

城镇水系统研究与应用

高丽莎, 韩超, 陈奕. 基于水闸调度的上海市苏州河泵站放江污染消除方案[J]. 净水技术, 2025, 44(7): 130-138.

GAO L S, HAN C, CHEN Y. Pollution elimination solutions based on sluice gate operation for pumping station discharge in Suzhou Creek in Shanghai [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(7): 130-138.

基于水闸调度的上海市苏州河泵站放江污染消除方案

高丽莎¹, 韩超^{2,*}, 陈奕¹

(1. 上海市水务规划设计研究院<上海市海洋规划设计研究院>, 上海 200233; 2. 上海城投兴港投资建设<集团>有限公司, 上海 201306)

摘要 【目的】市政泵站雨天放江污染是影响上海市区河道水质持续稳定改善的主要因素之一。为减轻泵站放江对河道水环境的影响,文章开展了基于水闸调度的上海市中心河道泵站放江污染尽快消除的相关研究,可为推进河道水质持续稳定改善,打造人民满意的“幸福河湖”提供技术支撑。【方法】文章基于详实的基础资料构建了高精度的苏州河及其沿线市政泵站一体化水力学模型,并应用实测数据对模型进行了率定验证。考虑水闸调控能力、涨落潮、降雨特征等因素设计了多种调度方案,以快速恢复降雨放江后排口区域水质为目标,应用模型进行多方案比选,提出了适用于不同降雨场景的河道泵闸优化调度方案。【结果】经模型模拟分析,优化调度方案下的苏州河日均排水量更大、水体置换效率更高,河道水质受泵站放江的影响历时明显缩短。以大雨场景为例,苏州河日均排水量较现状约增加1倍,可达449万m³,水体置换周期较现状的2.47d缩短为1.08d,河道水质受泵站放江的影响历时可缩短30%以上。【结论】结合历史数据与模型模拟验证,提出不同降雨场景下苏州河沿线市政泵站放江后的水闸调度优化方案,可适用于无防汛预警或暴雨预警的中雨至大雨条件下的泵站放江污染快速消除。

关键词 泵站放江 雨后水质恢复 苏州河 优化调度 河网水动力水质模型

中图分类号: TU992 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2025)07-0130-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.07.016

Pollution Elimination Solutions Based on Sluice Gate Operation for Pumping Station Discharge in Suzhou Creek in Shanghai

GAO Lisha¹, HAN Chao^{2,*}, CHEN Yi¹

(1. Shanghai Water Planning and Design Research Institute <Shanghai Ocean Planning and Design Research Institute>, Shanghai 200233, China;

2. Shanghai Chengtou Xinggang Investment & Construction <Group> Co., Ltd., Shanghai 201306, China)

Abstract [Objective] The pollution caused by municipal pumping stations releasing rivers during rainy days has become one of the main factors affecting the sustained and stable improvement of river water quality in the central urban area of Shanghai. In order to reduce the impact of pumping stations on the water environment of rivers, relevant research has been carried out on the elimination of pollution caused by pumping stations discharging water into the river in the central area of Shanghai based on sluice scheduling. This study can provide technical support for promoting the continuous and stable improvement of river water quality and creating a "happy river and lake" that satisfies the people. [Methods] Based on comprehensive foundational data, this study constructed a high-

[收稿日期] 2024-05-21

[基金项目] 国家自然科学基金(42371030)

[作者简介] 高丽莎(1992—),女,主要从事河网水动力水质数学模型研究与应用、防洪除涝和水资源调度等规划与研究的工作,E-mail: gaolsiao@163.com。

[通信作者] 韩超(1990—),男,主要从事水务水利规划研究的工作,E-mail: ctinghanchao@chengtou.com。

precision integrated hydraulic model of Suzhou Creek and its municipal pumping stations along the riverbanks, and conducted calibration and validation of the model using measured data. Multiple operational scenarios were designed by considering factors including sluice gate regulation capacity, tidal fluctuations, and rainfall characteristics, with the objective of rapidly restoring water quality in discharge zones following stormwater release. Through multi-scenario comparative analysis using the model, optimized pump-gate operation strategies applicable to diverse rainfall scenarios were proposed. [Results] Model simulation analysis demonstrated that under the optimized operation strategy, Suzhou Creek achieved greater daily average discharge capacity, enhanced water exchange efficiency, and a significantly shortened duration of water quality impacts induced by pumping station discharges. Taking the heavy rainfall scenario as an example, Suzhou Creek's daily discharge volume under the optimized strategy doubles compared to current levels, reaching 4.49 million m^3 . The water renewal cycle is reduced from 2.47 days to 1.08 days, while the duration of water quality impacts caused by pumping station discharges can be shortened by over 30%. [Conclusion] Through integrated analysis of historical data and model simulation validation, the optimized sluice gate operation strategy proposed in this study for post-discharge scenarios at municipal pumping stations along Suzhou Creek demonstrates operational feasibility without flood prevention warning or rainstorm warning, achieving rapid pollution mitigation following pumping station discharges.

Keywords pumping station discharge improvement of river water quality after rain Suzhou Creek optimized operation control hydrodynamic and water quality model of river network

经过多年的消黑除劣整治工作,上海市点源污染治理水平显著提升,中心城区的管网建设和污染源纳管渐趋完善,全市水环境治理取得了显著成效,但在降雨期间,受市政泵站放江影响,部分河道水质不稳定,雨水水质恢复时间长等现象依然存在。多项研究^[1-3]表明,市政泵站雨天放江污染已成为影响上海市区河道水质持续稳定改善的主要因素之一。

对于平原感潮河网地区来说,通过水闸、泵站等水利工程的合理调度,引入优质水源,有效提升河网水动力条件,增加河道水环境容量,可有效改善河道水环境^[4-5]。如丁瑞等^[6]和陈庆江等^[7]针对平原河网地区水动力弱、水流往复的问题,提出了日常活水畅流调度优化方案;闫毓等^[8]和穆守胜等^[9]提出了水位调控精准、流量分配合理的泵闸调度方案,促进了水体定向有序流动,有效提升了河网水动力条件;潘泓哲等^[10]为改善太湖流域走马塘东南片平原河网区的水生态环境,利用数学模型从多个目标层面优选引调水方案,实现水量水质综合优化调控。但以上研究均是通过活水畅流调度来改善河网地区水质,并未针对泵站放江水污染开展过相关研究。为全面推进美丽上海建设,打造人民满意的“幸福河湖”,亟需对市政泵站放江后的泵闸调度优化方案进行深入研究。

苏州河是上海母亲河,沿岸正打造多元功能复合的活力城区、尺度宜人有温度的人文城区、生态效益最大化的绿色城区。为打造苏州河沿岸更高质量

水生态环境,本研究以苏州河中心城区段为例,基于详细的基础地理、水利工程、水文及水质资料,构建了苏州河及其排水系统一体化模型,开展了基于水闸调度的上海市中心河道泵站放江污染尽快消除的相关研究工作,有利于在污染源全面整治工作基础上,不断推进苏州河水质持续稳定改善。

1 区域概况

1.1 基本情况

苏州河中心城区段西侧以外环线为界,东连黄浦江,流经上海市普陀、长宁、静安、虹口、黄浦等区,长度约为 20.8 km。现状平均河宽为 64 m,常水位为 2.50~2.80 m,具有区域排涝、航运以及景观生态等功能。其沿线防汛市政泵站 29 个,对应的排水系统数量为 23 个,服务面积为 50.15 km^2 ,如图 1 所示。

1.2 泵站放江对苏州河水质的影响特征分析

通过对 2021 年和 2022 年苏州河沿线市政泵站放江、水质在线监测数据等进行统计分析,苏州河中心城区上游段北新泾点位受放江影响时长相对较长,小雨至大雨期间,水质恢复时间长达 4~5 d;中下游段梦清园和温州路点位受放江影响时长相对较短,水质恢复时间为 1~3 d。从超标因子来看,苏州河受泵站放江影响的超标因子以氨氮为主,总磷和溶解氧偶尔超标,高锰酸盐指数基本不超标。因此,本研究选取氨氮及其劣 V 类持续时间作为后续研究的主要特征指标进行方案间的对比分析。

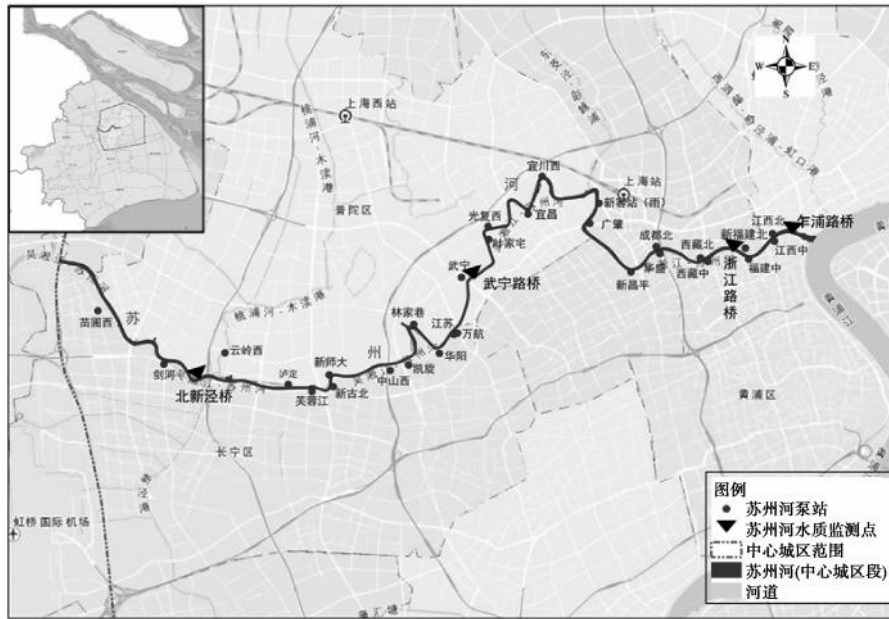


图1 苏州河中心城区段及其沿线市政泵站分布

Fig. 1 Distribution of Municipal Pumping Stations along the Central Urban Section of Suzhou Creek

2 精细化河网水动力模型构建

针对平原感潮河网地区水情、工情特征,上海市水务规划设计研究院开发形成了1套具有完全自主知识产权的一维平原感潮河网水动力水质模型。经过30多年对河网模型技术的持续开发完善,该模型已广泛应用于上海乃至长三角防洪排涝^[11-12]、水环境治理^[13]、水资源保护^[14]等规划设计、工程建设以及调度管理工作中。实践表明,该模型能够真实客观地反映上海平原、感潮、人控河网在各种复杂影响因素下的水流运动和水质变化规律。本文采用上述模型软件,针对苏州河水系特点,全新构建了苏州河水系水动力水质模型。

2.1 模型原理

2.1.1 水量基本方程

描述一维明渠非恒定流的基本方程为圣维南方程组,并使用四点线性隐式差分格式进行数值离散,采用矩阵标识法求解河网节点水位方程组。水动力基本方程如式(1)和式(2)。

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B_w \frac{\partial Z}{\partial t} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + 2u \frac{\partial Q}{\partial x} + (gA - Bu^2) \frac{\partial Z}{\partial x} - u^2 \frac{\partial A}{\partial x} \Big|_x + g \frac{n^2 |Q| Q}{AR^{1.333}} = 0 \quad (2)$$

其中: t ——时间坐标;

x ——空间坐标;

Q ——流量, m^3/s ;

Z ——水位, m ;

u ——断面平均流速, m/s ;

n ——糙率系数;

A ——过流断面面积, m^2 ;

B ——主流断面宽度, m ;

R ——水力半径;

q ——旁侧入流流量, m^3/s ;

g ——重力加速度, m/s^2 ;

B_w ——水面宽度。

2.1.2 水质基本方程

水质模块的基本原理为物质输移的对流扩散方程,并使用有限体积法幂函数格式进行数值离散,联立方程求解。水质基本方程如式(3)。

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(AUC)}{\partial x} = \frac{\partial \left(AE_x \frac{\partial C}{\partial x} \right)}{\partial x} - KAC + S_r \frac{A}{h} + \frac{dS}{dx} \quad (3)$$

其中: C ——污染物质的断面平均质量浓度, mg/L ;

U ——断面平均流速, m/s ;

E_v ——纵向分散系数;

h ——水深, m;

S ——外部源(汇)项(包括支流的汇入或泵站放江污染);

K ——污染物降解系数:

 S_r ——底泥释放系数。

2.2 模型构建

2.2.1 河网概化

为准确模拟苏州河水动力水质变化规律,本次河网模型构建范围包含与苏州河紧密相连的 5 个水利控制片,分别为嘉宝北片、蕴南片、青松片、淀北片、淀南片,重点聚焦苏州河中心城区段。考虑到模型构建范围内大小河流众多,在模拟过程中,必须将它们予以适当概化,保留它们的基本功能,但又要便于模型计算。根据河网概化的基本原则^[15],本次共概化 1 404 条河段,1 543 个实测断面,202 个泵闸、13 个水(潮)位边界,并根据各水利片的实际水面率对模型进行了校核,如图 2 所示。模型结合苏州河沿线泵站放江的实际情况,概化了 29 个点源,具体点位见图 1 泵站位置。

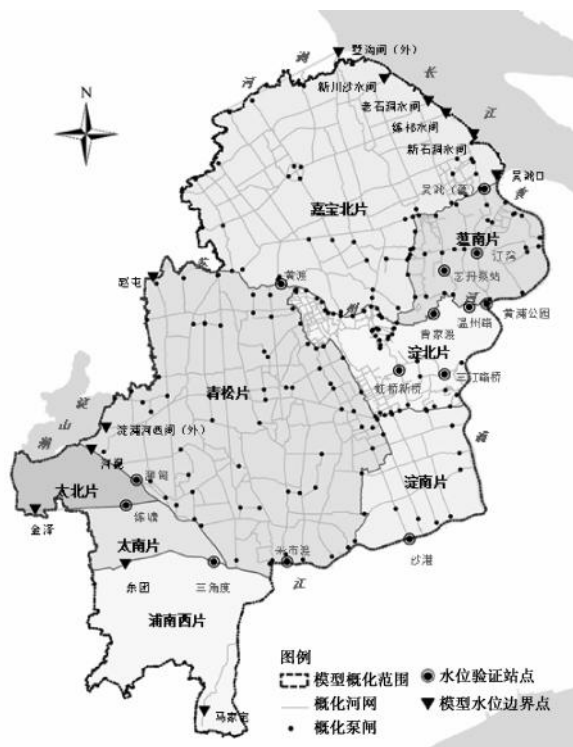


图 2 苏州河水系河网概化图

Fig. 2 Generalized Gragh of Suzhou Creek Network

2.2.2 水动力模型率定与验证

本研究选用了 2017 年—2019 年历年 7 月、8 月

14 个站点的实测水位数据,对模型中河道的糙率参数进行率定与验证。经过模型率定验证,当苏州河糙率系数为 0.020~0.035,黄浦江及其主要支流糙率系数为 0.018~0.035,其他河道糙率系数为 0.022 5~0.032 时,各代表断面水位的计算值与实测值吻合较好,具体模型误差情况见文献^[15]。总体来看,模型误差较小,可用于模拟研究苏州河水系受多因素综合影响的水动力变化特征。

2.2.3 水质模型率定验证

本研究选用 2022 年 2 月的实测水文水质监测数据对苏州河的水质模型进行了率定,并选取 2022 年 3 次市政泵站放江期间的实测数据对模型进行了验证。3 次泵站放江对应的降雨情况如表 1 所示。

表 1 苏州河 3 场不同降雨事件统计

Tab. 1 Statistics of Three Different Rainfall Events in Suzhou Creek

降雨类型	时间	雨量/mm
中雨(10~24.9 mm)	2022-06-05 4:00—15:00	21.0
大雨(25~49.9 mm)	2022-06-29 13:00—14:00	28.0
较长历时降雨 (超过 24 h)	2022-03-20 11:00— 2022-03-22 3:00	63.0

经过率定,模拟计算水质与实测水质的变化趋势基本一致,氨氮指标平均误差小于 15%,苏州河各监测断面误差情况如图 3 所示。不同降雨场景(分别对应 3 场降雨事件)下的水质监测断面点(北新泾)的氨氮计算值与实测值对比情况如图 3(c)~3(d)所示,苏州河中心城区段沿程水质变化情况如图 4 所示。

3 泵闸调度优化方案研究

3.1 方案设计

苏州河活水畅流常规方式:在大潮汛期间实行“东引南北排”,小潮汛期间实行“西引东排”相结合的调度方式。本次方案设计主要考虑水闸调控能力、涨落潮、降雨特征等因素,结合模型方案评估与优化,减少放江污染影响时长,最大限度降低防汛泵站放江对河道水环境影响。

以大雨场景为例,本次计算的时间段 6 月 28 日—7 月 4 日,均处于大潮汛期间,实际的调度方式为“东引南北排”。本文共设计 2 个优化方案,其中方案 0 为现状实际调度方案;方案 1~2 分别为泵站放江后,苏州河河口闸分别采取西引东排调度 2 个

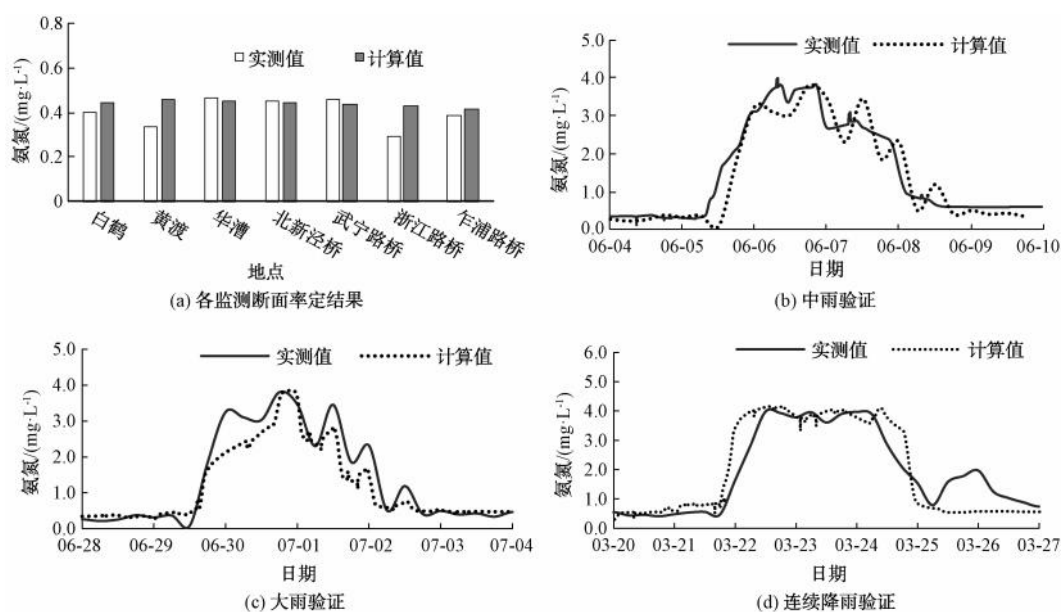


图3 2022年苏州河水水质率定验证结果

Fig. 3 Calibration and Verification Results of Water Quality Determination of Suzhou Creek in 2022

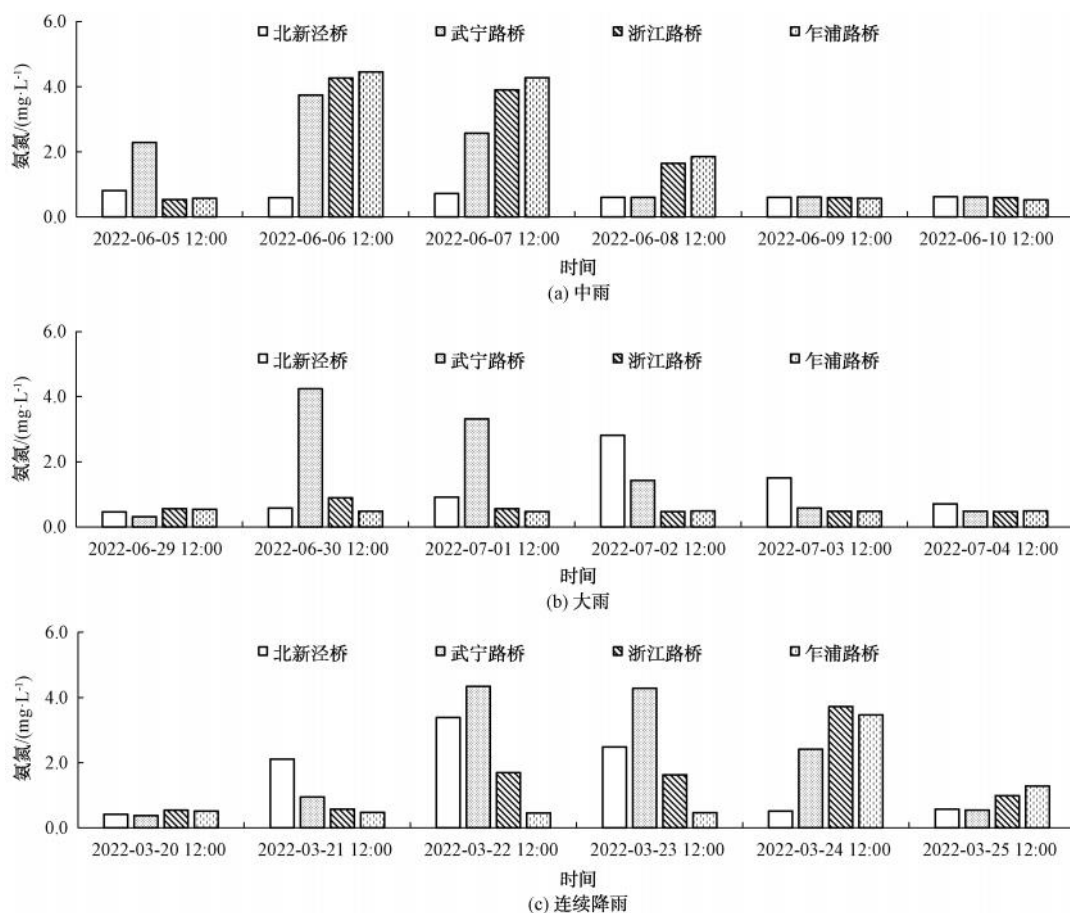


图4 不同降雨场景下苏州河水水质沿程变化

Fig. 4 Water Quality along the Suzhou Creek in Different Rainfall Events

潮周期(约 1 d)、4 个潮周期(约 2 d)的调度方式, 如图 5 所示。

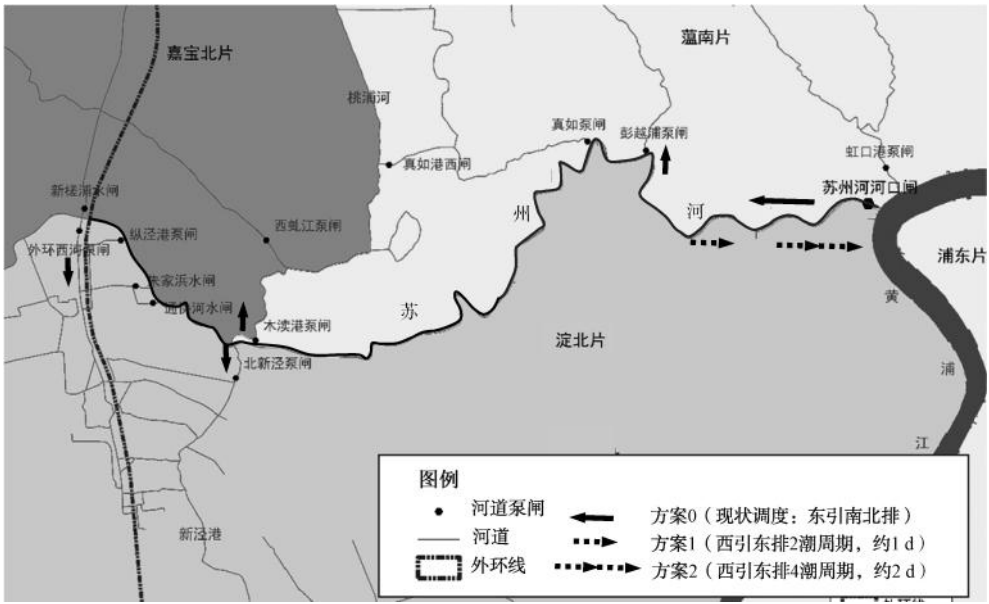


图 5 河道泵闸分布图及其调度运行方式

Fig. 5 Distribution and Operation Control Mode of Creek Pump Gates

3.2 结果分析

3.2.1 引排水量分析

3 个方案下,苏州河河口闸引排水量情况如表 2 所示。由表 2 可知,方案 0 为引水,方案 1 和方案 2 为排水。与方案 0 相比,方案 1 和方案 2 水量

交换较大,在泵站放江后这 2 个方案的日均排水量(430 万~449 万 m^3)为方案 0 日均引水量(219 万 m^3)的 2 倍左右。此外,经计算,后 2 个方案苏州河中心城区段水体置换周期较方案 0 均可缩短 1 d 左右。

表 2 苏州河河口闸引排水量

Tab. 2 Inflow and Outflow of Suzhou Creek Estuary Sluice

方案号	泵站放江后调度方式	平均水位/m	日均引排水量/ m^3	苏州河中心城区段槽蓄量/ m^3	水体置换周期/d
0	实际调度(引水为主)	2.89	219 万	541 万	2.47
1	西引东排调度 2 个潮周期	2.40	-449 万	487 万	1.08
2	西引东排调度 4 个潮周期	2.35	-430 万	481 万	1.12

注:引排水量“+”为引水,“-”为排水。

3.2.2 水质改善分析

本研究选取泵站放江影响消除最快,并且调度代价最小的方案为推荐方案。放江前苏州河氨氮平均质量浓度为 0.41~0.52 mg/L ,放江当天及放江后

各方案水质对比情况如表 3 和图 6 所示。与方案 0 相比,方案 1 和方案 2 苏州河水质均可提前 40 h 消除劣 V 类,水质改善效果相差不大,影响历时相较于方案 0 可缩短约 30%。

表 3 计算结果

Tab. 3 Calculation Results

方案	放江当天		放江结束第 1 d		放江结束第 2 d		放江结束第 3 d		放江结束第 4 d		劣 V 类 持续时间/h
	平均值/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	劣 V 类河 长占比	平均值/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	劣 V 类河 长占比	平均值/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	劣 V 类河 长占比	平均值/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	劣 V 类河 长占比	平均值/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	劣 V 类河 长占比	
方案 0	0.90	0	1.56	52%	1.58	52%	1.33	21%	1.01	0	85
方案 1	1.06	8%	1.43	10%	1.26	0	0.95	0	0.76	0	46
方案 2	1.06	8%	1.43	10%	1.26	0	0.79	0	0.62	0	46

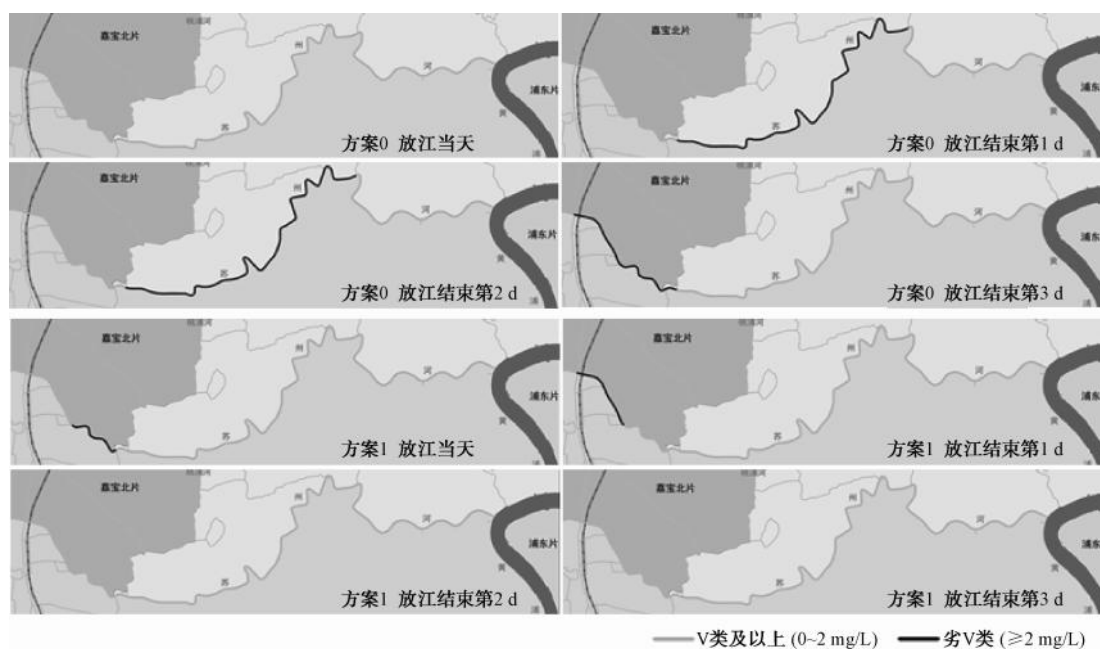


图 6 各方案下苏州河的水质演变

Fig. 6 Water Quality Evolution of Suzhou Creek under Different Schemes

经分析,方案 0 为苏州河自黄浦江引水,日均引水量约为 219 万 m³,方案 1 和方案 2 为苏州河向黄浦江排水,日均排水量为 430 万~449 万 m³。与方案 0 相比,方案 1 和方案 2 中苏州河水体置换效率更高,有利于河道水质的快速恢复。方案 1 和方案 2 水质改善效果相差不大,但是方案 1 泵闸调度的时间只需 2 个潮周期,时间更短。从综合效益最佳的角度考虑,本研究选取方案 1 为推荐方案。

采用同样的方法,本研究还对中雨案例和连续降雨案例下的调度方案进行了比选,计算结果如表 4 所示。经研究,在较长历时中雨案例(污染负荷较大)下,推荐调度方案:泵站放江后,苏州河采取西引东排 6 个潮周期;在连续降雨期间,推荐调度方案为:泵站放江后,苏州河实行西引东排调度 4 个潮周期。影响历时较现状调度方案均可缩短 30% 及以上。

表 4 其他降雨场景的计算结果
 Tab. 4 Calculation Results of Other Rainfall Events

降雨场景	泵站放江后调度方式	劣 V 类河长占比					劣 V 类持续时间/h
		放江当天	放江结束第 1 d	放江结束第 2 d	放江结束第 3 d	放江结束第 4 d	
较长历时	现状实际调度	0	51%	79%	68%	21%	110
中雨	西引东排调度 4 个潮周期	0	51%	51%	6%	0	91
	西引东排调度 6 个潮周期	0	51%	79%	0%	0	67
	西引东排调度 8 个潮周期	0	51%	79%	0%	0	67
连续降雨	现状实际调度	8%	79%	79%	51%	0	95
	西引东排调度 2 个潮周期	10%	90%	24%	18%	0	80
	西引东排调度 4 个潮周期	10%	90%	0%	0%	0	46
	西引东排调度 6 个潮周期	10%	90%	0%	0%	0	46

4 结论与建议

本研究利用详实的基础资料构建了苏州河及其沿线市政泵站的一体化模型,针对泵站放江后河道

水质恢复时间长的问题,提出了不同降雨场景下泵闸调度优化方案。主要结论及建议如下。

(1)本研究构建的苏州河水系河网水动力水质

模型全面反映了苏州河点源、面源和泵站放江污染对河道的影响。经率定验证,模型整体误差较小,可以较真实地反映苏州河水量水质变化规律,可以应用于其沿线市政泵站放江的模拟研究。

(2)结合历史数据与模型模拟验证,通过对苏州河中雨、大雨及连续降雨场景下 10 多个方案的计算分析,提出的不同降雨场景下苏州河沿线市政泵站放江后的水闸调度优化方案,可适用于无防汛预警或暴雨预警的中雨至大雨条件下的泵站放江污染快速消除。

(3)建议通过开展泵闸调度的调水试验,进一步验证和完善苏州河及其排水系统泵闸调度优化方案的实用性和可行性。

参考文献

- [1] 程逸群,陈向超,黄志金,等.上海市泵站放江污染现状及治理对策浅析[J]. 净水技术, 2022, 41(s1): 259-262.
CHENG Y Q, CHEN X C, HUANG Z J, et al. Analysis on current situation and control measures of discharge pollution of pumping station in Shanghai City [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(s1): 259-262.
- [2] 顾一鸣,马艳.防汛泵站放江污染削减对策探索[J]. 净水技术, 2021, 40(10): 138-143.
GU Y M, MA Y. Discussion on the countermeasures of discharge pollution reduction in stormwater pumping station [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(10): 138-143.
- [3] 谭琼.合流制泵站水安全与水环境“两水平衡”运行对策探讨[J]. 给水排水, 2022, 48(1): 39-44.
TAN Q. Study on the operational strategy of pumping station to balance flooding control and receiving water quality protection [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(1): 39-44.
- [4] 许益新,李一平,罗育池,等.引水改善平原感潮河网水质效果评估[J]. 水资源保护, 2019, 35(6): 124-130.
XU Y X, LI Y P, LUO Y C, et al. Effect evaluation of water diversion to water quality improve in plain tidal river network [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(6): 124-130.
- [5] 向龙,韩雨芯,赵梓鉴,等.圩区河网活水调控方案模拟与评价研究[J]. 水电能源科学, 2024, 42(6): 37-41.
XIANG L, HAN Y X, ZHAO Z J, et al. Simulation and evaluation for active flow regulation schemes in polder area river network [J]. Water Resources and Power, 2024, 42(6): 37-41.
- [6] 丁瑞,范子武,李云,等.表流湿地与活水循环协同提升城市河网水环境品质——以苏州狮子山水系为例[J]. 湿地科学与管理, 2023, 19(5): 34-38.
DING R, FAN Z W, LI Y, et al. Synergistic improvement of urban river environment through surface flow wetlands and river flow circulation: A case study of lion mountain river system in Suzhou [J]. Wetland Science & Management, 2023, 19(5): 34-38.
- [7] 陈庆江,丁瑞,赵海.平原河网区活水畅流对水动力和水质的改善效果[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(3): 8-13.
CHEN Q J, DING R, ZHAO H. Improvement effect of hydrodynamics and water quality by flowing water in plain river network area [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(3): 8-13.
- [8] 闫毓,袁赛瑜,唐洪武,等.上海蕴南水利控制片河网水动力再造[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(4): 329-334, 365.
YAN Y, YUAN S Y, TANG H W, et al. Hydrodynamic reconstruction of Wennan river network in Shanghai City [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(4): 329-334, 365.
- [9] 穆守胜,柳杨,乌景秀,等.常州市主城区畅流活水方案模拟比选及现场试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2022(5): 148-156.
MU S S, LIU Y, WU J X, et al. Simulation and comparison of clean water diversion schemes in Changzhou main urban area [J]. Hydro-Science and Engineering, 2022(5): 148-156.
- [10] 潘泓哲,李一平,唐春燕,等.多目标优化下平原河网引调水改善水环境效果评估[J]. 湖泊科学, 2021, 33(4): 1138-1152.
PAN H Z, LI Y P, TANG C Y, et al. Evaluation of the effect of water diversion on improving water environment in plain river network under the multi-objective optimization [J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(4): 1138-1152.
- [11] 丁国川,施晓文,易文林,等.上海市现状圩区除涝能力评估[J]. 水利技术监督, 2023(5): 1-4, 45.
DING G C, SHI X W, YI W L, et al. Assessment of flood control capacity in current polder areas in Shanghai [J]. Technical Supervision in Water Resources, 2023(5): 1-4, 45.
- [12] 李学峰,赵敏华,林发永.上海市排水防涝“蓝-绿-灰”海绵空间融合探索[J]. 中国防汛抗旱, 2023, 33(5): 14-18.
LI X F, ZHAO M H, LIN F Y. Exploration of the integration of “blue-green-grey” sponge space for drainage and flood management in Shanghai [J]. China Flood & Drought Management, 2023, 33(5): 14-18.
- [13] 时珍宝,陈长太.基于河网纳污能力的初期雨水治理截流标准[J]. 净水技术, 2020, 39(8): 56-59.
SHI Z B, CHEN C T. Standards of initial runoff interception based on environmental capacity [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(8): 56-59.
- [14] 陈长太,董亚萍,李学峰.上海大都市圈水源地共同保护策略研究[J]. 中国给水排水, 2023, 39(18): 32-35.
CHEN C T, DONG Y P, LI X F. Study on cooperative protection strategy of water sources in Shanghai metropolitan area [J].

China Water & Wastewater, 2023, 39(18): 32–35.

- [15] 高丽莎, 高程程, 汪涛. 基于精细化河网水动力模型的长宁区除涝能力评估[J]. 水资源保护, 2021, 37(5): 62–67.
GAO L S, GAO C C, WANG T. Assessment of waterlogging

control capacity in Changning District based on refined river network hydrodynamic model[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 62–67.

(上接第 31 页)

- [31] KINH C T, SUENAGA T, HORI T, et al. Counter-diffusion biofilms have lower N_2O emissions than co-diffusion biofilms during simultaneous nitrification and denitrification: Insights from depth-profile analysis[J]. Water Research, 2017, 124: 363–371. DOI: 10.1016/j.watres.2017.07.058.
- [32] KINH C T, RIYA S, HOSOMI M, et al. Identification of hotspots for NO and N_2O production and consumption in counter- and co-diffusion biofilms for simultaneous nitrification and denitrification[J]. Bioresource Technology, 2017, 245: 318–324. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.08.051.
- [33] OKABE S, OSHIKI M, TAKAHASHI Y, et al. N_2O emission from a partial nitrification-anammox process and identification of a key biological process of N_2O emission from Anammox granules[J]. Water Research, 2011, 45(19): 6461–6470.
- [34] WANG X X, FANG F, CHEN Y P, et al. N_2O micro-profiles in biofilm from a one-stage autotrophic nitrogen removal system by microelectrode[J]. Chemosphere, 2017, 175: 482–489. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.02.026.
- [35] LÜ Y T, JU K, SUN T, et al. Effect of the dissolved oxygen concentration on the N_2O emission from an autotrophic partial nitrification reactor treating high-ammonium wastewater[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2016, 114: 209–215. DOI: 10.1016/j.ibiod.2016.01.022.
- [36] LÜ Y T, JU K, WANG L, et al. Effect of pH on nitrous oxide production and emissions from a partial nitrification reactor under oxygen-limited conditions[J]. Process Biochemistry, 2016, 51(6): 765–771.
- [37] ALI M, RATHNAYAKE R M L D, ZHANG L, et al. Source identification of nitrous oxide emission pathways from a single-stage nitrification-Anammox granular reactor[J]. Water Research, 2016, 102: 147–157. DOI: 10.1016/j.watres.2016.06.034.
- [39] 田晓雷. 短程硝化过程羟胺的测定方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
TIAN X L. Research on hydroxylamine determination methods in short-cut nitrification processes[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [39] LI L, LING Y, WANG H, et al. N_2O emission in partial nitrification-Anammox process[J]. Chinese Chemical Letters, 2020, 31(1): 28–38.
- [40] BUNGAY H R, WHALEN W J, SANDERS W M. Microprobe techniques for determining diffusivities and respiration rates in microbial slime systems[J]. Biotechnology and Bioengineering, 1969, 11(5): 765–772.
- [41] SONG J, LI Y, KE D, et al. In situ graphene-modified carbon microelectrode array biosensor for biofilm impedance analysis[J]. Electrochimica Acta, 2022, 403: 139570. DOI: 10.1016/j.electacta.2021.139570.
- [42] 吕永涛, 姜晓童, 徒彦, 等. 反硝化除磷污泥聚集体内原位除磷活性及有机物浓度的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(5): 2396–2401.
LÜ Y T, JIANG X T, TU Y, et al. In-situ phosphorus removal activity and impact of the organic matter concentration on denitrifying phosphorus removal in sludge aggregates[J]. Environmental Science, 2021, 42(5): 2396–2401.
- [43] 刘敏, 许世远. 长江口潮滩沉积物: 水界面营养盐环境地球化学过程[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
LIU M, XU S Y. Environmental geochemistry of nutrients at the sediment-water interface in the Yangtze Estuary tidal flat[M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd, 2007.
- [44] JAMESON B D, BERG P, GRUNDLE D S, et al. Continental margin sediments underlying the NE Pacific oxygen minimum zone are a source of nitrous oxide to the water column[J]. Limnology and Oceanography Letters, 2021, 6(2): 68–76.
- [45] MEYER R L, ALLEN D E, SCHMIDT S. Nitrification and denitrification as sources of sediment nitrous oxide production: A microsensor approach[J]. Marine Chemistry, 2008, 110(1/2): 68–76. DOI: 10.1016/j.marchem.2008.02.004.
- [46] WANG J H, CHEN Y P, DONG Y, et al. A new method to measure and model dynamic oxygen microdistributions in moving biofilms[J]. Environmental Pollution, 2017, 229: 199–209. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.05.062.
- [47] 宋慧敏, 周小红, 张永明, 等. 基于微电极技术的反硝化滤池生物膜特性分析[J]. 中国环境科学, 2012, 32(5): 850–854.
SONG H M, ZHOU X H, ZHANG Y M, et al. Analysis of biofilm characteristics in denitrification filters using microelectrode technology[J]. China Environmental Science, 2012, 32(5): 850–854.
- [48] PLOUG H, JØRGENSEN B. A net-jet flow system for mass transfer and microsensor studies of sinking aggregates[J]. Marine Ecology Progress Series, 1999, 176: 279–290. DOI: 10.3354/meps176279.
- [49] NI B J, CHEN Y P, LIU S Y, et al. Modeling a granule-based anaerobic ammonium oxidizing (ANAMMOX) process[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2009, 103(3): 490–499.