

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.09.018

基于多目标优化的厂网河一体化调度方法

刘小梅^{1,2}, 曾思育¹, 顾朝光², 赵洁², 陈文³

(1. 清华大学 环境学院, 北京 100084; 2. 北控水务集团, 北京 100102; 3. 丹华水利环境技术<上海>有限公司, 上海 200235)

摘要: 通过排水管网-污水厂-河道一体化调度能有效改善河网水环境质量,提升区域河道断面水质达标率。以杭州市余杭区塘河南片水系为例,分别构建排水管网和河网水动力水质模型,通过数值模拟,量化分析现状智能分流井、闸站调度规则下河道水质达标情况,识别关键调度要素,并通过选择合适的优化调度算法,选取排水管网的总溢流污染负荷、汛期污染强度和补水量作为优化目标,采用粒子群算法(PSO)和非支配排序遗传算法(NSGA-II)进行调度方案优化。结果表明,优化后排水管网溢流污染负荷削减80%,红卫港水质达标率从0提升到71%,枫树港COD_{Mn}平均浓度为11.6 mg/L,降低了37%,显著提高了河网水质达标率,降低了排口溢流污染,从而改善了水环境。

关键词: 厂网河一体化; 优化调度; 模拟分析; 多目标优化

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)09-0123-07

Integrated Scheduling Method for Wastewater Treatment Plant, Sewer Network and Receiving River Based on Multi-objective Optimization

LIU Xiao-mei^{1,2}, ZENG Si-yu¹, GU Chao-guang², ZHAO Jie², CHEN Wen³

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing Enterprises Water Group Limited, Beijing 100102, China; 3. DHI A/S, Shanghai 200235, China)

Abstract: Through the coordinated and integrated management of the drainage network, wastewater treatment plants, and receiving rivers, the water environmental quality of the river network can be significantly enhanced, leading to improved water quality regular rate in regional river sections. Hydrodynamic water quality models for both the drainage network and river network in the southern part of the Tanghe River system in Yuhang District were separately established. Through numerical simulation, the quantitative analysis of river water quality regular rate was conducted under the intelligent scheduling rules of diversion wells and sluice gates. Key scheduling factors were identified, and optimization objectives were established by selecting appropriate algorithms. Specifically, the total overflow pollution load, flood season pollution intensity, and supplementary water volume of the drainage network were chosen as the primary optimization targets. Particle swarm optimization (PSO) and non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) were employed to optimize the scheduling schemes. After optimization,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978374)

通信作者: 曾思育 E-mail: szeng@mail.tsinghua.edu.cn

the overflow pollution load of the drainage network was reduced by 80%, the water quality regular rate at Hongweigang River increased from 0 to 71%, and the average COD_{Mn} at Fengshugang River decreased by 37% to 11.6 mg/L. These improvements significantly enhanced the overall water quality regular rate of the river network and effectively mitigated outlet overflow pollution, thereby substantially improving the water environment.

Key words: wastewater treatment plant-sewer network-river integration; optimized scheduling; simulation analysis; multi-objective optimization

由于城市水系统中基础设施种类繁多、形式多样,且运行受到降雨等因素影响,导致其具有动态性、不确定性和多目标性等特性,往往出现污水厂与管网、管网与河道运行管理无法协同的现象,比如城市河流黑臭的主要原因之一就是许多城市,特别是老城区的雨污分流不彻底,降雨期间大量雨水混合污水进入河道,导致河道水环境难以改善^[1-2],而对于污水厂而言,只能被动接受排水管网输送的污水,如没有有效预警,无法提前做好厂内相应设施准备,不能充分利用各个调蓄设施,导致污水厂工艺调控滞后,甚至在高峰流量时出现厂前直接溢流排放,或是部分时段污水处理不达标。因此,为了满足河道水质达标的需求,排水管网-污水厂-河道(以下称厂网河)的一体化管控模式已成为解决我国及世界城市水污染问题的主要对策及趋势^[3]。如何进行排水管网与污水厂、排水管网与河网、河道上游与下游的耦合调控,实现各设施运行状态的识别诊断及优化调度控制,成为厂网河一体化运行的核心难点。

早在2011年Lacour等^[4]、Hoppe等^[5]就开始进行了以污染控制为目标的优化方法研究,主要是选择一些简单案例进行分析,之后逐步有学者应用到实际场景中,并对效果进行量化计算,如Vezzano等^[6]、Duy等^[7]分别应用到丹麦哥本哈根和法国波尔多城市的实际案例。随着监测技术的发展,结合在线数据进行优化调度研究,如Bachmann-Machnik等^[8],水质优化目标也从采用悬浮物(SS)或总悬浮物(TSS)为主逐渐转变为以COD为主^[9]。同时充分利用整个基础设施整合排水管网、污水厂,如Sun等^[10]提出一种基于污水排放的综合实时控制(RTC)方法,用于排水管网和污水厂综合排水系统。但总体而言,大多数研究仅考虑了污水厂、排水管网的综合系统,未将降雨、河道运行等考虑在内,导致最

终优化结果未完全反映排水系统状况,对于水体水质的改善作用有限。

笔者以南方典型平原河网地区杭州市余杭区塘河南片水系为例,按照厂网河一体化运行的要求,在构建排水管网水动力水质模型、河网水动力水质模型的基础上,采用多目标优化方法,提出智能分流井、河道闸站的优化调度方案,旨在为提升区域水质达标率提供技术支撑。

1 模型构建与关键调度因素识别

1.1 研究区域与数据来源

研究区域位于杭州市余杭区塘河流域南片,属于城市平原河网,水质保障压力较大,水系内河道纵横交错,水源充沛。余杭区塘河属于京杭大运河支流,连接西溪湿地、南湖、闲林港等重要水系,是城市重要的生态廊道,水质管理目标为Ⅳ类。研究区域总面积为11.42 km²,包括清水港及葛港圣田两个圩区,其中清水港区块为5.46 km²(含老城区3.87 km²)、葛港圣田区块为5.96 km²。片区包括36条52.8 km主要河道、75.9 km排水管道、18处主要闸站、2座提升泵站和13个智能分流井,研究区域范围如图1所示。



图1 研究区域范围

Fig.1 Overview of study area

采用的基础数据包括河道断面、水利工程及调度、水位和流量等。其中,河道断面数据来源于测绘数据,河道水动力及水质数据来源于人工检测及在线监测数据,水工构筑物及其调度信息来源于实地调研及自控系统,管道流量、水位和降雨数据等来源于在线监测数据。

1.2 城市管网水动力及水质模型搭建

采用MIKE URBAN进行管网模型搭建,研究区域包括老城区及新城区两个区域,老城区排水管网为合流制,新城区排水管网为分流制。根据地形、河道分布和管网分布,将研究区域划分为61个子汇水区,共概化雨水管网48.2 km、合流制管网27.7 km、检查井1491个、排口129个、管道1519条、泵站4座、智能分流井13个,管道直径最小为DN200、最大为调蓄管道DN3000。模型边界条件主要包括污水时变化系数曲线、泵站及智能分流井现状调度规则,根据实际情况进行设定,调控设施包括调蓄管道排空泵站、宝塔泵站、金星泵站和13个智能分流井,涉及的参数包括管道曼宁系数、检查井局部水头损失等,根据相关文献及经验设定初始值。

利用污水干管旱天流量和雨水排口水位的在线监测数据对管网水动力参数进行率定。宝塔泵站和金星泵站后干管流程模拟结果的相对误差分别为8.6%和0.7%,8个在线监测设备所在的主干管网水位过程线拟合较好,相对误差分别为1.2%、0.8%、2.8%、1.6%、3.0%、0.8%、1.3%、0.9%,均不超过3.0%。对晴天和雨天两种工况分别进行水质参数率定,晴天采用污水处理厂进水水质数据、雨天采用2022年8月—11月三场降雨相应的人工监测水质数据进行率定,所有水质率定点的平均相对误差不超过14.3%,满足模型精度要求。

1.3 河网水动力及水质模型搭建

采用NAM水文模型对流域水文予以建模,用Load Calculator进行污染负荷评估,进而用MIKE 11搭建河道水动力水质模型。模型概化了包括余杭区塘河、闲林港和枫树港等研究区域主干河道在内的36条河道、205处断面,以及用于描述研究区域的水流流态。研究区域的外部边界条件包括河道上、下游边界以及山区汇水,内部边界条件包括模型河网内部结构物、区间水文模型的产汇流、排水管网排口边界。内、外边界的设置均采用接入的实时流量水位数据,同时对水工结构物包括18座闸及

闸站的设计参数、闸泵的调度规则等进行设置。

分别用实测点位监测数据对河网水位及水质参数进行率定,率定后的河道水动力水质模型参数包括河道曼宁系数($0.03 \text{ s/m}^{1/3}$)、降解系数(高锰酸盐指数为 0.1 d^{-1} 、氨氮为 0.16 d^{-1} 、总氮为 0.08 d^{-1} 、总磷为 0.06 d^{-1})、扩散系数($5 \text{ m}^2/\text{s}$)。对比模拟水位与实测水位,各站点水位过程线完全吻合,相对误差分别不大于4.6%、2.5%、5.0%,满足精度要求,基本能够较好地反映余杭平原河网水位的变化过程。率定以后的高锰酸盐指数、氨氮的计算值与实测值整体偏差较小,相对误差在15%以内,可见模型可以用于模拟河网的水质变化。

1.4 现状问题与关键调度因素识别

1.4.1 排水管网排口溢流污染控制关键点分析

选择7月6日的降雨过程进行模拟,降雨历时1.5 h,雨峰阶段降雨量为 6.3 mm/h ,模拟时间为1 d。模拟结果显示,降雨情景下老城区合流制污水管网按照当前分流井水位控制规则运行时仍然会出现溢流,造成局部河道水质浓度迅速上升。如宝林港中段氨氮浓度峰值约增至雨前水平的3倍,雨前氨氮浓度为 2.64 mg/L ,雨中峰值为 7.85 mg/L ,雨后2 h为 3.46 mg/L 。同时,9#、10#智能分流井所在排口溢流量最大,总溢流量为 4711 m^3 ,总 COD_{Mn} 污染负荷量为 2051.93 kg ,属于溢流控制关键位置。

1.4.2 降雨情景下河网水质改善关键点分析

研究区域5月26日—27日两天降雨历时48 h,总降雨量为 25.7 mm ,小时峰值约为 10 mm 。考虑雨后河网水质的变化,对5月26日—28日共3 d进行了模拟。结果表明,研究区域内红卫港、枫树港水质较差,全天 COD_{Mn} 浓度均处于超标状态,断面考核标准为IV类,但在该模拟情景下红卫港 COD_{Mn} 峰值浓度为 14.7 mg/L ,属于V类水,枫树港 COD_{Mn} 峰值浓度为 20.9 mg/L ,属于劣V类水,持续时间为1 h。为提升红卫港和枫树港的水质达标率,当闲林港水质较好时,可以通过张家桥闸站引水泵直接补水至红卫港;当余杭区塘河上段水质较好时,可以利用清水港闸站引水泵,引余杭区塘河上段水至宝林港,从西向东改善枫树港与红卫港水质,具体调度情况如图2所示。因此,核心控制因素为张家桥引水泵和清水港引水泵,通过优化算法寻求两泵的联合调度以提高区域内2个超标河段枫树港和红卫港的水质达标率。



图 2 红卫港和枫树港调度示意

Fig.2 Schematic diagram of scheduling of Hongweigang River and Fengshugang River

2 优化目标及条件设置

研究区域的最终优化目标为区域内河道水质尽可能达标,根据关键调度因素识别结果,优化思路如下:首先优化智能分流井 9#、10#的运行规则,在充分应用污水厂处理能力以及调蓄设施调蓄能力的前提下实现管网排口溢流污染总负荷最小。然后以此作为输入条件,进一步优化张家桥泵和清水港泵的运行调度规则,尽可能提升红卫港和枫树港的水质达标率且确保补水量最小。为保证计算效率及优化效果,需要合理选择优化算法。管网排口溢流污染总负荷选用粒子群算法(PSO)优化,水质达标优化选用带精英策略的非支配排序遗传算法(NSGA-II)。

2.1 目标 1(溢流污染总负荷最小)

2.1.1 目标函数

模拟时段内关键排口(9#、10#排口)的 COD_{Mn} 总负荷最小,即:

$$\text{Min} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m C_{ij} Q_{ij} \Delta t \quad (1)$$

式中: C_{ij} 为第 i 个排口第 j 时段内监测的 COD_{Mn} 浓度, mg/L ; Q_{ij} 为第 i 个排口第 j 时段内的模拟溢流量, m^3/s ; m 为排口总数,个; n 为时段内的时间步长总数, h ; Δt 为时间间隔, h ; i 为排口数; j 为时段内的时间步长数。

2.1.2 决策变量

对 9#、10#智能分流井排河阀门的开启度进行控制,在模拟时段前 4 h 内每 1 h 控制 1 次,两个分流井共控制 8 次,即 8 个决策变量。

2.1.3 约束条件

阀门开启度约束条件是开度范围为 0~100%,将污水干管金星泵站流量上下限(0~0.67 m^3/s ,即污水厂进水干管)作为污水厂处理能力的约束条件,调蓄管容积上限 10 600 m^3 作为调蓄设施调蓄能力的约束条件。

2.2 目标 2(水质达标率高且补水量最小)

2.2.1 目标函数

使降雨期间红卫港和枫树港的汛期污染强度(COD_{Mn} 浓度与考核断面目标地表水 IV 类的 COD_{Mn} 浓度之比)大于 1.1 的持续时间最短,且补水量尽可能小。

$$\text{Min} \left\{ \lambda \cdot \left[w_1 \cdot \frac{\text{num} \left(\frac{C_{1,h}}{C_{1,s}} > i_{COD_{Mn}} \right)}{\text{总小时数}} + w_2 \cdot \frac{\text{num} \left(\frac{C_{2,h}}{C_{2,s}} > i_{COD_{Mn}} \right)}{\text{总小时数}} \right] + \sum_{i=1}^T Q_i \Delta t \right\} \quad (2)$$

式中: λ 为惩罚系数,主要为了保证多个目标值之间统一量纲; w_1 、 w_2 分别为两条河达标优先级权重,本场景中都设置为 0.5; $C_{1,h}$ 、 $C_{2,h}$ 分别为红卫港、枫树港断面处每小时的水质模拟值, mg/L ; $C_{1,s}$ 、 $C_{2,s}$ 分别为红卫港、枫树港水质标准值, mg/L ; $i_{COD_{Mn}}$ 为汛期污染强度上限值,取 1.1; T 为总控制次数; Q_i 为控制时长内的补水流量, m^3/s ,也是本方案中的决策变量; Δt 为时间间隔, h 。

2.2.2 决策变量

决策变量为张家桥补水流量和清水港补水流量。其中,前者的控制间隔为 4 h,在 48 h 内控制 12 次;后者的控制间隔为 4 h,在 48 h 内控制 12 次,即决策变量的个数为 24 个。

2.2.3 约束条件

将清水港补水流量上下限(0~7.5 m^3/s)、张家桥补水流量上下限(0~2.8 m^3/s)、同等条件下优化后的管网排口溢流污染 COD_{Mn} 负荷作为约束条件。

3 优化方案与结果分析

3.1 优化算法筛选

由于管网排口溢流整体模型涉及到大量的边界输入,包括边界流量、河道情况和降雨情况等,其复杂性与非线性决定了模型无法采用传统的数值求解方法,所以选用启发式的智能优化算法,总体可以分为两类,一类是基于个体搜索的优化算法,

另一类是基于种群搜索的优化算法^[11]。在排水泵阀调度优化算法选择上,为避免出现局部最优情况,更倾向于选择寻优方向性更强的基于种群搜索的优化算法。在基于种群搜索的优化算法中,发展最为完善的是遗传算法(GA)、蚁群算法(ACO)和粒子群算法(PSO),其中蚁群算法更多地应用于路径规划等问题,与排水泵阀优化场景有较大差异,所以在算法选择上更倾向于在遗传算法与粒子群算法中进行选择。

3.1.1 粒子群算法

粒子群算法属于仿生类算法,其原理是模拟了鸟类群体捕食活动的规律。在粒子群算法中,每个粒子拥有位置与速度两个属性,粒子根据个体最优解和全局最优解来调整自己的速度和方向,最终整个集群会向最优解区域聚集。

由于城市区域的降雨历时较短,在排水泵阀优化场景的算法选择方面,与全局搜索能力相比,更倾向于选择寻优方向性更强的优化算法。粒子群算法具有优异的收敛能力、搜索速度快、具有记忆能力、易于工程实施等优点^[12]。因此,管网排口溢流污染总负荷最小优化结果的优化算法选用粒子群算法。

3.1.2 非支配排序遗传算法

带精英策略的非支配排序遗传算法在遗传算法的基础上进行了改进,在执行变异前根据个体的支配关系进行分层,引进了精英策略,保证了优良种群不会被丢弃,是目前最流行的多目标遗传算法之一,非常适合解决当前场景下的多目标优化问题。

对于水质达标优化的多目标场景,其问题具有多目标、带有空间约束、降雨时空分布复杂等特征,同时排水系统与河道系统水力过程本身就具有较强的非线性,这些决定了调度系统的非线性特征较强,且稳定的全局最优解获得难度大^[13]。在面对多目标优化问题时,粒子群算法在更新粒子的位置与速度方面,其复杂度也会提升。基于这些特点,选择带精英策略的NSGA-II来求解。

3.2 管网排口溢流污染总负荷优化

粒子群算法的主要参数包括种群规模、最大迭代次数、惯性系数与变异系数。其中种群规模决定算法的初始种群,一般设置在20~100左右。由于管网排口溢流问题中整体降雨时间较短,经过测试将

种群规模控制在30可达到较好的收敛性与速度。最大迭代次数决定模型解的稳定性,经过测试将最大迭代次数控制在10次,可使结果达到稳定的同时节约寻优时间。惯性系数与变异系数均采用粒子群算法默认的系数进行设定。

最终寻优总时间约为18.45 h,计算各个阀门每小时开度的最优解。Valve 8: [31.09, 0.00, 100.00, 7.81]; Valve 9: [0.00, 3.77, 39.33, 5.74]; Valve 10: [6.10, 24.22, 12.89, 0.00]。优化前后9#、10#排口溢流污染负荷总量COD_{Mn}时间序列曲线如图3所示。9#、10#排口现状模拟方案溢流污染负荷总量COD_{Mn}为2051.93 kg,优化后溢流污染负荷总量COD_{Mn}为404.69 kg,削减比例超过80%。

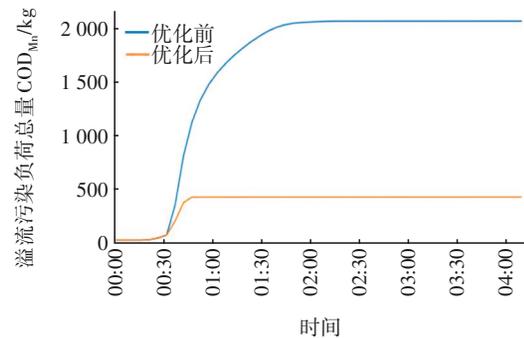


图3 优化前后9#、10#排口溢流污染负荷总量COD_{Mn}的变化
Fig.3 Chang in total COD_{Mn} pollution load of overflow outlet 9# and 10# before and after optimization

3.3 河道考核断面水质达标优化

带精英策略的非支配排序遗传算法的主要参数包括种群规模、最大迭代次数与变异系数。其中种群规模决定算法的初始种群,一般设置在100~200左右。在河道考核断面水质达标优化结果问题中虽然降雨时间较短,但是由于这是多目标问题,经过测试将种群规模控制在150可以达到更好的收敛性与速度。最大迭代次数决定模型解的稳定性,经过测试,将最大迭代次数控制在15次,可以让结果在达到稳定的同时寻优时间较短,变异系数选择默认的0.001。

在15次迭代中目标函数不断被优化,其历代下降趋势线表明,第8次后逐渐收敛,第15次后则达到平稳状态。在15次迭代优化后的决策变量解值,清水港每4h的补水流量(m³/s)分别为[1.20, 0.87, 0.68, 1.30, 0.24, 2.83, 3.80, 2.96, 1.87, 0.66,

0.67, 1.37], 张家桥补水流量分别为 [1.81, 0.14, 0.50, 2.22, 2.30, 0.60, 2.42, 0.56, 0.42, 1.34, 0.28, 1.77], 清水港引水泵及张家桥引水泵优化调度曲线如图 4 所示。

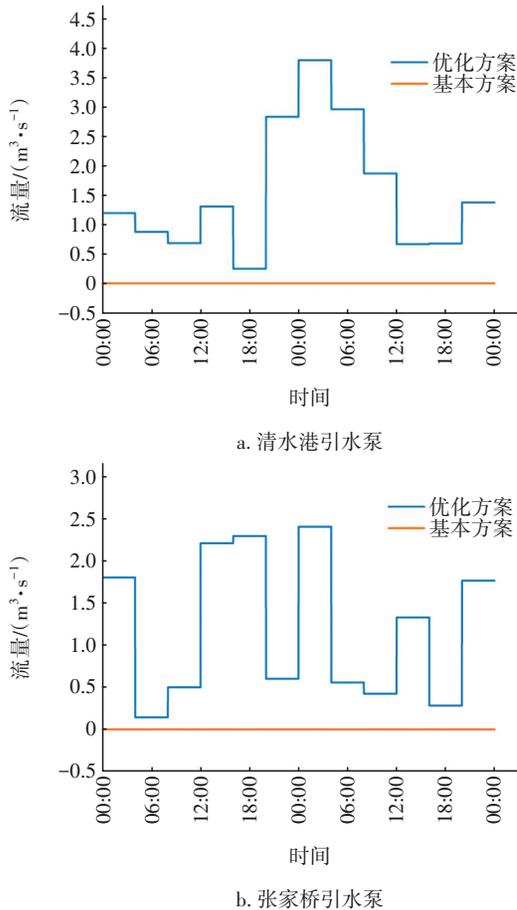
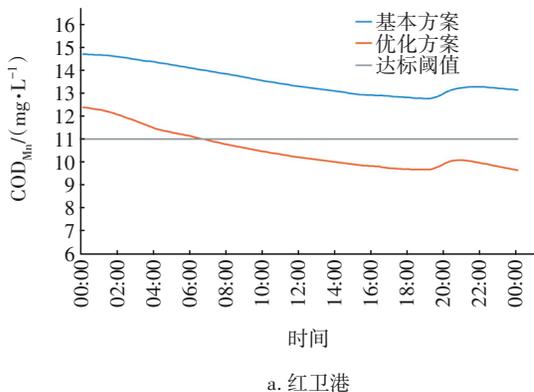
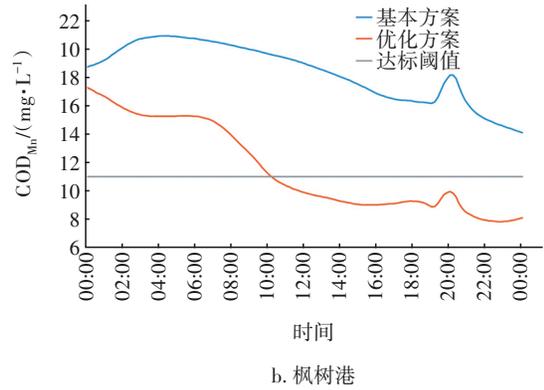


图 4 清水港引水泵与张家桥引水泵优化调度曲线
Fig.4 Optimized scheduling curves of Qingshuigang pump and Zhangjiaqiao pump

优化前红卫港和枫树港全天 COD_{Mn} 均处于超标状态, 红卫港 COD_{Mn} 峰值浓度为 14.7 mg/L, 枫树港为 20.9 mg/L, 如图 5 所示。



a. 红卫港



b. 枫树港

图 5 红卫港和枫树港优化调度结果

Fig.5 Optimized scheduling results of Hongweigang River and Fengshugang River

经优化调度后, 红卫港当日 17:00 水质达标率从 0 提升到 71%; 而枫树港 COD_{Mn} 平均浓度为 11.6 mg/L, 降低了 37%, 水质达标率从 0 提升到 58.3%。优化后总调度引水量为 $2.6 \times 10^5 m^3$, 其中张家桥闸站补水 $0.98 \times 10^5 m^3$, 清水港闸站补水 $1.62 \times 10^5 m^3$ 。

4 结论

① 以南方典型平原河网地区杭州市余杭区为例, 采用 MIKE URBAN、MIKE 11 分别建立排水管网水动力及水质模型、河网水动力及水质模型, 识别河道水质提升关键排口、关键河道断面等核心设施, 选择排水管网排口总污染负荷、河道断面水质达标率 2 个指标作为优化控制目标, 分别采用 PSO、NSGA-II 进行优化计算, 最终实现河道水质的有效提升, 红卫港水质达标率从 0 提升到 71%, 枫树港平均浓度为 11.6 mg/L, 降低 37%, 优化效果显著, 能有效提升水质达标情况。

② 形成了一套区域排水厂网河一体化优化调度方法, 综合考虑了污水提升泵站、智能分流井、调蓄设施、污水处理厂、河道闸站等排水设施, 通过关键要素识别、优化目标确定、优化算法选择及计算等最终达成河道水质提升, 但本研究仅将污水处理厂主干管末端提升泵站处理能力作为边界条件, 未考虑污水处理厂其他片区进水变动及工艺要求, 后续可在此基础上进一步研究。

参考文献:

[1] 张彦晶. “厂站网池”一体化调度实时预报预警系统 [J]. 中国给水排水, 2022, 38(24): 108-114.
ZHANG Yanjing. Real-time forecast and early warning system for integrated scheduling of “WWTP, pump

- station, sewer network, and initial storm-water storage tank”[J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(24): 108-114(in Chinese).
- [2] 徐祖信,王诗婧,尹海龙,等. 污水管网中雨水混接来源的高效诊断方法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(3): 384-390.
XU Zuxin, WANG Shijing, YIN Hailong, *et al.* Cost-effective locating inappropriate rainfall inflow into urban sewer network[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2017, 45(3): 384-390 (in Chinese).
- [3] 刘龙志,王浩正,黄荣,等. 流域治理视角下排水系统匹配性评估方法[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(6): 24-30, 37.
LIU Longzhi, WANG Haozheng, HUANG Rong, *et al.* Evaluation methods of drainage system matching from the perspective of watershed management [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(6): 24-30, 37 (in Chinese).
- [4] LACOUR C, SCHUETZE M. Real-time control of sewer systems using turbidity measurements [J]. *Water Science and Technology*, 2011, 63(11): 2628-2632.
- [5] HOPPE H, MESSMANN S, GIGA A, *et al.* A real-time control strategy for separation of highly polluted storm water based on UV-Vis online measurements: from theory to operation[J]. *Water Science and Technology*, 2011, 63(10): 2287-2293.
- [6] VEZZARO L, CHRISTENSEN M L, THIRSING C, *et al.* Water quality-based real time control of integrated urban drainage systems: a preliminary study from Copenhagen, Denmark [J]. *Procedia Engineering*, 2014, 70: 1707-1716.
- [7] DUY K L, MARUÉJOULS M, GUILLAUME B, *et al.* Application of stormwater mass-volume curve prediction for water quality-based real-time control in sewer systems [J]. *Urban Water Journal*, 2019, 16(1/2): 11-20.
- [8] BACHMANN-MACHNIK A, BRUENING Y, BAKHSIPOUR A E, *et al.* Evaluation of combined sewer system operation strategies based on highly resolved online data[J]. *Water*, 2021, 13(6): 751.
- [9] WEI Z Q, SHANGGUAN H D, ZHAN J J, *et al.* Water quality-based double-gates control strategy for combined sewer overflows pollution control [J]. *Water*, 2021, 13(4): 529.
- [10] SUN C C, LUIS R, BERNAT J D, *et al.* Integrated pollution-based real-time control of sanitation systems [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 269: 110798.
- [11] 张庆科. 粒子群优化算法及差分进行算法研究[D]. 济南:山东大学, 2017.
ZHANG Qingke. Research on the Particle Swarm Optimization and Differential Evolution Algorithms [D]. Jinan: Shandong University, 2017(in Chinese).
- [12] 梁益闻. 城市河湖闸泵群防洪排涝优化调度模型研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2018.
LIANG Yiwen. Research on Optimal Scheduling Model of Urban River Lake Sluice Pump Group Drainage System [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2018(in Chinese).
- [13] 陈丰. 城市排水系统内涝与溢流控制性能评价与优化研究[D]. 北京:清华大学, 2016.
CHEN Feng. Research on Evaluation and Optimisation of Flood and Overflow Control Capacity of Urban Rainage System [D]. Beijing: Tsinghua University, 2016(in Chinese).

作者简介:刘小梅(1985-),女,安徽安庆人,博士研究生,高级工程师,北控水务北京业务区副总经理,主要研究方向为厂网河一体化优化调度。

E-mail: xm-liu20@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期:2024-09-27

修回日期:2024-11-20

(编辑:任莹莹)