

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

张晓峰¹, 石永杰², 刘俊¹, 宋炳坤¹, 高衍¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国生态城市研究院, 天津 300467)

摘要:以望虞河西岸的甘露圩和荡北圩为研究区, 构建水动力-水质模型, 选取恰当的水动力、水质和经济成本指标构建活水调度多目标评价指标体系, 采用层次分析法和熵权法主客观相结合确定指标权重, 决策单圩活水调度最优方案, 并与圩区联合调度方案比较活水调度效果。结果表明: 利用多目标评价指标体系可有效确定活水调度最优方案; 甘露圩最优调度方案为陈家角闸和甘露港闸共同引水, 徐家浜闸站以 $6\text{ m}^3/\text{s}$ 流量抽排; 荡北圩最优调度方案为黄塘河闸和五星河北闸引水, 珠桥河闸站和五星河闸站共以 $9\text{ m}^3/\text{s}$ 流量抽排; 与单圩活水调度相比, 两圩联合调度后畅流活水效果更优。

关键词: 圩区; 多目标评价; 活水调度; 层次分析法; 熵权法; 望虞河西岸

中图分类号: TV213.4; X522

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2024)03-0080-08

Multi-objective optimization of flowing water dispatch schemes in western polder area of Wangyu River based on AHP-entropy weight method//ZHANG Xiaofeng¹, SHI Yongjie², LIU Jun¹, SONG Bingkun¹, GAO Yan¹(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. China Eco-city Academy, Tianjin 300467, China)

Abstract: Taking Ganlu and Dangbei polders in the western polder area of the Wangyu River as the study area, a hydrodynamic and water quality coupling model was constructed, and appropriate parameters of hydrodynamic, water quality, and economic costs were selected to construct a multi-objective evaluation indicator system for flowing water dispatch. The weights of the indicators are determined through a combination of the analytic hierarchy process (AHP) and entropy weight method. The optimal flowing water dispatch scheme for each individual polder is determined, and the effectiveness of these schemes are compared with the jointly coordinated flowing water dispatch scheme for the polder area. The results show that the multi-objective evaluation index system effectively determines the optimal flowing water dispatch scheme. For Ganlu Polder, the optimal scheme involves jointly diverting water from the Chenjiajiao Sluice and Ganlugang Sluice, with the Xujiabang Sluice discharging at a flow rate of $6\text{ m}^3/\text{s}$. For Dangbei Polder, the optimal scheme involves diverting water from the Huangtang River Sluice and Wuxing River North Sluice, with the Zhuqiao River Sluice and Wuxing River Sluice jointly discharging at a flow rate of $9\text{ m}^3/\text{s}$. Compared with individual flowing water dispatch schemes, the jointly coordinated flowing water dispatch for both polders exhibits superior effectiveness in ensuring smooth water flow.

Key words: polder area; multi-objective evaluation; flowing water dispatch; AHP; entropy weight method; west bank of Wangyu River

城市化和工业化进程的不断加快, 使得平原河网地区入河污染物增加, 河流水环境恶化, 水污染加重。针对这一问题, 我国在不放松控源截污力度的同时, 逐渐通过活水调度等方式发挥水利工程生态效益的水环境治理措施提高自净能力和水环境容量^[1-2]。吕学研等^[3]指出, 在坚持控源截污这一先

决条件的同时, 通过调度水闸、泵站等水利工程引入优质水, 促进水体流动, 可有效改善河网水动力条件; 许益新等^[4]在张家港市等平原河网地区开展了调水工程研究, 证明科学的活水调度为恢复水生态系统良性循环提供了有力的支撑; 陈庆江等^[5]利用河网水动力数值模拟和现场观测, 验证了活水调度

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471015)

作者简介: 张晓峰(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: 2035319896@qq.com

通信作者: 刘俊(1968—), 男, 教授, 博士, 主要从事城市防洪与排水、城市水资源优化配置研究。E-mail: ljohhai@163.com

对水环境的改善效果。但目前的活水调度实践多是针对不同调度方案,以水质指标为主进行单污染因子或多污染因子评价,或结合河道水体水动力条件^[6]进行比较和评价,未能建立相互联系的综合体系,且少有将经济因素纳入考虑,难以协调水质、水动力、经济成本等目标整体评价活水调度,从而确定最优的多目标方案。

望虞河西岸地区位于太湖流域武澄锡虞区锡澄片区,区域内人口稠密,经济发展势头强劲。由于引江济太工程,该地区水环境治理工作更有利于保障太湖水质^[7],但该地区河网复杂,水利工程众多,圩区密集,约占锡澄片圩区的 90%,污染负荷重且圩区建设一定程度上改变了河流水文特性,破坏了水系连通性和水体自然流动性^[8-9],自净能力不足。其中,甘露圩和荡北圩是望虞河西岸圩区的典例,两圩地势低洼,为满足防洪排涝需求,修筑了大量阻水工程,人口稠密,工业、生活污染源较多,水环境状况不理想,且由于紧邻望虞河,随着引江济太进入常态化,望虞河西控工程的组合调度方式复杂多样,圩区水环境更加敏感,闸泵等水利工程的联合调度对两圩水环境影响较其他区域将更为显著^[10]。同时,国家 4A 级旅游景区荡口古镇核心景观区域坐落于此,为彰显荡口古镇的“水文化”特色,其水环境要求也更加严格,水环境标准须相应提高,活水需求较高。

选取位于太湖流域的望虞河西岸圩区中的甘露圩和荡北圩为研究区,统筹考虑水质改善、水动力及经济成本等因素,在合理选择相关指标与权重确定方法的基础上,构建活水调度多目标评价指标体系,决策两圩各自最优活水调度方案,同时考虑圩区联合调度,对比联合调度前后的调度效果,以期有望虞河西岸及太湖锡澄片圩区常态化活水调度提供科学依据与技术支持。

1 研究区概况

甘露圩和荡北圩位于无锡市望虞河西岸鹅湖镇,其中甘露圩总面积 19.91 km²,地面高程 3.9 ~ 5.5 m,荡北圩总面积 10.81 km²,地面高程 4.2 ~ 5.1 m。研究区为典型的平原河网圩区,降水充沛,多年平均降水量 1 119 mm;水系发达,以望虞河、九里河、伯渎港、张塘河、黄塘河、刘潭桥河(接徐冲桥港)构建成“二纵四横”骨干河网水系格局;圩内水利工程众多,主要包括甘露圩内的陈家角闸、甘露港闸站、界泾关闸站、徐家浜闸站、北鲍圩排涝站及荡北圩内的黄塘河闸、五星河北闸、珠桥河闸站、五星河闸站、角上排涝站、新生河套闸、解放桥排涝站,水利工程规模见表 1。

表 1 主要水利工程规模

圩区名称	工程	所在河道	闸门规模		泵站规模/ (m ³ /s)	控制水位/m
			闸孔净宽/m	闸顶高程/m		
甘露圩	陈家角闸	对浜河	4	5.5		3.5
	甘露港闸站	甘露港	6	5.5/4.8	6	3.6
	界泾关闸站	后塘河	4	5.5/4.8	6	3.6
	徐家浜闸站	向阳河	4	5.5	6	3.6
	北鲍圩排涝站	北鲍圩河			1	3.6
荡北圩	黄塘河闸	黄塘河	4	5.5		3.6
	五星河北闸	五星河	5	5.5		3.6
	珠桥河闸站	珠桥河	4	5.1	4	3.6
	五星河闸站	五星河	6	5.1	5	3.6
	角上排涝站	角上浜			0.5	3.6
	新生河套闸	新生河	8	5.5/4.8		3.6
	解放桥排涝站	解放桥河			0.5	3.6

2 研究方法

2.1 水动力-水质模型构建

2.1.1 模型选取及构建

统筹考虑研究区河网特征、水文特性以及工程布置情况,选用 MIKE11 模型作为构建研究区水动力-水质模型的工具^[11-12],对活水调度水环境改善效果进行模拟分析。模型构建时将计算边界向西拓至走马塘,重点加密概化研究区内河网、水工建筑物及污染源数据,河网概化共概化河道 89 条,水工建筑物 50 余处;在分析研究区污染现状的基础上,污染源概化主要考虑 NH₃-N、COD。选取 2019 年望虞河逐时水位系列数据作为水动力边界条件,九里河、走马塘、伯渎港设置为常水位边界。

2.1.2 模型参数率定

汛期水量充沛,河流水系以防洪排涝为主,一般不会采用引调水改善河道水环境,考虑实际情况,选择非汛期水位数据进行水动力及水质模块率定,主要参数取值如下:地表最大储水量 15 mm、根区最大储水量 150 mm、地表径流系数 0.8、壤中流时间常数 1 000 h、基流时间常量 2 000 h。由于研究区非汛期无逐时水位资料且日内水位变化不大,分别选取 2019 年 10—11 月望虞河实测水位、计算范围内甘露站 2019 年 10—11 月逐日平均水位实测数据作为模型的边界条件、率定目标进行率定,结果见图 1,并选择 2019 年 12 月、2020 年 2—3 月两个阶段的望虞河实测水位作为模型的边界条件,将模拟结果与甘露站逐日平均水位的实测水位过程对比进行验证。经计算,2019 年 10—11 月、2019 年 12 月、2020 年 2—3 月 3 个时段水位率定结果和验证结果的纳什效率系数(NSE)分别为 0.930、0.914、0.912,均较接近 1;均方根误差(RMSE)分别为 0.019、0.021、0.022,均小于 0.1,说明构建的模型精度满足要求,计算结果

可信度高,可用于描述河网水动力情况。

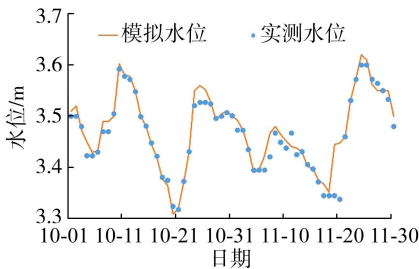


图1 模型模拟与实测水位对比(2019 年)

水质模块率定参数主要包括衰减系数 K 和扩散系数 D 。通过对研究区河道水质现状和主要污染因子的分析, $\text{NH}_3\text{-N}$ 是首要污染因子, 在率定水质参数时, 为充分保证模型可靠性, 同时率定研究区 28 个河道水质监测断面的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 COD(首、次要污染因子)。选取 2019 年 10—11 月每日 8 时 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 COD 实测数据的均值进行率定, 率定结果见图 2, 选取 2019 年 12 月每日 8 时 28 个水质监测断面 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 COD 实测数据的均值进行验证。经计算, $\text{NH}_3\text{-N}$ 率定结果和验证结果的平均绝对百分比误差 (MAPE) 分别为 6.6% 和 7.2%, COD 率定结果和验证结果的 MAPE 值分别为 7.8% 和 8.3%, 均在小于 10% 的合理范围内, 说明构建的模型较为可靠, 可用于描述实际河网水环境变化规律。

2.2 活水调度多目标评价指标体系构建

2.2.1 指标选取

在遵循目的性、层次性、科学性、可比性、可操作

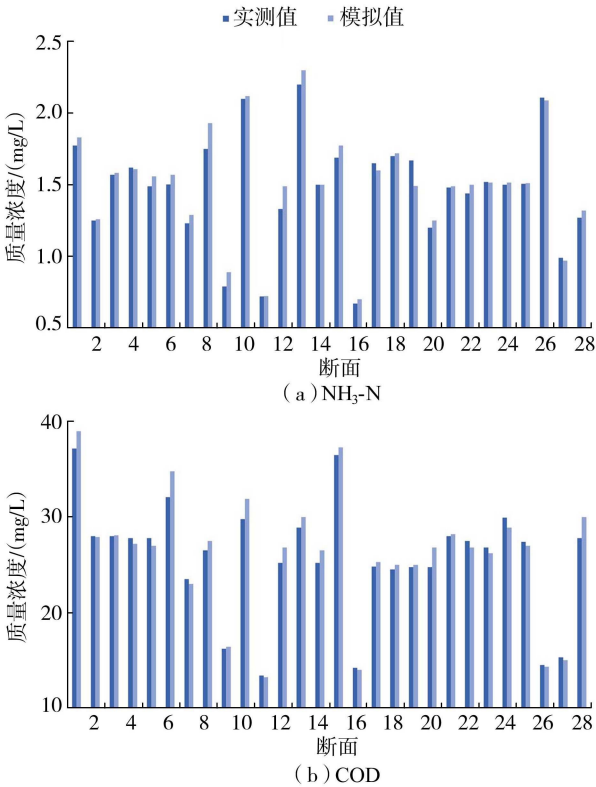


图2 模型模拟与实测水质对比

性、可获取性等基本原则的基础上, 通过查阅大量文献资料、标准规划和征询相关领域的专家学者意见, 结合研究区域实现河网畅流活水的主体需求, 选择了水质改善度参数、水力连通性参数和经济成本参数等 3 类指标, 具体指标及计算方法见表 2。

表2 选取的指标及计算方法

指标分类	具体指标名称	计算公式	指标性质	备注
水质改善度参数	水质达标率	$R = N_{\text{达标}} / N$	正向指标	衡量水功能区达标情况和河流水环境改善状况
	质量浓度变化指数	$P = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\rho_{0i} - \bar{\rho}_i}{\rho_{0i} + \bar{\rho}_i}$	正向指标	从水体污染物浓度变化方面, 以污染物浓度降低程度与原浓度和调度方案浓度之和的比值反映水质变化趋势与程度
	$\text{NH}_3\text{-N}$ 加权平均质量浓度	$\rho = \sum_{i=1}^N \alpha_i \rho_i$	负向指标	反映活水调度对河网水质改善效果, 将现状下研究区各水质监测断面的综合污染指数归一化处理, 将其作为各断面的污染权重系数
	水质标准差	$S_A = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\rho_i - \bar{\rho})^2}$	负向指标	从污染物分布均匀性角度反映在调度时间内研究区整体的水质空间分布特征, 补充说明浓度变化指数指标无法体现的水质改善空间差异性
水力连通性参数	平均流速	$v = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i$	正向指标	反映调度方案使区域河网水体置换速率及活化程度
	活水段占比	$P_F = N_{v > 0.10} / N$	正向指标	平原河网地区当河道流速大于 0.10 m/s 时 ^[13] , 溶解氧浓度和饱和度趋于稳定, 水体自净能力的增速趋于平缓, 此时水质改善较优
	滞水率	$P_S = N_{v < 0.02} / N$	负向指标	当平原河网地区水体流速低于 0.02 m/s 时 ^[14-15] , 即形成滞水, 水体复氧能力与自净能力极低, 此时水质较差, 不利于水生生物生长
	流速标准差	$S_v = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v})^2}$	负向指标	描述在调度时间内研究区河网水力连通情况和水动力改善效果空间分布状况, 流速标准差较大时区域河网内可能存在局部流速突变的情况, 将破坏水生生物的生长环境
经济成本参数	泵站引排流量		负向指标	反映在调度时间内, 为实现畅流活水而消耗的工程运行费用与设备折损费用等显性经济成本

注: $N_{\text{达标}}$ 为达水功能区标准的水质监测断面数; N 为水质监测断面数; ρ_{0i} 为 i 断面现状 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度, mg/L; ρ_i 为 i 断面在活水调度方案下的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度, mg/L; $\bar{\rho}$ 为各断面 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度均值, mg/L; α_i 为 i 断面的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度权重系数; v 为调度方案河道平均流速, m/s; v_i 为 i 断面在调度方案下水体流速, m/s; $N_{v > 0.10}$ 为水体流速大于 0.10 m/s 的水质监测断面数; $N_{v < 0.02}$ 为水体流速基本处于滞流状态 ($v < 0.02$ m/s) 的水质监测断面数。

2.2.2 评价指标体系及权重计算

在充分分析研究区水质现状与活水现状的基础上,构建活水调度多目标评价指标体系,利用层次分析法-熵权法组合赋权。层次分析法^[16]通过构建判断矩阵,由专家等根据各指标的相对重要程度以确定权重,可以充分反映指标实际含义;熵权法^[17]是一种基于数据本身的方法,可避免各评价指标权重的主观性,使评价结果更加科学客观,该组合赋权方法兼顾了单一主观赋权、客观赋权的优点^[18-19],提高了权重的准确性和可信度。评价指标体系(图3)由目标层A、准则层B和指标层C构成,其中目标层为畅流活水总目标,准则层为水质改善度、水力连通性和经济成本,指标层包含9项指标,其统计时段均在调度时段内。

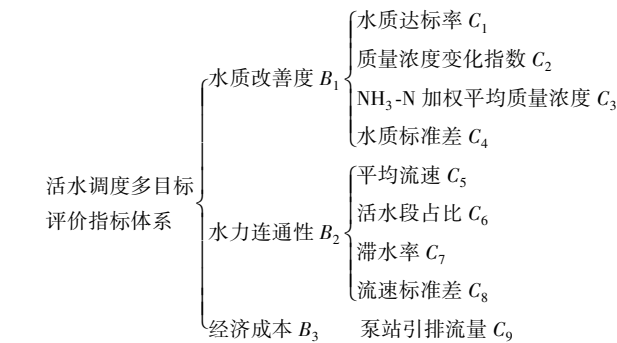


图3 活水调度多目标评价指标体系

根据建立的活水调度多目标评价指标体系,从指标层由下而上逐层计算指标权重值。由于不同指标的取值区间不一致,为了更便捷地进行准则层综合评价,先对各项指标进行取值标准化处理。各方案指标的计算结果经标准化处理后取值范围为[0,1],根据评价标准和标准化公式,当指标标准化值为1时,该指标分级为优;指标标准化值在[0.6,1)范围内时,该指标分级为良;指标标准化值在(0,0.6)范围内时,该指标分级为中;指标标准化值为0时,该指标分级为差。

在进行指标标准化处理后,采用以下公式计算准则层的指标:

$$y_i = \sum_{j=1}^m w_{ij} u_{ij} \tag{1}$$

式中: y_i 为准则层*i*的综合评价价值; m 为准则层*i*的指标个数; w_{ij} 为准则层*i*指标*j*的权重; u_{ij} 为准则层*i*指标*j*的标准化值。

指标层采用熵权法赋权,当熵值 $e_{ij} \rightarrow 1$,用传统熵权法计算指标权重时, e_{ij} 微小的变化可能引起权重值较大变化,易导致指标权重产生较大误差。因此,采用改进后的熵值计算公式^[20],即

$$w_{ij} = \begin{cases} (1 - \bar{e}_{ij}) w_{0j} + \bar{e}_{ij} w'_j & e_j < 1 \\ 0 & e_j = 1 \end{cases} \tag{2}$$

其中

$$\bar{e}_{ij} = \frac{\sum_{j=1}^n e_{ij}}{n} \quad (e_{ij} \neq 1)$$
$$w_{0j} = (1 - \bar{e}_{ij}) / \sum_{j=1}^n (1 - \bar{e}_{ij})$$
$$w'_j = (1 + \bar{e}_{ij} - e_{ij}) / \sum_{j=1}^n (1 + \bar{e}_{ij} - e_{ij})$$

式中: $\bar{e}_{ij}$ 为所有不为1的熵值平均值; n 为指标个数; w_{0j} 、 w'_j 为熵值分离量级权重。

最后,将计算得出的每一项指标权重根据所属准则层进行归一化处理,得到指标层各指标权重值。

采用层次分析法确定准则层指标权重,在建立递阶层次结构后构造判断矩阵,并进行一致性检验。针对目标层畅流活水的目标,通过广泛征求专家意见,按照层次分析法1~9标度构建判断矩阵为 $B =$

$$(b_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 4 \\ 0.5 & 1 & 3 \\ 0.25 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}。经计算,判断矩阵B$$

的最大特征根 $\lambda_{\max} = 3.018$,一致性指标为0.009,判断矩阵 B 阶数为3,随机一致性指标为0.58,则一致性比值为 $0.016 < 0.1$,通过一致性检验。因此,目标层综合评价时,各准则层指标权重分别为0.558、0.320、0.122。

2.3 活水调度方案设计

为方便评价与比较方案模拟效果,以开启引水闸的数量对方案进行分组,将开1、2、3台闸分别定义为模式1、模式2、模式3。各圩区工程数量及调度组合方式众多,因此需要通过必要的模拟和定量定性分析,排除不合理的、实践价值小的工程调度组合。

2.3.1 甘露圩活水调度方案设计

陈家角闸与北鲍圩排涝站距离较近,通过试验方案模拟与分析可知,陈家角闸与北鲍圩排涝站均开启时,在动力抽排下,望虞河水从陈家角闸进入对浜河,但很快又通过北鲍圩河退入望虞河,无法惠及甘露圩更多区域;陈家角闸和北鲍圩排涝站均关闭时,甘露圩北片无清水补给,难以改善水环境。因此甘露圩方案设计中关于陈家角闸和北鲍圩排涝站的调度组合主要模拟陈家角开闸、北鲍圩排涝站关泵和陈家角关闸、北鲍圩排涝站开泵两种调度方式。将甘露圩引水闸和排水泵进行组合,得到甘露圩活水调度方案集,见表3,经前期模拟与筛选,比选出模式1、模式2、模式3的畅流活水效果较优的方案,分别为方案1-3、2-2、3-1。

2.3.2 荡北圩活水调度方案设计

相较荡北圩其他区域,荡北圩内的4A级景区荡口古镇对水质要求更为严格。前期模拟结果显

表3 甘露圩活水调度方案

开闸引水情况	方案	陈家角闸调度方式	北鲍圩排涝站调度方式(抽排流量)	甘露港闸站调度方式(抽排流量)	界泾关闸站调度方式(抽排流量)	徐家浜闸站调度方式(抽排流量)
模式1	1-1	开闸	关泵	开泵(6 m ³ /s)	关闸关泵	关闸关泵
	1-2	开闸	关泵	开泵(6 m ³ /s)	开泵(6 m ³ /s)	关闸关泵
	1-3	开闸	关泵	开泵(6 m ³ /s)	关闸关泵	开泵(6 m ³ /s)
	1-4	开闸	关泵	开泵(6 m ³ /s)	开泵(6 m ³ /s)	开泵(6 m ³ /s)
	1-5	关闸	开泵(1 m ³ /s)	开闸关泵	开泵(6 m ³ /s)	关闸关泵
	1-6	关闸	开泵(1 m ³ /s)	开闸关泵	关闸关泵	开泵(6 m ³ /s)
	1-7	关闸	开泵(1 m ³ /s)	开闸关泵	开泵(6 m ³ /s)	开泵(6 m ³ /s)
	1-8	关闸	开泵(1 m ³ /s)	开泵(6 m ³ /s)	开闸关泵	关闸关泵
	1-9	关闸	开泵(1 m ³ /s)	开泵(6 m ³ /s)	开闸关泵	开泵(6 m ³ /s)
模式2	2-1	开闸	关泵	开闸关泵	开泵(6 m ³ /s)	关闸关泵
	2-2	开闸	关泵	开闸关泵	关闸关泵	开泵(6 m ³ /s)
	2-3	开闸	关泵	开闸关泵	开泵(6 m ³ /s)	开泵(6 m ³ /s)
	2-4	开闸	关泵	开泵(6 m ³ /s)	开闸关泵	关闸关泵
	2-5	开闸	关泵	开泵(6 m ³ /s)	开闸关泵	开泵(6 m ³ /s)
	2-6	关闸	开泵(1 m ³ /s)	开闸关泵	开闸关泵	开泵(6 m ³ /s)
模式3	3-1	开闸	关泵	开闸关泵	开闸关泵	开泵(6 m ³ /s)

示,当黄塘河闸关闭时,打开圩内其他闸进行引水,古镇河污染物浓度降幅在 15% 以内;当黄塘河闸打开引水时,古镇河污染物浓度降幅达到 40% 以上,水质改善更为明显;对于荡北圩南部解放-角上排区(主要引排闸泵工程为新生河套闸和角上排涝站),当打开新生河套闸引张塘河水入排区,同时角上排涝站以 0.5 m³/s 的流量配合抽排,可使解放-角上排区在满足控制水位的条件下实现畅流活水。在此基础上将荡北圩引排闸泵进行组合,得到荡北圩活水调度方案集,见表 4。经前期模拟与筛选,比选出模式 1、模式 2、模式 3 的畅流活水效果较优的方案,分别为方案 1-1、2-3、3-1。

表4 荡北圩活水调度方案

开闸引水情况	方案	五星河北闸调度方式	五星河闸站调度方式(抽排流量)	珠桥河闸站调度方式(抽排流量)
模式1	1-1	关闸	关闸关泵	开泵(4 m ³ /s)
	1-2	关闸	开泵(5 m ³ /s)	关闸关泵
	1-3	关闸	开泵(5 m ³ /s)	开泵(4 m ³ /s)
模式2	2-1	开闸	关闸关泵	开泵(4 m ³ /s)
	2-2	开闸	开泵(5 m ³ /s)	关闸关泵
	2-3	开闸	开泵(5 m ³ /s)	开泵(4 m ³ /s)
	2-4	关闸	开闸关泵	开泵(4 m ³ /s)
模式3	3-1	开闸	开闸关泵	开泵(4 m ³ /s)

2.3.3 圩区联合调度方案设计

甘露圩和荡北圩联合调度后,整体活水调度在顺应“由北向南、由东向西”引排格局的基础上从望虞河引水到甘露圩,再通过徐家浜站和包更上闸由庆安河、浩桥河进入黄塘河,最后入荡北圩,活水路径见图 4。考虑穷举法计算量巨大,将甘露圩及荡北圩的较优方案进行合理组合。界泾关闸站距甘露圩、荡北圩交界河道较远,引水量较少,对荡北圩影

响较小,圩区联合调度时不考虑甘露圩活水方案 3-1(界泾关闸站开闸);五星河闸站距甘露圩、荡北圩交界河道较远,当来水条件相同时,五星河闸站开闸与开泵影响基本一致,圩区联合调度时仅需考虑荡北圩活水调度方案 3-1、2-3 中其一即可,因此圩区联合调度方案主要考虑甘露圩 1-3、2-2 和荡北圩 1-1、2-3 的组合,组合方案见表 5。



图4 圩区联合调度活水路径示意图

3 结果与分析

对各方案进行模拟分析并提取出各方案模拟后

表 5 圩区联合调度方案

方案	甘露圩					荡北圩			
	陈家角闸 调度方式	北鲍圩排涝 站调度方式	甘露港闸站调度 方式(抽排流量)	界泾关闸站 调度方式	徐家浜闸站 抽排流量	黄塘河闸 调度方式	五星河北闸 调度方式	五星河闸站调度 方式(抽排流量)	珠桥河闸站 抽排流量
1	开闸	关泵	开泵(6 m ³ /s)	关闸关泵	6 m ³ /s	开闸	关闸	关闸关泵	4 m ³ /s
2	开闸	关泵	开泵(6m ³ /s)	关闸关泵	6 m ³ /s	开闸	开闸	开泵(5 m ³ /s)	4 m ³ /s
3	开闸	关泵	开闸关泵	关闸关泵	6 m ³ /s	开闸	关闸	关闸关泵	4 m ³ /s
4	开闸	关泵	开闸关泵	关闸关泵	6 m ³ /s	开闸	开闸	开泵(5 m ³ /s)	4 m ³ /s

的典型水质监测断面的流量、流速、水位、NH₃-N 质量浓度等水动力、水质基础数据,将其进行标准化处理并按照活水调度多目标评价指标体系进行计算,得到各方案活水效果的评价结果。

3.1 甘露圩活水调度方案

甘露圩活水调度方案的定量评价情况见表 6。

甘露圩畅流活水最优方案是模式 2 中的 2-2。具体调度方式为:打开陈家角闸和甘露港闸共同引水,徐家浜站开泵 6 m³/s 排水,其水质改善度为 0.962,水力连通性为 0.875,经济成本为 1,畅流活水评价结果为 0.939。

3.2 荡北圩活水调度方案

荡北圩活水调度方案的定量评价情况见表 7。

荡北圩畅流活水最优方案是模式 2 中的 2-3。

具体调度方式为:打开黄塘河闸和五星河北闸共同引水,珠桥河闸站开泵 4 m³/s 和五星河闸站开泵 5 m³/s排水,同时打开新生河套闸,角上排涝站 0.5 m³/s抽排,促进荡北圩解放-角上排区活水,其水质改善度为 0.743,水力连通性为 0.811,经济成本为 0.8,畅流活水评价结果为 0.772。

3.3 圩区联合调度方案

圩区联合调度方案指标标准化值及方案综合评价结果见表 8。

圩区联合调度后,对甘露圩、荡北圩的水质改善度、水力连通性及综合评价结果与两圩单独活水调度结果进行对比。方案 1 ~ 4 中河网最高水位在 3.50 ~3.55 之间,水位降低且满足控制水位的要求。对于甘露圩的活水效果而言,方案 1 与方案 2

表 6 甘露圩活水调度方案指标标准化值及评价结果

方案	指标层									准则层			目标层
	水质达标率	质量浓度变化指数	NH ₃ -N 加权平均质量浓度	水质标准差	平均流速	活水段占比	滞水率	流速标准差	泵站引排流量	水质改善度	水力连通性	经济成本	畅流活水
1-3	1.000	1.000	1.000	0.821	0.968	1.000	0.950	0.616	0.750	0.956	0.888	0.750	0.909
2-2	1.000	1.000	1.000	0.847	0.792	0.979	0.950	0.763	1.000	0.962	0.875	1.000	0.939
3-1	1.000	0.570	0.928	0.859	0.804	0.756	0.950	0.849	1.000	0.810	0.837	1.000	0.842

表 7 荡北圩活水调度方案指标标准化值及评价结果

方案	指标层									准则层			目标层
	水质达标率	质量浓度变化指数	NH ₃ -N 加权平均质量浓度	水质标准差	平均流速	活水段占比	滞水率	流速标准差	泵站引排流量	水质改善度	水力连通性	经济成本	畅流活水
1-1	0.645	0.622	0.811	0.543	0.567	0.320	0.867	1.000	1.000	0.655	0.676	1.000	0.704
2-3	0.867	0.692	0.829	0.588	0.787	0.644	1.000	0.832	0.800	0.743	0.811	0.800	0.772
3-1	0.867	0.414	0.784	0.662	0.519	0.014	0.867	1.000	1.000	0.677	0.581	1.000	0.686

表 8 圩区联合调度方案指标标准化值及评价结果

方案	圩区	指标层									准则层			目标层
		水质达标率	质量浓度变化指数	NH ₃ -N 加权平均质量浓度	水质标准差	平均流速	活水段占比	滞水率	流速标准差	泵站引排流量	水质改善度	水力连通性	经济成本	畅流活水
1	整体	1.000	1.000	1.000	0.667	0.789	0.895	0.913	0.902	0.375	0.936	0.922	0.540	0.885
	甘露圩	1.000	1.000	1.000	0.859	1.000	1.000	0.950	0.616	0.750	0.982	0.932	0.800	0.944
	荡北圩	0.645	1.000	0.822	0.557	0.725	0.320	0.867	1.000	1.000	0.755	0.742	1.000	0.781
2	整体	1.000	1.000	1.000	0.634	0.894	0.956	1.000	0.808	0.360	0.948	0.935	0.240	0.881
	甘露圩	1.000	1.000	1.000	0.863	1.000	1.000	0.950	0.631	0.750	0.985	0.957	0.800	0.953
	荡北圩	1.000	1.000	0.836	0.603	1.000	0.644	1.000	0.822	0.800	0.863	0.887	0.840	0.868
3	整体	1.000	1.000	1.000	0.638	0.685	0.792	0.913	0.052	0.700	0.943	0.862	0.760	0.895
	甘露圩	1.000	1.000	1.000	0.709	0.921	0.978	0.950	0.763	1.000	0.992	0.919	1.000	0.970
	荡北圩	0.645	1.000	0.823	0.592	0.725	0.792	0.867	1.000	1.000	0.760	0.740	1.000	0.783
4	整体	1.000	1.000	1.000	0.709	0.792	0.821	1.000	0.841	1.000	0.959	0.907	0.600	0.898
	甘露圩	1.000	1.000	1.000	0.871	0.935	0.978	0.950	0.781	1.000	0.992	0.948	1.000	0.979
	荡北圩	1.000	1.000	0.836	0.603	1.000	0.644	1.000	0.832	0.800	0.871	0.885	0.840	0.872

(方案3与方案4)中甘露圩调度方式与其单圩调度方案1-3(2-2)相同,与对照组1-3、2-2相比,方案1与方案2、方案3与方案4中甘露圩的水质改善度、水力连通性和综合评价效果均提升5%、2.5%、3%以上,其中方案4提升效果最为明显。对于荡北圩的活水效果而言,方案1与方案3(方案2与方案4)荡北圩调度方式与其单圩调度方案1-1(2-3)相同,与对照组1-1、2-3相比,方案1与方案3、方案2与方案4中荡北圩的水质改善度、水力连通性和综合评价效果均提升9%、15%、10%以上,其中方案4对水力连通性和综合评价效果的提升效果最明显。可见,甘露圩和荡北圩联合调度可降低圩区河道水位;与单圩活水调度效果相比,联合调度各方案水力连通性和水质改善效果得到进一步提升,其中方案4提升效果最佳,且圩区联合调度对荡北圩的提升效果更为显著。

4 结 论

- a. 科学合理的闸泵调度方式可使研究区达到较优的畅流活水效果,河网水环境得到明显改善。其中甘露圩最优活水调度方案为2-2,陈家角闸和甘露港闸共同引水,徐家浜闸站以6 m³/s流量抽排,此时水质改善度0.962,水力连通性0.875,畅流活水评价结果0.939;荡北圩最优活水调度方案为2-3,黄塘河闸和五星河北闸引水,珠桥河闸站和五星河闸站共以9 m³/s流量抽排,此时水质改善度为0.743,水力连通性为0.811,畅流活水评价结果为0.772。
- b. 对比两圩单独活水调度,圩区联合调度时各方案水力连通性及水质改善度均得到不同程度的提升,水环境状况得到进一步改善,其中最优方案为方案4,且两圩联合调度对荡北圩的提升效果更为显著。
- c. 圩区联合调度后甘露圩和荡北圩交界处河道畅通,在单一圩区活水调度的基础上增加圩内蓄水面积,使清水能惠及研究区更广的区域,畅流活水效果更佳,其他平原河网圩区进行活水调度时可适当考虑扩大范围。

参考文献:

[1] DAI Jiangyu, WU Shiqiang, WU Xiufeng, et al. Impacts of a large river-to-lake water diversion project on lacustrine phytoplankton communities [J]. Journal of Hydrology, 2020, 587: 124938.

[2] 张炜, 胡乐, 钱启蒙, 等. 基于Delft3D的苏州市渭塘镇河道水动力水质模拟[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43

(6): 96-102. (ZHANG Wei, HU Le, QIAN Qimeng, et al. Simulation of hydrodynamics and water quality for Weitang Town river network in Suzhou based on Delft3D [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(6): 96-102. (in Chinese))

[3] 吕学研, 吴时强, 张咏, 等. 调水引流工程生态与环境效应研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(4): 38-45. (LYU Xueyan, WU Shiqiang, ZHANG Yong, et al. Progress of ecology and environment effect of water diversion project[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2015, 26(4): 38-45. (in Chinese))

[4] 许益新, 王文才, 曾伟峰, 等. 调水引流改善平原河网水环境质量模拟[J]. 水资源保护, 2018, 34(1): 70-75. (XU Yixin, WANG Wencai, ZENG Weifeng, et al. Simulation on improvement of water environment in plain river network by water diversion [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(1): 70-75. (in Chinese))

[5] 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))

[6] 闫隰, 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))

[7] 庞琰瑾, 袁增伟. 平原河网区降雨径流污染负荷测算: 以太湖流域望虞河西岸为例[J]. 湖泊科学, 2021, 33(2): 439-448. (PANG Yanjin, YUAN Zengwei, Quantification of pollutants in rainfall-runoff in plain areas with dense river networks: a case study in the Western Bank of Wangyu River, Taihu Basin[J]. Journal of Lake Science, 2021, 33(2): 439-448. (in Chinese))

[8] YU Zhihui, WANG Qiang, XU Youpeng, et al. Dynamic impacts of changes in river structure and connectivity on water quality under urbanization in the Yangtze River Delta plain[J]. Ecological Indicators, 2022, 135: 108582.

[9] 胡祉冰, 逢勇, 胥瑞晨, 等. 走马塘排水对望虞河引水水质的影响[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 135-140. (HU Zhibing, PANG Yong, XU Ruichen, et al. Effect of Zoumatang drainage on water quality of Wangyu River diversion[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 135-140. (in Chinese))

[10] 周宏, 石永杰, 刘俊, 等. 太湖流域高度城镇化地区畅流活水多目标调度决策研究[J]. 湖泊科学, 2023, 35(4): 1279-1295. (ZHOU Hong, SHI Yongjie, LIU Jun, et al. Multi-criteria decision making of water transfer schemes

- in highly urbanized area of Lake Taihu Basin[J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35 (4): 1279-1295. (in Chinese))
- [11] 党晓戈,王世岩,刘畅,等. 基于 MIKE11 闸坝联合调控的北运河生态流量保障模拟[J]. 中国农村水利水电, 2021(7): 94-100. (DANG Xiaoge, WANG Shiyang, LIU Chang, et al. Ecological flow guarantee simulation based on Mike11 in North Canal Gate dams joint regulation [J]. China Rural Water and Hydropower, 2021 (7): 94-100. (in Chinese))
- [12] 高勋,陈星,卢娟娟,等. 台州主城区河道生态需水计算与水量调度[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(3): 55-61. (GAO Xun, CHEN Xing, LU Juanjuan, et al. Ecological water demand calculation and water volume scheduling for river channels in Taizhou's main urban area [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(3): 55-61. (in Chinese))
- [13] 胡鹏,杨庆,杨泽凡,等. 水体中溶解氧含量与其物理影响因素的实验研究[J]. 水利学报, 2019, 50(6): 679-686. (HU Peng, YANG Qing, YANG Zefan, et al. Experimental study on dissolved oxygen content in water and its physical influence factors [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(6): 679-686. (in Chinese))
- [14] 陈俪丹,高成,陈妍清,等. 考虑水质及水动力条件的滨江圩区最优活水方案[J]. 水电能源科学, 2021, 39(3): 16-19. (CHEN Lidan, GAO Cheng, CHEN Yanqing, et al. Optimal living water scheme of polder area along the Changjiang River considering water quality and hydrodynamic conditions [J]. Water Resources and Power, 2021, 39(3): 16-19. (in Chinese))
- [15] 沈鑫. 圩区水动力提升模拟研究:以昆山市吴淞圩为例 [D]. 南京:东南大学, 2020.
- [16] 陈义华. 数学建模的层次分析法[J]. 甘肃工业大学学报, 1997, 23 (3): 92-97. (CHEN Yihua. The analytic hierarchy process for mathematical modelling [J]. Journal of Gansu University of Technology, 1997, 23 (3): 92-97. (in Chinese))
- [17] 张欣莹,解建仓,刘建林,等. 基于熵权法的节水型社会建设区域类型分析[J]. 自然资源学报, 2017, 32(2): 301-309. (ZHANG Xinying, XIE Jiancang, LIU Jianlin, et al. Analysis on the regional type of water-saving society based on entropy weight method [J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(2): 301-309. (in Chinese))
- [18] 艾亚迪,魏传江,马真臻. 基于 AHP-熵权法的西安市水资源开发利用程度评价[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40 (2): 11-16. (AI Yadi, WEI Chuanjiang, MA Zhenzhen. Evaluation on water resources development and utilization degree based on AHP-entropy weight method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(2): 11-16. (in Chinese))
- [19] 郭金,顾冲时,何菁. 基于组合赋权二维云模型的堤防工程风险评价[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(6): 117-122. (GUO Jin, GU Chongshi, HE Jing. Risk assessment for levee engineering based on a two-dimensional cloud model with combination weighting [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(6): 117-122. (in Chinese))
- [20] 李兵,庄文化,孙海龙. 改进熵权法在岩石边坡生态护坡效果综合评价中的应用[J]. 中国水土保持, 2019(9): 58-63. (LI Bing, ZHUANG Wenhua, SUN Hailong. Application of improved entropy weight method in comprehensive evaluation of eco-engineering protection for rock slope [J]. Soil and Water Conservation in China, 2019(9): 58-63. (in Chinese))

(收稿日期:2023-06-07 编辑:俞云利)

(上接第 44 页)

- [15] SIM J I, YANG K H, JEON J K. Influence of aggregate size on the compressive size effect according to different concrete types[J]. Construction and Building Materials, 2013, 44(7): 716-725.
- [16] 吴智敏,徐世烺,刘红艳,等. 最大骨料粒径对混凝土双 K 断裂参数的影响[J]. 大连理工大学学报, 2000 (3): 358-361. (WU Zhimin, XU Shilang, LIU Hongyan, et al. Influences of maximum aggregate sizes on double-K fracture parameters of concrete [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2000(3): 358-361. (in Chinese))
- [17] ZHANG J, LEUNG C K Y, XU S. Evaluation of fracture parameters of concrete from bending test using inverse analysis approach [J]. Materials and Structures, 2010, 43(6): 857-874.
- [18] AMPARANO F E, XI Y, ROH Y S. Experimental study on the effect of aggregate content on fracture behavior of concrete[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2000, 67 (1): 65-84.
- [19] 李清富,张鹏. 塑性混凝土强度试验研究[J]. 混凝土, 2006 (5): 75-79. (LI Qingfu, ZHANG Peng. Experimental research on strength of plastic concrete [J]. Concrete, 2006(5): 75-79. (in Chinese))
- [20] 李家正,严建军,杨华全. 塑性混凝土在三峡工程中的应用研究[J]. 水力发电学报, 2009, 28 (1): 159-164. (LI Jiazheng, YAN Jianjun, YANG Huaquan. Application of plastic concrete in TGP [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28 (1): 159-164. (in Chinese))

(收稿日期:2023-05-08 编辑:骆超)