

岳浩, 郑永路, 徐斌, 等. 洪泽湖多目标水量调度决策模型及其应用[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(2): 258-266. YUE H, ZHENG Y L, XU B, et al. Multi-objective operation and decision-making model of Hongze Lake and its application[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(2): 258-266. (in Chinese)

洪泽湖多目标水量调度决策模型及其应用

岳浩¹, 郑永路², 徐斌¹, 郑祖国³, 钟平安¹, 周佳敏², 张雨薇⁴

(1. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098; 2. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222;
3. 浙江省青田县水利局, 浙江 丽水 323900; 4. 中国雄安集团生态建设投资有限公司, 河北 保定 071700)

摘要: 针对洪泽湖水量利用与生态水位维持这一矛盾开展多目标水量调度决策方法研究, 构建贴近适宜生态水位(生态效益)、缺水率最小、引水量最小、入湖水量改变度最小等目标的多目标调度模型, 考虑生态效益目标与水资源利用目标的不可共度性及决策者偏好模糊性特征, 采用多目标模糊决策法从非劣解集中筛选最适宜调度方案。结果表明: 多目标模型解集反映生态效益和经济社会效益的置换关系, 贴近适宜生态水位的调控方式在一定程度上降低洪泽湖调蓄能力, 与水资源利用形成矛盾关系; 模糊决策法筛选的均衡调度策略可以有效反映决策者的偏好情况, 并提供适用于不同情景的优化调度方式; 生态目标优先方案通过减少供水、增加引水量、调节入湖水量等方式有效补充生态用水, 可将生态水位偏离差降低至 0.30 m, 可为生态优先原则下的适宜调度策略制定提供参考。

关键词: 适宜生态水位; 多目标模型; 水库调度; 模糊多目标决策; 模糊优选法; 洪泽湖

中图分类号: TV213.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0026

开展水库多目标调度以兼顾经济社会多目标需求与生态过程平衡, 是减轻河湖生态系统压力、实现人水和谐可持续发展的有效手段。在水库调度实践中, 通过水库调蓄能力调控水位、出库过程以维持水库上下游水位、水量过程达到生态保障需求, 其难点在于如何协调多目标之间竞争性用水保障的矛盾关系, 形成一类多目标优化调度与决策。类似于河流水生态系统的保护要求, 水库调度主要通过控制水位的涨落在适宜生态水位附近以维持湖泊湿地生态系统的稳定并发挥其生态功能。现有的多目标调度模型中, 对于生态需水的分析和处理主要有 3 种形式: 把生态水量或水位作为优化模型求解中的约束条件, 采用最小、适宜生态流量作为水库出库基流约束, 即条件约束型^[1]; 把生态需求作为优化模型的目标函数, 即目标函数型^[2]; 在构建的价值目标模型中分析生态水量或水位的经济效益, 即价值型^[3]。Tang 等^[4]利用环境平均缺水量目标保证生态需水并作为多目标模型的一部分; Xu 等^[5]以下泄流量和生态需水为依据构建生态风险指

标均衡多种效益; Dai 等^[6]利用实际水位与生态水位之差量化洞庭湖的生态效益; Wang 等^[7]以命中率的形式集结 6 个生态流量特征指标并以此构建生态流量目标函数; Li 等^[8]则进一步引入水文变异指标来描述生态流量情况。随着生态保护要求的逐步提高以及生态需水理论的不断发展和完善, 近期研究^[9-10]认为湖泊生态水位是指维持湖泊生态系统结构、功能和过程完整性所需的水位情势, 包括水位的变化范围和过程两方面, 既要求水位的变化控制在一定的区间范围以内, 同时还要尽可能贴近多样化生态功能发挥的水位涨落过程, 以往仅基于最小生态流量约束或目标、价值型的建模方式并不能完全反映这一特征。

此外, 水库调度的关键还包括如何解决多目标决策难题。一方面, 约束湖泊水位的变化范围和涨落过程相当于约束了湖泊的径流调节能力, 会对湖泊其余的综合利用目标产生负面影响; 另一方面, 调度方案并不唯一, 决策的困难还在于生态效益的价值难以与综合利用的效益/成本一并准确度量, 调度方案的决策高度取决于决策者的偏好, 表现出模

收稿日期: 2022-10-23 修回日期: 2023-03-01 网络出版时间: 2023-04-13

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.tv.20230412.1036.001.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3000104); 国家自然科学基金项目(52279010; 52121006); 江苏高校“青蓝工程”资助项目

作者简介: 岳浩(1998—), 男, 河北张家口人, 主要从事水资源规划与管理研究。E-mail: yh1005@hhu.edu.cn

通信作者: 徐斌(1986—), 男, 湖南长沙人, 教授, 博士, 主要从事水资源规划与管理研究。E-mail: xubin_hhu@hhu.edu.cn

糊不确定性。模糊数学是解决模糊决策问题的有效手段,不同学者基于直觉模糊集^[11]、犹豫模糊集^[12]、区间模糊集^[13]等理论从不同角度提出了模糊决策方法。张吉军^[14]提出模糊层次分析法,利用模糊数表示目标间二元比较关系,并通过去模糊化处理最终得到准确权重,但去模糊化过程也舍弃了部分模糊信息。模糊排序方法直接利用模糊数进行排序^[15-17],虽然较为全面但计算过程往往复杂,且难以直观反应其决策思路。陈守煜等^[18]提出系统层次分析模糊优选理论,利用模糊从优隶属度逐层进行方案的优劣评价并得到最终的方案优选结果。该方法计算过程简洁,同时充分考虑伴随生态效益产生的模糊因素,可以得到模糊环境下的最适宜调度策略。

针对上述问题,本研究以洪泽湖为研究对象开展水库多目标调度决策模型研究及应用,构建贴近

适宜生态水位过程的多目标优化调度模型,分析生态与河道外用水之间的水量竞争关系,在此基础上利用模糊优选法得到洪泽湖最适宜调度策略,并分析调度过程及其相关特征。

1 研究区域概况

洪泽湖是我国第四大淡水湖,位于江苏省西北部淮河下游区,地理位置见图1。作为淮河流域最大的湖泊,洪泽湖具有调节淮河洪水并兼有供水、航运、水产养殖等功能,还肩负南水北调东线工程水量调节的任务。洪泽湖的可供水量主要包括过境水量、本地径流量和外调水量3部分,其正常蓄水位为13.0 m,汛限水位为12.5 m,滨湖圩区破圩蓄洪水位14.5 m。

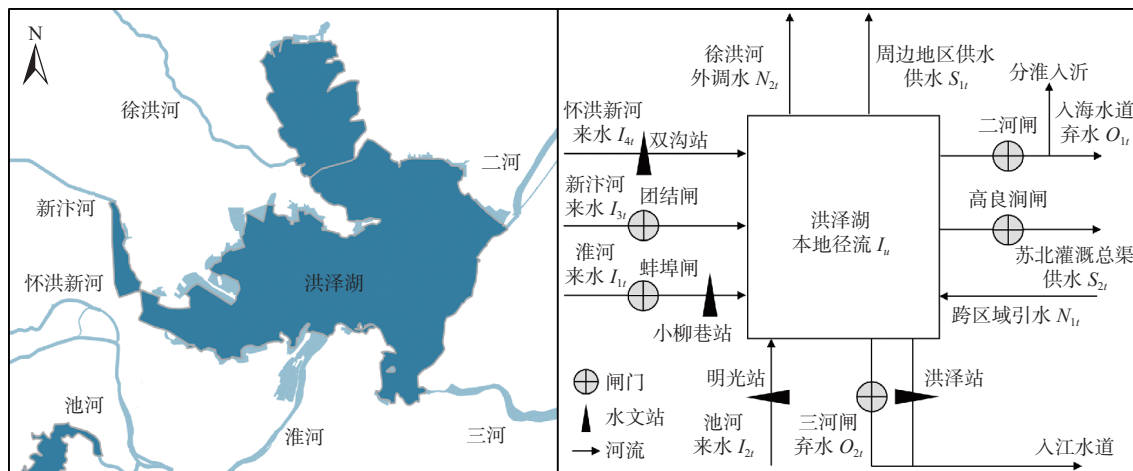


图1 洪泽湖出入湖水系模型概化

Fig. 1 Generalized diagram of water system model of Hongze Lake

洪泽湖具有重要的生态价值与资源优势,动植物资源十分丰富,有国家和省级重点保护鱼类及鸟类数十种。因此洪泽湖生态效益是多目标调度过程中极为重要的目标,本研究主要考虑生态效益以及河道外用水等水资源利用目标之间的协调。

为量化生态效益,相关研究人员以防洪要求为前提,在充分考虑了鱼类、鸟类和水生植物3个层次对于水位水量的需求情况后,计算洪泽湖适宜生态水位过程。对于鱼类、鸟类,通过筛选重点保护物种,结合湖泊形态学分析,面向鱼类、鸟类多样性维持开展洪泽湖生态需水核算^[19-20];对于洪泽湖复杂的植物种群利用相关模型模拟水生植物变化情况,结合野外实测样方和遥感影像提取洪泽湖水位对植物格局的影响^[21-22]。考虑到生态需水更侧重于

为动植物提供用水保障,因此本研究同时给出生态水位下限作为调度约束。综合得到的洪泽湖适宜生态水位过程以及水位调控下限见图2,在此基础上开展水库多目标调度,控制水位在不低于水位下限范围的同时尽可能贴近适宜生态水位过程。

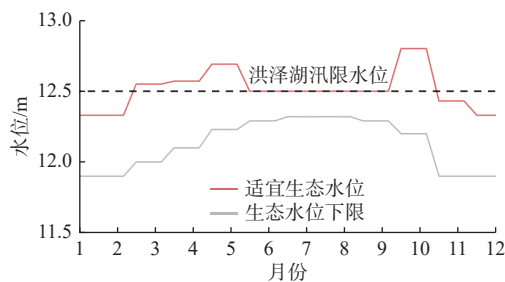


图2 洪泽湖适宜生态水位过程

Fig. 2 Diagram of suitable ecological water level

2 洪泽湖多目标水量调度决策

洪泽湖多目标调度决策的基本原则是充分利用现有的工程措施, 统筹考虑本地水、过境水及外调水, 实现洪泽湖水资源综合利用, 并综合生态系统特点与决策者偏好, 筛选最适宜的调度方案。

2.1 多目标水量调度模型

当水量充沛时洪泽湖往往可以兼顾生态需水与河道外经济社会用水, 而在枯水年型下存在湖泊生态用水与生产生活用水的矛盾。此时, 从优化生态目标的角度而言, 可以实施的调度措施主要分为“开源”和“节流”两种。“开源”指通过改变过境的时程分布规律或增加跨区域调水的方式使湖泊水位与适宜生态水位过程相适, 而“节流”则指通过减少河道外供水的方式维持湖泊中适量的水位与水深。两类措施均产生一定的经济“成本”, 需要同时考虑并均衡各种“成本”与生态目标项的关系。因此, 本研究构建以生态水位偏离差、缺水率、引水量和入湖水量改变度最小为目标的洪泽湖多目标调度模型。

2.1.1 目标函数

生态水位偏离差最小(生态效益最优)目标函数为

$$\min F_1 = \min \sum_{t=1}^T |Z_t - Z_{e,t}| \quad (1)$$

式中: F_1 为生态水位偏离差, m; T 为调度期总时段数; Z_t 为时段 t 洪泽湖水位, m; $Z_{e,t}$ 为时段 t 适宜生态水位, m。

缺水率最小目标函数为

$$\min F_2 = \min \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left(\frac{D_t - S_t}{D_t} \right)^2} \times 100\% \quad (2)$$

式中: F_2 为缺水率, %; D_t 为时段 t 周边地区综合需水量, 亿 m^3 ; S_t 为时段 t 洪泽湖可供水量, 亿 m^3 。

引水量最小目标函数为

$$\min F_3 = \min \sum_{t=1}^T N_t \quad (3)$$

式中: F_3 为引水量, 亿 m^3 ; N_t 为时段 t 引水量, 亿 m^3 。

入湖水量改变度最小目标函数为

$$\min F_4 = \min \sqrt{\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \left(\frac{I_{kt,o} - I_{kt}}{I_{kt,o}} \right)^2} \times 100\% \quad (4)$$

式中: F_4 为入湖水量改变度, %; K 为洪泽湖受工程控制的主要入湖水系总数; $I_{kt,o}$ 、 I_{kt} 分别为入湖水量调控前后入湖水系 k 在时段 t 的入湖水量, 亿 m^3 。

将入湖水系作为调控对象, 通过控制各水系闸门调节相应入湖过程, 以此改善洪泽湖供水条件。改变入湖过程必然对入湖水系自身效益造成影响, 因此设置入湖水量改变度目标间接量化其效益, 寻求尽可能不改变原始来水过程的优化调度策略。

2.1.2 约束条件

水量平衡约束为

$$V_{t+1} = V_t + \sum_{k=1}^K I_{kt} + I_t + N_t - O_t \quad (5)$$

式中: V_t 、 V_{t+1} 分别为时段 t 、 $t+1$ 洪泽湖的蓄水量, 亿 m^3 ; I_t 为时段 t 本地径流量, 亿 m^3 ; O_t 为时段 t 出湖水量, 包含供水和弃水, 亿 m^3 ; 其他符号意义同前。

水位约束为

$$Z_t \leq Z_{t,des_u} \quad (6)$$

$$Z_{t,l} \leq Z_t \quad (7)$$

式中: Z_{t,des_u} 为时段 t 洪泽湖水位上限, 汛期对应汛限水位 12.5 m; $Z_{t,l}$ 为时段 t 洪泽湖水位下限, $Z_{t,l} = \max \{Z_{t,el}, Z_{t,des_l}\}$, 其中 $Z_{t,el}$ 和 Z_{t,des_l} 分别为时段 t 洪泽湖生态水位下限和死水位, m。

入库水量约束为

$$\sum_{t=1}^T I_{kt} = \sum_{t=1}^T I_{kt,o} \quad (k = 1, \dots, K) \quad (8)$$

式中: $I_{kt,o}$ 、 I_{kt} 、 K 和 T 意义同前。

汛期引水量约束为

$$N_t = 0 \quad (t = T_{fs}, \dots, T_{fe}) \quad (9)$$

式中: T_{fs} 、 T_{fe} 为淮河流域汛期开始、结束对应时刻; N_t 意义同前。

调度期初、期末蓄水量约束为

$$V_1 = V_s \quad (10)$$

$$V_{T+1} = V_e \quad (11)$$

式中: V_s 、 V_e 分别为设定的洪泽湖调度期初、期末蓄水量, 亿 m^3 ; V_1 、 V_{T+1} 分别为时段 1 及时段 $T+1$ 洪泽湖蓄水量。

出湖水量约束为

$$Q_t \leq O_t \leq \bar{O}_t \quad (12)$$

式中: \bar{O}_t 和 Q_t 分别为时段 t 出湖水量上限(即最大出湖能力)和下限(最小出湖水量), 亿 m^3 ; O_t 意义同前。

以上式 (1)~(12) 共同构成洪泽湖多目标调度模型。

2.1.3 求解算法

采用第三代非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm III, NSGA-III)进行求解。

NSGA-III算法由 Deb 等^[23]于2014年提出,利用均匀分布的参考点在提高求解效率的同时保持种群多样性,可计算得到较为均匀的非劣解集,使得算法更适合求解3个及以上目标的模型,因此被广泛应用于水资源规划与管理^[24-25]、新能源规划^[26-27]等多个领域并取得较好效果。

利用NSGA-III算法求解洪泽湖多目标调度模型主要分为以下步骤,相应的流程见图3。

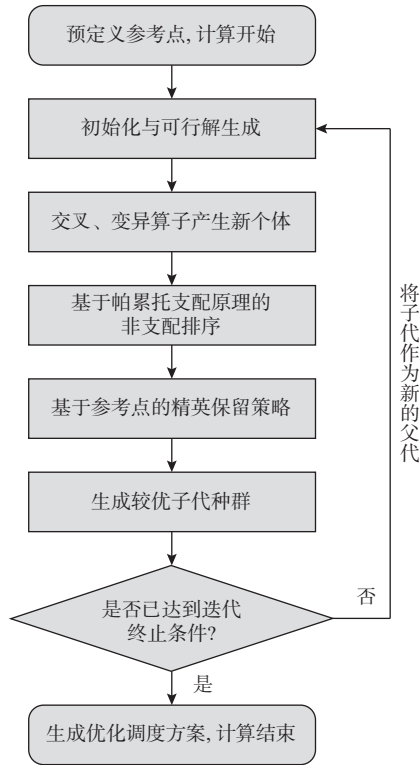


图3 NSGA-III算法求解流程
Fig. 3 Flowchart of NSGA-III algorithm

预定义参考点:对于每个目标,在 $[0, 1]$ 区间内根据设置好的分段数进行等分,即可得到该目标的参考点分布;将不同目标的参考点进行组合,即可得到对应目标空间维度的参考点^[23]。预定义的参考点将作为后续筛选个体的依据。

$$\begin{aligned} &\text{当 } O_i < \underline{Q}_i \text{ 时} && N_i = \text{rand}([0, D_i - O_i]) && O'_i = O_i + N_i && S_i = 0 \\ &\text{当 } \underline{Q}_i \leq O_i \leq D_i \text{ 时} && N_i = \text{rand}([0, D_i - O_i]) && O'_i = O_i + N_i && S_i = 0 \\ &\text{当 } O_i > D_i \text{ 时} && N_i = 0 && O'_i = D_i && S_i = D_i - O_i \end{aligned} \quad (17)$$

式中: I_{kt} 为入湖水系 k 在时段 t 生成的入湖水量,亿 m^3 ; $I_{kt,U}$ 和 $I_{kt,L}$ 分别为入湖水系 k 在时段 t 的入湖水量上限和下限,亿 m^3 ; I_{sum} 为调度期总来水量,亿 m^3 ; $I_{k\tau}$ 为入湖水系 k 在先前计算时刻 τ 的已确定入湖水量,亿 m^3 ; \bar{I}_{kv} 和 \underline{I}_{kv} 分别为入湖水系 k 在后续计算时刻 v 的未确定入湖水量上限和下限,亿 m^3 ; O_i 和 O'_i 分

别为修正前后时段 t 出湖水量,亿 m^3 ; D_i 和 \underline{Q}_i 分别为时段 t 周边地区需水量和最小出湖水量,亿 m^3 ; S_i 为时段 t 弃水量,亿 m^3 ; $\text{rand}([a,b])$ 表示在 a 和 b 之间取随机数。

初始化与可行解生成:根据洪泽湖调度需求生成初始种群(即第一代父代种群),将种群个体数设置为 n ,对应 n 组调度方案;种群中的每个个体包含 $T \times L$ 个决策变量, T 对应一年的旬数, L 则对应需要被调控的水库调度特征变量,包含入湖水系来水量、湖水位(除初始水位)、引水量等,对应的种群矩阵 C 为

$$C = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{11,1} & \cdots & I_{KT,1} & Z_{1,1} & \cdots & Z_{T,1} & N_{1,1} & \cdots & N_{T,1} \\ I_{11,2} & \cdots & I_{KT,2} & Z_{1,2} & \cdots & Z_{T,2} & N_{1,2} & \cdots & N_{T,2} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ I_{11,n} & \cdots & I_{KT,n} & Z_{1,n} & \cdots & Z_{T,n} & N_{1,n} & \cdots & N_{T,n} \end{bmatrix} \quad (13)$$

考虑到NSGA-III算法以随机初始化的方式生成个体,虽然可以满足3组变量的取值范围约束,但在调度期中各时段独立随机生成的变量不能满足水量平衡等约束条件,无法提供可行解。本研究利用初始化方式生成满足初始取值范围和水量平衡的可行解,利用罚函数修正交叉、变异过程中的约束违背情况,以保证寻优的高效性。

对于入湖水量,为保证各时段入湖流量既满足各自上下限约束,同时总量守恒,采用逆序递推式随机生成方法得到各水系入湖水量,由此得到的各时段入湖水量约束如式(14)~(16)所示。对于水量平衡,需要使其满足式(5)约束,因此利用修正后的入湖水量重新梳理水量平衡过程,以引水量和出湖水量调节水量平衡,如式(17)所示。

$$I_{kt} \in [I_{kt,L}, I_{kt,U}] \quad (14)$$

$$I_{kt,L} = \max \left\{ \underline{I}_{kt}, I_{\text{sum}} - \sum_{\tau=t+1}^T I_{k\tau} - \sum_{v=1}^{t-1} \bar{I}_{kv} \right\} \quad (15)$$

$$I_{kt,U} = \min \left\{ \bar{I}_{kt}, I_{\text{sum}} - \sum_{\tau=t+1}^T I_{k\tau} - \sum_{v=1}^{t-1} \underline{I}_{kv} \right\} \quad (16)$$

对于交叉、变异过程中产生的新个体,可能在水位约束与出库水量约束中存在违反单变量约束

的情况,产生不可行解干扰寻优过程,因此需要通过罚函数减少此类解的优先级。当生成的个体存在上述两种约束时,需要通过增加惩罚项使各目标值一定程度劣化,降低该方案成为最优调度方案的可能性。

交叉、变异算子产生新个体:对父代种群进行交叉和变异,以进行全局寻优。其中,交叉采用模拟二进制交叉算法,变异采用多项式变异算法,其核心计算方法分别如式(18)和(19)所示,由此可得到规模同为 n 的新种群。将父代与新种群进行合并,得到规模为 $2n$ 的备选种群,需要从中选取 n 个个体生成较优种群(即子代种群)。

$$\begin{cases} c'_{ii} = \frac{1}{2}(c_i + c_j) - \frac{1}{2}\beta(c_j - c_i) \\ c'_{jj} = \frac{1}{2}(c_i + c_j) + \frac{1}{2}\beta(c_j - c_i) \end{cases} \quad (18)$$

$$c'_{kk} = c_k + \delta(u - l) \quad (19)$$

式中: c_i 、 c_j 和 c_k 为父代种群个体 i 、 j 和 k ; c'_{ii} 和 c'_{jj} 为交叉产生的新种群个体 ii 和 jj ; β 为模拟二进制交叉算法对应的重组系数; δ 为多项式变异系数; u 和 l 分别为决策变量的上限和下限; c'_{kk} 为变异产生的新种群个体 kk 。

利用帕累托支配原理开展非支配排序:根据帕累托支配原理划分不同非支配层级 F_{F_q} ,将种群按照“非支配个体>可行个体>不可行个体”进行划分,以便于寻优迭代。依次选择较高层级的全部个体进行保留,直至某层级无法全部放入时停止并遗弃后续层级。此时被选中的个体共 $\sum_{q=1}^Q \text{count}(F_{F_q})$ 个(式中: $\text{count}(F_{F_q})$ 为非支配层 F_{F_q} 包含个体数, Q 为完整放入的层级数),仍需要利用参考点筛选出 $n - \sum_{q=1}^Q \text{count}(F_{F_q})$ 个个体。

利用参考点进行精英保留:首先通过理想点将个体的目标空间归一化,使各目标值分布于 $[0, 1]$ 区间内。然后根据归一化个体与参考点的欧氏距离,将其关联至预定义的参考点上。最后按照从稀疏到密集的顺序选择参考点,保留其所关联个体,以保证个体在目标空间中充分均匀,直至筛选出所需的 $n - \sum_{q=1}^Q \text{count}(F_{F_q})$ 个个体,步骤(4)和(5)中所保留的个体构成子代种群。

收敛条件判别:当子代与父代种群目标值差异小于 1% 或达到预定迭代次数时则优化完成,否则将筛选得到的子代种群作为新的父代种群,重复以

上步骤直至达到以上收敛条件,由此得到互不支配的水库调度方案集。

2.2 多目标模糊决策方法

从非劣解集最终确定适宜的调度方案构成多目标决策问题,即对一定数量的具有多个目标的备选方案,依据决策者偏好确定各目标权重,并进行方案评价、排序、选择^[28]。在洪泽湖多目标调度过程中,由于生态价值难以度量、效益成本关系难以量化等问题,选取方案构成一类模糊多目标决策问题。因此,采用模糊优选法对调度方案进行筛选,通过相对隶属度来量化目标优劣并依次确定各方案对优的隶属度并排序,其实现步骤如下:

针对有 m 个方案 n 个目标的决策问题,建立决策特征值矩阵 $X = \{x_{ij}\}_{m \times n}$,在此基础上针对不同类型目标建立相对隶属度矩阵 $Z = \{z_{ij}\}_{m \times n}$,其中对于越小越优和越大越优目标分别按照式(20)和(21)计算:

$$z_{ij} = \frac{\max_i x_{ij} - x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}} \quad (20)$$

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_i x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}} \quad (21)$$

式中: x_{ij} 为方案 i 目标 j 对应目标值; z_{ij} 为方案 i 目标 j 对应相对隶属度。

根据相对性原理得到相对最优及最劣方案隶属度向量 $\mathbf{G}=[g_1, g_2, \dots, g_n]$ 及 $\mathbf{B}=[b_1, b_2, \dots, b_n]$ 后,以相应的权重计算各方案距离指标 d_{g_i} 及 d_{b_i} :

$$\begin{cases} d_{g_i} = \sqrt{\sum_{j=1}^n [w_j (g_j - z_{ij})]^2} & i = 1, 2, \dots, m \\ d_{b_i} = \sqrt{\sum_{j=1}^n [w_j (z_{ij} - b_j)]^2} & i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (22)$$

式中: w_j 为目标 j 对应权重; m 为总方案数; g_j 、 b_j 分别为目标 j 对应的最优、最劣相对隶属度,其计算公式为 $g_j = \max_i z_{ij}$, $b_j = \min_i z_{ij}$; d_{g_i} 、 d_{b_i} 分别为方案 i 对与最优及最劣方案间的欧氏距离。

定义 u_i 为方案 i 的相对优属度以度量方案综合性能, u_i 越大方案越优,反之则越劣,其表达式为

$$u_i = \left\{ 1 + \frac{\sum_{j=1}^n [w_j (g_j - z_{ij})]^2}{\sum_{j=1}^n [w_j (z_{ij} - b_j)]^2} \right\}^{-1} \quad (23)$$

式中: u_i 为方案 i 的相对优属度,即模糊决策排序依据;其他符号意义同前。

3 应用实例

3.1 多目标调度模型建立与求解

实例按照 2.1 节所述构建洪泽湖 4 种目标调度模型,将特枯年型 2012 年下洪泽湖出入湖数据以及本地径流作为模型输入,其中可调控的入湖水系主要考虑淮河干流、怀洪新河、池河和新汴河。利用 PlatEMO 平台^[29]运行 NSGA-III 算法得到 60 组相互不完全支配的非劣解,结果见图 4。

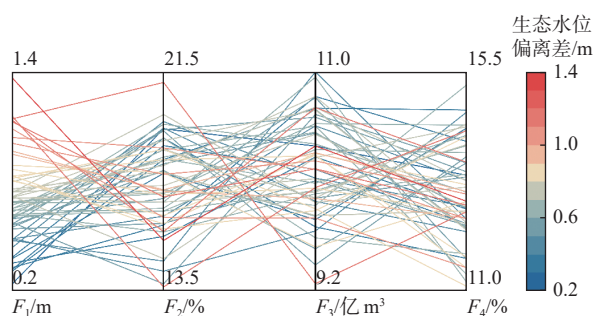


图 4 帕累托前沿平行坐标系

Fig. 4 Parallel coordinates plots of Pareto front

由图 4 可以看出,在相同的求解条件下,非劣解集在各目标上仍然差异明显。在特枯来水条件下,贴近适宜生态水位的调度方式需要维持较高水位,需要通过限制供水、增大引水或调节入湖过境水等措施实现,因此构成了生态效益和调度成本的权衡过程。

以生态为主的调度方式最大程度地满足了湖沼系统内多物种的水位、水深等生境要求,但一定程度上降低了湖泊的调蓄能力,与水资源利用形成矛盾关系。非劣解集中:生态水位偏离差目标变化范围为 [0.2 m, 1.4 m],对应生态效益逐渐降低,对应周边地区综合缺水率为 [13.5 %, 21.5 %],引水量目标为 [9.2 亿 m³, 11.0 亿 m³],入湖水量改变度为 [11.0 %, 15.5 %]。解方案之间互为非支配关系,形成复杂的备选方案集;选取对应的决策方案取决于决策者的偏好信息。

3.2 最适宜调度策略分析

图 4 中折线之间相互交叉,各目标之间存在着不同程度的矛盾,其复杂置换关系需要决策者权衡多种效益以选择最终调度方案。基于不同决策偏好考虑,设置 4 种较为典型的决策偏好,见表 1。分别以生态效益、缺水率、引水量和入湖水量改变度 4 个目标为决策重心,以反映不同决策偏好得到的调度策略差异。利用不同权重,通过 2.2 节所述模

糊优选方法从非劣方案集中选择最优调度策略,得到的对应方案目标值见表 2。为便于后续说明,分别将决策结果命名为方案 A、B、C、D。

表 1 洪泽湖多目标调度决策典型权重

Tab. 1 Typical weights of Hongze Lake multi-objective operation objectives

决策偏好	目标权重	方案序号
生态目标优先	(0.4, 0.2, 0.2, 0.2)	A
缺水率目标优先	(0.2, 0.4, 0.2, 0.2)	B
引水量目标优先	(0.2, 0.2, 0.4, 0.2)	C
入湖水量目标优先	(0.2, 0.2, 0.2, 0.4)	D

表 2 不同典型偏好下洪泽湖最优调度策略

Tab. 2 Optimal operation strategies of Hongze Lake under different weights

方案序号	最优策略目标值			
	F_1/m	$F_2/\%$	$F_3/亿m^3$	$F_4/\%$
A	0.30	18.29	10.70	14.71
B	0.58	13.76	10.65	13.62
C	1.14	21.11	9.26	12.63
D	0.82	18.66	9.87	11.09

将得到的 4 种最优调度方案目标值进行对比,绘制雷达图见图 5。可见通过模糊优选法进行方案决策时,得到的方案特征完全符合权重的分布情况,这表明模糊优选能够在考虑模糊性的基础上有效反映决策者偏好的因素。

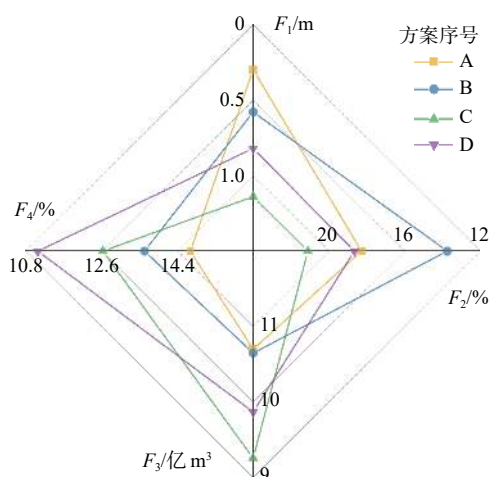


图 5 方案目标对比雷达图

Fig. 5 Comparison radar map of alternatives' objectives

在生态目标优先方案 A 中,生态水位偏离差为 0.30 m,明显优于其他方案,与方案 C 最大值相比更是显著降低 0.84 m。然而优化生态水位的偏差将使得水资源利用成本增加,表现为引水量和入湖水量改变度 2 个目标均增大,分别对应于 10.70 亿 m³

和 14.71%。相较于各自的最小值增加了 1.44 亿 m^3 (方案 C) 和 3.62 个百分点(方案 D), 而缺水率也比最小的方案 B 增加了 4.53 个百分点。总的来看, 方案 A 通过在一定程度上减少供水、增加引水、调节入湖水量的方式优化了生态效益, 在生态优先的调度原则下是一个适宜方案。其余不同方案间生态目标与其他目标呈此消彼长的矛盾关系, 反映决策者不同偏好特性条件下决策方式的差异。

进一步将方案 A、B、C、D 调度水位和引水量过程进行对比, 见图 6。对比生态水位过程, 方案 A 使得洪泽湖水位保持在适宜生态水位附近小幅度波动, 更加适合动植物栖息等生态需求, 与之对应的引水成本也保持较高水平, 在 1、2、4 和 5 月时段均为 4 个方案中最高。方案 B、C 和 D 均在不同时段生态水位偏差较大, 对应生态效益降低。

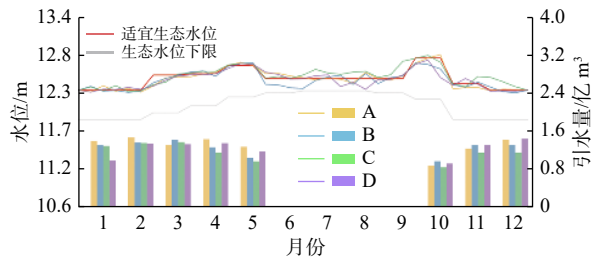


图 6 最优调度策略水位过程及引水量过程

Fig. 6 Process diagram of water level process and water diversion of optimal operation strategies

4 结论

针对洪泽湖调度问题提出了多目标调度决策模型, 利用模糊优选模型从非劣解集中筛选最适宜调度策略, 模型效果较好。

洪泽湖多目标优化调度模型以生态水位偏差差、缺水率、引水量和入湖水量改变度最小为目标综合优化洪泽湖水资源调控过程, 使湖泊水位尽可能贴近适宜生态水位过程。多目标模型解集反映了生态效益和社会经济效益的置换关系, 贴近适宜生态水位的调控方式在一定程度上降低了洪泽湖调蓄能力, 与水资源利用形成矛盾关系。

模糊优选模型可以有效筛选多目标调度非劣解集, 在考虑模糊性的基础上反映决策者偏好, 在综合生态效益与成本关系后, 并提供适用于不同偏好预期情景的优化调度策略。

生态目标优先方案通过减少供水、增加引水量、调节入湖水量等方式有效补充生态用水, 可将生态水位偏离差由 1.14 m 降低至 0.30 m, 其他 3 个目标

相较于各自的最小值增加了 4.53 个百分点(方案 B)、1.44 亿 m^3 (方案 C) 和 3.62 个百分点(方案 D), 该方案优先保证了生态效益的实现, 提供生态优先原则下的适宜调度策略。

本文提出洪泽湖多目标调度决策模型, 以综合视角反映了多目标水量调度过程中生态“效益”与水资源利用“成本”的关系, 并根据决策者偏好的模糊特性和差异选择符合决策预期的均衡方案, 可为洪泽湖调度实践提供理论支撑。

参考文献:

- [1] CASTELLETTI A, PIANOSI F, SONCINI-SESSA R. Water reservoir control under economic, social and environmental constraints[J]. *Automatica*, 2008, 44(6): 1595-1607. DOI: 10.1016/j.automatica.2008.03.003.
- [2] XU Z, YIN X, SUN T, et al. Labyrinths in large reservoirs: An invisible barrier to fish migration and the solution through reservoir operation[J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(1): 817-831. DOI: 10.1002/2016WR019485.
- [3] CHEN D, CHEN Q, LI R, et al. Ecologically-friendly operation scheme for the Jinping cascaded reservoirs in the Yalongjiang River, China[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2014, 8(2): 282-290. DOI: 10.1007/s11707-013-0396-5.
- [4] TANG R, DING W, YE L, et al. Tradeoff analysis index for many-objective reservoir optimization[J]. *Water Resources Management*, 2019, 33(13): 4637-4651. DOI: 10.1007/s11269-019-02363-z.
- [5] XU B, SUN Y, HUANG X, et al. Scenario-based multiobjective robust optimization and decision-making framework for optimal operation of a cascade hydropower system under multiple uncertainties[J]. *Water Resources Research*, 2022, 58(4). DOI: 10.1029/2021WR030965.
- [6] DAI L Q, MAO J, WANG Y, et al. Optimal operation of the Three Gorges Reservoir subject to the ecological water level of Dongting Lake[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(14). DOI: 10.1007/s12665-016-5911-z.
- [7] WANG H, BRILL E D, RANJITHAN R S, et al. A framework for incorporating ecological releases in single reservoir operation[J]. *Advances in Water Resources*, 2015, 78: 9-21. DOI: 10.1016/j.advwatres.2015.01.006.
- [8] LI D, WAN W, ZHAO J. Optimizing environmental

- flow operations based on explicit quantification of IHA parameters[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 563: 510-522. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.06.031.
- [9] 淦峰,唐琳,郭怀成,等.湖泊生态水位计算新方法与应用[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(5): 783-790. DOI: 10.18307/2015.0504.
- [10] 董国强,王振龙,刘猛,等.基于生态需水优先的洪泽湖水量调控研究[J]. *水生态学杂志*, 2020, 41(5): 39-48. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2020.05.005.
- [11] LIU J, LI H, HUANG B, et al. Similarity-divergence intuitionistic fuzzy decision using particle swarm optimization[J]. *Applied Soft Computing*, 2019, 81: 105479. DOI: 10.1016/j.asoc.2019.05.006.
- [12] FARHADINIA B, HERRERA-VIEDMA E. Multiple criteria group decision making method based on extended hesitant fuzzy sets with unknown weight information[J]. *Applied Soft Computing*, 2019, 78: 310-323. DOI: 10.1016/j.asoc.2019.02.024.
- [13] WANG L, LI D, ZHANG S. Mathematical programming methodology for multiattribute decision making using interval-valued intuitionistic fuzzy sets[J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2013, 24(4): 755-763. DOI: 10.3233/IFS-2012-0595.
- [14] 张吉军.模糊层次分析法(FAHP)[J]. *模糊系统与数学*, 2000(2): 80-88. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7402.2000.02.016.
- [15] CLEMENTE M, FERNÁNDEZ F R, PUERTO J. Pareto-optimal security strategies in matrix games with fuzzy payoffs[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2011, 176(1): 36-45. DOI: 10.1016/j.fss.2011.03.006.
- [16] YANG A L, HUANG G H, QIN X S, et al. Evaluation of remedial options for a benzene-contaminated site through a simulation-based fuzzy-MCDA approach[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 213-214: 421-433. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2012.02.027.
- [17] YATSALO B, KOROBV A, MARTÍNEZ L. Fuzzy multi-criteria acceptability analysis: A new approach to multi-criteria decision analysis under fuzzy environment[J]. *Expert systems with applications*, 2017, 84: 262-271. DOI: 10.1016/j.eswa.2017.05.005.
- [18] 陈守煜,赵瑛琪.系统层次分析模糊优选模型[J]. *水利学报*, 1988(10): 1-10. DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.1988.10.001.
- [19] 邱新天,尹心安,刘洪蕊,等.面向鸟类栖息地保护的洪泽湖湿地植被种植方案研究[J]. *水生态学杂志*, 2020, 41(5): 107-114. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2020.05.013.
- [20] QIU X T, LIU H R, YIN X A, et al. Combining the management of water level regimes and plant structures for waterbird habitat provision in wetlands[J]. *Hydrological Processes*, 2021, 35(5). DOI: 10.1002/hyp.14122.
- [21] 徐志侠,王浩,董增川,等.南四湖湖区最小生态需水研究[J]. *水利学报*, 2006(7): 784-788. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2006.07.003.
- [22] 秦敬岚,尹心安,刘洪蕊,等.湖泊水位变化对挺水植物影响分析:以洪泽湖为例[J]. *环境工程*, 2020, 38(10): 53-60. DOI: 10.13205/j.hjgc.202010009.
- [23] DEB K, JAIN H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, part I: Solving problems with box constraints[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2014, 18(4): 577-601. DOI: 10.1109/TEVC.2013.2281535.
- [24] CHEN J, ZHONG P A, LIU W F, et al. A multi-objective risk management model for real-time flood control optimal operation of a parallel reservoir system[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: 125264. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125264.
- [25] NI X K, DONG Z C, XIE W, et al. Research on the multi-objective cooperative competition mechanism of Jinsha River downstream cascade reservoirs during the flood season based on optimized NSGA-III[J]. *Water*, 2019, 11(4): 849. DOI: 10.3390/w11040849.
- [26] CHEN F, ZHOU J, WANG C, et al. A modified gravitational search algorithm based on a non-dominated sorting genetic approach for hydro-thermal-wind economic emission dispatching[J]. *Energy*, 2017, 121(FEB.15): 276-291. DOI: 10.1016/j.energy.2017.01.010.
- [27] XU B, ZHU F L, ZHONG P A, et al. Identifying long-term effects of using hydropower to complement wind power uncertainty through stochastic programming[J]. *Applied Energy*, 2019, 253: 113535. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113535.
- [28] 肖尧,钟平安,徐斌,等.基于区间犹豫模糊语言集的水资源多目标决策[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(1): 50-66. DOI: 10.13476/j.cnki.ns-bdqk.2021.0005.
- [29] TIAN Y, CHENG R, ZHANG X, et al. PlatEMO: A MATLAB platform for evolutionary multi-objective optimization [Educational Forum][J]. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 2017, 12(4): 73-87. DOI: 10.1109/MCI.2017.2742868.

Multi-objective operation and decision-making model of Hongze Lake and its application

YUE Hao¹, ZHENG Yonglu², XU Bin¹, ZHENG Zuguo³,
ZHONG Ping'an¹, ZHOU Jiamin², ZHANG Yuwei⁴

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Beifang Investigation, Design & Research Co., Ltd, Tianjin 300222, China; 3. Qingtian County Water Conservancy Bureau, Lishui 323900, China; 4. Ecological Construction Investment Corporation of China Xiong'an Group, Baoding 071700, China)

Abstract: Lakes played critical roles in maintaining sustainable natural ecosystem function and providing operational services such as flood control, water supply, and irrigation. In many countries and regions, water resource and water shortage problems were intensified owing to increased demand associated with population growth and socioeconomic development. Owing to water resource shortage problems in lake systems, overuse of water resources would lead to the minimum reserved water volume required for ecological purposes being diverted for human consumption, resulting in severe ecological degradation. To restore the ecological condition of lakes, it was critical to resolving the conflict between consumptive water use and ecological water use through multi-objective reservoir operation and informed decision-making. With explicit identification of the ecological and other water demands, together with consideration of streamflow conditions, this can be formulated as a multi-objective optimization reservoir operation and decision-making modeling problem. The operation of reservoirs aimed to maintain the water level and volume process of the upstream and downstream to meet the ecological guarantee demand, of which the difficulty would lie in how to coordinate the contradictory relationship among consumptive and ecological water use as well as water supply from multiple sources. For the decision-making problem, the ecological benefits, which could hardly be measured accurately, made it necessary to consider fuzziness in the process of decision-making.

To resolve the above problems, a multi-objective reservoir operation model was established based on suitable ecological water levels, aiming for the ecological problems of Hongze Lake in Huai River Basin, China. From the perspective of opening sources and reducing consumption, objective functions for minimizing ecological water level deviation, water shortage percentage, diverted water, and reservoir inflow deviation was addressed to evaluate the ecological benefits and costs of reservoir operation. To select the optimal compromise from the Pareto set derived from the multi-objective operation model, the fuzzy optimum selecting model was introduced to select optimal operation strategies, reflecting the equilibrium between ecological security and water supply comprehensively. Finally, Hongze Lake was taken as a study case to conduct multi-objective operation modeling and fuzzy decision-making.

The main contributions of this study comprise the following: (1) Tracking the suitable ecological water level would sufficiently lower the regulation capability of Hongze Lake to a certain extent, which either affected water delivery or necessitates water diversion and supplemented inflow from releases by river engineering facilities, and the corresponding non-inferior alternatives reflected tradeoffs of ecological benefits and regulation costs. (2) The fuzzy optimum selecting model can screen the alternative set under perturbation of fuzzy ecological information, and select appropriate operation strategies according to various decision-maker's preferences. (3) Compared with the alternative with minimum consumptive water shortage, the ecological priority alternative can effectively satisfy ecological demands by reducing water supply, increasing diverted water, and strengthening inflow regulation, which resulted in a low ecological water level deviation of 0.30 m, along with the increasing water shortage percentage, diverted water, and reservoir inflow deviation objectives up to 18.29 %, 1.070 billion m³, and 14.71 %, respectively. By analyzing the water level process of Hongze Lake under different operation strategies, the ecological priority alternative showed relatively high diverted water in January, February, April, and May making the water storage of Hongze Lake more suitable to meet the ecological needs of animals and plants.

The findings provided an effective framework to quantify and coordinate the conflicts between ecological benefits and economic costs, providing theoretical support and practical application value for solving the problems of multi-objective operation of reservoirs.

Key words: suitable ecological water level; multi-objective model; reservoir operation; fuzzy multi-attribute decision; fuzzy optimum selecting model; Hongze Lake