

席海潮, 解阳, 刘赛艳, 等. 基于 IMOCS 算法的跨流域水资源多目标优化调配[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(5): 946-958. XI H C, XIE Y Y, LIU S Y, et al. Multi-objective optimal allocation of inter-basin water resources based on improved multi-objective cuckoo search algorithm[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(5): 946-958. (in Chinese)

# 基于 IMOCS 算法的跨流域水资源多目标优化调配

席海潮<sup>1,2</sup>, 解阳<sup>2,3,4</sup>, 刘赛艳<sup>2</sup>, 毛青<sup>2</sup>, 张钦<sup>2</sup>, 胡华清<sup>2</sup>, 刘辰焯<sup>2</sup>

(1. 南京市水利规划设计院股份有限公司, 南京 210000; 2. 扬州大学水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009;  
3. 江苏省高效节能大型轴流泵站工程研究中心, 江苏 扬州 225009;  
4. 扬州大学现代农村水利研究院, 江苏 扬州 225009)

**摘要:** 为有效求解跨流域水资源多目标优化调配问题, 提出一种改进多目标布谷鸟算法(improved multi-objective cuckoo search algorithm, IMOCS)。针对多目标布谷鸟优化算法(multi-objective cuckoo search algorithm, MOCS)收敛速度慢、容易陷入局部最优解的缺点, 引入混沌理论和变异机制, 采用自适应发现概率和步长改进 MOCS, 形成 IMOCS 算法。以南水北调东线工程江苏段为例, 构建跨流域水资源多目标调配模型, 分别采用 IMOCS 和 MOCS 求解模型, 并运用基于组合赋权的非负矩阵分解法对 2 种算法所得的 Pareto 解集进行评价。结果表明: IMOCS 在收敛性、多样性和综合性能方面优于 MOCS, 能够得到更高质量的 Pareto 解集; 相较于 50%、75% 和 95% 来水频率下的 MOCS 所求解的最优配置方案, IMOCS 所求解的最优配置方案缺水总量减少 0.21 亿、0.51 亿和 0.07 亿 m<sup>3</sup>, 损失水量分别减少了 0.13 亿、1.53 亿和 1.11 亿 m<sup>3</sup>。因此, IMOCS 可为跨流域水资源多目标优化配置计算提供有效的算法参考。

**关键词:** 改进多目标布谷鸟算法; 多目标优化; 水资源优化配置; 南水北调东线工程江苏段

**中图分类号:** TV213.9 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0094

水资源是支撑经济社会可持续发展和生态环境健康稳定的基础性自然资源, 具有时空分布不均的特征, 且常与经济社会发展水平和产业结构布局不相匹配<sup>[1]</sup>。为此, 人们采取各种工程性和非工程性的措施合理配置水资源, 即水资源调配<sup>[2]</sup>。跨流域调水工程将富水流域的水调入贫水流域, 用来缓解贫水流域的缺水问题, 是缓解区域水资源分布不均、实现水资源合理配置的重要措施<sup>[3]</sup>。

传统跨流域优化调配多以单目标调配为主, 即侧重于跨流域调水某个方面的作用, 并将其作为调度目标进行优化, 而将其他目标作为约束条件进行处理<sup>[4]</sup>。侍翰生等<sup>[5]</sup>以缺水量(弃水量)平方和最小为目标函数建立了水资源优化调度模型, 将多目标问题转化为单目标问题, 得到江苏段的水资源优化调度方案。王文杰等<sup>[6]</sup>以抽水量和总缺水量最小构

建优化调度模型, 利用遗传算法进行求解, 得到江苏段的水量调配方案。然而依托跨流域调水工程的水资源调配问题, 是一个涉及多目标、非线性、强约束的复杂多目标优化问题。当决策问题需要面对多个目标时, 一般的单目标调度方法已不能满足工程调度需求<sup>[7]</sup>, 并且跨流域调水工程中河湖(库)自然连通和人工连通的并存方式以及不同湖库之间的串并联关系使得水资源调配过程更复杂<sup>[8]</sup>, 近年来, 许多研究人员在跨流域水资源优化配置方面开发了一些新的多目标优化算法<sup>[9-10]</sup>, 并取得了一定效果, 这些结果表明改进多目标优化算法是优化水资源系统的重要方法之一。因此, 有必要开发新算法来进行复杂的跨流域水资源多目标优化调配研究。

布谷鸟搜索算法是 Yang 等<sup>[11]</sup>通过模拟布谷鸟寻窝产卵的行为而提出的一种群智能优化算法, 比

收稿日期: 2024-02-21 修回日期: 2024-08-22 网络出版时间: 2024-09-24

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240923.1546.002>

基金项目: 国家自然科学基金项目(42401010); 江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究项目资助(24KJB570005); 江苏省高效节能大型轴流泵站工程研究中心开放课题项目(ECHEAP013); 2024 年度扬州大学人文社会科学研究基金项目(xjj2024-38)

作者简介: 席海潮(1998—), 男, 江苏连云港人, 主要从事水资源优化调配研究。E-mail: 1592943370@qq.com

通信作者: 解阳(1986—), 男, 山东巨野人, 副教授, 博士, 主要从事水资源系统分析与优化研究。E-mail: xieyangyang@yzu.edu.cn

现有大多数启发式优化算法的效率更高。为解决多目标优化问题, Yang 等<sup>[12]</sup>结合 Pareto 最优策略,进一步设计了多目标布谷鸟优化算法(multi-objective cuckoo search algorithm, MOCS),该算法自提出以来,因其参数少和原理简单易于实现等优点,表现出更出色的收敛性和性能,被广泛应用于一些复杂工程性问题。杨晓萍等<sup>[13]</sup>基于改进的多目标布谷鸟优化算法解决了梯级水电站多目标优化调度问题,得到梯级水电站用水过程。钟祿充等<sup>[14]</sup>利用混合多目标布谷鸟优化算法求解流水线车间调度问题。赵小强等<sup>[15]</sup>基于改进的多目标布谷鸟优化算法求解污水处理能耗和出水水质模型。但是 MOCS 也存在容易陷入局部最优解,运行后期收敛速度慢等问题。

为解决以上问题,本文通过混沌理论生成混沌序列,采用混沌序列初始化鸟巢位置,用来加强种群多样性;采用余弦策略将固定发现概率和步长设置为随迭代次数变化而动态改变的变量;最后为防止算法在迭代后期陷入局部最优,借鉴第二代非支配遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithms-II, NSGA-II)中变异策略对 MOCS 每代的第

一层级引入变异机制,进一步提高种群的质量,形成改进的多目标布谷鸟优化算法(improved multi-objective cuckoo search algorithm, IMOCS)。以南水北调东线工程江苏段(以下简称江苏段)为例,分别采用 IMOCS 和 MOCS 求解江苏段水资源多目标优化调配模型,运用基于组合赋权-非负矩阵分解法对方案集进行方案评价,提出江苏段水资源最优调配方案。

## 1 研究区概况

### 1.1 研究区域

江苏段是在江水北调工程的基础上,逐步扩大调水规模并向北延伸,是缓解我国北方水资源严重短缺问题的重要战略性基础设施<sup>[10]</sup>。为充分体现湖泊的调蓄能力和江苏段的实际工程运行特点,根据江苏段的主要组成和干线支流的连接关系进行系统概化,将江苏段主要划分为长江-洪泽湖、洪泽湖-骆马湖、骆马湖-骆马湖-南四湖、南四湖 6 个受水区,将安徽省的农业受水区划入洪泽湖,将山东省单独概化为 1 个用水户,概化后的系统示意图,见图 1。



图 1 南水北调东线工程江苏段水资源系统概化图

Fig. 1 Generalized water resources system of the Jiangsu Section of South-to-North Water Transfers (J-SNWT) Project

### 1.2 研究数据

采用 P-III 型曲线对洪泽湖、骆马湖、南四湖下级湖的历史来水数据进行水文频率分析,得出不同

设计频率的年径流量,从而选择与其相近的年份作为代表年,确定 50%(平水年)、75%(枯水年)、95%(特枯水年)3 种来水条件下典型年。以月为计

算单位,以水文年为计算周期,以 3 个调蓄湖泊洪泽湖、骆马湖、南四湖下级湖的入湖径流作为输入,各个湖泊的起调水位为死水位。相关湖泊历史长序列径流资料来源于《淮河水文年鉴》。

江苏段 7 个受水区的用水部门主要包括农业、工业、生活、生态环境、航运等。在经济社会预测的基础上,即考虑江苏段整体的经济布局 and 产业结构调整等情况,按照资源节约和环境友好型社会要求,考虑强化节水措施,加大节水力度等因素提出需水方案。采用需水定额法计算不同设计频率下

的江苏段受水区农业、工业、生活、生态环境的需水结果,按照江苏段受水区输水干线和支线,分别对各航运每天开闸次数和开闸耗水量进行统计分析,从而确定各区间的航运需水总量。预计到 2030 年,江苏段各受水区在 50% 来水频率下的各类需水总量将达到 159.77 亿 m<sup>3</sup>,在 75% 来水频率下的各类需水总量将达到 186.35 亿 m<sup>3</sup>,在 95% 来水频率下的各类需水总量将达到 216.83 亿 m<sup>3</sup>。不同来水频率下各区间不同部门的需水总量,见图 2。

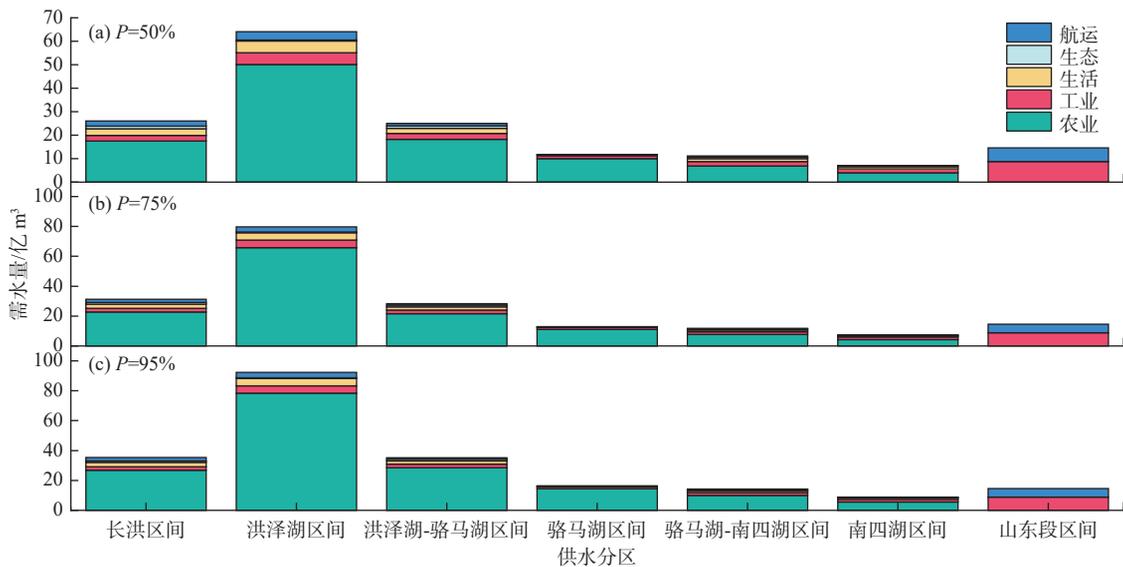


图 2 江苏段各区间需水总量

Fig. 2 Total water demand among the intervals of the J-SNWT Project

## 2 研究方法

### 2.1 江苏段多目标水资源优化调配模型

#### 2.1.1 目标函数

在对江苏段水资源系统进行水资源优化配置时,应该充分满足不同用水部门的用水需求。蒸发、渗漏损失水量和调蓄湖泊的弃水量都会严重影响水资源配置的效率。因此,本文综合考虑以不同用户缺水总量最小和水资源系统水量损失最小为水资源调配目标。目标函数计算公式为

目标 1: 缺水总量最小

$$f_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^m (W_{D,i,t} - W_{S,i,t}) \quad (1)$$

式中:  $f_1$  为水资源系统内各用户(农业、工业、生活、航运和生态)在整个调度期内的缺水总量, 万 m<sup>3</sup>;  $T$  为调度期内总月数;  $m$  为水资源系统的调配单元(受水区、湖泊和河道等)总数;  $W_{D,i,t}$  为水资源系统第  $t$  月第  $i$  单元的需水量, 万 m<sup>3</sup>;  $W_{S,i,t}$  为水资源系统在

第  $t$  月给第  $i$  单元的供水, 万 m<sup>3</sup>。

目标 2: 水资源系统水量损失最小

$$f_2 = \sum_{t=1}^T \left[ \sum_{i=1}^I (W_{L,i,t} + W_{Q,i,t}) + \sum_{j=1}^J (W_{E,j,t} + W_{Q,j,t}) \right] \quad (2)$$

式中:  $f_2$  为水资源系统在调度期内的总水量损失, 万 m<sup>3</sup>;  $I$  为河道单元总数;  $W_{L,i,t}$  和  $W_{Q,i,t}$  分别为第  $i$  河道单元在第  $t$  月的渗漏损失水量和弃水量, 万 m<sup>3</sup>;  $J$  为湖泊单元总数;  $W_{E,j,t}$  和  $W_{Q,j,t}$  分别为第  $j$  湖泊单元在第  $t$  月的蒸发水量和弃水量, 万 m<sup>3</sup>。

江苏段的沿程水量损失主要指河湖水面蒸发损失和渗漏损失。湖泊水面蒸发损失量主要公式为

$$E_w = KE_{pan} \quad (3)$$

式中:  $E_w$  为月水面蒸发量, mm;  $K$  为蒸发器月水面蒸发量折算系数;  $E_{pan}$  为蒸发器月水面蒸发量, mm。

首先建立湖泊库容与湖泊水位面积相关曲线关系, 计算湖泊水面面积, 在建立湖泊蒸发损失和水面面积的统计关系, 结合江苏段调蓄湖泊实际情况,

建立调蓄湖泊的蒸发损失为

$$H = E_w F \quad (4)$$

式中:  $H$  为月水面蒸发水量,  $m^3$ ;  $E_w$  为月水面蒸发量,  $mm$ ;  $F$  为月平均水面面积,  $km^2$ 。

河道渗漏损失由考斯加可夫(Kostiakov)公式<sup>[16]</sup>计算得出,主要公式为

$$S = 0.01A Q_0^{1-m} \quad (5)$$

式中:  $S$  为每千米渠道输水损失流量,  $m^3/s$ ;  $Q_0$  为渠道平均流量,  $m^3/s$ ;  $A$ 、 $m$  为渠床土壤透水性参数,其值见表 1。

表 1 土壤透水性参数  
Tab. 1 Soil permeability parameters

渠床土壤	$A$	$m$
沙壤土黏土	3.40	0.50
轻壤土	2.65	0.45
中壤土	1.90	0.40
重壤土	1.30	0.35
黏土	0.70	0.30

### 2.1.2 约束条件

约束条件包含水量平衡约束、湖泊调蓄能力约束、北调控制水位约束等,具体如下:

湖泊水量平衡约束

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + Q_{i,t} + J_{i,t} + P_{i+1,t} - C_{i,t} - W_{D1,i,t} - W_{E,i,t} - W_{Q,i,t} \quad (6)$$

河网单元水量平衡约束

$$J_{i,t} - W_{Q,i,t} = C_{i,t} - W_{D2,i,t} - P_{i,t} - W_{L,i,t} \quad (7)$$

湖泊调蓄能力约束

$$V_{i,t,\min} \leq V_{i,t} \leq V_{i,t,\max} \quad (8)$$

泵站抽水能力约束

$$0 \leq J_{i,t} \leq J_{i,t,\max}; 0 \leq C_{i,t} \leq C_{i,t,\max} \quad (9)$$

控制闸站下泄能力约束

$$W_{Q,i,t,\min} \leq W_{Q,i,t} \leq W_{Q,i,t,\max} \quad (10)$$

式(6)~(10)中:  $i$  为湖泊编号;  $V_{i,t}$  为第  $i$  湖泊第  $t$  时段末库容,  $万 m^3$ ;  $Q_{i,t}$ ,  $J_{i,t}$ ,  $W_{Q,i,t}$ ,  $C_{i,t}$  为第  $i$  湖泊第  $t$  时段天然入湖径流量、抽水入湖水量、抽湖北调水量和弃水量,  $万 m^3$ ;  $P_{i+1,t}$ ,  $P_{i,t}$  为第  $t$  时段泄入第  $i$  湖泊和第  $i-1$  湖泊的水量,  $万 m^3$ ;  $W_{D1,i,t}$ ,  $W_{D2,i,t}$  为第  $i$  区间第  $t$  时段的需水量,  $万 m^3$ ;  $W_{E,i,t}$  为第  $i$  湖泊第  $t$  时段的蒸发损失,  $万 m^3$ ;  $W_{L,i,t}$  为第  $i$  河网第  $t$  时段的渗漏损失量,  $万 m^3$ ;  $V_{i,t,\min}$ ,  $V_{i,t,\max}$  分别为第  $i$  湖泊第  $t$  时段的库容上、下限,  $万 m^3$ ;  $J_{i,t,\max}$ ,  $C_{i,t,\max}$  分别为第  $i$  湖泊

第  $t$  时段泵站的上限能力,  $万 m^3$ ;  $W_{Q,i,t,\min}$ ,  $W_{Q,i,t,\max}$  分别为第  $i$  闸站第  $t$  时段的过流能力上、下限,  $万 m^3$ ;  $W_{Q,i,t,\min}$ ,  $W_{Q,i,t,\max}$  分别为第  $t$  时段第  $i$  闸站的最小和最大过流能力,  $万 m^3$ 。

北调控制水位约束。将北调控制水位作为下限约束,当湖泊水位低于此水位时,停止抽湖泊既有蓄水北调,具体见表 2。

表 2 调蓄湖泊北调控制水位  
Tab. 2 Controlled water levels in storage lakes 单位:  $m$

湖泊	7月上旬— 8月底	9月上旬— 11月上旬	11月中旬— 3月底	4月上旬— 6月底
洪泽湖	12.0	12.0~11.9	12.0~12.5	12.5~12.0
骆马湖	22.2~22.1	22.1~22.2	22.1~23.0	23.0~22.5
南四湖	31.8	31.5~31.9	31.9~32.8	32.3~31.8

非负约束。所有的流量均大于 0。

## 2.2 改进 MOCS 算法

MOCS 依靠莱维飞行中随机游走策略来确定步长  $a$ , 所以 MOCS 的寻优能力很强。但固定步长和发现概率使得 MOCS 后期收敛速度慢,容易陷入局部最优解等问题<sup>[13,17]</sup>。针对这些问题,本文从种群初始化、鸟巢位置更新和寻优路径 3 个方面改善算法性能,提出一种 IMOCS 算法。

### 2.2.1 混沌映射

MOCS 的初始鸟巢位置是随机生成的,可能会导致鸟巢位置分布不均匀、降低种群多样性,而混沌序列具有不重复遍历性、随机性和规律性等特点,能够使得算法种群保持多样性,提高算法的全局搜索能力。Tent 混沌映射在均匀性、规律性和迭代速度方面相比较于其他混沌映射具有更大的优势<sup>[18]</sup>。Tent 混沌映射的表达式为

$$Z_k(i+1) = \begin{cases} \frac{Z_k(i)}{u} & 0 \leq Z_k(i) < u \\ \frac{1-Z_k(i)}{1-u} & u \leq Z_k(i) \leq 1 \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $Z_k(i+1)$  为区间  $[0,1]$  的混沌序列  $k$  为种群数量;  $i$  为当前迭代次数;  $u$  取值  $[0,1]$ 。

结合混沌序列,进一步生成搜索区域内的布谷鸟鸟巢初始位置  $X_k(i)$ , 公式如下:

$$X_k(i) = X_k(i)_{\min} + Z_k(i)(X_k(i)_{\max} - X_k(i)_{\min}) \quad (12)$$

式中:  $X_k(i)_{\min}$ ,  $X_k(i)_{\max}$  分别为  $X_k(i)$  序列的最小值和最大值。

### 2.2.2 动态发现概率和步长

MOCS 中固定的步长  $a$  和发现概率  $P_a$  可能会

导致 MOCS 的迭代次数的增加和寻优精度不高。如果  $P_a$  值较大,  $a$  值较小, MOCS 的收敛速度会加快, 但容易陷入局部最优解。如果  $a$  值较大,  $P_a$  值较小, MOCS 的迭代次数将会增多且寻优精度会下降。采用余弦策略将  $a$  和  $P_a$  设置为随迭代次数增加而改变的变量<sup>[14,17]</sup>。在算法运行初期采用较大的  $a$  和  $P_a$ , 可以迅速找到最优解的周围, 在运行后期采用较小的  $a$  和  $P_a$  来获取最优的收敛结果, 以此来提高算法的寻优精度。

动态发现概率和步长公式如下:

$$P_a = P_{a,max} \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{T-1}{T_{max}-1}\right) + P_{a,min} \quad (13)$$

$$a(i+1) = \begin{cases} a_{max} \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{T}{T_{max}}\right) & R \leq 0.2 \\ a(i) & 0.2 < R \leq 0.5 \\ a_{min} & R > 0.5 \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $P_{a,max}$  和  $P_{a,min}$  为  $P_a$  的控制参数, 都位于 0~1 范围内;  $a_{max}$  和  $a_{min}$  为  $a$  的控制参数,  $a$  的取值范围为 [0.01, 0.20];  $T$  为进化代数;  $T_{max}$  为进化代数上限;  $R$  为当前进化代数与最大进化代数之比。

### 2.2.3 种群变异机制

MOCS 在迭代后期可能存在陷入局部最优解的问题。要想获得高质量的种群, 必须加大种群规模, 但种群规模的加大势必会影响计算机的运行, 导致寻优速度下降。因此, 借鉴 NSGA-II 算法中变异策略对 MOCS 每代的 Pareto 第一层级引入变异机制, 以进一步提高第一层级种群的质量, 防止 MOCS 在迭代后期陷入局部最优<sup>[17]</sup>。变异机制如下:

$$x_{t,b2} = x_{t,b1} + \left[ a_1 \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{T-1}{T_{max}-1}\right) \right] \oplus \varepsilon \quad (15)$$

式中:  $x_{t,b2}$ 、 $x_{t,b1}$  为变异前和变异后的鸟巢位置;  $a_1$  为控制参数, 为 [0, 1] 之间均匀分布的随机数;  $\varepsilon$  为  $1 \times d$  向量, 服从标准正态分布;  $d$  为优化问题的维数。

### 2.2.4 算法流程

基于以上描述, IMOCS 的流程见图 3。

## 2.3 基于组合赋权-非负矩阵分解的多属性评价

### 2.3.1 水资源优化调配模型指标体系

进行江苏段水资源优化调配研究是为实现多水源在输水过程到多用户之间的互济互调, 因此, 在水资源系统中进行调度应尽可能充分利用天然来水, 合理利用湖泊的调蓄能力, 增加整个水资源系

统的供水总量, 缓解不同受水区的缺水程度。在此基础上, 进一步选取抽江水量、弃水量、蒸发渗漏水量和总抽水量指标。结合江苏段实际情况, 构建江苏段水资源系统指标体系, 见表 3。

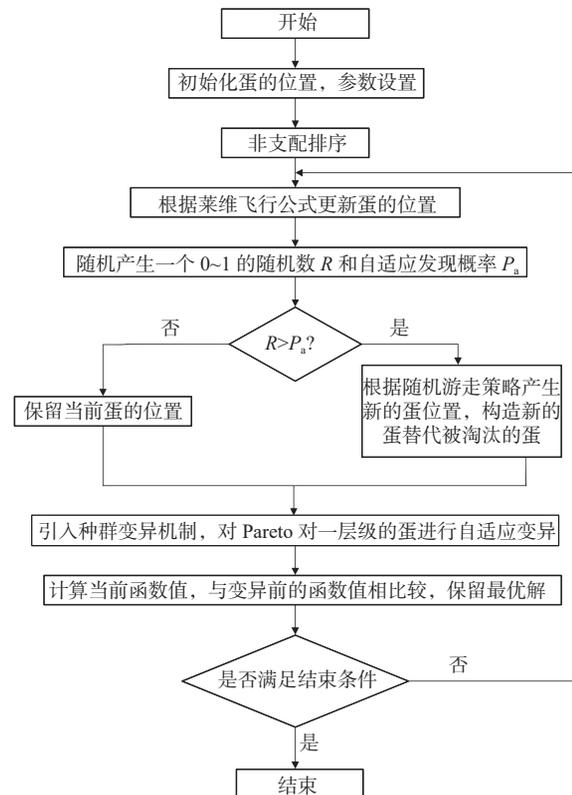


图 3 IMOCS 的算法流程

Fig. 3 Algorithm flow chart of IMOCS

表 3 南水北调东线工程江苏段水资源系统指标体系

Tab. 3 Water resources system index system of the J-SNWT Project

评价准则	指标
水资源利用效率	总缺水量 $f_1$
	抽江水量 $f_2$
	弃水量 $f_3$
水资源系统成本	蒸发渗漏水量 $f_4$
	总抽水量 $f_5$

### 2.3.2 基于组合赋权-非负矩阵分解的多属性评价方法

采用主观与客观权重相结合的计算方法确定各指标权重, 采用层次分析法进行主观赋权<sup>[19]</sup>。采用 CRITIC (criteria importance through inter-criteria correlation) 进行客观赋权, CRITIC 法在指标权重的确定上不仅分析指标变异对权重的影响, 也考虑到指标之间存在的冲突性关系<sup>[20]</sup>。在确定主、客观权重之后, 按式(16)计算组合权重, 计算公式为

$$w(i) = \mu w_1(i) + (1 - \mu) w_2(i), i = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

式中:  $\mu$  为主、客观权重之间的组合系数,  $0 \leq \mu \leq 1$ ;  $w_1$  为客观权重;  $w_2$  为主观权重;  $w$  为融合后的权重。

基于非负矩阵分解原理的评价方法<sup>[21]</sup>的主要公式如下:

$$\begin{cases} v_i = \sum_{j=1}^n z_{ij} \cdot h_j / \sum_{j=1}^n h_j^2 & (i = 1, 2, \dots, m) \\ h_j = \sum_{i=1}^m z_{ij} \cdot v_i / \sum_{i=1}^m v_i^2 & (j = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $n$  为 Pareto 最优解集中的解个数;  $m$  为评价指标数;  $V=(v_1, v_2, \dots, v_m)^T$  为基向量,  $v_i \in [0, 1], \sum v_i^2 = 1$ ;  $H=(h_1, h_2, \dots, h_n)$  为权向量,  $h_j \in [0, +\infty)$ ;  $z_{ij}$  为解  $j$  对

应指标  $i$  的归一化值。

### 3 结果及分析

#### 3.1 ZDT 测试集结果

为验证 IMOCS 性能的可行性与优越性, 选用文献 [22] 中给出的 ZDT 测试集 (ZDT1、ZDT2、ZDT3、ZDT4 和 ZDT6) 检验 IMOCS 性能。IMOCS 对 ZDT 测试集的 Pareto 前沿和测试集 Pareto 真实前沿对比见图 4, 结果表明 IMOCS 对 ZDT 测试集的优化结果基本收敛到测试集的 Pareto 真实前沿面上且分布较为均匀。

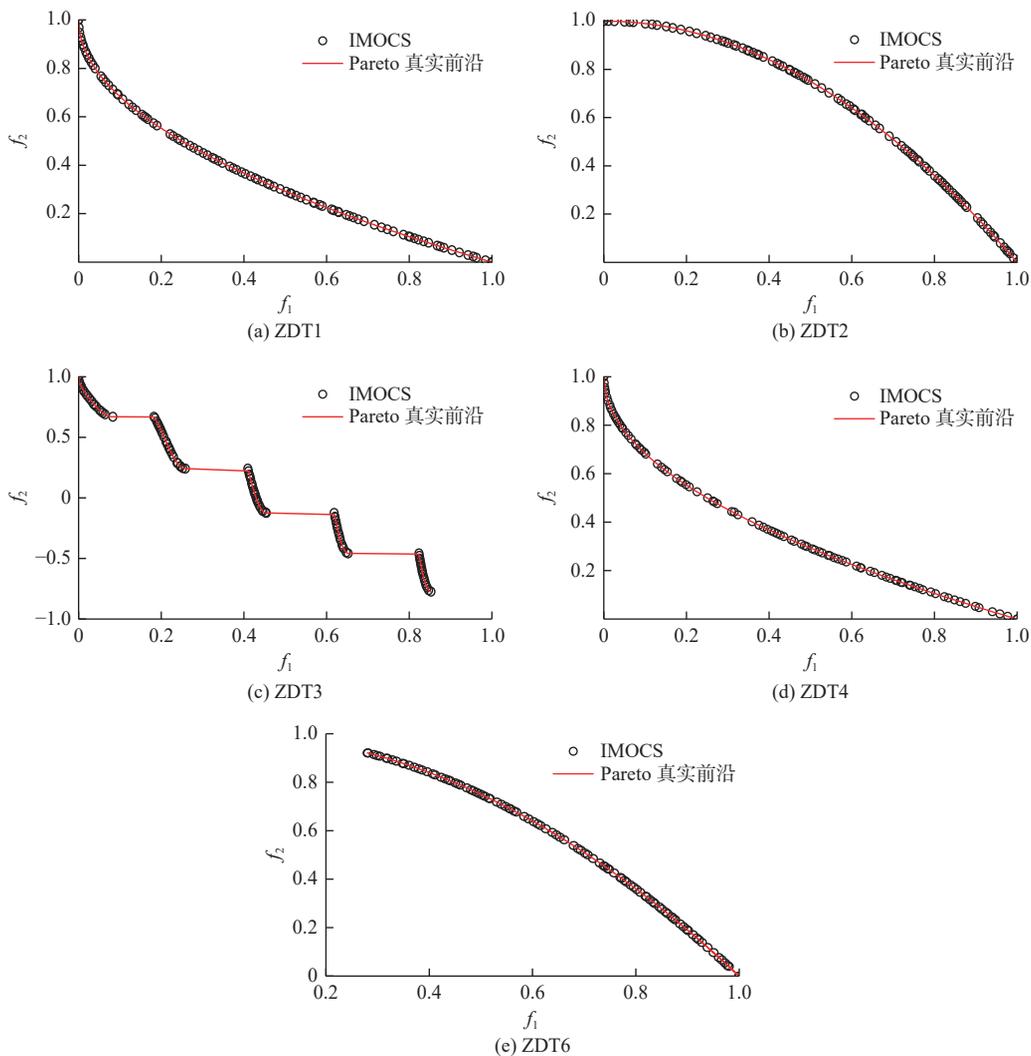


图 4 IMOCS 求解的 Pareto 解集与 Pareto 真实前沿对比

Fig. 4 Comparison of the Pareto solution set solved by IMOCS with the Pareto true frontier

为进一步验证 IMOCS 的算法性能, 采用收敛性指标 (generational distance, GD): 多目标算法所求解的 Pareto 解集收敛到 Pareto 真实前沿面的能力, 其值越小, 表明收敛精度越高<sup>[23]</sup>; 多样性指标 (spacing metric, SP): 多目标算法所求解的 Pareto 解

集应均匀分布在整个解空间的能力, SP 越小, 表明得到的 Pareto 解分布更均匀<sup>[23]</sup>; 综合评价指标 (inverted generational distance, IGD): 通过一个标量值来同时反映多目标算法的收敛性和多样性, IGD 越小, 表明所得解集具有较好的综合性能<sup>[24]</sup>。对

IMOCS 进行性能验证,并与其他多目标算法(MOCS 和 NSGA-II)进行横向对比。IMOCS 的参数设置为:鸟巢种群规模为 100,最大迭代为 1 000,种群参数数量为 10。MOCS 的参数设置为:发现外来鸟蛋概率为 0.25,其他参数同 IMOCS 设置相同。NSGA-II 的参数设置为:种群规模为 100,最大迭代为 1 000,种群参数数量为 10,交叉概率为 0.8,变异概率为 0.05。为避免算法随机性所带来的影响,分别使用 3 种算法对测试集重复求解 20 次,得到 GD、SP 和 IGD 的平均值和方差,其统计结果见表 4。结果表明 IMOCS 在 ZDT 测试集中的收敛性、多样性

和综合性要优于 MOCS。在收敛性方面,IMOCS 在 ZDT1、ZDT2 和 ZDT6 表现出优越的收敛性能,在 ZDT3 和 ZDT4 中的收敛结果虽然低于 NSGA-II,但与其收敛结果相差较小。在多样性方面,IMOCS 在 ZDT3 和 ZDT4 表现出优越的分布性能,在其他测试函数上的测试结果略小于 MOCS 和 NSGA-II,但测试结果都在同一量级上。在综合性方面,IMOCS 除了 ZDT4,在其他测试函数都表现出优越的性能。IMOCS 的 GD、SP 和 IGD 的方差在 ZDT2、ZDT3 和 ZDT6 数值更小,说明 IMOCS 相较于其他 2 种算法更加稳定。

表 4 3 种算法的收敛结果

Tab. 4 Convergence result of three algorithms

测试函数	算法	GD		SP		IGD	
		平均值	方差	平均值	方差	平均值	方差
ZDT1	IMOCS	2.04E-04	3.12E-09	9.46E-03	5.27E-06	2.92E-04	2.08E-09
	MOCS	2.79E-04	2.04E-09	8.77E-03	1.43E-06	2.94E-04	8.80E-09
	NSGA-II	3.69E-04	1.41E-08	1.44E-02	2.62E-07	4.08E-04	5.80E-09
ZDT2	IMOCS	9.59E-05	3.47E-11	8.76E-03	6.24E-07	2.97E-04	5.73E-10
	MOCS	1.29E-02	1.97E-03	7.85E-03	5.21E-06	7.50E-03	5.84E-04
	NSGA-II	3.86E-04	2.93E-08	1.46E-02	3.41E-06	4.24E-04	6.73E-10
ZDT3	IMOCS	3.68E-04	3.63E-10	3.29E-02	3.77E-08	4.06E-04	3.95E-09
	MOCS	4.05E-04	1.11E-08	3.30E-02	4.46E-08	4.29E-04	2.10E-08
	NSGA-II	3.52E-04	8.81E-10	3.39E-02	1.69E-08	4.89E-04	2.98E-08
ZDT4	IMOCS	8.01E-02	7.71E-03	1.23E-02	1.61E-05	5.20E-02	3.08E-03
	MOCS	2.94E-01	3.25E-02	1.25E-02	3.84E-05	2.00E-01	2.01E-02
	NSGA-II	5.21E-04	4.09E-09	1.46E-02	3.82E-07	6.33E-04	1.03E-09
ZDT6	IMOCS	5.99E-03	3.08E-04	5.27E-02	1.61E-05	1.29E-04	2.31E-09
	MOCS	1.01E-01	4.65E-03	3.60E-01	5.21E-05	9.64E-04	1.80E-05
	NSGA-II	1.52E-01	5.80E-04	1.89E-02	4.45E-05	3.74E-02	2.71E-05

### 3.2 多目标优化调配模型求解结果

#### 3.2.1 多目标优化调配模型求解 Pareto 解集

采用 IMOCS 和 MOCS 分别求解江苏段水资源优化配置模型。图 5 为 IMOCS 和 MOCS 迭代 5 000 次后得到的 Pareto 前沿。如图 5(a)、(b)和(c)所示,IMOCS 求解结果下受水区缺水目标值的分布范围为 [1.36, 11.78] 亿  $m^3$ 、[19.19, 84.47] 亿  $m^3$ 、[104.81, 224.72] 亿  $m^3$ ,系统水量损失目标值分布范围为 [116.73, 121.47] 亿  $m^3$ 、[57.16, 94.31] 亿  $m^3$ 、[14.10, 67.31] 亿  $m^3$ 。MOCS 求解结果下受水区缺水目标值的分布范围为 [1.36, 11.16] 亿  $m^3$ 、

[19.22, 90.70] 亿  $m^3$ 、[97.04, 214.50] 亿  $m^3$ ,系统水量损失目标值分布范围为 [118.16, 122.02] 亿  $m^3$ 、[58.67, 97.65] 亿  $m^3$ 、[13.86, 70.96] 亿  $m^3$ 。

#### 3.2.2 Pareto 解集收敛性检验

为进一步验证 IMOCS 和 MOCS 对多目标优化配置模型求解的 Pareto 解集是收敛的,采用超体积指标<sup>[25]</sup>进行判别,并分别将 IMCOS 和 MOCS 对多目标算法的解集完整计算 30 次,计算每次得到 Pareto 解集的超体积指标值,如果超体积指标相近,则代表 IMOCS 和 MOCS 所求解的 Pareto 是收敛的,其结果具有一定的科学性,计算结果见表 5。

IMOCS 对应的 50%、75% 和 95% 来水频率的 Pareto 超体均值分别为 0.57、0.48 和 0.48, 方差为 1.78E-07、6.6E-07 和 1.32E-07, 其变化程度极小, 表明 IMOCS 所求解的 Pareto 解集是收敛的。MOCS 对应的 50%、75% 和 95% 来水频率的 Pareto 超体

积均值为 0.46、0.42 和 0.37, 方差为 3.25E-07、1.33E-07 和 1.26E-07, 其变化程度同样也极小, 表明 MOCS 所求解的 Pareto 解集也是收敛的。在 2 种算法同时收敛的情况下, 进行最优调配方案选择。

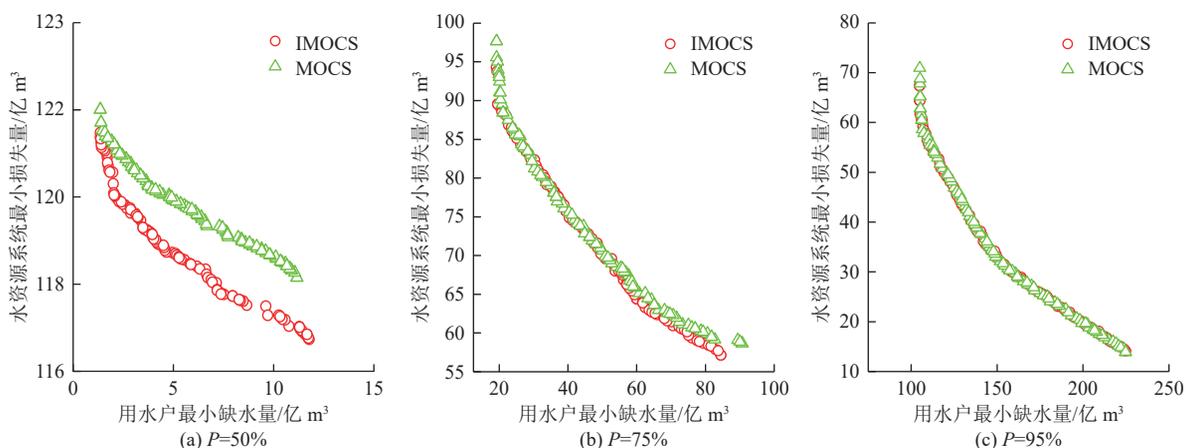


图 5 2 种算法迭代 5 000 次后的 Pareto 解集

Fig. 5 Pareto solution set after 5 000 iterations of the two algorithms

表 5 2 种算法对应的超体指标收敛值

Tab. 5 Convergence values of hypervolume metrics corresponding to the two algorithms

来水频率	IMOCS		MOCS	
	均值	方差	均值	方差
P=50%	0.57	1.78E-07	0.46	3.25 E-07
P=75%	0.48	6.61E-07	0.42	1.33 E-07
P=95%	0.48	1.32E-07	0.37	1.26E-07

### 3.3 江苏段水资源最优调配方案选择

#### 3.3.1 组合赋权法对方案集赋权

由于 Pareto 前沿面中存在很多方案, 且各方案的目标值分布广泛, 如果将所有方案考虑进备选方案集, 会增加方案决策的不确定性和难度。因此,

在选择备选方案集时, 选择总缺水量目标值最小的 10 个方案作为备选方案集。将 IMOCS 求解出的备选方案集记为方案集 1, MOCS 求解出的备选方案集记为方案集 2。采用层次分析法对方案集 1 和方案集 2 进行主观赋权, CRITIC 法进行客观赋权。在 50% 来水频率下, 江苏段的运行成本被首要关注, 应尽可能降低工程运行成本。因此, 在主观赋权时, 总抽水量被赋予最大的权重。在 75% 和 95% 来水频率下, 应着重关注弃水量和蒸发渗漏量, 以防损失水量对工程调配效率产生影响。因此, 主观赋权时对赋予弃水量和蒸发渗漏量较大的权重。采取  $\mu=0.5$  对主客观权重进行融合, 水资源优化配置方案集指标权重见表 6。

表 6 3 种来水频率下 2 个方案集的权重分配

Tab. 6 The weight distribution table of two scheme sets under the three incoming water conditions

方案集	权重	P=50%					P=75%					P=95%				
		$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$
方案集1	$W_1$	0.39	0.13	0.18	0.13	0.16	0.47	0.12	0.15	0.12	0.13	0.50	0.13	0.13	0.12	0.12
	$W_2$	0.17	0.11	0.11	0.23	0.39	0.17	0.14	0.21	0.29	0.19	0.17	0.14	0.21	0.29	0.19
	$W$	0.28	0.12	0.14	0.18	0.28	0.32	0.12	0.13	0.18	0.26	0.33	0.12	0.12	0.18	0.26
方案集2	$W_1$	0.38	0.14	0.14	0.13	0.21	0.50	0.13	0.12	0.12	0.13	0.54	0.11	0.12	0.12	0.12
	$W_2$	0.17	0.11	0.11	0.23	0.39	0.17	0.14	0.21	0.29	0.19	0.17	0.14	0.21	0.29	0.19
	$W$	0.27	0.13	0.12	0.18	0.30	0.33	0.12	0.12	0.18	0.26	0.35	0.11	0.11	0.17	0.25

### 3.3.2 水资源最优调配方案选择

采用非负矩阵分解法分别对方案集 1 和方案集 2 进行评价,得到 3 种来水频率下的水资源最优配置方案。将 50% 来水频率下方案集 1 和方案集 2 的最优配置方案分别记为方案 1 和方案 2,将 75% 来水频率下方案集 1 和方案集 2 的最优配置方案分别记为方案 3 和方案 4,将 95% 来水频率下方案集 1 和方案集 2 的最优配置方案分别记为方案 5 和方案 6,各个方案指标情况详见表 7。

图 6 为 50%、75% 和 95% 来水频率下 6 种方案的指标对比图。如图 6(a)所示,在 50% 来水频率下方案 1 的缺水总量比方案 2 减少 0.21 亿 m<sup>3</sup>,抽江水量增大 0.33 亿 m<sup>3</sup>,弃水量减少 0.18 亿 m<sup>3</sup>,蒸发渗漏量增加 0.05 亿 m<sup>3</sup>,总抽水量增加了 0.36 亿 m<sup>3</sup>;如图 6(b)所示,在 75% 来水频率下方案 3 的缺水总量比方案 4 减少 0.51 亿 m<sup>3</sup>,抽江水量减少 2 亿 m<sup>3</sup>,弃

水量减少 0.77 亿 m<sup>3</sup>,蒸发渗漏量减少 0.76 亿 m<sup>3</sup>,总抽水量减少 2.52 亿 m<sup>3</sup>;如图 6(c)所示,在 95% 来水频率下方案 5 的缺水总量比方案 6 减少 0.07 亿 m<sup>3</sup>,抽江水量减少 1.08 亿 m<sup>3</sup>,弃水量减少 0.58 亿 m<sup>3</sup>,蒸发渗漏量减少 0.53 亿 m<sup>3</sup>,总抽水量减少 8.71 亿 m<sup>3</sup>。

表 7 不同最优配置方案的指标值  
Tab. 7 The index values of the six optimal allocation schemes

方案	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$
方案1	1.40	14.30	69.87	51.40	230.39
方案2	1.61	13.97	70.05	51.35	230.03
方案3	19.60	96.19	32.29	57.23	321.25
方案4	20.11	98.19	33.06	57.99	323.77
方案5	105.18	144.55	1.67	60.04	395.77
方案6	105.25	145.63	2.25	60.57	404.48

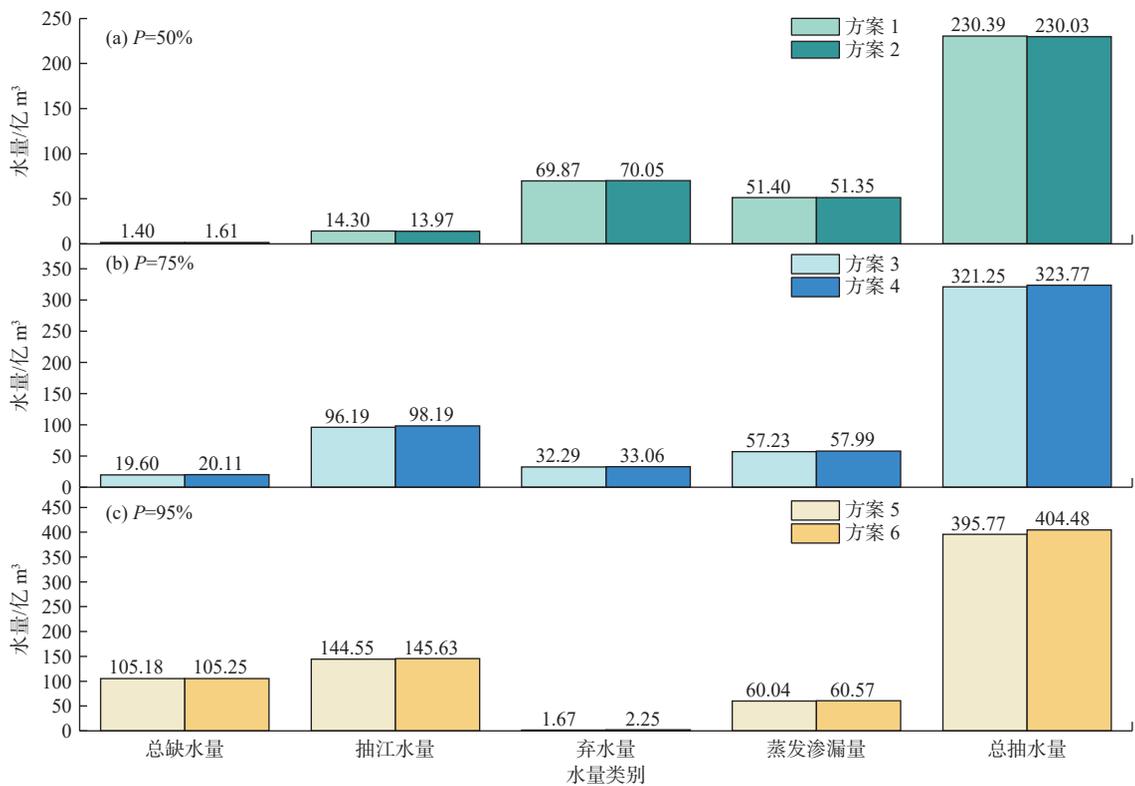


图 6 3 种来水频率下最优配置方案对比

Fig. 6 The optimal allocation schemes comparison diagram under the three incoming water conditions

图 7 为江苏段在 50%、75% 和 95% 来水频率下的最优配置方案。在 50% 来水频率下选择方案 1 作为最优配置方案。如图 7(a)所示,方案 1 的缺水总量为 1.40 亿 m<sup>3</sup>,抽江水量为 14.30 亿 m<sup>3</sup>,弃水量为 69.87 亿 m<sup>3</sup>,蒸发渗漏量为 51.40 亿 m<sup>3</sup>,总抽水量为 230.39 亿 m<sup>3</sup>。在 75% 来水频率下选择方案 3 作为最优配置方案。如图 7(b)所示,方案 3 的缺水总

量为 19.60 亿 m<sup>3</sup>,抽江水量为 96.19 亿 m<sup>3</sup>,弃水量为 32.29 亿 m<sup>3</sup>,蒸发渗漏量为 57.23 亿 m<sup>3</sup>,总抽水量为 321.25 亿 m<sup>3</sup>。在 95% 来水频率下选择方案 5 作为最优配置方案。如图 7(c)所示,方案 5 的缺水总量为 105.18 亿 m<sup>3</sup>,抽江水量为 144.55 亿 m<sup>3</sup>,弃水量为 1.67 亿 m<sup>3</sup>,蒸发渗漏量为 60.04 亿 m<sup>3</sup>,总抽水量为 395.77 亿 m<sup>3</sup>。

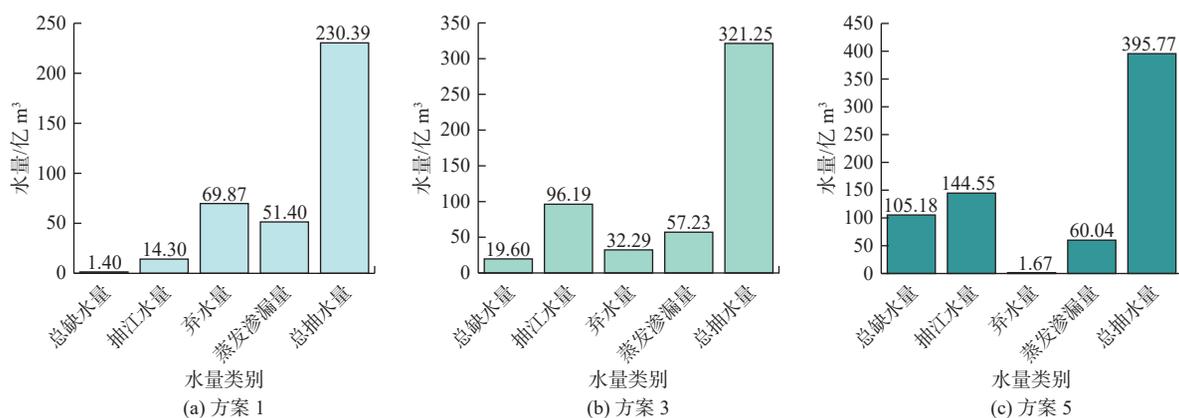


图 7 3 种来水频率下最优配置方案

Fig. 7 The optimal allocation schemes under the three incoming water conditions

## 4 讨论

水资源具有供水、灌溉、发电、航运等多种用途,关系到经济社会效益和生态环境效益。在有限的水资源条件下,缓解不同用水部门之间的矛盾,提高水资源综合利用效益,都需要对水资源进行多目标优化调配<sup>[26]</sup>。多目标优化算法旨在实现 2 个方面目标:一是使其得到的解集尽可能地逼近真实的 Pareto 前沿面上;二是使得到的解集尽可能均匀分布在真实的 Pareto 前沿面上<sup>[27]</sup>。多目标算法所给出的 Pareto 解集可以反映出不同目标优化值的关系,在解决水资源多目标优化调配问题上具有显著优势。将 IMOCS 求解 ZDT 测试集展示的性能与其他多目标优化算法结果进行比较,5 个测试函数的收敛性指标和分布性指标结果表明:加入混沌映射可以增强 MOCS 的搜索能力,动态发现概率和步长可以有效提高 MOCS 的 Pareto 解集的多样性,种群变异机制可以有效避免 MOCS 陷入局部最优解。测试函数的结果表明 IMOCS 在收敛性和分布性方面要优于 MOCS 和 NSGA-II,这与张鑫帅等<sup>[28]</sup>的研究结果可以相互验证。

在江苏段水资源优化配置研究中,在 50% 来水频率下,IMOCS 所求解的 Pareto 前沿要明显优于 MOCS 求解的 Pareto 前沿,这一结果表明,在来水充足的情况下,江苏段水资源系统的缺水总量和总损失水量存在强烈的竞争关系,IMOCS 在探索这种竞争关系时表现出比 MOCS 更好的效率。IMOCS 的 Pareto 解集方案要优于 MOCS 的 Pareto 解集方案,可以在相同缺水条件下实现更低的水量损失,这对于南水北调东线工程江苏段的管理者制定决策方案至关重要。在 75% 来水频率下,IMOCS 所求解的 Pareto 前沿要在水量损失最小方面要优于 MOCS 求解的 Pareto 前沿,这一结果表明,在缺水

量增大时,IMOCS 的 Pareto 解集方案能够提供损失水量更小的方案。在 95% 来水频率下,IMOCS 所求解的 Pareto 前沿和 MOCS 求解的 Pareto 前沿基本相似,这一结果表明,在来水极枯的情况下,多目标优化调配模型的 Pareto 前沿变化空间十分有限,IMOCS 并不能得到比 MOCS 更好的 Pareto 解集方案。在上述各来水频率下 Pareto 前沿的结果表明,IMOCS 能够在江苏段水资源优化配置研究中表现出更优越的性能,其求解复杂的多目标优化调配问题的性能也能在江苏段的水资源优化配置研究中得以体现,为跨流域调水工程水资源优化调配提供参考意见。

在水资源最优配置方案研究中,从 50% 来水频率到 95% 来水频率,方案集 1 和方案集 2 最优配置方案的缺水量、抽江水量和总抽水量在逐渐增加,其配置结果与闻昕等<sup>[29]</sup>和于凤存等<sup>[30]</sup>的研究结果相互验证,弃水量随着来水条件的变化而呈现出下降的趋势,这与方国华等<sup>[31]</sup>的研究结果相一致。相比较于方案集 2 的最优配置方案,方案集 1 的最优配置方案能够有效地提高水资源系统的供水能力,减少用户缺水和水量损失。在 3 种不同来水条件下对南水北调东线工程江苏段进行方案选择,在分析中可得 IMOCS 所求解的最优配置方案能够促进水资源利用效率和效益的最大化,实现水资源的高效利用,维持水资源系统的可持续发展,在有限的水资源条件下达成经济社会发展和生态环境的平衡发展。

## 5 结论

采用 ZDT 测试集对 IMOCS、MOCS 和 NSGA-II 进行测试,Pareto 解集的收敛性、分布性和综合性能指标表明 IMOCS 具有更好的多目标优化性能。

分别采用 IMOCS 和 MOCS 求解江苏段水资源优化配置模型, IMOCS 能够提升 MOCS 的种群多样性, 避免陷入局部最优, 能够在相同条件下得到更高质量的 Pareto 解集。

相较于 50%、75% 和 95% 来水频率下的 MOCS 所求解的最优配置方案, IMOCS 求解的最优配置方案缺水总量减少了 0.21 亿、0.51 亿和 0.07 亿  $m^3$ , 损失水量分别减少了 0.13 亿、1.53 亿和 1.11 亿  $m^3$ 。

由于本文采用的是代表年方法, 根据不同来水条件制定相应的水资源配置方案, 而非从长序列配置过程中提取有效规则, 这在一定程度上降低了水资源配置规则的适用性。未来研究将收集更长的历史径流数据来研究南水北调东线工程江苏段的水资源配置规则。

#### 参考文献:

- [1] 王浩, 游进军. 中国水资源配置 30 年 [J]. *水利学报*, 2016, 47(3): 265-271. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20150484.
- [2] YAN Z, SHA J, LIU B, et al. An ameliorative whale optimization algorithm for multi-objective optimal allocation of water resources in Handan, China [J]. *Water*, 2018, 10(1): 87. DOI: 10.3390/w10010087.
- [3] 闻昕, 李精艺, 谭乔凤, 等. 南水北调东线工程江苏段中长期优化调度研究 [J]. *水力发电学报*, 2022, 41(6): 65-77. DOI: 10.11660/slfdbx.20220607.
- [4] 付银环, 李新旺, 徐宝同, 等. 不确定性多目标模糊规划在水资源优化配置中的应用 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(3): 470-479. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0047.
- [5] 侍翰生, 程吉林, 方红远, 等. 基于动态规划与模拟退火算法的河-湖-梯级泵站系统水资源优化配置研究 [J]. *水利学报*, 2013, 44(1): 91-96. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2013.01.007.
- [6] 王文杰, 吴学文, 方国华, 等. 南水北调东线工程江苏段水量优化调度研究 [J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(3): 422-426. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2015.03.006.
- [7] 吴悦, 徐佳琪, 仇文顺, 等. 潮白河北京段生态补水调度方案研究 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(9): 180-189. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.09.016.
- [8] 杨才杰, 王贺龙, 温进化, 等. 基于 IA-PSO 的库坝梯级系统水资源优化配置与调度 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(4): 60-68. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.04.0052.
- [9] OUYANG S, QIN H, SHAO J, et al. Multi-objective optimal water supply scheduling model for an inter-basin water transfer system: The South-to-North Water Diversion Middle Route Project, China [J]. *Water Supply*, 2020, 20(2): 550-564. DOI: 10.2166/ws.2019.187.
- [10] 郭玉雪, 张劲松, 郑在洲, 等. 南水北调东线工程江苏段多目标优化调度研究 [J]. *水利学报*, 2018, 49(11): 1313-1327. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20180597.
- [11] YANG X S, DEB S. Engineering optimisation by cuckoo search [J]. *International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation*, 2010, 1(4): 330. DOI: 10.1504/ijmmno.2010.035430.
- [12] YANG X S, DEB S. Multiobjective cuckoo search for design optimization [J]. *Computers & Operations Research*, 2013, 40(6): 1616-1624. DOI: 10.1016/j.cor.2011.09.026.
- [13] 杨晓萍, 黄瑜珈, 黄强. 改进多目标布谷鸟算法的梯级水电站优化调度 [J]. *水力发电学报*, 2017, 36(3): 12-21. DOI: 10.11660/slfdbx.20170302.
- [14] 钟祿充, 钱斌, 胡蓉, 等. 混合布谷鸟算法求解绿色流水车间调度问题 [J]. *中国机械工程*, 2018, 29(22): 2674-2681. DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2018.22.004.
- [15] 赵小强, 李丽娟, 冯小林. 基于改进多目标布谷鸟算法的污水处理优化控制方法 [J]. *兰州理工大学学报*, 2020, 46(1): 93-99. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5196.2020.01.016.
- [16] PARHI P K, MISHRA S K, SINGH R. A modification to Kostikov and modified Kostikov infiltration models [J]. *Water Resources Management*, 2007, 21(11): 1973-1989. DOI: 10.1007/s11269-006-9140-1.
- [17] 明波, 黄强, 王义民, 等. 基于改进布谷鸟算法的梯级水库优化调度研究 [J]. *水利学报*, 2015, 46(3): 341-349. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2015.03.011.
- [18] 郭现峰, 李浩华, 魏金玉. 基于 Fibonacci 变换和改进 Logistic-Tent 混沌映射的图像加密方案 [J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2023, 53(7): 2115-2120. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20220799.
- [19] 侯建军, 毛轶超, 陈利, 等. 基于 AHP 层次分析法的

- 履带式智能消防机器人设计研究 [J]. *包装工程*, 2023, 44(10): 172-180. DOI: [10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.10.017](https://doi.org/10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.10.017).
- [20] 葛如涛, 陈陆望, 王迎新, 等. 基于改进 AHP 法和 CRITIC 法耦合赋权的松散承压含水层富水性评价 [J]. *合肥工业大学学报 (自然科学版)*, 2023, 46(4): 519-528. DOI: [10.3969/j.issn.1003-5060.2023.04.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-5060.2023.04.014).
- [21] 解阳阳, 黄强, 李向阳, 等. 基于非负矩阵分解原理的方案优选方法及其应用 [J]. *西安理工大学学报*, 2017, 33(2): 138-144. DOI: [10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2017.02.003](https://doi.org/10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2017.02.003).
- [22] ZITZLER E, DEB K, THIELE L. Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: Empirical results [J]. *Evolutionary Computation*, 2000, 8(2): 173-195. DOI: [10.1162/106365600568202](https://doi.org/10.1162/106365600568202).
- [23] ZHANG M, WANG H, CUI Z, et al. Hybrid multi-objective cuckoo search with dynamical local search [J]. *Memetic Computing*, 2018, 10(2): 199-208. DOI: [10.1007/s12293-017-0237-2](https://doi.org/10.1007/s12293-017-0237-2).
- [24] 袁田, 尹云飞, 黄发良, 等. 全局替换的自适应权重调整 MOEA/D [J]. *控制理论与应用*, 2023, 40(4): 653-662. DOI: [10.7641/CTA.2022.11231](https://doi.org/10.7641/CTA.2022.11231).
- [25] 纪昌明, 马皓宇, 彭杨. 面向梯级水库多目标优化调度的进化算法研究 [J]. *水利学报*, 2020, 51(12): 1441-1452. DOI: [10.13243/j.cnki.slxb.20200214](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20200214).
- [26] HABIBI DAVIJANI M, BANIHABIB M E, NAD-JAFZADEH ANVAR A, et al. Optimization model for the allocation of water resources based on the maximization of employment in the agriculture and industry sectors [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 533: 430-438. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2015.12.025](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.12.025).
- [27] GUO Y, TIAN X, FANG G, et al. Many-objective optimization with improved shuffled frog leaping algorithm for inter-basin water transfers [J]. *Advances in Water Resources*, 2020, 138, 103531. DOI: [10.1016/j.advwatres.2020.103531](https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103531).
- [28] 张鑫帅, 刘俊, 罗世彬. 基于改进多目标布谷鸟搜索算法的翼型气动优化设计 [J]. *航空学报*, 2019, 40(6): 49-62. DOI: [10.7527/S1000-6893.2018.22550](https://doi.org/10.7527/S1000-6893.2018.22550).
- [29] 闻昕, 王志, 方国华, 等. 基于改进多目标粒子群算法的南水北调东线江苏段工程联合优化调度研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(3): 110-116. DOI: [10.11705/j.issn.1672-643X.2017.03.21](https://doi.org/10.11705/j.issn.1672-643X.2017.03.21).
- [30] 于凤存, 方国华, 王文杰, 等. 基于多目标遗传算法的南水北调东线工程湖泊群优化调度研究 [J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(3): 78-85. DOI: [10.13522/j.cnki.ggps.2016.03.015](https://doi.org/10.13522/j.cnki.ggps.2016.03.015).
- [31] 方国华, 郭玉雪, 闻昕, 等. 改进的多目标量子遗传算法在南水北调东线工程江苏段水资源优化调度中的应用 [J]. *水资源保护*, 2018, 34(2): 34-41. DOI: [10.3880/j.issn.1004-6933.2018.02.07](https://doi.org/10.3880/j.issn.1004-6933.2018.02.07).

## Multi-objective optimal allocation of inter-basin water resources based on improved multi-objective cuckoo search algorithm

XI Haichao<sup>1,2</sup>, XIE Yangyang<sup>2,3,4</sup>, LIU Saiyan<sup>2</sup>, MAO Qing<sup>2</sup>, ZHANG Qin<sup>2</sup>, HU Huaqing<sup>2</sup>, LIU Chenye<sup>2</sup>  
 (1. *Nanjing Water Conservancy Planning and Design Institute Co., Ltd, Nanjing 210000, China*; 2. *College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225008, China*; 3. *Engineering Research Center of High-efficiency and Energy-saving Large Axial Flow Pumping Station, Jiangsu Province, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China*; 4. *Modern Rural Water Resources Research Institute, Yangzhou University, Yangzhou 225008, China*)

**Abstract:** For inter-basin water transfer projects, the water conflict between society, economy, ecology, and other sectors makes the water allocation process more complicated. The optimal allocation of water resources was one of the most effective ways to alleviate the conflict between water supply and demand. It was necessary to implement an effective water resources optimization allocation concept in inter-basin water transfer projects to ensure the efficient implementation of inter-basin water transfer projects. This study presents an improved multi-objective cuckoo algorithm to effectively solve the multi-objective optimal allocation problem of inter-basin water resources.

To address the shortcomings of multi-objective cuckoo algorithm such as slow convergence speed and easy to fall into local optimal solutions, chaos theory and variation mechanism were introduced, and adaptive discovery probability and step size were used to improve multi-objective cuckoo algorithm and enhance the overall performance of improved multi-objective cuckoo algorithm. A water resources optimal allocation model of the

Jiangsu section of the South-to-North Water Transfers Project was established. Improved multi-objective cuckoo algorithm and multi-objective cuckoo algorithm were adopted to solve the water resources optimal allocation model, respectively. A non-negative matrix factorization method based on combined weighting was used for scheme evaluation.

The results show that: improved multi-objective cuckoo algorithm was better than multi-objective cuckoo algorithm in terms of convergence, distribution, and overall performance, and was capable of yielding higher-quality Pareto solution sets; Compared with the optimal allocation solution solved by multi-objective cuckoo algorithm under the 50%, 75%, and 95% incoming water conditions, the total water shortage of the optimal allocation solution solved by improved multi-objective cuckoo algorithm was reduced by 21 million  $\text{m}^3$ , 51 million  $\text{m}^3$  and 7 million  $\text{m}^3$ , and the water loss was reduced by 13 million  $\text{m}^3$ , 15 million  $\text{m}^3$  and 11 million  $\text{m}^3$ , respectively.

Therefore, improved multi-objective cuckoo algorithm could provide an effective algorithmic reference for the calculation of multi-objective optimal allocation of inter-basin water resources.

**Key words:** improved multi-objective cuckoo search algorithm; multi-objective optimization; water resources optimal allocation; Jiangsu section of the South-to-North Water Transfers Project

.....

(上接第 945 页)

of 4.93% reduction in electricity consumption costs. At the same computational budget, solving the optimization model using trigger levels for optimization was proved to be significantly more efficient compared to the time-table schedule. This efficiency stemmed from the smaller search space available when trigger levels were employed. Through a comprehensive comparative analysis encompassing variations in trigger levels, pump statuses, and their response to varying electricity tariff periods, it became apparent that the dynamic adjustment of trigger levels in tanks enabled flexible pump scheduling and optimized storage capacity utilization. Contrasted with fixed trigger levels, the lower trigger-off level effectively minimized stored water volumes during peak tariff periods, harnessing the storage capacity of water tanks at a lower budgetary cost while mitigating redundancy in nodal pressure. In contrast to explicit time-table schedules for pumps, the inclusion of water trajectory considerations in tanks promoted proactive pump switching to prevent tank backwater effects, indicative of reduced nodal pressure redundancy.

The operational rule utilizing time-variable trigger levels allowed for pump switching at variable time steps, enhancing flexibility in pump operation scheduling. This adaptive feature enhances the possibility of identifying optimal solutions aligned with predefined objectives. In multi-pump, upstream-downstream joint water supply systems, the scheduling with time-varying water level control can achieve more significant economic benefits.

**Key words:** water distribution system; time-variable trigger level; energy conservation and consumption reduction; tank; optimal operation