

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.10.015

# 城市高密度建成区小流域多目标协同的联合调度

武涛<sup>1</sup>, 刘军<sup>2,3</sup>, 邓德宇<sup>2,3</sup>, 赵如金<sup>4</sup>, 吴雪薇<sup>2,3</sup>, 杜彩丽<sup>1</sup>,  
张列宇<sup>1</sup>, 姚永连<sup>5</sup>

(1. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2. 中建三局绿色产业投资有限公司, 湖北 武汉 430000; 3. 中建武汉黄孝河机场河水环境综合治理建设运营有限公司, 湖北 武汉 430000; 4. 江苏大学 环境与安全工程学院, 江苏 镇江 212013; 5. 中规院<北京>规划设计有限公司, 北京 100044)

**摘要:** 近年来,在长江大保护等国家政策的驱动下,城市水环境治理已进入流域综合管理阶段,推动流域多目标联合调度管理已成为城市精细化管理的重要课题。以武汉市某典型小流域为研究对象,探索城市高密度建成区小流域多目标协同的联合调度方案,旨在实现水安全、水环境和水生态的平衡。通过模型分析与实测数据相结合的方法,制定了晴天、雨天及雨后水质恢复的联合调度策略。该策略实施后实现了经济高效的“污涝共治”,在保障水环境的同时降低了水安全风险,提升了城市韧性,有效整合了流域设施,可为城市流域精细化管理提供参考。

**关键词:** 高密度建成区; 城市小流域; 水环境治理; 多目标协同; 联合调度

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2026)10-0103-07

## Coordinated Multi-objective Joint Dispatching in Small Watersheds of High-density Built-up Urban Areas

WU Tao<sup>1</sup>, LIU Jun<sup>2,3</sup>, DENG Deyu<sup>2,3</sup>, ZHAO Rujin<sup>4</sup>, WU Xuewei<sup>2,3</sup>,  
DU Caili<sup>1</sup>, ZHANG Lieyu<sup>1</sup>, YAO Yonglian<sup>5</sup>

(1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. China Construction Third Engineering Bureau Green Industry Investment Co. Ltd., Wuhan 430000, China; 3. China Construction Wuhan Huangxiahe River Airport River Water Environment Comprehensive Treatment Construction and Operation Co. Ltd., Wuhan 430000, China; 4. School of the Environment and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 5. CAUPD Beijing Planning & Design Consultants Co. Ltd., Beijing 100044, China)

**Abstract:** In recent years, propelled by national policies such as the Yangtze River Major Conservation (YRMC) Action, urban water environment management has entered the stage of integrated watershed governance, making integrated multi-objective joint dispatching management a critical issue in urban refined management. This study focuses on a typical small watershed in a high-density built-up area of Wuhan, aiming to explore a coordinated multi-objective joint dispatching scheme to balance water security, water quality, and aquatic ecology. By combining model analysis with field monitoring data, joint dispatching strategies for dry weather, rainy weather, and post-rain water quality recovery were developed.

通信作者: 邓德宇 E-mail: 964573656@qq.com

The implementation of these strategies has achieved cost-effective sewage treatment and waterlogging prevention while maintaining water environmental quality, significantly reducing hydrological risks, enhancing urban resilience, and consolidating watershed infrastructure systems. These outcomes provide valuable insights for advancing refined governance in urban watershed management.

**Keywords:** high-density built-up areas; urban small watershed; water environment management; multi-objective collaboration; joint dispatching

随着城市流域功能定位的多元化发展和人民日益增长的美好生活需要,水安全、水环境、水生态等多重目标需求之间的平衡日益复杂化。“十四五”以来,我国流域治理实现了从单一污染治理向综合治理的转变。在《深入打好城市黑臭水体治理攻坚战实施方案》《城镇生活污水处理设施补短板强弱项实施方案》《关于加强城市内涝治理的实施意见》等国家政策的推动下,各地大力推进污水、排水系统基础设施建设,逐步弥补历史欠账,形成以政府为主导的多元主体协同治理模式<sup>[1]</sup>,并提出对厂、网、河(湖)等涉水要素进行一体化运维管理的要求。厂网河一体化联动联调立足涉水设施的系统性关联,通过构建动态耦合模型实现优化调度,打破传统碎片化管理局限,缓解了溢流污染和城市内涝问题,提升了河道水质达标率和应急响应能力,优化了系统运行能耗。但是,目前我国厂网河一体化调度水平仍不高:一是单一目标导向与多情境适应性不足,现有实践及研究多聚焦于单一水质目标,且缺乏对不同降雨情境下城市防洪与水环境一体化调度的综合考虑<sup>[2]</sup>,难以应对复杂多变的天气情况;二是多龙治水缺乏统筹,大多数污水处理厂、排水管网等设施的运维管理仍分属不同运营单位,短期内难以实现统一管理<sup>[3]</sup>,各单位之间需求、职责和优先级不同,缺乏联动机制,导致多目标协同难度较大。

在此背景下,制定科学的调度方案,协调多层次运营单位,通过联合调度充分发挥设施潜力<sup>[4]</sup>,实现水安全、水环境、水生态多重目标,已成为城市精细化管理的重要课题。以武汉市某典型小流域为例,深入分析其多目标协同的联合调度实践与成效,可为类似城市流域治理提供参考。

## 1 概述

### 1.1 流域及项目概况

武汉市H河全长10.4 km,其中明渠段长5.4

km,暗涵段长5.0 km,流域汇水面积51.4 km<sup>2</sup>,多年平均降雨量1 280 mm。流域内合流区与分流区并存,现状合流区面积25.2 km<sup>2</sup>,占比49%(见图1)。随着城市化进程的加快和人口规模的增长,现有污水处理系统已难以满足日益增长的污水处理需求,雨季溢流污染频发,导致河道水质长期处于地表水劣V类,水生态系统遭到破坏。上游区域排水系统承载能力不足,“看海”现象时有发生。

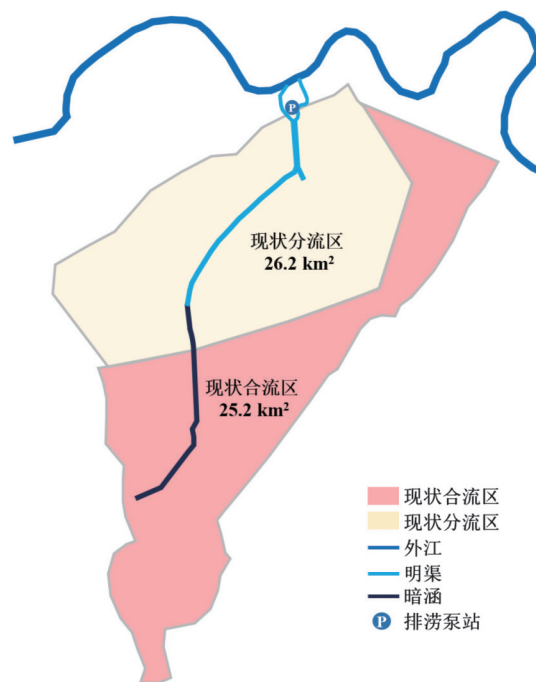


图1 H河流域分区示意

Fig.1 Schematic diagram of H river basin zoning

H河水环境综合治理项目通过强化流域基础设施建设,系统性解决了污水超载、溢流污染、内涝风险及生态退化问题(拓扑关系见图2)。

#### ① 污水系统

明渠起端为新建净水厂,设计处理量10万 m<sup>3</sup>/d,出水水质执行地表水Ⅳ类标准;配合末端既有的污水处理厂(50万 m<sup>3</sup>/d),可以解决污水处理能力不足的问题。

## ② 合流制溢流(CSO)污染控制系统

新建25万 $\text{m}^3$ 调蓄池1座,配套建设6 $\text{m}^3/\text{s}$ 的强化处理设施,调蓄并处理雨季超出污水系统处理能力的污水,削减溢流次数,降低溢流污染影响。

## ③ 排涝系统

对末端的排涝泵站进行重建,新增排涝能力88 $\text{m}^3/\text{s}$ ,同步对河道进行拓宽,排涝标准由20年一遇提升至50年一遇。

## ④ 水生态系统

利用明渠起端净水厂、末端污水处理厂出水对河道进行生态补水,补水量15万 $\text{m}^3/\text{d}$ ,恢复河道动力,搭配“灰绿结合”的曝气喷泉及生态浮床,解决河道生态恶化问题。

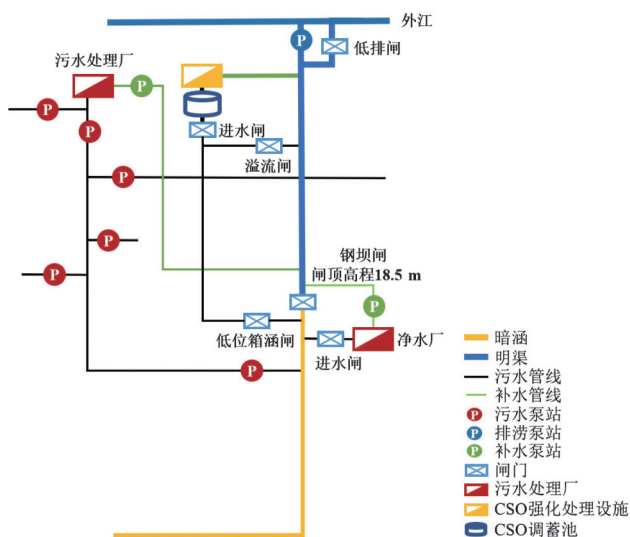


图2 流域系统治理拓扑

Fig.2 Topology of watershed system governance

## 1.2 现状问题分析

① 排水体制的二元特征显著。流域上游为老城区,现状建设用地占比已接近区域总用地面积的90%,属于高密度建成区,彻底“合改分”难度大,合流制排水体系将长期存在,形成与分流制并行的二元排水格局。

② 系统运行具有不确定性。流域调度涉及污水泵站、排涝泵站、系列闸门(钢坝闸、低位箱涵闸、自排闸、沿岸闸口)、污水处理厂、调蓄池、强化处理等涉水设施,其检修、停产(停电)、故障等异常工况均可能引起连锁反应,威胁水安全与水环境。

③ 多层级的运营主体各自为政。流域内涉水设施分属不同层级的运营主体,如市泵站管理处负责排水泵站及钢坝闸的调控,区水务局管辖沿岸

闸口运行,排水公司主导末端污水处理厂及配套泵站运营。各主体以部门职能为导向开展工作,管理目标单一,各设施之间难以实现协同联动。

在排水体制复杂、设施多样、管理割裂的叠加效应下,流域设施的运行调度响应滞后,导致溢流及内涝风险高,亟须制定合理的联合调度策略及方案,最大限度激发流域各处理设施的潜力,实现水安全、水环境、水生态多目标的协同。

## 2 基于模型分析的联合调度

### 2.1 调度目标

流域调度以保障水环境为主,兼顾水安全、水生态,主要目标有:①晴天污水全截流,正常工况下不发生溢流现象。②雨天溢流污染可控,年均溢流次数小于10次。③水安全满足50年一遇排涝要求。④明渠水质达到地表水V类标准,力争主要水质指标达到地表水IV类标准。⑤流域内相关设施运行正常,排水正常。

### 2.2 CSO污染的控制策略

为尽可能减少合流制污水进入明渠污染水质,考虑到晴天暗涵的液位为14.5~16.5m,初步设定CSO系统的暗涵启动液位为16.5m,即暗涵液位达到16.5m后,立即打开低位箱涵闸门,让合流制污水进入CSO调蓄池及强化处理设施进行处理。考虑到随着降雨增大,后续处理设施能力将会逐渐不足,结合年均溢流次数 $\leq 10$ 次、上游暗涵预留空间、邻近污水泵站防淹没水位等要求,控制钢坝闸的启动液位为17.8m,即暗涵液位超过17.8m时,打开钢坝闸,河道进入行洪模式,暗涵污水直排明渠,避免上游发生内涝风险。

基于上述控制条件,采用MIKE模型对暗涵在临界降雨场次(24.4mm,65min)及全年降雨过程中的溢流频次进行模拟分析。基于武汉市1980年—2018年(38年)降雨数据进行皮尔逊III型分析,并综合考虑降雨强度,选择丰水年且大雨、暴雨场次较多的2016年作为典型年(总降雨量1844mm,大雨8场,暴雨、大暴雨各4场)。

① 根据场次模拟流量[见图3(a)]可以看出,分流制排口流量峰值比暗涵入低位箱涵的流量峰值提前20min,但分流制雨水截入低位箱涵也增加了最终进入调蓄池的流量峰值。整个汇流管流过程持续约4.5h,调蓄池最高水位11.5m[见图3

(b)],此时调蓄池调蓄量约20万 $\text{m}^3$ ,同时CSO处理设施以6 $\text{m}^3/\text{s}$ 处理后直接排放。可见,当降雨强度小,产汇流流量小于CSO处理设施处理能力时,调蓄池无需蓄水即可保证暗涵不溢流,因此降雨强度对溢流影响很大。

② 典型年全年溢流8次,满足一年不超过10次溢流的要求。其中,降雨强度大的场次易发生溢流,连续降雨后暗涵液位控制、调蓄池排空情况也会影响发生溢流的可能性及溢流量。

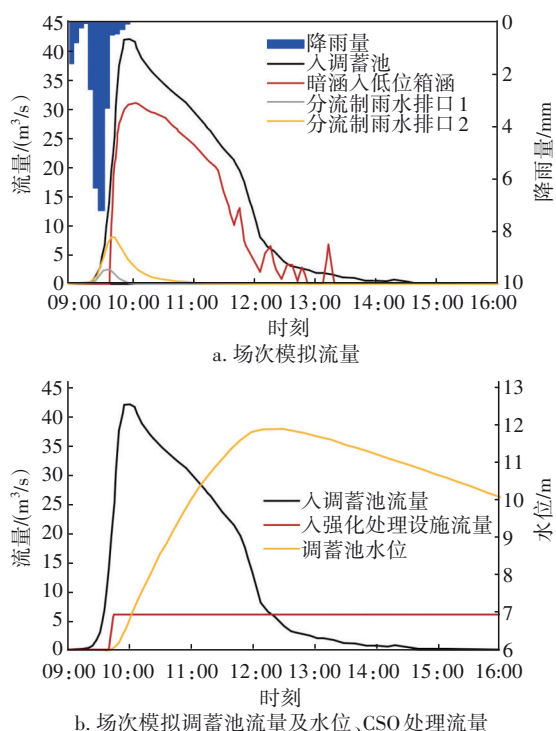


图3 临界降雨场次模拟结果

Fig.3 Simulation results of critical rainfall events

## 2.3 河道行洪排涝控制策略

为确保河道行洪排涝能力达到50年一遇24 h暴雨标准(368 $\text{m}^3/\text{s}$ ),且上游暗涵区域不发生内涝、

溃水,拟定的边界条件为:充分考虑明渠段沿程主要排口的入河流量,在末端排涝泵站前池达到启排液位15.65 m后,立即启动泵站排水。模拟显示(见图4),在上游过河箱涵处存在壅水现象,但明渠段基本满足50年一遇排涝要求。

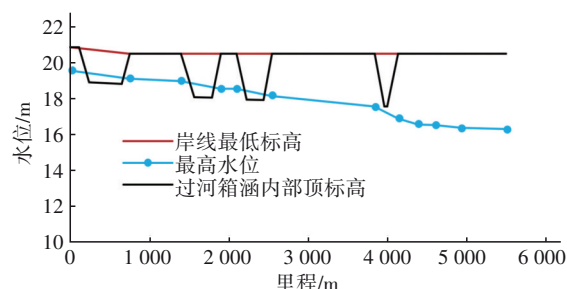


图4 河道水位变化

Fig.4 Change of river water level

## 2.4 雨后水质恢复控制策略

暗涵液位超过17.8 m时,将打开暗涵末端钢坝闸,CSO污水将直排明渠段,设定雨后河道水质为地表水劣V类,按明渠段15万 $\text{m}^3/\text{d}$ 的补水量计,MIKE模型模拟结果表明,河道主要水质指标均可在3 d内恢复,其中COD、总磷、 $\text{BOD}_5$ 恢复较快,氨氮恢复最慢,主要原因在于末端CSO强化处理设施的尾水排放。

## 3 基于模型与实测数据优化的联合调度

### 3.1 晴天联合调度方案

晴天模式下,流域调度目标为水环境优先,即最基本目标为确保暗涵、排口污水全截流,在此基础上,尽可能降低暗涵及流域污水管网运行水位、增加河道生态补水量。基于调度目标及管网实测数据,对排水管网进行系统分析,可知:①主汛期前,晴天暗涵来水量<污水系统设计处理能力,雨后1~2 d可完成消纳。②主汛期雨后系统来水量较汛前显著增加,且雨后5 d左右可完成消纳(见图5)。

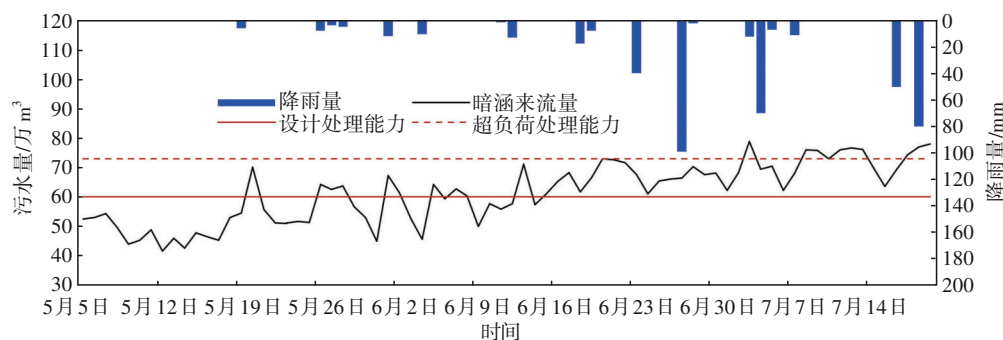


图5 流域污水量分析

Fig.5 Analysis of sewage volume in the watershed

汛期来临之前,暗涵液位稳定可控。进入汛期之后,暗涵晴天工况下能够实现管网超低水位运行,但同时也带来不同污水处理系统水量分配问题;汛期雨后暗涵将维持2~5 d高水位的情况,降雨量越大,污水处理系统压力越大,后续晴天水位恢复得越慢(见图6)。

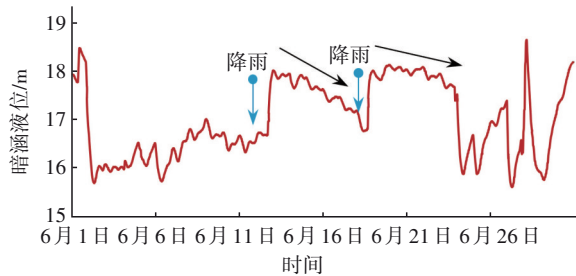


图6 汛期暗涵液位变化

Fig.6 Change of liquid level in culvert during flood season

该系统晴天工况下,主要调度策略如下:

① 晴天各污水处理设施均满负荷运行,涉及管网低水位水量分配问题,原则为优先保障净水厂的进水量,主要原因在于净水厂为原位重力进水,可最大限度节能降耗,且尾水可直接补给河道。

② 雨后各污水处理设施超负荷运行,尽快降低管网液位,避免连续降雨导致溢流。

### 3.2 雨天联合调度方案

原设计雨天调度方案为管网水位达到16.5 m即启动CSO系统,但从模型模拟结果看,该调度思路仍有不少优化空间。如小雨工况下(24 h降雨量为0~9.9 mm)暗涵液位至多升高60 cm,最大上升速度约20 cm/h,即使暗涵液位超过16.5 m也基本没有溢流风险,为此,选取不同降雨工况下的典型暗涵液位变化趋势进行分析:

① 在24 h降雨17.3 mm的中雨工况下[见图7(a)],暗涵液位在降雨高峰期3 h内上升120 cm,最高液位达到18.2 m(溢流液位为18.5 m),由于雨前暗涵液位较低(16.7 m),即使未启用CSO系统也未出现溢流,但雨后管网液位一直处于高位。

② 在12 h降雨16.8 mm的大雨工况下[见图7(b)],暗涵液位1 h内上升约70 cm,属于连续的降雨导致暗涵液位较高,最终在第二场降雨高峰期发生溢流。

③ 在24 h降雨70 mm的暴雨工况下[见图7(c)],由于短历时雨强极大,暗涵水位3 h内上涨2 m,虽然暗涵液位较低,但由于降雨来势汹汹,上游

管网面临极大的溃水压力,钢坝闸打开后暗涵液位快速下降。

④ 在红色暴雨预警下([见图7(d)],24 h降雨量达到126.9 mm,在钢坝闸已经全开进入行洪模式的情况下,暗涵液位仍然持续攀升,5 h上升2.5 m,上游溃水风险非常大。

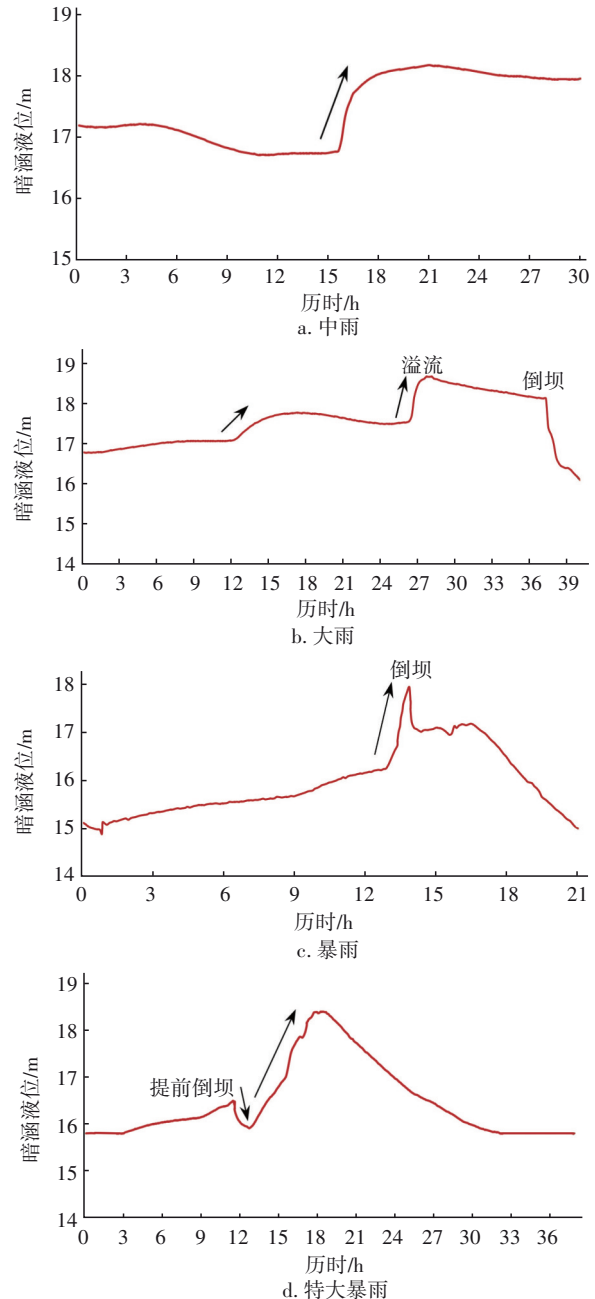


图7 不同降雨强度下暗涵液位变化曲线

Fig.7 Liquid level variation curves of culvert under different rainfall intensities

该系统不同降雨工况下的调度策略优化思路主要有:

① 雨前通过污水系统满负荷/超负荷运行,尽可能预降水位,大雨工况暗涵水位预降至17.0 m,暴雨工况预降至16.5 m。若降雨时未达到预设液位,可提前开启低位箱涵闸进水5~8 m<sup>3</sup>后关闭,达到降低水位、预热CSO系统的效果。

② 基于不同降雨工况、暗涵基础液位,对CSO启动液位进行分级考虑,如中小雨工况下,尽量利用现有污水处理设施消纳合流制污水;大雨工况下,暗涵水位达到18.0 m时启动CSO系统;暴雨工况下则在降雨时立即启动CSO系统。

③ 在降雨及汇流已结束,暗涵液位处于较为安全的区间,如暗涵液位下降至17.5 m,方能关闭CSO系统,利用污水处理系统进行处理,确保河道水质。

④ 暴雨工况下,与末端排涝泵站的联动需更加紧密,雨前需预降河道液位,雨后尽快启动全部水泵。

### 3.3 雨后水质恢复调度方案

基于原模型的模拟策略,选取4月28日典型降雨工况(24 h降雨63.1 mm,倒坝行洪,沿线排口同步开启,且29日、30日有连续降雨,总降雨量21.7 mm),对河道雨后水质恢复的实测数据进行分析(见图8),可知:受倒坝行洪、排口排污影响,暴雨期间明渠各断面主要水质指标均劣于地表水V类。暴雨后第3天、降雨结束后第1天(5月1日),除下游3#断面氨氮受CSO系统运行影响偏高外,其余指标均已达到地表水V类标准。5月2日,明渠主要水质指标已全面恢复至地表水IV类标准,原调度策略可行。从调度优化角度看,在保障暗涵液位的基础上,可将CSO调蓄池内存蓄的污水输送至末端污水处理厂进行处理,以此降低CSO系统运行对水质的影响。

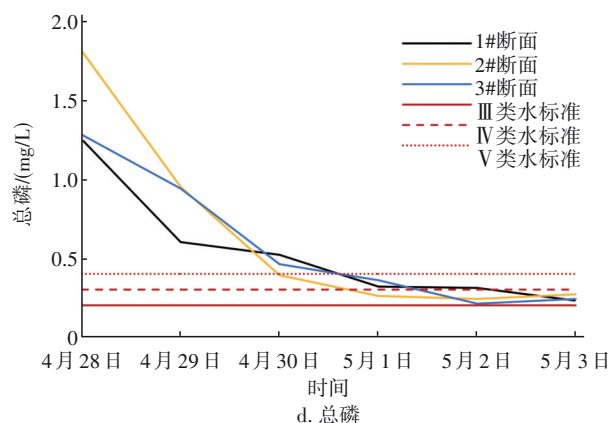
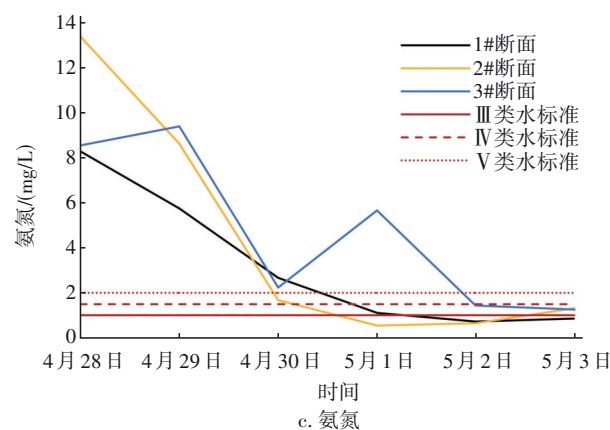
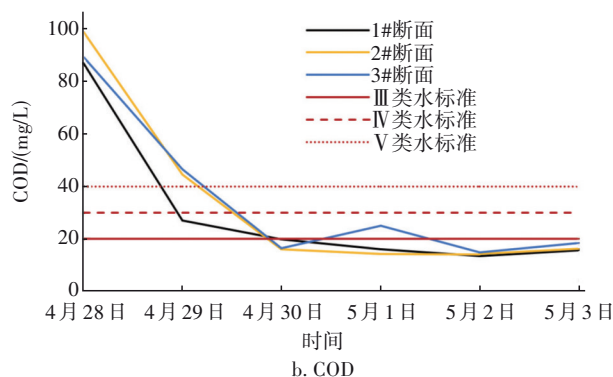
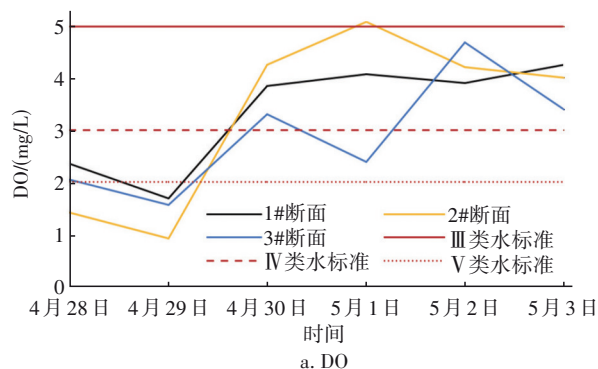


图8 不同水质指标在雨后的恢复过程

Fig.8 Recovery process of different water quality indexes after rain

## 4 多目标协同调度效果

### 4.1 污涝共治

通过构建流域设施联合调度方案,实现污水溢流控制与内涝防治的协同治理。在溢流污染控制方面,流域溢流频次显著降低,由2020年的26次降至2024年的8次,并在45 mm/24 h降雨强度下实现零溢流,有效改善了原有“小雨小溢、大雨大溢、暴雨全溢”的被动局面。同时,河道水质由地表水劣V类稳定提升至地表水V类,经常性达到地表水III

类,呈现持续向好趋势。在内涝防治方面,提升了城市韧性。在34 mm/h的强降雨条件下,流域未出现大面积严重渍水;即便遭遇91.9 mm/h极端降雨(相当于设计雨强的3.91倍),上游区域渍水深度仅约50 cm,且降雨结束后1 h内即可快速消退,显著提升了城市应对极端降雨事件的能力。

## 4.2 水城同治

在合流制与分流制并存的复合排水体系中,通过多系统联合调度,能够有效整合流域内的各类设施,最大限度发挥流域设施的潜力,实现经济高效的流域治理。在工程投资上,该模式约为0.45亿元/km<sup>2</sup>,相较于传统的单一雨污分流改造方案,不仅降低了投资成本,还大幅缩短了生态、环境效益显现的周期。在运维成本上,联合调度优化了运行模式,减少了不必要的启闭操作,可延长设备使用寿命,降低维护成本。在空间价值上,河道由昔日臭水沟变成休闲好去处,为城市空间品质的优化与居民生活品质的提升注入新动力。

## 5 结论与展望

### 5.1 结论

通过模型分析论证了设计调度方案的可行性,并在实际调度经验的基础上,提出了联合调度的优化方案:①晴天污水系统满负荷运行,雨后超负荷运行,确保管网处于低水位运行状态,避免后期发生连续降雨导致溢流。②雨前预降水位,大雨时暗涵水位预降至17.0 m,暴雨时预降至16.5 m,若降雨时未达到预设液位,可提前开启低位箱涵闸进水,达到降低液位、预热强化处理设施的效果。③雨天对CSO系统进行分级启用,当降雨汇流结束、暗涵水位处于安全区间时,关闭CSO系统,利用污水系统处理调蓄池内蓄水,确保水质。④暴雨时,加强与末端泵站的联动,雨前预降河道水位。

### 5.2 展望

①深化政企协同,组建联合调度专班,整合政府统筹优势与企业技术、管理优势,构建优势互补的协作机制,提升调度效能;②优化监管机制,建立科学监管与考核体系,强化方案执行刚性;推行“按效付费”模式,以绩效激励管理质量提升;③强化制

度联动,将联合调度深度融入“河长制”,搭建常态化信息共享平台,依托“河长制”问题反馈机制与调度专业技术力量,实现流域问题快速响应与闭环处置。

## 参考文献:

- [1] 王殿常,赵云鹏,陈亚松,等. 我国城市水环境治理的现状与困境分析[J]. 给水排水,2023,49(11):25-31.  
WANG D C, ZHAO Y P, CHEN Y S, et al. Analysis of present situation and dilemma for treatment of urban water environment of China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023,49(11):25-31(in Chinese).
- [2] 莫世川,谢坤,陈华,等. 城市厂网河一体化模拟与调度研究进展[J]. 中国农村水利水电,2022(10):42-46,50.  
MO S C, XIE K, CHEN H, et al. Research on the integrated modeling and operation of urban drainage systems and rivers [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(10):42-46,50(in Chinese).
- [3] 梁雨雯,郭迎新,赵晨辰,等. 城镇生活污水系统厂网一体化考核体系的构建与应用[J]. 中国给水排水,2024,40(16):23-28.  
LIANG Y W, GUO Y X, ZHAO C C, et al. Construction and application of integrated assessment system of urban domestic sewage treatment plant and sewage pipeline network [J]. China Water & Wastewater, 2024,40(16):23-28(in Chinese).
- [4] 王浩正,刘智晓,刘龙志,等. 流域治理视角下构建弹性城市排水系统实时控制策略[J]. 中国给水排水,2020,36(14):66-75.  
WANG H Z, LIU Z X, LIU L Z, et al. Real time control solutions for urban drainage system under watershed treatment [J]. China Water & Wastewater, 2020,36(14):66-75(in Chinese).

作者简介:武涛(1982—),男,甘肃酒泉人,博士,正高级工程师,主要从事流域水环境治理研究工作。

E-mail:23110740049@m.fudan.edu.cn

收稿日期:2025-04-07

修回日期:2025-05-07

(编辑:衣春敏)