第36卷第5期 水资源与水工程学报 Vol. 36 No. 5
2025年10月 Journal of Water Resources & Water Engineering Oct., 2025

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2025.05.06

基于组合赋权云模型的平原河网水量水质评价模型研究

黄显峰[1], 谭毅苗[1], 赵同强[2], 郭晓茜[1]
(1.河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2.昆山市水务局, 江苏 昆山 215300)

摘　要:针对平原河网地区水质恶化问题,以昆山市高新区新江圩为例,首先构建水动力水质耦合模型,并提出基于组合赋权云模型的调度方案评价方法,制定不同调水方案,放入水动力水质模型中进行模拟研究,构建水质-水量评价指标体系;采用层次分析法求得主观权重以及熵权法和TOPSIS法求得客观权重,再利用博弈论纳什均衡手段求得各指标综合权重。对各指标进行评价等级范围划分,使用X条件云发生器求得等级隶属度,进行加权综合权重求和后得到各方案综合评价得分。评分按由高到低排名依次为方案五、方案七、方案三、方案四、方案六、方案二、方案一、初始调度方案,比选得到综合最优调度方案为调度方案五。采用本研究提出的方法优选出的方案能够在保证水质得以改善的同时,显著降低调水量,节约调度成本,可为平原区域通过调水改善水环境的研究提供参考。

关键词:平原河网; MIKE11; 水动力水质数值模拟; 评价指标体系; 组合权重; 云模型; 方案评价
中图分类号:TV213.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1672-643X(2025)05-0048-09

Water quality and quantity assessment of plain river etworks based on a combined weighting cloud model

HUANG Xianfeng[1], **TAN Yimiao**[1], **ZHAO Tongqiang**[2], **GUO Xiaoxi**[1]
(1. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*;
2. *Kunshan Water Authority*, *Kunshan* 215300, *China*)

Abstract: To address the water quality deterioration in plain river network areas, a case study of river scheduling schemes was carried out for the Xinjiangwei area of Kunshan High-Tech Zone. A hydrodynamic－water quality coupled model was first established, and an evaluation method for scheduling schemes based on a combined weighting cloud model was proposed. Various water transfer schemes were developed and then simulated by the coupled model to construct a water quality－quantity evaluation index system. The subjective weights of the indices were determined by the analytic hierarchy process (AHP), while the objective weights were obtained through the entropy weight and TOPSIS. The comprehensive weights of each index were then calculated by Nash equilibrium theory in game theory. Subsequently, the indices were classified into different grades, and the X-conditional cloud generator was employed to determine the membership degree of each grade. The comprehensive evaluation scores of all schemes were obtained by weighted summation of the comprehensive weights. The schemes were ranked in descending order as follows: scheme 5, scheme 7, scheme 3, scheme 4, scheme 6, scheme 2, scheme 1, and the initial scheduling scheme. According to the comparative analysis, scheme 5 was identified as the optimal comprehensive scheduling scheme. This scheme can ensure water quality improvement while minimizing the water transfer volume, providing a reference for research on water environment improvement through water transfer in plain river network regions.

Key words: plain river network; MIKE11; hydrodynamic－water quality numerical simulation; evaluation index system; combined weighting; cloud model; scheme evaluation

收稿日期:2025-03-11;　**修回日期**:2025-08-20
基金项目:国家自然科学基金项目(520031111)
作者简介:黄显峰(1980—),男,湖北麻城人,博士,副教授,主要从事水利水电系统优化调度研究。

1　研究背景

平原河网地区是我国的经济文化中心[1],是长三角一体化发展战略、京津冀协同发展战略和粤港澳大湾区发展战略等国家重大战略的实施地[2-3]。平原河网水生态、水环境的优劣直接影响平原河网地区的可持续发展[4],因此营造良好的水环境可推动平原河网地区高质量发展,对我国社会经济的可持续健康发展具有重要意义。

然而,平原河网所在区域的地势低洼且水系密集[5],河道内流速较小,水动力不足[6],导致其泄水能力降低,洪水涝水难以排出。此外,河道的流通性变差,也使得水体自净能力减弱[7],更易产生污水聚集的情况,从而引发水环境恶化、水生态退化等严重问题[8]。同时,随着社会经济的快速发展、城市化和工业化进程的不断加快[9]以及人类活动的持续干预,河道之间的连通性被削弱,加之城镇大量点源及非点源污染物排入河道,导致平原河网的水环境问题日益突出,严重制约了区域社会、经济、文化的发展[10]。因此,充分利用现有闸泵工程,合理高效地调控有限水资源,在改善河网水质的同时,尽量降低调水量、节约调度成本,从而达到综合改善效果最优,对平原河网水环境改善至关重要。

平原河网水动力条件复杂,且各河道的污染程度不同,在选择调水路线和调度方式时,必须考虑各河道的污染物分布情况,使区域内整体水质得以较大程度的提升。目前,相关研究主要集中在由流域性、区域性骨干河流构成的平原河网,对小型圩区内部河流的河网水环境问题研究较少。

2020 年,陈伟健[11]基于 MIKE11 模型对昆山市金华村圩区河网进行引调水方案模拟,采用灰色关联分析法评选出了综合效益最高的最佳引水量和引水时长;陈梦琳[12]基于改进 G1-熵权法构建了城市饮用水安全保障方案评价云模型,统筹考虑水量、水质、环境管理、风险应急和建设运营 5 个方面建立指标体系,评价比选出最优方案。2021 年,Delgado 等[13]采用灰色聚类分析法基于 pH 值、生化需氧量(biochemical oxygen demand, BOD)、化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)、总可溶性固形物(total suspended solids, TSS)等 7 个指标,评估了 Huallaga 河水质情况,有利于水质改善措施的提出。2022 年,门宝辉等[14]利用单因子指数法和灰色关联分析法评价了滦河承德段水质,并选取 GDP、人口等指标基于基尼系数法评价不同水环境容量分配方案,结果表明,环境效益权重较大的方案合理性更高;董金明等[15]基于 MIKE11 水文水质模型对宜兴城区河网的模拟结果,运用熵值法和层次分析法构建了综合评价体系定量评选出了改善效果最佳的水系连通方案。2023 年,Shiferaw 等[16]采用 EFDC 模型模拟 Geum 河在不同控制方案下的水量水质变化情况,基于水质指数(water quality index, WQI)法选取总磷(total phosphorus, TP)、总氮(total nitrogen, TN)等水质指标评价水质的改善结果。

综上,目前水质改善方案的评价方法主要集中于综合污染指数法、层次分析法、主成分分析法、灰色关联分析法、TOPSIS(technique for order preference by similarity to an ideal solution)法、云模型、模糊综合评价法等,其中云模型通过计算指标等级隶属度进行评价,可兼顾指标关联性、随机性与模糊性,适用范围较广。因此,本研究以改善区域水质为主要目标,以降低调水量和节约调度成本为次要目标,建立水动力水质耦合模型,对圩区不同调度方案进行模拟分析,构建基于层次分析法[17]、熵权法[18]、TOPSIS 法[19]的组合赋权云模型评价方法,科学直观地反映水质、水量两者之间的联系,评价各方案的综合改善效果,最终选取评分最高者作为综合最优调度方案。可为日后以水量调控为主要手段并综合考虑多方因素的条件下,改善平原河网水质的相关研究提供参考。

2　基于 MIKE11 的水动力水质耦合模型构建

2.1　水动力水质耦合模型构建过程

基于 MIKE11 的水动力 HD 模块与水质 AD 模块构建水动力水质耦合模型,主要是按研究区域实际情况生成指定模块运行时所需的文件,将所有文件输入模拟文件汇总模拟。模型构建过程共 7 步,分别为概化河网及河道断面、编辑闸泵调度规则、拟定时间序列文件、配置 HD 参数文件、配置 AD 参数文件、建立边界文件以及生成模拟文件。

2.2　模型率定与验证

模型率定与验证时,水动力模块选择水位日均值作为比对分析对象,水质模块则选用各污染物浓度作为比对分析对象。针对已有实测数据的时间段,分别进行模型模拟。在模型率定阶段,通过不断调整改变模拟文件中的糙率、扩散系数、衰减系数等各种参数,使得模拟数据与实测数据值不断接近。在模型验证阶段,通过对比模拟值与实测值,验证模

型是否构建合理,水动力 HD 模块采用纳什效率系数 NSE、均方根误差 $RMSE$ 和相对误差均值 MRE 作为评估指标;水质 AD 模块因水质实测浓度每月只有 1 个均值浓度,数据较少,故计算相对误差均值 MRE,若验证指标满足要求,说明模型构建成功,若不满足要求,则继续重新设置文件参数进行模拟,重新验证,重复以上步骤,直至评估指标符合要求,则模型构建成功。

3 基于组合赋权云模型的调度方案评价方法

调度方案的综合评价是以改善区域水质为主要目标,以降低调水量为次要目标,从水质与水量两项内容构建评价指标体系,使方案评价内容更加全面。

3.1 水质-水量评价指标体系构建

构建水质-水量评价指标体系,具体见表 1。

表 1 水质-水量评价指标体系

评价目标	一级指标	二级指标(单位)
调度方案综合改善效果	水质	河道 NH_3—N 末时浓度 (mg/L)
		河道 NH_3—N 最大浓度 (mg/L)
		河道 TP 末时浓度 (mg/L)
		河道 TP 最大浓度 (mg/L)
		河道 COD_{Mn}末时浓度 (mg/L)
		河道 COD_{Mn}最大浓度 (mg/L)
	水量	河道最高水位 (m)
		河道水位日内最大波动值 (m)
		圩区日调水量 (m^3)

注:NH_3—N 为氨氮,是一种营养素物质;TP 为总磷,是水中所有磷元素的总合;COD_{Mn}为化学需氧量高锰酸盐指数,代表在特定条件下水中可被氧化物质所耗氧量的总和。

3.2 指标体系组合赋权方法

本文选取层次分析法计算主观权重以及熵权法和 TOPSIS 法计算客观权重,采用博弈论纳什均衡手段并统筹考虑各方法的优劣计算综合权重。熵权法根据数据包含信息量大小计算权重,TOPSIS 法是通过比较数据与正理想目标值的接近程度来计算权重,两种方法的侧重点不同,结合使用可降低数据变化差异对客观权重计算所产生的影响。

3.2.1 *层次分析法确定主观权重* 构建 t 目标在 H 层级指标要素的判别矩阵 $A_{Ht} = (a_{ij})_{S_{Ht}\times S_{Ht}}$,$a_{ij}$ 为要素 i 对 j 的重要性判别标度值,且 $a_{ij} = 1/a_{ji}$。相对重要性共分 9 级,依据决策人自身经验与个人偏好进行打分判断,决策人通常为权威专家,重要性等级判别标度值含义见表 2;随后再进行判别矩阵一致性检验,RI_{Ht} 根据判别矩阵 A_{Ht} 的阶数 S_{Ht} 取值,具体标准见表 3。

表 2 指标重要性判别标度值及其含义

判别标度值	含义
1	i 与 j 的重要性程度相同
3	i 的重要性与 j 相比程度略微明显
5	i 的重要性与 j 相比程度较为明显
7	i 的重要性与 j 相比程度特别明显
9	i 的重要性与 j 相比程度极为明显
2、4、6、8	上述相邻判别标度的中间值

表 3 平均随机一致性系数 RI 取值标准

阶数	1	2	3	5	6	7
RI	0	0	0.58	1.12	1.24	1.32

3.2.2 *熵权法确定客观权重* 首先针对 m 个评价方案和 n 个评价指标构建初始数据矩阵 $\boldsymbol{P}$。

$$\boldsymbol{P} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \cdots & p_{mn} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中:p_{ij} 为第 i 个评价方案第 j 个指标的初始数据值,$i = 1,2,\cdots,m$,$j = 1,2,\cdots,n$。

再按指标类型进行标准化处理,得到标准化矩阵 $\boldsymbol{B}$,并计算信息熵值 E_j,最后确定熵权法的客观权重。

3.2.3 *TOPSIS 法确定客观权重* 首先针对 m 个评价方案和 n 个评价指标构建初始数据矩阵 $\boldsymbol{R}$,对 $\boldsymbol{R}$ 进行正向标准化处理,得到正向标准化矩阵 $\boldsymbol{S}$。正向指标标准化公式及逆向指标正向标准化公式分别见公式(2)、(3)。

$$s_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m}(r_{ij})^2}} \tag{2}$$

$$s_{ij} = \frac{r_{ij}^{-1}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m}(r_{ij}^{-1})^2}} \tag{3}$$

式中:r_{ij} 为初始数据矩阵 $\boldsymbol{R}$ 中的元素;s_{ij} 为正向标准化矩阵 $\boldsymbol{S}$ 中的元素;$i = 1,2,\cdots,m$,$j = 1,2,\cdots,n$。

再计算正、负理想目标 T^+、T^-、指标 j 的最优、最劣欧式距离 $D+j$、$D-j$,以及指标 j 与正理想目标的距离 L_j,最终确定 TOPSIS 客观权重。

3.2.4 *博弈论计算综合权重* 先建立权重向量集 $\boldsymbol{U}$,假定采用 k 种方法确定 n 个指标的权重,其中 k_1

种主观赋权方法,k_2 种客观赋权方法($k = k_1 + k_2$),构建 k 组指标权重向量 $u_l = \{u_{l1}, u_{l2}, \cdots, u_{ln}\}$,$l = 1, 2, \cdots, k$,得到权重向量集 $\boldsymbol{U}$。再计算最优线性组合权重系数 α',求得最优组合权重 ω^*。

$$\boldsymbol{U} = \{u_1^T, u_2^T, \cdots u_k^T\} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ u_{k1} & u_{k2} & \cdots & u_{kn} \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中:u_{l_j}为第 l 个赋权方法第 j 个指标的权重值,$l = 1, 2, \cdots, k$,$j = 1, 2, \cdots, n$。

3.3　调度方案云模型评价方法

3.3.1　*云模型的基本理论*　云模型于 1995 年由李德毅等[20] 提出,是兼顾样本模糊随机性的定性定量不确定转换模型,对样本数量以及彼此间相关性要求不高,兼容性较好,不但能求解指标权重,还可求解等级隶属度,从而对指标等级进行评价。

云模型引入特征参数期望 Ex,熵 En 和超熵 He,基于云发生器采用数学手段解决数据定性与定量之间的矛盾,实现二者之间的转换。其中,Ex 为样本均值,反映云滴的分布中心位置;En 反映云滴离散程度,满足"$3En$ 准则",即落在[$Ex - 3En, Ex + 3En$]区间内的云滴才可作为有效云滴进行计算;He 为 En 的熵,反映云滴厚度。

基础云模型呈正态云分布,设 $\boldsymbol{M}$ 为定量计算域,$\boldsymbol{M}$ 上的定性概念记为 C,定量值 $x \in \boldsymbol{M}$,满足,$x \sim N(Ex, En'^2)$,其中正态随机熵 $En' \sim N(En, He^2)$,$\mu(x)$为 x 对 C 的隶属度,其计算如公式(5)。

$$\mu(x) = \exp\left[-\frac{(x - Ex)^2}{2En'^2}\right] \tag{5}$$

3.3.2　*基于X条件云发生器计算等级隶属度*　本文按指标数据自身分布特点划分指标等级范围,共分为 4 个等级(Ⅰ ~ Ⅳ),因所有指标均为负向指标,故等级范围划分方向相同,以指标数据均值 $\bar{x}_j$ 作为 Ⅱ、Ⅲ 等级分界值,等级范围以 $\bar{x}_j$ 为中心对称分布,根据指标数据变化差异大小确定等级差百分比 ε,确保所有数据均能被评价等级涵盖,等级评分与各等级范围的划分见表 4。

表 4　评价指标等级评分及等级范围划分

评价等级(等级评分)	指标 j 等级范围
Ⅰ(95)	$[\bar{x}_j \times (1 - 2\varepsilon), \bar{x}_j \times (1 - \varepsilon))$
Ⅱ(85)	$[\bar{x}_j \times (1 - \varepsilon), \bar{x}_j)$
Ⅲ(75)	$[\bar{x}_j, \bar{x}_j \times (1 + \varepsilon))$
Ⅳ(60)	$[\bar{x}_j \times (1 + \varepsilon), \bar{x}_j \times (1 + 2\varepsilon)]$

使用 X 条件云发生器求解各指标等级隶属度,为保证计算精准度,取云滴数为 1 000,首先按等级求解指标 j 的特征参数 Ex_{ij}、En_{ij}、He(超熵 He 取经验值 0.005),再代入,重复计算 1 000 次,求解指标 j 在不同等级的隶属度 μ_{ij},得到隶属度矩阵 $\boldsymbol{D}$。

$$\begin{cases} Ex_{ij} = \dfrac{S_{ij,\max} + S_{ij,\min}}{2} \\ En_{ij} = \dfrac{S_{ij,\max} - S_{ij,\min}}{6} \end{cases} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{D} = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \cdots & \mu_{1n} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \cdots & \mu_{2n} \\ \mu_{31} & \mu_{32} & \cdots & \mu_{3n} \\ \mu_{41} & \mu_{42} & \cdots & \mu_{4n} \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中:$S_{ij,\max}$、$S_{ij,\min}$ 分别为指标 j 在等级 i 的上、下限值,$i = 1, 2, 3, 4$,$j = 1, 2, \cdots, n$;Ex_{ij} 为指标 j 在等级 i 的期望;En_{ij} 为指标 j 在等级 i 的熵。

3.3.3　*方案综合评价得分*　将指标 j 的等级评分与对应等级隶属度相乘得到该指标的评分值 G_j,再加权各指标综合权重 ω^* 求和得到方案综合评分 G。

$$G_j = 95 \times \mu_{1j} + 85 \times \mu_{2j} + 75 \times \mu_{3j} + 60 \times \mu_{4j} \tag{8}$$

$$G = \sum_{j=1}^{n} \omega_j^* G_j \tag{9}$$

4　实例研究

4.1　研究区域概况

新江圩位于昆山市高新区北部,东邻巴城镇,西接周市镇,总面积约 6.44 km^2。其水系分布呈"一横四纵"布局。圩区水面面积为 36.28 hm^2,现状水面率为 5.63%,圩内最低排涝水位为 2.20 m,圩内允许最高水位为 2.80 m。河道现状统计见表 5。

新江圩现有防洪排涝闸站共 10 个,其中龙江河北闸和大渔塘北闸不具备抽排能力,仅可作为闸门使用,闸宽 6 m。各防洪排涝闸站具体参数见表 6,闸站分布情况见图 1。

新江圩共有 11 个水质监测断面,其中五号河 3 个、龙江河、大渔塘、二号河、孝仁塘各 2 个。根据《高新区河道水质监测汇总表》,2024 年 1 月—2024 年 12 月新江圩河道的整体水质较差,主要污染指标为氨氮(NH_3—N)、总磷(TP)、化学需氧量(COD_{Mn}),全年圩内河道整体水质以Ⅳ类为主,枯水期部分时段为Ⅴ类水。根据现场勘察以及调研实测资料粗略估算各污染物浓度:NH_3—N 为 5.9 mg/L、TP 为 1.3 mg/L、COD_{Mn}为 42.6 mg/L。

表 5　新江圩河道现状统计表

序号	河道名称	河道类别	起点	终点	平均宽度/m	圩内段长度/m
1	杨林塘(圩区段)	圩外河道	茆沙塘	常泾河	60	4 305
2	茆沙塘(圩区段)	圩外河道	杨林塘	新塘河	36	2 168
3	新塘河(圩区段)	圩外河道	茆沙塘	常泾河	37	5 024
4	常泾河(圩区段)	圩外河道	杨林塘	新塘河	30	961
5	五号河	圩内河道	茆沙塘	常泾河	30	4 340
6	龙江河	圩内河道	杨林塘	新塘河	25	1 986
7	大渔塘	圩内河道	杨林塘	新塘河	25	1 704
8	二号河	圩内河道	杨林塘	新塘河	25	1 530
9	孝仁塘	圩内河道	杨林塘	新塘河	25	1 114

表 6　新江圩各防洪排涝闸站主要参数

序号	闸泵名称	河道名称	闸宽/m	泵站流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	泵站功率/kW
1	龙江站闸	五号河	5	5.1	195
2	龙江河北闸	龙江河	6		
3	龙江河南站闸	龙江河	6	3.2	130
4	大渔塘北闸	大渔塘	6		
5	二号河南闸	二号河	5	3.2	130
6	二号河北闸	二号河	6	3.2	130
7	新生北站	孝仁塘	5	3.2	130
8	五号河站闸	五号河	5	3.2	130
9	新江站闸	大渔塘	5	3.2	130
10	孝仁塘站闸	孝仁塘	5	2.0	80

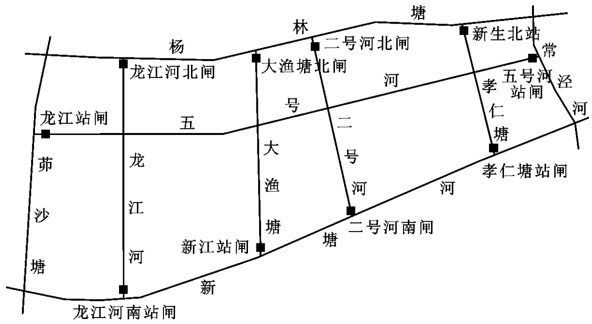

图 1　新江圩各防洪排涝闸站分布

4.2　水动力水质耦合模型构建、率定与验证

4.2.1　水动力水质耦合模型构建　根据研究区域实际情况,依次设置好河网、断面、闸泵调度规则、时间序列、HD 参数、AD 参数、边界文件后,将上述编辑完成的所有文件导入模拟文件中耦合处理,为保证模型稳定运行,时间步长取 30 s。模型运行过程中为确保稳定计算且不发散,要求克朗数 $C<1$。

4.2.2　水动力模型率定与验证　选择 2024 年 1 月 1 日—2024 年 5 月 31 日进行率定、2024 年 6 月 1 日—2024 年 12 月 1 日进行验证。圩外河道选用杨林塘典型断面的水位实测及模拟数据进行评估分析,圩内河道选取五号河作为代表河道进行水位日均值评估,评估指标为 *NSE*、*RMSE* 和 *REA*。

杨林塘评估结果:$NSE=0.993$、$RMSE=0.008\ 4$、$REA=0.22\%$,五号河评估结果:$NSE=0.973$、$RMSE=0.013\ 3$、$REA=0.44\%$,各指标评估结果均表明模型水动力模块模拟结果可信度高,故模型合理,可用于后续研究分析。杨林塘、五号河水位 2024 年全年率定与验证结果见图 2。

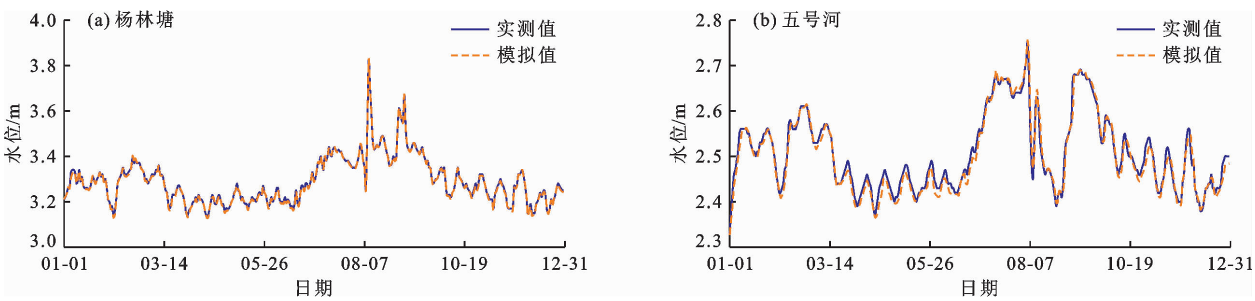

图 2　杨林塘、五号河水位 2024 年全年率定与验证结果

4.2.3　水质模型率定与验证　以相对误差均值 *MRE* 作为评估指标,对各河道内 NH_3—N、TP、COD_{Mn}的浓度值进行误差分析,结果见表 7。表 7 显示,所有河道水质指标浓度值均满足|*MRE*|<10% 的要求,表明水质模块模拟结果可信度高。结合水动力模块的评估结果,可以认为该水动力水质耦合模型精确度较高,模型合理,可进行后续研究分析。

4.3　研究区闸泵调度方案拟定与模拟

选定水质最差时段即 2024 年 1 月 1 日—2 月 26 日为调度计算期,每周调度规则相同。闸泵运行方式有 2 种:①闸泵启闭情况和运行日期保持与初始调度方案相同,闸门仅部分开启;②所有闸泵每天均参与调度运行。具体闸泵运行方式见表 8、9。设定 7 种调度方案,各方案的日调水量和闸泵运行方式见表 10。

表 7　新江圩各河道水质浓度值相对误差均值

序号	河道	相对误差均值 *MRE* /%		
		NH_3—N	TP	COD_{Mn}
1	杨林塘	6.90	8.22	5.47
2	五号河	5.91	6.54	5.86
3	龙江河	4.43	6.55	5.28
4	大渔塘	5.43	8.34	5.99
5	二号河	6.75	6.88	8.13
6	孝仁塘	5.20	7.02	6.16

表 8　调度方案闸泵运行方式①

序号	闸泵名称	闸宽/m	闸门运行情况	流量/($m^3\cdot s^{-1}$)	泵站运行情况
1	龙江河北闸	6	开闸 1 h (14:00—15:00)		
2	大渔塘北闸	6	开闸 1 h (07:00—08:00)		
3	二号河北闸	6	开闸 1 h (08:00—09:00)	3.2	关闭
4	新生北站	5	开闸 3 h (14:00—17:00)	3.2	关闭
5	龙江站闸	5	关闭	5.1	开泵 3 h (14:00—17:00)
6	五号河站闸	5	关闭	3.2	开泵 1 h (07:00—08:00)
7	龙江河南站闸	6	关闭	3.2	开泵 1 h (08:00—09:00)
8	新江站闸	5	开闸 1 h (07:00—08:00)	3.2	关闭
9	二号河南闸	5	关闭	3.2	开泵 1 h (09:00—10:00)
10	孝仁塘站闸	5	关闭	2.0	开泵 3 h (07:00—10:00)

表 9　调度方案闸泵运行方式②

序号	闸泵名称	闸宽/m	闸门运行情况	流量/($m^3\cdot s^{-1}$)	泵站运行情况
1	龙江河北闸	6	关闭		
2	大渔塘北闸	6	周二、四、六开闸 2 h (07:00—09:00)		
3	二号河北闸	6	周一、三、五开闸 2 h (07:00—09:00)	3.2	关闭
4	新生北站	5	开闸 3 h (14:00—17:00)	3.2	关闭
5	龙江站闸	5	关闭	5.1	开泵 3 h (14:00—17:00)
6	五号河站闸	5	关闭	3.2	开泵 4 h (06:00—10:00)
7	龙江河南站闸	6	关闭	3.2	关闭
8	新江站闸	5	开闸 4 h (06:00—10:00)	3.2	关闭
9	二号河南闸	5	关闭	3.2	关闭
10	孝仁塘站闸	5	关闭	2.0	开泵 3 h (07:00—10:00)

4.4　调度方案评价模型建立

4.4.1　评价指标体系的确定　新江圩内有 5 条河流,为衡量圩区整体的方案优劣,考虑按河道水面面积(河长×平均河宽)对其进行权重划分,各河道指标数据加权之和即为该调度方案的评价指标数据,所有指标均为成本型指标,即数据越小越优。经计

算,五号河、龙江河、大渔塘、二号河、孝仁塘所占权重分别为 0.451 2、0.172 1、0.147 6、0.132 6、0.096 5,评价指标数据见表 11。

表 10 各调度方案的日调水量和闸泵运行方式

调度方案	日调水量/m^3	闸泵每日运行方式
初始方案	111 240	①部分参与调度
方案一	111 240	②全部参与调度
方案二	122 760	①部分参与调度
方案三	122 760	②全部参与调度
方案四	148 320	①部分参与调度
方案五	148 320	②全部参与调度
方案六	171 000	①部分参与调度
方案七	171 000	②全部参与调度

4.4.2 评价指标组合赋权权重的计算 基于由 3 种赋权方法组成的权重集合,经计算得到归一化后的最优线性组合权重系数为:$\alpha_1^* = 1.214\ 3$,$\alpha_2^* = 1.430\ 5$,$\alpha_3^* = -1.644\ 8$,由此进一步求得综合权重,计算结果见表 12。

4.4.3 基于组合赋权云模型的调度方案评价 计算水质-水量评价指标体系的特征值,并对各评价指标进行等级划分,变化差异小的指标取 $\varepsilon = 5\%$,变化差异大的指标取 $\varepsilon = 20\%$。将各方案的指标数据输入 X 条件云发生器中,计算得到各方案的综合评价得分,具体结果见表 13。

由表 13 可知,调度方案五的综合评分最高,调度方案七次之,两方案各项指标的等级隶属度见表 14、15。

表 11 各调度方案评价指标数据汇总

调度方案	河道 NH_3—N 浓度/($mg \cdot L^{-1}$)		河道 TP 浓度/($mg \cdot L^{-1}$)		河道 COD_{Mn}浓度/($mg \cdot L^{-1}$)		河道最高水位/m	河道水位日内最大波动值/m	圩区日调水量/m^3
	末时	最大	末时	最大	末时	最大			
初始方案	1.369 5	1.573 6	0.291 3	0.335 5	8.628 1	10.578 4	2.769 3	0.231 0	111 240
方案一	1.379 4	1.592 0	0.291 9	0.339 1	8.720 1	10.735 9	2.631 0	0.125 0	111 240
方案二	1.319 9	1.516 7	0.279 6	0.324 0	8.291 6	10.155 3	2.750 3	0.175 9	122 760
方案三	1.334 8	1.542 5	0.281 3	0.328 6	8.410 1	10.362 7	2.644 6	0.125 2	122 760
方案四	1.257 2	1.459 3	0.263 4	0.310 6	7.874 3	9.733 2	2.766 9	0.232 9	148 320
方案五	1.254 4	1.452 5	0.261 6	0.308 8	7.874 8	9.711 1	2.672 4	0.126 3	148 320
方案六	1.235 1	1.422 9	0.258 4	0.303 8	7.723 3	9.477 7	2.757 9	0.227 7	171 000
方案七	1.242 4	1.443 3	0.259 1	0.307 4	7.797 5	9.646 6	2.712 5	0.164 3	171 000

表 12 评价指标组合权重

评价指标	层次分析法主观权重	客观权重		博弈论综合权重
		熵权法	TOPSIS 法	
河道 NH_3—N 末时浓度	0.142 8	0.082 2	0.095 1	0.134 6
河道 NH_3—N 最大浓度	0.058 1	0.075 3	0.093 3	0.024 8
河道 TP 末时浓度	0.216 3	0.093 4	0.094 8	0.240 3
河道 TP 最大浓度	0.075 1	0.076 6	0.094 2	0.045 8
河道 COD_{MN}末时浓度	0.130 2	0.077 9	0.095 0	0.113 4
河道 COD_{MN}最大浓度	0.058 1	0.072 6	0.093 5	0.020 7
河道最高水位	0.025 4	0.136 4	0.078 9	0.096 3
河道水位日内最大波动值	0.083 8	0.115 8	0.088 3	0.122 2
圩区日调水量	0.092 2	0.094 5	0.090 4	0.098 4

表 13　各调度方案的综合评分

调度方案	初始方案	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五	方案六	方案七
综合评分	68.49	72.91	77.20	79.52	78.94	84.33	78.90	80.22

表 14　调度方案五评价指标等级隶属度

评价指标	调度方案五指标数据	等级隶属度			
		Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
河道 NH_3—N 末时浓度/($mg \cdot L^{-1}$)	1.254 4	0.008 6	0.991 1	0.000 2	0
河道 NH_3—N 最大浓度/($mg \cdot L^{-1}$)	1.452 5	0.002 4	0.997 4	0.000 2	0
河道 TP 末时浓度/($mg \cdot L^{-1}$)	0.261 6	0.120 1	0.810 0	0.063 3	0.006 6
河道 TP 最大浓度/($mg \cdot L^{-1}$)	0.308 8	0.154 8	0.787 6	0.055 0	0.002 7
河道 COD_{MN}末时浓度/($mg \cdot L^{-1}$)	7.874 8	0.001 0	0.999 0	0	0
河道 COD_{MN}最大浓度/($mg \cdot L^{-1}$)	9.711 1	0	1.000 0	0	0
河道最高水位/m	2.672 4	0	0.993 8	0.006 2	0
河道水位日内最大波动值/m	0.126 3	0.985 4	0.014 6	0	0
圩区日调水量/m^3	148 320	0	0	1.000 0	0

表 15　调度方案七评价指标等级隶属度

评价指标	调度方案七指标数据	等级隶属度			
		Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
河道 NH_3—N 末时浓度/($mg \cdot L^{-1}$)	1.242 4	0.147 6	0.852 3	0.000 1	0
河道 NH_3—N 最大浓度/($mg \cdot L^{-1}$)	1.443 3	0.014 2	0.985 8	0.000 1	0
河道 TP 末时浓度/($mg \cdot L^{-1}$)	0.259 1	0.263 2	0.673 8	0.058 2	0.004 8
河道 TP 最大浓度/($mg \cdot L^{-1}$)	0.307 4	0.225 7	0.729 7	0.041 7	0.002 8
河道 COD_{MN}末时浓度/($mg \cdot L^{-1}$)	7.797 5	0.338 1	0.661 9	0	0
河道 COD_{MN}最大浓度/($mg \cdot L^{-1}$)	9.646 6	0	1.000 0	0	0
河道最高水位/m	2.712 5	0	0.096 2	0.903 8	0
河道水位日内最大波动值/m	0.164 3	0.004 4	0.963 3	0.032 3	0.000 1
圩区日调水量/m^3	171 000	0	0	0.001 5	0.998 5

5　讨　论

评分结果表明,当调水量相同时,不同闸泵运行方式所引起的最高水位、日内水位波动性的不同对综合评分也具有一定的影响;按闸泵运行方式②调度的方案的最高水位、日内水位波动性比对应按方式①调度的方案小,其余指标数据相差不大,故而按方式②调度的方案其综合评分均高于相应按方式①调度的方案。

根据不同方案对各河道的水质改善效果分析可知,调度方案六、七对河道水质的改善效果最好,其调水量也最大,这与佘淑园等[21]研究得出的“增大流量是改善河道水质的重要途径,随水量的增大,河道水质趋好”的结论一致。方案四、五的改善效果略次于上述两方案,在综合评分中体现为该 4 个方案的分值差距较小。且方案五和方案七河道最高水位主要隶属于等级Ⅱ和Ⅲ,水位日内最大波动值主要隶属于等级Ⅰ和Ⅱ,圩区日调水量主要隶属于等级Ⅲ和Ⅳ,表明日调水量越小,则水量指标项的隶属等级越高,相应的指标评分也越高。

最终选取调度方案综合评价得分最高者即调度方案五作为综合最优调度方案,该方案综合评分为 84.33,日调水量为 148 320 m^3,所有闸泵均按固定时段参与调度运行。

评价结果整体反映了调水量越多,则水质改善效果越好,综合评分越高的一般规律,与谭茜等[22]

提出的“调水工程通过增加水体流动性和促进沉积物再悬浮影响水质，能有效提升水体置换效率，改善水质”的结论一致；方案五对河道水质的改善效果略次于方案七，方案三的水质改善效果不如方案四和方案六，但方案五和方案三的综合评分值均高于比对方案，也体现了水量指标的加入对综合评分的影响，证明基于改进云模型的调度方案评价方法是合理可行的。

此外，本研究提出的组合赋权云模型方法在平原河网水量水质评价中展现出了独特优势：一方面，通过整合水质和水量指标，实现了多目标协同优化；另一方面，云模型能够有效处理数据的模糊性和随机性，结合博弈论赋权确保了权重的科学性和平衡性。在不同的评价研究中，云模型均发挥了很大的作用，如陈东[23]基于 Criteria 赋权法和完全自适应噪声集合经验模态分解法计算指标综合权重，并采用云模型对马金溪河生态治理后的环境影响效果进行评价；夏进喜等[24]构建测点监控模型，结合云模型提取云特征值并计算云相似度，实现了单测点的局部安全评价，将云模型的评价结果作为 D-S 证据理论的基本概率分配解决了其需要主观构建而导致的主观性问题；侯公羽等[25]提出一种基于博弈论组合赋权-云模型的综合效益评价模型对紫云山抽水蓄能电站进行实例分析，充分验证了所构建模型的有效性与准确性。

6 结 论

本研究以昆山市高新区新江圩为研究区域，针对平原河网地区水环境问题，构建了基于 MIKE11 的水动力水质耦合模型，并提出了基于组合赋权云模型的调度方案评价方法，系统评价了不同调度方案的水质改善效果及经济适用性。

(1)基于 MIKE11 的水动力 HD 与水质 AD 模块，构建了水动力水质耦合模型，采用纳什效率系数(*NSE*)、均方根误差(*RMSE*)和相对误差均值(*MRE*)对水位和水质进行率定与验证，结果表明模型模拟精度较高，能够有效反映研究区的水动力与水质变化规律。

(2)提出了以水质改善为主要目标、兼顾水量的评价指标体系，采用层次分析法与熵权法-TOPSIS 法结合博弈论确定综合权重，并基于云模型计算各方案的综合评分。该方法能够科学、直观地反映水质与水量之间的协同关系。

(3)通过模拟分析 7 种调度方案，发现调水量与水质改善效果呈正相关，但调水量并非唯一决定因素。综合考虑水质与水量指标，方案五(日调水量 148 320 m^3，闸泵运行方式②)综合评分最高(84.33)，在保证水质改善效果的同时，显著降低了调水量及人力物力消耗，具有较高的经济适用性。

参考文献：

[1] 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.

[2] 沈大利. 平原河网城市河道水质变化和内涝风险预测技术研究[D]. 杭州：浙江大学，2022.

[3] 吴浩云，陆志华. 太湖流域治水实践回顾与思考[J]. 水利学报，2021，52(3)：277-290.

[4] 丁钰童，莫李娟，黄冬菁，等. 基于 MIKE11 的引排水改善平原河网水环境质量模拟研究[J]. 中国农村水利水电，2023(9)：166-170 +176.

[5] 魏清福. 平原河网圩区水利工程生态调度方案研究：以苏州吴中城南包围为例[J]. 人民长江，2022，53(10)：31-36.

[6] 何 岩，金国裕. 昆山市平原河网地区活水畅流工程方案设计和效果[J]. 黑龙江水利科技，2020，48(8)：79-81.

[7] 李 悦，李志威，胡旭跃，等. 大通湖区水系连通工程改善水环境的效果评估[J]. 水资源与水工程学报，2021，32(4)：116-123.

[8] 黄 嵩. “溇港圩田”河网水动力模拟与调控研究[D]. 郑州：华北水利水电大学，2022.

[9] 马迎群，曹 伟，赵艳民，等. 典型平原河网区水体富营养化特征、成因分析及控制对策研究[J]. 环境科学学报，2022，42(2)：174-183.

[10] 闫 毓，袁赛瑜，唐洪武，等. 上海蕰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 +365.

[11] 陈伟健. 平原圩区河网水质改善模拟及评价研究[D]. 南京：河海大学，2020.

[12] 陈梦琳. 基于云模型的城市饮用水安全保障方案评价体系研究[D]. 雅安：四川农业大学，2020.

[13] DELGADO A, CUADRA D, SIMON K, et al. Evaluation of water quality in the lower Huallaga River Watershed using the grey clustering analysis method[J]. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2021, 12(1): 481-492.

[14] 门宝辉，牛晓赟，刘灿均，等. 滦河承德段水环境容量计算及初始分配[J]. 水资源保护，2022，38(2)：168-175 +189.

[15] 董金明，石永杰，周文琦，等. 基于 APH – EWM 的宜兴城区水系连通方案定量评价[J]. 水电能源科学，2022，40(4)：45-49.

(下转第 64 页)

[6] LI Xuan, HOU Jingming, CHAI Jie, et al. An online data-driven evolutionary algorithm-based optimal design of urban stormwater-drainage systems[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2022, 148(11): 04022041.

[7] DINIZ G J D, SCUDELARI A C, DE MEDEIROS J D F. Performance of low impact development techniques in flood hazard mitigation in a closed urbanised catchment for extreme precipitation events [J]. Urban Water Journal, 2024, 21(8): 987-1002.

[8] WANG Zhe, ZHANG Zhiming, LIU Qianting, et al. Study on the coordinated regulation of storage and discharge mode in plain cities under extreme rainfall: a case study of a southern plain city[J]. Water, 2025, 17(9): 1385.

[9] 郭元裕,白宪台,雷声隆. 南方圩(湖)区最优水面率研究[J]. 水利学报,1982(7):8-17.

[10] 周建康,朱春龙,罗国平. 平原圩区设计排涝流量与水面率关系研究[J]. 灌溉排水学报,2004(4):64-66+70.

[11] 姜欣彤,廖小龙,全栩剑,等. 基于 Landsat 的粤港澳大湾区水面率演变分析[J]. 人民珠江,2022,43(6):21-27.

[12] 刘璐铭,殷丽雪,颜 军,等. 一种遥感影像快速计算水面率的方法[J]. 遥测遥控,2023,44(4):96-101.

[13] 夏成亮,王 露,许 生,等. 海绵城市建设背景下江苏宿迁市中心城区水面率与内涝关系研究[J]. 中国防汛抗旱,2024,34(8):6-10+21.

[14] 柯文杰. 基于多目标优化的城镇适宜水面率研究[J]. 水利规划与设计,2024(8):27-32+144.

[15] 何 旸,程麒铭,苏义鸿,等. 基于参数全局敏感性分析的 LID 设施空间布局优化研究[J]. 水资源保护,2025,41(3):194-203.

[16] 陈 燕,黄 瑾,蔡丽婧. 适用于初雨截流的降雨-径流定量表达方法与设计雨型[J]. 中国给水排水,2025,41(4):49-53.

[17] 印发《广州市中心城区暴雨公式及计算图表》的通知[R]. 广州:广州水务局,2011.

[18] 黄浩辉,植石群. 广州市暴雨强度公式编制与设计暴雨雨型研究技术报告[R]. 广州:广东省气候中心,2022.

[19] 邓培德. 城市暴雨的积水计算[J]. 给水排水,1998,24(7):6-12+3.

[20] 唐 明,周涵杰,许文涛,等. 蓄涝水面率选择对城市内涝治理效果的影响及分区研究[J]. 水利水电技术(中英文),2021,52(12):12-24.

[21] 施奇妙,徐宗学,卢兴超,等. 基于局部和全局方法的 SWMM 模型参数敏感性分析[J/OL]. 水利水电技术(中英文),1-23[2025-07-22]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1746.TV.20241227.1138.002.html.

[22] 史书华,陈 星. 基于调蓄能力与水系结构关系分析的城市合理水面率研究:以常熟市为例[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2020,42(2):1-6.

(上接第 56 页)

[16] SHIFERAW N, KIM J, SEO D. Identification of pollutant sources and evaluation of water quality improvement alternatives of a large river[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(11): 31546-31560.

[17] 张明锐,段宏伟,徐 杰,等. 基于层次分析法与熵权法的城市轨道交通牵引变压器健康状态评估[J]. 城市轨道交通研究,2025,28(1):138-143.

[18] 温达鑫. 基于 AHP-熵权-云模型的水利工程施工安全评价研究[J]. 水利科技与经济,2023,29(7):93-97.

[19] 高建强,张 浩,危日光. 基于熵权-TOPSIS 法的风光柴储互补发电系统容量优化配置[J]. 动力工程学报,2025,45(2):300-306.

[20] 李德毅,孟海军,史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展,1995(6):15-20.

[21] 佘淑园,刘高东,靳皓琛,等. 基于水质水量联合调度的岷江干流污染应急处置研究[J/OL]. 水电能源科学,2025(9): 29-33[2025-07-16]. https://doi.org/10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20241970.

[22] 谭 茜,田 鑫,吴 师,等. 引江济淮工程试调水期间菜子湖及巢湖水质响应变化研究[J]. 水利规划与设计,2025(6):58-65+74.

[23] 陈 东. 基于 CRITIC-CEEMDAN-CM 的河流生态治理后环境影响评价方法[J]. 陕西水利,2025(5):74-77.

[24] 夏进喜,聂俊坤,庄志华,等. 基于云模型-改进 D-S 证据理论耦合的土石坝渗压安全评价[J]. 中国农村水利水电,2025(8):184-190.

[25] 侯公羽,马骁赟,孙晓荣,等. 基于组合赋权-云模型的抽水蓄能电站综合效益评价[J/OL]. 工程科学与技术,1-15[2025-07-16]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20250513.0946.002.html.