

徐伟, 臧旭东, 夏冰, 等. 基于混合多目标粒子群算法的梯级橡胶坝群蓄洪调度研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2025, 56(1): 73-81.

XU W, ZANG X D, XIA B, et al. Research on flood storage and scheduling of cascade rubber dam groups based on HMOPSO algorithm[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2025, 56(1): 73-81.

## 基于混合多目标粒子群算法的梯级橡胶坝群蓄洪调度研究

徐伟<sup>1</sup>, 臧旭东<sup>1</sup>, 夏冰<sup>2</sup>, 张磊<sup>2</sup>, 杨蕾<sup>2</sup>

(1. 沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110161; 2. 阜新市水利勘测设计研究院有限公司, 辽宁阜新 123099)

**摘要:** [目的]城市段河道梯级橡胶坝群蓄洪调度问题具有非线性、多维性和高约束性, 研究其高效稳定的求解方法, 有助于在保证防洪安全的前提下充分利用洪水退水期的水资源补充坝内库容, 对提高汛期洪水利用效率具有重要意义。研究考虑社会目标、生态目标和效率目标, 建立梯级橡胶坝群多目标蓄洪调度模型。[方法]为提升模型求解性能, 提出了一种混合多目标粒子群算法(HMOPSO)用于模型求解, 该算法通过 Logistic 映射初始化种群, 采用差分进化策略优化迭代过程, 并引入轮盘赌法选择全局最优解。以阜新市细河城市中心段梯级橡胶坝实际工程为例, 选取该区域 1994 年和 2013 年的典型洪水过程为条件进行多目标蓄洪调度模型求解, 将 HMOPSO 算法结果与 MOPSO 和 NSGA-II 算法结果进行对比, 利用多种性能指标评价各算法的 Pareto 前沿, 并对调度解集进行规律性分析。[结果]各算法均满足求解需求, 而 HMOPSO 算法相较于其他算法的 GD 指标优越 28.57% 以上, HV 指标优越 19.96% 以上, 证明 HMOPSO 算法在收敛性、均匀性和多样性方面均优于其他对比算法, 能更有效应对不同洪水情景下的蓄洪调度需求; 生态目标与效率目标之间存在负相关关系, 若侧重于生态目标的实现, 则整体调度时间会增加; 洪水退水期的线形特征对调度的解集范围具有影响, 洪尾可蓄水量、可调度时间越长, 可行解集范围则越大。[结论]基于 HMOPSO 算法为城市段河道梯级橡胶坝群的合理蓄洪调度提供了理论依据, 可为类似地区的研究提供参考。

**关键词:** 梯级橡胶坝群; 蓄洪调度模型; 多目标粒子群算法; 洪水资源利用

中图分类号: TV213.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-1700(2025)01-0073-09

## Research on Flood Storage and Scheduling of Cascade Rubber Dam Groups Based on HMOPSO Algorithm

XU Wei<sup>1</sup>, ZANG Xudong<sup>1</sup>, XIA Bing<sup>2</sup>, ZHANG Lei<sup>2</sup>, YANG Lei<sup>2</sup>

(1. College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China; 2. Fuxin Water Conservancy Survey and Design Institute Co., Liaoning Ltd., Fuxin Liaoning 123099, China)

**Abstract:** [Objective] The flood storage and scheduling problem of a cascade rubber dam group in urban river channels has nonlinearity, multidimensionality, and high constraints. Studying on its efficient and stable solution method can help fully utilize the water resources during the flood retreat period to supplement the reservoir capacity in the dam while ensuring flood control safety. It is of great significance to improve the efficiency of flood water utilization during the flood season. The study considered social, ecological, efficiency objectives and established a multi-objective flood storage and scheduling model for a cascade rubber dam group. [Methods] To improve the performance of model solving, a hybrid multi-objective particle swarm algorithm (HMOPSO) which initializes the population through logistic mapping is proposed, it can adopt differential evolution strategy to optimize the iterative process and introduce the roulette wheel method to select the global optimal solution. Taking the actual project of the cascade rubber

收稿日期: 2024-12-17 修回日期: 2025-01-02

基金项目: 辽宁省教育厅课题项目(JYTZD2023124)

第一作者: 徐伟(1977-), 男, 博士, 副教授, 从事水力学及河流动力学研究, E-mail: slxw@syau.edu.cn

dam in the central section of Xihe, Fuxin City as an example, the typical flood processes from 1994 to 2013 were selected as conditions to solve the multi-objective flood storage scheduling model. The results of HMOPSO algorithm were compared with MOPSO and NSGA-II algorithms, and various performance indicators were used to evaluate the Pareto front of each algorithm. The scheduling solution set was analyzed for regularity. [Results]The results showed that all algorithms meet the solving requirements, and the HMOPSO algorithm had a GD index superior to other algorithms by more than 28.57% and an HV index superior to other algorithms by more than 19.96%. This proves that the HMOPSO algorithm is superior to other comparative algorithms in terms of convergence, uniformity, and diversity, and can more effectively respond to flood storage and scheduling needs in different flood scenarios; there is a negative correlation between ecological goal and efficiency goal. If we focus on achieving ecological goal, the overall scheduling time will increase; the linear characteristics of the flood retreat period have an impact on the range of feasible solution sets for scheduling. The longer the available water storage capacity and scheduling time of the flood tail, the larger the range of feasible solution sets. [Conclusion]This article provides a theoretical basis for the rational flood storage and scheduling of cascade rubber dams in urban river sections based on the HMOPSO algorithm, which can serve as a reference for research in similar regions.

**Key words:** cascade rubber dam group; flood storage scheduling model; multi-objective particle swarm algorithm; flood resource utilization

橡胶坝可营造良好的景观效应、补充地下水资源,经常用于城市河道的建设中<sup>[1]</sup>。然而对于水资源稀缺地区,橡胶坝蓄水区内水源的更新来源较少,橡胶坝坝群塌坝迎汛后如何拦蓄洪水资源补充坝内库容,实现合理可行的蓄洪调度是亟待解决的问题<sup>[2]</sup>。此类调度问题往往面临着约束条件复杂、求解维度较高等问题,现有的橡胶坝方案大多为遍历算法<sup>[3]</sup>、试算法<sup>[4]</sup>,而这类算法难以求解多目标问题,且求解效率不高,不能满足多目标蓄洪调度问题的求解需求。启发式智能优化算法中多目标粒子群算法(MOPSO)及其改进算法原理简单,寻优效果好<sup>[5]</sup>,经常在水库群<sup>[6]</sup>、泵站<sup>[7]</sup>、灌渠<sup>[8]</sup>等水资源调度中使用。然而传统的启发式智能优化算法在寻优过程中往往易陷入局部最优解,导致搜索精度降低;在高维场景下其性能也会受到严重影响,使算法搜索能力下降<sup>[9]</sup>。本研究针对多目标粒子群算法中存在的不足提出了一种混合多目标粒子群算法(HMOPSO),该算法通过 Logistic 混沌映射提高算法初始值的多样性;引入差分进化算法(DE)中的差分进化策略改进其迭代过程以增强全局搜索能力;使用轮盘赌法选取全局最优解,提升算法搜索的均匀性。结合阜新市城市中心段梯级橡胶坝工程实例,分别考虑社会目标、生态目标和效率目标建立梯级橡胶坝群多目标蓄洪调度模型,分别使用 HMOPSO、MOPSO 和非支配排序遗传算法(NSGA-II)对模型求解,通过世代距离(GD)、间距度量(SP)、超体积度量(HV)等性能指标评价运算结果,验证 HMOPSO 算法的优越性,并结合 HMOPSO 算法的调度方案集进行规律性分析。

## 1 材料与方 法

### 1.1 调度运行原则

1.1.1 迎汛调度原则 汛期大洪水来临前为确保橡胶坝的安全运行,应实施塌坝操作以迎接洪水<sup>[10]</sup>。洪峰过后,需评估流量是否仍处于警戒水平。若流量低于警戒值,且根据水文和气象预报确认不会再出现流量增加的情况,应适时抬高坝体,以拦蓄洪水尾水,补充坝群库容。

1.1.2 梯级橡胶坝蓄水原则 在满足坝群安全运行的情况下尽可能多的拦蓄洪水资源,且应保证蓄水过程中橡胶坝群出口泄流量高于河道生态流量<sup>[11]</sup>,避免下游河流进入长时间的干涸状态,破坏河道生态。

### 1.2 目标函数

(1)社会目标:蓄洪调度首要目标是将各橡胶坝全部蓄满,维持城区内水生态,采用布尔值判定。

$$\sum_{i=1}^{n-1} V_i^d \sum_{i=1}^n V_i^f \begin{cases} \text{yes}, 1 \\ \text{no}, 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $V_i^d$ 为第*i*级橡胶坝调度后蓄水量( $\text{m}^3$ ); $V_i^f$ 为第*i*级橡胶坝满库容( $\text{m}^3$ )。

(2)生态目标:为防止蓄洪调度期间导致下游河道长期干涸从而对生态系统造成破坏,应确保坝群出口的泄流量不低于生态流量,以最大化最小泄流量为目标函数。

$$Q_0 = \text{Max} [\text{Min}(Q_1^b), \text{Min}(Q_2^b), \dots, \text{Min}(Q_n^b)] \quad (2)$$

式中: $Q_0$ 为*n*组方案中橡胶坝出口最小泄流量的最大值( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ); $Q_i^b$ 为随时间改变的一次调度中坝群末端橡胶坝泄流量( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )。

(3)效率目标:在满足社会目标和生态目标的基础上,调度时间越少则调度效率越高。因此,本模型将整体调度时间的最小化设定为第 3 个目标函数。

$$T=\text{Min}(T_b) \quad (3)$$

式中: $T$ 为*i*组方案中坝群调度总时间最小值(h); $T_b$ 为坝群调度总时间(h)。

### 1.3 约束条件

为求得目标函数的可行解,依据橡胶坝泄流计算的基本要求和准则<sup>[12]</sup>,设定了如下约束条件。

(1)水量平衡约束<sup>[13]</sup>:采用水量平衡原理进行上下级橡胶坝之间的水量交换。

$$V_t=V_{t-1}-Q_{t-1}\times\Delta t+Q_{t-1}^u\times\Delta t \quad (4)$$

式中: $V_t$ 为第*t*时刻下级橡胶坝蓄水量( $\text{m}^3$ ); $\Delta t$ 为泄流计算时间步长,取 60 s; $Q_{t-1}^u$ 为第*t*- $\Delta t$ 时刻下级橡胶坝蓄水量( $\text{m}^3$ ); $Q_{t-1}$ 为第*t*- $\Delta t$ 时刻下级橡胶坝泄流量( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ); $Q_{t-1}^u$ 为第*t*- $\Delta t$ 时刻上级橡胶坝下泄流量( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ )。

(2)坝上水位约束:各橡胶坝的坝上水头不能超过各自的允许设计水头。

$$H_i\leq H_i^a \quad (5)$$

式中: $H_i$ 为调度过程中各坝上水头(m); $H_i^a$ 为各坝允许设计水头(m)。

(3)安全流量约束:各坝泄流量要保证坝体运行安全,也不能超过河道允许的行洪能力,根据实际工程情况设定最大下泄流量。

$$Q_i^o\leq Q_i^s \quad (6)$$

式中: $Q_i^o$ 为第*i*级橡胶坝坝下泄流量( $\text{m}^3$ ); $Q_i^s$ 为该坝对应的安全下泄流量( $\text{m}^3$ )。

(4)生态流量约束:调度期间橡胶坝群末端下泄流量不应小于规定生态流量,河道生态流量采用 tennant 法<sup>[14]</sup>计算。

$$Q_c\leq Q_e \quad (7)$$

式中: $Q_c$ 为坝群出口下泄流量( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ); $Q_e$ 为河道生态流量( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ )。

(5)非负值约束,运算期间所有计算参数全部不得小于 0。

## 2 混合多目标粒子群算法

### 2.1 多目标粒子群算法

多目标粒子群算法(MOPSO)沿袭了单目标粒子群算法的思想,模拟了鸟群觅食过程中的信息共享与合作行为,每个粒子代表一个潜在的解,通过与邻居粒子和自身历史最佳位置的相互作用,不断更新和调整自身位置以寻找最优解。与 PSO 不同的是 MOPSO 旨在同时优化多个目标函数,且由于多个目标的约束,其运算结果不是单一的解,而是由多个符合条件的解组成的解集。

### 2.2 混合多目标粒子群算法

MOPSO 算法在种群初始值选取和全局最优的选取策略是随机的,导致其对全局搜索的能力较差。此外,随着迭代的进行,粒子的多样性可能逐渐减少,导致群体趋同,从而易使算法出现早熟收敛的问题<sup>[15]</sup>。本研究针对 MOPSO 的上述缺陷,分别从初始值选取、迭代方法、全局最优值选取等方面进行优化。

2.2.1 种群初始值选取优化 混沌映射具有复杂性和不可预测性,通过这种方法生成混沌序列作为初始值,可提高初始种群的多样性<sup>[16]</sup>。本研究采用逻辑斯蒂映射生成混沌序列,将其作为种群的初始值,其序列生成公式为:

$$X_{n+1}=rX_n-r(X_n)^2=rX_n(1-X_n) \quad (8)$$

式中: $X_n$ 为序列的第*n*项,取值范围为(0,1); $r$ 为控制参数,取值为(0,4],当 $r=4$ 时,序列处于完全混沌状态。

2.2.2 迭代过程优化 在迭代过程中,采用差分进化算法来更新粒子的位置,增加粒子突变的能力,可使算法跳出局部最优解<sup>[17]</sup>。该方法的基本原理是通过变异和交叉操作生成新的候选解,并将其与种群中的原始解进行比较,保留较优的解以进入下一次迭代。具体的变异操作和交叉操作公式为:

$$v_i=x_{r1}+F(x_{r2}-x_{r3}) \quad (9)$$

式中: $v_i$ 为生成的变异向量; $x_{r1}, x_{r2}, x_{r3}$ 为从当前种群中随机选择的不同向量,且不等于 $x_i$ ;  $F$ 为变异因子,取值范围[0,2],可控制差分向量随机放缩。

$$u_{ij}=\begin{cases} u_{ij} & \text{if } \text{rand}_j \leq CR \text{ or } j = j_{\text{rand}} \\ x_{ij} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $j$ 为目标向量 $x_i$ 和变异向量 $u_i$ 的分量索引; $\text{rand}_j$ 为在[0,1]区间内的均匀分布随机数,决定是否在第*j*个位

置进行交叉;CR为交叉概率; $j_{rand}$ 为随机整数,取值范围为[1,D],可控制至少有一个位置执行变异操作;D为向量维度。

2.2.3 全局最优解选取优化 在每次迭代过程中,全局最优解的合理选取有助于增加解集的多样性和均匀性,HMOPSO算法将每次迭代后的解集划分为多个网格,采用轮盘赌法<sup>[18]</sup>按概率选择全局最优解,对于解集较少的网格提高选择概率,而解集较多的网格概率选取概率降低。每个网格被选中概率为:

$$p(m_i) = \frac{f(m_i)}{\sum_{j=1}^N f(m_j)} \tag{11}$$

式中: $m_i$ 为第*i*个网格; $f(m_i)$ 为与网格*i*对应的适应度,网格内解集越多,适应度越小; $N$ 为网格的总数。

第*i*个网格累积概率:

$$q_i = \sum_{j=1}^i f(x_j) \tag{12}$$

式中: $f(x_j)$ 为第*j*个网格的适应度值; $q_i$ 为第*i*个网格的累计概率,取值为第1个到第*i*个网格适应度之和。

最终被选中的网格:

$$M_s = M_i, \text{ if } r \in q_i \tag{13}$$

式中: $M_s$ 为被选中从中选取最优解的网格; $r$ 为(0,1)的随机数。

### 2.3 流程图

HMOPSO算法的基本流程如图1。

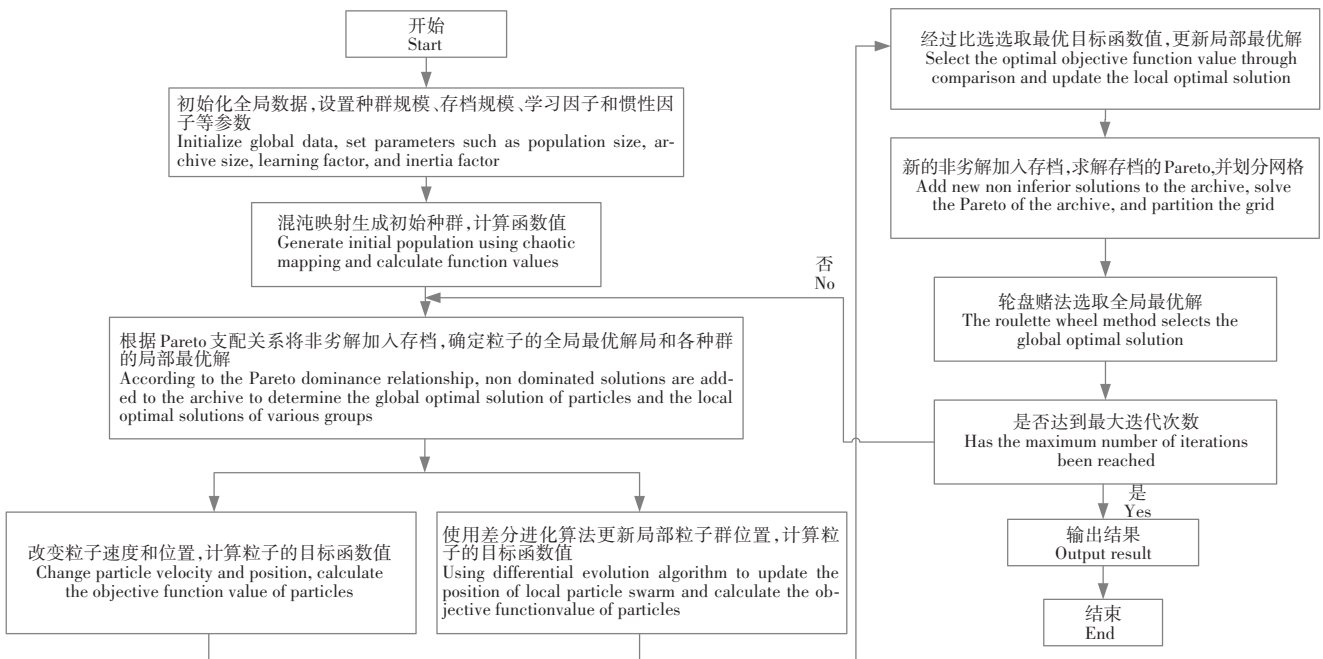


图1 HMOPSO算法流程图

Figure 1 HMOPSO algorithm flowchart

### 2.4 评估指标

本研究选取世代距离(GD)、间距指标(SP)和超体积指标(HV)这3种指标进行多目标算法的性能评估。GD值越小,表明解集的收敛性越好;SP值越小,表明解集越均匀;HV值越大,解集的收敛性和多样性更优。详细说明见文献<sup>[19]</sup>。

## 3 实例应用

### 3.1 区域概况

阜新市位于辽宁省西北部,属于半干旱地区,是一个资源型缺水城市。细河自东向西穿越市区,本研究研究区域为阜新市城市中心段的7座梯级橡胶坝,坝群形成了一条总长度为8.15 km的带状水面,水面面积达137

万 m<sup>3</sup>,总蓄水量为 145 万 m<sup>3</sup>,表 1 和图 2 展示了橡胶坝群的具体参数和分布情况。梯级橡胶坝的建设补充了城区内地下水,显著改善了细河两岸及周边地区的生态环境。

表 1 细河城市中心段橡胶坝基本参数

Table 1 Basic parameters table of rubber dam at the central end of Xihe

序号 Serial number	橡胶坝名称 Rubber dam name	坝体宽度/m Dam width	坝高/m Dam height	蓄水量/万 m <sup>3</sup> Water storage	蓄水长度/m Storage length
1	1号橡胶坝 No. 1 rubber dam	137	2.5	25	1 500
2	2号橡胶坝 No. 2 rubber dam	137	2.5	17	1 030
3	3号橡胶坝 No. 3 rubber dam	147	2.5	23	1 300
4	4号橡胶坝 No. 4 rubber dam	133	2.5	18	1 143
5	5号橡胶坝 No. 5 rubber dam	155	2.5	18	957
6	6号橡胶坝 No. 6 rubber dam	175	2.5	24	1 125
7	7号橡胶坝 No. 7 rubber dam	147	2.5	20	1 095

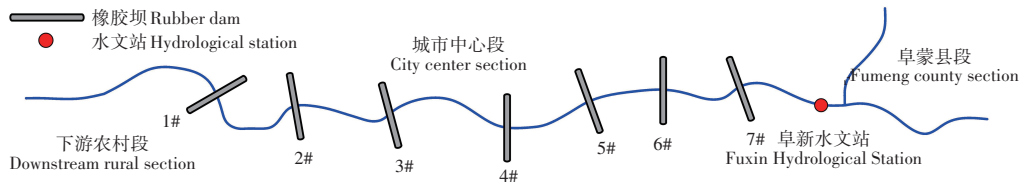


图 2 细河阜新城市中心段梯级橡胶坝分布图

Figure 2 Location map of rubber dam group in urban section of Fuxin City

研究区域内没有其他支流汇入,采用城市上游阜新水文站提供的洪水资料作为输入条件进行多目标梯级橡胶坝蓄洪调度。经过比选,最终选用洪尾曲线形不同的 1994 年和 2013 年典型洪水进行调度。由图 3 可知,各年洪峰流量分别为 286 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>和 360 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>,经验频率分别为 12.3% 和 10.6%,洪尾期间可调度总水量分别为 309 万 m<sup>3</sup>和 431 万 m<sup>3</sup>,可蓄水调度时间分别为 7.7 h 和 14.8 h,依照调度原则,橡胶坝群蓄洪调度前各项均为塌落状态。

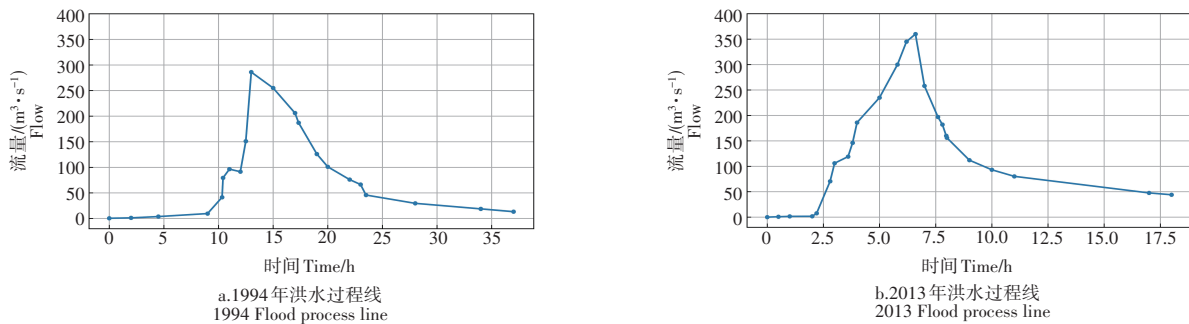


图 3 1994年和2013年洪水过程线

Figure 3 Flood Process Lines of 1994 and 2013

### 3.2 结果与分析

3.2.1 结果比较 分别采用HMOPSO、MOPSO、NSGA-II 这三种算法求解多目标蓄洪调度问题,其中NSGA-II 具有鲁棒性强、解集分布性好等优点<sup>[20]</sup>,在多目标求解问题的研究中应用广泛,故将其作为对照组算法。经多次试算,算法种群大小均设为60,迭代次数180次,其余公共参数的选取也一致。为减少极端情况对运算结果的干扰,分别使用各算法进行10次并行求解计算,从中提取每种算法的Pareto最优解集进行对比分析<sup>[21]</sup>。需要注意的是,调度模型将社会目标(橡胶坝库容全部蓄满)转化为布尔约束,对于不满足判定的解集直接不参与迭代,故算法所得解集均能满足社会目标。由图4可知,生态目标和效率目标之间呈明显的负相关性,解集向两个目标函数均优的右下方偏移。图中HMOPSO算法的解集范围最大,解集曲线密集,均不受其他算法的解集支配;相较之下,MOPSO和NSGA-II算法的解集数量较少,且解集曲线有不同程度的间断。

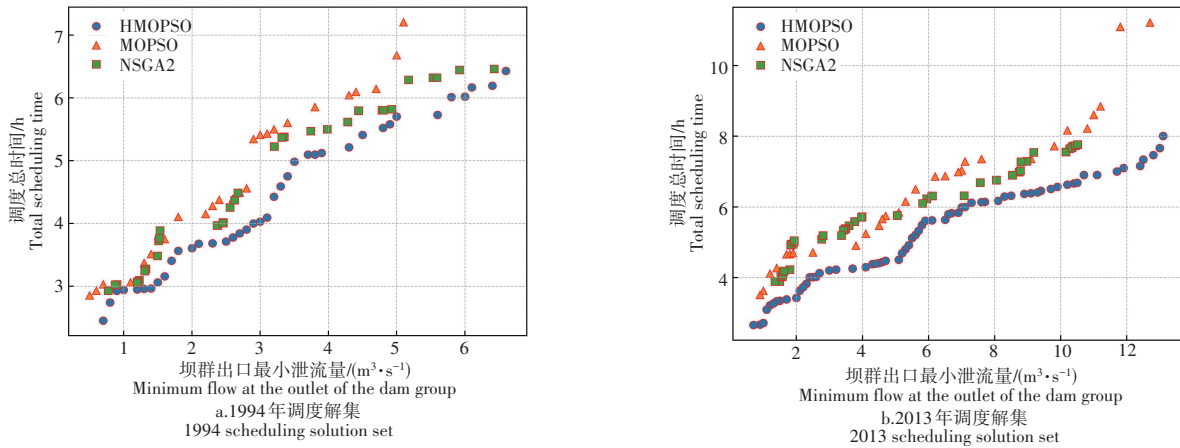


图4 1994年和2013年调度解集

Figure 4 Scheduling solution sets in 1994 and 2013

将求解结果标准化后采用GD、HV和SP这3种性能指标对算法性能进行评估。由表2可知, HMOPSO算法相较于MOPSO算法, GD指标减少35.48%, SP指标降低36.84%, HV指标提升47.74%; 相较于NSGA-II算法, GD指标减少28.57%, HV指标提升19.96%。HMOPSO算法除与NSGA-II算法比较时SP值变化不大(即算法的均匀性与NSGA-II持平)外, 其收敛性、多样性均有显著提升。

表2 算法性能指标

Table 2 Algorithm performance indicators

算法 Algorithm	1994年典型洪水 Typical flood of 1994			2013年典型洪水 Typical flood of 2013		
	GD	SP	HV	GD	SP	HV
HMOPSO	0.120	0.012	0.393	0.122	0.009	0.557
MOPSO	0.186	0.019	0.266	0.296	0.025	0.347
NSGA-II	0.168	0.011	0.336	0.241	0.010	0.369

由图5和图6可知, NSGA-II算法每次运行的结果差异较大, 稳定性较低; MOPSO算法虽然在稳定性上略优于NSGA-II, 但其整体收敛性差且解集分散。相比之下, HMOPSO算法在多次运行中表现出一致的优越性, 其生成的解集更接近Pareto前沿, 在3种算法中表现最优。

3.2.2 调度方案分析 HMOPSO算法求解效果最好, 选用其求解结果进行方案分析。由该算法最终调度集可知, 生态目标和效率目标为明显的负相关关系: 若注重于实现生态目标, 则调度时间会增加; 若注重于提高调度效率, 则生态流量会降低。理论上所有调度解集均可适用于实际蓄洪调度运行中, 本研究针对不同侧重目标(生态目标侧重、效率目标侧重、双目标均衡)采用均匀采样法<sup>[22]</sup>从1994年和2013年的调度解集中筛选出具有代表性的典型调度方案。最终根据1994年和2013年调度解集中各选取了生态目标优先方案A、B, 效率目标优先方案C、D, 以及均衡方案E、F、G这7组典型方案。图7展示了各典型方案下梯级橡胶坝出口流量过程线。表3为各典型方案下蓄洪调度的生态目标和效率目标实现情况。模型将社会目标转化为约束, 各方案均满足社会、生态、效率目标, A、B方案侧重于生态目标的实现, F、G方案侧重于调度效率, 而C、D、E方案则较为均衡。在可行解覆盖范围方面, 典型方案中1994年较2013年的坝群出口最小泄流量取值范围缩短49.2%, 相应调度时间取值范围减少26.4%, 分析其原因, 1994年洪尾曲线出现线性陡降的情况, 而2013年洪尾曲线呈指数平缓降低, 导致1994年可调度总时间较2013年降低47.9%, 洪尾可蓄水量也减少28.3%。由此可知, 蓄洪调度模型求出的可行解范围大小受洪尾曲线线形影响, 洪尾可调度时间和可蓄水量越大则蓄洪调度可行解范围越大。

### 4 讨论与结论

在水资源稀缺地区, 合理高效利用洪水资源以补充橡胶坝群库容是一个亟待解决的问题。因此, 提出合理、高效的橡胶坝蓄洪调度方案十分重要。随着智慧水利建设的不断推进<sup>[23]</sup>, 高性能智能算法在各研究领域逐渐兴起, 可以解决复杂的水资源调度问题<sup>[24]</sup>。在此前涉及橡胶坝的调度研究中, 张涛等<sup>[25]</sup>使用试算法实现了

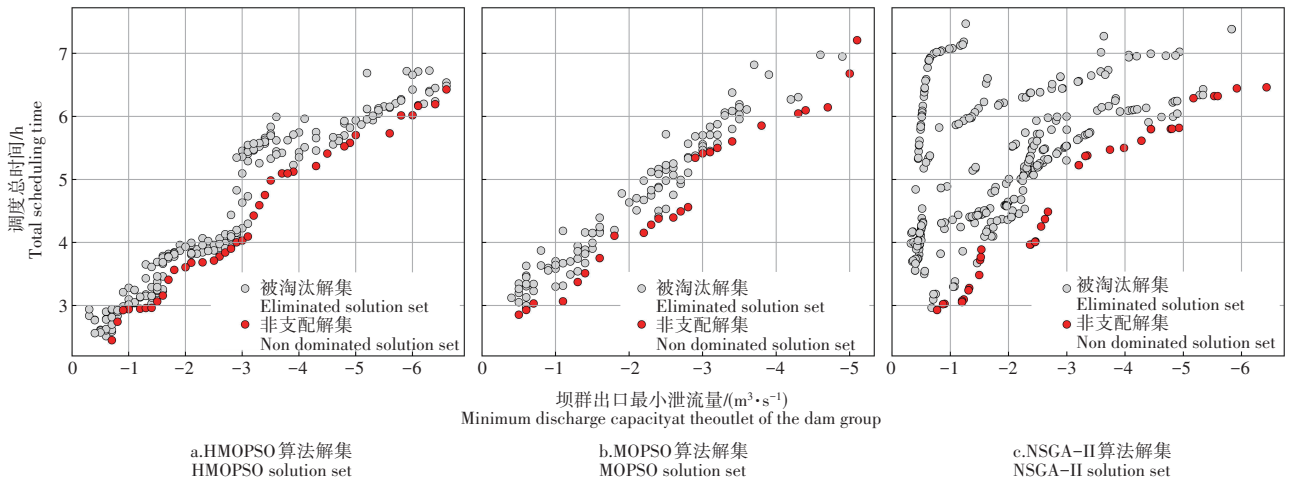


图5 1994年调度解集选取过程

Figure 5 Selection process of scheduling solution set in 1994

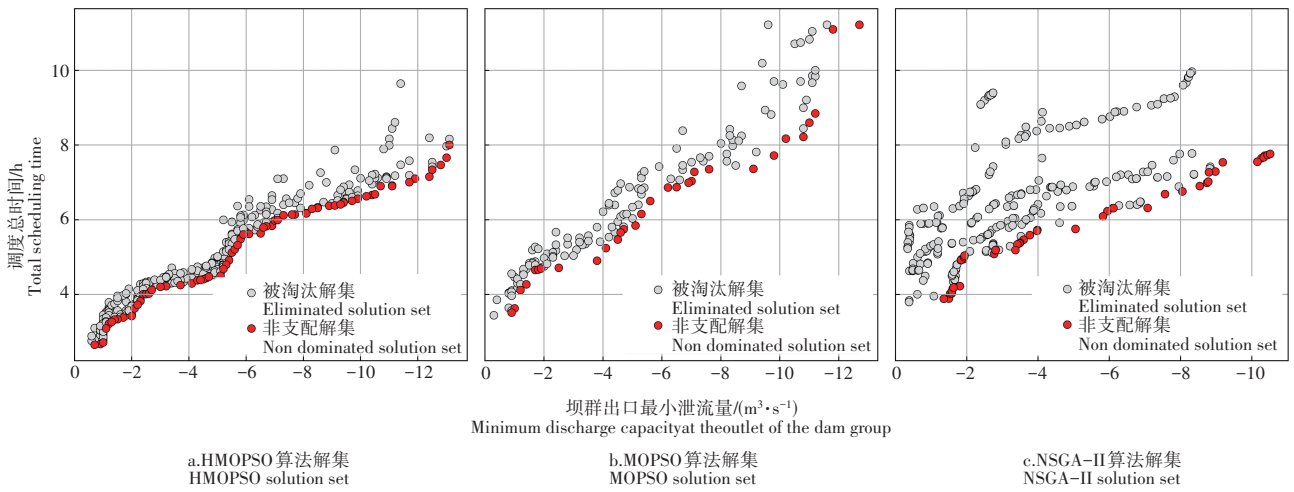


图6 2013年调度集选取过程图

Figure 6 Selection process of scheduling solution set in 2013

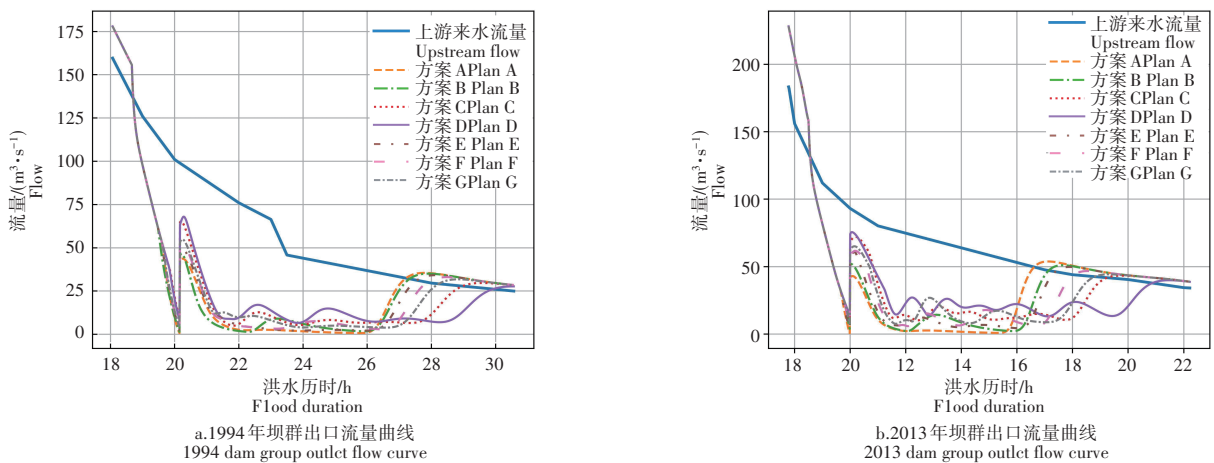


图7 1994年和2013年坝群出口流量曲线

Figure 7 Export flow curves of rubber dam groups in 1994 and 2013

徒骇河闸坝群的蓄洪调度,但效率较低且计算量大;邓浩等<sup>[26]</sup>提出了改进遗传算法用于汾河太原城区段闸坝群泄水调度,虽提高了计算效率,但不适用于多目标的橡胶坝群蓄洪调度。本研究提出一种HMOPSO算法,在满

表3 典型方案目标函数参数  
Table 3 Typical scheme objective function parameter

典型方案 Typical scheme	1994年典型方案 Typical plan for 1994		2013年典型方案 Typical plan for 2013	
	生态目标,坝群出口 最小泄流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ) Ecological goals, minimum flow at the outlet of the dam group	效率目标,整体蓄洪 调度时间/h Efficiency goals, overall flood storage scheduling time	生态目标,坝群出口 最小泄流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ) Ecological goals, minimum flow at the outlet of the dam group	效率目标,整体 蓄洪调度时间/h Efficiency goals, overall flood storage scheduling time
A	0.7	2.5	0.7	2.7
B	1.4	3.0	2.2	3.7
C	2.1	3.7	4.3	4.4
D	3.0	4.0	5.7	5.3
E	3.8	5.1	7.6	6.1
F	5.0	5.7	10.2	6.6
G	6.6	6.4	13.1	8.0

足社会、效率和生态目标的前提下,解决了高维度、复杂的橡胶坝蓄洪调度问题。该方法结合了前人研究的优点,提供了多种合理可行的调度方案,为类似地区的研究提供了参考。

本研究以阜新市城市中心段橡胶坝群实际工程为例,建立了考虑社会目标、生态目标、效率目标的梯级橡胶坝群蓄洪调度模型,针对传统MOPSO算法的不足提出了一种改进的HMOPSO算法,并分别采用HMOPSO、MOPSO和NSGA-II算法进行求解。结果表明,3种算法均可以求解出满足要求的多组解集,而相较于其他算法, HMOPSO算法的GD指标优越28.57%以上, HV指标优越19.96%以上,可以有效应对不同洪水条件下的蓄洪调度需求,为开展橡胶坝群蓄洪调度研究提供了更优的计算方法;同时研究表明生态目标、效率目标之间存在显著的负相关性,若着重于实现生态目标则调度时间会增加,反之亦然;且橡胶坝群蓄洪调度方案的可行解集范围受洪尾曲线线形影响,洪尾可蓄水量、可调度时间越长,可行解集范围则越大。

参考文献:

[1] 杨俊杰,单 耀.浅析橡胶坝在水利工程中的应用[J].治淮,2024(11):56-58.  
YANG J J, SHAN Y. A brief analysis of the application of rubber dams in water conservancy projects[J]. Harnessing the Huaihe River, 2024(11):56-58.

[2] 高大鹏.基于橡胶坝群的联合调度运行方式研究[J].黑龙江水利科技,2021,49(10):116-118.  
GAO D P. Research on joint scheduling operation mode based on rubber dam group[J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2021, 49(10):116-118.

[3] 赵瑜琪,彭清娥.梯级橡胶坝工程应急调度方案的优化设计[J].水利水电技术(中英文),2021,52(1):137-145.  
ZHAO Y Q, PENG Q E. Optimal design of emergency dispatching scheme for cascade rubber dams[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(1):137-145.

[4] 王加虎,殷荣胜,李 丽,等.产澜河流域城市橡胶坝群景观流量补水调度研究[J].水利水电技术(中英文),2022,53(8):152-160.  
WANG J H, YIN R S, LI L, et al. Research of regulation of landscape flow of rubber dam group in Chanba River basin based on finite traversal method[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(8):152-160.

[5] 叶倩琳,王万良,王 铮.多目标粒子群优化算法及其应用研究综述[J].浙江大学学报(工学版),2024,58(6):1107-1120,1232.  
YE Q L, WANG W L, WANG Z. Survey of multi-objective particle swarm optimization algorithms and their applications[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2024, 58(6):1107-1120, 1232.

[6] 李承龙,杨 侃,蔡玉琴,等.基于改进粒子群算法的水资源优化调配模型研究[J].人民黄河,2022,44(7):69-74.  
LI C L, YANG K, CAI Y C, et al. Research on optimal allocation model of water resources based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Yellow River, 2022, 44(7):69-74.

[7] DONG W, Q Y. Data-driven solution for optimal pumping units scheduling of smart water conservancy[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(3):1919-1926.

[8] LIU Y, YANG T. Irrigation canal system delivery scheduling based on a particle swarm optimization algorithm[J]. Water, 2018, 10(9):1281-1281.

[9] 李娜娜.基于改进粒子群算法的多目标优化问题研究[D].贵阳:贵州民族大学,2022.  
LI N N. Research on multi-objective optimization problems based on improved particle swarm algorithm[D]. Guiyang: Guizhou Minzu University, 2022.

- [10] 陈界仁,赵悦君,任磊,等.基于数学模型的沂河橡胶坝群塌坝方案[J].水利水电科技进展,2022,42(1):75-79.  
CHEN J R,ZHAO Y J,REN L,et al.Collapse scheme of rubber dam group in Yihe River based on numerical model[J].Advances in Science and Technology of Water resources,2022,42(1):75-79.
- [11] 田世民,江恩慧,王远见,等.基于黄河流域系统治理的水库多目标调度约束阈值研究[J].水利学报,2024,55(6):631-642,665.  
TIAN S M,JIANG E H,WANG Y J,et al.Research on constraint thresholds for multi-objective scheduling of reservoirs based on Yellow River basin system governance[J].Journal of Hydraulic Engineering,2024,55(6):631-642,665.
- [12] 姜雪.多级橡胶坝联合调度泄流特性研究[D].太原:太原理工大学,2015.  
JIANG X.Study on the flow discharge characteristics of multi-level rubber dams joint scheduling[D].Taiyuan:Taiyuan University of Technology,2015.
- [13] 刘攀,郭生练,张文选,等.梯级水库群联合优化调度函数研究[J].水科学进展,2007(6):816-822.  
LIU P,GUO S L,ZHANG W X,et al.Derivation of optimal operating rules for cascade reservoirs[J].Advances in Water Science,2007(6):816-822.
- [14] 李阳,邹进,张雷,等.基于水文学法的小流域生态流量研究[J].水电能源科学,2023,41(8):52-55.  
LI Y,ZOU J,ZHANG L,et al.Study on ecological flow of small watershed based on hydrological method[J].Water Resources and Power,2023,41(8):52-55.
- [15] 王文君,方国华,李媛,等.基于改进多目标粒子群算法的平原坡水区水资源优化调度[J].水资源保护,2022,38(2):91-96,127.  
WANG W J,FANG G H,LI Y,et al.Optimal operation of water resources in plain slope water area based on improved multi-objective particle swarm optimization algorithm[J].Water Resource Protection,2022,38(2):91-96,127.
- [16] QIAO WB,YANG Z.Modified dolphin swarm algorithm based on chaotic maps for solving high-dimensional function optimization problems[J].IEEE Access,2019,7:110472-110486.
- [17] 孙秋戎,李勇,唐歉,等.改进的多目标差分进化算法在水库优化调度中的应用[J].人民珠江,2021,42(6):8-13.  
SUN Q R,LI Y,TANG Q,et al.Application of improved multi-objective differential evolution algorithm in the optimal operation of reservoirs[J].Pearl River,2021,42(6):8-13.
- [18] 李想,董玉民.一种优化的量子蚁群算法在旅行商问题上的应用[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2022,39(5):127-133.  
LI X,DONG Y M.Application of an optimized quantum ant colony algorithm to TSP problem[J].Journal of Chongqing Normal University (Natural Science),2022,39(5):127-133.
- [19] 刘若辰,李建霞,刘静,等.动态多目标优化研究综述[J].计算机学报,2020,43(7):1246-1278.  
LIU RC,LI JX,LIU J,et al.A survey on dynamic multi-objective optimization[J].Chinese Journal of Computers,2020,43(7):1246-1278.
- [20] 周修理,王开宇,秦娜,等.应用NSGA-II-AdaBoost方法结合土壤物理性质对大豆产量预测模型的构建[J].东北农业大学学报,2024,55(7):71-82.  
ZHOU X L,WANG K Y,QIN N,et al.Construction of a soybean yield prediction model using NSGA-II-AdaBoost method integrated with soil physical properties[J].Journal of Northeast Agricultural University,2024,55(7):71-82.
- [21] 李文峰,徐蕾,杨琳琳,等.基于改进蚁群算法的农业机器人多田块路径规划方法与试验[J].南京农业大学学报,2024,47(4):823-834.  
LI W F,XU L,YANG L L,et al.Multi field path planning method and experiment of agricultural robot based on improved ant colony algorithm[J].Journal of Nanjing Agricultural University,2024,47(4):823-834.
- [22] 李传利,李新杰,金祖凯,等.基于SA-NSGA-II算法的水库多目标优化调度研究[J].水电能源科学,2024,42(2):183-187.  
LI C L,LI X J,JIN Z K,et al.Study on multi-objective optimal scheduling of reservoirs based on SA-NSGA-II algorithm[J].Water Resources and Power,2024,42(2):183-187.
- [23] 黄艳,喻杉,罗斌,等.面向流域水工程防灾联合智能调度的数字孪生长江探索[J].水利学报,2022,53(3):253-269.  
HUANG Y,YU S,LUO B,et al.Development of the digital twin Changjiang River with the pilot system of joint and intelligent regulation of water projects for flood management[J].Journal of Hydraulic Engineering,2022,53(3):253-269.
- [24] 刘洪波,营浩然.基于协同进化粒子群优化算法的水资源配置模型及应用[J].人民黄河,2024,46(11):74-79.  
LIU H B,JIAN H R.Water allocation model based on coevolutionary particle swarm optimization algorithm and its application[J].Yellow River,2024,46(11):74-79.
- [25] 张涛,张求真,乔友刚,等.平原河道闸坝群洪水资源联合调度研究[J].中国农村水利水电,2022(5):147-151,156.  
ZHANG T,ZHANG Z L,QIAO Y G,et al.Research on the flood resources joint operation of the sluice dam group in the plain river[J].China Rural Water and Hydropower,2022(5):147-151,156.
- [26] 邓浩,郝瑞霞.基于改进遗传算法的梯级橡胶坝调度优化[J].人民黄河,2020,42(3):150-154.  
DENG H,HAO R X.Scheduling optimization of cascade rubber dam based on improved genetic algorithm[J].Yellow River,2020,42(3):150-154.