

城市雨水管理

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.19.016

合流制排水分区海绵城市多层级调控效果定量评估

韩靖博^{1,2}, 杨默远¹, 潘兴瑶¹, 卢亚静¹, 刘名文^{1,3}, 陈昊^{1,2}

(1. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048; 2. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学 理学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 海绵城市建设逐渐强调系统治理的理念,通过多层级调控措施充分发挥海绵城市建设效果,但目前多层级调控措施缺乏细致的定量评估研究。为此,以北京城市副中心海绵城市试点区内的一个已建合流制排水分区为例,基于 InfoWorks ICM 软件构建海绵城市建设区的精细化模型并开展情景模拟分析,定量评估不同层级的海绵城市建设效果。结果表明:①与海绵城市建设前相比,源头调控、过程调控、末端调控方案的年径流总量控制率由 47.9% 分别提升至 51.4%、75.7%、75.2%,源头-过程联合调控方案和源头-过程-末端联合调控方案分别达到 77.0% 和 84.5%;②在合流制排水分区计算年径流总量控制率时,应考虑在下游再生水厂处的间接溢流过程,以准确评估海绵城市建设效果;③对于合流制排水分区,实施截污管过程调控工程后仍存在年均 13 次的合流制溢流事件,源头-过程-末端联合调控使得年均溢流频次和溢流总量分别降低 61.5% 和 52.5%;④受再生水厂处理能力的制约,多层级调控技术方案对排水分区下游再生水厂溢流事件的影响十分有限,年均溢流频次和溢流总量仅降低 6.2% 和 3.8%,有必要在排水分区尺度多层级海绵城市建设的基础上,采用再生水厂提标改造等一系列综合性手段,实现区域尺度的海绵城市建设目标。

关键词: 海绵城市; 多层级调控; 合流制溢流; 年径流总量控制率; InfoWorks ICM

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)19-0095-07

Quantitative Evaluation of Multi-level Regulation Effect of Sponge City in Combined Drainage Zone

HAN Jing-bo^{1,2}, YANG Mo-yuan¹, PAN Xing-yao¹, LU Ya-jing¹, LIU Ming-wen^{1,3}, CHEN Hao^{1,2}

(1. Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Science, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: Sponge city construction gradually emphasizes the concept of system governance, and its effect can be fully manifested through multi-level regulation measures. However, there is a lack of detailed quantitative evaluation research on multi-level regulation measures. A case study was carried out

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07103-002、2017ZX07103-007); 北京市自然科学基金青年基金资助项目(8194061、8184075); 北京市科委重大研发项目(Z181100005318003)

通信作者: 杨默远 E-mail: ymoyuan@163.com

in a built-up combined drainage area in a sponge city pilot area of Beijing sub-center. A refined model of sponge city construction area based on InfoWorks ICM software was built, and the scenario simulation analysis was carried out. The effect of sponge city construction at different levels was quantitatively evaluated. Compared with the pre-sponge city, the volume capture ratio of annual runoff of source regulation, process control and terminal regulation schemes increased from 47.9% to 51.4%, 75.7% and 75.2% respectively, and those of the source-process and source-process-end combined control schemes reached 77.0% and 84.5%, respectively. When calculating volume capture ratio of annual runoff in the combined drainage zone, indirect overflow process of downstream reclaimed water plant should be considered to accurately evaluate the effect of sponge city construction. For the combined drainage zone, there were still 13 combined sewer overflow events per year after the implementation of the interception pipeline control project, and the source-process-end combined regulation could reduce the annual average overflow frequency and total overflow volume by 61.5% and 52.5%, respectively. Restricted by the treatment capacity of the reclaimed water plant, the impact of the multi-level regulation technical scheme on the overflow events of the downstream reclaimed water plant was very limited, and the annual average overflow frequency and total overflow volume only decreased by 6.2% and 3.8% respectively. Therefore, it was necessary to adopt a series of comprehensive means, such as construction of reclaimed water plant, to realize the construction target of sponge city at regional scale on the basis of multi-level sponge city construction of the drainage zone.

Key words: sponge city; multi-level regulation; combined sewer overflow; volume capture ratio of annual runoff; InfoWorks ICM

在当前海绵城市建设过程中,多层次调控已经成为一个热点话题,多层次调控指通过源头海绵设施改造、过程调控、末端滞蓄等措施分层控制海绵城市建设区的降雨径流和污染物,从而实现海绵城市的建设目标,对海绵城市建设方案设计具有重要的意义。模型模拟是定量评价海绵城市多层次建设效果的有效手段,随着科学技术的发展,水力模型已经逐步取代传统的水力计算分析手段,广泛应用于排水系统服务性能的总体评价^[1]。目前,对海绵城市建设效果的评价主要集中在小区尺度的源头低影响开发(LID)设施^[2-4],缺少对排水分区尺度的全面评估,也缺少对海绵城市不同层级建设效果的分离。尤其在合流制区域,由于多数小区是已建成的老旧小区,可进行的源头海绵设施改造范围相当有限,现有模型对过程和末端措施考虑不足。需要综合考虑各类海绵设施,如对截污管线建设和合流制溢流调蓄池建设等措施进行合理概化,从而准确评估海绵城市建设效果。基于此,笔者以北京城市副中心海绵城市试点区内的一个已建合流制排水分区为研究对象,基于 InfoWorks ICM 模型软件,以研究区域内实际海绵城市改造方案为依据,同时考虑研究区域

下游再生水厂的实际处理能力,构建了海绵城市建设区域的精细化模型。采用研究区域内某雨量站2008年—2018年的实测降雨资料,按照多层次调控的思路设置6个情景模拟方案,评估海绵城市多层次调控效果。

1 研究区域概况

北京市海绵城市试点区位于北京通州城市副中心的两河片区,西南起自北运河、北至运潮减河、东至春宜路,属温带大陆性半湿润季风气候区,多年平均降雨量为535.9 mm,6月—8月汛期内集中了全年75%以上的降雨。试点区总规划面积为19.36 km²,其中已建区为5.11 km²、行政办公区为7.86 km²、其他新建区为6.39 km²。本研究选择海绵城市试点区西北角的一个已建合流制排水分区。

研究区占地面积为1.54 km²,地面高程在14~28 m之间[见图1(a)];现状下垫面主要包括建筑用地、道路、绿地、裸地、水域等[见图1(b)]。研究区内共有管道77段,总长度为3.70 km,主要为雨污合流的现状管网,最大断面规格为3 200 mm×2 000 mm,最小断面规格为300 mm×300 mm。研究区南侧排口为通胡大街排口,排口为3.2 m×2 m

的方涵,出流方式为淹没出流[见图 1(c)]。此外,研究区在 2016 年—2017 年黑臭水体治理工程中对现有通胡大街合流制排口进行截流处理,于北运河东侧修建截污干管,研究区旱季污水通过该截污管

进入河东再生水厂。河东再生水厂位于通州新城河东地区,目前总处理能力为 $(4.0 \sim 4.4) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,在河东地区的污水处理能力为 $(1.5 \sim 1.7) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。



图 1 研究区域的基本地理信息

Fig. 1 Basic geographic information of study area

对于整个排水分区尺度而言,源头控制工程包括建筑小区、公园、学校等海绵改造项目共 12 项,主要技术措施为雨水花园、下沉式绿地、透水铺装、生物滞留池、植草沟、雨水桶等;过程调控工程主要为合流制管网截污管线工程;末端工程为排口末端的合流制溢流控制调蓄池。研究区内各类海绵工程的分布如图 2 所示。

确、快速地进行网络模拟。近年来,该模型也在我国得到了广泛应用,主要涉及城市雨洪分析与预测^[5-6]、排水系统暴雨径流控制^[7-9]、低影响开发措施模拟^[10]等方面。本研究建模主要涉及的模块包括水文模块、管道水力模块、污水量计算模块、实时控制模块和 SUDS 模块。

2.2 模型概化

依据前期收集的数据资料(见表 1),构建研究区的精细化城市排水管网模型,主要包括子产流单元划分、降雨产流模型构建、管网汇流模型构建、海绵设施概化等环节。

表 1 建模所需数据资料

Tab. 1 Data required for modeling

项目	数据时效性	数据内容	数据精度
基础地理信息	2011 年	基础地形数据	栅格数据,1 : 2 000
	2011 年	DEM 数据	栅格数据,5 m
	2013 年	航空影像数据	栅格数据,0.5 m
排水设施信息	2018 年	排水管网	矢量数据,3.70 km
	2018 年	检查井	矢量数据,79 个
	2018 年	排水口	矢量数据,1 个
水文气象数据/ 排口实测数据	2018 年	降雨过程	2008 年—2018 年,时间分辨率为 5 min
	2018 年	排口流量过程	2018 年通胡大街排口,时间分辨率为 5 min

① 子产流单元划分

对于小区与绿地地块,根据现状影像数据确定地块边界,划分子产流单元;对于道路,以检查井为节点,绘制泰森多边形,划分子集水区作为坡面产汇

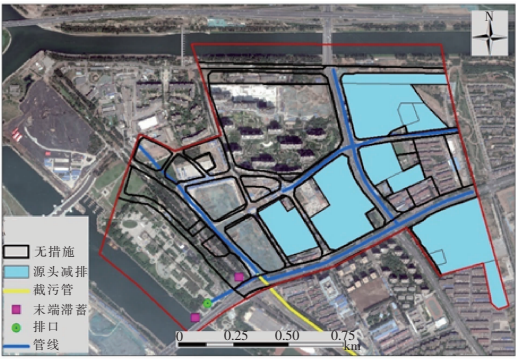


图 2 研究区的海绵城市建设概况

Fig. 2 Overview of sponge city construction in study area

2 模型构建

2.1 模型简介

本研究以 InfoWorks ICM 城市综合流域排水模型软件为工具,构建研究区域的精细化模型。InfoWorks ICM 软件在产流计算、汇流计算以及管网计算方面提供了多种方法,同时还耦合了污水计算模块、水质模块、河道模块等,可以仿真模拟城市水文循环过程,进行管网局限性分析和方案优化,准

流计算的基本单元,共计构建 123 个子产流单元。

② 降雨产流模型构建

在研究区内,区分绿地、道路、小区、水域 4 种用地类型,对应绿地、市政道路、屋面、小区道路、广场、水域 6 种不同的径流表面(其中小区包括屋面、小区道路、广场、绿地 4 种不同的径流表面)。各类径流表面面积按照实际勘测面积输入。选用固定径流系数法和 Horton 入渗公式计算子集水区产流,选用 SWMM 模型法进行坡面汇流过程验算。

③ 管网汇流模型构建

对排水管网资料进行梳理,确定上下游管网拓扑关系,构建上下游管段、管段与检查井之间的拓扑网络;检查排水口高程与河道断面高程的关系,分析排水口高程与设计洪水位关系;最终根据管道材料,设置糙率系数,构建管网汇流模型。在管网模型中,主要涉及的海绵设施为合流区的截污管线工程。

④ 海绵设施概化

在研究区内涉及的源头海绵工程措施包括下沉式绿地、雨水花园、植草沟、透水铺装、生物滞留池、生态停车场、渗渠、蓄水池等。采用 InfoWorks ICM 中的 SUDS/LIDs 模块,对上述各类海绵设施进行概化,下沉式绿地、雨水花园、植草沟、透水铺装、渗渠、蓄水池按照模块中对应内容设置。结合实际工程方案,对研究区内下沉式绿地设置蓄水深度为 100、150、250 mm,雨水花园设置蓄水深度为 200、300 mm,植草沟设置调蓄深度为 100、200 mm;生物滞留池设置为下凹深度为 300 mm 的下沉式绿地;生态停车场按照透水铺装进行概化。对研究区内所进行的各项海绵城市建设工程进行梳理,整理出各个海绵设施的具体面积和相关参数,按详细的施工资料设置产流单元参数。

过程海绵工程措施主要是通胡大街截污管线工程。在排水分区出口处设置 0.5 m 高的截流堰,用于截流生活污水,截流后的污水通过管径为 500 ~ 1 100 mm 的截污管进入河东再生水厂进行处理。根据调查,河东再生水厂对通州海绵城市试点区内的日常污水处理量为 15 000 ~ 17 000 m³/d,按照研究区人口总数等比例折算,研究区日常污水处理量为 4 605.7 m³/d。因此,按照 3 倍截污倍数设置再生水厂的最大污水处理能力,超出再生水厂处理能力的水量,通过再生水厂的溢流口排出。

末端海绵工程措施为通胡大街排口处设置的末

端调蓄池,用于收集合流制排口的溢流排放径流,末端调蓄池容积设置为 5 120 m³,设置调蓄池的排空时间为 24 h。因此,该排水分区具有两个径流外排途径,即通胡大街排口直接外排和河东再生水厂间接外排,当前对年径流总量控制率的计算主要考虑排口处的直接溢流外排流量,对再生水厂关注不足,可能对海绵城市建设效果评估产生一定影响,故在模型构建时将再生水厂的间接出流纳入计算范围。

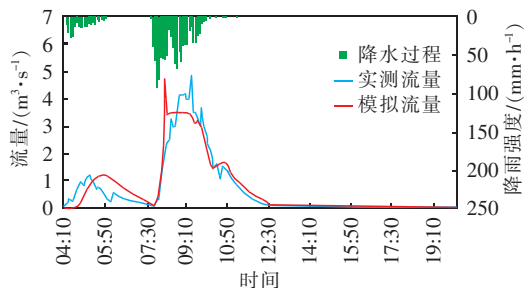
2.3 参数率定与验证

2018 年对海绵城市示范区的监测结果包括截污前干管和截污管内的流量、水深数据,依据《城镇雨水系统规划设计暴雨径流计算标准》(DB 11/T 969—2016),考虑最不利因素和相关文献确定最初模型参考参数,选取实测数据良好的 2018 年 8 月 8 日的降雨干管流量对模型进行率定,调整研究区内的初始径流损失、固定径流系数、Horton 初渗率、Horton 稳渗率、Horton 衰减率等参数(见表 2),使模拟径流尽可能反映实际径流过程。经调整,模拟径流和实测径流过程如图 3(a)所示,两者的纳什系数达到 0.884。按照参数率定结果,选取 7 月 17 日的降雨数据对模型率定结果进行验证,结果显示纳什系数为 0.833,峰现时间、洪峰流量基本一致[见图 3(b)],故认为模型可以较好地模拟研究区的雨水径流过程。

表 2 研究区的产流参数

Tab. 2 Flow parameters of study area

产流表面	径流量类型	初始损失值/m	固定径流系数	Horton 初渗率/(mm·h ⁻¹)	Horton 稳渗率/(mm·h ⁻¹)	Horton 衰减率/(mm·h ⁻¹)
绿地	Horton	0.008	—	115	12.7	2.8
市政道路	Fixed	0.003	0.9	—	—	—
屋面	Fixed	0.003	0.9	—	—	—
小区道路	Fixed	0.005	0.8	—	—	—
广场	Fixed	0.003	0.9	—	—	—
水域	Fixed	0	0	—	—	—



a. 参数率定

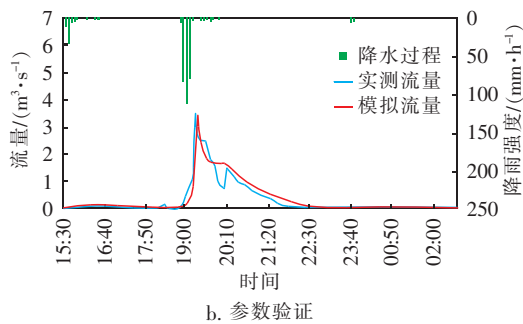


图3 研究区参数率定和验证结果

Fig. 3 Parameters calibration and verification results of study area

2.4 模拟情景设置

研究区海绵城市建设主要分为源头控制、过程调控、末端调蓄3类措施,参考相关规范、标准,以海绵城市建设前作为对照,基于实际建设的生物滞留池、下沉式绿地、透水铺装、雨水桶等海绵设施设置源头措施情景,结合通胡大街合流制截污管线工程设置过程措施情景,根据通胡大街排口调蓄池设置末端措施情景。为了定量评估海绵城市的多层级建设效果,需要全面考虑源头、过程、末端海绵措施的影响,最终设置海绵城市建设前、仅源头调控、仅过程调控、仅末端调控、源头-过程联合调控、源头-过程-末端联合调控共6个情景模拟方案。

3 模拟分析

3.1 年径流总量控制率分析

年径流总量控制率是海绵城市建设和考核的关键指标,依据《海绵城市建设评价标准》(GB/T 51345—2018),定义年径流总量控制率为通过自然与人工强化的渗透、滞蓄、净化等方式所控制(不外排)的年均降雨量与年均降雨总量的比值;同时按照该标准中所建议的模型模拟方法,对研究区内不同海绵城市建设方案的年径流总量控制率进行详细分析。

将研究区2008年—2018年降雨资料和研究区内生活污水排放过程作为精细化模拟输入条件,分别模拟分析6个不同情景条件下研究区的排口直接溢流外排和再生水厂间接溢流外排过程,并计算年径流总量控制率,结果如图4所示。

在考虑再生水厂排口间接出流影响时,海绵城市建设前,多年平均年径流总量控制率在47.9%左右;源头工程建设后,年径流总量控制率达到了51.4%,较建设前提升了3.5个百分点;通胡大街截

污管线工程建设后,年径流总量控制率为75.7%,较建设前提升了27.8个百分点;通胡大街末端溢流调蓄池建设后,年径流总量控制率达到75.2%,较建设前提升了27.3个百分点。由此可见,在研究区内,已建成区域的源头海绵改造对年径流总量控制率提升效果有限,过程和末端调控措施对已建成区域径流控制效果提升更为显著,其主要原因可能是研究区内源头海绵设施改造条件有限,源头海绵措施的实际面积仅占研究区总面积的5%。在对单层海绵工程建设效果评估的基础上,对源头-过程联合调控方案以及源头-过程-末端联合调控方案进行分析,其中源头-过程联合调控方案的年径流总量控制率达到77.0%,相较单源头调控提升了25.6个百分点;源头-过程-末端联合调控方案的年径流总量控制率达到84.5%,在源头-过程联合调控的基础上又提升了7.5个百分点。

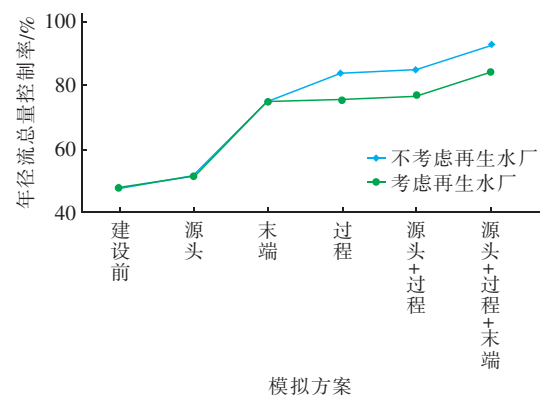


图4 2008年—2018年多年平均年径流总量控制率

Fig. 4 Average volume capture ratio of annual rainfall during 2008-2018

若不考虑再生水厂间接出流的影响,则过程工程方案、源头-过程联合方案以及源头-工程-末端联合方案的年径流总量控制率分别达到84.2%、85.2%和92.6%,相较于考虑再生水厂间接出流,计算所得的年径流总量控制率分别高出了8.5、8.2和8.1个百分点。因此,不考虑再生水厂间接出流会导致计算所得年径流总量控制率偏高,难以准确评估海绵城市实际建设效果。对于实施截污工程的合流制排水分区,需在计算年径流总量控制率时充分考虑再生水厂的實際处理能力与溢流排放量。

3.2 合流制溢流分析

在研究区所在的合流制区域,实施截污管过程调控工程后,虽然可以有效控制排口处的径流总量,

但是仍然存在年均13次的合流制溢流事件,年均溢流总量为 $9.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。源头-过程-末端联合调控方案对合流制溢流的控制效果较为突出,年均溢流次数由13次减少到5次,减少了61.5%,且2008年、2009年、2015年甚至未发生合流制溢流事件[见图5(a)];年均溢流总量从 $9.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ 降至 $4.7 \times 10^4 \text{ m}^3$,减少了52.5%[见图5(b)]。

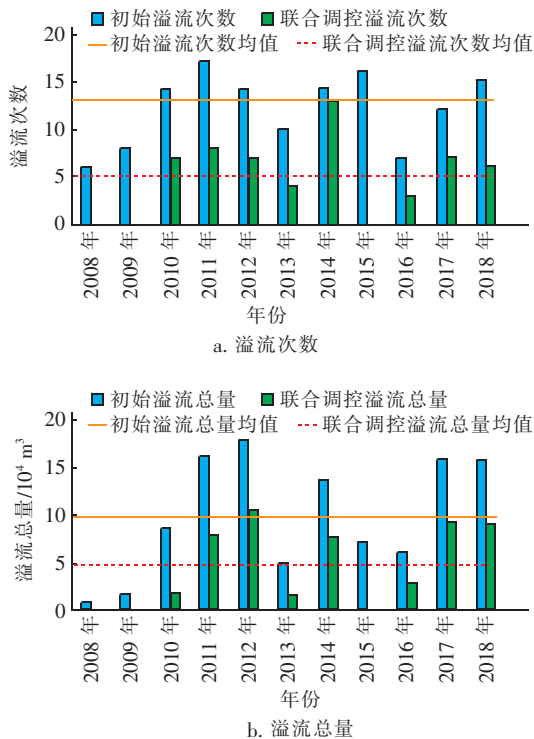


图5 合流制排口处溢流次数和总量对比

Fig. 5 Comparison of overflow times and volumes at combined discharge port

研究区下游存在再生水厂,按照再生水厂日均污水处理量3倍的截污倍数进行再生水厂处理能力概化,超出处理能力的水量溢流排入河道,再生水厂的溢流次数和溢流总量如图6所示。

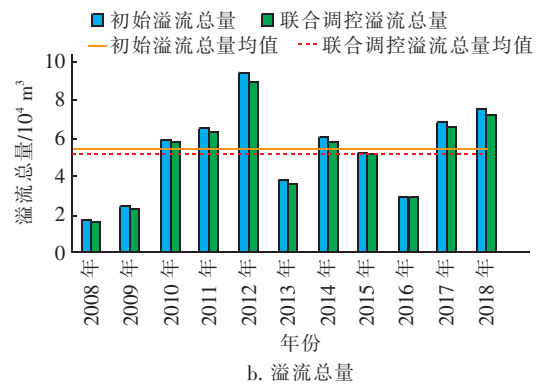
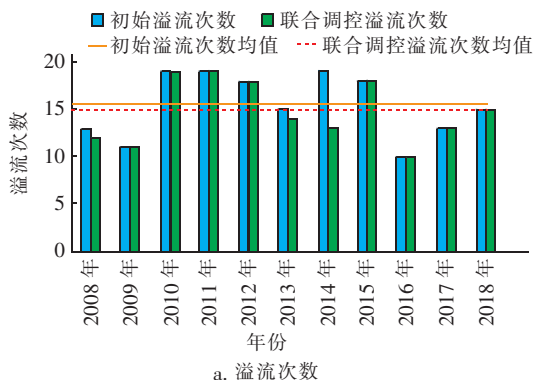


图6 再生水厂处溢流次数和总量对比

Fig. 6 Comparison of overflow times and volumes at reclaimed water plant

在再生水厂,源头-过程-末端联合调控后,年均溢流次数从16次减少到15次,减少了6.2%;溢流总量从 $5.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 减少至 $5.1 \times 10^4 \text{ m}^3$,减少了3.8%。对比排口和再生水厂处的合流制溢流情况,源头-过程-末端联合调控对合流制溢流的良好控制效果主要针对排口处的直接溢流过程,而对下游再生水厂的间接溢流过程控制效果十分有限。

4 结论

① 与海绵城市建设前相比,源头调控、过程调控、末端调控方案的年径流总量控制率由47.9%分别提升至51.4%、75.7%、75.2%,源头-过程联合调控方案和源头-过程-末端联合调控方案的年径流总量控制率分别达到77.0%和84.5%,已建成区域的源头海绵改造对年径流总量控制率提升效果有限(仅提高3.5个百分点),过程和末端调控措施对已建成区域的径流控制效果提升更为显著。

② 在合流制排水分区计算年径流总量控制率时,应考虑区域间接出流情况,否则易导致计算所得的年径流总量控制率偏高,难以准确评估海绵城市建设效果。

③ 对于合流制排水分区,实施截污管过程调控工程后,虽然能够有效降低外排径流,但仍存在年均13次的合流制溢流事件,源头-过程-末端联合调控能够有效控制合流制溢流污染,年均溢流频次和溢流总量分别降低61.5%和52.5%。

④ 受再生水厂处理能力的制约,多层级调控技术方案对排水分区下游再生水厂溢流事件的影响十分有限,年均溢流频次和溢流总量分别仅降低6.2%和3.8%,有必要在排水分区尺度多层级海绵

城市建设的基础上,考虑再生水厂提标改造、雨水湿地构建、河道水系连通等综合性手段,实现区域尺度的海绵城市建设目标。

参考文献:

- [1] 刘小梅,吴思远,云海兰,等. 水力模型在排水防涝规划体系中的应用[J]. 中国给水排水,2017,33(11): 133-138.
- Liu Xiaomei, Wu Siyuan, Yun Hailan, *et al.* Application of hydraulic models in drainage and flood control planning systems in small watersheds[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(11): 133-138 (in Chinese).
- [2] 庞璇,张永勇,潘兴瑶,等. 城市雨洪模拟与年径流总量控制目标评估——以北京市未来科技城为例[J]. 资源科学,2019,41(4): 803-813.
- Pang Xuan, Zhang Yongyong, Pan Xingyao, *et al.* Urban stormwater simulation and assessment of the control rate of total annual runoff: A case of the Future Science and Technology Park in Beijing [J]. Resources Science, 2019, 41(4): 803-813 (in Chinese).
- [3] 刘海娇,于磊,薛丽娟,等. 基于 PCSWMM 的老校区 LID 设施模拟[J]. 中国给水排水,2016,32(23): 143-146.
- Liu Haijiao, Yu Lei, Xue Lijuan, *et al.* Simulation of LID facilities in old campus based on PCSWMM [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(23): 143-146 (in Chinese).
- [4] 王文亮,李俊奇,宫永伟,等. 基于 SWMM 模型的低影响开发雨洪控制效果模拟[J]. 中国给水排水,2012,28(21): 42-44.
- Wang Wenliang, Li Junqi, Gong Yongwei, *et al.* LID stormwater control effect simulation based on SWMM [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(21): 42-44 (in Chinese).
- [5] 王滢,周小伟. InfoWorks ICM 在山地丘陵城市内涝治理中的应用[J]. 中国给水排水,2018,34(19): 118-123.
- Wang Ying, Zhou Xiaowei. Application of InfoWorks ICM in control of urban waterlogging in mountainous and hilly cities [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(19): 118-123 (in Chinese).
- [6] 言铭,魏忠庆,黄永捷,等. 汇水区划分对 InfoWorks ICM 水力模拟结果的影响[J]. 中国给水排水,2019, 35(1): 111-117.
- Yan Ming, Wei Zhongqing, Huang Yongjie, *et al.* Impact of catchment division on InfoWorks ICM hydraulic simulation [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(1): 111-117 (in Chinese).
- [7] 李建勇. InfoWorks ICM 在城市排水系统分析中的应用[J]. 中国给水排水,2014,30(8): 21-24.
- Li Jianyong. Application of InfoWorks ICM in analysis of urban drainage system [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(8): 21-24 (in Chinese).
- [8] 汉京超. 应用 InfoWorks ICM 软件优化排水系统提标方案[J]. 中国给水排水,2014,30(11): 34-38.
- Han Jingchao. Optimization of upgrading schemes of drainage systems by InfoWorks ICM software [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(11): 34-38 (in Chinese).
- [9] 魏忠庆,黄永捷,林兰娜,等. InfoWorks ICM 在排水管网问题诊断及改造中的应用[J]. 中国给水排水,2017,33(23): 115-119.
- Wei Zhongqing, Huang Yongjie, Lin Lanna, *et al.* Application of InfoWorks ICM in problem diagnosis and reconstruction of drainage pipe network for urban build-up area [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(23): 115-119 (in Chinese).
- [10] 王辉,张留臻. 基于 InfoWorks ICM 的已建排水系统海绵改造研究[J]. 城市道桥与防洪,2016,19(7): 170-172.
- Wang Hui, Zhang Liuli. Study on sponge reconstruction of built drainage system based on InfoWorks ICM [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2016, 19(7): 170-172 (in Chinese).



作者简介:韩靖博(1997-),男,河南洛阳人,硕士研究生,主要从事海绵城市模拟研究工作。

E-mail: hanjingb@hhu.edu.cn

收稿日期:2019-07-25