

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.24.020

联合调度策略用于河网区污水系统倒灌口排查

石顺权^{1,2}, 唐雨语¹, 陈德业¹, 胡和平¹, 闫超¹, 梁莎²

(1. 中水珠江规划勘测设计有限公司, 广东 广州 510610; 2. 华中科技大学 环境科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为解决南方某河网地区污水处理厂进水低浓度、高负荷运行的问题,结合流域水系及排水系统的特点,通过污水处理厂-排水管网-河涌的联合调度策略对倒灌口进行排查,分析了倒灌口空间分布规律、与周边管网拓扑关系及其对污水处理厂进水水质的影响。测算结果表明,扣除倒灌口影响后,污水处理厂进水氨氮浓度可提高25.2%,并基于分析结果提出了增设防倒灌设施、溯源整改、破损管段修复、强化泵闸管理等工程技术措施。

关键词: 污水管网; 截流井; 倒灌口排查; 联合调度; 提质增效

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)24-0115-07

Application of Joint Dispatching Strategy to Investigate the Backflow Points of the Sewage System in the River Network Area

SHI Shun-quan^{1,2}, TANG Yu-yu¹, CHEN De-ye¹, HU He-ping¹, YAN Chao¹, LIANG Sha²

(1. China Water Resources Pearl River Planning Surveying and Designing Co. Ltd., Guangzhou 510610, China; 2. School of Environmental Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: To solve the problem of low influent concentration and high load operation of the sewage treatment plant in a river network area in south China, the backflow points were investigated by the joint dispatching strategy of sewage treatment plant, sewage pipeline network, and river system, according to the local conditions. The spatial distribution, topology relationship, and its influence on the water quality of the sewage treatment plant were estimated. After removing the impact of backflow points, the influent ammonia nitrogen concentration of the sewage treatment plant can be increased by 25.2% based on the measurement. Based on the analysis results, the technical measures such as adding anti-backflow facilities, rectifying traceability cation, repairing the damaged pipeline, and strengthening pump & gate management have been proposed.

Key words: sewage pipeline network; interception well; backflow point investigation; joint dispatching; improving quality and efficiency

近年来,随着以控源截污为核心理念的水环境 治理工作逐步深入,城市污水管网密度不断提高,污

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51404106); 中水珠江规划勘测设计有限公司科技计划项目(201903)
通信作者: 胡和平 E-mail: huhp@prpsdc.com

水系统日趋完善。以广州市区为例,城市平均截污管网密度已达到 10 km/km^2 。^[1]

理想的管网密度可为分流制污水系统的建立奠定良好的基础,但由于尚未开展全面雨污分流,不少城市实际仍采用截流式合流制排水系统,虽能有效避免晴天污水入河,但数量庞大的截流井截留了大量雨水,造成雨天污水处理厂进水浓度偏低;更为严重的是,在南方河网区域,由于部分排水干管管底高程低于河道常水位,大量河水通过临河截流井、合流管等倒灌口进入污水处理厂,造成污水系统长期低浓度、超负荷运行^[1-5]。然而,体系庞杂的排水管网信息常常未能随城市发展而同步更新,控制河水倒灌路径的关键排水节点信息大量遗失,相应的倒灌治理工作因此无从谈起。污水系统长期处于不良工况下低效运行,污水厂活性污泥加速老化^[6],因此针对排水管网的沿河倒灌口进行全面排查刻不容缓。

典型的河水倒灌口常位于运河常水位以下,隐蔽性较高,常规排查存在工作量大、效果不明显等局限性。陈威等^[7]通过巡河船+侧扫声呐的方式确定了水下出口,但摸查操作过程容易受河道沿岸水草等障碍物影响;沈小华等^[8]通过人工摸排、水位对比、管道检测、水质检测相结合的方法开展了排水管网摸查,但排查工作量巨大;李乐等^[9]提出利用智能管涵机器人在城市高水位排水管路中开展排查,但其技术尚未开展实际应用。

基于南方某河网地区污水处理厂提质增效工程,结合水利调度的相关理念提出了一种具体、高效的排查策略,通过厂-网-河的联合调度,明确了污水管网系统的沿河倒灌口,并系统分析倒灌的主要成因、影响区域及治理策略,以期“十四五”期间相关污水系统的提质增效工作提供参考。

1 项目概况

1.1 自然条件概况

南方某滨海城市污水处理厂位于东江下游的河网区,分三期建设,总设计规模为 $40\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,服务总面积 102 km^2 ,服务人口105.71万人。

污水处理厂服务片区内水系纵横,涉及大小河流27条,其中干流为大型人工运河,河底高程高于毗邻的东江南支流。受潮汐影响,运河平均水位在 $1.73\sim 2.33\text{ m}$ 之间波动。场地地下水水位季节性变

化明显,通常在 $0.5\sim 1.7\text{ m}$ 之间。

服务片区内降雨量充沛,但降水量年内分布不均,雨季为4月—9月,平均降水量为 258 mm ;10月—次年3月为旱季,平均降水量为 55 mm 。为适应防洪排涝及生产灌溉需要,服务片区内已经建设各类泵闸、排站29座,通过联合调度,可以控制市区外江、内河的水位,并避免雨天外江水倒灌造成城市内涝。

1.2 污水系统概况

该污水处理厂配套污水管网总长度为 890 km ,建成区的平均管网密度约为 9.11 km/km^2 ,基本具备全面开展雨污分流的基础条件。现状排水体制主体为分流制,局部为截流式合流制。综合考虑城市用地规划、地形地势、接纳水体位置等因素,将区域内污水细分为17个污水系统,各污水系统之间相互独立,仅通过一条 $\text{DN}2\,000\sim 2\,600$ 的主干管串接。主干管临河而建,沿线配套有中途提升泵站5座,其中位于中下游的大型提升泵站的设计规模达到 $30\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。

2021年该污水处理厂平均进水量为 $39.13\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,基本处于满负荷运行状态,其中超负荷运行天数占79.69%。进水 BOD_5 浓度较低,2021年10月—12月平均 BOD_5 为 80.0 mg/L ,进水最低 BOD_5 为 39.3 mg/L ,与目标考核浓度(96 mg/L)相差较大。整个污水处理厂长期处于低浓度、超负荷运行状态。

1.3 现状问题分析

造成污水处理厂低浓度运行的因素通常有河水倒灌、地下水入渗、雨水错接等^[10-13],对相关工程案例进行分析认为:河水倒灌是造成低浓度运行的主要原因^[3, 6, 14]。

倒灌原理如图1所示。

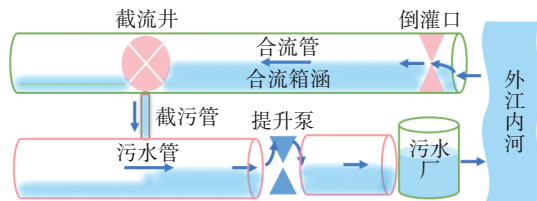


图1 倒灌原理示意

Fig.1 Schematic diagram of extra water flow backward

外江水通过倒灌口沿着合流管/涵上溯,翻越截流井溢流堰后倒灌进入污水管网,占据污水管网输空间并稀释污水中的污染物浓度,造成污水处理

厂高负荷、低浓度运行。

由于该污水处理厂地处滨海河网地区,水系纵横、地下管网密布、汇水区整体地势较低,容易受潮汐及降雨影响。结合管网运营报告、污水处理厂运行水质特征、现场初步排查结果等判断,沿河倒灌是污水处理厂进水污染物浓度低的主要及直接原因,对倒灌口的全面摸查是工程整治亟需开展的前期工作。

2 工作思路

2.1 基本概念

① 连通口:即排查过程中发现有污水漫流到河道的排口,连通口未必会倒灌,按照倒灌的可能性,连通口又可分为倒灌口及非倒灌口。

② 倒灌口:即存在倒灌风险的连通口,如管底高程较低的截流井溢流管、雨污合流管等,河道水位上升时河水能倒灌进入污水管网,是工程的重点整治对象。

③ 非倒灌口:不存在倒灌风险的连通口定义为非倒灌口,如管底高程较高的合流管、带有防倒灌闸门的合流管,虽然存在污水出流,但是不会发生河水倒灌。

2.2 基本工作原理

对污水处理厂服务片区内水系及排涝泵闸的关系进行整体分析后发现,联合调度流域内 29 座泵闸及排站,可将运河水导流至毗邻的外江水系(东江南支流),从而降低并控制流域外江、内河的整体水位,为管网摸查创造基本工作条件;通过控制污水处理厂进水负荷及配套污水提升泵站,可调控污水主干管网水位,并分别在管网高水位、管网低水位两种工况下,排查河道周边的污水出流情况,从而确定倒灌风险点。

2.3 联合调度方案

由于雨季城市面临较大防洪排涝压力,因此调度及排查工作安排在旱季晴天进行。

① 打开起点的节制闸,通过一次导流将运河水位控制在 1.7 m 以下,同时关闭中上游的节制闸,通过二次导流将运河上游来水全部导流至毗邻的外部水系;

② 关闭该污水处理厂服务片区内所有水库的泄洪渠,截断上游水库来水,同时开启内河末端的泵闸、排站,排空内河涌河水,使内河道基本处于

干枯状态,以此保证入河管网的末端管口均能露出水面。

具体的联合调度思路如图 2 所示。

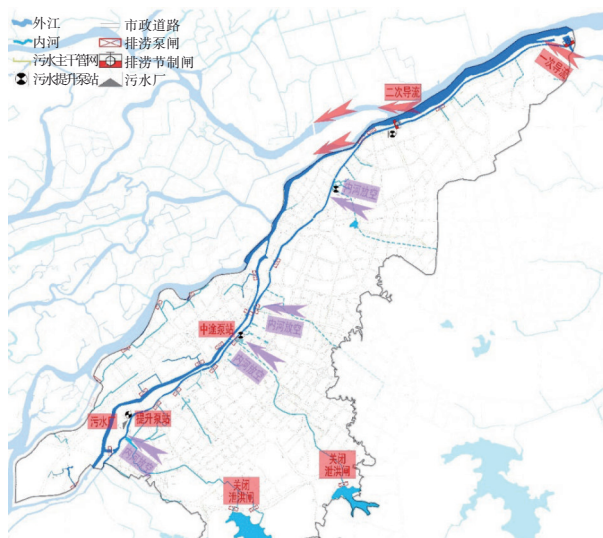


图2 联合调度方案示意

Fig.2 Schematic diagram of joint dispatching

2.4 排查思路

通过联合调度降低外江、内河水位,记录在此期间河涌的实时水位,随后通过调整污水处理厂运行负荷及提升泵调控污水管网水位,得到管网低水位及管网高水位两种工况,在不同工况下对有污水漫流到河道的管口(即连通口)进行详细排查,并记录污水处理厂水质、水量数据。具体排查思路如图 3 所示。

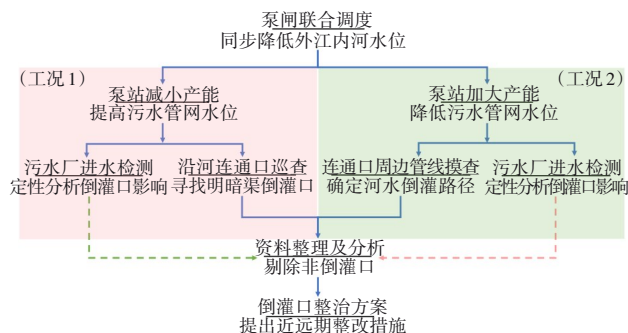


图3 倒灌口排查思路

Fig.3 Thinking of backflow point investigation

① 工况 1:河道低水位、管网高水位,排查连通口。

削减污水系统各级提升泵站产能,使污水暂时壅积在管网系统内,整体憋高污水管网液位,使得污水通过连通口溢流至河道中,记录排查发现的河

涌连通口位置、型式及流量等信息,同时记录污水处理厂水质、水量数据。

② 工况2:河道低水位、管网低水位,溯源排查连通口。

加大各级提升泵站产能(超量污水通过污水处理厂超越管道排入下游),降低管网液位,通过QV及CCTV等手段开展连通口溯源排查,明确连通口周边管网拓扑关系,通过管网流程拓扑关系分析倒灌发生部位,同时记录污水厂的水质、水量数据。

3 结果分析

3.1 倒灌口的空间分布规律

本次通过联合调度排查共发现83处连通口,包

括41处非倒灌口以及42处倒灌口。根据倒灌的成因、倒灌口的构型特点、倒灌影响范围等因素的差异,42处倒灌口可进一步分为6个子类:合流箱涵连通口、合流管连通口、截流井溢流口、破损雨污管段、带泵闸的暗渠出口以及带闸阀的截流井出口,其中后两个子类的倒灌口虽已设置防倒灌设施,但需要运营人员结合运河水位进行控制,管理成本较高,实际仍可能形成大量河水倒灌,根据其实际管理运行状况将其划定为倒灌口;非倒灌口可细分为独立合流管、高位排口、带挡水堰的连通口、带拍门的连通口以及其他排水口5个子类。连通口的具体分类及子类特点如表1所示。

表1 连通口的分类及特点

Tab.1 Classification and characteristic of sewage outfall

大类	子类	子类特点
倒灌口	合流箱涵连通口	箱涵与污水主干管网通过截流井相连,存在倒灌风险
	合流管连通口	合流管上游与污水主干管网通过截流井相连,存在倒灌风险
	截流井溢流口	截流井溢流口低于运河常水位
	破损雨污管段	管段破损,河水直接或间接倒灌进入污水管网,如河底埋管破损、河道挂管破损等
	带泵闸的暗渠出口	箱涵与污水主干管网相连且存在倒灌风险,但箱涵出口通过泵闸控制,需要人工运营
	带闸阀的截流井出口	截流井溢流口存在倒灌风险,但溢流口通过防倒灌闸门控制,需要人工运营
非倒灌口	独立合流管	不与主排水管网相连的排水管道
	高位排口	出水管口处管底高程高于运河高水位
	带挡水堰的连通口	出水管口处存在高于倒灌水位的挡水堰板
	带拍门的连通口	出水管口处存在重型防倒灌拍门
	其他排水口	不与主管网相连的间歇性排水通道,如山塘排水口、自来水破损出水口等

不同类型倒灌口如图4所示。



图4 不同类型倒灌口

Fig.4 Typical photograph of different backflow points

不同类型倒灌口数量及相对倒灌量如图5所示。

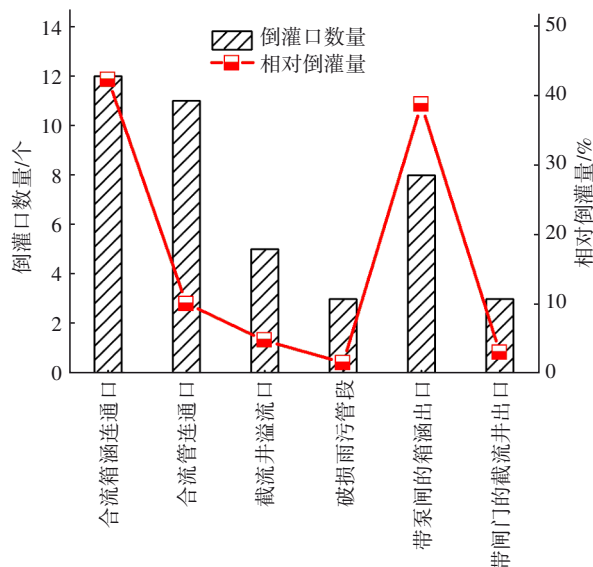


图5 不同类型倒灌口数量及相对倒灌量

Fig.5 Quantity and intrusion water proportion of different backflow points

合流管连通口、合流箱涵连通口及带泵闸的箱

涵出口占73.8%,截流井溢流口及带闸门的截流井出口占19.0%,破损雨污管段仅占7.2%。这是由于城市尚未完成全面雨污分流,大部分箱涵内部存在暗渠排口及相应的末端截污设施,这些截污设施实际可视为雨水及污水的连通部位,在运河水位受潮汐运动而涨落的过程中转化成倒灌通道。

以河道常水位、倒灌口主尺寸及底高程为主要参数,利用拓扑关系确定上游雨污连接口,通过矩形非满流及圆管非满流公式,定性计算分析不同类型倒灌口的相对倒灌量^[14-15],结果发现:合流箱涵连通口及带泵闸的箱涵出口理论倒灌量占比高达81.0%(见图5),说明小型箱涵的外水倒灌是污水处理厂进水浓度偏低的主要原因。

倒灌口的地理空间分布如图6(a)所示,42处倒灌口呈线状分布在外江内河沿岸,其中78.6%的倒灌口集中在外江沿岸,剩余21.4%的倒灌口散布在内河沿岸。造成这一现象的主要原因是外江流量大、水位高,位于水面以下的倒灌口(即管口位于常水位以下的排污口)对整体水质影响不明显,具有较高隐蔽性,因而在平时巡查过程中未被发现;而散布于内河沿岸的倒灌口对河涌水质及感官影响较大,很容易被发现,通过工程整改大部分已经完成整治,本次新发现的内河倒灌口,整体排污量较小或位于内河暗渠段,对明河段水质影响不明显且整治困难,因而在此前的巡查中未被发现或整治。

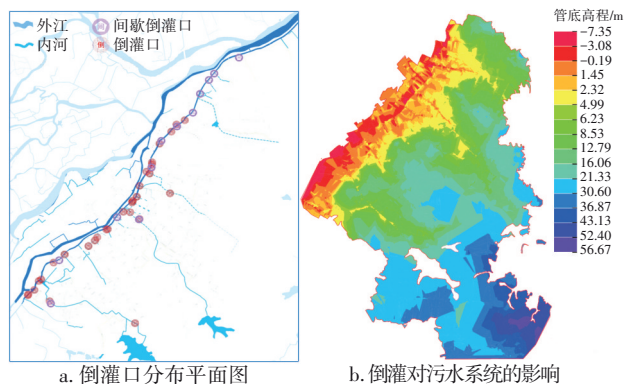


图6 倒灌口的分布及对污水系统的影响范围

Fig.6 Distribution of the backflow points and incidence of backflow points to sewage system based on DEM analysis

通过ArcGIS对河道水位、倒灌口高程、污水管(含合流管)的管底高程进行DEM模拟分析,评估倒灌口对市政污水系统的影响范围,结果如图6(b)所示,其中红色区域受倒灌影响最大,而蓝色区域则

几乎不受倒灌影响。

由图6可知,42处倒灌口集中分布的滨河地带,受倒灌影响最为严重,整体呈红色或橙色,说明在南方河网地区,倒灌的实际影响区域主要为临河地带的市政管网系统。

3.2 倒灌口对污水处理厂进水的影响

联合调度排查倒灌口期间,污水处理厂的运行水量及水质特征见图7。

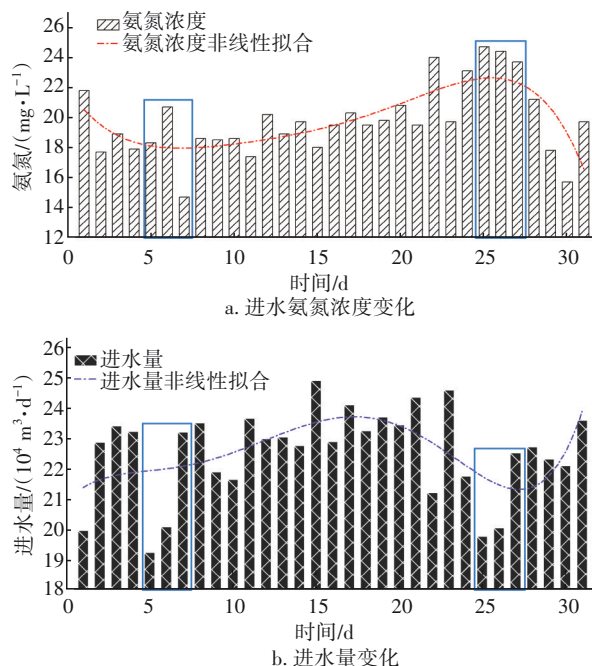


图7 联合调度期间污水厂进水氨氮浓度及水量变化

Fig.7 Variation of influent ammonia nitrogen concentration and sewage volume of the sewage treatment plant during the joint dispatching

对比发现,污水处理厂进水量与进水氨氮浓度呈负相关,说明存在外水涌入的情况。11月25日—28日为联合调度降水期间,在河道降水且污水提升泵减产时间段内,进水量下降12%;在河道降水且污水提升泵增大产能期间,进水量勉强达到平均值,污水处理厂总体进水量呈下降趋势,说明关闭倒灌口有助于削减外水倒灌量,继而降低污水处理厂负荷;与平均氨氮浓度相比,在河道低水位的工况下,污水处理厂平均进水氨氮浓度提高了25.2%,侧面证明沿河倒灌口作为河水倒灌的直接通道,对其开展彻底整治工作可有效提高污水处理厂的进水浓度。

4 整治措施

水质分析结果表明,控制河水倒灌能有效提高

污水处理厂进水浓度。针对此次排查发现的42处倒灌口的问题,结合现场实际及理论分析,提出了近期及远期的工程整改及管理措施。

① 工程整改措施

基于周边摸查管线勘察资料,针对不同类型的倒灌口制定了相应的整治措施,具体如下:

对于小型箱涵连通口、合流管连通口及沿河截流井溢流口,近期根据淹没水位的高程特点,在连通口外部加设防倒灌拍门,如图8(a)所示,或在保证过流断面的前提下,在检查井内合理设置挡水堰,如图8(b)所示,抬高连通口底高程。近期加设相关防倒灌设施后,虽能暂时缓解高水位问题,但同时会出现管涵末端淤积、拍门老化破损等新问题,需要不定期检查防倒灌设施运行状况并积极开展管涵清淤维护工作。为降低管网系统运营维护成本,远期可进行溯源整改,逐步取消小箱涵或合流管内部截流井。

对于大型箱涵连通口,近期设置带自控的电动泵闸,晴天尽量关闭泵闸或将泵闸维持在不能倒灌的开度,如图8(c)所示;远期开展箱涵内部排污口、截流井调查,并依托本市较为完善的管网系统逐步开展末端雨污分流,完成排污口整治及截流井上移。

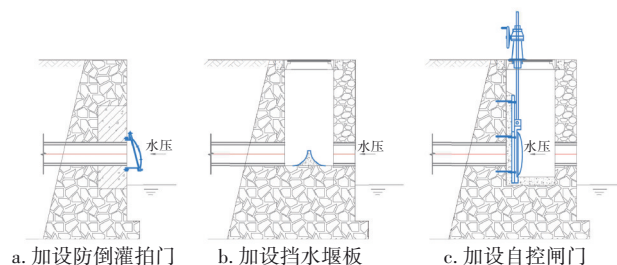


图8 典型防倒灌设施大样图

Fig.8 Detail plans of typical backflow prevention facilities

对于破损管段,近期建议全面核查、修复跨河管段,远期建议逐步取消跨河管段,不能取消的跨河管、沿河挂管由管养部门加强养护。

② 动态管理措施

由于以往工程建设的截流井未得到有效记录、保存和管理,部分形成了如今的倒灌口,需要耗费大量人力、物力进行排查和整治。建议通过GIS系统,结合互联网技术,记录污水处理厂配套截流井、跨河管、倒灌口等关键管网节点信息,并结合城市的工程建设动态,定时评估污水系统附属构筑物的

运行情况、更新相关信息,做到关键节点底数清楚,及时发现污水处理厂运行异常的原因,降低运营成本。

5 结论

结合流域特色,通过厂-网-河联合调度及系统排查,探讨了影响污水处理厂进水水质的42处沿河倒灌口的分类特征及分布规律。研究表明,河水通过小型箱涵及合流管倒灌是南方河网地区污水处理厂进水浓度偏低的主要成因,倒灌的实际影响区域主要为临河地带;同时通过水质监测及倒灌分析,论证了沿河倒灌口整治工作可有效提高污水浓度,并提出了具体的工程整改及动态管理措施。

参考文献:

- [1] 胡和平,王绍彪,廖瑜.污水管网高水位运行原因及对策措施研究[J].给水排水,2021,47(2):128-132.
HU Heping, WANG Shaobiao, LIAO Yu. Research on the causes and solutions for high water level operation of sewage system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(2): 128-132(in Chinese).
- [2] 陈玮,程彩霞,徐慧伟,等.合流制管网截流雨水对城镇污水处理厂处理效能影响分析[J].给水排水,2017,43(10):36-40.
CHEN Wei, CHENG Caixia, XU Huiwei, et al. Analysis on the effect of intercepted rainwater in combined sewer on the treatment efficiency of urban wastewater treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(10): 36-40(in Chinese).
- [3] 胡和平,陈德业,闫超,等.污水管网高水位运行工况下的截污方案探讨[J].给水排水,2019,45(4):50-55.
HU Heping, CHEN Deyue, YAN Chao, et al. Discussion on sewage interception under high water level operating condition of sewage system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(4): 50-55 (in Chinese).
- [4] 毛艳荣,卜俊玲,卢宝光,等.广州市西朗污水处理系统提质增效案例分析[J].给水排水,2020,46(10):45-51.
MAO Yanrong, BU Junling, LU Baoguang, et al. Research on quality improvement and efficiency improvement of Xilang sewage treatment system in Guangzhou City [J]. Water & Wastewater Engineering,

- 2020, 46(10): 45-51(in Chinese).
- [5] 杨俊. 关于南方某城镇污水系统提质增效的设计研究[J]. 低碳世界, 2022, 12(2): 31-33.
- YANG Jun. Design and research on improving quality and efficiency of sewage system in a town of south China [J]. Low Carbon World, 2022, 12 (2) : 31-33 (in Chinese).
- [6] 戴永康, 罗锋, 温巧贤. 东莞市城镇污水处理提质增效潜力分析[J]. 中国给水排水, 2020, 36(4): 1-5, 12.
- DAI Yongkang, LUO Feng, WEN Qiaoxian. Potential analysis of quality and efficiency improvement of municipal wastewater treatment in Dongguan [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36 (4) : 1-5, 12 (in Chinese).
- [7] 陈威, 王宵, 李杰. 城镇河道排污口排查及溯源方法研究[J]. 城市勘测, 2021(S1): 160-163.
- CHEN Wei, WANG Xiao, LI Jie. The study of checking and tracing the source of sewage outlets in urban rivers [J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2021(S1): 160-163(in Chinese).
- [8] 沈小华, 齐国辅, 严小明, 等. 南京市某排水管网检测工程实例分析[J]. 给水排水, 2020, 46(4): 134-138.
- SHEN Xiaohua, QI Guofu, YAN Xiaoming, *et al.* Analysis of a drainage pipe network inspection project in Nanjing [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(4): 134-138(in Chinese).
- [9] 李乐, 张伟, 赵光竹. 智能管涵检测机器人在城市高水位排水暗渠(箱涵)中的应用[J]. 中国勘察设计, 2021(4): 86-88.
- LI Le, ZHANG Wei, ZHAO Guangzhu. The application of intelligent pipe & culvert detection robot in urban high-water-level drainage culvert [J]. China Engineering & Consulting, 2021 (4) : 86-88 (in Chinese).
- [10] KARP C, KREBS P. Quantification of groundwater infiltration and surface water inflows in urban sewer networks based on a multiple model approach [J]. Water Research, 2011(45): 3129-3136.
- [11] MOESLUND J B H C. Water level estimation in sewer pipes using deep convolutional neural networks [J]. Water, 2020, 12(12): 3412.
- [12] 杨楠, 张栋俊, 张练, 等. 平原老城区污水处理提质增效实施策略分析[J]. 给水排水, 2020, 46(7): 22-26.
- YANG Nan, ZHANG Dongjun, ZHANG Lian, *et al.* Analysis of implementation strategies for improving wastewater treatment quality and effectiveness in the old urban plain area [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(7): 22-26(in Chinese).
- [13] 余凯华, 陈昱霖. 管网高水位运行城市污水处理设施补短板策略研究[J]. 给水排水, 2021, 47(10): 115-118.
- YU Kaihua, CHEN Yulin. Study on the strategy of making up the short board of urban sewage treatment facilities in high-water-level operation of pipe network [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(10): 115-118(in Chinese).
- [14] 马翠香, 王荣昌, 曾旭, 等. 平原河网地区污水管网外来水量衡算分析[J]. 净水技术, 2020, 39(6): 61-66.
- MA Cuixiang, WANG Rongchang, ZENG Xu, *et al.* Calculation and analysis of external water quantity of sewage pipe network in plain river network area [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(6): 61-66(in Chinese).
- [15] 王宏利. 基于水力模型的污水干管高水位运行原因诊断[J]. 城市道桥与防洪, 2021(5): 166-168.
- WANG Hongli. Diagnosis of high water level operation cause of main sewer based on hydraulic model [J]. Urban Roads, Bridges & Flood Control, 2021(5): 166-168(in Chinese).

作者简介:石顺权(1992-),男,湖北黄石人,硕士,注册环保工程师,主要从事水环境综合治理及海绵城市设计研究工作。

E-mail:shisq@prpsdc.com

收稿日期:2023-02-01

修回日期:2023-04-09

(编辑:衣春敏)