

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.12.020

武汉黄孝河机场河流域智慧水务调度系统

张 静^{1,2}, 陈 俊^{1,2}, 魏 宏^{1,2}, 邓德宇^{1,2}, 刘 军¹, 邹 静¹,
杨杏勃¹, 张诗雄^{1,2}, 陈 聪^{1,2}, 李 进^{1,2}

(1. 中建三局绿色产业投资有限公司, 湖北 武汉 430000; 2. 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)

摘 要: 针对流域治理面临的信息壁垒严重、智慧水务系统模型预测准确度低和调度预案参考价值低等问题,以武汉黄孝河机场河流域为研究对象,建立了黄孝河机场河流域智慧水务调度系统。该调度系统依托流域全要素监测监控体系,构建基于机理模型和经验模型共同驱动的预测预警模型和动态调度模型,极大提升了流域调度决策的科学性和运营管理的效率,为流域的多目标综合治理提供样本,对推动提升流域综合管理成效具有重要参考价值。

关键词: 智慧水务; 调度系统; 流域综合管理; 机理模型; 经验模型

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)12-0120-08

A Smart Water Dispatching System of Huangxiao River and Airport River Basin in Wuhan

ZHANG Jing^{1,2}, CHEN Jun^{1,2}, WEI Hong^{1,2}, DENG De-yu^{1,2}, LIU Jun^{1,2},
ZOU Jing^{1,2}, YANG Xing-bo¹, ZHANG Shi-xiong^{1,2}, CHEN Cong^{1,2}, LI Jin^{1,2}

(1. China Construction Third Bureau Green Industry Investment Co. Ltd., Wuhan 430000, China;

2. China Construction Wuhan Huangxiao River and Airport River Water Environment
Comprehensive Management Co. Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: In response to the serious information barriers, low prediction accuracy of smart water system models, and low reference value of dispatching plans faced by river basin management, a smart water dispatching system for Huangxiao River and Airport River basin in Wuhan is established. The dispatching system relies on the comprehensive monitoring and control system of the basin, and constructs a prediction and warning model and dynamic dispatching model driven by both mechanism model and empirical model, which greatly improves the scientific decision-making of basin dispatching and the efficiency of operation management. It provides samples for multi-objective comprehensive management of the basin and has important reference value for promoting and improving the effectiveness of basin comprehensive management.

Key words: smart water; dispatching system; comprehensive watershed management; mechanism model; empirical model

黄孝河机场河(以下简称“两河”)流域水环境综合治理二期工程于2019年启动,是湖北省首个人选

全球基础设施中心(GIH)项目库的项目、湖北省重点项目和武汉市“四水共治”头号工程。该项目建成投运后,为持续提升两河流域综合治理成效,推动流域的精细化管理,搭建了两河流域智慧水务平台。

1 平台的架构与功能

1.1 总体技术架构

根据流域治理需求,结合智慧水务行业发展现状与趋势^[1-2],总结同类项目的建设经验^[3-5],确定两河流域智慧水务平台的总体架构主要包括基础数据资料层、监测数据采集传输层、专业数据库层、网络与硬件设施层、应用软件支撑层、模型与算法层、自控指令下达层和业务应用层8大层级和信息安全体系、标准规范体系2大保障体系,具体见图1。

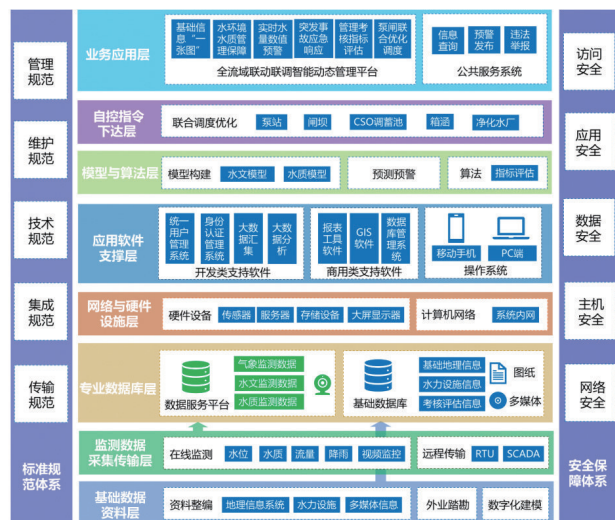


图1 两河流域智慧水务平台总体技术架构

Fig.1 Overall technical architecture of Huangxiao River and Airport River basin smart water platform

1.2 主要功能

基于上述系统层级,两河流域智慧水务平台分为大屏展示平台和工程师平台。大屏展示平台主要用于流域管理效果展示,包括流域态势、监测监控、预测预警、动态调度、管理运维和绩效考核等6大功能板块。工程师平台主要用于管理人员进行数据分析和日常管理,主要功能包括流域一张图、数据分析、预测预警、动态调度、管理运维、绩效考核、公众服务和人员考核等板块。

2 智慧水务调度系统的创新性

近年来,为解决流域水环境管理过程中面临的流域面积大、水务设施多、权属单位复杂、信息壁垒

严重等问题,智慧水务逐渐成为流域统筹管理的重要手段。然而,目前智慧水务系统在供水系统调度管理方面的研究很多^[1-4],而在流域排水系统管理方面的研究与应用较少^[5]。同时,在已有的智慧水务平台应用案例中,多存在流域要素多而监测体系覆盖不全、预测模型准确度低等问题,导致其难以有效指导流域的精细化管理工作。

为解决上述问题,对两河流域智慧水务平台的核心功能——智慧水务调度系统构建3大板块,分别为:

① 全流域尺度下的水务全要素实时监测监控系统

平台利用物联网感知、GIS、视频监控等智慧水务手段,将项目管辖范围内的降雨、水务设施、河道等数据接入平台,并在武汉市水务局的统筹下接入流域其他权属单位的已有监测监控数据,最终构建涵盖水务设施、雨量站、河道、易涝点、排污口、明渠补水口等流域全要素关键指标的实时监测监控系统,搭建完备的数据底板,为平台提供数据支撑。

② 基于经验模型和水文水动力模型共同驱动的预测预警模型

基于历史降雨事件数据,构建基于“降雨量-水务设施处理消纳量-暗涵液位变化速率”的经验预测模型;基于流域运行规律,构建“源-网-站-厂-河”的水文水动力水质模型。利用历史降雨事件经验数据不断率定模型参数,优化模拟结果。上述两个模型共同驱动,可弥补机理模型建立时间长、数据喂养周期长、初期准确率低的不足。

③ 基于经验模型与实时控制模型共同驱动的联控联调模型

根据流域水务设施运行逻辑制定调度规则,利用平台的实时监测数据,指导平台运行前期的调度决策,建立规则调度模型,在此期间积累调度经验数据。

基于调度经验数据库,结合降雨预报信息与平台的实时监测数据,匹配类似降雨事件,形成推荐调度预案;基于预测预警结果,结合降雨预报信息与平台的实时监测数据,利用内置的模型与优化算法,生成兼顾多个水目标的推荐调度预案。上述两个模型结合,可弥补平台运行前期机理调度模型参考价值低的不足。

3 智慧水务调度系统的模型构建及应用

3.1 预测预警模型构建与应用

3.1.1 预测预警模型构建

① 预测预警:经验模型构建

构建思路:梳理流域的调度逻辑,根据历史降雨事件的经验数据,建立降雨量/雨强、流域水务设施(污水处理厂及配套泵站、调蓄池及配套截污箱涵、闸门)运行状态与暗涵液位、河道液位等的变化关系,建立预测流域水安全风险的经验模型。

构建过程:

a. 根据历次降雨事件,总结降雨量、流域水务设施运行状态(污水处理厂小时进水流量、调蓄设施启闭状态及小时进水流量)及对应的两河暗涵液位上涨速率等数据,建立小时雨强、污水处理设施进水流量与河道暗涵液位上涨速率间的对应关系,形成预测预警板块的经验数据库。

b. 在未来降雨事件中,根据降雨预报的小时雨强,结合流域厂站设施运行状态,对应经验数据库中暗涵液位上涨速率,并根据预报降雨时长,依次对暗涵液位上涨量进行叠加,预测暗涵液位的上涨高度,具体算式如下:

$$H = \sum_{i=1}^n (v_i \cdot t_i) \quad (1)$$

式中: H 为暗涵液位上涨高度,m; n 为预测降雨事件中不同降雨雨强的数量,个; v_i 为流域第*i*个降雨雨强对应的暗涵液位上涨速率,m/h; t_i 为流域第*i*个降雨雨强对应的降雨时长,h。

在经验数据库中不存在与预报降雨雨强、水务设施运行状态匹配的历史数据时,可直接取用经验库中对应的暗涵液位上涨速率;若在经验数据库中无与上述指标匹配的历史数据,则根据预报降雨雨强在经验库中找到历史降雨雨强的范围,考虑水务设施运行状态,利用内插法或外推法计算出对应的暗涵液位上涨速率。

降雨事件结束后,将预测结果与实际结果进行比对,验证模型的适用性与准确度。

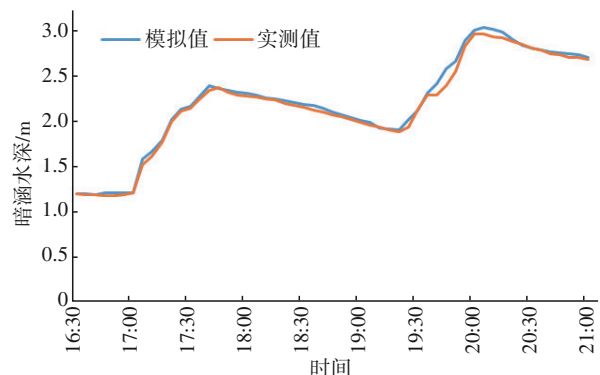
② 预测预警:机理模型(SWMM)构建

构建思路:系统基于两河流域内管网和两河河道数据,模拟流域“网-站-厂-河”等各类排水设施的运行规律,构建流域的一维管网水动力模型与一维河道水动力模型,建立预测流域水安全水环境风险的机理模型。

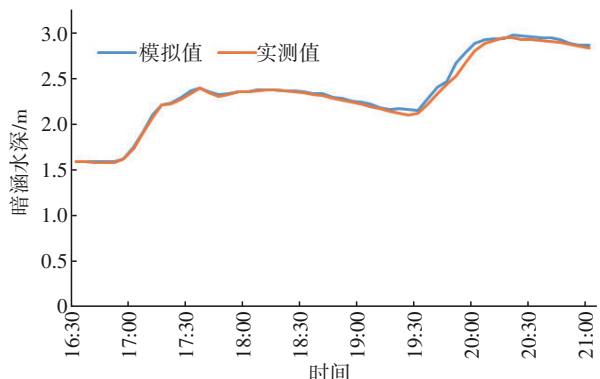
构建过程:基于流域范围内“网-站-厂-河”等设施运行逻辑,结合流域本底情况细分汇水范围,利用SWMM模型模拟流域汇水区地表径流的产汇流过程、管道和明渠的水力状态以及明渠中污染物扩散情况,从而建立流域的一维水文水动力水质模型,用来评估流域上游管网溢流情况和河道水质恢复效果。

模型参数率定与模型验证:以2022年7月19日降雨事件为例,介绍模型参数率定情况。

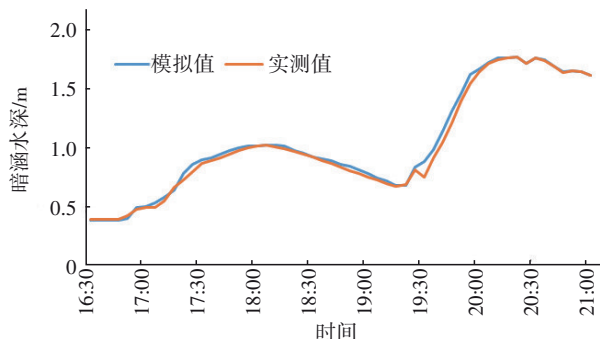
黄孝河双孔暗涵处、黄孝河三孔暗涵处、机场河青年路盒马鲜生暗涵处、机场河东渠低位箱涵接入处等4个代表监测点处的模型率定情况如图2所示。



a. 黄孝河双孔暗涵处



b. 黄孝河三孔暗涵处



c. 机场河青年路盒马鲜生暗涵处

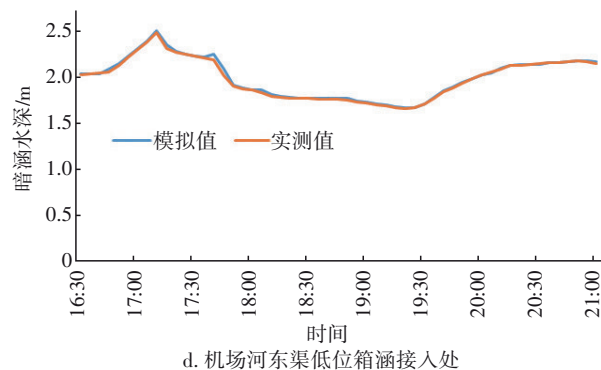


图 2 4 个代表监测点处的模型参数率定

Fig.2 Parameter calibration of the model at 4 representative monitoring points

模型参数率定误差统计见表 1。

表 1 模型参数率定误差统计

Tab.1 Statistics of model parameter error

| 项目 | 监测点位 | 纳什系数 |
|-------|---------------|------|
| 黄孝河流域 | 黄孝河路双孔暗涵处 | 0.61 |
| | 黄孝河路三孔暗涵处 | 0.71 |
| 机场河流域 | 机场河青年路盒马鲜生暗涵处 | 0.63 |
| | 机场河东渠低位箱涵接入处 | 0.65 |

由图 2 和表 1 可知,4 个代表监测点处模拟的暗涵水深变化趋势与实测变化趋势一致,对应的纳什效率系数均大于 0.6,因此,认为本项目 SWMM 预测预警模型能够较为准确地对两河暗涵液位变化进行预测。模型参数率定结果见表 2。

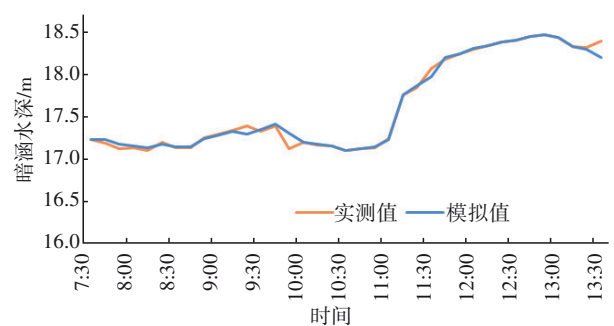
表 2 模型重要参数率定结果

Tab.2 Model parameter determination results

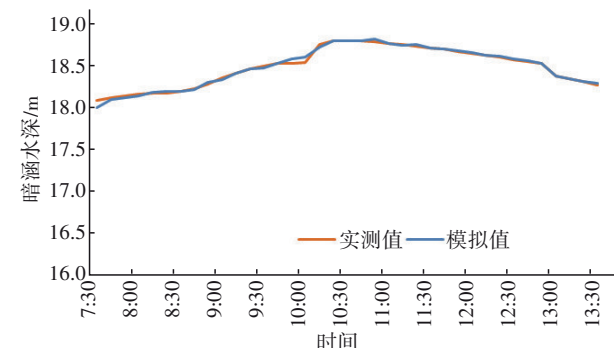
| 参数 | 平均值 |
|-----------------------------|-------|
| 平均坡度/% | 0.2 |
| 不透水面积比例/% | 61.68 |
| 不透水表面曼宁系数 | 0.05 |
| 透水表面曼宁系数 | 0.1 |
| 不透水表面洼蓄量/mm | 5.951 |
| 透水表面洼蓄量/mm | 8.179 |
| 最大入渗率/(mm·h ⁻¹) | 70 |
| 最小入渗率/(mm·h ⁻¹) | 3.5 |
| 衰减常数/h ⁻¹ | 3 |

为验证模型的稳定性,利用 2022 年 9 月 22 日降雨数据对模型进行验证,模拟结果见图 3。

由图 3 可知,随着降雨的持续,黄孝河暗涵末端、机场河西渠暗涵末端液位变化趋势,与实际观测暗涵液位变化趋势一致。因此,该模型具有一定的精度和稳定性。



a. 黄孝河箱涵末端



b. 机场河西渠暗涵末端

图 3 模型验证结果

Fig.3 Model validation results

3.1.2 预测预警模型应用实例

① 流域调度逻辑

两河上游为暗涵,下游为明渠,暗涵和明渠之间设有钢坝闸。两河上游暗涵之间设有西北湖联通闸,动态管控污水走向。晴天及小雨时,两河上游暗涵污水全部由污水处理厂消纳;中到大雨时,两河上游暗涵污水由污水处理厂、截污箱涵、CSO 调蓄处理设施共同消纳;暴雨及以上时,两河适时打开钢坝闸,明渠作为行洪排涝通道。

具体调度逻辑见图 4。

② 流域调度前期准备工作

平台收到 2023 年 4 月 2 日—3 日的暴雨降雨预报后,确定以保障水安全为主的调度目标,并利用 SWMM 模型和经验预测模型对暗涵溢流时间进行预测。

模型模拟边界条件:初始液位,黄孝河暗涵液位 15.50 m,机场河暗涵液位 17.00 m;降雨量,采用平台采购的天气预报数据。

其中,厂站设施运行情况分别为:

a. 采用 SWMM 模型模拟时,机场河 CSO 系统启用,黄孝河 CSO 系统未启用,前进四路闸保持关闭状态。

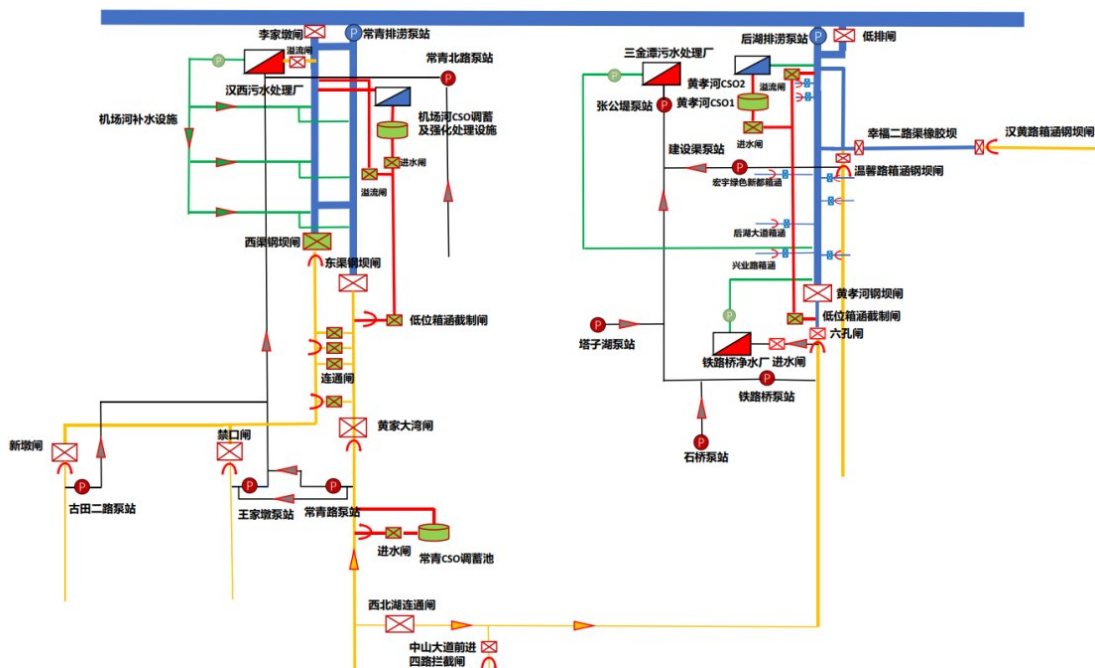


图 4 黄孝河机场河流域综合调度拓扑图

Fig.4 Scheduling topology diagram of Huangxiao River and Airport River basin

b. 在经验预测模型中,考虑降雨强度与水务设施运行状态,黄孝河、机场河分别匹配2023年2月11日—12日、3月16日—17日的降雨经验数据,具体见表3、4。

表 3 2023 年 2 月 11 日—12 日黄孝河流域降雨事件调度经验数据

Tab.3 Empirical data of rainfall dispatching in Huangxiao River basin in Feb. 11-12, 2023

| 运行边界条件 | | 降雨情况 | | | | 黄孝河暗涵液位变化情况 | | | 流域厂站设施运行情况 | | | |
|------------------------------|--|--------|--------|-------|-------|--------------------------|--------|--------|----------------------------|--|---------|---------|
| 初始状态:西北湖联通闸关闭 | | 降雨量/mm | 降雨时长/h | 降雨时间 | | 雨强/(mm·h ⁻¹) | 初始液位/m | 截止液位/m | 上涨速度/(cm·h ⁻¹) | 污水消纳量/(10 ⁴ m ³ ·h ⁻¹) | | |
| 黄孝河 CSO 系统尚未投用;降雨期间设施运行状态无变化 | | | | 开始时间 | 截止时间 | | | | | 铁路桥泵站 | 铁路桥净化水厂 | 黄孝河分散设施 |
| | | 2.9 | 0.67 | 19:45 | 20:25 | 4.33 | 17.83 | 17.87 | 13.33 | 1.1 | 0.34 | 0 |
| | | 4.2 | 0.167 | 21:05 | 21:25 | 25.15 | 17.97 | 18.14 | 33.33 | 1.1 | 0.34 | 0 |
| | | 1.1 | 0.33 | 23:40 | 00:00 | 3.33 | 18.30 | 18.34 | 12.12 | 1.1 | 0.34 | 0 |
| | | 2.3 | 0.5 | 00:10 | 00:40 | 4.60 | 18.45 | 18.53 | 16.00 | 1.1 | 0.34 | 0 |

表 4 2023 年 3 月 16 日—17 日机场河流域降雨事件调度经验数据

Tab.4 Empirical data of rainfall dispatching in Airport River basin in Mar. 16-17, 2023

| 运行边界条件 | | 降雨情况 | | | | 机场河暗涵液位变化情况 | | | 流域厂站设施运行情况 | | | | |
|---|--|--------|--------|-------|-------|--------------------------|--------|-----------|----------------------------|--|----------|-----------|---|
| 初始状态:西北湖联通闸关闭 | | 降雨量/mm | 降雨时长/h | 降雨时间 | | 雨强/(mm·h ⁻¹) | 初始液位/m | 对应时间点液位/m | 上涨速度/(cm·h ⁻¹) | 污水消纳量/(10 ⁴ m ³ ·h ⁻¹) | | | |
| | | | | 开始时间 | 截止时间 | | | | | 污水系统 | 常青CSO蓄水量 | 机场河CSO处理量 | |
| 设施启闭:3月16日23:20打开常青CSO,3月17日00:50开启机场河CSO,3月17日01:25常青CSO进满关闭 | | 13.2 | 7.5 | 14:40 | 22:10 | 1.76 | 17.16 | 17.65 | 6.53 | 1.38 | 0 | 0 | 0 |
| | | 5.2 | 1.3 | 22:10 | 23:12 | 4.00 | 17.82 | 17.98 | 12.31 | 1.38 | 0 | 0 | 0 |
| | | 12.2 | 1.5 | 23:20 | 00:50 | 8.13 | 17.98 | 18.13 | 10.00 | 0.46 | 5.3 | 0 | 0 |
| | | 4.7 | 0.58 | 00:50 | 01:25 | 8.10 | 18.13 | 18.34 | 36.21 | 0.46 | 5.3 | 2.57 | 0 |
| | | 5.4 | 2.58 | 01:25 | 04:00 | 2.09 | 18.34 | 18.54 | 7.75 | 0.46 | 0 | 2.57 | 0 |

c. 考虑降雨前期是厂站设施发挥调控作用的关键时期,结合降雨预报变动大等因素,本次主要

对开始降雨至暗涵接近溢流时的液位变化进行预测。两河流域预报降雨量与历史降雨量对比如图 5 所示。为便于比较,将历史实际降雨时间分布与预报降雨放于同一时间坐标轴上。图 5(a)中实际降雨起止时间为 2 月 11 日 19:00—2 月 12 日 12:00,为 1 h 均匀连续时间间隔;图 5(b)中实际降雨起止时间为 3 月 16 日 13:00—3 月 17 日 06:00,为 1 h 均匀连续时间间隔。根据图 5 对比结果,4 月 2 日—3 日预报降雨,黄孝河流域降雨雨型与 2 月 11 日—12 日历史降雨有较高相似度;机场河流域与 3 月 16 日—17 日历史降雨有较高相似度。同时考虑水务设施运行状态的一致性,本次经验模型采用上述两场降雨调度经验数据。

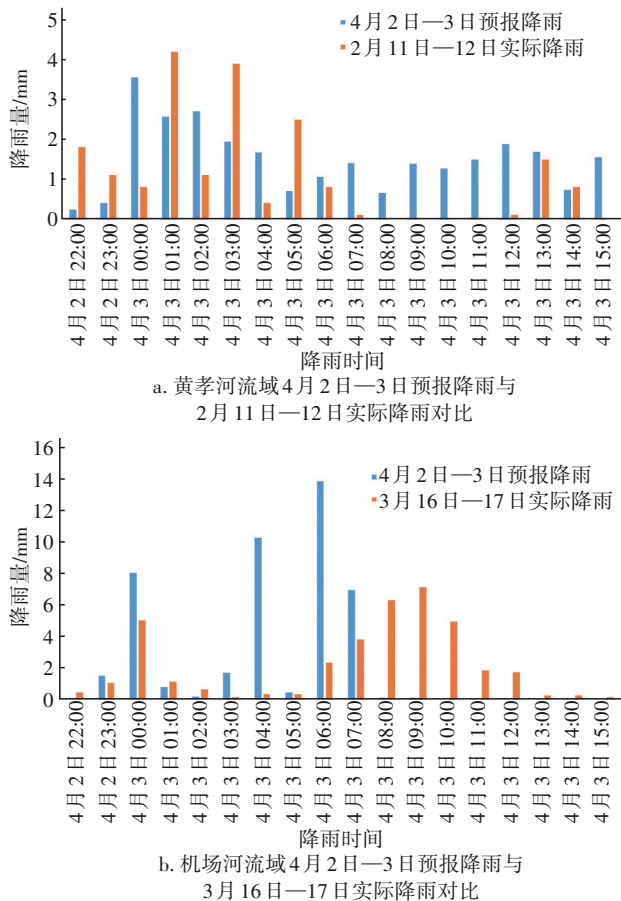


图 5 两河流域预报降雨量与历史降雨量对比

Fig.5 Comparison between forecast rainfall and historical rainfall in Huangxiao River and Airport River basin

③ 经验模型预测结果与分析

两河暗涵液位变化预测结果(经验模型)见图 6。由图 6 可知,黄孝河暗涵、机场河暗涵分别将于 2023 年 4 月 3 日 06:00、08:00 达到溢流液位。

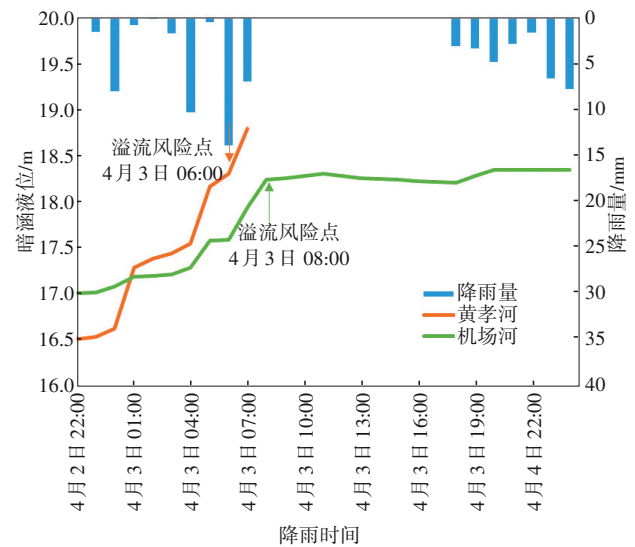


图 6 两河暗涵液位变化预测结果(经验模型)

Fig.6 Predict results of variation in liquid level of Huangxiao River and Airport River concealed culvert (empirical model)

④ SWMM 模型预测结果

两河暗涵液位变化预测结果(SWMM 模型)

见图 7。

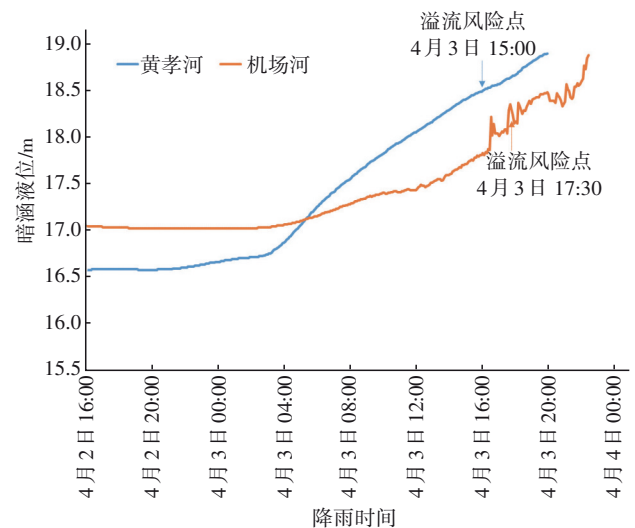


图 7 两河暗涵液位变化预测结果(SWMM 模型)

Fig.7 Predict results of variation in liquid level of Huangxiao River and Airport River concealed culvert (SWMM model)

由图 7 可知,黄孝河暗涵、机场河暗涵分别将于 2023 年 4 月 3 日 15:00、17:30 达到溢流液位。

⑤ 实际降雨与液位变化情况

实际降雨与两河暗涵液位变化见图 8。

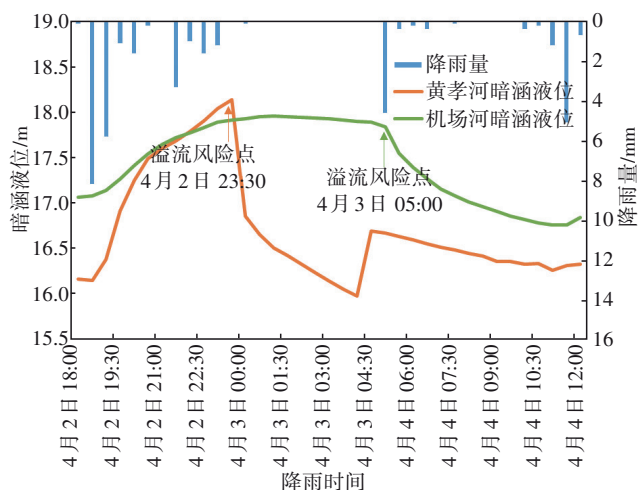


图8 实际降雨与两河暗涵液位变化

Fig.8 Actual results of rainfall and variation in liquid level of Huangxiao River and Airport River concealed culvert

⑥ 模型预测结果与实际结果对比与分析

预测结果与实际结果对比见表5。由表5可知,在扣除实际降雨延迟时间后,本次降雨利用经验模型和SWMM模型预测的黄孝河暗涵溢流时间分别比实际溢流时间晚0.5 h、晚9.5 h,机场河暗涵溢流时间分别比实际溢流时间早3 h、晚4 h。

参考《水文情报预报技术规范》(GB/T 22482—2008)中洪峰出现时间预报许可误差要求,本次预报许可误差为7.8 h。本次预测结果除SWMM模型预测的黄孝河暗涵溢流时间超出许可误差范围外,其他预测结果均在许可误差范围内。

根据本次预测模型应用情况可知,经验预测模型对黄孝河暗涵的溢流风险预测结果较为准确,对机场河暗涵的溢流风险预测结果与SWMM模型的准确度相差不大,但考虑到调度的即时性,认为经验预测模型预测结果更具有指导意义。

表5 预测结果与实际结果对比

Tab.5 Comparison between the predict results and the actual results

| 降雨开始时间 | | 流域名称 | 实测溢流时间 | 预测溢流时间 | | 误差统计 | | 备注 |
|---------------|---------------|------|------------|------------|------------|--------|--------|--------------------|
| 预报 | 实际 | | | 经验模型 | SWMM模型 | 经验模型 | SWMM模型 | |
| 4月2日 22:00 | 4月2日 18:00 | 黄孝河 | 4月2日 23:30 | 4月3日 06:00 | 4月3日 15:00 | 晚0.5 h | 晚9.5 h | 扣除实际降雨比预报降雨延迟时间6 h |
| | | 机场河 | 4月3日 05:00 | 4月3日 08:00 | 4月3日 17:30 | 早3 h | 晚4 h | |

3.2 动态调度模型构建与应用

平台的动态调度板块设置3种调度模型,主要包括基于实时控制方法的规则调度模型、机理调度模型和基于历史降雨调度数据的经验调度模型。其中,规则调度模型以武汉市水务局已批复的《黄孝河机场河流域水环境综合治理调度方案》为规则,基于系统的实际运行状态,利用已建立的模型计算控制条件参数,生成目标可达的调度方案;机

理调度模型基于实时的监测数据与降雨预报,内置简化模型,利用优化算法驱动简化模型,生成目标最优的调度方案;经验调度模型,基于实时的监测数据与降雨预报,从历史降雨调度数据库中筛选匹配类似降雨事件的调度经验数据,生成目标可达的调度方案。平台自动将3种调度方案进行对比(见图9),推荐最优调度方案,并经管理人员审核通过后,下发至各厂站。

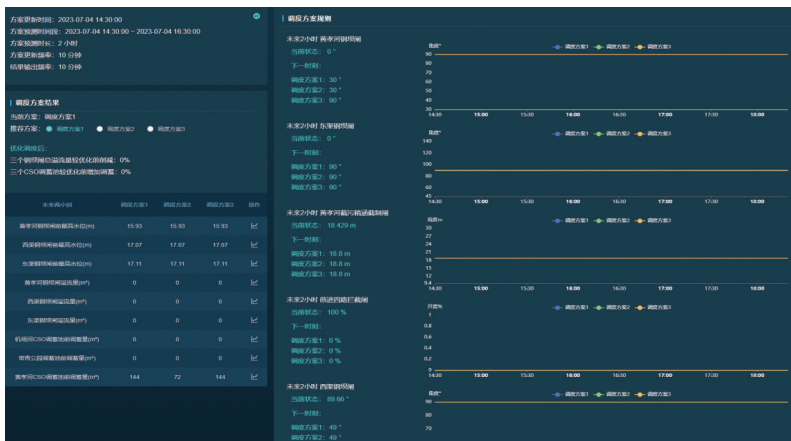


图9 智慧水务系统三种调度方案对比

Fig.9 Comparison of three dispatching schemes for smart water system

4 智慧水务平台整体应用效果

自2022年8月平台投运以来,两河流域共经历72场降雨,根据《降水量等级》(GB/T 28592—2012),其中暴雨6场、大雨4场、中雨13场、小雨42场。通过该智慧水务平台对流域内的污水处理厂、闸门、泵站、调蓄池等设施进行精细调度管理,最终实现了小到中雨时流域内仅发生1次短时溢流(污水厂检修期间),基本实现了污水全截留全处理,保证了流域水环境质量;在大到暴雨时,流域内未发生漫滩和严重渍水,兼顾了流域水环境安全。

5 结论

黄孝河机场河流域智慧水务平台,通过搭建覆盖流域全要素的智慧监测体系,提供完备的数据底板;通过机理模型与经验模型共同驱动,提升了平台预测准确性和调度预案的参考价值,从而打破了智慧水务平台的“智能不智慧”的瓶颈。未来,随着环保要求的提高,利用多种模型提升流域智慧水务系统的智慧化决策水平,将成为流域精细化管理领域的重要发展方向。

参考文献:

- [1] 张金松,李旭,张炜博,等. 智慧水务视角下水务数字化转型的挑战与实践[J]. 给水排水, 2021, 47(6): 1-8.
- ZHANG Jinsong, LI Xu, ZHANG Weibo, *et al.* Challenges and practice of water digital transformation from the view of smart water [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(6): 1-8(in Chinese).
- [2] 任海静,马一祎. 我国智慧水务的发展现状及前景

[J]. 建设科技, 2021(6): 60-63, 67.

REN Haijing, MA Yiyi. Development and prospect of smart water system in China [J]. Construction Science and Technology, 2021(6): 60-63, 67 (in Chinese).

- [3] 王冠,孔宇. 沙坪河河道流域智慧水务建设方案研究[J]. 给水排水, 2020, 46(3): 148-152.

WANG Guan, KONG Yu. Study on smart water affair construction scheme in Shaping river basin [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(3): 148-152 (in Chinese).

- [4] 申小艾,宁天竹,奚晓伟. 深圳市坪山河流域智慧水务建设方案研究[J]. 中国水利, 2018(5): 50-54.

SHEN Xiao'ai, NING Tianzhu, XI Xiaowei. Research on the construction scheme of smart water affairs in Pingshan River basin of Shenzhen City [J]. China Water Resources, 2018(5): 50-54(in Chinese).

- [5] 李振,李清泉,白春,等. 竹皮河流域智慧水务综合管控平台系统设计及应用[J]. 中国给水排水, 2023, 39(4): 118-126.

LI Zhen, LI Qingquan, BAI Chun, *et al.* Design and application of smart water integrated management and control platform in Zhupi River basin [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(4): 118-126 (in Chinese).

作者简介:张静(1989-),女,河南周口人,硕士,工程师,注册环保工程师,注册环境影响评价工程师,主要研究方向为流域水环境综合治理与智慧水务管理。

E-mail: zjhnu0102@163.com

收稿日期:2023-07-18

修回日期:2023-11-01

(编辑:衣春敏)

贯彻绿色发展理念

推进美丽中国建设