

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.21.020

合流制分区排水系统溢流污染负荷评估与治理

边兆生, 蔡甜, 戴慧奇

(中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南长沙 410014)

摘要: 以长沙市小西门排渍泵站服务片区为例, 针对该片区合流制分区排水系统溢流污染问题, 通过 MIKE URBAN 模型建立水质水量模型。根据小雨、中雨、大雨及暴雨等典型降雨对研究区进行场次污染特征分析, 以 2016 年全年降雨对研究区进行连续模拟, 得到全年溢流污染负荷。针对雨季溢流污染提出 3 种治理方案, 得出高低区单独截污 + 提高截流倍数 + 调蓄池的治理方案最优, 可使研究区的全年溢流次数降低至 33 次, COD、NH₃-N、TP 的溢流负荷削减率依次提高到 52.81%、61.30%、64.59%。

关键词: 合流制溢流污染; 分区排水系统; 调蓄池; MIKE URBAN

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)21-0115-06

Assessment and Treatment of Overflow Pollution Load in Combined Partition Drainage System

BIAN Zhao-sheng, CAI Tian, DAI Hui-qi

(PowerChina Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410014, China)

Abstract: Aiming at the overflow pollution problem of a combined partition drainage system in service area of Xiaoximen pump station in Changsha City, a water quality and quantity model was established by using MIKE URBAN. The event pollution characteristics of the study area were analyzed based on typical rainfall such as light rain, moderate rain, heavy rain and rainstorm, and the overflow pollution load in the whole year was obtained by continuous simulation of rainfall in 2016. Three measures for overflow pollution control in rainy season were proposed, and the optimal solution was single sewage interception in high and low areas, increase of interception ratio and setting detention tank, which could reduce the annual overflow times in the study area to 33 times, and increase the overflow load reduction rate of COD, NH₃-N and TP to 52.81%, 61.30% and 64.59%, respectively.

Key words: combined sewer overflow (CSO) pollution; partition drainage system; detention tank; MIKE URBAN

合流制溢流(CSO)污染作为城市排水系统发展过程中的遗留问题,是水体的重要外来污染源,严重影响着城市的水生态、水环境、水安全。随着水环境质量恶化、黑臭水体占比的不断提升,CSO 污染的评估与治理日趋紧迫^[1]。

针对 CSO 污染问题,国内外的治理思路主要集中在末端治理和源头治理两方面。末端治理通常通过扩大调蓄容积、提高截流倍数、采用智能截污井等

方式削减溢流污染负荷^[2];源头治理则强调生物滞留蓄作用,一方面削减地表径流量,减轻管网负荷,另一方面起到削减面源污染的作用^[3]。从 CSO 污染的评估来看,SWMM、InfoWorks CS、MIKE 等水力模型常被用作溢流负荷的评估工具,评估指标涉及溢流频次、溢流体积、溢流负荷等多方面^[4-5]。合流制分区排水系统遵循高水高排、低水低排的原则,旨在降低泵站和截污干管的运行负荷。但是,合流制分

区排水系统也面临着 CSO 污染问题,笔者以 MIKE 模型为评估工具,从调蓄方式、截流倍数、高低区管网运行方式等方面对其进行改造方案评估,以期为分区排水系统的 CSO 污染评估和治理提供参考。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区分区排水系统概况

本研究以长沙市小西门排渍泵站服务片区为研究对象,该片区现状采用截流式合流制排水体制,截流倍数 $n_0 = 1.0$ 。研究区分为高区、低区两套排水系统,其中高区汇水面积为 1.74 km^2 ,合流管于解放路、人民路、城南路分别截污,截流污水接入西侧低排管网,雨季雨水则直排湘江。低区汇水面积为 0.58 km^2 ,合流管在进小西门泵站前截污,截流污水接入沿江 $D1\ 400 \text{ mm}$ 截污干管,雨水进入小西门泵站后提升入江。沿湘江中路有 $D1\ 400$ 、 $D1\ 800 \text{ mm}$ 两套截污干管,两管于中山路位置合并,接入凤嘴泵站提升进入金霞污水处理厂。研究区的现状排水分区及排水系统如图 1 所示。

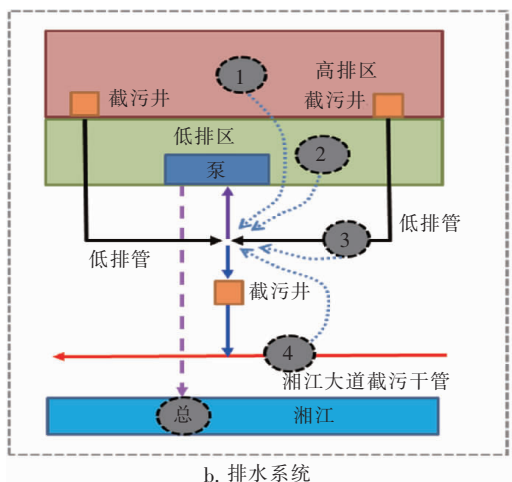


图1 现状排水分区及排水系统

Fig. 1 Current drainage area and drainage system

晴天,小西门泵站进水闸门关闭,区域内高、低区污水通过合流排水管网进入 $D1\ 400 \text{ mm}$ 老截污干管;雨季,高区截留污水进入低排区干管,在小西门泵站前截留污水进入截污干管,小西门泵站进水闸门打开,合流排水通过泵站自排或提升入江。

1.2 研究区水环境现状

受合流排水管网运行模式影响,研究区降雨排水时段存在合流溢流污水直排湘江的情况,尤其在泵站排水初期,出水水质呈现较为严重的“黑”“脏”现象。图 2 为 2017 年 10 月小西门泵站溢流污染事件实拍照片。由于小西门排渍泵站排口位置处于湘江一级饮用水源保护区,环境影响极其敏感,降雨时段排口“黑龙事件”备受环保部门及市民关注。

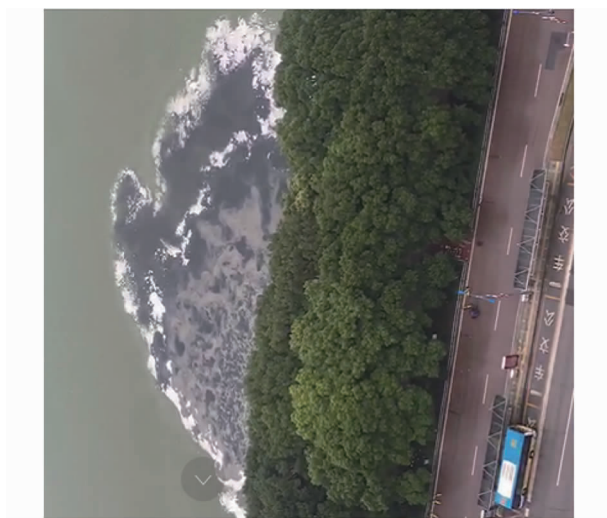


图2 小西门泵站溢流污染事件

Fig. 2 Overflow pollution incident at Xiaoximen Pumping Station

经调查,小西门泵站汇流区域内有黄兴路步行街、太平老街等商业集中的街道,区域内临街式的餐饮、大排档星罗密布。店铺、餐饮污废水未经处理直接排入雨水口及排水管网,导致旱季污水水质较差,大量未处理废水在管网中堆积,下雨时通过自排涵或泵站排入湘江。同时从区域截污模式来看,高区截流污水未直接进入沿江截污干管,而是进入低排干管后进行二次截污,截污效率较低,且增加了低区污染物负荷。

1.3 技术路线

本研究首先以现状排水管网系统为基础,收集研究范围内城市降雨、管网、渠道、泵站等基础数据,同时结合区域内水污染调查结果等分别建立研究区

管网的水质水量模型,在对研究区现状溢流污染负荷评估的基础上,为溢流污染整治方案进行后续论证、评估。具体的技术路线见图3。

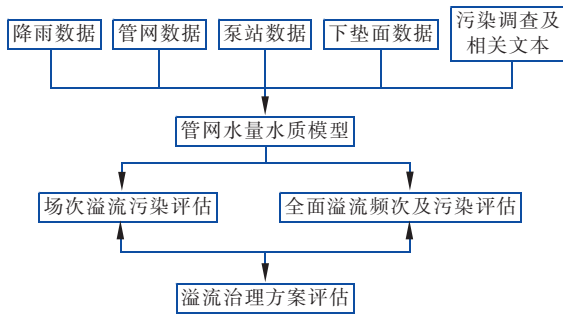


图3 研究区溢流污染评估技术路线

Fig. 3 Technical route of overflow pollution assessment in study area

2 模型构建及溢流污染负荷评估

2.1 管网水质水量模型构建

2.1.1 设计降雨

根据收集到的长沙市1998年—2017年近20年的降雨数据,得出长沙市多年平均降雨量为1 459.69 mm,年平均暴雨天数(日降雨量 ≥ 50 mm)为4.7 d。长沙市的降水量年际变化十分明显,年最大降水量出现在2012年(1 830 mm),最小降雨量出现在2007年(997 mm),降雨量有逐年上升趋势。根据20年的降雨统计资料,2016年长沙市的小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨分别为101、33、19、3、1 d,比较符合20年降雨的雨量区间统计值,且2015年—2017年的年降雨量较为稳定,因此本次模型采用2016年降雨作为全年污染负荷评估的边界降雨。

根据提供的长沙市场次降雨进行降雨等级划分。以最不利原则选取同等级中降雨量偏大、降雨强度偏高的降雨场次作为该等级降雨条件下的典型降雨。以典型暴雨为例,其场次降雨雨型见图4。

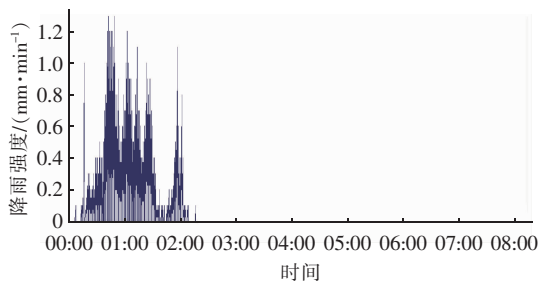


图4 典型暴雨降雨过程

Fig. 4 Typical rainstorm process

2.1.2 管网及下垫面概化

本研究采用MIKE URBAN构建管网的水质水量模型,研究区内基础资料较齐全,满足模型搭建需求。其中,研究区管线成果是模型搭建的主要依据,它包括了现状管网的排水方向和排水口等相关资料。对一些数据缺失、排水口方向不明、孤立管道等都进行了梳理。最终梳理得到的排水管道共702段,排水管道总长为21.15 km。结合区域内的排水(雨水)管线布置及周边下垫面形态和竖向布置,划分研究区域的子汇水区。在此基础上,根据泰森多边形法为管道每个节点分配子汇水区。图5为研究区的管网和汇水区径流系数概化结果。

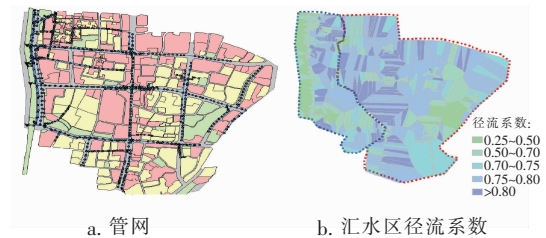


图5 研究区管网及汇水区径流系数

Fig. 5 Pipe network and runoff coefficient of catchment area in study area

2.1.3 模型参数设定

管网水动力模型的参数设置,决定了模型模拟的准确性。在一维管网水动力模型中,主要涉及的参数有平均坡面流速、模拟时间步长、管道曼宁系数、检查井局部水头损失等。其中,模拟时间步长取10~60 s,自动在此范围内调整;平均坡面流速取0.3 m/s,每一个集水区的平均流速决定了汇流时间;管道曼宁系数取71~77,管道材料为钢筋混凝土;检查井局部水头损失取0.1 m。检查井直径等于管道直径,以确保管道的排水能力。

管网水质模型中的对流扩散模块设定的参数有衰减系数和扩散系数,本研究不考虑污水负荷在管道中的衰减,扩散系数取 $2.0 \text{ m}^2/\text{s}$ 。模型的污水量根据综合污水量 \times 服务人口计算,因污水管道和提升泵站、污水处理厂等设施涉及的控规较多,且服务范围无法以控规为单位严格区分,故考虑利用单位面积人口来计算服务人口数,即利用各个控规的规划人口和建设用地面积,计算出总的单位面积人口,则污水管道及附属设施的服务水量=服务面积 \times 单位面积人口 \times 综合污水量。

2.1.4 模型率定

本研究采用纳什系数(NS)和平均相对误差(RE)来评价模型准确度,当RE绝对值<10%、NS值>0.75时,则说明模型的模拟结果较为准确。本次模拟采用2016年4月16日、6月29日、8月7日的降雨作为率定降雨,3个场次降雨量依次为50.50、28.14、12.06 mm。采样点位于高、低区分界的截流井以及小西门泵站的排放口处。以2016年8月7日场次降雨为例,其流量率定结果如下:截流井1处的NS值为0.79、RE值为9.6%,截流井2处的NS值为0.81、RE值为-6.3%,小西门泵站排口处的NS值为0.84、RE值为7.4%;小西门泵站排口处的水质(以COD、TP为例)率定结果如下:COD、TP的NS值分别为0.83、0.78,RE值分别为-7.8%、-6.8%。另外,其余场次下各监测点的水质水量率定后的NS值均大于0.75、RE绝对值均小于10%,说明本模型构建得较为合理,能够满足后续分析的要求。

2.2 现状溢流污染负荷评估

2.2.1 场次溢流污染特征分析

场次溢流污染特征分析是基于管网水质水量模型,对小雨、中雨、大雨及暴雨等典型降雨场次的区域污染物产生、转输进行模拟。基于研究区现状调研结果,对现状各类污染物(COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 及TP)的入管及排放进行模拟,最终统计各类污染物通过小西门泵站以及高排涵排口的排放量。现状条件下小西门泵站在不同降雨场次的溢流流量以及COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP溢流浓度如图6所示。

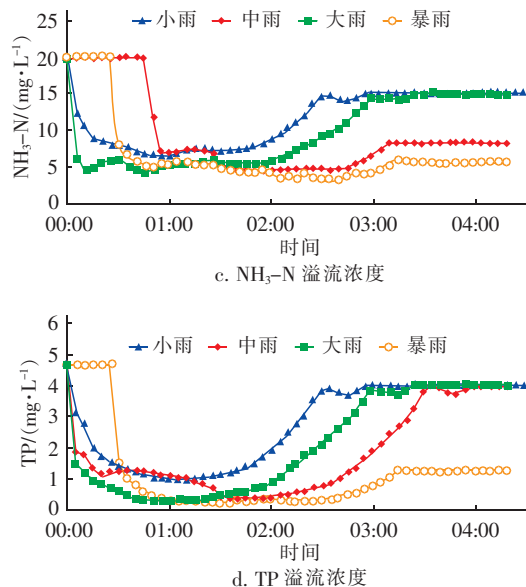
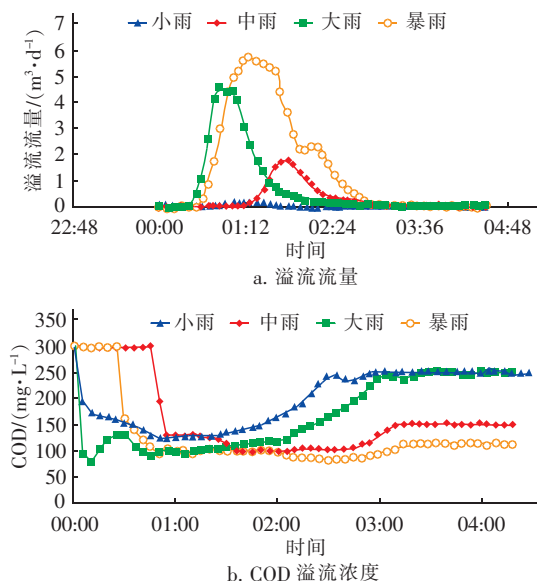


图6 研究区场次溢流污染特征

Fig. 6 Characteristics of overflow pollution in study area

图6(a)表明,随着降雨量的增大,溢流峰值流量亦增大,但峰值的出现时间不尽相同,其中大雨的峰值出现时间最靠前,这是由于各类型降雨的典型降雨雨型存在差异,导致汇流时间和汇流量存在差异。从图6(b)、(c)和(d)可以看出,3类污染物随降雨历时的变化趋势基本一致,其中小雨和大雨的COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP稳定值基本一致,分别为250、15、4 mg/L 。不难发现,4类雨型下各污染物的最终稳定浓度排序为小雨 \geq 大雨>中雨>暴雨。总体上来看,随着降雨量的增加,污染物的最终稳定浓度降低,说明后期雨水对污染物浓度的稀释作用明显。而大雨雨型下的污染物稳定浓度高于中雨,这可能是由于大雨的雨峰较为靠前,后期水量变小,但地表和管道的冲刷仍在持续,使得浓度维持在一定的值。

2.2.2 全年污染负荷评估

现状条件下,研究区域内通过小西门泵站溢流的COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP负荷分别为308.10、15.50和3.60 t/a,溢流量为 $221.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$;通过高排涵溢流的COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP负荷分别为147.60、5.50、1.10 t/a,溢流量为 $139.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。全年溢流次数为118次。

3 雨季溢流污染治理方案与评估

3.1 治理目标与调蓄方式的确定

总的来说,合流制溢流污染治理需以水环境容量为基础,在计算出允许外排负荷后,进一步确定年

溢流总量削减率、年溢流频次控制率、年溢流体积控制率。《海绵城市建设评价标准》(GB/T 51345—2018)提出合流制溢流排放口控制的双50量化指标(即年溢流体积控制率 $\geq 50\%$,控制后的悬浮物SS浓度 ≤ 50 mg/L)的要求,虽然本研究未采用源头减排等绿色设施,该指标仍然有一定的借鉴意义。鉴于湘江全流域水环境容量及流域水污染防治总体规划方案尚未编制,以控制污染物总量的思路进行溢流污染控制近期内难以实现,且研究区排口对环境容量的湘江在污染物总量排放上影响不大。根据《城市黑臭水体整治——排水口、管道及检查井治理技术指南(试行)》、海绵城市建设量化指标,结合本项目组对长沙市雨型、雨量、研究区受纳水体等情况的研究,将排口溢流污染频次作为主要考核指标,要求研究区的全年溢流频次控制率 $\geq 50\%$ 。

研究区现状截污干管截流倍数为1,以2016年的降雨为例,即仅依靠1倍截污干管截流,研究区降雨频次控制率为16.9%。以此类推,规划条件下若采用2倍截流干管截流,降雨频次控制率为22.0%。

由此可见,在现状条件及规划条件下,仅依靠截污干管截污控制溢流频次效果不佳,需增加调蓄设施进行辅助控制。本研究拟定调蓄容积为6 000 m^3 ,以2016年的降雨为边界条件,得出在高中区水量截污进低区情况下,小西门泵站全年截流频次 > 54 次,截流控制率 $> 46\%$;若高中区单独截污,小西门泵站全年截流频次 > 77 次,截流控制率 $> 65\%$ (见表1)。故本研究考虑通过截污管道+调蓄设施相结合的方式进行溢流频次控制。

表1 截流控制率与调蓄容积的关系

Tab.1 Relationship between control rate of interception and storage volume

调蓄池容积/ m^3	截流控制率/%	
	高中区截污进低区	高中区单独截污
4 000	39	59
5 000	41	63
6 000	46	65
7 000	50	68
8 000	52	69
9 000	55	75
10 000	57	78

3.2 治理方案概述

理想截污系统运行状况下,低区与高中区需分别截污进入截污管道,受现有截污模式的局限,现状小

西门泵站北侧高中区约1.74 km^2 区域截污后直接进入低区,如高中区建立单独截污系统,则需在人民路、解放路、西湖路上单独建立截污管道。本研究对在设定高中区单独截污及高中区截污进入低区(即保持现有截污模式)两类工况的前提下,再增设截流倍数条件,最终设定3种方案:方案1,在维持现状排水系统不变(高中区截污进低区)的情况下,增设1座6 000 m^3 的调蓄池,低区截流倍数为1;方案2,同样考虑低区接收高中区流量,同时提高高中区和低区的截流倍数为2,截留污水接入西侧低排管网,与低区内雨污水混合,经小西门污水泵站截污后,经雨水泵站排入湘江;方案3,高中区单独截污,小西门泵站仅排放低排汇水区内的雨污水,同时提高低区截流倍数为2。方案2和方案3均考虑6 000 m^3 调蓄池与截污干管联用,调蓄池设置于低区小西门泵站附近。

3.3 治理方案评估

根据拟定的3个治理方案,以长沙市2016年降雨资料作为边界条件,模拟得到3个方案的全年溢流污染负荷,详见表2。

表2 不同工况下的溢流污染情况

Tab.2 Overflow pollution under different working conditions

$t \cdot a^{-1}$

项 目	小西门泵站溢流负荷			研究区总体溢流负荷		
	COD	$NH_3 - N$	TP	COD	$NH_3 - N$	TP
现状	308.10	15.50	3.60	455.67	21.01	4.66
方案1	87.72	4.09	0.93	342.14	15.52	3.38
方案2	156.20	6.70	1.40	310.23	11.56	2.58
方案3	61.32	2.99	0.73	215.01	8.13	1.65

从小西门泵站溢流情况来看,方案3的溢流污染控制效果较好,相比现状工况,COD、 $NH_3 - N$ 、TP的溢流负荷削减率依次为80.10%、80.71%、79.72%。这是由于方案3采用了高低区分流的截污方式,极大地减轻了低区截污干管的负荷,由小西门泵站强排至外江的雨污混合水量同步减少。从表2还可以看出,方案1虽然未改变现状排水情况,只增设了调蓄池,但小西门的溢流负荷削减率却比方案2高1.5~1.8倍,这说明由于调蓄池位于低区截流干管附近,起到了分流的作用,缓解了小西门泵站强排混合污水的压力。另一方面,由于方案2采用了较高的截流倍数,使得截流干管和调蓄池基本满负荷运行,导致通过小西门泵站的溢流负荷剧增。

从研究区总体溢流负荷来看,方案1和方案2对3类污染物的溢流负荷削减率差距不大,但是方

案2的溢流负荷均略低于方案1。这说明方案2在一定程度上会增加低区小西门泵站的溢流负荷,但由于高区面积大,污染负荷高,增大截流倍数对高区的溢流负荷控制效果明显,使得研究区总体的溢流负荷较方案1有所下降。方案3由于采取分区截污的方式,低区截污干管、调蓄池的运行负荷都较为良好,故而研究区的COD溢流负荷削减率为52.81%, $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP的溢流负荷削减率均高于60%。通过模拟统计,方案1、方案2和方案3的年总溢流次数分别为41、50、33次。

总的来说,方案3具备溢流次数和溢流负荷削减的双重优势;方案2对研究区总体溢流负荷削减有利,但同时会增加小西门泵站的溢流负荷;方案1对小西门附近的溢流负荷控制较好,但对研究区总体的溢流负荷控制不佳。因此,考虑到小西门泵站位于湘江一级饮用水源保护区,本研究推荐采用方案3对研究区进行合流制溢流污染治理。从可实施性来看,方案1不另设截污管道,实施难度较低,但研究区总体截污效果与方案3的差距较大;方案2需对截污管道进行改造,可采用原位换管的方式,管线探测和施工条件相对完善;方案3需新建截污干管,由于人民路、解放路、西湖路车流量较大,同时实施较困难。因此,建议近期增设调蓄池,缓解研究区溢流污染,远期逐步实施方案3的新增截污管建设。

4 结论

① 合流制排水系统的溢流污染负荷受雨污混合水的水质、水量双重约束,因此受降雨量和雨型的影响,场次降雨污染物EMC值、污染物稳定浓度和浓度峰值出现时间不尽相同。

② 在研究区降雨资料齐全的情况下,开展溢流污染研究时有必要通过模型连续模拟,从全年溢流负荷削减率、溢流频次等多方面进行评估。

③ 针对本研究区高低排水系统分区排水的情况,对小西门泵站和研究区整体溢流污染治理方案进行分类评估,得出高低区单独截污+提高截流倍数+调蓄池的治理方案最优,对小西门泵站和研究区的溢流污染负荷削减率分别高于80%和50%,全年溢流次数从118次削减为33次。

参考文献:

- [1] 颜晓斐. 上海成都路合流污水调蓄池的污染减排效益及优化[J]. 中国给水排水,2010,26(8):6-10,14.

Yan Xiaofei. Pollution reduction benefit and optimization measures of Chengdulu combined sewage detention tank in Shanghai[J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(8):6-10,14(in Chinese).

- [2] 王建龙,黄涛,张萍萍,等. 基于道路调节的合流制溢流污染控制可行性分析[J]. 中国给水排水,2016,32(4):7-12.

Wang Jianlong, Huang Tao, Zhang Pingping, et al. Feasibility analysis of controlling pollution from combined sewer overflow by road surface detention[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(4):7-12(in Chinese).

- [3] Alves A, Sanchez A, Vojinovic Z, et al. Evolutionary and holistic assessment of green-grey infrastructure for CSO reduction[J]. Water, 2016, 8(9):402.

- [4] 张伟,钱静,李田,等. 水力模型辅助合流制系统改造及其运行效果评估[J]. 中国给水排水,2015,31(7):114-118.

Zhang Wei, Qian Jing, Li Tian, et al. Reconstruction of combined sewer system with help of hydraulic model and its performance assessment[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(7):114-118(in Chinese).

- [5] 于磊,马盼盼,潘兴瑶,等. 海绵城市源头措施对合流制溢流的减控效果研究[J]. 北京师范大学学报:自然科学版,2019,55(4):476-480.

Yu Lei, Ma Panpan, Pan Xingyao, et al. Effect of sponge city source measures for combined sewer overflows reduction and control[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2019, 55(4):476-480(in Chinese).



作者简介:边兆生(1990-),男,河南开封人,硕士,工程师,研究方向为城市给水排水工程。

E-mail:845385503@qq.com

收稿日期:2019-12-10