

陈泽伟, 纪莎莎, 何黎, 等. 基于水动力模型与大数据分析的污水干线优化调度策略[J]. 净水技术, 2024, 43(3):110-116.

CHEN Z W, JI S S, HE L, et al. Optimized controlling strategy of wastewater trunk pipelines based on hydrodynamic model and historical big data analysis [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(3):110-116.

## 基于水动力模型与大数据分析的污水干线优化调度策略

陈泽伟\*, 纪莎莎, 何黎, 宋晨曦

(上海市城市建设设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200125)

**摘要** 随着我国城市化的快速发展与国家污水处理要求的逐渐提高, 城市的污水排水系统越来越复杂。单纯依靠人工经验来进行污水系统的运维与优化调度的难度逐渐越大。文章以上海市白龙港片区污水主干系统为案例, 创新性地提出了通过水动力模型耦合历史大数据分析来进行污水干线系统优化调度的技术方案; 该方案通过历史大数据挖掘出各个泵站在污水厂不发生溢流情况下的启闭策略, 并将此策略放入经过严格率定验证的排水模型中进行评估。目前得到的优化方案通过模拟可以将 2021 年的白龙港污水厂的旱天溢流天数从现状的 58 d 降低至 50 d。该优化方案于 2022 年进行了试运行; 相比 2021 年, 在试运行的两个月内将旱天溢流总量降低了 13%。基于此案例分析, 最终总结出一种城市污水主干系统获取优化调度策略的方法。

**关键词** 污水主干模型 大数据分析 优化调度 数据提取 率定验证

中图分类号: TU992 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2024)03-0110-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.03.013

## Optimized Controlling Strategy of Wastewater Trunk Pipelines Based on Hydrodynamic Model and Big Data Analysis

CHEN Zewei\*, JI Shasha, HE Li, SONG Chenxi

(Shanghai Urban Construction Design Research Institute <Group> Co., Ltd., Shanghai 200125, China)

**Abstract** With the rapid development of urbanization at home and the gradual improvement of national wastewater treatment requirements, the urban wastewater drainage system is becoming more and more complex. As a result, it is increasingly difficult to rely solely on manual experience to operate and optimize the scheduling of the wastewater system. Taking the wastewater system in Bailonggang of Shanghai as a case, this paper innovatively proposed a technical scheme for optimal scheduling of wastewater trunk system by coupling historical big data analysis with hydrodynamic model. The scheme excavated the opening and closing strategy of each pump station without overflow in the WWTP through historical big data, and put this strategy into a drainage model with strict rate verification for evaluation. The optimization scheme obtained so far. Based on modelling, the number of dry overflow days at the Bailonggang WWTP in the entire 2021 could be reduced from the current 58 days to 50 days. This optimization was piloted in 2022. And it reduced the total overflow volume by 13% during the two months of the trial compared to 2021. Based on this case analysis, a method for obtaining optimal scheduling strategies for urban wastewater backbone systems is finally summarized.

**Keywords** wastewater trunk model big data analysis optimized controlling data extraction calibration and validation

城市化的快速发展和人口增长带来了污水排放的急剧增加, 同时, 政策对水环境保护和污水处理的要求也日益提高<sup>[1-3]</sup>。为了满足这些要求, 城市的污水排水系统变得越来越复杂, 包括污水处

理厂、管网、泵站等多个部分。这些部分之间相互联系, 涉及的参数和变量也非常多, 往往需要进行实时监测、数据分析、预测预警等方面的工作, 以确保污水系统的正常运行和高效运转。然而, 单纯依靠人工经验来进行污水系统的运维和优化调度已经无法满足日益复杂的要求, 必须借助先进的技术手段和科学的管理方法来实现污水系统

[收稿日期] 2023-02-17

[通信作者] 陈泽伟(1992—), 男, 硕士, 研究方向为排水水动力模型与智慧排水技术, E-mail: 879008342@qq.com。

的智能化管理和优化运营<sup>[4]</sup>。本文通过上海市白龙港污水主干泵站的历史大数据挖掘与排水水动力模型耦合的新方案,为复杂的污水主干系统的优化调度提供了一个新的解决思路:通过大量历史运行数据的分析挖掘,将调度人员的调度经验进行经验提炼,通过大数据算法分析出潜在的优化调度方案。将潜在的优化调度方案输入经过严格率定验证的模型进行评估,进而得到最优的调度策略。

## 1 研究对象概况

白龙港片区目前已形成“二片、二厂、三线”污水处理格局。“二片”是指白龙港污水处理厂污水片和虹桥污水处理厂污水片,“二厂”是指白龙港污水处理厂和虹桥污水处理厂,“三线”是指污水二期中线、南干线、污水二期南线三条污水干线<sup>[5-6]</sup>,具

体情况如图 1 所示。

其中,白龙港污水处理厂规划设计规模为 350 万 m<sup>3</sup>/d,近期总规模为 280 万 m<sup>3</sup>/d,虹桥污水处理厂设计规模为 20 万 m<sup>3</sup>/d。

污水中线服务范围涉及黄浦区与部分浦东新区,沿途有 M1、M2 两座中途泵站,污水经白龙港污水处理厂处理后深水扩散排放长江。

污水南干线主要节点泵站为南干线 1#、3#、4#、5#和 6#泵站。由于南干线建设年代久远、应急抢险事件频发,目前正在对南干线 3#~6#泵站间的干线管线实施搬迁改建,南干线的水量目前由中线承担。

南线服务范围涉及徐汇区、闵行区、长宁区和浦东新区中部地区,是白龙港片区服务范围最大的一根污水主干,主要节点泵站为 SA 泵站、吴闵 1#泵站、华泾港泵站及 SB 泵站。

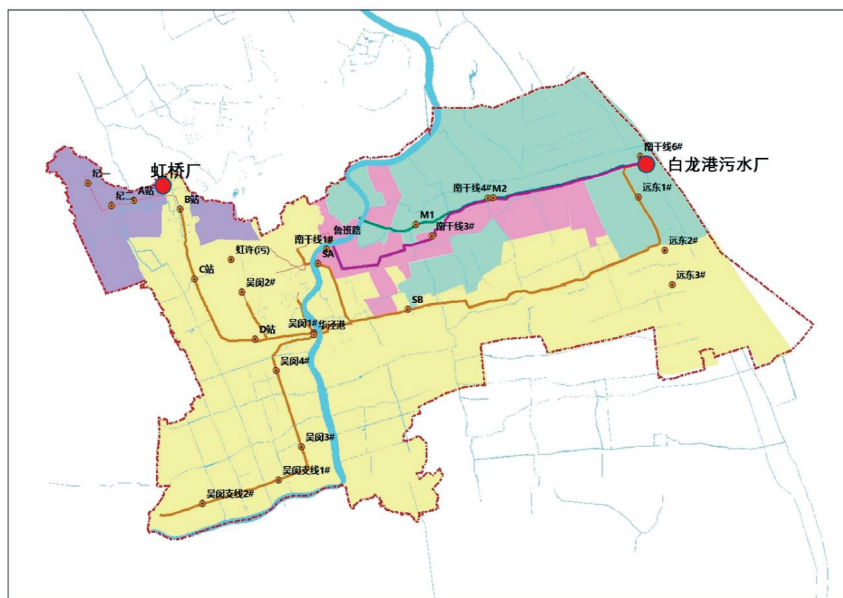


图 1 白龙港片区污水处理格局

Fig. 1 Layout of Wastewater Treatment in Bailonggang Area

## 2 模型的构建与率定验证

### 2.1 模型的建立

白龙港系统规模庞大且接入支线多而复杂,白龙港污水主干全长为 181 km,中途涉及 20 座提升泵站与 101 个泵机。其中最长主干从上游的纪一泵站到下游的白龙港污水处理厂,管道总长超过了 67 km。因此,采用分段建模思路:即从白龙港污水厂出发,逐步向上游拓展,分步建模,最终完成白龙港系统整体污水主干模型的建立。

鉴于白龙港污水厂及其相关污水主干模型异常复杂,因此,采用分段梳理、分段建立、分段验证的思路。其中,第一阶段建设范围为 M2/SB 至白龙港污水处理厂,第二阶段建设范围为 M1/华泾港/吴闵一至白龙港污水处理厂,第三阶段为纪一泵站至白龙港污水处理厂的全段污水主干模型建模。

在第三阶段,污水干线模型共纳入 67 个污水支线水量数据,水量输入的类型主要分为 3 类:

(1)2021年每5 min 泵站启闭数据;(2)2021年日均  
泵站输送数据;(3)通过人口数据推算的重力片区

污水量。3类数据使用的优先级从高到低。具体水  
量接入情况如图2所示。

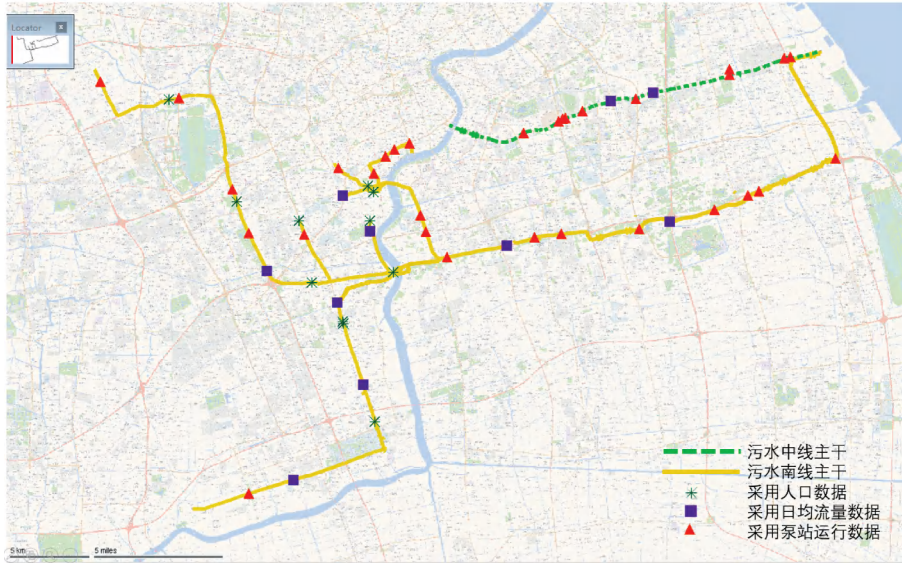


图2 污水主干模型流量数据接入点

Fig. 2 Flow Data Access Point of Wastewater Trunk Model

## 2.2 模型的率定

将建立的第三阶段的白龙港污水主干模型进行  
2021年的模拟,全年模拟效果较好,全年模拟水量  
为11.42亿 m<sup>3</sup>,白龙港进厂水量为11.63亿 m<sup>3</sup>,全

年总水量误差为1.8%。2021年全年每5 min 模拟  
对比详如图3所示。其中,典型的旱天、大雨以及暴  
雨工况的率定成果如表1所示。

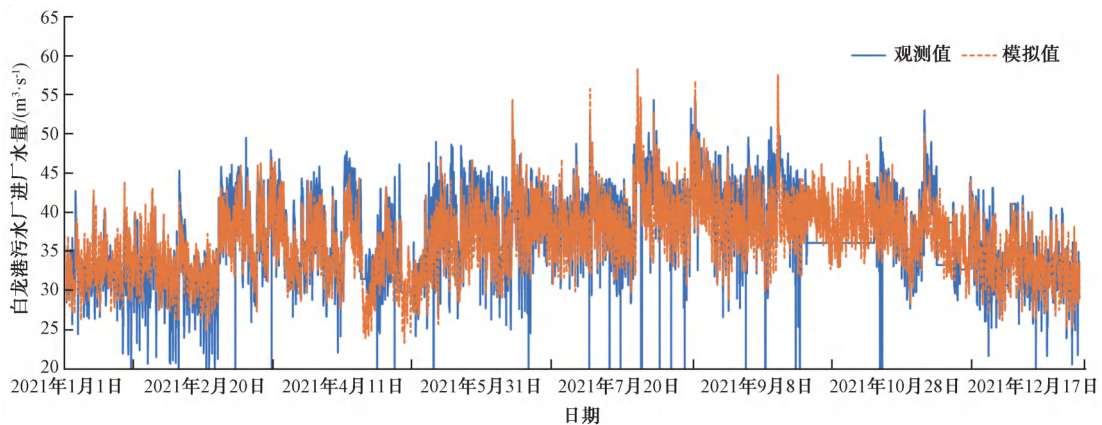


图3 白龙港污水主干模型2021年每5 min 模拟进厂流量与实测进厂流量对比

Fig. 3 Comparison between the Simulated and the Measured Influent Flow of Bailonggang Trunk Model in 2021

为了保证污水主干模型的准确性,除了进行纳  
什系数,峰值流量以及总量的常规率定外,根据  
*Code of Practice for the Hydraulic Modelling of Urban  
Drainage System* 中对于污水系统的率定要求,针对  
污水主干的旱天流量,进行了进一步的模拟值与历

史实测数据的对比。提取2021年旱天中逐日逐时  
的最大/最小流量作为边界值,与2021年度的所有  
旱天流量模拟曲线进行对比评估(图4)。评估发  
现:基本所有模拟旱天曲线均落于90%的监测数据  
边界内,从另一个方面说明了主干模型的准确性。

表 1 白龙港污水主干模型不同工况率定成果

Tab. 1 Calibration Results of Different Operation Conditions of Bailonggang Wastewater Trunk Model

比较项目	旱天工况	大雨工况	暴雨工况	均值
率定时间	3月12日 11:30— 3月14日 11:30	7月22日 21:00— 7月24日 21:00	6月10日 1:30— 6月12日 1:30	
纳什系数	0.72	0.69	0.68	0.7
实测峰值流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	45.4	48.9	51.5	
模拟峰值流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	45.9	49.0	54.2	
流量相对误差	1%	1%	5%	2%
实测流量总量/m <sup>3</sup>	6 570 303	6 434 331	6 983 385	
模拟流量总量/m <sup>3</sup>	6 721 516	6 422 863	7 141 850	
相对误差	2%	1%	3%	2%

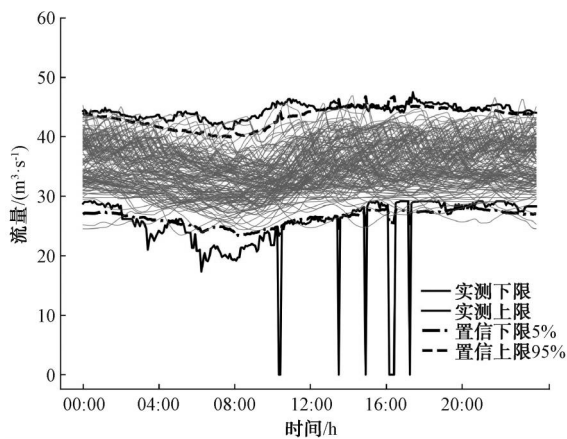


图 4 白龙港污水模型旱天模拟流量曲线

Fig. 4 Simulated Flow Curve of Bailonggang Wastewater Model in Dry Season

### 3 主干泵站历史运行大数据分析研究

国内外已经有学者通过排水模型对城市大型污水排水系统的优化调度进行研究<sup>[5-9]</sup>。因此,在污水主干模型率定验证成功的基础上,通过优化主干泵站的运行工况来降低末端白龙港污水处理厂的溢流问题。白龙港污水厂的末端瞬时处理能力峰值为 35 m<sup>3</sup>/s。根据白龙港 2020 年每 5 min 的历史数据进行分析:其旱天平均流量为 34.4 m<sup>3</sup>/s,雨天平均流量为 36.6 m<sup>3</sup>/s。显然控制雨天溢流需要通过扩建污水厂加以解决,故本次研究重点为减少旱天污水厂的溢流量。

中线末端 M2 泵站与南线末端 SB 泵站的单泵流量极大,分别为 4.7 m<sup>3</sup>/s 与 7.5 m<sup>3</sup>/s,这两个末端泵站的泵站启闭对于末端污水厂的流量影响较大。因此,本次大数据分析研究的重点为 M2 以及

SB 这两个主干末端泵站在不进行工程性措施改造的前提下,通过优化这两个末端泵站的启闭工况,达到在旱天情况下既能保证系统前端不冒溢,又可减少溢流发生天数。

#### (1) M2 泵站

M2 泵站位于龙东大道 1851 号,为中途输送泵站,属于污水二期干线系统。泵站装有污水泵 6 台,设计输送能力为 19.16 m<sup>3</sup>/s。上游为 M1 泵站、SB 泵站,下游为白龙港污水处理厂,污水输送至污水二期南线。

M2 泵站共有 2 个前池(1#及 2#),6 台泵机,每个前池各配有 3 台泵,其中 2 台定频,单机流量为 4.7 m<sup>3</sup>/s,1 台变频,单机流量为 4.25~4.70 m<sup>3</sup>/s。

#### ① 泵站流量分析

M2 泵站日均流量为 96.1 万 m<sup>3</sup>/d,最小流量为 66.7 万 m<sup>3</sup>/d,最大流量为 126.3 万 m<sup>3</sup>/d。M2 输流量 80%以上分布在 76 万~102 万 m<sup>3</sup>/d,折算输送量为 8.8~11.8 m<sup>3</sup>/s,即开启的泵台数为 2~3 台。

#### ② M2 泵站与白龙港进厂流量相关分析

M2 泵站占白龙港污水厂进厂流量的 29%,M2 泵站流量占白龙港进厂流量比例主要分布在 24%~35%。此外,当白龙港进厂流量<35 m<sup>3</sup>/s 时,开启 2 台泵的比例为 73.5%,开启 3 台泵的比例为 25.7%,其他比例为 0.8%;当进厂流量≥35 m<sup>3</sup>/s 时,开启 2 台泵的比例为 24.8%,开启 3 台泵的比例为 72.8%,开启 4 台泵的比例为 2.3%,其他比例为 0.1%。

#### ③ 2020 年泵启停个数与前池水位相关性分析

为了探索泵站如何控制泵的启闭,重点研究泵

启闭个数与泵站前池水位关系。通过使用 Python 脚本对于 10 万余个泵站每 5 min 运行数据进行清洗后,通过提取泵启闭变化数据得到泵站共有 888 个泵启闭变化点。除去不合理点,剩余 884 个时刻点。将这 884 个泵站启闭工况发生变化的工况与

M2 泵站的两个前池液位进行关联分析,得出 M2 泵站前池液位的最高值、最低值、平均值以及 80% 的泵站启闭点位对应的泵站前池水位区间以及最高启闭频率对应的前池水位。经过统计分析如表 2 所示。

表 2 M2 泵站启闭个数与前池水位相关性分析

Tab. 2 Correlation Analysis between Number of M2 Pumping Station State and Water Level

比较项目	0 变 1		1 变 0		1 变 2		2 变 1	
	1#	2#	1#	2#	1#	2#	1#	2#
泵组启闭变点数目	18	19	18	17	234	171	234	171
前池水位/m	最高	3.13	1.22	1.29	4.52	3.5	2.1	1.8
	最低	-6	-0.12	-0.01	-6	0.69	-0.7	-0.81
	平均	1.33	0.28	0.33	1.93	2.04	0.17	0.18
80%的泵组启闭变点数据对应的前池水位区间/m	1.4~2.0	1.2~2.0	0.1~0.9	0.0~0.9	1.5~2.5	1.6~2.6	0.1~0.5	0.1~0.5
启闭点频率最高数据对应的前池水位/m	1.5/1.8	1.7	0.1	0.2	1.8	2.0/2.1	0.1	0.1

注:泵变化中的 0 变 1 代表泵站状态从关闭变化成开启一台泵机,1 变 2 代表泵站状态从开启一台变成开启两台泵机。

## (2) SB 泵站

SB 泵站位于浦三路 3606 号,为中途输送泵站,属于污水二期干线系统。泵站装有污水泵 6 台,设计输送能力为 31.28 m<sup>3</sup>/s。上游为 SA 泵站及吴闵 1#泵站,下游为白龙港污水处理厂,污水输送至污水二期南线东段。

SB 泵站共有 2 个前池(1#、2#),6 台泵机,每个前池各配有 3 台泵,其中 2 台定频,单机流量为 7.5 m<sup>3</sup>/s,1 台变频,单机流量为 6.26~7.5 m<sup>3</sup>/s。

### ① 泵站流量分析

SB 泵站日均流量为 146.3 万 m<sup>3</sup>/d,最小流量为 83.0 万 m<sup>3</sup>/d,最大流量为 233.5 万 m<sup>3</sup>/d。SB 输送量 80% 以上分布在 122 万~170 万 m<sup>3</sup>/d,折算输送量为 14.1~19.7 m<sup>3</sup>/s,即开启的泵台数为 2~3 台。

### ② 与白龙港进厂流量相关分析

SB 泵站占白龙港污水厂进厂流量的 47%,SB 泵站流量占白龙港进厂流量比例主要分布在 43%~52%。此外,当白龙港进厂流量<35 m<sup>3</sup>/s 时,开启 2 台泵的比例为 56.0%,开启 3 台泵的比例为 42.2%,其他比例为 1.8%;当进厂流量≥35 m<sup>3</sup>/s 时,开启 2 台泵的比例为 19.6%,开启 3 台泵的比例为 76.9%,开启 4 台泵的比例为 3.0%,其他比例为 0.5%。

### ③ 2020 年泵启停个数与前池水位相关性分析

为了探索泵站如何控制泵的启闭,重点研究泵启闭个数与泵站前池水位关系。通过数据清洗后形成泵站每 5 min 运行数据,通过提取泵启闭变化数据得到泵站共有 414 个泵启闭变化点,将这 414 个泵站启闭工况发生变化的工况与 SB 泵站的两个前池液位进行关联分析,得出 SB 泵站前池液位的最高值、最低值、平均值以及 80% 的泵站启闭点位对应的泵站前池水位区间以及最高启闭频率对应的前池水位。经过统计分析如表 3 所示。

## 4 优化运行策略的研究与试运行

### 4.1 优化运行策略研究

将污水主干泵站大数据分析出来的泵站高频启闭液位数据,输入经过率定验证的污水主干模型进行模拟并与现状运行数据进行比较。为了保证优化运行工况的可落地性,模拟优化工况中的各个泵机的启闭水位的选取是综合了现状启闭液位与泵机高频启闭液位数据,并参考了泵站管理人员的相关建议在尽可能减少对现状启闭工况改变情况下进行的优化调度分析。现状运行的旱天溢流天数为 58 d。其识别溢流的策略为:进厂瞬时流量超过 35 m<sup>3</sup>/s,且持续时长超过 0.5 h。消除溢流的策略为:进厂瞬时流量不超过 35 m<sup>3</sup>/s,或者在超过 35 m<sup>3</sup>/s 的前提下,持续时长低于 0.5 h。

采用如表 4 所示的优化方案,优化工况下旱天

表3 SB 泵站启闭个数与前池水位相关性分析

Tab. 3 Correlation Analysis between Number of SB Pumping Station State and Water Level

比较项目	0 变 1		1 变 0		1 变 2		2 变 1	
	1#	2#	1#	2#	1#	2#	1#	2#
泵组启闭变点数目	25	19	24	15	129	37	126	39
前池水位/m								
最高	3.17	2.73	2.66	2.34	4.42	2.65	1.42	1.98
最低	-2.39	-1.48	-3.16	-3.01	-1.65	-2.00	-3.44	-3.32
平均	0.33	0.51	-1.19	-1.34	0.83	0.78	-2.10	-2.02
80%的泵组启闭变点数据 对应的前池水位区间/m	-2.4~1.9	-1.2~2.0	-3.0~1.1	-3.0~0.1	-0.3~2.0	-1.0~2.0	-3.0~-0.7	-2.9~0.5
启闭点频率最高数据对应 的前池水位/m	-0.3/-0.1/0	0	-3.0	-2.9	1.1/1.2	1.2	-2.8	-2.9

表4 实际运行工况与优化工况的情况对比

Tab. 4 Comparison of Actual and Optimized Operation Conditions

泵站名	泵机号	实际运行工况		模拟优化工况	
		启泵水 位/m	闭泵水 位/m	启泵水 位/m	闭泵水 位/m
M2 泵站	泵机 1#	0.7	0.5	1.2	0.7
	泵机 2#	1.2	0.7	1.4	0.5
	泵机 3#	1.5	0.7	2	0
	泵机 4#	2.7	0	2.2	0
	泵机 5#	2.8	0	/	/
	泵机 6#	3	0	/	/
SB 泵站	泵机 1#	-2	-3.1	-0.25	-2
	泵机 2#	-1	-3.1	0.4	-2
	泵机 3#	1	-3.1	0.5	-1
	泵机 4#	2.3	-3.1	0.85	-1
	泵机 5#	3.3	-3.3	/	/
	泵机 6#	4.3	-3.1	/	/

注:实际运行工况中的旱天溢流天数是 58 d,模拟优化工况下的旱天溢流天数是 50 d。

溢流天数分别为 50 d。相比实际运行数据,优化工况下旱天溢流率相比实际运行工况降低了 14%。

#### 4.2 泵站优化策略的试运行

运维单位在 2022 年度的 3 月—4 月的旱季工况试用了该优化工况对 M2、SB 泵站进行运行调度。最终对比发现:相比 2021 年度的 3 月—4 月,在 2022 年度旱天平均进厂水量基本持平、旱天天数增加 5 d 的基础上,2022 年旱天溢流天数与 2021 年持平。此外旱天溢流总量从 238 万 m<sup>3</sup> 降低至 207 万 m<sup>3</sup>,旱天溢流总量降低了约 13%(表 5)。该实际试

运行证明了该泵站优化策略作为一个非工程性措施对于减少末端污水厂溢流有一定的作用。

表5 2021 年原始调度工况与 2022 年优化调度工况下的白龙港 3 月—4 月溢流情况对比

Tab. 5 Comparison of Original Controlling Conditions in 2021 and Overflow Condition from March to April in Bailonggang under the Optimized Conditions in 2022

指标	2021 年	2022 年
旱天平均进厂水量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	308 万	296 万
3 月—4 月旱天总数/d	38	43
旱天溢流天数/d	15	15
旱天溢流率	39%	35%
总溢流量/m <sup>3</sup>	238 万	207 万
旱天溢流量减少率	-	13%

## 5 结论与展望

通过历史运行数据的分析挖掘结合水动力模型,进行污水主干系统的调度优化是一种有效的降低末端污水厂溢流的措施。该措施可以在不进行任何工程性改造的条件下将末端污水厂的旱天溢流总量降低。相比单纯依靠建立水动力模型进行污水系统的运行优化,本方法由于是基于历史运行数据提出的优化策略,其优化调度方案的可实施性更强。

本次研究污水系统主干的优化调度只采用了 M2、SB 两个末端泵站进行了优化。下一阶段研究应考虑如何针对全局的污水泵站进行优化策略的研究。此外,本次研究采用的历史数据跨度为 2020 年—2022 年,这 3 年的污水量情况或多或少受到疫情影响,可能与非疫情时间段有一定差距。下一阶段研究应增加大数据研究的样本量,以降低疫情对于整个研究的影响。

## 参考文献

- [ 1 ] YANG H, TONG X, GOU D F. Study on the waterlogging operation effects of InfoWorks ICM dispatching strategies [J]. E3S Web of Conferences, 2021, 228: 01009. DOI: 10.1051/e3sconf/202122801009.
- [ 2 ] LI H F, LU L J, HUANG X F. An optimal design strategy of decentralized storage tank locations for multi-objective control of initial rainwater quality [J]. Water Supply, 2020, 20(6): 2069-2081.
- [ 3 ] 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 W, QIAN J, LI T, 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.
- [ 4 ] WENG H T, LIAW S L. An optimization model for urban sewer system hydraulic design [J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2011, 30(1): 31-42.
- [ 5 ] 张留臻, 王辉, 谭琼, 等. 水力模型用于干线对区域排水系统运行影响的研究 [J]. 中国给水排水, 2017, 33(15): 122-125. ZHANG L L, WANG H, TAN Q, et al. Application of hydraulic model in assessment of influence of safe operation of SSP II on regional drainage systems [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(15): 122-125.
- [ 6 ] 彭海琴, 张留臻. 上海污水干线总管网络模型构建与调度研究 [J]. 城市道桥与防洪, 2020(1): 143-146, 158. PENG H Q, ZHANG L L. Study on construction and operation of sewage main network model in Shanghai [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2020(1): 143-146, 158.
- [ 7 ] 谭琼, 张建频, 徐贵泉, 等. 河道泵闸与市政泵站应对内涝的联动运行优化调度 [J]. 中国给水排水, 2018, 34(19): 124-128. TAN Q, ZHANG J P, XU G Q, et al. Optimal combined operation of municipal pumping stations and river pump gates for flooding control [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(19): 124-128.
- [ 8 ] 谭琼, 时珍宝, 张建频, 等. 大型合流制污水干管优化运行研究 [J]. 给水排水, 2011, 47(11): 97-101. TAN Q, SHI Z B, ZHANG J P, et al. Research on the optimal operation of large-scale combined sewage mains [J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 47(11): 97-101.
- [ 9 ] 廖青桃, 谭琼, 时珍宝, 等. 城市污水处理厂厂网联动平稳输送运行优化研究 [J]. 给水排水, 2016, 52(12): 20-24. LIAO Q, TAN Q, SHI Z B, et al. Research on the optimization of smooth conveying operation of urban sewage treatment plant and plant network [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 52(12): 20-24.
- [ 11 ] OGAWA S, UMEMURA A, OSHIMA N. On the equations of fully fluidized granular materials [J]. Zeitschrift Für Angewandte Mathematik Und Physik Zamp, 1980, 31(4): 483-493.
- [ 12 ] 周超, 张建锋, 何华, 等. 砂滤池对水中颗粒物截留效果及反冲洗效果的分析 [J]. 给水排水, 2013, 39(9): 33-38. ZHOU C, ZHANG J F, HE H, et al. Analysis of the interception effect and backwashing effect of sand filters on particulate matter in water [J]. Water & Wastewater Engineering, 2013, 39(9): 33-38.
- [ 13 ] 严煦世, 范谨初. 给水工程 [M]. 4 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. YAN X S, FAN J C. Water supply engineering [M]. 4th ed. Beijing: China Construction Industry Press, 1999.
- [ 14 ] 许仕荣, 安浩颖, 黄茂林. 均质滤料滤池反冲洗数值模拟及优化 [J]. 安全与环境学报, 2023, 23(6): 2111-2118. XU S R, AN H Y, HUANG M L. Numerical simulation and optimization of uniform media filter backwashing in filter [J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(6): 2111-2118.
- [ 15 ] 王珊, 张克峰, 张奔, 等. 煤砂滤池反冲洗优化及自控系统研究 [J]. 给水排水, 2017(s1): 33-36. WANG S, ZHANG K F, ZHANG B, et al. Research on optimization of backwashing and automatic control system for coal sand filter [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017(s1): 33-36.
- [ 16 ] 刘辉, 熊岚, 许建华. 防止煤砂双层滤料滤池跑煤的反冲洗方式 [J]. 净水技术, 2001, 20(4): 36-38. LIU H, XIONG L, XU J H. Backwashing process to prevent anthracite loss in dual media filter [J]. Water Purification Technology, 2001, 20(4): 36-38.