

DOI:

# 基于多目标协同的平原圩(垸)区水动力调控方法

程 旭<sup>1,2</sup>, 吴修锋<sup>1</sup>, 戴江玉<sup>1</sup>, 吴时强<sup>1,2</sup>, 程 磊<sup>2</sup>, 杨 帆<sup>1</sup>, 李子祥<sup>1</sup>

(1. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029; 2. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉 430072)

**摘要:**平原圩(垸)区地势低洼, 易受外洪内涝叠加影响, 水动力不足是制约水环境改善的关键因素。针对传统调控方法主观性强、难以实现全局优化的问题, 本文以太湖流域大荡圩为研究对象, 基于 Copula 函数构建了圩内-圩外联合水情情景, 应用 InfoWorks ICM 模型模拟了圩区水动力过程, 并构建 CNN-LSTM-SelfAttention 代理模型与遗传算法耦合, 开展了多目标协同优化调控。结果表明: 新增单点引水闸使水量交换率由 1.72% 提高至 36.69%, 闸泵协同优化后进一步提升至 49.82%; 在外洪叠加强降雨情景下, 河道水位可稳定控制在防洪警戒水位以下, 且取水后仍维持在最低控制水位以上, 同时显著提升河网流速与流量历时保证率。研究成果可为平原圩区洪涝防治与水环境改善提供理论与技术支撑。

**关键词:** 水动力调控; 水系连通; 闸泵协同调控; 多目标优化; 平原圩(垸)区

**中图分类号:** TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2026)00-0001-12

平原圩(垸)区在长江中下游等区域广泛分布, 其防洪安全与水环境质量直接关系区域水安全与生态安全<sup>[1]</sup>。该区域水系天然纵横交错, 地势低洼, 在汛期, 外河水位高涨, 遭遇强降雨时圩内降水无法自排, 极易发生洪涝灾害<sup>[2-3]</sup>。圩堤分割了内部河道与外部江河, 内外水体交换受阻, 内部河道水体流动性差, 水体长时间滞留, 污染物无法有效稀释和扩散<sup>[4]</sup>。因此, 开展多目标协同的水动力调控研究, 对于平衡防洪、供水与水环境改善需求, 提升平原河网地区综合治理能力, 具有重要的理论和实践意义。

水动力调控技术可分为工程性与非工程性 2 类。工程性调控主要通过调水工程、水系连通与优化等具体工程措施实现, 如美国的 Moses 工程、新西兰的 Rotoiti 湖调水工程以及中国的“引江济太”工程<sup>[5-7]</sup>; 非工程性调控不直接改变自然水体, 而是借助管理手段、预警系统等手段提升工程设施运行效率与区域综合抗灾能力<sup>[8-9]</sup>。随着计算机技术与系统分析理论的发展, 非工程性调控应用日益广泛<sup>[10-11]</sup>。当前水动力调控技术正逐步从传统单一依赖工程手段的模式, 向工程与非工程措施融合、协同作用的方向发展。王军等<sup>[12]</sup>和廖轶鹏等<sup>[13]</sup>分别从水系连通与多方式引水调控角度, 显著改善了河网水质与水动力条件。荷兰及欧洲低地国家圩区系统的水动力管理研究也指出, 工程围垦虽提升了防洪能力, 但显著削弱了区域水体连通性与自净功能, 需通过闸泵协同等措施实现水动力优化<sup>[14]</sup>。然而, 受限于水动力模型与调控优化算法耦合的复杂性, 现有研究多采用固定设计洪水或典型年情景开展调控方案的静态比选。此类方法依赖经验设定与人工筛选, 难以通过自动化手段寻求全局或近似最优的调度策略<sup>[15-16]</sup>。面对降雨时空分布不均及极端天气频发等复杂水文情势, 缺乏应对未来不确定性的动态适应能力<sup>[17]</sup>。此外, 圩(垸)区面积相对较小, 调蓄空间有限, 水动力过程对调控措施高度敏感, 并且其水文响应受外河水位、区域降雨及内部用水需求等多重边界条件共同制约, 调控过程复杂且不确定性显著<sup>[18]</sup>。近年来, 机器学习驱动的代理模型(如 CNN、LSTM 及其组合模型)在水文水动力模拟中的应用日益增多, 能够有效刻画复杂非线性过程<sup>[19]</sup>。部分研究已尝试将代理模型与遗传算法等优化方法耦合, 用于水

收稿日期: 2026-01-21; 修回日期: 2026-04-14; 接受日期: 2026-04-16; 网络出版日期:

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3208701); 南京水利科学研究院研究生论文基金(Yy124013)

作者简介: 程旭(1997—), 男, 河南安阳人, 博士研究生, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: 2022102060013@whu.edu.cn

通信作者: 戴江玉, E-mail: jydai@nhri.cn

资源多目标调度,但在平原圩(坑)区复杂水情条件下的闸泵协同多目标优化应用仍较为有限<sup>[20]</sup>。

本文以大荡圩为案例,通过拟合圩内-圩外联合概率分布,设定典型圩(坑)片区组合水情情景,综合考虑不同目标(防洪、供水、水环境改善等)的协同关系,明确不同情形下的主要调控目标,通过机器学习将InfoWorks ICM提炼为代理模型与数学优化算法直接耦合,构建兼具前瞻性与自适应能力的圩(坑)区水动力多目标优化模型,开展闸泵协同调控策略优化及其效果评估,以期为平原圩(坑)区水动力调控提供技术参考。

## 1 研究区概况

大荡圩位于太湖流域湖西区内部(图1),是典型的圩(坑)单元,面积约为8.7 km<sup>2</sup>,圩内地势平坦低洼,河网密集,水体更新主要依赖人工引排,水动力条件较弱,部分河段长期处于近静止状态(流速常年低于0.02 m/s),水体自净能力差,易出现水质恶化与富营养化风险。在汛期或强降雨过程中,圩区又面临外河高水位顶托与圩内涝水汇集叠加的双重压力。此外,大荡圩与湖西区河网在水力上存在显著耦合关系,其引排调度直接受外河水位、水势条件制约。

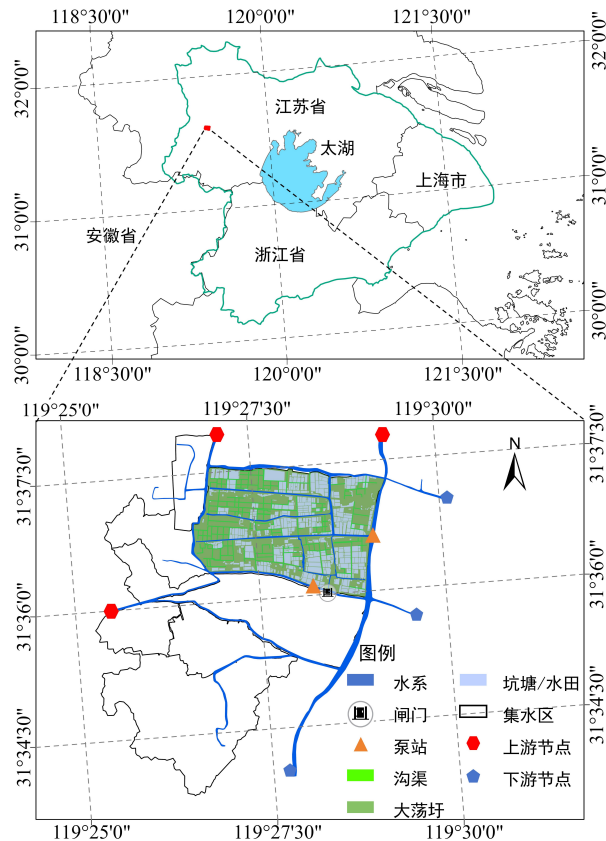


图1 研究区位置和水系结构

Fig. 1 Location of the study area and its water system structure

## 2 河网圩(坑)区多目标调控指标体系与决策模型构建

### 2.1 多目标调控指标体系

大荡圩现有水利工程以防洪安全为主,兼顾供水需求。本研究在保障防洪与供水基本功能的前提下,通过水系连通与闸泵调控,促进圩内水体有序流动,改善水环境质量。为此,从防洪、供水、水环境(水动力)

以及调控成本 4 个目标选取评价指标。

(1) 防洪目标。在面向水环境改善的有序流动调度中, 河道内水位需满足防洪、供水等最低限和最高限要求, 其约束表达式如下:

$$Z_{i,\min} < Z_{i,t} < Z_{i,\max} \quad (1)$$

式中:  $Z_{i,\min}$  和  $Z_{i,\max}$  分别为第  $i$  个河段的最低控制水位和防洪警戒水位, 大荡圩最低控制水位和防洪警戒水位分别为 3.2 m 和 3.8 m;  $Z_{i,t}$  为第  $i$  个断面  $t$  时刻的水位。

为避免单一指标难以全面反映防洪风险, 在防洪评价中同时考虑水位超限程度与超限持续时间, 采用总超标体积进行统一表征(式 2)。

$$V_e = \sum_{t=1}^T \max(0, Z_{i,t} - Z_{i,\max}) \times \Delta t \quad (2)$$

式中:  $V_e$  为总超标体积, 该值越小, 防洪目标完成得越好;  $T$  为调度期内的总时间步长数;  $\Delta t$  为洪水超警时间步长。

(2) 供水目标。使用供水保证满足程度衡量河道供水能力, 其计算公式如下:

$$P_s = P(Z_t > Z_{\min}) = \frac{m}{n+1} \quad (3)$$

式中:  $P_s$  为供水保证率;  $n$  为总时间步长数;  $m$  为供水量满足或大于需水量的时间段数。

(3) 水环境与生态改善目标。选用生态基流保证率、最小稀释流速保证率及水量交换率作为评估水环境与生态改善效果指标。结合平原河网水动力改善需求及工程实践, 设置 0.01 ~ 0.10 m/s 为流速控制阈值, 用于表征不同等级的水体流动状态, 最小稀释流速保证率计算公式如下<sup>[11,21]</sup>:

$$S_v(i,t) = \begin{cases} 0, & v_{i,t} < 0.01 \\ \frac{v_{i,t} - 0.01}{0.1 - 0.01}, & 0.01 \leq v_{i,t} < 0.1 \\ 1, & 0.1 \leq v_{i,t} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $S_v(i,t)$  为第  $i$  段河道  $t$  时刻最小稀释流速保证率;  $v_{i,t}$  为第  $i$  段河道  $t$  时刻流速, m/s。

生态基流阈值依据现状流量序列的 10% 与 90% 分位数确定, 分别表征维持基本生态功能的下限和相对稳定的较高流量水平, 生态基流保证率计算公式如下:

$$S_Q(i,t) = \begin{cases} 0, & Q_{i,t} < F_{Q,inv}(0.1) \\ \frac{Q_{i,t} - F_{Q,inv}(0.1)}{F_{Q,inv}(0.9) - F_{Q,inv}(0.1)}, & F_{Q,inv}(0.1) < Q_{i,t} < F_{Q,inv}(0.9) \\ 1, & F_{Q,inv}(0.9) < Q_{i,t} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $S_Q(i,t)$  为第  $i$  段河道  $t$  时刻生态基流保证率;  $Q_{i,t}$  为第  $i$  段河道  $t$  时刻流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $F_{Q,inv}$  为河道流量分布  $F_Q$  的逆函数。

为表征圩区整体调控效果, 对各河段单项指标按河段长度加权汇总, 得到圩区尺度目标函数<sup>[22]</sup>。

水量交换率是一个衡量水体更新、置换效率的关键指标, 特别适用于评估平原河网地区的活水循环、引清调水等治理工程的实效, 计算公式如下:

$$R_V = \frac{\sum_{t=1}^T \Delta t \times Q_{t,\text{in}}}{T \times \sum_{i=1}^k V_i} \quad (6)$$

式中:  $R_V$  为基于体积的水量交换率;  $Q_{t,\text{in}}$  为  $t$  时刻进入圩区水体的流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $V_i$  为第  $i$  段河道水体槽蓄量,

$\text{m}^3$ ;  $k$  为河段总数量。

(4) 调控成本( $C_d$ )。以泵站运行时长作为表征调控经济成本的关键指标。即在特定治理方案下, 为达到目标水位或水质置换要求, 泵站所需累计开启的运行时间。

## 2.2 基于 AHP 与 TOPSIS 的决策模型

为综合评价不同调控方案并实现多目标向单一综合目标的转化, 本文采用 AHP-TOPSIS 方法构建决策模型。其中, AHP 用于确定各指标权重, TOPSIS 用于计算方案相对贴近度, 并将其作为后续优化评价依据<sup>[23]</sup>。

根据调查结果, 大荡圩水动力调控目标的重要程度依次为防洪、供水、水环境改善和调控成本。采用层次分析法确定各评价指标的权重, 具体结果如表 1 所示。

表 1 指标最终权重表  
Table 1 Final weights of evaluation indicators

指标	$V_c$	$P_s$	$R_v$	$S_v$	$S_Q$	$C_d$
权重	0.24	0.21	0.17	0.14	0.14	0.1

在获得指标权重后, 采用 TOPSIS 方法对各调控方案进行综合评价。首先对指标进行标准化处理, 然后构建正、负理想解, 计算各方案与理想解之间的距离, 最终以相对贴近度表征方案优劣。

## 3 圩(垸)区水动力调控方法

### 3.1 基于 Copula 函数的圩(垸)区水情边界情景生成

传统调控多基于静态水情, 或者在外部来水充足条件下设定固定的调控方案进行分析评价, 难以反映降雨与来水的丰枯异步特征, 进而限制优化调控效果<sup>[24]</sup>。为此, 本文基于圩外来水与区域降雨的水文关联, 引入 Copula 函数构建联合概率分布, 并生成降雨-径流组合情景, 为模型训练与调度优化提供边界条件。

设随机变量  $X$  与  $Y$  分别表示圩(垸)区外部河道来水量和区域降雨径流量, 边缘分布函数分别为  $F_X(x)$  和  $F_Y(y)$ , 其联合分布函数为<sup>[25]</sup>

$$H(x,y) = C(F_X(x), F_Y(y)) \quad (7)$$

式中:  $H(x,y)$  为二维联合分布函数;  $C()$  为 Copula 函数, 当边缘分布连续时, Copula 函数唯一存在, 以常用的 Frank Copula 为例, 其表达式为

$$C(u,v) = \frac{1}{\theta} \ln \left[ 1 + \frac{(\exp(-\theta u) - 1)(\exp(-\theta v) - 1)}{\exp(-\theta) - 1} \right] \quad (8)$$

式中:  $\theta$  为函数参数, 其值越大, 变量之间的相关性越强;  $u = F_X(x)$ ,  $v = F_Y(y)$ 。

### 3.2 水系连通工程方案

大荡圩内外水体通过闸门和泵站实现水量交换(图 2(a)), 圩内现有水利工程包括泵站 5 台, 闸门 1 座, 其中五星排涝站配置 900ZLB 型水泵 3 台, 最大排水流量为  $9 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 闸口排涝站配置 800ZLB 型水泵 2 台, 最大排水流量为  $4 \text{ m}^3/\text{s}$ , 并配套设置水闸 1 座, 宽度 5 m。基于圩内外关键节点河床高差( $\Delta Z = 1.3 \text{ m}$ )与连通路长度( $L = 4.8 \text{ km}$ )的综合分析, 确定庄阳村为水动力条件最优的连通控制节点(图 2(b))。通过在该处新增引水闸, 构建单点引水连通道, 实现圩内-圩外水系连通。

闸泵按照以下规则进行启闭调控, 以实现引排水。 $Z_{\text{up}}$ 、 $Z_{\text{down}}$ 、 $Z_{\text{in}}$  分别表示圩区上游外河水位、下游外河水位和圩内控制水位。

- (1) 遇强降雨。 $\min(Z_{up}, Z_{down}) > Z_{in} > 3.8 \text{ m}$ , 优先排涝, 防止倒灌, 关闭所有闸门, 开启所有排涝泵站;  
 $Z_{up} > Z_{in} > 3.8 \text{ m} > Z_{down}$ , 关闭引水闸门, 下游闸门保持开启。
- (2) 平水期。 $3.8 \text{ m} > Z_{in} > 3.2 \text{ m}$ , 开启闸门依靠水位差重力流动进行引水、排水。
- (3) 枯水期降雨。 $Z_{in} > \min(Z_{up}, Z_{down})$ , 关闭闸门蓄水。
- (4)  $Z_{up} > Z_{in} > Z_{down}$ , 开启引水闸门, 关闭闸口处闸门。

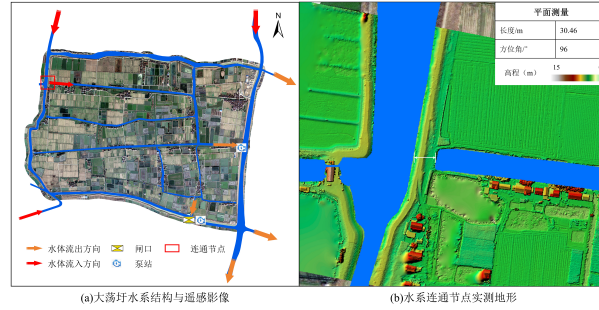


图2 大荡圩水系连通节点实测地形

Fig. 2 Measured topography of water-system connectivity nodes in the Dadang polder

通过在庄阳闸处单点引水, 圩内河道水量交换效率由 1.72% 提高至 36.69%, 圩内河网的平均流量与流速也均实现大幅增长, 整体水动力条件得到明显改善。

### 3.3 基于代理模型的圩(垸)区水动力响应关系构建

本研究基于 InfoWorks ICM(Integrated Catchment Management)模型构建大荡圩及周边水系的水文水动力模型, 用于模拟水系连通方案并为代理模型提供数值基础。产流采用固定径流系数法(湿润地区参数取 0.70~0.90); 汇流采用 SWMM 模型, 需定义子汇水区宽度和地面曼宁粗糙系数; 河道水动力过程通过求解圣维南方程组计算<sup>[26]</sup>。

InfoWorks ICM 模型能精确模拟复杂水动力过程, 但其封闭结构难以与高效优化算法直接迭代耦合, 导致优化求解效率低下, 调度决策多依赖经验, 主观性强<sup>[20]</sup>。为此, 本研究采用机器学习将 ICM 模型提炼为计算高效、输入输出透明的代理模型。该代理模型可快速映射入流边界、闸泵状态与圩内水位、流量等关键指标的非线性关系, 并与数学优化算法直接耦合, 形成模拟-优化闭环(图 3)。

为刻画闸泵调度与水文水动力响应的关联特征, 结合圩区闸泵设施布局、实际调度经验及防洪排涝需求, 将闸泵启闭组合逻辑、运行优先级归纳为 6 类典型工况(表 2)。工况涵盖不同来水强度与排涝需求下的核心调度场景, 覆盖了关键决策节点, 为后续机器学习代理模型训练提供了结构化、高效的输入样本。

引入 CNN-LSTM-SelfAttention 混合模型作为 InfoWorks ICM 代理模型, 对 6 类典型工况进行学习。该模型通过“特征提取—时序建模—注意力加权”结构, 实现闸泵调控与水文水动力响应关系的高效学习与预测, 其处理流程包括数据归一化、CNN 特征提取、LSTM 建模及 Attention 加权输出<sup>[27-28]</sup>。代理模型输入为多变量时序特征矩阵(时序为 4), 包括外部入流量、区域降雨及闸泵启闭状态(0/1); 输出为圩内外 3 个控制点水位及 10 段河道流量序列。模型采用 1D-CNN 对输入矩阵进行局部特征提取与降维, LSTM 捕捉长时序依赖, SelfAttention 识别关键时间步。三模块协同提升了多变量耦合特征的表达能力和预测精度(图 3(e))。

### 3.4 圩(垸)区水动力多目标优化调控

将代理模型与遗传算法(GA)有效耦合, 实现对圩(垸)系统闸泵调度策略的自动寻优(图 3)。以代理模

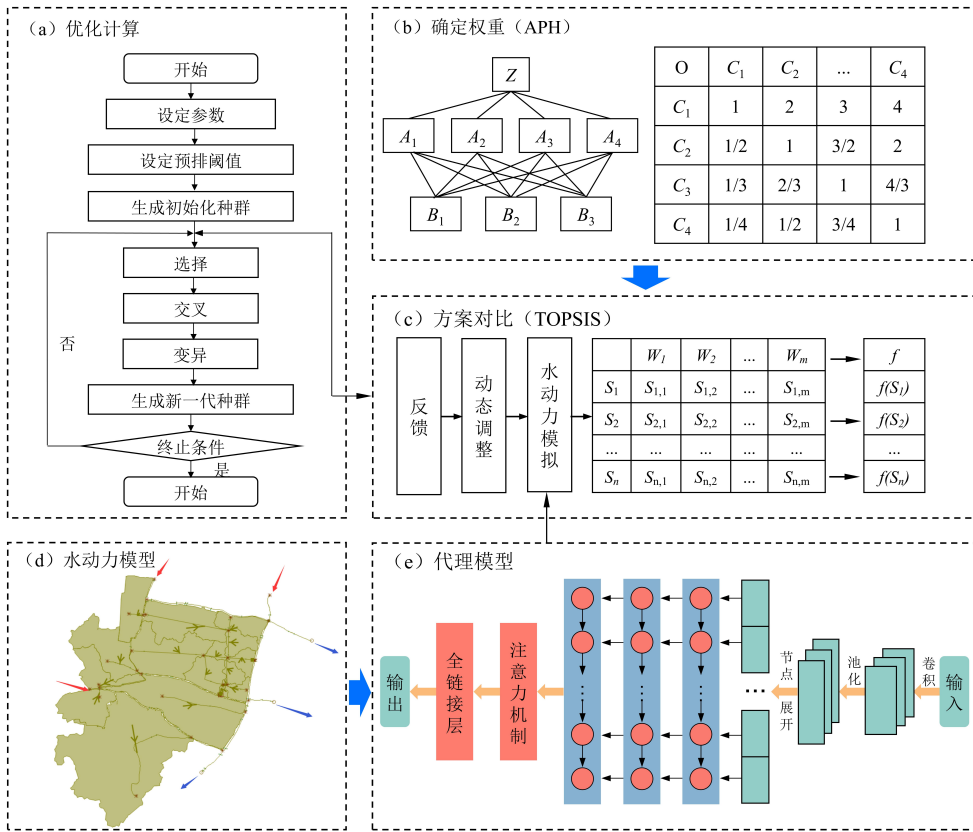


图 3 耦合水动力代理模型与遗传算法的优化框架

Fig. 3 Optimization framework coupling the hydrodynamic surrogate model with the genetic algorithm

表 2 大荡圩闸泵运行典型工况概化表

Table 2 Generalized table of typical operating conditions for gates and pumping stations in the Dadang polder

水工建筑物	庄阳闸	闸口	闸口泵	五星排涝泵	应用条件
工况1	1	1	0	0	自然顺流, 常态水位
工况2	1	0	0	0	圩内水位低, 上游水位高, 由上游向内调水
工况3	1	0	1	1	上下游水位相等, 提高流速
工况4	0	0	0	0	圩内水位高, 圩外低, 用于蓄水
工况5	0	0	1	1	圩内超标准, 圩外高于圩内
工况6	0	1	0	0	上游、圩内水位高, 下游水位低

注: 1代表开启, 0代表关闭。

型、指标体系和决策方法为核心, 嵌入 GA 优化框架, 自动寻优闸泵调度策略, 实现防洪、供水与水环境等多目标的最优平衡。为提高计算效率, 将闸泵启闭状态的调整间隔设定为 6 h, 在极端降雨条件下可进行动态调整。

为提高遗传算法的收敛效率与稳定性, 在优化过程中引入 2 项机制: ①基于降雨预报的预启动策略, 当未来 24 h 降雨超过阈值时提前排水, 在供水主导情形下适当蓄水; ②基于水位的动态反馈机制, 在优化迭代中对调度策略进行实时修正, 从而增强模型对水动力过程变化的适应能力。

## 4 结果与分析

### 4.1 基于 Copula 函数水情边界生成结果

采用 Frank-Copula 函数建立大荡圩外部河道场次洪水量和降雨总量的联合分布, 推求其 Copula 密度函数, 大荡圩外部河道来水与区域降雨联合密度如图 4 所示, 计算  $\theta$  值为 9.36, 表明二者存在较明显的相关性, 可为后续典型组合水情情景的构建提供依据。

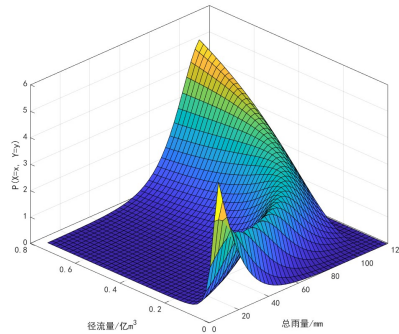


图 4 大荡圩外部河道来水与区域降雨的联合概率分布

Fig. 4 Joint probability distribution of inflow from external rivers and regional rainfall in the Dadang polder

基于工况特征, 从 Copula 生成的多情景样本中筛选对应的雨洪组合(图 5), 并划分为训练集与测试集, 在两者上对模型性能进行评估, 以检验代理模型的泛化能力。以 1 个月(典型调度期)为时间尺度, 从随机抽样生成的外部来水-区域降雨联合情景中, 选取了 5 场具有代表性的降雨-径流过程作为该月内的主要水文驱动事件。其余时段则设置为无雨条件, 外部河道来水量统一取为研究区枯水期平均流量, 并于调度期第 28 日设置一次集中取水活动, 以表征平枯期或无显著来水条件下大荡圩的基准运行状态。

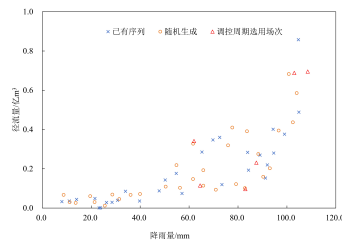


图 5 大荡圩外部河道来水与区域降雨的组合情景

Fig. 5 Combined scenarios of external river inflow and regional rainfall in the Dadang polder

### 4.2 代理模型模拟精度分析

为全面覆盖研究区域的典型水文情景, 本研究利用 InfoWorks ICM 生成了包含不同降雨强度、外河流量水文组合的模拟数据集, 用于对该代理模型进行充分的学习与训练。选取了 3 个点的水位(圩内 1 个, 圩外上、下游各 1 个), 包含 2 处闸门在内的 10 段河道流量进行训练模拟。

采用 Nash-Sutcliffe 效率系数 ( $E_{NS}$ ) 评价代理模型模拟精度, 不同工况下的模拟结果如表 3 所示, 结果表明, CNN-LSTM-SelfAttention 代理模型对水位和流量过程均具有较好的拟合能力, 其中水位模拟效果整体优于

流量。流量精度相对较低，主要是由于其对闸泵运行状态及局部水动力条件变化更为敏感。总体而言，该模型能够较好表征圩区闸泵调控下的水动力响应特征，可在后续优化过程中作为 InfoWorks ICM 的高效代理模型。

表 3 CNN-LSTM-SelfAttention 代理模型模拟精度统计

Table 3 Statistical summary of simulation accuracy of the CNN-LSTM-SelfAttention surrogate model

单位: %

工况	水位		河道流量		工况	水位		河道流量	
	$E_{NS} \geq 0.9$	$E_{NS} \geq 0.7$	$E_{NS} \geq 0.9$	$E_{NS} \geq 0.7$		$E_{NS} \geq 0.9$	$E_{NS} \geq 0.7$	$E_{NS} \geq 0.9$	$E_{NS} \geq 0.7$
工况1	100.0	100.0	90.0	95.0	工况4	83.3	100.0	68.8	100.0
工况2	100.0	100.0	33.3	100.0	工况5	83.3	100.0	50.0	87.5
工况3	100.0	100.0	38.9	100.0	工况6	100.0	100.0	50.0	88.9

### 4.3 优化调控效果分析

前文构建的多情景组合水情(涵盖不同重现期、丰枯异步特征)作为边界输入条件，代入调控模型进行模拟计算，分析优化调控对圩区水文水动力过程的改善效果，结果如图 6 所示。

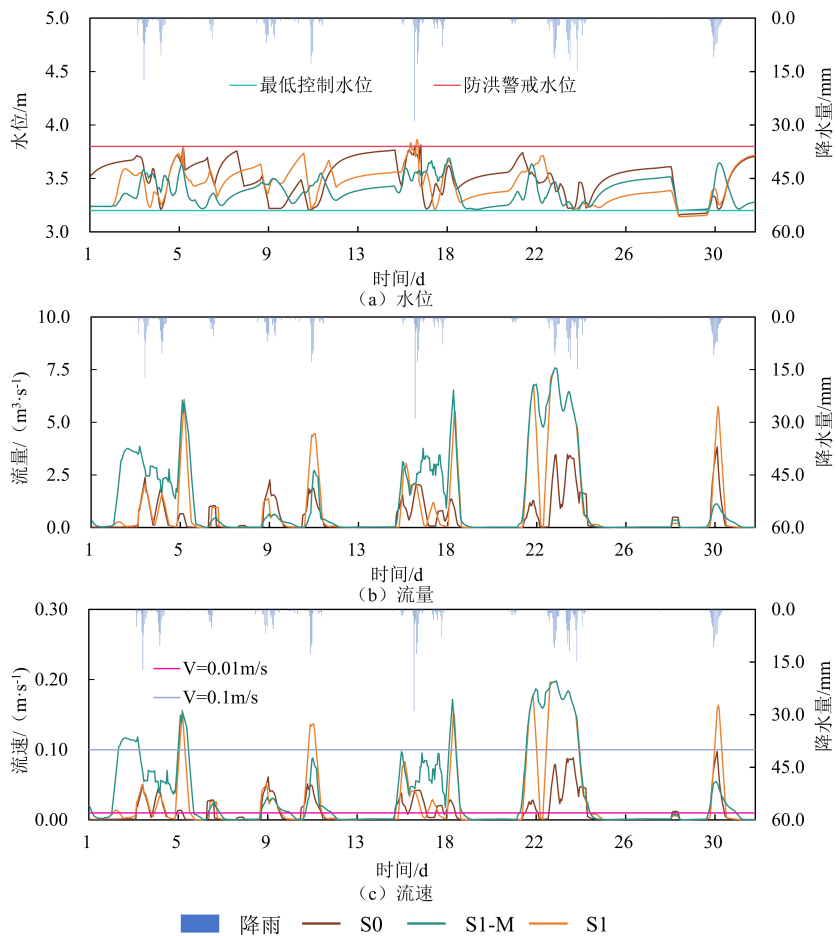


图 6 优化调控后圩内河道水力要素变化过程

Fig. 6 Temporal evolution of hydraulic variables in polder channels after optimized regulation

在原始水系结构(S0)和实施水系连通(S1)情景下, 调度期内第5日和第15日河道水位均出现不同程度的超出防洪警戒水位现象。在引入预排机制后, 优化调控方案(S1-M)在遭遇外洪叠加暴雨情景时, 河道水位仍可稳定控制在防洪水位以下, 显著提升了圩区防洪安全水平。此外, 依托前期形成的预蓄水量, 在第28日取水活动结束后, 通过闸泵协同调控, 河道水位仍可维持在3.2 m以上, 在保障防洪安全的同时有效满足了区域供水需求。

为定量表征不同调控方案下河网水动力条件的改善程度, 选取0.01、0.05和0.10 m/s作为代表性流速阈值, 以及0.1、0.5和1.0 m<sup>3</sup>/s, 分别对应弱流动状态、中等有效流动状态及较强流动状态。不同阈值下的流速和流量历时保证率(达标时间占比)如表4所示, 圩内河网的平均流量与流速历时保证率均呈现出S0<S1<S1-M的递增关系, 尤其在中低阈值( $V \leq 0.05$  m/s,  $Q \leq 0.50$  m<sup>3</sup>/s)条件下, 优化方案的提升幅度更为显著。此外, 经水系连通改造后, 水量交换率由1.72%提升至36.69%; 在此基础上, 通过闸泵联动优化调控, 该比率进一步增至49.82%, 整体水动力条件得到明显改善。

表4 不同阈值下的流速和流量历时保证率

Table 4 Duration guarantee rates of flow velocity and discharge under different threshold values

单位: %

情景	流速			流量		
	0.01 m/s	0.05 m/s	0.10 m/s	0.10 m <sup>3</sup> /s	0.50 m <sup>3</sup> /s	1.00 m <sup>3</sup> /s
S0	12.37	4.92	2.44	17.10	9.39	6.04
S1	25.67	15.11	11.28	30.61	20.03	16.69
S1-M	38.92	23.45	16.59	42.79	32.84	26.76
协同调控增益	13.25	8.34	5.31	12.17	12.81	10.07

同时需要指出, 不同水文情景下调控目标的重要性存在动态变化, 未来可进一步引入情景自适应权重, 以提升模型在复杂水文条件下的适应性与决策灵活性。

## 5 结 论

本文以太湖流域典型平原圩(坑)区-大荡圩为研究对象, 针对平原圩(坑)区水动力条件弱、水体交换受阻及水环境质量差等问题, 通过拟合圩(坑)内外联合概率分布生成了典型水情情景, 在建立InfoWorks ICM水文水动力模型的基础上, 进一步提炼CNN-LSTM-SelfAttention代理模型, 并嵌入优化算法, 实现了防洪、供水与水环境改善的多目标协同调控。主要结论如下:

(1)通过在庄阳村关键节点实施单点引水连通措施, 圩内外水体交换通道得以重构, 圩内-圩外水量交换率由原始状态的1.72%提升至36.69%, 圩内河网平均流量与流速均明显增加, 整体水动力条件得到初步改善。

(2)将代理模型嵌入遗传算法框架, 在极端外洪叠加强降雨情景下, 优化调控方案河道水位全程稳定控制在防洪警戒水位(3.8 m)以下, 避免了现状方案(S0)与单一水系连通方案(S1)中第5日、第15日超警风险; 同时, 在第28日取水结束后, 圩内水位仍维持在最低控制水位(3.2 m)以上, 有效保障供水安全。

(3)协同调控后大荡圩内部河网平均流速(流量)在0.01、0.05和0.10 m/s(0.1、0.5和1.0 m<sup>3</sup>/s)阈值下的历时保证率分别提升了13.25%、8.34%和5.31%(12.17%、12.81%和10.07%); 水量交换效率也得到显著提升, 由36.69%提高至49.82%, 表明闸泵协同调控在缓解圩区滞水问题、增强常态水体流动性方面具有突出优势。

## 参考文献:

[1] 李彬权, 陈丞, 肖洋, 等. 平原圩区复合下垫面水文水动力耦合模型[J]. 水科学进展, 2024, 35(5): 805-816. (LI B Q,

- CHEN C, XIAO Y, et al. A hydrological and hydrodynamic coupling model in polder areas with a complex underlying surface[J]. *Advances in Water Science*, 2024, 35(5): 805-816. (in Chinese))
- [2] QIN B Q, DENG J M, SHI K, et al. Extreme climate anomalies enhancing cyanobacterial blooms in eutrophic Lake Taihu, China[J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(7): e2020WR029371.
- [3] 林芷欣, 罗爽, 王强, 等. 太湖平原水网区雨洪响应特征及其影响因素 [J]. *水科学进展*, 2025, 36(3): 412-424. (LIN Z X, LUO S, WANG Q, et al. Changes of rainfall-flood response characteristics and its influencing factor over the Taihu river network plain region[J]. *Advances in Water Science*, 2025, 36(3): 412-424. (in Chinese))
- [4] TANG H W, YUAN S Y, CAO H. Theory and practice of hydrodynamic reconstruction in plain river networks[J]. *Engineering*, 2023, 24: 202-211.
- [5] 马明, 殷焱杰, 石亚东, 等. “引江济太”影响下太湖贡湖湾湖流时空变化 [J]. *湖泊科学*, 2024, 36(6): 1922-1932. (MA M, YIN Y J, SHI Y D, et al. Temporal and spatial changes of lake current in Gonghu Bay under the influence of water diversion from Yangtze River to Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2024, 36(6): 1922-1932. (in Chinese))
- [6] PRENTICE M J, ALLAN M G, BRUERE A, et al. Efficacy of an inflow diversion wall for managing eutrophication in two hydrologically connected lakes: a modelling study[J]. *Ecological Engineering*, 2026, 223: 107862.
- [7] ZHUANG W. Eco-environmental impact of inter-basin water transfer projects: a review[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(13): 12867-12879.
- [8] WANG K, WANG Z Z, LIU K L, et al. Assessing the floodwater utilization potential in a reservoir-controlled watershed: a novel method considering engineering regulations and an empirical case from China[J]. *Ecological Informatics*, 2022, 68: 101581.
- [9] 潘泓哲, 李一平, 唐春燕, 等. 多目标优化下平原河网引调水改善水环境效果评估 [J]. *湖泊科学*, 2021, 33(4): 1138-1152. (PAN H Z, LI Y P, TANG C Y, et al. Evaluation of the effect of water diversion on improving water environment in plain river network under the multi-objective optimization[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(4): 1138-1152. (in Chinese))
- [10] 杨帆, 黄玄, 范子武, 等. 城市河网工程群多目标联合调度优化模型 [J]. *中国防汛抗旱*, 2024, 34(9): 38-46. (YANG F, HUANG X, FAN Z W, et al. Multi-objective joint optimal regulation model of water works group in urban river network areas[J]. *China Flood & Drought Management*, 2024, 34(9): 38-46. (in Chinese))
- [11] 向龙, 韩雨芯, 赵梓鉴, 等. 圩区河网活水调控方案模拟与评价研究 [J]. *水电能源科学*, 2024, 42(6): 37-41. (XIANG L, HAN Y X, ZHAO Z J, et al. Simulation and evaluation for active flow regulation schemes in polder area river network[J]. *Water Resources and Power*, 2024, 42(6): 37-41. (in Chinese))
- [12] 王军, 蒋煜, 张兰, 等. 考虑水动力条件及水系连通的平原河网圩区畅流活水方案 [J]. *水电能源科学*, 2024, 42(4): 39-42, 61. (WANG J, JIANG Y, ZHANG L, et al. Schemes for smooth flow and active water in plain river network polder areas considering hydrodynamic conditions and water system connectivity[J]. *Water Resources and Power*, 2024, 42(4): 39-42, 61. (in Chinese))
- [13] 廖轶鹏, 黎东洲, 李云, 等. 面向水环境提升的平原城市河网水动力调控方案研究 [J]. *水利水运工程学报*, 2024(6): 14-23. (LIAO Y P, LI D Z, LI Y, et al. Research on hydrodynamic regulation schemes for water environment improvement in plain urban river networks[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2024(6): 14-23. (in Chinese))
- [14] HORVÁTH K, VAN ESCH B, VREEKEN T, et al. Potential of model predictive control of a polder water system including pumps, weirs and gates[J]. *Journal of Process Control*, 2022, 119: 128-140.
- [15] 袁赛瑜, 陈逸鸿, 罗霄, 等. 知识数据双驱动有感潮河网水动力智能模拟方法 [J]. *水科学进展*, 2025, 36(1): 28-38. (YUAN S Y, CHEN Y H, LUO X, et al. Knowledge-and data-driven intelligent simulation method for tidal river network hydrodynamics[J]. *Advances in Water Science*, 2025, 36(1): 28-38. (in Chinese))
- [16] 张文晴, 侯精明, 王俊琿, 等. 耦合 NSGA-II 算法与高精度水动力模型的 LID 设施优化设计方法研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 2022, 33(4): 133-142. (ZHANG W Q, HOU J M, WANG J H, et al. Optimization design method of LID facilities coupling NSGA-II algorithm and high-precision hydrodynamic model[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2022, 33(4): 133-142. (in Chinese))
- [17] 宋明明, 张建云, 刘艳丽, 等. 南方典型城市化流域降雨极值及概率特征研究 [J]. *水力发电学报*, 2021, 40(9): 1-13. (SONG M M, ZHANG J Y, LIU Y L, et al. Evolution and probability distribution of precipitation extreme values in typical urbanized basin in Southern China[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2021, 40(9): 1-13. (in Chinese))
- [18] 王静, 李娜, 王杉. 考虑圩区分布的平原河网区暴雨洪涝分析模型建立 [J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2020, 18(1):

- 70-79. (WANG J, LI N, WANG S. Establishment of numerical model for simulation of storm flooding in flat river network area considering polders distribution: a case study of Jiaying City, China[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2020, 18(1): 70-79. (in Chinese))
- [19] 罗赞, 张翔宇, 董增川, 等. 基于物理机制耦合深度学习的黄河干流流量演进模拟[J]. *水科学进展*, 2025, 36(2): 217-229. (LUO Y, ZHANG X Y, DONG Z C, et al. Simulation of river flow evolution in the Yellow River main stream based on the coupling of physical mechanisms and deep learning[J]. *Advances in Water Science*, 2025, 36(2): 217-229. (in Chinese))
- [20] BAO Y F, LIU P, LIN F Q, et al. Surrogate model of flooding loss to alleviate computational burden in reservoirs operation[J]. *Journal of Hydrology*, 2025, 662: 134087.
- [21] 田传冲, 魏婧, 黄冬菁. 基于水动力水质联合调控的温州市主城区平原河网引水规模研究[J]. *水电能源科学*, 2019, 37(4): 44-47. (TIAN C C, WEI J, HUANG D J. Study on the scale of water diversion of plain river network in the main urban area of Wenzhou City based on the hydrodynamic and water quality united-control model[J]. *Water Resources and Power*, 2019, 37(4): 44-47. (in Chinese))
- [22] 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 S, LI Y P, CHENG Y X, 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))
- [23] 贺蔚, 章雪彤, 何文浩, 等. 基于改进 TOPSIS 法的平原河网水动力水质补水方案优选[J]. *水科学进展*, 2025, 36(4): 707-716. (HE W, ZHANG X T, HE W H, et al. Optimal selection of hydrodynamic-water quality replenishment schemes in plain river networks on the basis of the improved TOPSIS method[J]. *Advances in Water Science*, 2025, 36(4): 707-716. (in Chinese))
- [24] 阮俞理, 张建云, 王乐扬, 等. 长江和黄河流域降水丰枯遭遇及不确定性分析[J]. *水科学进展*, 2024, 35(6): 865-876. (RUAN Y L, ZHANG J Y, WANG Y Y, et al. Analysis of precipitation wetness-dryness encountering and its uncertainty in the Yangtze River and Yellow River Basins[J]. *Advances in Water Science*, 2024, 35(6): 865-876. (in Chinese))
- [25] 刘章君, 郭生练, 许新发, 等. Copula 函数在水文水资源中的研究进展与述评[J]. *水科学进展*, 2021, 32(1): 148-159. (LIU Z J, GUO S L, XU X F, et al. Application of Copula functions in hydrology and water resources: a state-of-the-art review[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(1): 148-159. (in Chinese))
- [26] 郭元, 王路瑶, 陈能志, 等. 极端降水下的城市地表-地下空间洪涝过程模拟[J]. *水科学进展*, 2023, 34(2): 209-217. (GUO Y, WANG L Y, CHEN N Z, et al. Simulation of the flood process in urban surface-underground space under extreme rainfall[J]. *Advances in Water Science*, 2023, 34(2): 209-217. (in Chinese))
- [27] CHEN J L, CHEN K, ZHU Y H. Hybrid CNN-LSTM-attention model for enhanced reference crop evapotranspiration estimation toward optimized irrigation scheduling[J]. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2026, 25: 102545.
- [28] ZHANG C C, ZHOU Y Y, LU F, et al. Assessing the performance and interpretability of the CNN-LSTM-Attention model for daily streamflow forecasting in typical basins of the eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15: 82.

## Study on multi-objective coordinated hydrodynamic regulation methods for plain polder areas\*

CHENG Xu<sup>1,2</sup>, WU Xiufeng<sup>1</sup>, DAI Jiangyu<sup>1</sup>, WU Shiqiang<sup>1,2</sup>, CHENG Lei<sup>2</sup>, YANG Fan<sup>1</sup>, LI Zixiang<sup>1</sup>

(1. *The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China*)

**Abstract:** Plain polder areas are characterized by low-lying terrain and are highly susceptible to the combined impacts of external flooding and internal waterlogging. Insufficient hydrodynamic conditions are a key limiting factor for improving water environment in these regions. To address the subjectivity and difficulty of achieving global optimization associated with traditional regulation methods, this study takes the Dadang polder in the Taihu Basin as the study area. Joint inner-outer polder hydrological scenarios were constructed using a Copula function. The InfoWorks ICM model was employed to simulate the hydrodynamic processes within the polder area, and a surrogate model integrating CNN-LSTM-SelfAttention architecture was coupled with a genetic algorithm to perform multi-objective coordinated optimization of hydrodynamic regulation. The results show that the addition of a single diversion sluice increased the water exchange rate from 1.72% to 36.69%, which was further improved to 49.82% after coordinated optimization of gate-pump operation. Under the scenario of external flooding and heavy rainfall, the channel water level could be stably maintained below the flood warning level while remaining above the minimum control water level after water withdrawal. Furthermore, the duration guarantee rates of flow velocity and discharge in the river network were significantly improved. These findings can provide theoretical and technical support for flood control and water environment improvement in plain polder areas.

**Key words:** hydrodynamic regulation; water system connectivity; coordinated sluice-pump regulation; multi-objective optimization; plain polder areas

\* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No. 2023YFC3208701) and the Graduate Thesis Fund of Nanjing Hydraulic Research Institute, China (No. Yy124013).