯级联动、补偿调节的效果模拟,以选择优化方案;在运维阶段,应联系全流域(区域)的雨水调蓄设施,进行

上下游的联合调度与运行管理,与此同时,雨水调蓄设施实时调度控制系统与技术也亟待研发与应用。针对重调蓄、轻利用的问题,在探索集蓄雨水蓄存期间水质变化规律、水力停留时间等理论成果的基础上,将集蓄雨水纳入区域(流域)水资源统一配置规划中,从政策、水价及工程等方面逐步完善雨水利用途径,提升雨水资源化利用效率及海绵城市建设综合效益。

参考文献:

[1] POUR S H, ABD WAHAB A K, SHAHID S, et al. Low impact development techniques to mitigate the impacts of climate-change-induced urban floods: current trends, issues and challenges[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 62: 102373.

[2] TANSAR H, DUAN H F, MARK O. Catchment-scale and local-scale based evaluation of LID effectiveness on urban drainage system performance [J]. Water Resources Management, 2022, 36(2): 507-526.

[3] AL-JAWAD J Y, ALSAFFAR H M, BERTRAM D, et al. A comprehensive optimum integrated water resources management approach for multidisciplinary water resources management problems [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 239: 211-224.

[4] CAMPISANO A, BUTLER D, WARD S, et al. Urban rainwater harvesting systems: research, implementation and future perspectives [J]. Water Research, 2017, 115: 195-209.

[5] CARPIO-VALLEJO E, DÜKER U, WALDOWSKI J, et al. Contribution of rooftop rainwater harvesting to climate adaptation in the city of hannover: water quality and health issues of rainwater storage in cisterns and ponds [J]. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 2024, 256: 114320.

[6] HERRMANN T, SCHMIDA U. Rainwater utilisation in Germany: efficiency, dimensioning, hydraulic and environmental aspects [J]. Urban Water, 2000, 1(4): 307-316.

[7] 颜晓斐. 上海成都路合流污水调蓄池的污染减排效益及优化 [J]. 中国给水排水, 2010, 26(8): 6-10. (YAN Xiaofei. Pollution reduction benefit and optimization measures of Chengdulu combined sewage detention tank in Shanghai [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(8): 6-10. (in Chinese))

[8] 王犇, 李志军, 刘思源. 海绵城市改造调蓄池在伊通河中段综合生态治理中的应用 [J]. 城市住宅, 2017, 24(9): 121-124. (WANG Ben, LI Zhijun, LIU Siyuan. The application of sponge city transformation detention ponds in the comprehensive ecological treatment of the middle

- section of Yitong River [J]. Urban Architecture Space, 2017, 24(9): 121-124. (in Chinese))
- [9] 柏蔚. 对低影响开发中雨水调蓄设施的分析和思考研究[J]. 环境科学与管理, 2017, 42(8): 185-189. (BAI Wei. Analysis and thoughts on rainwater storage facilities [J]. Environmental Science and Management, 2017, 42 (8): 185-189. (in Chinese))
- [10] 徐僊,李唐,张岩. 天津中新生态城盐碱区域雨水调蓄设施分类与优化[J]. 绿色科技, 2019(20): 173-177. (XU Xi, LI Tang, ZHANG Yan. Classification and optimization of rainwater storage facilities in salt-alkali area of Tianjin Sino-Singapore ecological city[J]. Journal of Green Science and Technology, 2019(20): 173-177. (in Chinese))
- [11] 杜长伟,吴俊奇,汪慧贞,等. 北京市建筑小区雨水调蓄设施规模研究[J]. 给水排水, 2014, 50(10): 89-92. (DU Changwei, WU Junqi, WANG Huizhen, et al. Study on scale of rainwater detention facility in building subdistrict in Beijing [J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 50(10): 89-92. (in Chinese))
- [12] 汉京超,曹晶,周娟娟. 中心密集城区雨水调蓄设施集约化建设方案研究[J]. 给水排水, 2023, 49(6): 25-29. (HAN Jingchao, CAO Jing, ZHOU Juanjuan. Study on intensive construction scheme of rainwater storage facilities in central dense urban area [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49(6): 25-29. (in Chinese))
- [13] GUO J C Y, URBONAS B, MACKENZIE K. Water quality capture volume for storm water BMP and LID designs[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2014, 19(4): 682-686.
- [14] 李俊奇,李小静,王文亮,等. 美国雨水径流控制技术导则讨论及其借鉴[J]. 水资源保护, 2017, 33(2): 6-12. (LI Junqi, LI Xiaojing, WANG Wenliang, et al. Technical guidance for stormwater runoff control in United States and its significance[J]. Water Resources Protection, 2017, 33 (2): 6-12. (in Chinese))
- [15] User's manual; water quality capture optimization and statistics model(WQ-COSM) v2. 0 [R]. Washington D. C. : Urban Watersheds Research Institute, 2012.
- [16] 李俊奇,林翔,王文亮,等. 国内外雨水径流总量控制指标统计方法对比剖析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(8): 11-16. (LI Junqi, LIN Xiang, WANG Wenliang, et al. Comparison of statistical methods of runoff volume control indexes at home and abroad [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(8): 11-16. (in Chinese))
- [17] 李俊奇,王文亮,车伍,等. 海绵城市建设指南解读之降雨径流总量控制目标区域划分[J]. 中国给水排水, 2015, 31(8): 6-12. (LI Junqi, WANG Wenliang, CHE Wu, et al. Explanation of sponge city development technical guide; regional division for total rainfall runoff volume capture target [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(8): 6-12. (in Chinese))
- [18] 李俊奇,林翔,王文亮,等. 降雨间隔对雨水年径流总量控制率的影响规律探析[J]. 中国给水排水, 2019, 35(9): 120-126. (LI Junqi, LIN Xiang, WANG Wenliang, et al. Analysis of influence of rainfall interval on volume capture ratio of annual rainfall [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(9): 120-126. (in Chinese))
- [19] 张质明,胡蓓蓓,李俊奇,等. 中国日降雨空间变化对雨水径流源头总量控制的影响[J]. 水科学进展, 2018, 29(4): 465-472. (ZHANG Zhiming, HU Beibei, LI Junqi, et al. Influence of spatial variation in daily rainfall on volume capture of rainfall by source control facilities in China [J]. Advances in Water Science, 2018, 29(4): 465-472. (in Chinese))
- [20] LI Gong, JIN Chunling. Fuzzy comprehensive evaluation for carrying capacity of regional water resources[J]. Water Resources Management, 2009, 23(12): 2505-2513.
- [21] LIANG Changmei, ZHANG Xiang, XU Jin, et al. An integrated framework to select resilient and sustainable sponge city design schemes for robust decision making [J]. Ecological Indicators, 2020, 119: 106810.
- [22] WANG Y Y, HUANG G H, WANG S, et al. A risk-based interactive multi-stage stochastic programming approach for water resources planning under dual uncertainties[J]. Advances in Water Resources, 2016(94): 217-230.
- [23] XU Kui, ZHANG Xiaofeng, LING Lingbin, et al. An improved global resilience assessment method for urban drainage systems; a case study of Haidian Island, south China[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 360: 121135.
- [24] JIN Hengxu, LIANG Yiyang, LU Haipeng, et al. An intelligent framework for spatiotemporal simulation of flooding considering urban underlying surface characteristics [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2024, 130: 103908.
- [25] LIU Yue, QU Ying, CANG Yaodong, et al. Ecological security assessment for megacities in the Yangtze River basin: applying improved emergy-ecological footprint and DEA-SBM model [J]. Ecological Indicators, 2022, 134: 108481.
- [26] 万欣,卞文婕,魏然,等. 海绵城市水系统耦合协调发展及动态响应研究[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 135-142. (WAN Xin, BIAN Wenjie, WEI Ran, et al. Study on coupling coordination development and dynamic response of water system of sponge cities [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 135-142. (in Chinese))
- [27] 叶陈雷,徐宗学,雷晓辉,等. 福州晋安河片区海绵改造对城市内涝的影响[J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 83-92. (YE Chenlei, XU Zongxue, LEI Xiaohui, et al. Influences of sponge reconstruction of Jin' an River drainage district in Fuzhou City on urban flooding/ waterlogging [J]. Water Resources Protection, 2023, 39

- (1):83-92. (in Chinese))
- [28] 徐晋轩,李一阳,潘兴瑶,等.多时空尺度协同的场次降雨水资源量评价方法[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):19-25.(XU Jinxuan,LI Yiyang,PAN Xingyao,et al. Evaluation method of precipitation water resources based on multiple temporal and spatial scale coordination[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(1):19-25. (in Chinese))
- [29] SANIEI K, YAZDI J, MAJIDZADEHTABATABEI M R. Optimal size,type and location of low impact developments (LIDs) for urban stormwater control [J]. Urban Water Journal,2021,18(8):585-597.
- [30] ECKART K, MCPHEE Z, BOLISSETTI T. Multiobjective optimization of low impact development stormwater controls[J]. Journal of Hydrology,2018,562:564-576.
- [31] 李莹,莫淑红,杨元园,等.基于NSGA-II算法的海绵城市LID设施布设比例优化[J].给水排水,2021,57(增刊1):475-481.(LI Ying, MO Shuhong, YANG Yuanyuan,et al. Optimize proportions of LID facilities with NSGA-II [J]. Water & Wastewater Engineering,2021,57(Sup1):475-481. (in Chinese))
- [32] 陈前虎,邹澄昊,黄初冬,等.基于多目标粒子群算法的LID设施优化布局研究[J].中国给水排水,2019,35(19):126-132.(CHEN Qianhu,ZOU Chenghao,HUANG Chudong,et al. Optimization of LID facilities layout based on multi-objective particle swarm optimization algorithm [J]. China Water & Wastewater,2019,35(19):126-132. (in Chinese))
- [33] 付潇然,刘家宏,周冠南,等.面向内涝防治的地下调蓄池容量设计[J].水利水电技术,2019,50(11):1-8.(FU Xiaoran, LIU Jiahong, ZHOU Guannan, et al. Waterlogging control oriented-design of capacity of underground rainwater storage pool [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50 (11): 1-8. (in Chinese))
- [34] 薛鹏腾,毛立波,张峰,等.基于质量冲刷曲线和多属性决策的分流制控污调蓄设施的优化设计[J].水资源保护,2021,37(4):127-132.(XUE Pengteng, MAO Libo, ZHANG Feng, et al. Optimal design of regulation and storage facilities for pollution control in separate system based on mass flush curve and multi-attribute decision making [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (4): 127-132. (in Chinese))
- [35] 彭周洋,金溪,桑稳姣.基于NSGA-III算法的合流管网末端截流调蓄设施优化设计[J].环境工程,2022,40(8):143-149.(PENG Zhouyang,JIN Xi,SANG Wenjiao. Optimization of design of terminal flow interception and storage facilities of combined drainage system based on NSGA-III algorithm [J]. Environmental Engineering, 2022,40(8):143-149. (in Chinese))
- [36] 许文斌,李益飞,吴雪军,等.海绵设施的径流峰值控制贡献及调蓄容积计算方法[J].中国给水排水,2022,38(19):120-125.(XU Wenbin,LI Yifei,WU Xuejun,et al. Contribution of sponge facilities to peak runoff control and calculation method of storage volume [J]. China Water & Wastewater,2022,38(19):120-125. (in Chinese))
- [37] 刘成帅,韩臻悦,李想,等.基于BIC-KMeans和SWMM的城市雨洪快速模拟方法[J].水资源保护,2023,39(5):79-87.(LIU Chengshuai,HAN Zhenyue,LI Xiang,et al. Urban rainstorm flood rapid simulation method based on BIC-KMeans and SWMM [J]. Water Resources Protection,2023,39(5):79-87. (in Chinese))
- [38] 井雪儿,张守红.北京市雨水收集利用蓄水池容积计算与分析[J].水资源保护,2017,33(5):91-97.(JING Xueer, ZHANG Shouhong. Volume calculation and analysis of rainwater collection and utilization reservoir in Beijing [J]. Water Resources Protection,2017,33(5):91-97. (in Chinese))
- [39] 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))
- [40] 白生云.用于削减峰值流量调蓄池池容计算探讨[J].给水排水,2020,56(增刊1):445-448.(BAI Shengyun. Discussion on the calculation method of rainwater regulating storage tank capacity for peak flow reduction [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 56 (Sup1): 445-448. (in Chinese))
- [41] 何胜男,陈文学,刘燕,等.基于人工神经网络和粒子群优化的初期雨水调蓄池设计方法研究[J].水利学报,2020,51(12):1558-1566.(HE Shengnan, CHEN Wenxue,LIU Yan,et al. Study on design method of the initial rainwater storage tank based on ANN and PSO [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51 (12): 1558-1566. (in Chinese))
- [42] 徐荣,邓雅静,李一平,等.秦淮河流域典型排涝泵站前池水质与降雨特征响应关系[J].河海大学学报(自然科学版),2024,52(1):11-20.(XU Rong,DENG Yajing, LI Yiping, et al. Response relationship between water quality and rainfall characteristics in front pond of typical urban drainage pumping stations of Qinhuai River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(1):11-20. (in Chinese))
- [43] HUTCHINSON D, ABRAMS P, RETZLAFF R, et al. Stormwater monitoring two ecoroofs in Portland, Oregon, USA [C]//Proceedings Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference. Chicago:Sustainable Community, 2003:372-389.
- [44] 蒋春博,李家科,马越,等.雨水花园对实际降雨径流的

- 调控效果研究[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 122-127. (JIANG Chunbo, LI Jiak, MA Yue, et al. Regulating effect of rain garden on actual rainfall runoff[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(4): 122-127. (in Chinese))
- [45] 唐双成, 罗纨, 贾忠华, 等. 雨水花园对暴雨径流的削减效果[J]. 水科学进展, 2015, 26(6): 787-794. (TANG Shuangcheng, LUO Wan, JIA Zhonghua, et al. Effect of rain gardens on storm runoff reduction[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(6): 787-794. (in Chinese))
- [46] JIA Z, TANG S, LUO W, et al. Small scale green infrastructure design to meet different urban hydrological criteria[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 171: 92-100.
- [47] DAVIS A P, SHOKOUHAN M, SHARMA H, et al. Laboratory study of biological retention for urban stormwater management [J]. Water Environment Research, 2001, 73(1): 5-14.
- [48] JAMES W, JAMES W R C, VON LANGSDORF H. Computer-aided design of permeable concrete block pavement for reducing stressors and contaminants in an urban environment [C]//Proceedings of the 7th International Conference on Concrete Block Paving. Sun City: Document Transformation Technologies, 2003: 1-12.
- [49] 周晋军, 黄天意, 刘家宏, 等. 我国透水路面发展研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(4): 78-88. (ZHOU Jinjun, HUANG Tianyi, LIU Jiahong, et al. Review of permeable pavement development in China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(4): 78-88. (in Chinese))
- [50] BORGWARDT S. Long-term in-situ infiltration performance of permeable concrete block pavement[C]//Proceedings of the 8th International Conference on Concrete Block Paving. Washington, D. C.: Interlocking Concrete Pavement Institute, 2006: 149-160.
- [51] TAN Yuqing, CHENG Qiming, LYU Fengwei, et al. Hydrological reduction and control effect evaluation of sponge city construction based on one-way coupling model of SWMM-FVCOM: a case in university campus [J]. Journal of Environmental Management, 2024, 349: 119599.
- [52] 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.
- [53] 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))
- [54] 陈前虎, 周明, 邹澄昊, 等. 海绵化改造小区调蓄池优化布局及其雨水径流控制效果: 以浙江省嘉兴市烟波苑小区为例[J]. 水土保持通报, 2020, 40(3): 235-242. (CHEN Qianhu, ZHOU Ming, ZOU Chenghao, et al. Optimizing layout of storage pool in sponging-transformation estate and its effects on runoff control of rain water: taking Yanboyuan Estate of Jiaxing City, Zhejiang Province as an example[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(3): 235-242. (in Chinese))
- [55] 杜佐道, 徐晓明, 付朝晖, 等. 某医院后山雨水调蓄池削减洪峰流量的效果研究[J]. 给水排水, 2019, 45(12): 86-89. (DU Zuodao, XU Xiaoming, FU Zhaozhao, et al. Study on the effect of reducing peak flow by rainwater storage tank on the hill behind a hospital[J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(12): 86-89. (in Chinese))
- [56] ZHEN Y, SMITH-MILES K, FLETCHER T D, et al. Multi-objective optimization in real-time operation of rainwater harvesting systems [J]. EURO Journal on Decision Processes, 2023, 11: 100039.
- [57] GABORIT E, ANCTIL F, PELLETIER G, et al. Exploring forecast-based management strategies for stormwater detention ponds[J]. Urban Water Journal, 2016, 13(8): 841-851.
- [58] 程江, 祁继英, 许莉. 上海市成都路雨水调蓄池进水模式优化[J]. 中国给水排水, 2014, 30(5): 104-108. (CHENG Jiang, QI Jiying, XU Li. Inlet mode optimization of Chengdulu stormwater detention tank in Shanghai[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(5): 104-108. (in Chinese))
- [59] 李俊德, 范功端, 邹建勇. 基于差分进化算法的雨水调蓄设施优化调度研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(21): 119-124. (LI Junde, FAN Gongduan, ZOU Jianyong. Optimal scheduling of rainwater storage facilities based on differential evolution algorithm[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(21): 119-124. (in Chinese))
- [60] 钟晔, 紫檀, 甄晓玥. 实时控制系统提升调蓄池处理能力的模拟研究[J]. 给水排水, 2021, 47(4): 144-150. (ZHONG Ye, ZI Tan, ZHEN Xiaoyue. Modeling research on performance improvement of stormwater treatment detention basins by implementing real-time control systems [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(4): 144-150. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-05-22 编辑: 王芳)