

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.19.018

初雨调蓄池布置方式对管道沉积物污染控制研究

张青文¹, 余 健²

(1. 上海市政工程设计研究总院集团第六设计院有限公司, 安徽 合肥 230031; 2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘 要: 为了控制管道沉积物在径流雨水冲刷下对受纳水体造成的污染,采用雨水调蓄池截流初期雨水来削减高比例的降雨径流污染负荷,利用SWMM软件模拟研究了末端集中式和沿线分散式初雨调蓄池对污染物的控制效果。结果表明,4座沿线分散式初雨调蓄池能够降低沿线管道流量,减少管道沉积物冲刷和初期雨水溢流现象,相较于同容积下的1座末端集中式初雨调蓄池,在两场降雨中对悬浮物的平均削减率由68.58%提升至78.68%,在实际单块用地面积不足的情况下,采用分散式小面积调蓄池能够获得更好的环境效益。

关键词: 雨水调蓄池; 初期雨水; 管道沉积物; SWMM

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)19-0114-06

Effect of Initial Rainwater Storage Tank Layout on Control of Sewer Sediment Pollution

ZHANG Qing-wen¹, YU Jian²

(1. The Sixth Design Institute of Shanghai Municipal Engineering Design Institute Group Co. Ltd., Hefei 230031, China; 2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: To control the sewer sediment pollution to receiving water caused by runoff flushing, rainwater storage tanks were used to intercept the initial rainwater to reduce its high proportion of pollution load, and SWMM software was used to simulate the pollutants control effects of the terminal centralized and local distributed initial rainwater storage tanks. The results showed that the four local distributed initial rainwater storage tanks could reduce the pipeline flow, sewer sediment erosion and initial rainwater overflow. Compared with one terminal centralized initial rainwater storage tank with the same volume, the pollutants reduction rate increased from 68.58% to 78.68%. When the area of single land is insufficient, the local distributed storage tank with small footprint area can obtain better environmental benefits.

Key words: rainwater storage tank; initial rainwater; sewer sediment; SWMM

近年来,城市水污染问题日益严重,逐渐成为社会可持续发展的主要障碍之一,我国也对水环境质量提出了更高的要求。由大气沉降、人类活动等产

生的污染物随径流雨水进入排水管道,产生管道沉积物,因其受径流雨水冲刷产生的非点源污染已成为水体污染的重要来源。由于降雨径流污染存在一

通信作者: 张青文 E-mail: zqwym1018@163.com

定的初期冲刷效应,在理论上通过截流初期小部分雨水就能够获得较高的污染物控制率。因此在各项水污染防治措施中,雨水调蓄池凭借其较高的污染物控制率和较好的经济性得到了广泛的应用^[1]。上海市曾经在苏州河水环境治理中利用调蓄池削减合流制溢流污染,使COD浓度最高降低了157 mg/L^[2]。

作为收集高污染负荷初期雨水的设施,初雨调蓄池的规模大小、布置位置及运行管理模式是影响截污效果的关键性因素,也引起了众多学者的研究讨论^[3-4]。但在目前的研究中,为了方便调蓄池运行管理,多数采用大面积集中式调蓄池,而在用地受限的情况下其应用存在一定困难。为此,笔者利用模型分析了沿线分散式小面积初雨调蓄池相对于末端集中式调蓄池在水污染控制效果上的差异,以期为用地面积不足情况下采用多个小面积调蓄池提供一定理论依据。

1 研究区域及方法

1.1 研究区域概况

选取广州市某居民和商业区作为研究对象,总面积约为34.19 hm²。市区年降雨量约为1 720 mm,降雨量年内分布不均匀,主汛期为4月—6月。雨水降落至屋顶、道路和绿地3种下垫面属性上,各部分所占比例分别为32.2%、42.2%、25.6%,经分流制雨水管网汇入珠江。雨水管道总长度为3 796.3 m,管径为400~1 800 mm。片区内存在施工以及机动车、人为活动等造成的面源污染源。广州市《排水渠渠维修养护技术规范》(DB 4401/T 28—2019)规定,对于600 mm≤D≤1 000 mm的雨水管道应平均每半年清疏一次,但由于管渠养护工作不到位,常常导致管渠内沉积大量淤泥而得不到清理,因此以管

道沉积物为主的降雨径流污染较为严重。

1.2 污染物负荷计算

管道内污染物主要包括汇水面污染和沉积物污染。雨水管道沉积物理论上来源于汇水面上从雨水口进入的污染物质,研究区域内主要为悬移质颗粒物,忽略底物浓度的影响,其变化规律理应大致符合汇水面污染冲刷模型^[5],见式(1)。经物料平衡公式(2)推导产生管道沉积物产流模型,见式(3)。对研究区域管道内雨水进行水质检测发现,悬浮物(SS)浓度变化较大,其余指标浓度较低且无较大波动,因此本研究以SS浓度来表征沉积物含量,利用式(3)模拟管道沉积物产流过程,以实测的水力和水质数据对式(3)中的参数 C_1 、 C_2 进行拟合并验证。并将一节管段视为一个完全混合式反应器,研究沉积物在一维管线的汇流过程,见式(4)。此外还借助SWMM模型来模拟产流、地表径流、汇水面污染物的累积和冲刷以及管网汇流过程,计算不同时刻各管段、节点的汇水面污染负荷值,并将两种污染物进行叠加。

$$W = C_1 Q^{C_2} \quad (1)$$

式中: C_1 为冲刷系数; C_2 为冲刷指数; W 为污染物冲刷速率,mg/s; Q 为流量,L/s。

$$L_{\text{沉积物}} = L_{\text{下游}} - L_{\text{上游}} - L_{\text{雨水口}} \quad (2)$$

式中: $L_{\text{下游}}$ 和 $L_{\text{上游}}$ 分别为管道下游和上游检查井断面的污染负荷,mg; $L_{\text{雨水口}}$ 为雨水口的径流污染负荷,mg; $L_{\text{沉积物}}$ 为管道沉积物冲刷所释放的污染负荷,mg。

$$S_{\text{沉积物}} = \frac{L_{\text{沉积物}}}{60Qt} = \frac{W}{Q} = C_1 Q^{C_2-1} \quad (3)$$

式中: $S_{\text{沉积物}}$ 为管道沉积物冲刷释放污染物浓度,mg/L; t 为相邻采样时间间隔,min。

$$M_i = \begin{cases} C_1 Q_{k,t_0}^{C_2-1} \\ \frac{C_1 Q_{k-1,t_0}^{C_2} + C_1 (Q_{k,t_1} + Q_{k-1,t_0})^{C_2}}{Q_{k,t_1} + Q_{k-1,t_0}} \\ \vdots \\ \frac{C_1 Q_{1,t_0}^{C_2} + C_1 (Q_{1,t_0} + Q_{2,t_1})^{C_2} + \cdots + C_1 (\sum_{i=1,j=0}^k Q_{i,t_j})^{C_2}}{\sum_{i=1,j=0}^k Q_{i,t_j}} \end{cases} \quad \begin{matrix} t = t_1 \\ t = t_2 \\ \vdots \\ t \geq t_k \end{matrix} \quad (4)$$

式中: M_i 为 t_i 时刻管段 k 的混合沉积物浓度,mg/L; $Q_{k,i}$ 为 t 时刻管段 k 的上游节点边侧进流量,L/s。

图1为雨水及污染物汇流示意图, t 时刻各节点

边侧进流量分别为 $Q_{1,t}$ 、 $Q_{2,t}$ 、 \cdots 、 $Q_{n,t}$ 。 t_1 时刻,管段 k 冲刷产生的沉积物浓度 $S_k = C_1 Q_{k,t_0}^{C_2-1}$, t_2 时刻管段 $k-1$ 冲刷产生的沉积物进入管段 k ,混合后产生的沉

积物浓度 $M_k = \frac{C_1 Q_{k-1,t_0}^{C_2} + C_1 (Q_{k,t_1} + Q_{k-1,t_0})^{C_2}}{Q_{k,t_1} + Q_{k-1,t_0}}$, 直

到 t_k 时刻管段1冲刷产生的沉积物汇入管段 k , 全管段参与汇流, 管段 k 流量达到峰值。

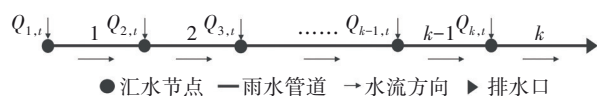


图1 雨水及管道沉积物汇流示意

Fig.1 Diagram of rainwater and sewer sediment confluence

2 模型的构建与验证

2.1 水力与水质模型

以SWMM模型作为研究区域水力与汇水面污染模型,对研究区域进行汇水面划分、管网概化、参数提取、子计算模块构建等,共得到129个子汇水区、125条雨水管道、124个节点和1个排放口,根据现有资料输入管长、管径、子汇水区面积、不透水率等具有实际物理意义的参数,借鉴前人经验^[6-7]输入并率定子汇水区特征宽度、曼宁系数、透水地面和不透水地面的注蓄量、污染物累积与冲刷参数等经验参数,通过连续性方程、曼宁公式、动量方程、污染物累积与冲刷方程等完成雨水流量、水位及汇水面污染的模拟计算。

以式(4)作为管道沉积物污染模型,通过2019年3月9日实测降雨数据拟合得到模型参数,降雨特征见表1,以SS作为污染物指标,所得模型参数 C_1 、 C_2 分别为1.855 6、1.275 5。用5场降雨数据对模型进行验证,验证项为节点水位、汇水面SS及管道沉积物SS,以确保模型的准确性。用纳什效率系数(NSE)^[8]评价模拟结果与实测结果的吻合性,结果见表2,纳什效率系数均大于0.7,说明所构建模型准确可靠,可用于不同降雨情景下汇水面和沉积物污染的模拟。

表1 降雨特征

Tab.1 Rainfall characteristics

项 目	降雨历时/h	降雨量/mm	平均雨强/(mm·min ⁻¹)	前期干旱期/d	降雨类型
2019-03-09	2.25	13	0.096	0.04	中雨
2019-03-22	0.50	17	0.567	6	中雨
2019-04-13	2.00	34	0.283	1	大雨
2019-10-10	3.00	21	0.117	3	中雨
2019-10-13	2.67	33	0.206	2	大雨
2019-10-23	2.00	15	0.125	9	中雨

表2 模型验证结果

Tab.2 Validation results of model

项 目	节点水位	节点汇水面SS	管道沉积物SS	
			管段1	管段2
2019-03-22	0.966	0.980	0.885	0.880
2019-04-13	0.793	0.811	0.808	0.827
2019-10-10	0.862	0.880	0.711	0.735
2019-10-13	0.841	0.925	0.895	0.807
2019-10-23	0.812	0.908	0.801	0.778

2.2 调蓄池模型

以SWMM软件中的蓄水单元作为初雨调蓄池,对末端集中式与沿线分散式两种情况进行截污效能的模拟,末端集中式在排口处设置一个蓄水单元,沿线分散式则根据研究区域降雨径流污染现状分成4个子区域(面积分别为5.42、10.17、10.85、7.75 hm²),每个子区域管网末端增设蓄水单元,如图2所示。

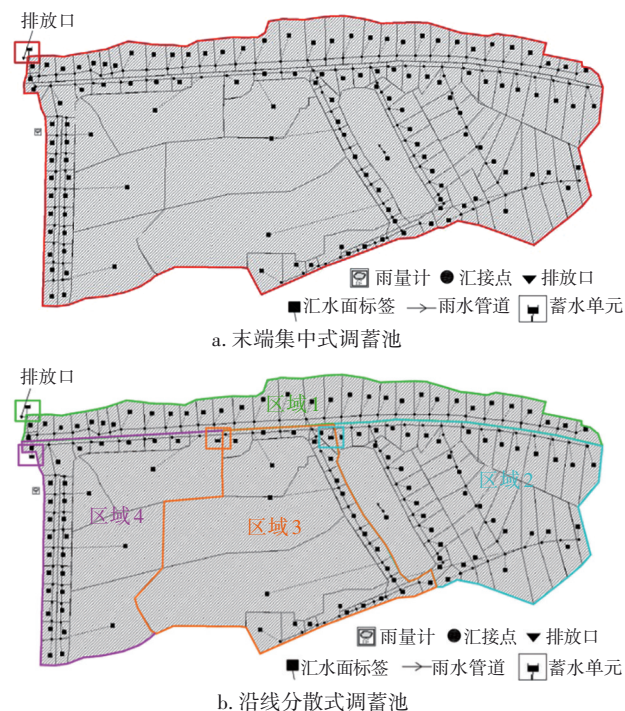


图2 调蓄池位置示意

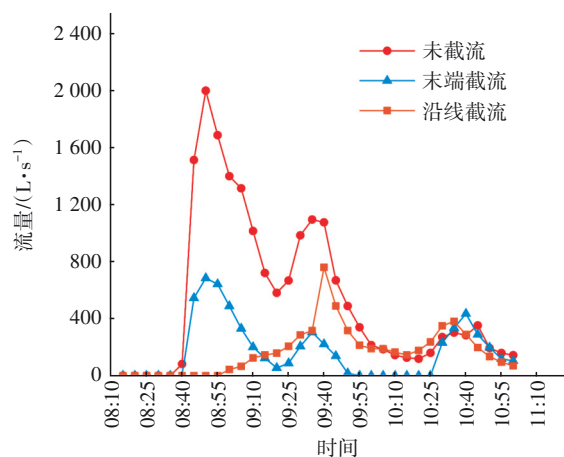
Fig.2 Schematics of storage tank location

由于本研究重点考察初雨调蓄池布置方式对截污效果的影响,对调蓄池容积不进行过多的探讨,以笔者前期研究得出的10.1 mm初期雨水量作为计算依据,利用初期雨水动态汇流过程经图解法求得调蓄池容积为3 700 m³。其中,各子区域的分散式初雨调蓄池容积分别为700、900、1 100、1 000

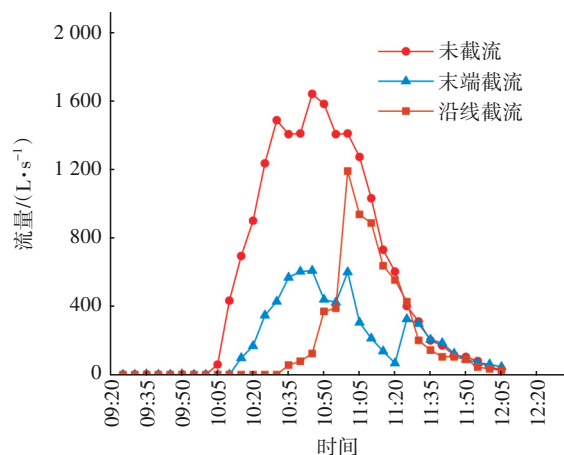
m^3 。在蓄水单元添加控制语句,使调蓄池达到满容积时停止进水,以2019年4月13日和10月13日两场降雨的实测数据模拟计算调蓄池及雨水管网排口的流量和SS浓度,分析调蓄池的截污效果和对受纳水体的环境效益。

3 结果与讨论

雨水管网排口流量过程线如图3所示。调蓄池能够有效削减雨水管网排口流量,将初期雨水截流,降低初期雨水对受纳水体的污染。4月13日降雨中末端集中式和沿线分散式初雨调蓄池分别能够截流3747.06、3744.72 m^3 的雨水量,10月13日分别能够截流3700.84、3700.85 m^3 的雨水量,与3700 m^3 调蓄池容积误差较小。



a. 4月13日降雨



b. 10月13日降雨

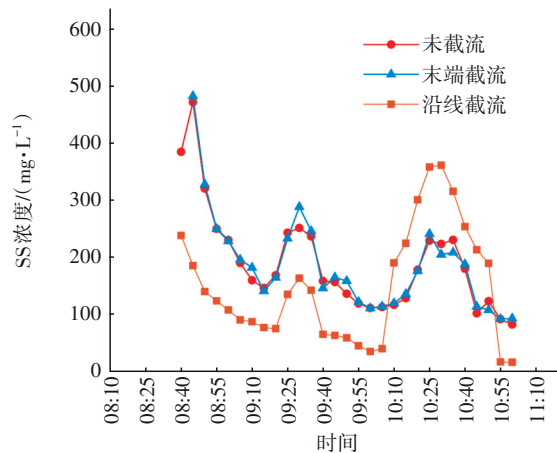
图3 雨水管网排口流量过程线

Fig.3 Drainage hydrograph of rainwater pipe network

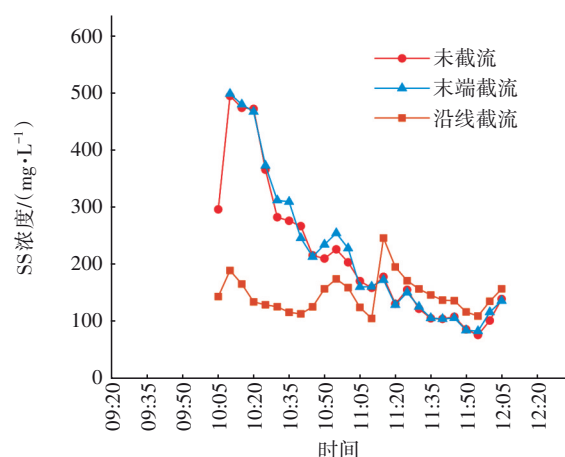
由于集中式调蓄池并未改变管网沿线流量,在洪峰时流量过大,管道满载运行,故一部分污染物浓度较高的初期雨水会越过截流设施而从排口溢

流,导致末端集中式调蓄池在前期未达到满容积时排口仍有较高的雨水流量。而沿线分散式调蓄池通过收集子区域初期雨水,降低管道流量,管道不易发生超负荷运行情况,当调蓄池达到满容积时排口才有较为洁净的雨水排出,排口流量在后期才开始增大。

雨水管网排口SS浓度过程线如图4所示。由于末端集中式调蓄池并未改变污染物的累积、冲刷和汇流过程,排口SS浓度过程线与未截流时基本重合,调蓄池对径流雨水SS浓度无明显影响,其对污染物的控制通过截流部分初期雨水来实现,4月13日和10月13日两场降雨分别削减了68.71% (855.69 kg)和68.47% (953.14 kg)的悬浮物。而采用沿线分散式调蓄池时排口SS浓度在前期有所降低,这是因为管道流量的降低能够减轻雨水对管道沉积物的冲刷,从而降低管道沉积物对受纳水体的污染;而在后期SS浓度则比未截流时有所升高,这是因为各子区域调蓄池并不是独立运行的,上游调蓄池未截流的雨水经管网汇流冲刷沉积物使其SS浓度增大,这部分雨水汇流到下游时调蓄池已达到满容积而从排口排出,但同时降雨后期排口流量逐渐减小,因此后期所增加的污染物负荷一般要小于前期所削减的污染物负荷,4月13日和10月13日两场降雨分别削减了78.78% (981.09 kg)和78.59% (1094.00 kg)的悬浮物。故沿线分散式调蓄池通过截流更多的初期雨水和削弱管道沉积物冲刷可以控制更多的径流污染,在两场降雨中,通过截流初期雨水而削减的悬浮物量分别为445.23、505.86 kg,通过减弱管道沉积物冲刷而削减的悬浮物量分别为535.86、588.14 kg。



a. 4月13日降雨



b. 10月13日降雨

图4 雨水管网排口SS浓度过程线

Fig.4 SS concentration hydrograph at the outlet of rainwater pipe network

集中式和分散式调蓄池进水SS浓度及截流雨水量如图5和图6所示。调蓄池开始进水时SS浓度较高,为污染较严重的初期雨水,随着较为洁净的非初期雨水混入,SS浓度逐渐降低,直到调蓄池达到满容积时停止进水。

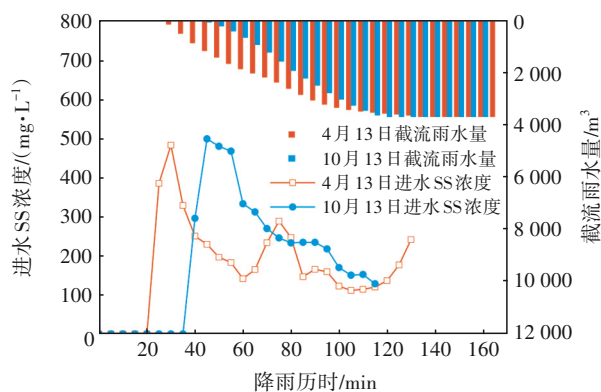
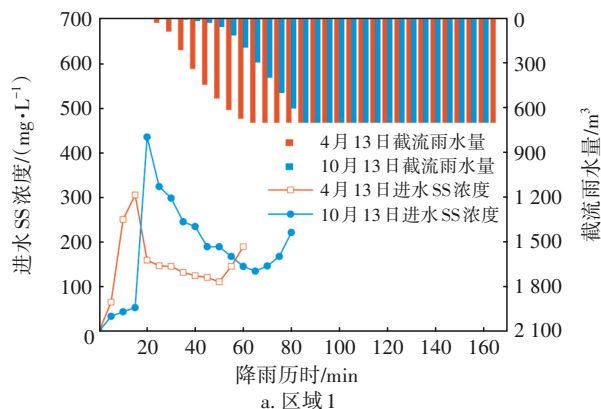
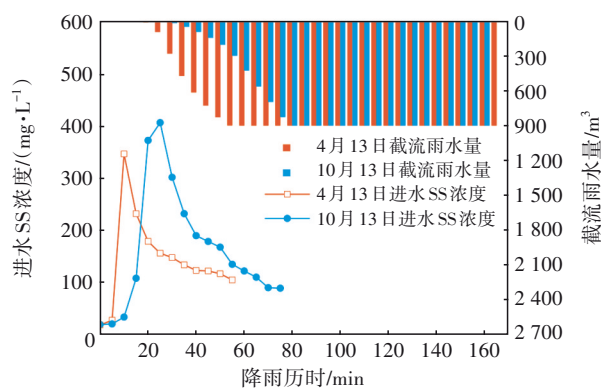


图5 集中式调蓄池进水SS浓度与截流雨水量

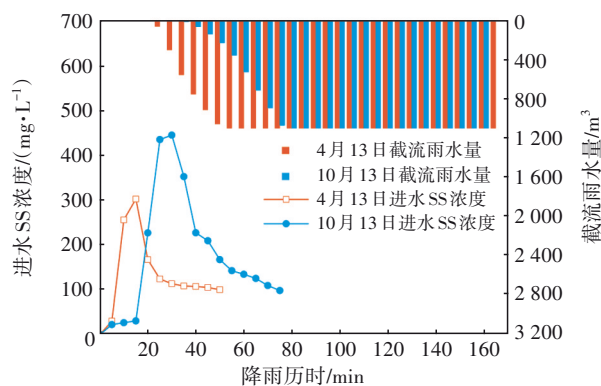
Fig.5 SS concentration and intercepted rainfall of centralized storage tank



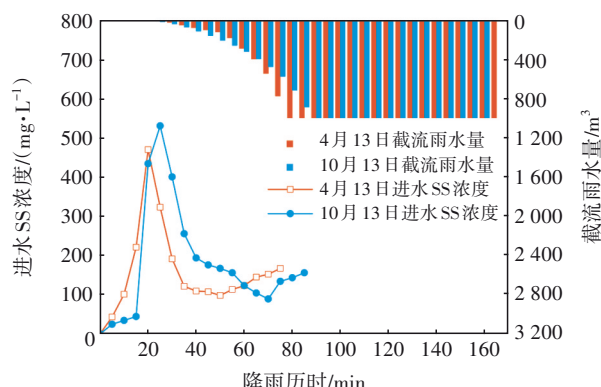
a. 区域1



b. 区域2



c. 区域3



d. 区域4

图6 分散式调蓄池进水SS浓度与截流雨水量

Fig.6 SS concentration and intercepted rainfall of distributed storage tank

各区域沿线分散式调蓄池开始进水时间要先于末端集中式调蓄池,且上游未截流而经管网汇流冲刷沉积物产生的浑浊雨水可能在中后期调蓄池未达到满容积时被截流,从而导致如区域1和区域4所示的后期SS浓度突增的情况。区域2和区域3这部分浑浊雨水未进入截流设施而被排放至下游。在4月13日降雨中,末端集中式和沿线分散式调蓄池截流的悬浮物总量分别为855.69、462.12 kg,在10月13日降雨中分别为953.14、540.55 kg,相同总

容积下沿线分散式调蓄池截流的悬浮物量较末端集中式调蓄池要少。而此处的结果与上述通过排口流量与SS浓度计算的沿线分散式调蓄池截流初期雨水控制的悬浮物总量误差分别为3.8%、6.9%,在允许范围内。

4 结论与建议

① 在相同容积下,通过在管网沿线布设分散式调蓄池比在末端布设集中式调蓄池能控制更多的污染物,两场降雨中削减的悬浮物总量分别提高了14.7%和14.8%。一方面,管网末端雨水汇流量较大,容易发生“超载”现象,即满管运行,此时调蓄池难以全部将其截流,部分污染程度较高的初期雨水会经管道排入受纳水体,故分散式调蓄池所截流初期雨水量比集中式调蓄池多;另一方面,分散式调蓄池通过降低沿线管网流量,削弱了雨水对管道沉积物的冲刷作用,故其能够在沿线减少悬浮物的产生。因此,沿线分散式调蓄池比末端集中式调蓄池拥有更好的污染物控制效果。

② 分散式调蓄池并不是独立的,下游调蓄池需接受上游调蓄池未截流但经管网汇流冲刷沉积物产生的浑浊雨水,由于这部分雨水的汇流时间差,导致下游调蓄池所接纳雨水中的污染物负荷后移,初期冲刷效应被削弱,甚至会使部分高污染雨水直排入受纳水体,相同总容积下进入分散式调蓄池的污染物总量比集中式调蓄池低,致使分散式调蓄池利用率降低。所以,应根据片区面源污染和雨水负荷情况对初期雨水进行分散截流,并改善截流设施水力功能,使初期雨水进入调蓄池的同时部分向下游汇流,让上游调蓄池负荷之外的初期雨水提前进入下游调蓄池,避免后期其在下游调蓄池满负荷时排入受纳水体,进一步提高污染物控制率。

参考文献:

- [1] THOMAS R B, KIRISITS M J, LYE D J, *et al.* Rainwater harvesting in the United States: a survey of common system practices [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 75: 166–173.
- [2] 程江. 苏州河储存式雨水调蓄池水环境质量改善效应分析[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(1): 104–108.
CHENG Jiang. Analysis of water quality improvement in Suzhou Creek by stormwater detention tanks [J]. *China*

Water & Wastewater, 2014, 30 (1): 104–108 (in Chinese).

- [3] 潘羽. 基于SWMM的分流制系统初期雨水调蓄池调蓄能力研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
PAN Yu. Study on Capability of the Initial Rainwater Detention Tanks in Separate System Based on SWMM [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015 (in Chinese).
- [4] 刘洪波, 潘定, 高赛赛, 等. 典型初期雨水调蓄池的运行控制模式[J]. *净水技术*, 2015, 34(5): 96–99.
LIU Hongbo, PAN Ding, GAO Saisai, *et al.* Operation and control modes of typical cases for initial rainfall storage tanks [J]. *Water Purification Technology*, 2015, 34(5): 96–99 (in Chinese).
- [5] 潘国庆, 车伍, 李海燕, 等. 雨水管道沉积物对径流初期冲刷的影响[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(4): 771–776.
PAN Guoqing, CHE Wu, LI Haiyan, *et al.* Effect of storm sewer sediment on first flush [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(4): 771–776 (in Chinese).
- [6] 赵冬泉, 王浩正, 陈吉宁, 等. 城市暴雨径流模拟的参数不确定性研究[J]. *水科学进展*, 2009, 20(1): 45–51.
ZHAO Dongquan, WANG Haozheng, CHEN Jining, *et al.* Parameters uncertainty analysis of urban rainfall-runoff simulation [J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(1): 45–51 (in Chinese).
- [7] 赵冬泉, 陈吉宁, 王浩正, 等. 城市降雨径流污染模拟的水质参数局部灵敏度分析[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(6): 1170–1177.
ZHAO Dongquan, CHEN Jining, WANG Haozheng, *et al.* Local sensitivity analysis for pollution simulation of urban rainfall runoff [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29 (6): 1170–1177 (in Chinese).
- [8] GUPTA H V, KLING H. On typical range, sensitivity, and normalization of mean squared error and Nash-Sutcliffe efficiency type metrics [J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(10): 125–132.

作者简介: 张青文(1994–), 男, 安徽宣城人, 硕士, 工程师, 主要从事市政给排水设计工作。

E-mail: zqwym1018@163.com

收稿日期: 2020–10–10

修回日期: 2020–12–02

(编辑: 刘贵春)