

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.18.005

黄孝河、机场河流域合流区溢流污染控制标准探索

符韵¹, 杨森², 李敏¹, 姚永连³, 杨婕¹

(1. 武汉市水务科学研究院<武汉市水土保持监测站>, 湖北 武汉 430014; 2. 宜水环境科技<上海>有限公司, 上海 200030; 3. 中规院<北京>规划设计公司, 北京 100044)

摘要: 黄孝河、机场河为汉口地区的重要河流,由于其流域合流制区域缺少有效的溢流污染控制措施,故雨季溢流污染严重,雨后河道水质变差。为了进一步提升黄孝河、机场河流域水环境质量,结合现有设施现状,通过InfoWorks模型,基于2个典型年的小雨、中雨、大雨和暴雨场次降雨,从水质、水量两个方向分析控制溢流量与年溢流次数的关系。研究表明,随着降雨的增加,溢流量逐步增多且溢流污染物平均浓度呈现先增大后减小的趋势,在年溢流10次左右对应的场次降雨下溢流量上升的斜率较为明显,可控制溢流污染总量和污染物浓度相对较优。

关键词: 黄孝河; 机场河; 溢流污染; 溢流次数

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)18-0029-07

Exploration of Overflow Pollution Control Standards in the Combined Sewer Areas of Huangxiao River and Jichang River

FU Yun¹, YANG Sen², LI Min¹, YAO Yong-lian³, YANG Jie¹

(1. Institute of Water Science Researching in Wuhan, Wuhan 430014, China; 2. Ewaters Environmental Science and Technology <Shanghai> Co. Ltd., Shanghai 200030, China; 3. CAUPD Beijing Planning & Design Consultants Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: Huangxiao River and Jichang River are important rivers in Hankou area. However, due to inadequate overflow pollution control in the combined sewer system area, there is significant pollution during rainy seasons, further deteriorating water quality post-rain. To enhance the water environment quality of Huangxiao River and Jichang River basins, through InfoWorks model calculation and existing facilities analysis, this study examined the impact of small, medium, large, and heavy rainfall events based on two typical annual rainfalls to understand the relationship between overflow control and annual overflow occurrences from the water quality and quantity directions. The results indicated that with the increase of rainfall, the amount of overflow increases gradually and the average concentration of overflow pollutant increases first and then decreases. The escalation in overflow is more pronounced, yet effective control manages both the total overflow volume and pollution concentration better at approximately 10 annual overflow occurrences.

Key words: Huangxiao River; Jichang River; overflow pollution; overflow times

黄孝河、机场河是汉口主要的两条河流,流域内污水收集不彻底导致黄孝河、机场河旱季污水直排入河情况严重。2017年10月—12月(78 d)内,黄

孝河铁路桥箱涵平均污水量为 $19 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,有64个无雨天(日降雨量 $\leq 2 \text{ mm}$)出现污水直排入河情况;机场河暗涵平均污水量为 $21.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,有25个无

雨天(日降雨量 ≤ 2 mm)出现污水直排入河情况,但污水厂处理能力尚有富余。

为了解决旱季污水直排入河问题,2017年底在黄孝河起端(黄孝河铁路桥箱涵进黄孝河处)设置钢坝闸,机场河明渠起端(机场河暗涵进机场河处)设置东、西渠钢坝闸,并设截污管从钢坝闸前导流进入污水处理厂,充分利用污水处理厂的处理能力来增加污水收集率。但是钢坝闸建成后由于上游系统来水量与下游截污、处理不匹配导致流域排水系统长期处于憋排状态,系统应对降雨无调蓄能力、高水位带来管网内流速低及污染物沉积严重等风险,因此,流域存在内涝和污染双重问题。

为解决流域内合流制溢流(CSO)污染问题,近期采用调蓄和截污箱涵的方式进行控制,远期再结合海绵城市建设进一步提高^[1]。我国目前暂无专门针对CSO污染控制的专项国家标准规范,《海绵城市建设评价标准》(GB/T 51345—2018)明确合流制溢流排放口的年溢流体积控制率不应小于50%的评价要求,整体上是一项很大的进步^[2]。但是该标准仅给出了溢流控制的最低要求,对于黄孝河、机场河来说,直接采用合流制溢流排放口的年溢流体积控制率不小于50%的标准过低,方案制定时溢流次数的选择没有其他合理依据。为此,通过模型评估,以环境效益最优为目标来探索黄孝河、机场河流域的CSO控制标准,采用合流制溢流控制次数这种直观、易于管理和考核的指标来指引CSO控制工程建设标准选择。

1 黄孝河、机场河流域排水概况

1.1 排水体制

黄孝河、机场河流域排水体制分布见图1。



图1 排水体制分布

Fig.1 Distribution of drainage system

目前,黄孝河、机场河流域的合流区分流区并存,上游存在49.4 km²(占总面积的39%)的合流制排水区域。本着雨污分流能分必分的原则,除古田片、常码头片、汉西片、二七滨江片和丹水池片旧城改造区域能改为分流制外,剩余34.8 km²(占总面积的28%)的老城区由于人口密度大、管网改造难度大而规划保留合流制排水体制。

1.2 现状雨水系统

黄孝河系统汇水面积为52.1 km²,区域排水由黄孝河明渠、温馨路箱涵后接建设渠明渠、汉黄路箱涵三条主干管(渠)收集送入后湖泵站。机场河系统汇水面积为73.9 km²,主要通过古田二路箱涵、禁口箱涵、机场河箱涵和金银潭排水渠汇集到机场河,汛期经常青泵站抽排至府河,非汛期经李家墩闸出府河(见图2)。本次研究的范围主要为明渠上游,即黄孝河明渠上游18.6 km²和机场河明渠上游54.2 km²的汇水面积。由于黄孝河系统和机场河系统通过西北湖箱涵连通,因此将两个系统一起分析。



图2 雨水系统分布

Fig.2 Distribution of stormwater system

1.3 钢坝闸情况

上游合流制管网系统的下游出口位于黄孝河箱涵末端和机场河箱涵末端,在出口箱涵末端进入河道明渠前,现状设置了截污钢坝闸,其中黄孝河箱涵出口河道钢坝闸闸底高程14.90 m,闸顶高程18.5 m,机场河箱涵出口河道钢坝闸闸底高程15.50 m,闸顶高程18.25 m,故截流的上游合流箱涵污水不排入河道明渠。在目前的闸控运行状态下,黄孝河旱季闸前运行水位在17.5~17.8 m范围波动,机场河旱季闸前运行水位在17.5~17.6 m范

围波动,旱季闸前水位高,不会发生溢流。在雨季黄孝河、机场河的钢坝闸均不开启的情形下,随着降雨量的增大,闸前水位持续升高,最终发生闸顶溢流。

2 排水系统的主要特征

2.1 独特的“憋排”系统

黄孝河、机场河流域地势平缓,管网坡度总体较小。近10年来,武汉陆续实施了清水入湖工程、黑臭水体治理等项目。为改善合流制系统污水随雨水排入黄孝河、机场河的情况,系统末端排口多采用设闸拦截,并设截污管导流进入污水系统的截污运行模式,导致合流系统一直处于高位运行。近期管网系统探查资料显示,汉口地区污水系统一直处于高水位运行状况,存在大量高水位管网在未进行管网降水的情况下无法进行管网探查工作,而在可进行探查的1 707.43 km管网中,满管管段约348.71 km,占普查管网的20.42%。

2.2 坡度缓、易淤积的大汇水面排水系统

黄孝河、机场河流域在全国乃至全世界的合流制体系内都属于较为罕见的大面积单一出口的体系,旱季黄孝河明渠上游18.6 km²的汇水与机场河明渠上游54.2 km²的汇水分别经黄孝河箱涵出口、机场河箱涵出口进入截污管,雨季超过钢坝闸溢流水位后溢流排出。受地形限制,汇水区域内管网坡度较小,管内流速普遍低于0.4 m/s,因此管网易出现淤积。区域骨干排水通道约5 km,雨水行进时间约1~2 h,小雨时管网流速小,污染物逐步沉积且浓度进一步升高;大雨时流速增大,污染物被雨水冲刷进入河道,因此雨季对受纳水体造成冲击性影响。

2.3 合流制管网的外来水量占比高

汉口区域的地铁、建筑工程等深基坑排水大多排入合流制管网,加之管网存在不同程度的破裂、渗漏、脱节等结构性缺陷,因此管网外来水量较多。通过对片区内排水管网水的水质、水量监测,采用流量-水质物料守恒法估算汉口黄孝河、机场河排水系统外来水的入流入渗率。其中,黄孝河明渠上游的铁路桥片外来水入流入渗率约为51.82%,机场河明渠上游的古田二路片外来水入流入渗率约为47.93%,常青路片外来水入流入渗率约为31.09%^[3]。

3 溢流控制存在的问题及解决思路

3.1 溢流控制存在的问题

黄孝河、机场河流域雨水体系面积大,流程长,出口集中,在近年合流溢流治理的历史过程中,雨水体系拦截、封堵等末端治理遗留的问题带来了不同的溢流污染特征,给溢流污染控制带来了极大的难度。

① 典型的“憋排”系统带来大范围的旱季高水位运行问题,导致系统应对降雨无调蓄能力,小雨就会出现低洼街道雨水井的满溢风险。以黄孝河低洼区域台北路为例,目前合流区内管网运行水位长期为18~19 m,区域地面高程仅为19.3 m左右,因此降雨满溢风险极大。

② 黄孝河、机场河流域合流制排水系统设计截流倍数接近1,但实际截流倍数仅为0.1左右。因现状排水系统截流能力普遍较低,故雨季溢流风险较高。

③ 污水处理厂难以承纳溢流污染,流域范围内2座污水处理厂目前均已出现旱季超负荷运行的状况,雨季受管网输送系统能力和排放标准的限制,污水处理厂已无法通过超负荷运行来满足雨季合流污水处理要求,暴雨造成截流管网溢流口及污水处理厂前发生大量溢流,即便建设分散式调蓄设施,泵送回污水处理厂的处理时间和处理余量仍然不足。

3.2 溢流解决思路

针对流域上游合流区溢流污染的现状,近期规划新建低位箱涵以收集上游合流区污水至溢流污水处理和储存设施,收集污水经处理达标后排放,实现对溢流污染的直接控制。远期规划扩建污水处理厂来增加雨季处理水量,同时结合上游合流区管网清淤及缺陷修复来降低上游管网高水位,进一步减轻雨季检查井满溢风险、提升系统实际截流倍数。近期规划设计方案制定时首先要考虑的问题是溢流污染控制标准的选择,因此研究重点是溢流口处调蓄设施设计标准的确定。从便于监管角度考虑,武汉市选择年均溢流频次作为控制标准,以监测数据为基础,以水质和水量两个方向的模型评估为手段,以环境效益和经济效益最优为目标来研究黄孝河、机场河流域的溢流次数。

4 溢流次数的研究

4.1 研究思路

在确定溢流控制规模时,先用场次降雨来模拟溢流量、溢流污染物浓度和总量,并分析相对能够控制较高污染负荷的降雨区间,然后分析能够控制较高污染负荷相应降雨区间所对应的年降雨溢流控制次数,以期为溢流控制工程规模提供参考依据;在进行工程方案设计和效果评估与方案决策时,用年降雨进行模拟复核。

4.2 建模过程

4.2.1 模型构建

利用2019年汉口片区管网隐患点普查管网数据进行管网拓扑关系的梳理和数据检查,采用InfoWorks软件建立机场河钢坝闸、黄孝河钢坝闸上游的雨水与合流管网以及钢坝闸下游河道(黄孝河、机场河)耦合水力模型,用于合流制溢流分析评估,动态模拟排水管网和明渠中的重力排水、管网泵站抽排压力流、闸门截流等复杂水动力过程。考虑地形、管网汇水和下游河道的区间汇水,划分雨水子集水区。各子集水区根据所在影像解析的下垫面类型(屋面、道路、铺装、绿地、水面等)进行面积归类,按照透水难易特性进行各子集水区的产流计算。其中,绿地透水下垫面采用Horton下渗法模拟,不透水或弱透水下垫面采用固定径流系数法模拟。综合考虑区域内的污水泵站服务分区、区域内社区分布和第六次人口普查数据,对合流制管网的污水量进行分配,然后根据各合流制区域污水泵站的旱季抽排水量进行水量平衡计算。

另外,在钢坝闸上游雨水与合流管网水力模型基础上构建管网水质模型,考虑雨水面源污染与合流管收集污水的混合,采用一维对流扩散模型模拟污染物在管网内的输运变化。在项目开展过程中,对4个居住小区的污水进入市政管前的检查井进行水质取样监测,其中COD平均约252 mg/L;对合流制区域内3座污水泵站格栅井进行晴天取样监测,COD为96~121 mg/L。

4.2.2 模型校验

利用项目开展过程中获取的相关数据开展模型校验。在合流管网中开展了为期一周的管网水深监测,获取了上下游合流管道在晴天工况下的运行水深数据。收集同期合流制区域内3座污水泵站

的抽排水量,获取了日抽排流量统计数据。模拟晴天合流制排水管网在污水泵站运行和合流管箱涵出口处截流钢坝闸关闭状态下的工况,与水深监测和泵站抽排水量统计数据进行了对比,得到如下结果:

① 3座污水泵站的日均抽排水量、日最大抽排水量与模拟抽排水量差值占比均介于±10%以内(见表1)。

表1 污水泵站2019年8月晴天日均抽排水量和最大日抽排水量与模拟抽排水量对比

Tab.1 Comparison of daily average pumping capacity, maximum daily pumping capacity and simulated pumping capacity of sewage pumping station in August, 2019

污水泵站	晴天平均抽排水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	晴天最大抽排水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	晴天模拟抽排水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	晴天模拟抽排量与晴天平均抽排量 差值占比/%	晴天模拟抽排量与晴天最大抽排量 差值占比/%
铁路桥	302 240	324 150	298 090	-1.37	-8.04
常青路	382 727	412 500	383 422	0.18	-7.05
古田二路	200 785	222 570	223 244	11.19	0.30

② 对管网水深监测数据进行分析,剔除明显存疑的6个监测站点数据,对比为期一周晴天工况下8个站点的管网水深监测数据(黄孝河分区5个、机场河分区3个)。监测结果表明,7个站点的模拟水深过程与监测水深过程趋势吻合良好,纳什效率系数介于0.52~0.73之间;1个站点的趋势对比略差,表现为监测的低水深过程在模拟过程反映不明显。由于该监测点距离污水泵站较近,受泵站抽排影响明显,在无泵机启停监测数据下不再进一步调整模拟。

在暴雨情形下,开启合流制箱涵出口处的钢坝闸,上游合流管网来水将分别进入黄孝河、机场河明渠,经河道末端的后湖排涝泵站和常青排涝泵站外排。通过获取设置在明渠起端的水位标尺人工记录数据,选择记录较为齐全的7月5日—6日的小时水位数据用于模型暴雨情景校验。降雨数据采用同期区域内的3个有效降雨站点监测的5 min降雨数据(降雨总量为110~132 mm)。模拟对比结果表明,黄孝河起端明渠水位模拟过程与监测过程趋势吻合良好,纳什效率系数为0.83,最高水位差为10 cm;机场河起端明渠水位模拟过程与监测过程趋势吻合良好,纳什效率系数为0.81,最高水位差为

14 cm。

由于管网水质模型校验数据相对有限,因此2019年8月对合流制区域的3座污水泵站格栅井进行晴天取样监测,其中COD的4次检测数据介于96~121 mg/L,模拟数值介于103~128 mg/L。

4.3 模拟分析

以降雨总量、日降雨天数、暴雨天数较为接近近35年平均值为原则,选取了两个典型年5 min间隔的降雨数据(见表2),用于合流制溢流评估。

表2 典型年降雨统计

Tab.2 Statistics of typical year rainfall

典型年	总降雨量/ mm	降雨场 次/次	场次最大降 雨量/mm	场次最大5 min降 雨强度/(mm·h ⁻¹)
代表年1	1 039.2	114	118.2	74.9
代表年2	1 139.4	100	92.1	127.2

注: 降雨场次按照6 h间隔进行划分。

合流制系统末端截流工程建设需要平衡CSO控制与排涝安全需求,既要保障雨天不溢流或少溢流来控制或减少溢流污染入河,又要保障在中大雨情形下末端截流闸开启下泄上游合流制管网雨水径流的排水安全需求。因而CSO控制工程溢流目标的选择,需要模拟合流制系统在中小降雨下的现状钢坝闸不开启工况时的溢流量,以及控制该场次降雨量不溢流相对应的控制溢流次数;同时也需要模拟小雨、中雨、大雨和暴雨情形下现状钢坝闸不开闸时的溢流污染物总量和浓度变化;综合溢流量、溢流污染负荷分析,以指引CSO控制工程建设目标选择。

① 溢流量分析

将2个典型年的场次降雨按照降雨量由大到小排序,从中挑选11场雨量为4.9~49.2 mm的降雨过程(相近雨量的降雨选择降雨强度大者)用于水力模型模拟计算,分析末端截流钢坝闸不开启工况下的溢流量(见表3)。

从表3可见,现状合流制系统在场次降雨量为10.0 mm条件下,汇集的上游合流管网中的雨水径流将从关闭的钢坝闸顶开始溢流;随着降雨的增加,溢流量逐步增大;在24.4 mm和37.6 mm场次降雨下溢流量上升的斜率较为明显。进一步分析控制该场次降雨量不溢流所对应的典型年内的场次降雨量从大到小的次序,可以得到对应的溢流控制次数(见图3)。可见,控制24.4 mm和37.6 mm场

次降雨不溢流,相当于代表年2、代表年1全年控制的溢流次数分别为10~13次和7~8次。

表3 典型年11场次降雨模拟的现状合流系统末端溢流量统计

Tab.3 Statistics of overflow at the end of the current combined sewer system of 11 rainfalls from the typical year

序号	降雨量/mm	降雨累积时 长/min	黄孝河钢坝 闸顶溢流 量/10 ⁴ m ³	机场河渠钢 坝闸顶溢流 量/10 ⁴ m ³
1	4.9	35	0	0
2	7.0	25	0	0
3	10.0	225	0.4	0.7
4	11.6	55	2.8	1.8
5	12.9	70	4.5	3.9
6	14.8	70	8.2	6.6
7	19.1	245	12.9	12.1
8	24.4	65	21.3	20.6
9	37.6	195	39.9	40.3
10	46.3	240	51.3	54.3
11	49.2	290	53.0	56.8

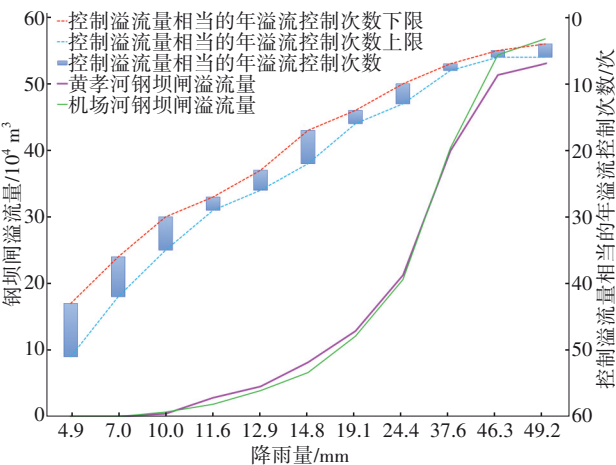


图3 典型年11场降雨模拟的现状合流系统末端钢坝闸顶溢流量和溢流控制次数

Fig.3 Simulation of overflow amount and overflow control events of steel dam gate at the end of the current combined sewer system of 11 rainfalls from the typical year

② 溢流污染分析

将2个典型年场次降雨数据混合,按照降雨量由大到小排序,在表3的基础上增加5场大雨及暴雨场次,形成涵盖小雨、中雨、大雨和暴雨事的16场次降雨数据(见表4),用于水质模拟。分析在末端截流钢坝闸不开启工况下,雨水径流污染与合流管网污水混合后从钢坝闸顶溢流量、COD浓度及其总量,模拟结果分别见图4、5。

表4 两个典型年场次降雨选中的16场次降雨
Tab.4 Selected 16 rainfalls from two typical year rainfalls

序号	降雨量/mm	降雨累积时长/min
1	4.9	35
2	7.0	25
3	10.0	225
4	11.6	55
5	12.9	70
6	14.8	70
7	19.1	245
8	24.4	65
9	37.6	195
10	46.3	240
11	49.2	290
12	54.8	935
13	60.2	610
14	75.4	1 125
15	92.1	210
16	118.2	890

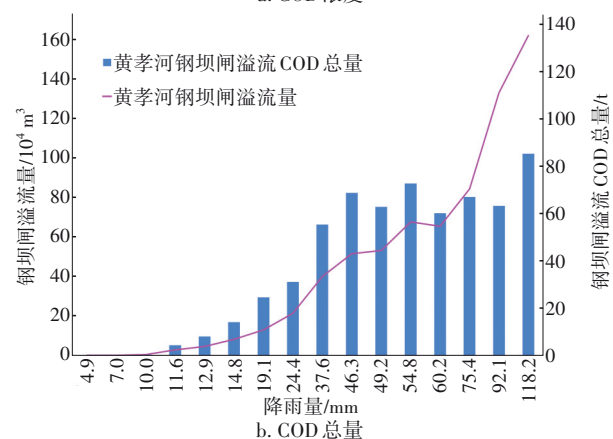
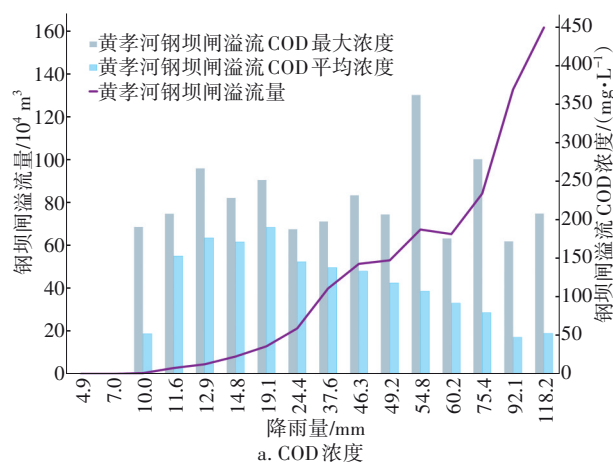


图4 典型年16场次降雨量模拟下现状合流系统末端黄孝河钢坝闸顶溢流COD浓度与总量

Fig.4 Simulation of Huangxiao River steel dam gate overflow COD concentration and total amount at the end of the current combined sewer system of 16 rainfalls from the typical year

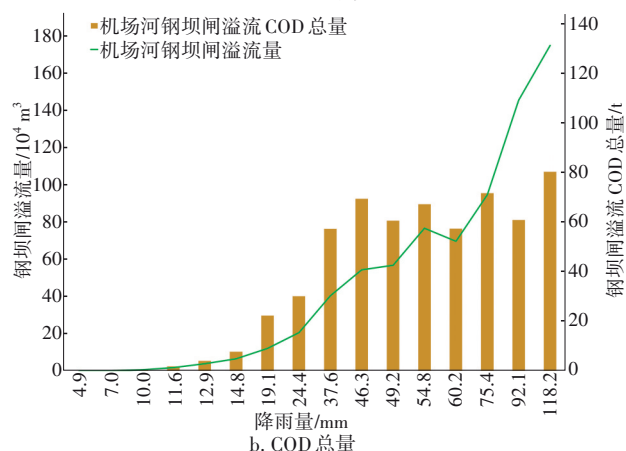
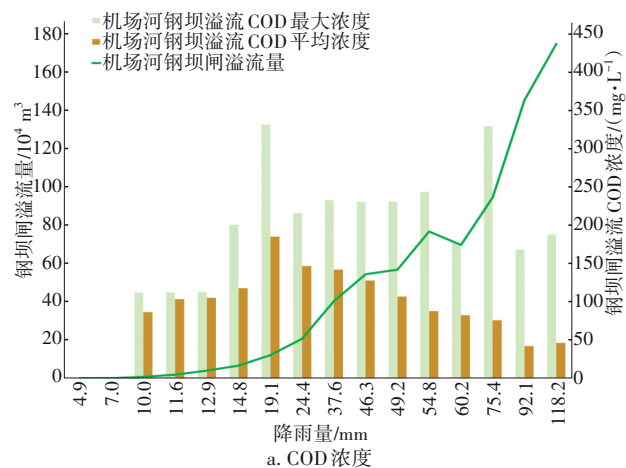


图5 典型年16场次降雨量模拟下现状合流系统末端机场河钢坝闸顶溢流COD浓度与总量

Fig.5 Simulation of Jichang River steel dam gate overflow COD concentration and total amount at the end of the current combined sewer system of 16 rainfalls from the typical year

在小雨、中雨、大雨和暴雨模拟下的黄孝河钢坝闸、机场河钢坝闸溢流COD平均浓度和总量来看,随着降雨量的增加,COD平均浓度呈现先增大后减少的趋势,在19.1 mm场次降雨的COD平均浓度最大;溢流COD总量随着降雨量增加和初期径流污染汇入呈现先快速增加,在大雨和暴雨级别下的中后期降雨径流污染负荷相对较小,表现为溢流污染总量未完全随着降雨总量的增加而增加,从对应的溢流污染平均浓度也可以看出降雨中后期的污染浓度较低;其中24.4 mm与37.6 mm降雨下溢流污染总量变幅明显,而降雨量高于37.6 mm后的溢流污染总量增幅不明显。

综合上述溢流水量和COD溢流污染总量分析,控制24.4~37.6 mm降雨径流污染可控制溢流污染

总量和污染浓度相对较优,相当于年溢流次数7~13次。在进行溢流控制目标选择时,还需兼顾上游合流制管网的排水安全。结合流域排水特征,将年溢流次数控制在10次左右能有效控制溢流污染负荷,在排涝要求为先时,可结合钢坝闸开闸运行与调度组合来实现。

5 结语

结合区域排水特征建立水力水质模型,模拟分析了黄孝河、机场河合流制区域在现状末端钢坝闸截流情形下的溢流水量和溢流污染物总量,得出如下结论和建议:

① 基于2个典型年的小雨、中雨、大雨和暴雨场次降雨进行溢流控制目标的分析,年溢流次数宜控制在10次左右,可有效控制CSO污染。

② 在确定溢流控制目标后,CSO工程规模计算中需采用5 min间隔年降雨数据开展全年模拟分析,以辅助工程规模优化。

③ 模拟得出溢流污染物平均浓度随降雨量增加呈现先增大后减小的趋势,在此基础上根据典型降雨模拟得到的具体数据,可从技术经济性的角度得到相对最优的控制降雨量,为溢流控制设施的规模制定提供参考。

④ 由于缺失雨天COD监测数据,雨天模拟的溢流水量和COD的绝对数值可能存在偏差,在使用成果时需关注污染物平均浓度和总量的变化趋势。此外,在大雨、暴雨事件下,为了保障上游排涝安全,合流箱涵出口处的截污钢坝闸会开启,显著增加管网流速,使合流管内的沉积污染物不同程度地进入下游河道。在条件允许的情形下,建议增加溢流 $\text{NH}_3\text{-N}$ 模拟分析,为下游河道的水环境管理提供

支撑。

参考文献:

- [1] 赵泽坤,车伍,赵杨,等. 美国合流制溢流污染控制灰绿设施结合的经验[J]. 中国给水排水, 2018, 34(20): 36-41.
ZHAO Zekun, CHE Wu, ZHAO Yang, et al. Experiences of combination of gray-green infrastructure for combined sewer overflow control in the United States [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(20): 36-41 (in Chinese).
- [2] 赵泽坤,车伍,赵杨,等. 中美合流制溢流污染控制概要比较[J]. 给水排水, 2018, 44(11): 128-134.
ZHAO Zekun, CHE Wu, ZHAO Yang, et al. Summary comparison of combined sewer overflow control between China and the United States [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(11): 128-134 (in Chinese).
- [3] 符韵,李敏,钟兴. 基于监测评估的汉口片区排水系统入渗分析方法与实践[J]. 净水技术, 2021, 40(7): 92-99.
FU Yun, LI Min, ZHONG Xing. Analysis and practice on infiltration rate of external water in drainage system of Hankou area based on monitoring and evaluation [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(7): 92-99 (in Chinese).

作者简介:符韵(1990-),女,江西抚州人,硕士,高级工程师,主要从事排水规划、设计、科研工作。

E-mail:475832621@qq.com

收稿日期:2022-04-22

修回日期:2022-07-12

(编辑:丁彩娟)

珍惜水,爱护水,以水促和平