

城市雨水管理

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2024. 01. 019

绿色海绵设施和灰色调蓄设施对排水系统提标的作用

韩松磊, 胡启玲, 张楠, 莫祖澜, 陈建, 武振东, 吕永鹏
(上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092)

摘要: 《上海市城镇雨水排水规划(2020—2035年)》要求主城区(含中心城)的排水系统设计重现期达到5年一遇。为此,以上海市中心城区某排水系统为研究对象,结合该排水系统内的海绵城市建设要求,定量化分析了源头绿色海绵设施和灰色调蓄设施对雨水排水系统提标的效果。结果显示,灰色调蓄设施可有效提高系统的排水能力,而相同调蓄容积的源头绿色海绵设施的提标效果较差,并与其服务面积比有关。进一步分析发现,可通过源头绿色海绵设施对径流系数的影响,定量化计算其对排水系统提标调蓄容积的贡献。

关键词: 源头绿色海绵设施; 灰色调蓄设施; 排水标准; 调蓄容积; 径流系数; 提标改造

中图分类号: TU992 文献标识码: A 文章编号: 1000-4602(2024)01-0126-05

Role of Green Sponge Facilities and Gray Storage Facilities in Upgrading Rainwater Drainage System

HAN Song-lei, HU Qi-ling, ZHANG Nan, MO Zu-lan, CHEN Jian,
WU Zhen-dong, LÜ Yong-peng

(Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: The Shanghai Urban Rainwater Drainage Plan (2020–2035) requires that the design return period of the drainage system in the main urban areas (including the central city) should be five years. Therefore, the effect of source green sponge facilities and grey storage facilities on the upgrading of rainwater drainage system in the downtown area of Shanghai was quantitatively analyzed based on the construction requirements of sponge city in the drainage system. The grey storage facilities effectively improved the drainage capacity of the system. By contrast, the source green sponge facilities with the same storage capacity demonstrated poor upgrading performance, and there was a certain relationship with their service area ratio. Further analysis showed that the contribution of green sponge facilities to the storage capacity of the drainage system could be quantified through investigating the influence of green sponge facilities on the runoff coefficient.

Key words: source green sponge facility; gray storage facility; drainage standard; storage volume; runoff coefficient; upgrading and reconstruction

基金项目: 住房和城乡建设部研究开发项目(K20200919); 住房和城乡建设部软科学研究项目(R20200221); 上海市科学技术委员会技术标准项目(21DZ2208700)

按照《上海市城镇雨水排水规划(2020—2035年)》(以下简称《雨水规划》)要求,上海市中心城区的排水标准需从1年一遇提高到5年一遇。《雨水规划》提出,结合中心城区平原感潮河网和高度城市化的特点,积极践行海绵城市理念,推进“绿、灰、蓝、管”多措并举,其中中心城区有129个强排系统和66 km²自排区域,按《雨水规划》标准约342×10⁴ m³的新建绿色设施要用于提标建设。该调蓄量的计算基于目前中心城区1年一遇的排水系统标准提升到5年一遇的标准。

根据《上海市海绵城市建设规划(2017—2035)》(以下简称《海绵规划》),通过海绵城市建设,到2020年建成区20%以上的面积达到目标要求;到2030年,建成区80%以上的面积达到目标要求。目前中心城各区编制的海绵城市建设规划也明确要求,到2020年20%的面积要达到海绵城市建设年径流总量控制率70%的要求。

鉴于此,笔者以上海中心城区某现有排水系统为研究对象,结合该系统内的海绵城市建设要求,分析源头绿色海绵设施和灰色调蓄设施对排水系统提标的效果,探讨海绵城市建设与排水系统提标之间的关系。

1 研究区域概况

W汇水区域位于上海中心城区,服务面积约为0.9 km²,为合流制泵排系统。该系统以居住用地为主(见图1),东部有部分待建用地,规划为商办综合用地及部分居住用地,建筑、道路和绿地占比分别为82.10%、9.66%、8.24%。



图1 W汇水区域用地类型

Fig.1 Land use of W catchment

2 模型的构建与本底评估

选择SWMM模型作为研究工具,综合考虑W汇水区域排水管网与下垫面情况,还有地表径流汇入市政管网时路径受小区围墙阻挡的影响,细划了子

汇水区,共划分了590个子汇水区,面积在0.01~0.9 hm²之间。为便于分析源头绿色海绵设施的效果,减少和控制外在的影响因素(如:管道逆坡、错混接、大管接小管等),选择该系统上游3.7 hm²的范围A作为研究区域,如图2所示。

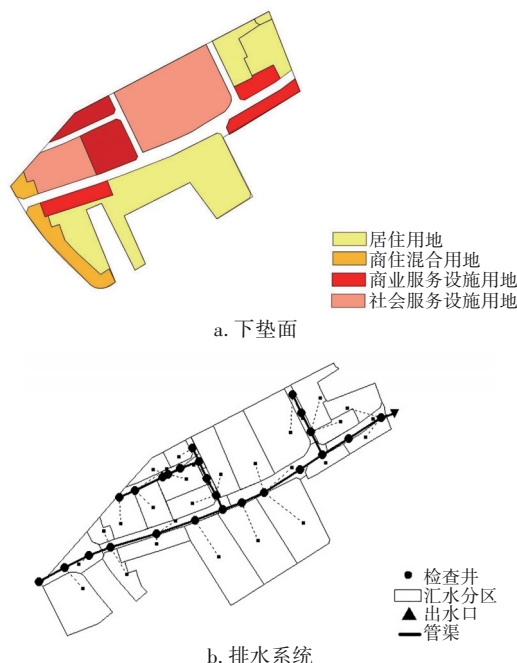
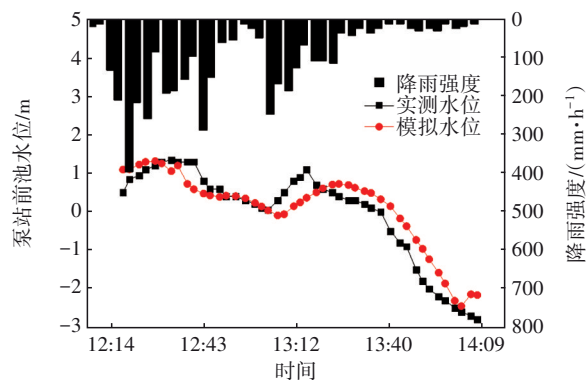


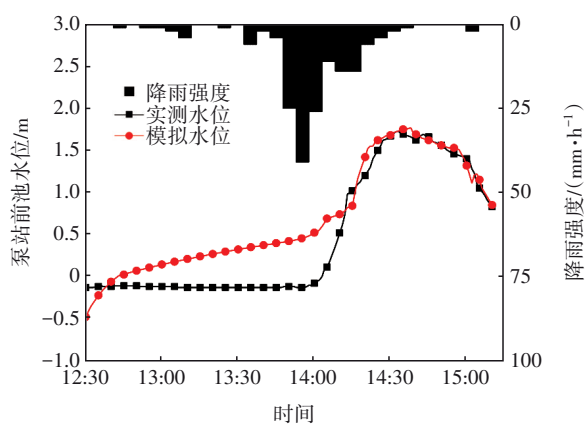
图2 研究区域A的下垫面与排水系统分布

Fig.2 Distribution of underlying surface and drainage system of A sub-catchment

参考相关文献、模型用户手册和实地监测值^[1]选择管网模型参数,其中产流过程计算采用Horton方程模拟降雨入渗过程。模型参数敏感度分析参考谭琼等^[2]、董欣等^[3]的研究方法,选择灵敏度较高参数的初始值来提高管网模型率定效率。选取W区域内泵站SCADA系统中2015年的2场降雨对模型进行率定和验证,如图3所示。结果表明,纳什效率系数(NS)均在70%以上,满足模型使用要求。



a. 2015年7月11日降雨事件



b. 2015年8月7日降雨事件

图3 W区域泵站前池水位模拟值与实测值对比(模型率定与验证)

Fig.3 Comparison between simulated and measured water levels in forebay of pumping station in W area (model calibration and verification)

使用上述经率定与验证后的管网水力模型评估A区域的排水能力,在1年一遇1h设计降雨(36.5 mm)条件下,A区域无积水,满足1年一遇排水标准;在5年一遇1h设计降雨(58 mm)条件下,A区域积水量为681 m³。以A区域排口的5年一遇下游水位过程线作为边界条件(见图4),评估源头绿色海绵设施和灰色调蓄设施对排水系统提标的效果。

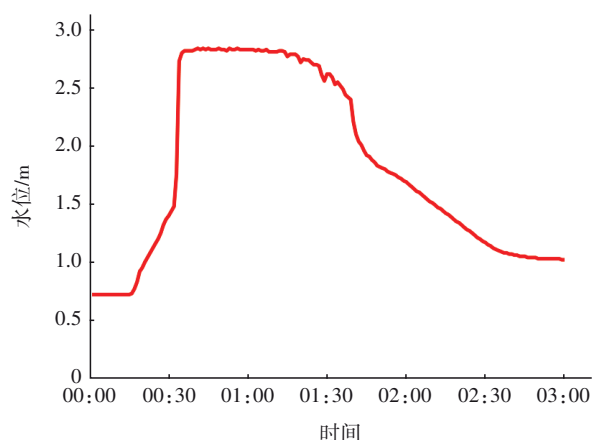


图4 A区域排口的5年一遇下游水位过程线

Fig.4 Downstream hydrograph of the outlet in A area under 5-year return period

采用SWMM模型对A区域进行长序列连续降雨模拟,评估海绵城市建设前的年径流总量控制率。选用接近上海多年平均值的1996年(年降雨量为1 183 mm)的分钟降雨数据^[4],蒸发量采用上海多

年各月平均蒸发量数据。模拟结果显示,A区域海绵城市建设前的年径流总量控制率为28%。

3 绿色海绵设施和灰色调蓄设施的提标效果

3.1 源头绿色海绵设施的提标效果

根据A区域海绵城市建设要求,年径流总量控制率目标为75%,为便于研究,源头绿色海绵设施采用生物滞留设施概化,按照规划年径流总量控制率75%(设计降雨量为22.2 mm),结合下垫面共布置2 745 m²,下凹深度为0.2 m,下凹调蓄体积共549 m³,其中海绵设施的面积与其服务的汇水面积比为10%。采用长序列连续降雨模拟,得到其年径流总量控制率为77%,满足海绵城市建设目标要求。采用5年一遇1h设计降雨评估其排水能力,积水量为477 m³,相比无海绵设施时减少了204 m³,且远小于其调蓄容积。通过分析降雨过程线可知,峰现时间为第25分钟,对应降雨量为22 mm,服务面积比为10%,此时已有220 mm的降雨产生的径流进入生物滞留设施,模型中峰值出现前,生物滞留设施显示已经充满水,峰值到来时生物滞留设施已无调蓄空间,导致其削峰能力下降。因此,可通过调整海绵设施的服务面积比提高其提标能力。分别模拟服务面积比为15%和20%工况下的提标效果及对应的年径流总量控制率,结果如表1所示。

表1 生物滞留设施在不同服务面积比下的提标效果

Tab.1 Upgrading effect of bioretention facilities under different service area ratios

服务面积比/%	年径流总量控制率/%	积水量/m ³	积水减少量/m ³
现状	28	681	—
10	77	477	204
15	66	262	419
20	59.5	313	368

同时分析A区域出口的流量过程线,探究源头绿色海绵设施对提标的影响。因研究区域排水管网存在下游顶托,流量过程线无法直观反映海绵设施建设效果,将其设置为自由出流,三种工况下的出流过程线如图5所示。

由表1可知,随着服务面积比的增加,年径流总量控制率降低;而在服务面积比为15%时,积水量最少,对排水系统的提标效果较好。由图5可知,当服务面积比为15%时,峰值削减和延迟效果最好,与表1结果一致。分析可知,在相同生物滞留设施

调蓄容积下,年径流总量控制率和排水系统提标对海绵设施服务面积比的要求是相反的,但不是线性关系。对于排水系统提标而言,提高服务面积比,会导致生物滞留设施的收水范围减小,在峰值出现时,生物滞留设施有更多的调蓄容积用于削减径流峰值;但是当服务面积比过高时,如表1中的20%,则生物滞留设施的收水范围过小,导致在降雨峰值过后其调蓄容积仍有空余,使得其调蓄容积利用效率降低。对于年径流总量控制率而言,是以一年的日降雨量为单位,过高的服务面积比导致生物滞留设施的收水范围减小,一年中未蓄满水的天数增加,降低了生物滞留设施调蓄容积的利用效率,年径流总量控制率降低。

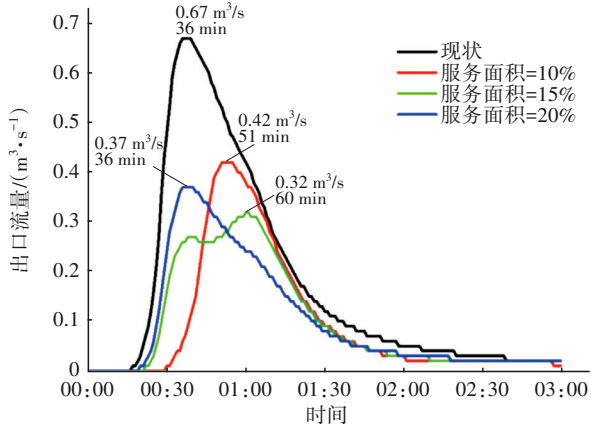


图5 A区域排口流量过程线

Fig.5 Flow hydrograph of the outlet in A area

3.2 灰色调蓄设施的提标效果

根据本底现状5年一遇设计降雨条件下出现681 m³积水的情况,在研究区域主干管承压水面线最低处布置700 m³的调蓄池,其中调蓄池进水管的底高程与排水管网积水点冒溢前检查井内的水位相一致,以最大程度地将调蓄池的容积用于削峰和调蓄积水。模拟结果显示,调蓄池储水量为685 m³,积水全部消除。

综上可知,源头绿色海绵设施与灰色调蓄设施对排水系统提标效果的差别与其进水方式有关。源头绿色海绵设施在径流产生后、进入排水管网前进水;而灰色调蓄设施可通过控制在径流汇入管网后、积水发生前进水,其容积能更好地用于削峰。

3.3 海绵设施与排水系统提标的定量关系

根据最新的《室外排水设计标准》(GB 50014—2021),当采用推理公式法时,排水管渠的雨水设计

流量应按式(1)进行计算,而《雨水规划》提出每个排水系统提标的缺口调蓄容积按照式(2)进行计算。因此,可通过源头绿色海绵设施建设后径流系数的变化,建立源头绿色海绵设施与排水系统提标的关系。同时,利用5年一遇1 h设计降雨模拟径流系数的变化,可以避免降雨强度和降雨时间对径流系数的影响,更为准确地计算源头绿色海绵设施对排水系统提标的贡献。

$$Q_s=q \cdot \Psi \cdot F$$
 (1)

$$V_{需}=10(D_5-D_{现状}) \cdot \Psi \cdot F$$
 (2)

式中: Q_s 为雨水设计流量,L/s; q 为设计暴雨强度,L/(hm²·s); Ψ 为综合径流系数; F 为汇水面积, hm²; $V_{需}$ 为提标所需调蓄量,m³; D_5 为5年一遇设计降雨量,mm; $D_{现状}$ 为基于设计重现期现状管网可以输送的降雨量,mm。

选择不同下垫面地块,根据其年径流总量控制率的建设要求,结合《上海市海绵城市建设指标体系(试行)》,在不同透水比例用地上布置生物滞留设施(服务面积比为15%),并构建模型,评估源头绿色海绵设施建设前后径流系数的变化。其中,模拟降雨为5年一遇1 h设计降雨(58 mm),模拟时长为2 h,根据SWMM模型的模拟结果,综合径流系数按照式(3)进行计算。模拟结果如表2所示。

$$\Psi_5=(D_s+D_L)/D_5$$
 (3)

式中: Ψ_5 为5年一遇设计降雨下的径流系数; D_s 为扣除生物滞留设施调蓄后的地表径流量,mm; D_L 为生物滞留设施穿孔管的外排水量,mm; D_5 为5年一遇设计降雨量,mm。

表2 不同下垫面在不同年径流总量控制率和5年一遇设计降雨条件下的径流系数

Tab.2 Runoff coefficient of different underlying surfaces under different volume capture ratio of annual rainfall and 5-year design rainfall

项 目		不透水面积比例/%						
		20	30	40	50	60	70	80
海绵设施建设前		0.349	0.437	0.522	0.604	0.680	0.751	0.812
年径流 总量控 制率 /%	60	0.289	0.374	0.451	0.534	0.593	0.661	0.720
	65	0.266	0.349	0.431	0.511	0.572	0.641	0.698
	70	0.251	0.324	0.402	0.478	0.547	0.617	0.674
	75	0.221	0.289	0.365	0.445	0.516	0.586	0.642
	80	0.188	0.256	0.329	0.402	0.471	0.544	0.599
	85	0.153	0.202	0.281	0.351	0.412	0.475	0.535

根据表2所示的模拟结果,按照《雨水规划》提

出的每个排水系统提标的缺口调蓄容积按照式(2)进行计算,可将海绵城市建设对排水系统提标的作用通过减小径流系数的方式直接进行计算。以研究区域A为例,在年径流总量控制率为75%的条件下,根据表2中不同下垫面对应的径流系数和A区域的下垫面数据,加权计算得到源头绿色海绵设施建设后的综合径流系数 Ψ_s 为0.341,按照式(2)计算得到提标所需调蓄容积 $V_{需}$ 为271 m³。对比表2中的数据,在年径流总量控制率为75%、服务面积比为15%条件下,A区域的模拟积水量为262 m³,结果基本保持一致,误差为3%,满足规划设计使用要求。

4 结论

在上海市中心城区排水系统从1年一遇提标至5年一遇的规划设计目标下,以某排水系统为例,通过构建数学模型分析源头绿色海绵设施和灰色调蓄设施对排水系统提标的效果。并通过分析5年一遇设计降雨下,不同下垫面和海绵城市建设目标下的径流系数,提出源头绿色海绵设施对排水系统提标容积贡献的计算方法。需要指出的是,本研究建立在雨水排水管道无逆坡、大管套小管等管网本身问题的基础上,若存在上述问题,需结合监测数据和数学模型进一步分析。

参考文献:

- [1] 王溯,李田,冯沧,等.排水系统地下水渗入量的水力学模型辅助评估[J].中国给水排水,2010,26(10):13-18.
WANG Su, LI Tian, FENG Cang, *et al.* Hydraulic model-assisted evaluation of groundwater infiltration rate

into drainage systems [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(10): 13-18 (in Chinese).

- [2] 谭琼,李田,周永潮,等.城市雨水管网模型参数的率定与评价[J].湖南大学学报(自然科学版),2008,35(1):31-35.
TAN Qiong, LI Tian, ZHOU Yongchao, *et al.* Calibration of urban stormwater drainage model [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2008, 35(1): 31-35 (in Chinese).
- [3] 董欣,杜鹏飞,李志一,等. SWMM模型在城市不透水区地表径流模拟中的参数识别与验证[J].环境科学,2008,29(6):1495-1501.
DONG Xin, DU Pengfei, LI Zhiyi, *et al.* Parameter identification and validation of SWMM in simulation of impervious urban land surface runoff [J]. Environmental Science, 2008, 29(6): 1495-1501 (in Chinese).
- [4] 韩松磊,李田.南方平原城市生态滞蓄设施运行效果的模拟评估[J].中国给水排水,2017,33(3):119-122.
HAN Songlei, LI Tian. Simulation and evaluation of operation effect of ecological retention facilities in southern plain cities [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(3): 119-122 (in Chinese).

作者简介:韩松磊(1991-),男,上海人,硕士,工程师,主要研究方向为城市雨洪管理、城市面源污染控制、海绵城市建设等。

E-mail:hansonglei@163.com

收稿日期:2022-09-01

修回日期:2023-02-03

(编辑:刘贵春)

落实绿色发展理念,全面推行河长制