

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.24.002

海绵城市设施建设效果监测体系构建与应用

郭瀛莉¹, 汤 钟², 孙 静², 张 亮², 李 兵¹, 韩京成³,
俞 露², 武晓峰¹, 黄跃飞¹

(1. 清华大学深圳国际研究生院 水科学与工程中心, 广东 深圳 518055; 2. 深圳市城市
规划设计研究院有限公司, 广东 深圳 518028; 3. 深圳大学 化学与环境工程学院,
广东 深圳 518071)

摘 要: 海绵城市作为缓解城市内涝、控制城市水污染的重要策略之一,在我国受到广泛关注。海绵城市建设过程中的效果监测及评估是不可缺少的组成部分,可为海绵绩效考核提供量化指标,为海绵设施的运行维护提供基础数据。结合工程规划及海绵城市“源头-过程-末端”的污染控制技术体系,提出基于“本底-源头-过程-末端”的水量水质效果评估监测体系。在此基础上,以某海绵试点城市为例,对监测体系的构建及实施进行验证。结果表明,海绵设施能有效缓解城市内涝,对面源污染削减效果较好,有利于流域水环境的改善。该监测体系可为海绵城市建成区域运维阶段的水量水质管理提供监测依据和数据参考。

关键词: 海绵城市; 径流调控; 水质管理; 监测体系

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)24-0008-08

Establishment and Application of the Monitoring and Assessment System of Sponge City Facilities Construction

GUO Ying-li¹, TANG Zhong², SUN Jing², ZHANG Liang², LI Bing¹,
HAN Jing-cheng³, YU Lu², WU Xiao-feng¹, HUANG Yue-fei¹

(1. Water Research Center, Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518055,
China; 2. Urban Planning & Design Institute of Shenzhen, Shenzhen 518028, China; 3. College
of Chemistry and Environmental Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518071, China)

Abstract: As one of the vital strategies for mitigating urban waterlogging and controlling urban water pollution, sponge city has garnered widespread attention in China. Concurrently, within the process of constructing sponge cities, monitoring and evaluating the effectiveness is an indispensable component. This evaluation can yield quantitative indicators for assessing sponge performance and provide fundamental data for the operation and maintenance of sponge facilities. Therefore, by integrating the engineering planning and the pollution control technology system of “source-midway-end” approach in sponge city development, this article proposes a water quantity and quality evaluation and monitoring system based on the “background-source-midway-end” framework. Based on above, on site monitoring in a sponge pilot city was used as a case study to demonstrate the applicability of the proposed framework.

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2019B110205005); 国家自然科学基金青年基金资助项目(51908296)
通信作者: 李兵 E-mail: li.bing@sz.tsinghua.edu.cn

The results indicated that sponge facilities can effectively alleviate urban waterlogging, reduce non-point source pollution, and improve the water environment in the watershed. Furthermore, the monitoring system can offer a foundation for monitoring and serve as a data reference for water quantity and quality management during the operation and maintenance phase of the sponge city built-up area.

Key words: sponge city; runoff regulation; water quality management; monitoring system

海绵城市建设的目的是通过水量水质的联合调控,实现径流总量控制、径流峰值控制以及径流污染控制等目标^[1]。鉴于径流污染负荷总量控制可通过控制径流总量实现,各地在海绵城市建设中目前首要关注水量问题,即主要通过建设生物滞留池、植草沟、下凹式绿地等各项海绵设施来调蓄雨水径流、增强入渗,达到径流总量控制目的。构建海绵城市效果监测及评估体系,可为海绵绩效考核提供量化指标,为海绵设施的运行维护提供基础数据^[2]。但是,伴随海绵城市建设的推广普及,如何科学评价海绵城市水量水质的联合调控效果,成为当前海绵城市建设亟需解决的热点和难点问题。

Leng 等^[3]采用降雨-径流模型和河流系统模型相结合的方法建立了水量水质综合评价框架,并以苏州典型平原河网区为例,评价了不同海绵城市建设方案的效果,但尚未构建海绵城市中不同层级的水量水质控制指标监测网络。杨松文等^[4]对海绵城市径流指标评估中监测网络的系统化构建和布点问题进行探讨,并以深圳市海绵城市试点为例提出了具体的监测布点方法,但对水量水质联合调控效果的监测方法尚不清晰。宫永伟等^[5]以济南海绵城市试点区为例,提出整体、流域、典型工程三部分的水量水质监测方案。王泽阳等^[6]以厦门海绵城市试点区为例,结合在线监测和人工监测的技术手段,提出了设施、地块、流域3个层级的监测体系。郭效琛等^[7]以青岛海绵试点区为例,按照“源头-过程-末端”的布点思路,构建了典型措施、项目地块、雨水管网及河道的在线监测布点方案。上述监测体系案例虽然构建了不同层级的水量水质监测方案,但后续监测过程对其方法的验证应用和实施效果还未见报道。因此,结合海绵城市“源头-过程-末端”的面源污染控制技术体系,提出了“本底-源头-过程-末端”的水量水质联合调控效果评估监测体系。在此基础上,以某海绵试点为例进行验证和实施,为国内海绵城市水量水质联合调控的效果评估提

供系统化的监测体系参考。

1 监测体系构建

1.1 监测对象

基于海绵城市建设的“源头-过程-末端”面源污染控制技术(见图1),通过对渗透、储存、调节、输送、截污净化等生态技术的组合应用来加强城市环境管理,实现雨水径流及面源污染控制。一般将发生在城市下垫面和雨水口之前的污染物产生、累积、冲刷过程称为面源污染的源头产生阶段,径流污染物从雨水口到排放口之间的输送过程称为传输阶段,而径流污染物从排放口进入受纳水体的过程称为末端排放阶段。基于“源头-过程-末端”的全过程理念,构建海绵城市“本底-源头-过程-末端”的水量水质监测体系,如图2所示。

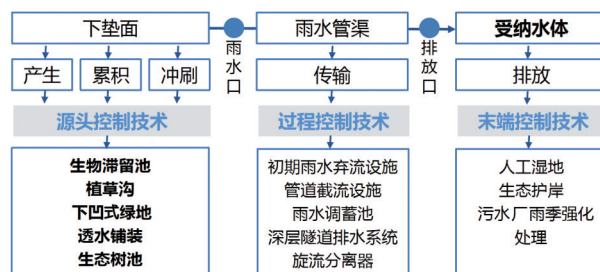


图1 “源头-过程-末端”面源污染控制技术

Fig.1 Non-point source pollution control technology of “source-midway-end”

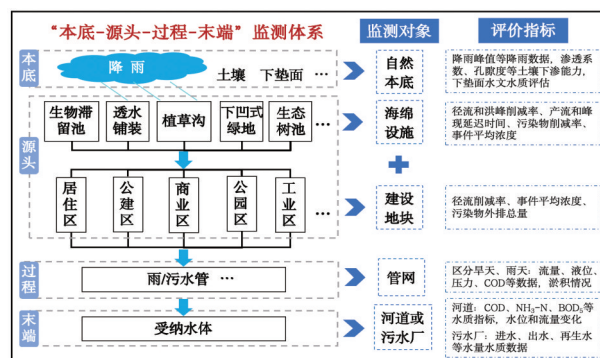


图2 “本底-源头-过程-末端”监测体系

Fig.2 Monitoring system of “background-source-midway-end”

1.1.1 自然本底

通过对目标区域的自然本底进行监测,为后续监测数据提供背景值,监测对象有降雨量、土壤、典型下垫面等。其中降雨量是海绵城市监测工作中区域径流分析的重要基础数据,雨量计的布设需结合试点区域现有气象站的分布情况、试点区域条件和《降水量观测规范》(SL 21—2015)的相关要求进行。试点区域内的土壤下渗能力检测指标包括土壤渗透系数、孔隙度、土壤容重等,检测土壤类型包括居住用地、工业用地、商业用地、绿地等。同时需对海绵设施的下渗能力进行监测,即在掌握目标区域本底土壤自然下渗能力的基础上,对比不同类型海绵设施的下渗雨水量,以判断区域内的径流削减情况。对于不同下垫面的监测,其目的是通过对海绵建设过程中下垫面的水文水质评估,为海绵城市建设、绩效评估和智慧海绵平台的建设积累基础数据。下垫面监测类型包括裸地、草地、路面、铺装、广场和平顶屋面6大类,监测点位于明渠内或明渠末端的雨水井(需记录对应的汇水面积),检测指标包括SS、COD、TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 等水质指标。自然本底监测一次即可,各类典型海绵设施则每半年监测一次。

1.1.2 源头

① 海绵设施

通过监测海绵设施在场次降雨中的流量变化和污染物浓度变化,来评价其水质水量控制效果,明晰雨水径流削减率以及SS、COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、TN等主要污染物削减率。监测方法坚持分散与集中相结合,选取具有代表性且监测条件较好的设施,以更好地反映试点区域内海绵设施的整体情况。进行监测的海绵设施需满足雨水组织情况明确、面积足够大、汇水边界清楚、排水出口清晰以及监测数据易于获得等条件。在入流口、出口(排水管出口)处设置监测点进行流量测量,并对水质进行监测。为反映场降雨过程完整的径流污染变化特征,采用固定时间步长(5 min)进行采样。

② 地块

考虑各海绵设施的组合效果,以不同类型的功能地块作为监测对象,评估海绵建设项目的实施对地块外排径流控制率、污染物削减率的影响。监测地块按照其功能划分为居住区、公建区、工业区、公园区等类型。实施监测的地块应具有海绵城市建

设的典型性和代表性,需提前明确地块内雨水排入市政雨水管网的入口,确保监测数据易于获得。监测点一般位于连接市政雨水管的检查井,监测内容为流量和SS,其中流量为在线自动监测,SS采用在线监测与人工采样监测相结合方式。为反映场降雨过程完整的径流污染变化特征,采用固定时间步长(5 min)进行采样。

1.1.3 过程

基于雨水管网内涝点、管网雨污混接和主干管网下游位置等关键节点的监测,掌握不同频率降雨事件下排水管道水位和流量的变化过程,动态监控试点区域内管网的排水特征。

1.1.4 末端

① 河道

考虑地块外排的径流最终汇入流域水体,对流域内主要河道的水量和水质进行监测,掌握不同频率降雨事件对应的河道水位和流量变化过程,明确径流污染对河道水环境质量的影响程度和量化关系,评估海绵城市建设后水环境的改善效果。监测断面或点位应能反映水体的总体水质、流量或水位状况,尽可能以最少的断面或点位数量获取足够的有代表性的信息。

沿水体每200~600 m间距设置监测点,存在上下游来水的河流水系则应在上游和下游断面设置监测点,且每个水体的监测点不应少于3个。采样点应设置于水面下0.5 m处,水深不足0.5 m时,则设置在水深的1/2处。每1~2周取样应至少1次,且降雨量等级不低于中雨时在降雨结束后的1 d内应至少取样1次,连续测定1年。

② 污水处理厂

污水处理厂的监测内容包括泵站、污水处理厂进水、污水处理厂出水等水质、水量数据。掌握不同频率降雨事件对应的进出水的水量及水质,可为污水处理厂的工艺优化提供数据支撑。

1.2 评价指标

1.2.1 径流调控分析指标

① 场次径流削减率

a. 源头海绵设施。计算场降雨条件下各单项源头设施的径流体积削减率 $\alpha_{\text{场}}$,以定量分析源头设施对径流总量的调控效应,计算式如下:

$$\alpha_{\text{场}} = \left(1 - \frac{V_{\text{排}}}{V_{\text{进}}}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: $V_{\text{进}}$ 为场降雨源头设施入口监测的径流体积, m^3 ; $V_{\text{排}}$ 为场降雨源头设施排口监测的径流体积, m^3 。

b. 地块。计算场降雨条件下地块的径流体积削减率 $\alpha_{\text{场}}$, 以定量分析地块对径流总量的调控效应, 计算式如下:

$$\alpha_{\text{场}}' = (1 - \frac{V_{\text{排}}'}{V_{\text{降}}}) \times 100\% \quad (2)$$

式中: $V_{\text{降}}$ 为一场降雨体积量, m^3 , 即场降雨量 $H_{\text{场}}$ 与汇水面积 A 的乘积; $V_{\text{排}}'$ 为海绵设施实施后地块的场降雨外排径流体积, m^3 。

② 产流和峰现延迟时间

产流延迟时间指实测降雨开始到海绵设施排口产生径流的时间, 以评估不同海绵设施的产流延迟效果。峰现延迟时间指实测降雨量峰值与径流峰值的错峰时间, 峰现时间指排水出口产生洪峰流量的时间, 以监测降雨雨峰出现时刻为参考, 分别计算不同海绵设施的峰现延迟时间, 以评估不同海绵设施的峰现时间控制效果。

1.2.2 径流污染物分析指标

① 污染物削减率

设施污染物削减率 L_h 随降雨量的变化而变化, 其计算式如下:

$$L_h = (1 - \frac{W_{\text{排}}}{W_{\text{进}}}) \times 100\% \quad (3)$$

式中: $W_{\text{进}}$ 为场降雨累计进入设施的污染物总量, kg ; $W_{\text{排}}$ 为场降雨累计排出设施的污染物总量, kg 。

② 事件平均浓度

事件平均浓度 (EMC) 指在场降雨条件下, 排口处的场次径流污染物排放总量与径流体积的比值^[8], 计算式如下:

$$\text{EMC} = \bar{C} = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^T C(t)Q(t)dt}{\int_0^T Q(t)dt} \approx \frac{\sum_{i=1}^n C_i V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (4)$$

式中: M 为场次径流排放某污染物的总质量, g ; V 为场次径流总体积, m^3 ; $C(t)$ 为径流过程某污染物浓度随时间 t 的分布, mg/L ; $Q(t)$ 为 t 时刻的径流量, m^3/s ; T 为场次径流总历时, s ; n 为时间分段数; C_i 为第 i 时间段水样中某污染物的浓度, mg/L ; V_i 为第 i 时间段的径流体积, 即上次采样至本次采样时段内的径流量, m^3 。

2 应用案例

2.1 研究区域概况

某国家海绵城市试点区域城市建设面积为 16.39 km^2 , 试点建设后全面达到试点批复的海绵城市指标要求, 实现了“小雨不积水、大雨不内涝、水体不黑臭、热岛有缓解”的综合海绵绩效。试点区域内包含居住区、公建区、工业区和公园区等不同功能类型的地块, 并采用了生物滞留池、下凹式绿地、生态树池、植草沟、绿色屋顶和透水铺装 (沥青、植草砖) 等海绵设施。

2.2 具体监测信息

2.2.1 海绵设施层级监测

选定监测的海绵设施位于不同的海绵项目, 具体的监测信息如表1所示。监测点位于设施的进口、排口以及溢流口, 监测指标包含流量和水质两项。其中, 生物滞留池的雨水组织主要为上游植草沟的汇水和园区道路雨水, 并通过生物滞留池出口排入市政雨水管网。

表1 各类海绵设施监测信息

Tab.1 Monitoring information of various sponge facilities

类型	设施面积/ m^2	服务面积/ m^2	所属地块	监测点位	监测指标
植草沟	190	280	公园区	设施进口、排口以及溢流口	流量 (在线监测)、SS (在线监测与人工监测相结合的方式)
生物滞留池	190	550	公园区		
透水铺装	120	120	工业区		
生态树池	7	90	公建区		
下凹式绿地	35	1 000	公建区		

2.2.2 地块层级监测

选定监测的地块共包含4种类型: 居住区、公建区、工业区、公园区。监测点位于连接市政雨水管的检查井, 监测指标包含流量和水质两项, 具体的监测信息见表2。

表2 各类地块监测信息

Tab.2 Monitoring information of various blocks

类型	面积/ m^2	所含海绵设施	监测点位	监测指标
居住区	48 819	绿色屋顶、透水铺装、下凹式绿地等	位于连接市政雨水管的检查井	流量 (在线监测)、SS (在线监测与人工采样监测相结合的方式)
公建区	25 243	绿色屋顶、透水铺装、下凹式绿地等		
工业区	152 843	绿色屋顶、下凹式绿地、透水铺装等		
公园区	510 000	生物滞留池、植草沟、生态停车场等		

2.2.3 河道级监测

选定的河道监测点位共 7 个,监测频率为 1 次/周。

2.3 效果评估及分析

2.3.1 海绵设施

① 径流调控分析

表 3 为不同场降雨条件下各源头海绵设施的监测降雨量、峰现延迟时间和场次径流削减率。在源头采取海绵设施能有效削减降雨径流并延缓峰现时间,各海绵设施的外排径流峰值较降雨峰值的延迟时间为 3~59 min,不同海绵设施的场次径流削减率为 20.5%~87.9%。生态树池的场次径流削减率较低,可能是因为监测的生态树池滞蓄空间较小。在 23.7 mm 降雨情景下,下凹式绿地和植草沟的降雨-径流过程如图 3 所示。由图 3 可知,下凹式绿地总进水量为 25.7 m³,总外排量为 6.1 m³,径流控制率为 76.3%,高于植草沟(56.4%)。即下凹式绿地的下凹空间能更大程度地汇集周围不透水地面产生的雨水径流,起到调蓄下渗的作用。

表 3 各海绵设施的径流调控效果

Tab.3 Runoff control effect of various sponge facilities

措施类型	监测降雨量/mm	峰现延迟时间/min	场次径流削减率/%
生物滞留池	11.6	6	87.9
下凹式绿地	23.7	3	76.3
植草沟	23.7	17	56.4
透水铺装	14.0	59	85.8
生态树池	11.5	28	20.5

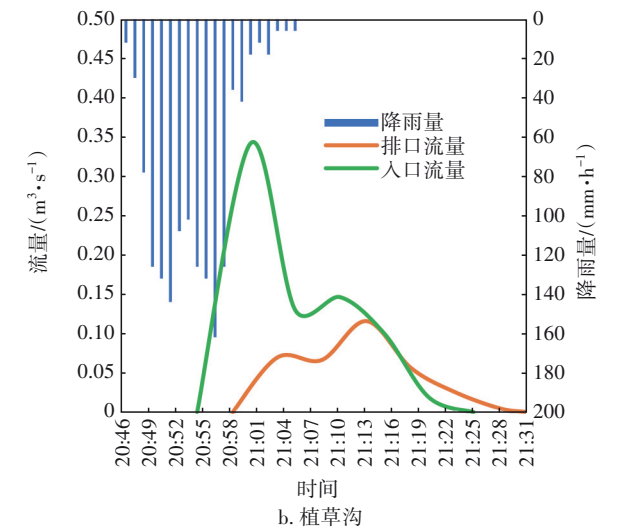
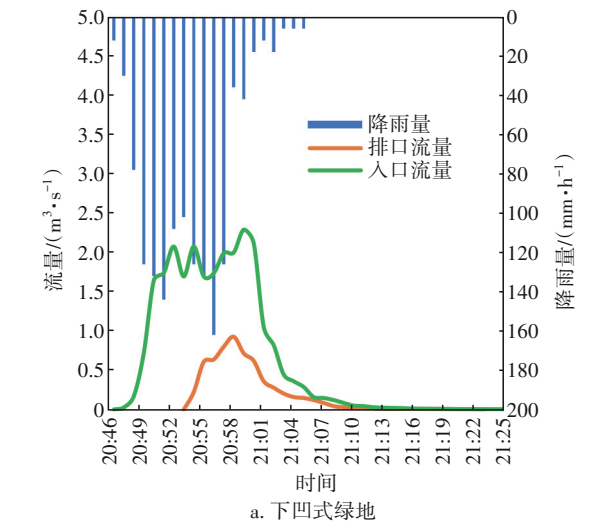


图 3 23.7 mm 降雨情景中下凹式绿地和植草沟径流过程比较

Fig.3 Comparison of runoff process between sunken lawn and grassed swales under 23.7 mm rainfall

② 径流污染分析

表 4 为不同场降雨条件下各源头海绵设施的监测降雨量、SS 最大值和最小值及其 EMC。可知,在暴雨 87.5 mm 情景下,透水铺装排口 SS 最大值为 243 mg/L,EMC 为 48.5 g/m³,均大于其他海绵设施,即透水铺装表面的污染物含量相对较高,应注意养护清洗。在同样的降雨情景下,下凹式绿地排口 SS 最大值为 12 mg/L,EMC 为 5.4 g/m³;植草沟排口 SS 最大值为 36 mg/L,EMC 为 28.6 g/m³。此外,对下凹式绿地和植草沟的进口处及排口处的污染物 SS 进行了监测,结果见图 4。根据计算,下凹式绿地(面积为 35 m²)的 SS 总进入量为 0.36 kg,总外排量为 0.12 kg,削减率为 66.5%。植草沟(面积为 190 m²)的 SS 总进入量为 0.60 kg,总外排量为 0.07 kg,削减率为 88.1%。

表 4 各海绵设施的径流污染物(SS)浓度分析

Tab.4 Analysis of runoff pollutant(SS) concentration of sponge facilities

措施类型	监测降雨量/mm	排口 SS 最大值/(mg·L ⁻¹)	排口 SS 最小值/(mg·L ⁻¹)	EMC/(g·m ⁻³)
生物滞留池	17.6	29	22	26.4
下凹式绿地	87.5	12	4	5.4
植草沟	87.5	36	12	28.6
透水铺装	87.5	243	19	48.5
生态树池	35.9	30	13	19.8

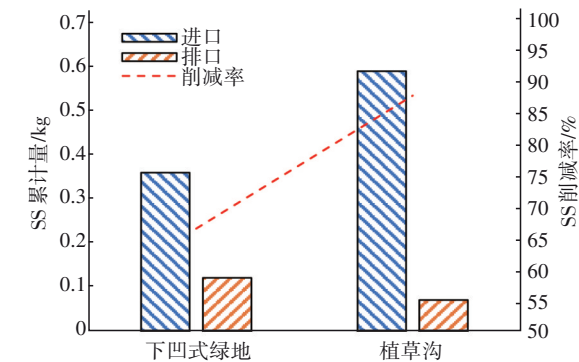


图4 相同降雨情景中下凹式绿地和植草沟对SS的削减效果比较

Fig.4 Comparison of SS removal effect between sunken lawn and grassed swales under the same rainfall

2.3.2 地块

① 径流调控分析

表5为不同场降雨条件下各地块的监测降雨量、峰现延迟时间和场次径流削减率。在不同功能区的地块中,采取海绵城市建设措施能有效延迟峰现时间(10~16 min),同时有效减少降雨径流外排量,场次径流削减率为92.7%~98.1%。在降雨量为26.3 mm、历时约68 min的情景下,对比了居住区、工业区和公建区3种地块的降雨-径流过程,结果见图5。

表5 不同降雨条件下各地块的径流调控效果

Tab.5 Runoff control effect of different blocks under different rainfall

地块分类	监测降雨量/mm	峰现延迟时间/min	场次径流削减率/%
居住区	26.3	14	98.1
公建区	26.3	10	92.7
工业区	26.3	13	97.5
公园区	46.6	16	93.4

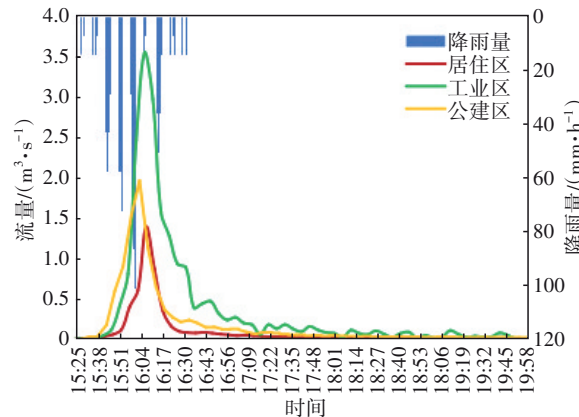


图5 相同降雨下居住区、工业区和公建区的径流过程比较

Fig.5 Comparison of runoff processes in residential, industrial, and public areas under the same rainfall

由表5和图5可以看出,在相同降雨条件下,居住区的峰现延迟时间最长(14 min),场次径流削减率最高(98.1%)。统计结果表明,居住区内总降雨量体积为1 283.94 m³,总外排量为24.9 m³,外排量占总降雨量的比例为1.9%。公建区内的总降雨量体积为694.43 m³,总外排量为51.12 m³,外排流量占总降雨量的比例为7.3%。工业区内总降雨量体积为3 998 m³,径流量峰值较雨量峰值延迟13 min,总外排量为98.96 m³,外排流量占总降雨量的比例为2.5%。

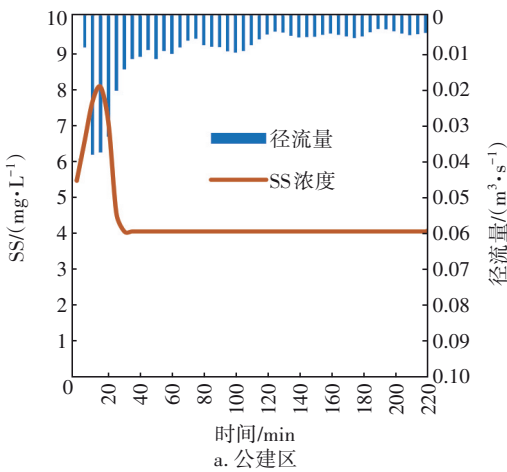
② 径流污染物分析

表6为不同场降雨条件下各地块的监测降雨量、SS浓度最大和最小值、EMC及SS总排放量。在雨量为62.1 mm的暴雨情景下,居住区排口SS浓度最大值和最小值分别为276 mg/L和8 mg/L,在第75分钟监测到SS的最后一次有效浓度为10 mg/L,排口监测到的SS总排放量为3.92 kg,经计算得到EMC为64.5 g/m³。在雨量为54.9 mm的暴雨情景下,公建区和工业区的径流量和SS浓度变化曲线如图6所示。

表6 各地块的径流污染物浓度分析

Tab.6 Analysis of runoff pollutant concentration of different blocks

地块分类	监测降雨量/mm	排口SS浓度最大值/(mg·L⁻¹)	排口SS浓度最小值/(mg·L⁻¹)	SS总排放量/kg	EMC/(g·m⁻³)
居住区	62.1	276	8	3.92	64.5
公建区	54.9	8	4	0.50	4.5
工业区	54.9	45	9	19.70	20.5
公园区	100.9	45	5	14.90	10.3



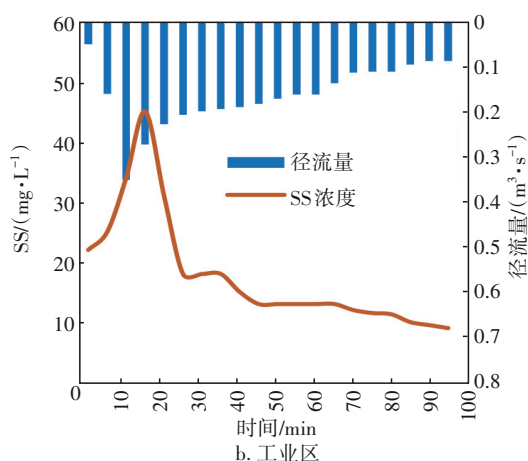


图6 54.9 mm暴雨下公建区和工业区的径流量和SS浓度变化

Fig.6 Variation of SS concentration and flow of runoff in public and industrial blocks under the 54.9 mm rainstorm

公建区出流开始后第15分钟SS浓度达到峰值(8 mg/L),较径流量峰值延迟5 min,之后浓度逐渐下降,在第195分钟监测到最后一次有效浓度为4 mg/L,本场降雨SS总排放量为4.5 kg,EMC为4.5 g/m³;工业区出流开始后第15分钟SS浓度达到峰值(45 mg/L),之后浓度逐渐下降,在第95分钟监测到最后一次有效浓度为9 mg/L,本场降雨SS总排放量为19.7 kg,计算得到EMC为20.5 g/m³。相对来说,公建区地表径流水质较好,而工业区地表径流水质较差。

2.3.3 流域

海绵设施建设有利于流域水环境的改善。2015年试点区内某河道水质较差,氨氮和总氮等指标在各月份监测数据均高于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2022)中V类水体的限值,因此海绵城市建设前该河道的水质为劣V类。海绵改造后,2018年7月—2019年6月在该河道上游和下游开展了水质监测,发现化学需氧量、总磷、氨氮均值分别为24.5、0.32、2.5 mg/L,均低于2015年的监测值,表明该河道水质在逐渐改善。

3 讨论

构建了4个层级“本底-源头-过程-末端”的水量水质监测体系,可为海绵城市建设区域的水量水质联合调控效果评估监测提供思路。在“本底-源头-过程-末端”监测体系的指导下,应进行自然本底的监测,通过对不同下垫面的监测和模拟得出相

关径流系数和土壤渗透系数,可为试点区域相关规划设计和标准的制定提供参考。未来应完善对厂网的监测,为排水系统和污水处理厂的现状运行情况评估、日常运行风险识别提供数据支撑。通过对基本水质指标的监测,把握污水排放特点,为雨污分流改造、径流污染控制、黑臭整治效果提供监测佐证。基于监测体系中各监测对象的长期监测数据,积累大量且全面的监测数据,有利于海绵城市建设项目的控制效果计算,以更准确地评估和预测海绵城市建设对水量水质的联合调控效果^[9]。后期建立项目数据库^[10],如典型海绵设施的监测数据,可为不同海绵建设项目中海绵设施的布设提供数据参考,有助于海绵城市的进一步推广与应用。

此外,考虑将“本底-源头-过程-末端”的监测数据在逻辑上进行有效关联,在流域层级设置水量水质控制总目标,再通过逐层拆解,确定流域内地块层级的水量水质控制目标,以便优化地块内的海绵设施组合。为了更好地对“本底-源头-过程-末端”不同层级的监测数据进行评估,应设置一套标准,对收集的原始数据进行规范,统一各层级监测数据的信息精度质量。同时,应增大水质传感器、水位传感器等监测设备的投入、使用和定期维护,长期采集不同层级监测点位的水量水质数据,利用监测大数据辅助海绵城市建设的管理维护和效果评价^[11],同时建立海绵城市智慧化管理信息共享平台,为不同城市内涝积水以及面源污染治理提供数据参考并提升治理能力。

4 结论

结合海绵城市“源头-过程-末端”的水量水质控制技术,构建了一套“本底-源头-过程-末端”的监测体系,包括自然本底、典型海绵设施、典型地块、管网、污水处理厂以及流域主要河道断面的监测评估。并以某海绵城市试点片区为例验证其实用性,针对研究区内不同对象,即海绵设施、地块以及流域主要河道,提出具体的监测方案,对各监测对象进行了降雨-径流过程的水质水量分析。验证表明,源头海绵措施能有效延缓峰现时间、控制径流量及减少面源污染。不同海绵设施的场次径流削减率为20.5%~87.9%,下凹式绿地和植草沟的SS削减率分别为66.5%和88.1%。在不同类别地块中采取海绵措施,能有效减少降雨径流的外排

量,场次径流削减率为92.7%~98.1%,同时有效减少了悬浮物的排放量。此外,海绵城市建设还有利于流域水环境的改善。

参考文献:

- [1] 张建云,王银堂,胡庆芳,等. 海绵城市建设有关问题讨论[J]. 水科学进展, 2016, 27(6): 793-799.
ZHANG Jianyun, WANG Yintang, HU Qingfang, *et al.* Discussion and views on some issues of the sponge city construction in China[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(6): 793-799 (in Chinese).
- [2] XIA J, ZHANG Y Y, XIONG L H, *et al.* Opportunities and challenges of the sponge city construction related to urban water issues in China[J]. Science China (Earth Sciences), 2017, 60(4): 652-658.
- [3] LENG L Y, MAO X H, JIA H F, *et al.* Performance assessment of coupled green-grey-blue systems for sponge city construction [J]. Science of the Total Environment, 2020, 728:138608.
- [4] 杨松文,陈铁,周志鹏,等. 海绵城市径流指标评估监测网络的构建方法[J]. 环境工程学报, 2020, 14(11): 3225-3233.
YANG Songwen, CHEN Tie, ZHOU Zhipeng, *et al.* Construction method of monitoring network for runoff index evaluation in sponge city [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(11): 3225-3233 (in Chinese).
- [5] 宫永伟,张新勃,李慧文,等. 济南市海绵城市建设试点区水量水质监测方案[J]. 中国给水排水, 2017, 33(11): 116-119, 127.
GONG Yongwei, ZHANG Xinbo, LI Huiwen, *et al.* Plan for water quantity and quality monitoring at a sponge city pilot site in Jinan [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(11): 116-119, 127 (in Chinese).
- [6] 王泽阳,关天胜,吴连丰. 基于效果评价的海绵城市监测体系构建——以厦门海绵城市试点区为例[J]. 给水排水, 2018, 44(3): 23-27.
WANG Zeyang, GUAN Tiansheng, WU Lianfeng. Construction of sponge city monitoring system based on effect evaluation—a case study of Xiamen sponge city pilot area[J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(3): 23-27 (in Chinese).
- [7] 郭效琛,赵冬泉,崔松,等. 海绵城市“源头-过程-末端”在线监测体系构建——以青岛市李沧区海绵试点区为例[J]. 给水排水, 2018, 44(8): 24-28.
GUO Xiaochen, ZHAO Dongquan, CUI Song, *et al.* Construction of “Source-Process-End” on-line monitoring system for sponge city: a case study of sponge pilot area in Licang District, Qingdao City[J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(8): 24-28 (in Chinese).
- [8] 陈莹,王昭,赵剑强,等. 样品数量对径流事件平均浓度估算结果的影响——以时间间隔采样法为例[J]. 中国环境科学, 2017, 37(2): 620-627.
CHEN Ying, WANG Zhao, ZHAO Jianqiang, *et al.* Impacts of sampling size on estimation accuracy of road runoff event mean concentration — taking time-interval sampling method for example [J]. China Environmental Science, 2017, 37(2): 620-627 (in Chinese).
- [9] 郭效琛,杜鹏飞,辛克刚,等. 基于监测与模拟的海绵城市典型项目效果评估[J]. 中国给水排水, 2019, 35(11): 130-134.
GUO Xiaochen, DU Pengfei, XIN Kegang, *et al.* Performance evaluation of typical projects in sponge city based on monitoring and simulation [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(11): 130-134 (in Chinese).
- [10] 许申来,周影烈,李王锋,等. 海绵城市理念下流域协同治理策略思考与探索[J]. 中国给水排水, 2021, 37(2): 1-6.
XU Shenlai, ZHOU Yinglie, LI Wangfeng, *et al.* Exploration and thought on the strategy of basin coordinated management under the concept of sponge city [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(2): 1-6 (in Chinese).
- [11] 王浩正,刘智晓,刘龙志,等. 流域治理视角下构建弹性城市排水系统实时控制策略[J]. 中国给水排水, 2020, 36(14): 66-75.
WANG Haozheng, LIU Zhixiao, LIU Longzhi, *et al.* Real time control solutions for urban drainage system under watershed treatment [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(14): 66-75 (in Chinese).

作者简介:郭瀛莉(1997-),女,广西贵港人,硕士研究生,主要从事海绵城市相关研究。

E-mail: 705832931@qq.com

收稿日期:2021-01-25

修回日期:2021-01-25

(编辑:丁彩娟)