

城市雨水管理

## 基于 SWMM 的截流式排水系统溢流研究与对策

陈盛达, 冯一军, 吴荣波, 毛 斌, 贾 能

(杭州市城市规划设计研究院, 浙江 杭州 310012)

**摘 要:** 雨污混接与初期雨水污染问题使分流制排水系统难以发挥预期环境效益,截流式分流制排水系统是对传统分流制排水系统的一种改进。以某一商业住宅区域为例,运用 SWMM 模型模拟不同典型降雨条件下各类污染物的排放情况,并利用模型评估截流井升级改造、新建调蓄设施和泵站运行优化 3 种溢流控制对策。结果表明,截流井改造能大幅降低污染物溢流量,新建调蓄设施在降雨量较小时削减效果较为明显,而通过泵站运行方式优化在某种程度下不仅能降低工程投资,还能提高整个污水处理系统的效率。

**关键词:** 截流式排水系统; SWMM; 溢流; 调蓄设施; 泵站运行优化

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)21-0118-07

## Overflow of Intercepted Separate Drainage System and Its Countermeasures Based on SWMM

CHEN Sheng-da, FENG Yi-jun, WU Rong-bo, MAO Bin, JIA Neng

(Urban Planning and Design Institute of Hangzhou, Hangzhou 310012, China)

**Abstract:** The pollution of combined sewer system and initial rain water makes it difficult for the separate drainage system to exert the expected environmental benefits. The intercepted separate drainage system is an improvement over the traditional separate system. The discharge of major pollutants under different typical rainfall conditions in a residential and commercial area was simulated by using SWMM model. Three overflow control measures was proposed including upgradation of the interception well, construction of new storage facility and optimization of pumping station operation. The results showed that overflow pollutants could be significantly reduced by upgradation of the interception manholes. The effect of new storage facility was obvious when the rainfall was small. However, optimization of pumping station operation could not only reduce the project investment to some extent, but also improve the efficiency of the entire sewage treatment system.

**Key words:** intercepted separate drainage system; SWMM; overflow; storage facility; optimization of pumping station operation

近年来分流制排水系统在城镇排水系统中已经得到了广泛应用,传统分流制排水系统中雨水、污水分别单独敷设一套管网,污水处理设施规模较小,理论上不存在溢流井,减少了对受纳水体的污染,而实际中雨污混接以及未经处理的初期雨水对城市水体

造成严重污染<sup>[1]</sup>,例如在老旧小区中,阳台空间有限,不能同时设污水管和雨水管,居民利用阳台放置洗衣机,洗衣产生大量富含氮、磷的污水,接入雨水管后直接排入河道;另外,菜市场餐饮以及大排档街市等地方产生的垃圾污水部分直接通过雨水口进入

雨水系统,严重污染受纳水体。

截流式分流制系统是在完全分流制的基础上,通过在污水干管或雨水管网中设置截流井截流初期雨水,并最终将截流水输送至污水处理厂或就地处理。截流式分流制可较好地保护水体不受污染且同时在一定程度解决了雨污水混接问题<sup>[2]</sup>。而实际中雨污水混接、错接以及地下水入渗等现象的存在使得合流污水溢流难以避免,因此研究截流式排水系统对城市水体的污染状况有着重大现实意义。

## 1 截流式分流制排水系统

根据截流井设置位置不同,高学琬等人<sup>[3]</sup>将分散式截流排水系统分为3种方式:末端截流集中调蓄、分散截流集中调蓄和分散截流分散调蓄。末端截流集中调蓄通常沿河设置一条截污干管,连接沿河的所有雨水排放口,最终排放前设置截流井控制水量,当雨水超过一定水位时,后期雨水溢流进入河道,如图1所示。由于初期雨水到末端排水口距离较长,与后期污染物浓度较低的雨水混合,使得末端截污的效率偏低。

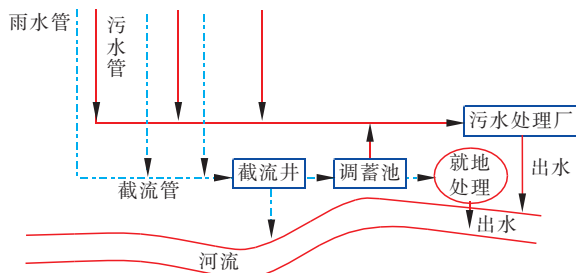
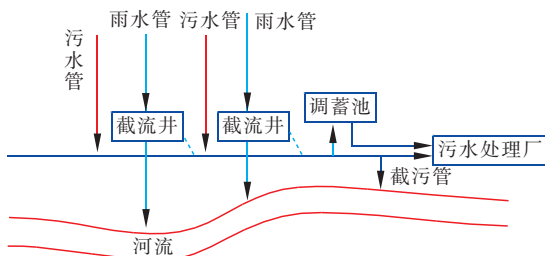


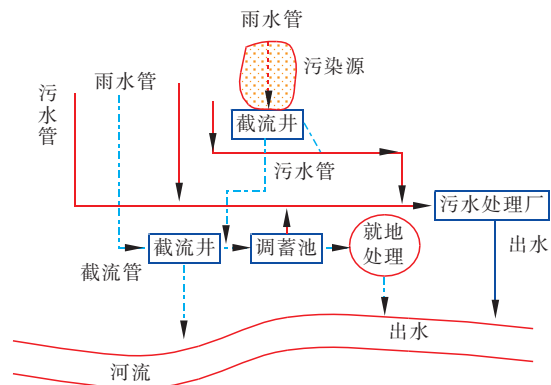
图1 末端截流集中调蓄

Fig. 1 Terminal intercepting and centralized storage

分散截流集中调蓄是在沿河所有雨水排放口前设置截流井控制水量,当雨水超过设定水位时,后期雨水通过各截流井溢流入河道,如图2所示。而当源头污染较严重时,从源头直接截流污染物浓度较高的初期雨水,很大程度避免了与下游低浓度雨水混合而降低截污效率。



a. 一般情况下



b. 源头污染较严重时

图2 分散截流集中调蓄

Fig. 2 Distributed intercepting and centralized storage

## 2 研究区域SWMM建模

### 2.1 排水系统概化

研究区域总面积约为4.82 km<sup>2</sup>,现基本为分流制排水系统,经调查该区域内有近50%的居民将洗衣机放置在阳台,大量洗衣污水进入雨水管,为截流进入雨水管的污水,现状区域内雨水管通过截流短管将大部分污水截流,属分散式截流排水系统。结合该地区的雨污水管网普查资料和地形高程点分布,对研究区域进行概化,如图3所示。

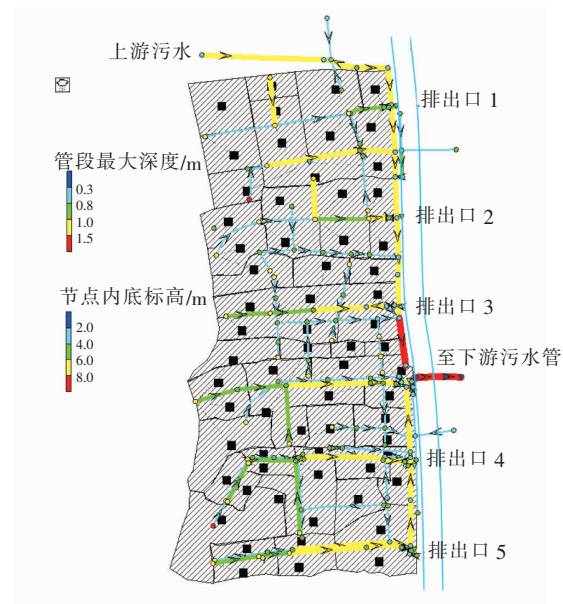


图3 研究区域模型界面

Fig. 3 Model interface of study area

该区域主要包含4类下垫面:建筑屋面、市政道路、地块道路和绿地,所占比例分别为37%、17%、36%和10%,不透水区域主要为建筑屋面和硬化道路。经概化,研究区域共划分子汇水区为65个、检

查井节点为143个、污水管段为114根、承担截污功能的雨水管段为26根(管径为DN600~1500),为简化剩余的雨水管段,未做截污区域的子汇水区直接汇流至排出口,雨水溢流排放口为5个、污水排放口为1个、溢流堰为5个。截污干管沿河布置,管径为DN1200~1800。

## 2.2 水文参数确定

水文模块包括地表产流模型和地表汇流模型,研究区域内土壤主要为红壤,采用Horton入渗模型模拟研究区域的产流入渗过程,设置最大入渗速率为76 mm/h、最小入渗速率为18 mm/h、衰减常数为 $4\text{ h}^{-1}$ 。每个子汇水区的面积、宽度和不透水百分比通过卫星影像图和现状用地图确定,子汇水区域的其他相关参数设置如下:不透水区的注蓄量为2 mm、可透水区的注蓄量为8 mm、不透水区的曼宁系数为0.012、透水区的曼宁系数为0.10、管段粗糙系数为0.015。

## 2.3 水质模块参数设置

水质模块主要包括地表污染物累积模型和冲刷模型。SWMM模型可以根据不同的功能区或者不同的地表利用状况进行不同地表污染物的累积模拟。本研究选择SS、COD、TN和TP这4个水质指标进行模拟,其中SS是城市地表污染物最主要的携带者,COD为有机物指标,TN和TP是富营养化污染物指标。

### 2.3.1 地表污染物累积模型

地表污染物累积量与土地利用状况、绿化条件、交通状况、土地裸露程度以及降雨间隔、降雨强度等直接相关。SWMM中提供的污染物累积方程有幂函数形式、指数函数形式与饱和湿润方程3种,本研究选择指数函数形式污染物累积方程,如下:

$$B = C_1(1 - e^{-C_2 t}) \quad (1)$$

式中  $B$ ——污染物累积量,  $\text{kg}/\text{hm}^2$

$C_1$ ——污染物最大累积量,  $\text{kg}/\text{hm}^2$

$C_2$ ——累积速率常数

$t$ ——累积时间, min

多数研究表明<sup>[4-7]</sup>,屋顶的SS含量较高、但COD累积量普遍较低,而交通道路的SS和COD含量均较高。结合研究区域特点和文献,将区域内土地利用类型分为屋顶、绿地、市政道路和地块道路4类,前期干旱天数为7 d,不同地表的污染物累积参数如表1所示。

表1 不同地表的污染物累积参数

Tab.1 Parameter values for surface pollutant accumulation

项 目		SS	COD	TN	TP
屋顶	最大累积量/ ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	250	80	4.0	0.6
	累积速率常数	0.065	0.050	0.133	0.100
绿地	最大累积量/ ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	60	40	10	1.8
	累积速率常数	0.040	0.040	0.100	0.080
市政道路	最大累积量/ ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	400	170	12	0.6
	累积速率常数	0.071	0.085	0.167	0.150
地块道路 <sup>[8]</sup>	最大累积量/ ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	100	120	10	0.6
	累积速率常数	0.062	0.064	0.156	0.120

### 2.3.2 冲刷模型

冲刷指在降雨中产生的径流对汇水区表面污染物的溶解和沉积作用。SWMM提供的污染冲刷函数有事件平均浓度冲刷、指数冲刷和事件平均冲刷,指数冲刷方程考虑污染物累积量和降雨径流量对冲刷的影响,故本研究选择指数冲刷模型,如下:

$$W = S_1 q^{S_2} B \quad (2)$$

式中  $W$ ——污染物冲刷量,  $\text{mg}/\text{L}$

$S_1$ ——冲刷系数

$S_2$ ——冲刷指数

$q$ ——单位面积上的径流量,  $\text{mm}/\text{hm}^2$

利用相关文献和SWMM用户手册确定不同地表污染物累积和冲刷模型的相关参数,如表2所示。

表2 冲刷模型参数

Tab.2 Parameter values for wash-off model

项 目		SS	COD	TN	TP
屋顶	冲刷系数	0.007	0.006	0.004	0.002
	冲刷指数	2.3	2.2	1.8	1.8
绿地	冲刷系数	0.004	0.003 5	0.002	0.001
	冲刷指数	2.3	2.2	1.8	1.2
市政道路	冲刷系数	0.008	0.007	0.004	0.002
	冲刷指数	2.3	2.2	1.8	1.7
地块道路	冲刷系数	0.005	0.004	0.003	0.003
	冲刷指数	2.3	2.2	1.8	1.7

## 2.4 降雨及旱季入流

### 2.4.1 旱季入流

通过泵站旱季污水量连续监测数据,以及对应各污水排水分区的给水量数据,按比例分配各排水分区的旱季污水入流量,研究区域内单位面积污水比流量在 $98 \sim 294\text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{hm}^2)$ 之间,平均为195.5

$\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{hm}^2)$ 。由于阳台污水、雨水混接的存在,部分污水进入雨水管,据测算其量约为生活污水总量的15%,监测终端泵站污染物浓度,计算其平均值作为旱季流量污染物浓度:SS为120 mg/L、COD为251 mg/L、TN为52 mg/L、TP为2.8 mg/L。

#### 2.4.2 降雨数据的选择

不同强度降雨数据采用研究区域内某雨量站2017年4月—10月的监测数据,选取5月4日的小雨(3.5 mm)、6月22日的典型中雨(15 mm)、6月12日的典型大雨(41 mm)、6月24日的典型暴雨(71 mm)和典型特大暴雨(100 mm)5场降雨数据。降雨期间的污水流量仍采用旱季入流值。

#### 2.5 模型校核

选择2017年4月22日晴天泵站实测水位与模型比较校验模型水量结果,模型计算与实测的最高水位与最低水位基本一致,各时段水位变化基本一致。利用2011年9月29日的降雨和各类地表径流污染物监测值<sup>[9]</sup>进行水质参数率定。因研究区域主要为商业和居住用地,将实测数据按用地类型加权平均得到子汇水区的污染物平均浓度,图4给出了降雨实测和模拟的污染物浓度变化过程,可以看出模拟与实测的污染物浓度变化趋势基本一致,模拟与实测的各类污染物浓度峰值误差较小(<10%),总体而言,率定后模型的模拟精度较好,可满足工程需要。

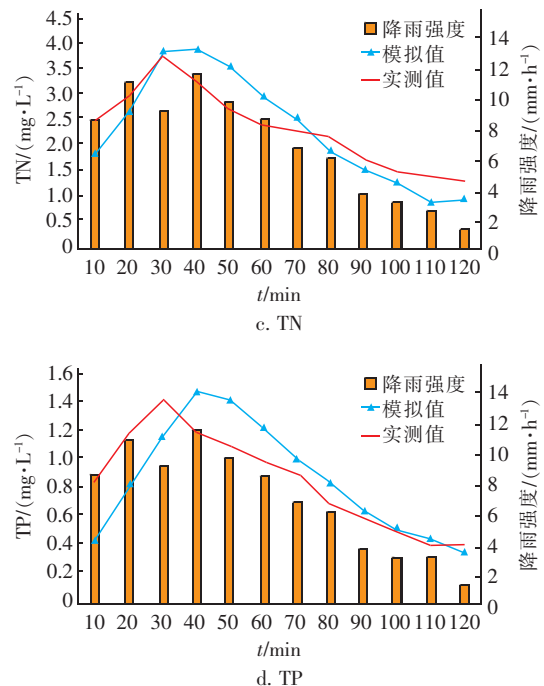
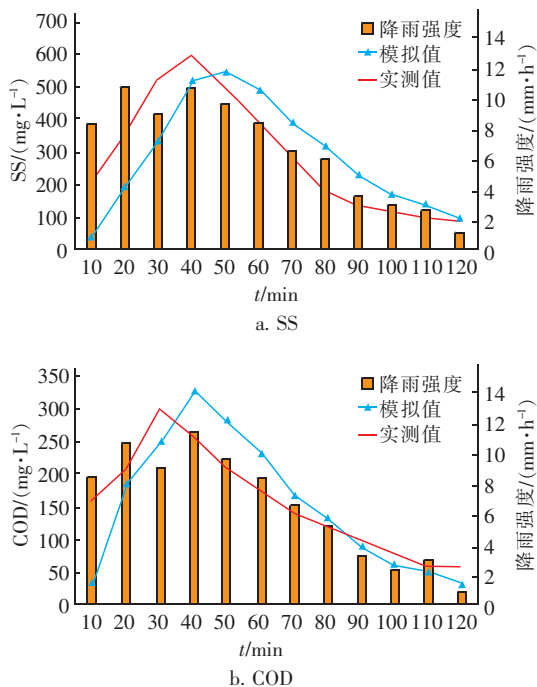


图4 实测与模拟的污染物浓度过程线

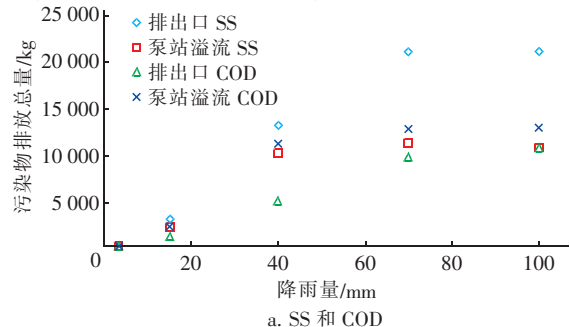
Fig.4 Change of simulated and measured pollutant concentrations

### 3 溢流模拟与对策

在晴天条件下污水管网基本能满足要求,晴天进入该区域的污水总量在  $12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  以内(转输上游污水量为  $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ),由于下游提升泵站设计容量及下游管段排水能力的限制,当污水流量持续超过  $1.73 \text{ m}^3/\text{s}$  时,则需要开启溢流设施,将部分污水直接排放至水体。

#### 3.1 现状模拟

利用SWMM分别模拟上述5场降雨,统计所有雨水排放口及泵站的溢流污染物总量,见图5。可知,小雨时无污染物直接排放,随降雨量的增大,污染物排放量不断增加,雨水口SS排放量始终大于泵站溢流量,而COD却相反,原因是相比生活污水,径流中COD浓度较低,而SS浓度较高。





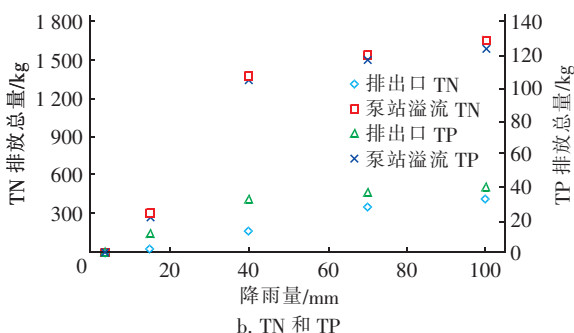


图5 不同降雨条件下的污染物排放量

Fig. 5 Pollutant discharge under different rainfall

降雨强度从中雨增加到大雨时,直排污染物迅速增加,部分区域路面出现积水,积水量约为 5 500 m<sup>3</sup>。而对比暴雨和特大暴雨,两者各污染物排放量较接近,一方面由于受截流短管能力限制,进入截污干管的雨水在暴雨条件下已达到峰值;另一方面,该降雨强度下污染物冲刷作用已较完全,暴雨和特大暴雨条件下的积水量分别为 21 000、52 000 m<sup>3</sup>,部分污染物留在积水中,因此特大暴雨条件下 SS 和 COD 排放量略有下降。

因生活污水的氮、磷含量普遍高于降雨径流平均浓度,泵站溢流的 TN 和 TP 总量均明显高于雨水排出口,随降雨强度的变化规律与 COD 和 SS 类似。

### 3.2 截流井改造

现有系统条件下,雨天大量雨水通过截流管进入污水系统,挤占了污水系统容量,致使大量生活污水溢流。传统截流井,无论是截流槽式还是跳跃式截流井、固定堰式截流井在大雨期间均不能较好地控制进入截污管道的流量,且会对城市排涝产生较大影响。而近些年出现的新型截流井能根据入流量自动控制截流量,例如虹吸堰截流井、旋流限流阀截流井及自控截流井<sup>[10]</sup>。图 6 为阳台水自控截流井。



图6 阳台污水自控截流井

Fig. 6 Auto-controlled interception well for balcony sewage

当洗衣污水或屋顶初期雨水进入时,由于污水出水口位置较低,污水进入污水管,当降雨量过大或

中后期雨水进入装置内时,浮球由于浮力作用上升,并带动联动装置关闭污水出水口,雨水则全部进入雨水管。

利用 SWMM 控制规则模拟此类自控截流井,当节点水位高于一定值时,关闭该段截流管。不同降雨条件下各污染物排放总量和现状排放量对比见图 7。降雨量强度较小时,改造前后生活污水和初期雨水均进入截污干管,在中雨条件下现状 COD 排放量为 3 506 kg,而截流井改造后排放量降至 2 158 kg,减排效果明显。而当降雨强度达到一定程度时,除 SS 外,截流井改造后降雨后期低浓度雨水不再进入污水系统,从而避免了高浓度生活污水溢流。当日降雨量达到 40 mm 时,减少排放 COD、TN 和 TP 的比例分别为 29.4%、46.5% 和 36.7%,当日降雨量达到 70 mm 时,该值分别为 27.9%、37.5% 和 41.6%。总体而言,降雨强度较大时,避免雨水进入污水系统能显著减少各类污染物的排放。

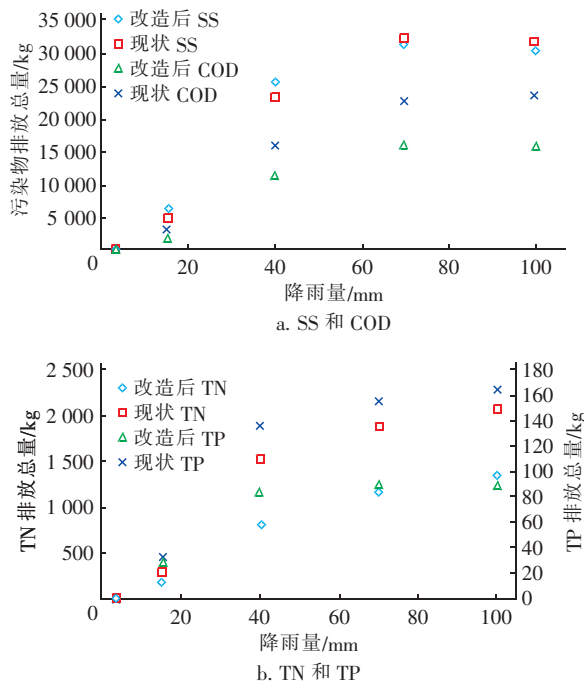


图7 截流井改造前后污染物排放对比

Fig. 7 Pollutant discharge comparison before and after upgrade of the interception well

### 3.3 新建调蓄设施

新型截流井在实际运行中存在一定管理问题,若考虑在该系统末端新建初雨调蓄设施,根据设计规范求得调蓄池有效容积为 8 000 m<sup>3</sup>,当系统超负荷运行时,先将过量污水排入调蓄池,调蓄池蓄满后

再将过量污水排入水体。在模型中设置调蓄池后,模拟得到不同降雨量下各污染物的削减率,如图8所示。可知,降雨量较小时,调蓄池能有效减少进入水体的污染物,各污染物平均削减率超过25%,而随着降雨量增至40 mm以上时,各污染物削减率基本稳定在10%以内,TN与TP的削减率持续下降。

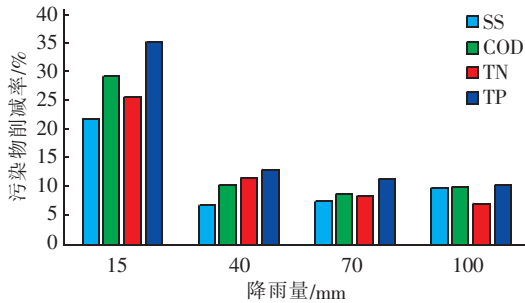


图8 不同降雨量下各污染物削减率

Fig.8 Pollutant reduction rate under different rainfall

### 3.4 泵站优化运行

从整个城市污水系统来看,在污水厂处理能力有限的情况下,在中途泵站弃流低浓度雨水有利于提高污水厂的处理效率,让更多高浓度污水得到处理。而现今的合流污水泵站控制方式较为单一,主要通过泵前水池水位高低控制水泵启闭,当流量超过系统输送能力时开启溢流,降雨后期大量低浓度雨水进入污水系统,不仅使得污水厂的处理效率下降,还造成电能的浪费。

Ganora 等人<sup>[11]</sup>提出一种优化运行方案,降雨时泵站的入流量达到一定值 $Q_{th}$ ,开启所有水泵,持续运行一段时间 $T_w$ ,若此时流量仍超过设定值 $Q_{th}$ ,关闭所有水泵,将所有水量排入水体,直到入流量小于 $Q_{th}$ 再恢复水位控制方式;若 $T_w$ 时间内流量小于 $Q_{th}$ ,直接切换至水位控制方式。在本研究区域,当临界流量 $Q_{th}=2\ 600\text{ L/s}$ 、 $T_w=3.5\text{ h}$ 时,模拟得到不同控制方式下的泵后流量对比,如图9所示。

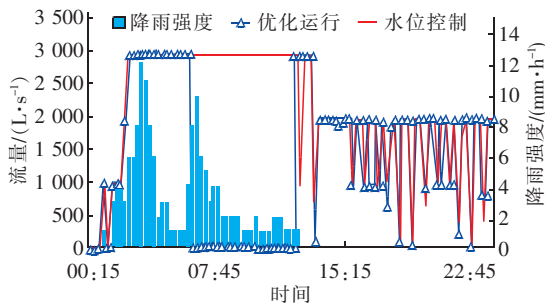


图9 泵后流量

Fig.9 Pumped flow for two control modes

当运行时间超过 $T_w$ (3.5 h)时,优化方案实施停泵溢流;当泵站入流量小于 $Q_{th}$ (2 600 L/s)时,泵站运行恢复至水位控制方式。尽管调整泵站运行方式会增加污水溢流量(如图10所示),但该时段的污染物浓度较低,停泵溢流时段TN浓度不到旱季的1/2,从而为其他污水系统留出更多容量。优化后的泵站运行方式其实质与智能截流井类似,根据入流量大小切换不同的运行方案,实际操作中可根据降雨特点和径流污染情况合理确定 $Q_{th}$ 和 $T_w$ 值。

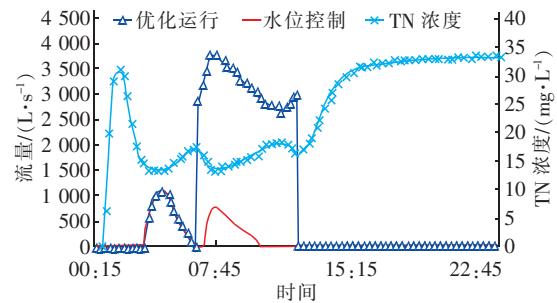


图10 溢流量对比

Fig.10 Overflow for two control modes

## 4 结论

通过采用SWMM对某研究区域截流式排水系统进行水质、水量模拟,评估现状系统的各污染物排放量,并提出3种不同应对溢流污染的控制对策,结果显示,截流井改造后能大幅降低雨天进入污水系统的雨水,从而避免氮、磷含量较高的生活污水溢流至水体,当日降雨量达到40 mm时,COD、TN和TP的削减率显著,分别为29.4%、46.5%和36.7%,降雨达到一定强度时进入截污管的雨水总量已经达到峰值,因此削减率不再增加。当降雨量较小时,新建一定规模的调蓄设施能有效捕获浓度较高的初期雨水。而从整个城市污水系统角度来看,当污水厂处理能力有限时,通过部分污水泵站操作方式的优化可以提高整个系统的处理效率,并且基本无需新增设施。

## 参考文献:

- [1] 高将,张宝军,周慧芳. 截流式合流制排水系统对城市水体污染状况研究分析[J]. 江苏水利,2017(4): 1-5.
- Gao Jiang, Zhang Baojun, Zhou Huifang. Research on pollution status of urban water caused by intercepting combined drainage system [J]. Jiangsu Water Resources, 2017(4): 1-5 (in Chinese).

- [2] 张连强. 截流式分流制城镇排水系统的形式及设计研究[D]. 重庆:重庆大学,2013.  
Zhang Lianqiang. Study on Types and Design Issues of Intercepted Separate Urban Drainage[D]. Chongqing: Chongqing University,2013(in Chinese).
- [3] 高学琰,彭海琴,蔡辉艺,等. 分散式截流排水系统的形式及应用探讨[J]. 中国给水排水,2016,32(2): 6-10.  
Gao Xuelong, Peng Haiqin, Cai Huiyi, *et al.* Discussion on type and application of distributed intercepting drainage systems[J]. China Water & Wastewater,2016, 32(2):6-10(in Chinese).
- [4] 韩龙,余麟. 深圳市建成区地表污染物累积特征研究[J]. 广东化工,2016,43(2):90-91.  
Han Long, Yu Lin. Research on accumulation characteristic of the build-up of urban surface pollutants in Shenzhen[J]. Guangdong Chemical Industry,2016, 43(2):90-91(in Chinese).
- [5] 张善发,李田,高廷耀. 上海市地表径流污染负荷研究[J]. 中国给水排水,2006,22(21):57-60.  
Zhang Shanfa, Li Tian, Gao Tingyao. Study on pollution load of urban surface runoff in Shanghai[J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(21): 57-60(in Chinese).
- [6] 王志标. 基于SWMM的棕榈泉小区非点源污染负荷研究[D]. 重庆:重庆大学,2007.  
Wang Zhibiao. Research of the Non-point Source Pollution Load in Palm-spring Residential District Based on SWMM[D]. Chongqing:Chongqing University,2007(in Chinese).
- [7] 张静,周玉文,刘春,等. 降雨地表径流水质模拟中SWMM模型水质参数确定[J]. 环境科学与技术, 2017,40(5):165-170.  
Zhang Jing, Zhou Yuwen, Liu Chun, *et al.* Determination of water quality parameters of SWMM model for water quality simulation of rainfall-runoff[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(5): 165-170(in Chinese).
- [8] Egodawatta P, Goonetilleke A. Characteristics of pollutants built-up on residential road surfaces[A]. Proceedings of the 7th International Conference on HydroScience and Engineering[C]. Philadelphia:Drexel University,2006.
- [9] 李松波,向美洲,陈前虎. 杭州市城区不同土地利用类型降雨径流污染特征[J]. 浙江科技学院学报, 2012,24(6):475-480.  
Li Songbo, Xiang Meizhou, Chen Qianhu. Pollution characteristic of runoff in different function areas of Hangzhou city[J]. Journal of Zhejiang University of Science and Technology, 2012, 24(6): 475-480(in Chinese).
- [10] 张宏达,杨曦,何强. 德国的截流井及相关设计[J]. 中国给水排水,2005,21(6):104-106.  
Zhang Hongda, Yang Xi, He Qiang. Intercepting well and relative design in Germany[J]. China Water & Wastewater,2005,21(6):104-106(in Chinese).
- [11] Ganora D, Isacco S, Claps P. Framework for enhanced stormwater management by optimization of sewer pumping stations [J]. Journal of Environmental Engineering,2017. DOI:10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001220.



作者简介:陈盛达(1991-),男,浙江舟山人,硕士,助理工程师,研究方向为给水排水规划设计、管网模型等。

E-mail:125482283@qq.com

收稿日期:2019-04-02