

城市排水与
雨洪管理

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2025. 15. 022

基于模型预测控制的河湖库群优化调度

白 珣^{1,2}, 陈 磊^{1,2}, 邵知宇^{1,2}, 马海元^{1,2}, 柴宏祥^{1,2}

(1. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 重庆大学 环境与生态学院, 重庆 400045)

摘 要: 实时优化调度在基于河网和湖库群的城市排水系统安全管理中具有至关重要的作用,但现有研究忽略了动态变化环境下河网和湖库群优化调度对整个系统河道泛洪风险的影响。为此,采用模型预测控制与雨洪管理模型(SWMM)耦合的策略,构建了一个旨在最小化河道总泛洪量的河网和湖库群实时优化调度方法。以重庆市某片区为例,对比了4种城市开发水平场景下的河道泛洪风险,涵盖5种不同重现期降雨场景。结果表明,上游建设湖库和优化调度均是减轻河道泛洪风险的重要手段。相比上游未建设湖库的场景1和场景2,上游建设湖库的场景3和场景4的河道总泛洪量显著降低,场景3相比场景1降低了73.48%~100%、场景4相比场景2降低了65.70%~100%。上游建设湖库后,优化调度可进一步降低河道总泛洪量,场景3相比场景1降低了18.64%~100%、场景4相比场景2降低了18.45%~100%。

关键词: 河湖库群; 优化调度; 模型预测控制; 雨洪管理模型(SWMM); 遗传算法
中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)15-0156-07

Optimal Scheduling of River and Lake Reservoir Groups Based on Model Predictive Control

BAI Yu^{1,2}, CHEN Lei^{1,2}, SHAO Zhi-yu^{1,2}, MA Hai-yuan^{1,2}, CHAI Hong-xiang^{1,2}

(1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of Education>, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Real-time optimal scheduling plays a critical role in the safety management of urban drainage system that integrates river networks with lake reservoir groups. However, previous studies have largely neglected the potential risk of river flooding caused by the coordinated operation of these components under dynamically changing environmental conditions. To address this issue, a strategy combining model predictive control with storm water management model (SWMM) was developed to establish a real-time optimal scheduling method for river networks and lake reservoir groups, with the objective of minimizing total flood discharge in the river. This study compared the risks of river flooding in a specific area in Chongqing under four different levels of urban development, across five rainfall scenarios with varying return periods. The construction of lake reservoirs upstream, along with the optimal scheduling strategy, were both effective measures for mitigating the risk of river flooding. Compared to

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3800500)

通信作者: 柴宏祥 E-mail: chaihx@126.com

scenario 1 and scenario 2, where no such infrastructure was developed upstream, the total flood discharge in rivers under scenario 3 and scenario 4—where lake reservoirs were constructed upstream—was significantly reduced. Specifically, the total flood discharge in scenario 3 decreased by 73.48% to 100% compared to scenario 1, and in scenario 4, it decreased by 65.70% to 100% compared to scenario 2. Following the construction of lake reservoirs upstream, optimal scheduling strategy could further reduce the total flood discharge in the river. Compared to scenario 1, scenario 3 demonstrated a reduction ranging from 18.64% to 100%. Similarly, compared to scenario 2, scenario 4 showed a reduction ranging from 18.45% to 100%.

Key words: river and lake reservoir groups; optimal scheduling; model predictive control; storm water management model (SWMM); genetic algorithm

在全球极端气候变化和城市化快速发展的背景下,城市内涝成为一个日益严峻的问题。为了有效应对和缓解这一问题,多种工程性与非工程性措施应际而生。特别在非工程性措施中,通过优化排水系统中的可控设施,实现排水设施的高效运行,从而提高整个排水系统的安全性、可靠性成为研究和实践的重点。

近年来,随着智能控制算法技术的不断发展,遗传算法、蛙跳算法、模型预测控制以及深度学习等优化控制技术,在排水系统的实时优化调度领域得到了广泛的研究和应用^[1-6]。其中,模型预测控制因其集实时优化控制和预测功能于一体的特性,已在排水系统实时优化调度中得到有效运用^[7-10]。作为城市排水系统重要组成部分的河网和湖库群,在承载和输送降雨径流等方面起着关键作用,对城市排水安全具有深远的影响。然而,现有研究主要集中于优化各湖库群的水位运行安全和最小化下泄流量等,往往忽略了从系统整体角度出发,考虑不同城市开发水平下,优化调度在降低整个系统河道泛洪风险方面的能力。

为此,利用模型预测控制算法与雨洪管理模型(SWMM)耦合,构建了一种基于河网和湖库群的实时优化调度方法,旨在降低整个排水系统的河道泛洪风险。该研究结合实际工程,比较分析了不同城市开发水平和不同降雨场景下,优化调度与现状调度在减少河道总泛洪量方面的效果,并从优化策略的角度分析其减灾成因,以验证所提方法的有效性和实用性,进而为城市排水安全保障提供新思路和方法论。

1 模型预测控制

模型预测控制是一种基于时间序列的迭代滚动优化控制策略,核心机制涵盖模型预测、滚动优化、反馈校正 3 个基本环节^[11]。如图 1 所示,本研究提出的模型预测控制滚动优化策略依据如下原理:设定预测时域为 K_p ,控制时域为 K_c ,在任意时刻 t ,系统当前状态被用于对 K_p 时段内的系统行为进行预测。随后,利用智能算法如遗传算法,对控制策略进行搜索与优化,以得到 K_c 时段内的最优控制方案。本研究中,在 t 时段仅实施所确定的首个控制方案。当步长至 $t=t+1$ 时,系统将重复上述过程,并结合当前模型实时状态进行反馈校正,以评估并减少模型预测偏差。通过这一连续迭代过程,直至模拟完成,从而确保控制策略的适应性与准确性。

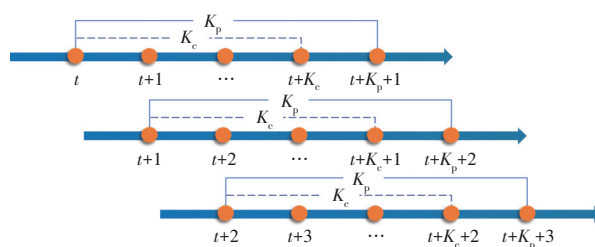


图 1 模型预测控制原理

Fig.1 Principle of model predictive control

2 研究案例及模型构建

2.1 研究区域概况

选取重庆市某规划片区作为研究区域,总面积为 35.94 km²。该区域整体地形呈现两边高、中间低,具有典型山地特征,地势起伏多变,最大相对高差近 100 m。区域内包含 3 个现状湖库 ST1、ST2、ST3 和一个拟规划建设湖库 ST4,具体拓扑结构见图 2。该区域各湖库周边雨水通过附近管网收集后,

分别引流至ST1、ST2和ST3湖库。随着ST4湖库的建设,上游汇水区的雨水经收集并最终引流至ST4湖库。此外,其余城市汇水区雨水经管网收集后直接排入附近河道,最终排出系统,汇入下游河道。

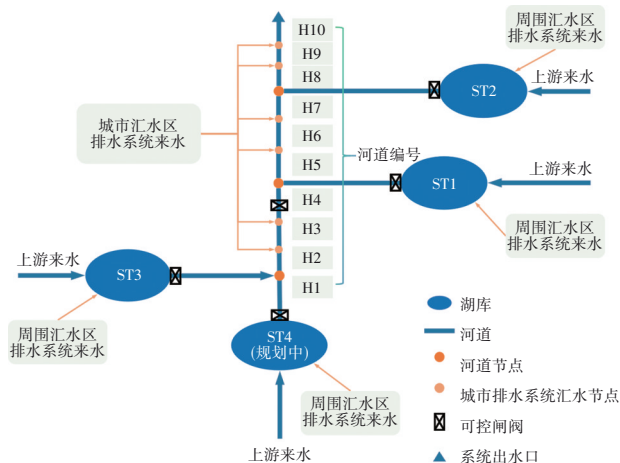


图2 研究区域概况

Fig.2 Overview of the case area

2.2 设计降雨

研究区域的降雨雨峰靠前,降雨历时短,短时易形成暴雨或强降雨,其暴雨强度修订公式如下:

$$q = \frac{1111(1 + 0.945 \lg P)}{(t + 9.713)^{0.561}} \quad (1)$$

式中: q 为降雨强度, $L/(s \cdot \text{hm}^2)$; P 为降雨重现期, a ; t 为降雨持续时间, min 。

设置雨峰系数为0.4,降雨持续时间为2 h。设计了10、20、50、100和200年一遇共5个重现期的降雨场景,降雨量分别为87.62、100.52、117.58、130.49和143.39 mm,具体降雨过程线见图3。

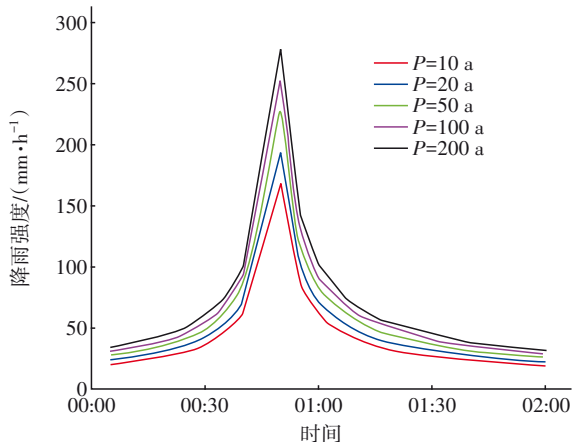


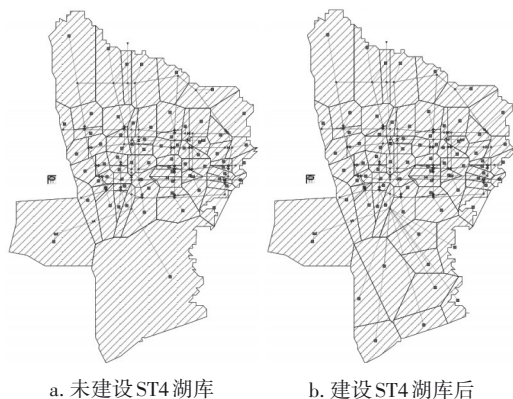
图3 设计降雨过程线

Fig.3 Design rainfall process lines

2.3 SWMM构建

本研究旨在实现河湖库群的优化调度,因此重点考虑流入各个湖库以及河道的主干雨水管网,使用管网简化技术对城市内部远离河湖库群的支流雨水管网进行科学合理的简化,以此在降低管网简化对模型精度影响的基础上,提高优化算法的运算效率。

本研究基于区域卫星影像资料,利用ArcGIS对研究区域的雨水管网进行简化处理,构建了主干雨水管网模型。通过泰森多边形方法,实现子汇水区的划分。该模型现状包括69个子汇水区、69个管网节点(包括调蓄湖库)、69条雨水管道、9个河道节点以及9条河道,并设有1个出水口。随着未来规划湖库ST4的建设,上游汇水区的雨水经周边管网收集后汇入ST4湖库,建设ST4湖库前后的SWMM模型如图4所示。



a. 未建设ST4湖库 b. 建设ST4湖库后

图4 建设ST4湖库前后的SWMM模型

Fig.4 SWMM model before and after construction of ST4 lake reservoir

SWMM模型中的水文模块采用Horton下渗模型进行模拟,水力演算采用动力波法^[12]。为了全面观察系统随时间的变化过程,本研究设置模拟时间为3 h。此外,考虑到道路的行泄功能,本研究将道路概化为明渠,并根据道路设计资料设置道路的形状和宽度等参数,构建一个包含双排水系统的SWMM模型。

在模型建立的基础上,本研究应用综合径流系数法,在管网设计重现期条件下,对模型进行评估与校验。模型计算得到的区域综合径流系数为0.596,符合《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)要求。

2.4 优化调度模型构建

2.4.1 模型预测控制与SWMM耦合

模型预测控制与SWMM耦合可分为3个步骤,具体流程见图5。

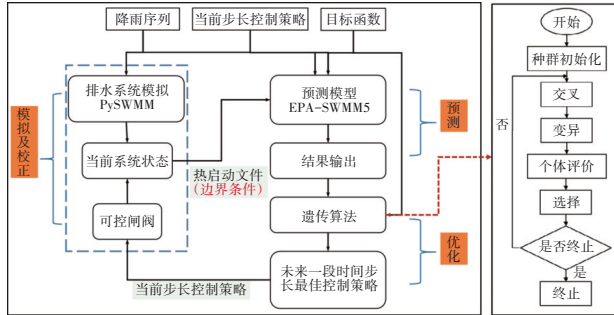


图5 模型预测控制与SWMM耦合流程

Fig.5 Coupling process of model predictive control and SWMM

① 初始化:首先利用PySWMM对模型初始状态进行计算,以确定当前系统的运行状态。此后,将得到的状态结果作为下一时间步长SWMM运行的初始边界条件,通过热启动文件将其导入SWMM中,以便对系统中可控设施在未来时段内的优化控制策略进行预测与评估。

② 优化控制策略的确定:利用遗传算法,基于系统当前的运行状态、模型输出结果以及目标函数,计算未来控制时域内各时间步长的最优控制策略。本研究中,在下一个时间步长仅使用上述优化得到的首个控制策略。

③ 迭代预测与优化:在随后的时间步长内,为了减少模型与实际系统之间的误差,根据SWMM当前实时的状态进行反馈校正和评估。通过这种方式,模型预测控制算法与SWMM的耦合过程将在每个时间步长中重复执行预测、优化和模拟校正步骤,直至整个模拟过程完成。

2.4.2 决策变量、目标函数和约束条件选取

在研究区域系统中,可控设施主要包括河道闸门及各湖库出口闸门。作为决策变量,这些闸门的开启程度以百分比形式表示,取值范围从0(完全关闭)到1(完全开启)变化,其中初始状态设定为完全开启,即为1。

优化调度模型的目标是最小化河道总泛洪量:

$$\text{Min} F_1: \left\{ F_1 = \sum_{i=1}^m V_{\text{flood}_i} \right\} \quad (2)$$

式中: m 为河道总节点数; V_{flood_i} 为第 i 个河道节点泛洪量。

约束条件为各闸门的最大、最小开启度。

2.4.3 优化算法

在本研究中,采用遗传算法以SWMM在每个时间步长上模拟得出的河道总泛洪量为目标函数对性能进行评价。遗传算法通过模拟自然选择和遗传学机制,例如交叉、变异和选择等^[7],对决策变量进行迭代优化,以寻找最佳控制策略。本研究选取预测时域与控制时域均为3 h,闸门改变时间步长为15 min。

2.5 研究场景

研究区域当前上游大多处于未开发状态,且该区域目前全段河流均未达到防洪标准,因此计划未来在区域上游规划建设一个湖库ST4。基于此背景,本研究构建了4种模拟场景,以反映不同程度的城市开发对区域水文响应的影响。场景1:现状本底(未规划上游ST4湖库+上游区域未开发);场景2:现状本底+上游开发(未规划上游ST4湖库+上游区域开发);场景3:现状本底+上游规划湖库(规划上游ST4湖库+上游区域未开发);场景4:现状本底+上游规划湖库+上游开发(规划上游ST4湖库+城市上游区域开发)。具体而言,本研究通过将上游各汇水区不透水百分比增加40%作为城市开发水平。4种场景分别在10、20、50、100、200年一遇的降雨事件下进行模拟。

3 分析与讨论

3.1 湖库承载能力评估

湖库的承载降雨径流能力对下游河道排水安全起着关键作用。研究区域内各湖库承载汇水面积、初始水位、限制水位、可调蓄库容与最大应对降雨量(不泄流)如表1所示。可以看出,ST1和ST2湖库的最大降雨承载量分别为142.44和135.37 mm。鉴于ST1和ST2湖库位于城市中心城区,且周边分布有包括国家重点实验室在内的多项关键基础设施,超载降雨事件可能对周边区域造成严重影响。因此在本研究中,当降雨量在两湖库的承载能力范围内时,设定ST1和ST2湖库出口闸门保持完全关闭状态;仅当降雨量超过两湖库承载能力,且湖库水位距离最大限制水位1 m时,才开始对ST1和ST2湖库出口闸门启闭进行优化调整。

表1 各湖库承载降雨场景分析

Tab.1 Analysis of rainfall scenarios in each lake reservoir

湖库	承载汇水面积/hm ²	初始水位/m	限制水位/m	可调蓄库容/10 ⁴ m ³	最大应对降雨量/mm
ST1	211.7	2.0	3.7	16.00	142.44
ST2	86.7	2.0	4.0	193.50	135.37
ST3	358.9	8.5	12.5	129.88	>203.32
ST4	802.1	2.0	3.0	162.50	173.36

相比之下,ST3和ST4湖库具备较高的承载能力,其降雨承载量分别可达203.32和173.26 mm。在本研究涵盖的所有降雨场景下,二者能够在不泄流的情况下安全承载周边汇水区的径流。基于此,本研究在所有模拟场景中始终保持ST3和ST4湖库出口闸门为关闭状态,不对其出口闸门进行优化调整。

3.2 未建设ST4湖库下优化调度结果分析

首先模拟了上游未建设ST4湖库条件下两种城市开发水平(场景1和场景2)在不同降雨重现期下的优化调度效果,并与现状排水系统没有任何控制措施进行效果对比,结果如图6所示。

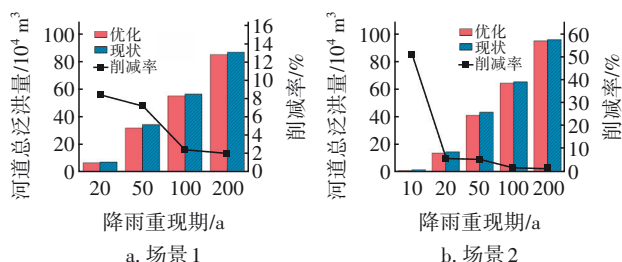


图6 场景1和场景2中优化调度与现状河道总泛洪量对比
Fig.6 Comparison of total river flooding volumes between optimal scheduling and current conditions in scenario 1 and scenario 2

从图6可以看出,在未建设ST4湖库时,场景1在20年一遇降雨事件下开始出现河道泛洪,且随着降雨重现期的增加,河道总泛洪量显著升高,平均增幅达85.00%。在上游进行开发后,场景2在10年一遇降雨事件下就开始出现河道泛洪,河道总泛洪量平均增幅高达108.20%。总体而言,相比场景1,场景2的河道总泛洪量增加9.58%~100%,进一步验证了上游开发会显著加剧河道泛洪风险。

与现状无控制措施相比,优化调度对场景1和场景2的改善效果均较小,河道总泛洪量削减率分别为1.96%~8.42%和0.94%~51.61%。特别是,随着降雨重现期的增加,优化效果会显著降低,这一现象在场景2中更为明显。这与场景1和场景2中

河道已基本处于满载状态有关,从而留给优化调蓄的空间非常有限,尤其是场景2上游处于开发状态,可供调蓄的空间进一步减少。鉴于此,本研究将进一步集中讨论分析建设ST4湖库后的优化调度效果,以评估上游建设湖库对改善河道泛洪风险的潜在贡献。

3.3 建设ST4湖库下优化调度结果分析

相比现状排水系统没有任何控制措施,上游建设ST4湖库后两种城市开发水平(场景3和场景4)在不同降雨重现期下的优化调度效果如图7所示。

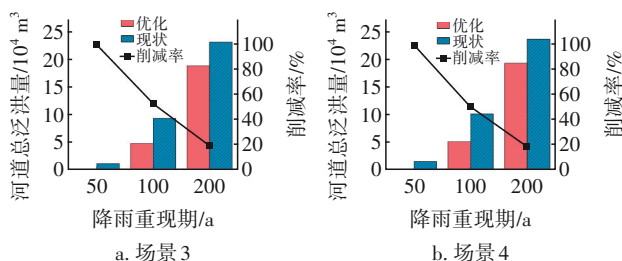


图7 场景3和场景4中优化调度与现状河道总泛洪量对比
Fig.7 Comparison of total river flooding volumes between optimal scheduling and current conditions in scenario 3 and scenario 4

从图7可以看出,在上游建设ST4湖库后,场景3和场景4中河道泛洪现象在50年一遇降雨事件下开始出现,而且相较于场景1和场景2,河道总泛洪量显著降低,场景3相比场景1降低73.48%~100%、场景4相比场景2降低65.70%~100%。而场景4相比场景3的河道总泛洪量仅增加2.96%~28.73%。

随着ST4湖库的建设实施,优化调度效果亦得到显著提升,对比两组场景在不同降雨重现期下的优化调度效果,可以看出两者的改善效果基本一致。经优化调度,场景3和场景4的河道总泛洪量削减率分别为18.64%~100%和18.45%~100%,特别是在50年一遇降雨事件中,通过优化调度可完全消除河道泛洪现象。这一效果的出现与上游建设ST4湖库有关,上游汇水区的降雨径流被有效收集至ST4湖库,从而减轻了下游河道的泛洪风险。以

上结果证实了上游建设ST4湖库对于提高区域防洪能力和减轻河道泛洪风险的积极作用。

3.4 湖库与河道水深优化对比分析

在200年一遇降雨事件中,河道闸门、ST1和ST2的出水口闸门均处于优化控制中;而在50年一遇和100年一遇降雨事件中,系统仅有河道闸门处于优化控制中。为此,进一步对比分析了在上游建设ST4湖库后200年一遇降雨事件下ST1和ST2湖库的水深变化情况(见图8),以及50、100和200年一遇降雨事件下河道闸门上游H3河道水深的变化情况(见图9),以此来探究优化调度减轻河道泛洪量的原因。

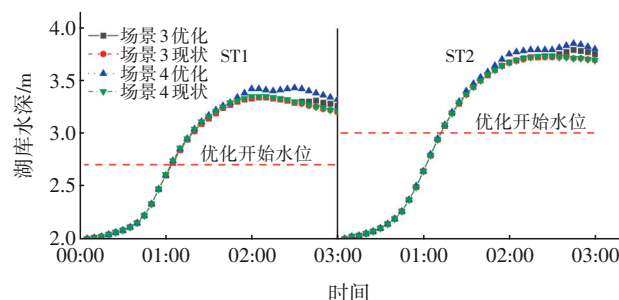


图8 200年一遇降雨条件下ST1与ST2湖库的水深变化

Fig.8 Change in water depth of ST1 and ST2 lake reservoirs under 200-year return period rainfall

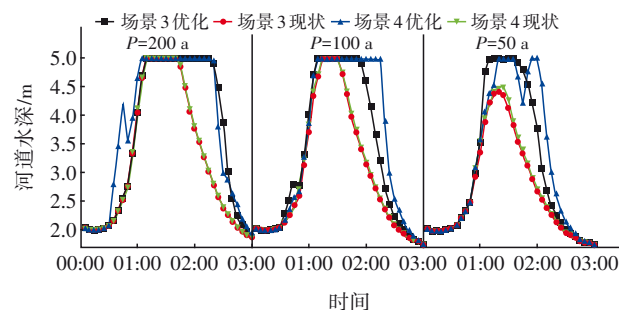


图9 H3河道的水深变化

Fig.9 Change in water depth of H3 river

从图8可以看出,优化调度可有效利用两个湖库的承载能力。在两种场景中,ST1的水位在01:05时到达优化开始水位,而ST2的水位则在01:15时到达。因此,水位的主要变化发生在这两个时刻之后。在200年一遇降雨事件下,与现状无任何控制措施情况相比,场景3中ST1、ST2的平均水位分别可提升4、3 cm,最大水深分别可提升11、12 cm,分别平均削减约3 200、2 400 m³向下游输送的水量;在场景4中,ST1、ST2的平均水位分别可提升8、6 cm,最大水深分别可提升20、17 cm,分别平均削减约

8 900、9 700 m³向下游输送的水量。

从图9可以看出,与现状无任何控制措施情况相比,场景3和场景4中H3河道的平均水深分别可增长0.34~0.42 m和0.45~0.52 m,H3河道满载甚至超载时间分别可延长30~35 min和20~40 min。这表明,通过优化控制河道闸门,可以更大程度地利用上游河道的承载能力,从而减少向中下游输送的水量。由于研究区域的关键基础设施主要集中在中下游,通过“牺牲”上游的一部分承载能力,可以有效减少向中下游输送的流量,从而减轻中下游河道的泛洪风险。

4 结论

① 在上游未建设ST4湖库的场景1和场景2中,河道抵抗泛洪的能力较弱,分别在经历10年和20年一遇降雨事件时即出现泛洪,而且场景2比场景1的河道总泛洪量增加了9.58%~100%,表明上游的开发会加剧河道泛洪风险;随着降雨重现期的增加,河道总泛洪量显著增长,平均增幅分别达到85.00%和108.20%;尽管通过优化调度可以在一定程度上减少河道总泛洪量,但由于上游河道已接近满载状态,优化效果有限,仅为1.96%~8.42%和0.94%~51.61%。

② 在上游建设ST4湖库的场景3和场景4中,直到50年一遇降雨事件才开始出现河道泛洪,河道总泛洪量相比场景1和场景2分别可减少73.48%~100%和65.70%~100%。在建设ST4湖库后,优化调度效果显著提升,场景3和场景4的河道总泛洪量分别可减少18.64%~100%和18.45%~100%。特别是在50年一遇降雨场景下,通过优化调度可以完全消除两个场景的河道泛洪,验证了优化调度的有效性。

③ 对优化可控设施相连湖库及上游河道水深变化的分析表明,优化调度能够更有效地利用湖库和上游河道的承载能力,减少向下游的水量输送,从而有效降低河道泛洪风险。

综上,对于研究区域而言,建设上游ST4湖库与实施优化调度对于减少河道泛洪量均具有积极作用。为提高优化算法的运算效率,本研究对水力模型雨水管网部分进行了合理简化,且未与实时降雨预测数据耦合,未来的研究将探索气象降雨预测数据与精细模型结合,在保证运算效率的同时实现更

加精准化的实时优化调度。

参考文献:

- [1] TALEBI A, DOLATSHAHI M, KERACHIAN R. A framework for real-time operation of urban detention reservoirs: application of the cellular automata and rainfall nowcasting [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 350: 119638.
- [2] 黄荣, 蒋龙, 王浩正, 等. 岳阳市某流域排水系统联合调度解决方案研究 [J]. *给水排水*, 2022, 48(6): 137-143.
HUANG Rong, JIANG Long, WANG Haozheng, *et al.* Joint dispatching solution for drainage system of a drainage basin in Yueyang City [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 48(6): 137-143 (in Chinese).
- [3] RUANGPAN L, MAHGOUB M, ABEBE Y A, *et al.* Real time control of nature-based solutions: towards smart solutions and digital twins in Rangsit Area, Thailand [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 344: 118389.
- [4] BOWES B D, TAVAKOLI A, WANG C, *et al.* Flood mitigation in coastal urban catchments using real-time stormwater infrastructure control and reinforcement learning [J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2021, 23(3): 529-547.
- [5] 杨丽娟, 薛联青, 伍佑伦, 等. 基于多目标混合蛙跳差分进化算法的皂市水库优化调度 [J]. *中国农村水利水电*, 2023(11): 27-34, 44.
YANG Lijuan, XUE Lianqing, WU Youlun, *et al.* Optimal operation of Zaoshi Reservoir based on multi-objective shuffled frog leaping differential evolution algorithm [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2023(11): 27-34, 44 (in Chinese).
- [6] 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 Haozheng, LIU Zhixiao, LIU Longzhi, *et al.* Real time control solutions for urban drainage system under watershed treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(14): 66-75 (in Chinese).
- [7] ABOU RJEILY Y, ABBAS O, SADEK M, *et al.* Model predictive control for optimising the operation of urban drainage systems [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 566: 558-565.
- [8] SVENSEN J L, SUN C, CEMBRANO G, *et al.* Chance-constrained stochastic MPC of Astlingen urban drainage benchmark network [J]. *Control Engineering Practice*, 2021, 115: 104900.
- [9] LUO X, LIU P, XIA Q, *et al.* Machine learning-based surrogate model assisting stochastic model predictive control of urban drainage systems [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 346: 118974.
- [10] JEAN M È, MORIN C, DUCHESNE S, *et al.* Real-time model predictive and rule-based control with green infrastructures to reduce combined sewer overflows [J]. *Water Research*, 2022, 221: 118753.
- [11] LUND N S V, FALK A K V, BORUP M, *et al.* Model predictive control of urban drainage systems: a review and perspective towards smart real-time water management [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2018, 48(3): 279-339.
- [12] 汤青峰, 彭立云, 蒋永红, 等. 基于SWMM的城市河网情景调控与分析研究 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(5): 15-26.
TANG Qingfeng, PENG Liyun, JIANG Yonghong, *et al.* SWMM-based scenario regulation and analysis of urban river networks [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(5): 15-26 (in Chinese).

作者简介:白珂(1999-),女,陕西榆林人,硕士研究生,主要研究方向为城市内涝防治。

E-mail:1368938826@qq.com

收稿日期:2024-02-23

修回日期:2024-04-01

(编辑:刘贵春)