

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.05.012

基于闸群联合调控的荆州沙北片河网水动力重构研究

林炜杰^{1,2,3}, 徐 津^{1,2,3}, 陈 瀚^{1,2,3}, 朱 海^{1,2,3}, 彭习渊⁴, 杨 卫⁴,
唐洪武^{3,5}, 王玲玲^{1,2,3}

(1. 河海大学流域水循环与水安全全国重点实验室; 2. 河海大学水利水电学院;
3. 河海大学水利部水循环与水动力系统重点实验室; 4. 湖北省水利水电规划勘测设计院;
5. 华南理工大学海洋科学与工程学院)

摘要: 为对引水量受限的荆州长湖水系沙北片河网进行水动力重构,提出了一种基于水闸调控响应特征与分阶段单目标优化的闸群联合调控方法,建立了一维水动力模型进行单闸调控敏感性分析,识别了河网调控中的关键水闸及其有效开度区间,并据此构建闸群联合调控优化模型,系统分析并确定了最优调控方案。结果表明:各水闸对河网不同渠道水动力影响存在差异,且单闸调控难以兼顾主支渠水动力协同改善;在日均引水流量 $5\text{ m}^3/\text{s}$ 的条件下,得到的最优调控方案能使滞缓区流速提升 25% 以上,河网平均流速提升 14.72%~22.44%,且干渠在调控过程中流速保持在 0.1 m/s 以上,有效重构了研究区域的水动力,并保障了河网的引排功能。

关键词: 平原河网;水动力重构;闸群联合调控;敏感性分析;荆州沙北片河网

中图分类号:TV143

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2026)05-0106-08

Research on hydrodynamic reconstruction of Shabei River Network in Jingzhou based on joint gate group operation

Lin Weijie^{1,2,3}, Xu Jin^{1,2,3}, Chen Han^{1,2,3}, Zhu Hai^{1,2,3}, Peng Xiyuan⁴, Yang Wei⁴, Tang Hongwu^{3,5}, Wang Lingling^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, Hohai University;

2. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University;

3. Key Laboratory of Hydrologic-Cycle and Hydrodynamic-System of Ministry of Water Resources, Hohai University;

4. Hubei Institute of Water Resources Survey and Design;

5. School of Marine Science and Engineering, South China University of Technology)

Abstract: To reconstruct the hydrodynamics of the Shabei River Network in the Changhu water system of Jingzhou under limited water diversion, a joint gate group operation method based on gate regulation response characteristics and phased single-objective optimization was proposed. A one-dimensional hydrodynamic model was established to conduct sensitivity analysis of single-gate regulation, and key gates and their effective opening ranges were identified. Based on this, a joint gate group operation optimization model was constructed to systematically analyze and determine the optimal operation scheme. The results indicate that different gates have varying impacts on the hydrodynamics of different channels; single-gate regulation can hardly achieve coordinated improvement of hydrodynamics in both main and branch canals. Under the condition of an average daily water diversion flow of $5\text{ m}^3/\text{s}$, the optimal operation scheme increased the flow velocity in stagnant flow zones by over 25%, increased the average flow velocity of the river network by 14.72%-22.44%, and maintained the flow velocity above 0.1 m/s in main canals during the regulation process, effectively reconstructing the hydrodynamics of the study area and ensuring the water diversion and drainage functions of the river network.

Key words: plain river network; hydrodynamic reconstruction; joint gate group operation; sensitivity analysis; Shabei River Network of Jingzhou

平原河网地区地势低平、河道比降小,加之频繁的人类活动(如围垦和填埋)影响,普遍存在水动力微弱、流速空间分布不均等问题^[1-2]。水动力不足直接降低了水体的物质输运效率及其自净能力^[3-5],导致污染物滞留、水质恶化,严重制约了平原地区水生态安全与社会经济可持续发展。因此,有效改善平原河网水

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3202600);国家自然科学基金项目(52479062);国家自然科学基金青年科学基金项目(52309086);江苏省水利科技项目(2024009,2023013)

作者简介: 林炜杰(2000—),男,硕士研究生,主要从事水力学数值模拟研究。E-mail:182778387@qq.com

通信作者: 王玲玲(1966—),女,教授,博士,主要从事水力学数值模拟研究。E-mail:wanglingling@hhu.edu.cn

动力条件已成为提升水质与水资源利用效率的关键。目前,平原河网主要通过水闸、泵站等水利工程来改善水动力条件^[6-7],但单一工程的经验调控存在局限性,往往只能改善局部水动力条件,难以兼顾干支流、大尺度区域的整体协调^[8-9]。系统整合闸站工程体系,构建使水动力局部与整体格局更为协调的联合调度策略,是近年来提出的平原河网水动力重构思路中的关键途径^[10]。

闸群联合调控是实现系统化水动力重构的有效手段,其核心在于通过多工程协同调度,增强平原河网干支渠的联动性与水体交换能力^[11-12]。闫毓等^[13]针对上海滬南片水系提出了包括增加泵引流量的多要素协同调控方法,使河网中多数断面流速得到提升;何健等^[14]分析了扬州市河网不同水闸运行方案下的河道水动力改善效果,发现调整水流路线和增加泵引流量可以不同程度改善河网水动力条件;徐存东等^[15]设计了 7 种太湖流域南浔区河网闸泵调控方案并采用水动力模型进行了模拟,发现外河开闸引水与增加泵引流量相结合的调控方案能有效提高河网水动力。上述研究表明,通过增加引水流量能在一定程度上改善河网水动力条件,但在引水流量受限的平原河网中,局部水动力的提升常以其他区域水动力削弱为代价,难以实现局部与整体协同优化。因此,如何在特定引水条件下,充分挖掘现有闸群的调控潜力,构建高效协同的闸群联合调度模型,获得水动力改善效果最优的调控方案,实现平原河网水动力局部与整体协同提升,是亟待深入研究的问题。

为重构引水流量受限的江汉平原沙北片河网水动力,本文提出了基于水闸调控响应特征与分阶段单目标优化的闸群联合调控方法,该方法通过建立一维水动力模型开展单闸调控敏感性分析和识别关键调控水闸及其有效调控区间,并进一步构建了闸群联合优化调控模型,系统探索了闸群最优调控方案,可为类似区域水网管理与调控提供参考。

1 研究区概况

沙北片河网位于湖北省荆州市中心城区,属长湖水系,区域总面积为 38.54 km²,水系及工程特征如图 1 与表 1 所示。该河网西北通过荆襄河与长湖相连,枯水期主要依赖长湖供水,水体从横大路闸(D 闸)引入,经内部河网汇入豉湖渠,形成“西引南排”的水流格局。然而,长湖枯水期可供水量仅为 5 m³/s,加之区域缺少统一的水闸调度规则,导致枯水期干渠与靠近闸口的渠段水动力相对较强,而部分远离闸口的渠段断面流速不足 0.03 m/s,水体滞留严重,水质多为Ⅳ类至劣Ⅴ类,存在显著的生态环境风险。为改善当前状况,亟须在 5 m³/s 的引水条件下充分挖掘现有水闸的调控潜力,构建闸群联合调控优化模型,实现河网水动力在局

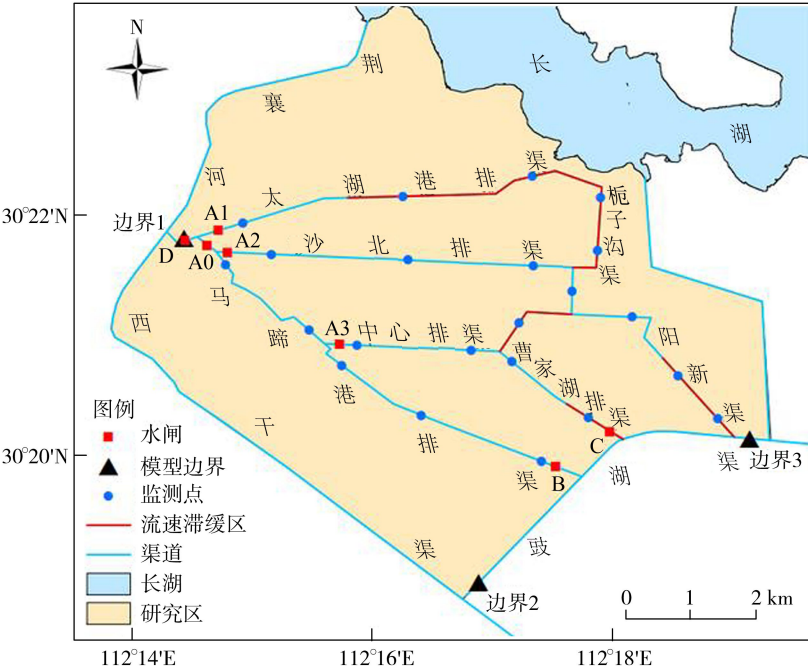


图 1 研究区水系及工程特征示意图

Fig. 1 Schematic diagram of river system and hydraulic structures in study area

表 1 主要水闸信息
Table 1 Information of key gates

编号	名称	闸门数量	闸门宽度/m	闸门高度/m	闸底板高程(黄海高程)/m
A0	马蹄港排渠闸 1	2	3.5	2.5	25.94
A1	太湖港排渠闸	1	3.5	2.5	27.00
A2	沙北排渠闸	2	3.5	2.5	25.92
A3	中心排渠闸	2	5.0	2.5	25.17
B	马蹄港排渠闸 2	1	2.4	2.5	25.01
C	曹家湖闸	1	2.3	2.8	25.00
D	横大路闸	1	3.0	2.5	27.20

部与整体层面的协调改善。

2 模型建立与率定

2.1 水动力模型

对河网水动力过程进行模拟,并在此基础上分析工程调控对水动力格局的影响,是实现河网水动力格局重构的前提。通过构建一维水动力模型,可以量化水闸调控对河网水位、流速分布的影响,为后续优化模型提供可靠的数据基础。

2.1.1 模型原理

本文采用一维水动力模型对沙北片河网进行水动力模拟分析。模型基于一维非恒定流圣维南方程组,包括连续方程与动量方程,通过离散求解得到河道流量、水位等水动力要素的时空变化过程。

2.1.2 模型建立

建模范围覆盖沙北片区主要排水渠道,包括马蹄港排渠、太湖港排渠、豇湖渠等 8 条河道,总长度约 34 km。区域内布设 7 座主要控制水闸,承担引水、节制及排水功能,构成完整的水力调控体系。在边界条件设置方面,模型以太湖港排渠上游横大路闸(边界 1)和西干渠与豇湖渠交汇处(边界 2)为入流边界,以豇湖渠下游、距边界 2 约 5.3 km 处(边界 3)为出流边界,具体如图 1 所示。为保证模型计算精度与运算效率,模拟时间步长取为 30 s,初始水深根据实际运行情况设为 1 m。

2.1.3 参数率定

河道糙率为水动力模型的关键参数。为准确模拟沙北片河网的水动力特性,需对各河道的糙率进行率定^[16],以确保模拟水位、流量过程的精度。

由于沙北片河网内部没有水位测站,缺乏历史水位监测资料。为了率定河网模型,于 2024 年 5 月 6—15 日开展了沙北片河网调水试验,试验期间通过横大路闸从长湖向沙北片河网引水,日均引水流量稳定控制在 3.5 m³/s,设立了监测点(图 1 中蓝色点)测量水动力指标,涵盖了主要渠道的流量过程和典型断面的水位过程,具有良好的代表性与完整性,可作为模型率定的依据。

在率定过程中,模型入流边界采用实测流量过程,出流边界采用实测水位过程。通过多轮糙率率定验证,最终确定太湖港排渠、梔子沟渠、沙北排渠、中心排渠、马蹄港排渠、曹家湖排渠、阳新渠和豇湖渠的糙率分别为 0.035、0.035、0.036、0.025、0.023、0.022、0.036、0.028。

4 个代表性断面的水位模拟与实测过程整体吻合良好(图 2),各断面水位相对误差均控制在±3%以内,纳什效率系数在 0.929~0.973 范围内,表明所构建的模型具有良好的精度与适用性,能够有效支撑后续的联合调控模拟分析。

2.2 优化模型

优化模型通过设定目标函数、决策变量与约束条件,将水动力模拟与优化算法相结合,实现调控策略的定量寻优,为河网水动力重构提供方法支撑。

2.2.1 目标函数

已有研究揭示,水动力是控制水体复氧与污染物输移、扩散、降解过程的关键因素,提升流速能促进污染物的稀释与降解^[10]。基于这一原理,本文优化模型设置两个目标函数,分别用于衡量河网流速滞缓区改善效果与水动力整体提升幅度。

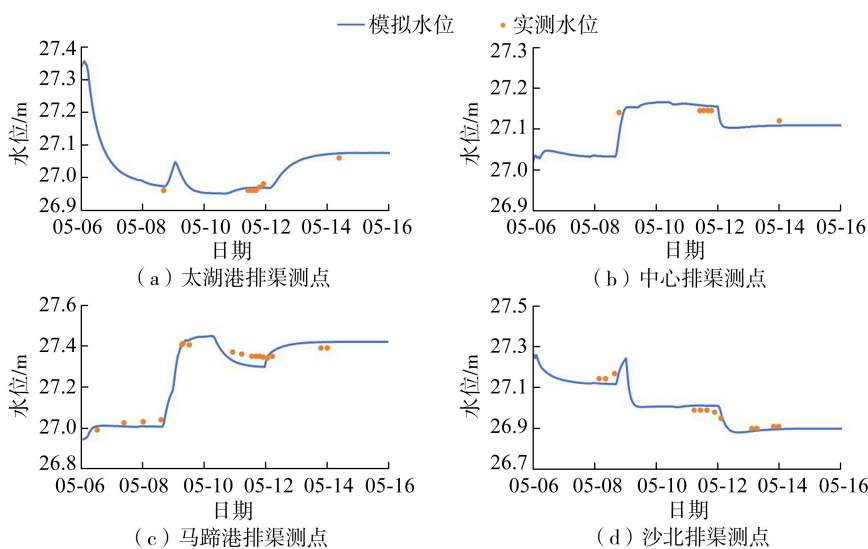


图 2 模型水位验证结果
Fig. 2 Model validation results for water levels

a. 流速滞缓区断面达标率(以下简称“断面达标率”)。当流速低于 0.03 m/s 时,水流对浮游植物生物量的抑制效果较差,与静水环境无显著差异,水体自净能力弱^[17],因此将断面流速持续低于 0.03 m/s 的河段定义为滞缓区。该指标含义为:在流速滞缓区内若干断面中,流速提升幅度达到预设阈值的断面数量所占比例。该指标用于衡量调控方案在空间分布上的均衡性。将断面流速较基础工况提升 25% 设定为“有效提升”的判断标准。断面达标率目标函数 F_1 如下:

$$\min F_1 = 1 - R = \left(1 - \frac{N_{25\%}}{N}\right) \times 100\% \tag{1}$$

式中: R 为断面达标率; $N_{25\%}$ 为调控后相对于基础工况流速提升幅度达到或超过 25% 的断面数量; N 为滞缓区内断面总数。

b. 河网平均流速整体提升率(以下简称“平均流速提升率”)。在实现空间均衡优化的基础上,调控方案的全局水动力提升幅度仍然是衡量水动力重构综合效益的重要优化指标,体现了方案在全域范围内的优化效果^[11]。该指标含义为:调控后河网全域平均流速相对于基础工况的提升百分比。该指标有助于在确保滞缓区局部流速提升的同时,进一步评价调控方案对整个河网水动力条件的改善程度,并作为调控方案优选的指标之一。平均流速提升率目标函数 F_2 如下:

$$\min F_2 = 1 - \eta = \left(1 - \frac{v_1 - v_0}{v_0}\right) \times 100\% \tag{2}$$

式中: η 为平均流速提升率; v_1 为调控后河网平均流速, m/s; v_0 为基础工况的河网平均流速, m/s。

本文研究的首要目标是流速滞缓区的断面达标,因此在调控方案优选过程中采用分阶段单目标优化策略,即第一阶段确保断面达标率符合要求,优选出达标率高的调控方案;第二阶段在第一阶段基础上进一步优选平均流速提升率表现最优的方案,确保在优化局部水动力的同时,兼顾整体水动力有所提升。

2.2.2 决策变量与约束条件

优化模型以水闸开度作为决策变量,结合上述目标函数,建立如下优化模型:

$$\begin{aligned} & \begin{cases} \min F_1 = 1 - R(e_1, e_2, \dots, e_n) \\ \min F_2 = 1 - \eta(e_1, e_2, \dots, e_n) \\ q_{引} = Q \\ \text{s. t. } e_{i, LB} \leq e_i \leq e_{i, UB} \\ \bar{v}_{干} \geq 0.1 \text{ m/s} \end{cases} \end{aligned} \tag{3}$$

式中: $e_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为第 i 个水闸的开度, m; $e_{i, LB}$ 、 $e_{i, UB}$ 分别为第 i 个水闸开度调节的下界与上界, m; $R(e_1, e_2, \dots, e_n)$ 、 $\eta(e_1, e_2, \dots, e_n)$ 分别为 R 和 η 关于开度的函数; $\bar{v}_{干}$ 为干渠的平均流速, m/s; $q_{引}$ 为研究区引

水流量, m^3/s ; Q 为特定的引水流量, m^3/s 。Tang 等^[10]研究表明,维持干渠流速大于 0.1 m/s 是保障水体复氧能力与河道自净潜力的基础条件,故 $\bar{v}_{\text{干}}$ 不应低于 0.1 m/s ,以确保区域引排通畅。

2.2.3 模型求解优化流程

本文采用改进型粒子群优化(IPSO)算法对闸群联合调控模型进行求解。IPSO 算法在传统粒子群基础上引入了收缩因子与自适应惯性权重,兼顾全局搜索与局部收敛。求解过程中,以不同水闸开度作为优化变量,每一组闸门开度组合视为一个粒子,依据目标函数结果不断迭代更新个体与群体最优解,最终输出满足条件的调控方案。IPSO 算法在特定引水流量下,能够高效获得闸群联合调控的最优方案。基于 IPSO 算法的优化模型求解流程如图 3 所示。

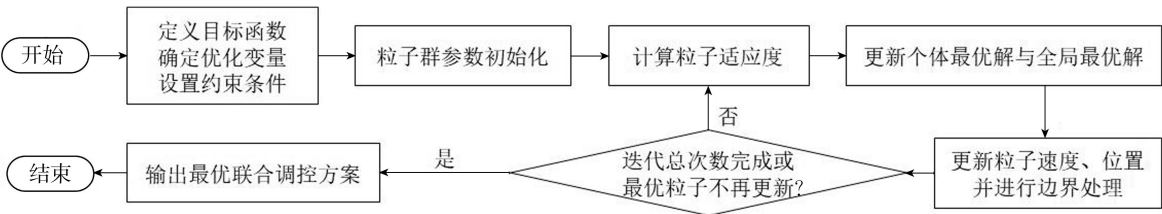


图 3 基于 IPSO 算法的优化模型求解流程

Fig. 3 Flowchart of solving optimization model based on IPSO algorithm

3 单闸调控模拟与响应特征分析

为评估各闸对沙北片河网水动力空间格局的调控作用,并为闸群联合调控优化模型的构建提供依据,在一维水动力模型基础上,开展了单闸调控响应模拟分析,挖掘水闸调控潜力。

3.1 基础工况设定与分析

基础工况设定为:横大路闸(边界 1)引水流量保持 $5\text{ m}^3/\text{s}$,入流边界 2、出流边界 3 分别采用调水试验实测的流量和 水位,河网内其余 6 座水闸全开。

基础工况的模拟结果(太湖港排渠、沙北排渠、中心排渠、马蹄港排渠、曹家湖排渠和阳新渠的平均流速分别为 0.051 、 0.140 、 0.085 、 0.195 、 0.050 、 0.045 m/s)表明,马蹄港排渠与沙北排渠的平均流速显著高于其他支渠,干支渠水动力差异明显。太湖港排渠、阳新渠等支渠有约 40% 河段为流速滞缓区(图 1),这些区域普遍位于支渠末端,也是水质较差河段。

3.2 调控方案设计

本文依次调节河网内部 6 座水闸的开度,每次仅调节一座水闸(其余各闸保持全开),开度以 0.1 m 为变化步长,待河网水动力稳定后再逐级增加开度,直至该闸处于全开且河网流速响应趋于稳定。通过模拟分析单个水闸开度变化对典型渠道平均流速的敏感性影响机制,明确各闸在水动力调控中的作用。为了量化流速对水闸闸门开度变化的响应程度,引入流速敏感度系数 S_v :

$$S_v = \frac{\Delta v}{\Delta G}$$

(4)

式中: Δv 为渠道平均流速变化量, m/s ; ΔG 为水闸开度变化量, m 。 S_v 越大表示该水闸闸门开度的微小变化对渠道流速影响越显著,调控能力越强。

为客观确定各水闸的有效调控开度区间,设定如下规则:将敏感度系数不低于其最大值 10%(即 $S_v \geq 0.1S_{v,\text{max}}$) 的开度范围界定为该水闸的有效调控区间。此规则旨在筛选出对渠道流速具有显著调控能力的开度,避免将调控效果微弱的开度纳入后续优化,从而聚焦于关键调控参数。

3.3 调控响应特征分析

图 4 为流速敏感度系数热力图,具体分析如下:

a. B 闸在开度 $0.3\sim0.6\text{ m}$ 时,马蹄港排渠流速敏感度系数最高可达 0.416 s^{-1} 。从物理机制上看,B 闸直接控制干渠出流通 道,当其开度降低时,干渠流量受限,水体被迫分流到支渠,增强了横向扩散能力,从而有效缓解了马蹄港排渠水资源过度集中问题,推动水流向阻力较大的区域扩散。A0 闸在开度 $0.3\sim0.7\text{ m}$ 时,太湖港排渠流速敏感度系数最高达 0.411 s^{-1} ;当 A0 闸开度低于 0.3 m 时,沙北排渠和中心排渠发生倒流

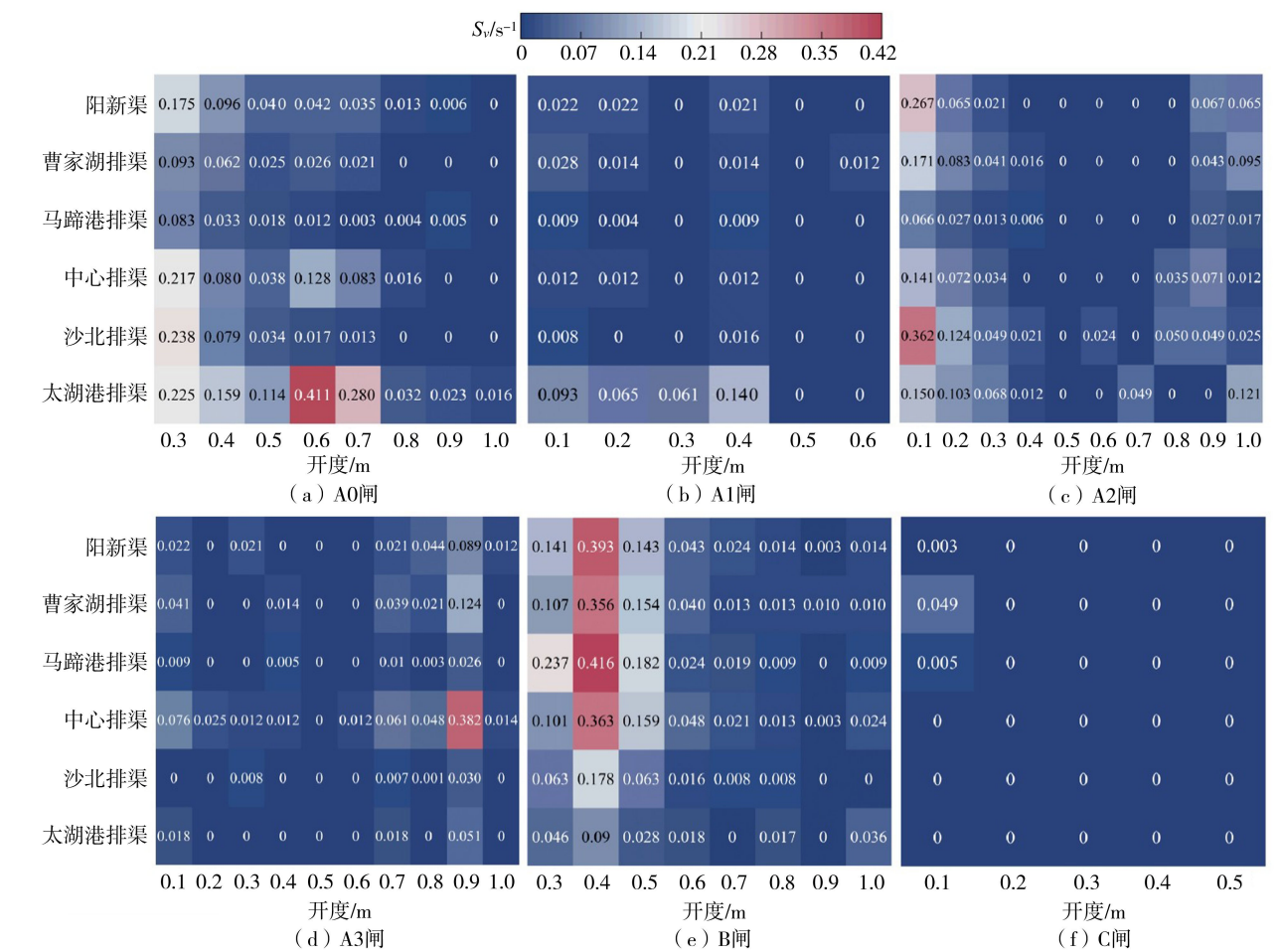


图 4 单闸调控下各渠道流速敏感度系数热力图

Fig. 4 Heatmap of flow velocity sensitivity coefficients for each channel under single-gate regulation

现象,可能因太湖港排渠水动力过强,扰乱了正常引排方向,易加剧水质恶化与排涝风险。因此,在调控过程中应避免将 A0 闸开度设定在 0.3 m 以下,以保障水动力空间格局稳定。

b. A2 闸在开度 0.1~0.3 m 时,沙北排渠流速敏感度系数最高达 0.362 s^{-1} ,可有效缓解其流速相对较高状态并提升其他支渠引水能力。A3 闸流速表现出一定的非线性响应,在开度为 0.7~0.9 m 区间时,中心排渠流速敏感度系数最高达 0.382 s^{-1} ,推测该区间内水位差较优,形成较好引流条件。此外,两闸开度变化时河网支渠的流速敏感度系数大多低于 0.100 s^{-1} ,表明两闸调控效果集中、干扰性较低,适合局部水动力调节。

c. A1 闸与 C 闸的调控效果较弱,调节其开度后对大多渠道流速变化影响较小,马蹄港排渠和沙北排渠流速敏感度系数在 0.02 s^{-1} 以下,而滞缓区的流速进一步降低,说明两闸对水动力空间格局的改善效果有限,这可能与其所属河段本身水动力较弱有关,对调控不敏感。因此在后续优化中,A1 闸与 C 闸保持全开,以简化调控过程。

综上,在特定引水流量下,沙北片河网不同水闸调控能力差异明显,且单闸调控难以兼顾主渠与支渠水动力条件的协调改善。通过流速敏感度系数分析,可为闸群联合调控优化提供明确的变量与约束筛选依据及物理机制。后续选取 B、A0、A2 和 A3 闸构成沙北片河网的主要调控闸群。

4 闸群联合调控优化研究

在单闸调控的基础上,进一步构建以关键水闸开度为决策变量的闸群联合调控优化模型,系统探索闸群最优调控方案。

4.1 模型设置

两个目标函数为 F_1 (河网流速滞缓区改善效果) 和 F_2 (水动力整体提升效果),选取 B、A0、A2、A3 闸的

开度(e_1 、 e_2 、 e_3 、 e_4)作为决策变量,其调控区间分别为:B 闸 0.3~0.6 m,A0 闸 0.3~0.7 m,A2 闸 0.1~0.3 m,A3 闸 0.7~0.9 m。约束条件中 $\bar{v}_\text{干}$ 为干渠马蹄港排渠的平均流速; $q_\text{引}$ 为横大路闸(边界1)5 m³/s 的引水流量。

4.2 优化调控结果分析

根据优化模型计算结果,绘制了断面达标率与关键水闸开度响应关系的平行坐标图,如图 5 所示。从整体分布来看,各调控方案的断面达标率差异显著,表明不同开度组合对滞缓区水动力影响敏感。而大量红色线条分布于图中不同位置,则说明多个调控方案能够实现 100% 的断面达标率,即滞缓区内各断面流速提升幅度均满足 25% 以上的要求,反映调控策略的多样性与操作的灵活性。这些高断面达标率方案中,B 闸与 A0 闸的开度多集中在 0.30~0.38 m,而 A2 闸与 A3 闸开度则分别分布在 0.22~0.30 m 和 0.81~0.90 m 区间内,说明尽管高达标率并非由某一单一变量区间所决定,但在满足联合调控逻辑的前提下,通过限制 B 闸与 A0 闸、提高 A2 闸与 A3 闸的过流能力能有效抑制干渠水流快速下泄,促使水体在河网内部更易于横向扩散至支渠,缓解支渠水体滞缓的问题。

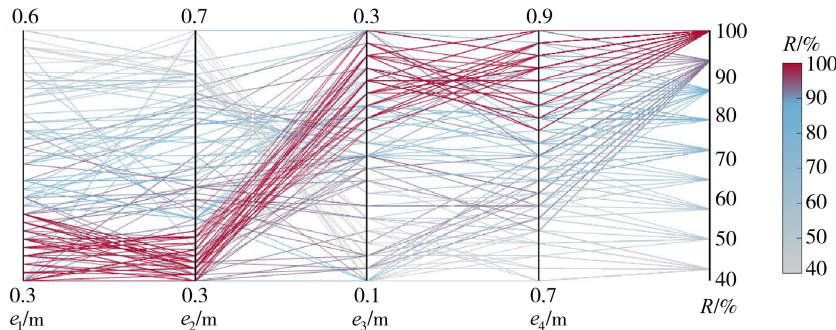


图 5 断面达标率与关键水闸开度响应关系平行坐标图

Fig. 5 Parallel coordinate plot of response relationship between section compliance rate and key gate openings

进一步分析可知,这些高断面达标率方案的平均流速提升率在 14.72%~22.44% 之间,表明即便调控方案使得断面达标率为 100%,但河网整体水动力效果仍存在差异。图 6 为调控区间内两项指标上解集的空间分布,二者无明显线性相关关系。同时达到最高断面达标率和最大平均流速提升率(22.44%)的调控方案为 B、A0、A2、A3 闸开度分别为 0.32、0.30、0.29、0.88 m,该方案下滞缓区平均流速提升幅度达 28.3%。

如图 7 所示,在最优调控方案下,原本水动力较弱的支渠平均流速均明显增大,而干渠的平均流速则仍保持在 0.1 m/s 以上,说明其基本引排功能仍能得到有效保障。由此可见,在特定引水条件下,合理的闸群联合调控有助于推动沙北片河网水动力格局从“主干快速流排”向“支干协调通流”转变,实现河网水动力重构。这一结果印证了分阶段单目标优化在水动力调控中的有效性,也证明了闸群联合调控优化模型在本文设定条件下具有较好的调控方案优选能力。与通过增加引水流量的传统调控方式相比,本文方法能够在特定引水条件下充分利用现有闸群的协同运作来改善水动力条件,从而提高水资源的利用效率,对类似河网的联合调控实践具有参考价值。

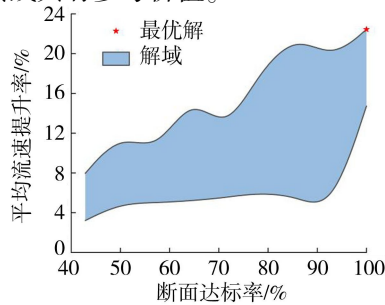


图 6 闸群联合调控方案在断面达标率与平均流速提升率空间中的分布

Fig. 6 Distribution of joint gate group operation schemes in space of section compliance rate and average flow velocity increase rate

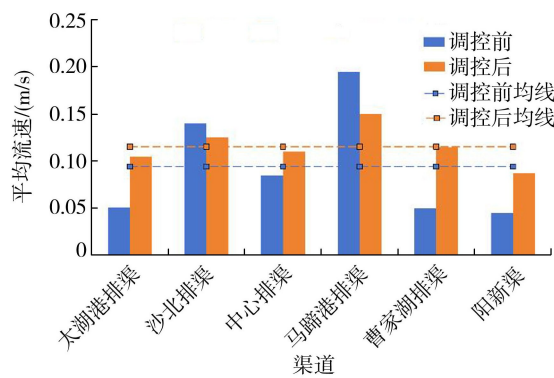


图 7 最优方案调控前后各渠道平均流速对比

Fig. 7 Comparison of average flow velocity in each channel before and after regulation by optimal scheme

值得注意的是,本文研究从水动力角度展开,并且所得结果反映的是闸门开度稳定后的平均改善效果,在实际工程应用中需考虑闸门启闭时间和管理制度对方案实施的影响。未来研究可进一步耦合水质过程,拓展至动态引水情景,并综合考虑闸门操作对河道冲刷、航运及生态的潜在影响,以更全面地评估调控效果。

5 结 论

a. 基于水闸调控响应特征与分阶段单目标优化方法,构建了沙北片河网闸群联合调控优化模型,该模型能够充分挖掘现有水闸潜力,在特定引水条件下有效改善区域水动力条件,实现水动力有效提升,可为类似平原河网水动力调控提供参考。

b. 通过水闸调控响应特征分析,识别出对沙北片河网水动力重构起关键作用的水闸。其中,马蹄港排渠闸 1 与马蹄港排渠闸 2 是调控主支渠水流分配的核心闸门,沙北排渠闸与中心排渠闸在局部水动力改善方面也具有一定的潜力。各闸的调控特征可为闸群联合调控优化模型的变量选取与约束设定提供依据。

c. 得到了 5 m³/s 引水流量下沙北片河网水动力重构的最优调控方案,实现了河网局部与整体水动力的协同提升。该方案实施后,滞缓区内各断面流速提升幅度均在 25% 以上,河网整体平均流速提升 14.72%~22.44%。同时,干渠在调控过程中平均流速保持在 0.1 m/s 以上,保障了其引排功能不受影响。

参考文献:

[1] 钟子悦,余明辉,陈小齐,等. 珠江三角洲河网地形和径流条件变化对潮动力格局的影响[J]. 水资源保护,2023,39(3): 213-221. (Zhong Ziyue, Yu Minghui, Chen Xiaoqi, et al. Effects of changes in river network topography and runoff on tidal dynamic pattern in Pearl River Delta[J]. Water Resources Protection,2023,39(3):213-221. (in Chinese))

[2] Coder L, Musolff A, Kronsbein M P, et al. How anthropogenic modification of riverscapes reduces the resilience of floodplain water bodies to drought[J]. Ecological Engineering,2025,219:107686.

[3] 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 Qingjiang, Ding Rui, Zhao Hai, 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. (in Chinese))

[4] 沈志伟,张晓雷,余亮,等. 基质组配、填充方式及水力负荷对生态滤坝净化效果的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):37-43. (Shen Zhiwei, Zhang Xiaolei, Yu Liang, et al. Effects of substrate combination, packing arrangement and hydraulic loading on the purification performance of ecological filter dam [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(6):37-43. (in Chinese))

[5] Hua W, Zilin S, Yichuan Z, et al. Connection between anthropogenic water diversion and hydrodynamic condition in plain river network[J]. Water,2021,13(24):3596.

[6] 张晓峰,石永杰,刘俊,等. 基于 AHP-熵权法的望虞河西岸圩区活水调度方案多目标优选[J]. 水利水电科技进展,2024,44(3):80-87. (Zhang Xiaofeng, Shi Yongjie, Liu Jun, et al. Multi-objective optimization of flowing water dispatch schemes in western polder area of Wangyu River based on AHP-entropy weight method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,,2024,44(3):80-87. (in Chinese))

[7] 陆倩,崔冬,田利勇,等. 平原河网地区泵闸合建枢纽布置形式[J]. 水利水电科技进展,2019,39(3):62-67. (Lu Qian, Cui Dong, Tian Liyong, et al. Arrangement types of a combined sluice-pump hub in plain river network region[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019,39(3):62-67. (in Chinese))

[8] 于珊,李一平,程一鑫,等. 调水引流工程对平原河网水动力调控的效果[J]. 湖泊科学,2021,33(2):462-473. (Yu Shan, Li Yiping, Cheng Yixin, et al. The impacts of water diversion on hydrodynamic regulation of plain river network[J]. Journal of Lake Sciences,2021,33(2):462-473. (in Chinese))

[9] Yan Xiaohui, Wang Yan, Fan Boyuan, et al. Data-driven modeling of sluice gate flows using a convolutional neural network[J]. Journal of Hydroinformatics,2023,25(5):1629-1647.

[10] Tang Hongwu, Yuan Saiyu, Cao Hao. Theory and practice of hydrodynamic reconstruction in plain river networks [J]. Engineering,2023,24(5):202-211.

[11] 刘曾美,曹钰帆,黎智良,等. 复杂联围内涝防治规划中雨洪模拟精度提升研究[J]. 水资源保护,2025,41(1):64-75. (Liu Zengmei, Cao Yufan, Li Zhiliang, et al. Study on accuracy improvement of stormwater simulation in waterlogging control planning for complex integrated embankment[J]. Water Resources Protection,2025,41(1):64-75. (in Chinese))

analysis of influencing parameters[J]. Tunnel Construction,2022,42(12):1996-2005. (in Chinese))

[14] Wu Jie,Li Pengfei,Yao Aijun,et al. Three-dimensional analytical solutions for non-Darcy seepage ahead of a grouted subsea tunnel face[J]. Computers and Geotechnics,2023,159:105509.

[15] Zhang Yu,Zhang Dingli,Fang Qian,et al. Analytical solutions for non-Darcy seepage in grouted subsea tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2020,96:103182.

[16] 张丙强,王启云,卢晓颖. 软土地层浅埋圆形隧道非达西渗流场解析研究[J]. 岩土力学,2018,39(12):4377-4384. (Zhang Bingqiang,Wang Qiyun,Lu Xiaoying. Analytical solution for the non-Darcian seepage field of a shallow circular tunnel in soft soil [J]. Rock and Soil Mechanics,2018,39(12):4377-4384. (in Chinese))

[17] 于茜,潘海东,吕咸青. 南海主要分潮振幅变化趋势再探[J]. 海洋学报,2022,44(5):62-70. (Yu Qian,Pan Haidong,Lyu Xianqing. Trends in the amplitudes of major tidal constituents in the South China Sea;a revisit[J]. Haiyang Xuebao,2022,44(5):62-70. (in Chinese))

[18] 潘以恒,罗其奇,周斌,等. 半无限平面含注浆圈深埋隧道渗流场解析研究[J]. 浙江大学学报(工学版),2018,52(6):1114-1122. (Pan Yiheng,Luo Qiqi,Zhou Bin,et al. Analytical study on the seepage field of a deep-buried tunnel with a grouting circle in a half-plane[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2018,52(6):1114-1122. (in Chinese))

[19] 李毅,伍嘉,李坤. 基于 FLAC3D 的饱和-非饱和渗流分析[J]. 岩土力学,2012,33(2):617-622. (Li Yi,Wu Jia,Li Kun. Saturated-unsaturated seepage analysis based on FLAC3D[J]. Rock and Soil Mechanics,2012,33(2):617-622. (in Chinese))

[20] 杜朝伟. 海底隧道衬砌水压力及结构受力特征研究[D]. 北京:北京交通大学,2011.

[21] 王建宇. 再谈隧道衬砌水压力[J]. 现代隧道技术,2003,40(3):5-10. (Wang Jianyu. Once more on hydraulic pressure acting on tunnel linings[J]. Modern Tunnelling Technology,2003,40(3):5-10. (in Chinese))

[22] 朱成伟,应宏伟,龚晓南. 任意埋深水下隧道渗流场解析解[J]. 岩土工程学报,2017,39(11):1984-1991. (Zhu Chengwei,Ying Hongwei,Gong Xiaonan. Analytical solutions for seepage fields of underwater tunnels with arbitrary burial depths[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2017,39(11):1984-1991. (in Chinese))

(收稿日期:2025-06-17 编辑:熊水斌)

(上接第 113 页)

[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))

[13] 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. (Yan Yu,Yuan Saiyu,Tang Hongwu,et al. Hydrodynamic reconstruction of Wennan river network in Shanghai City[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(4):329-334. (in Chinese))

[14] 何健,冯胜男,韩幸烨. 闸泵调度对扬州市主城区河网水动力水质改善效果的模拟分析[J]. 江苏水利,2022(6):6-11.

[15] 徐存东,訾亚辉,黄嵩,等. 基于 MIKE 21 的圩区河网水动力调控方法研究[J]. 水利水电技术(中英文),2023,54(7):161-170. (Xu Cundong,Zeng Yahui,Huang Song,et al. Research on the hydrodynamic regulation method of river network in polder area based on MIKE 21[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2023,54(7):161-170. (in Chinese))

[16] 孙文宇,姚成,刘志雨,等. 秦淮河水文水动力模型及实时校正[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(4):26-33. (Sun Wenyu,Yao Cheng,Liu Zhiyu,et al. Hydrological and hydrodynamic model of Qinhuai River and real-time correction[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(4):26-33. (in Chinese))

[17] 李健,金中武,蔺秋生. 香溪河水质的平面二维数值模拟[J]. 水动力学研究与进展:A 辑,2012,27(6):720-726. (Li Jian,Jin Zhongwu,Lin Qiusheng. Application of two-dimensional water quality model in Xiangxi River[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics,2012,27(6):720-726. (in Chinese))

(收稿日期:2025-07-31 编辑:熊水斌)