

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

闻昕^{1,2}, 王志³, 方国华¹, 郭玉雪¹, 周磊⁴

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038;

3. 南水北调东线江苏水源有限责任公司, 江苏 南京 210029; 4. 华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘要: 针对南水北调东线江苏段工程优化调度问题, 构建协调系统缺水量和抽江水量两目标的联合优化调度模型, 研发基于改进多目标粒子群算法的模型求解方法, 建立组合赋权-TOPSIS方法进行多属性决策方法, 形成基于“两线-三湖-四水源-六区间”的水资源调配空间格局, 提出以大型泵站工程为核心的骨干枢纽联合调度方案。在50%、75%和95%来水条件下, 经优化调度后受水区缺水量与常规调度相比分别降低了 $10.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $16.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $7.1 \times 10^8 \text{ m}^3$, 系统抽江水量分别减少了 $17.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $14.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $12.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。该方案可有效提高供水保障水平, 充分发挥三大湖泊的调蓄能力, 降低系统运行成本, 具有显著的社会、经济等综合效益。

关键词: 多目标优化; 改进多目标粒子群算法; TOPSIS 决策; 泵站群

中图分类号: TV697.12

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)03-0110-07

Study on optimal operation of Jiangsu section of eastern route of South-to-North Water Diversion Project based on improved multi-objective particle swarm optimization algorithm

WEN Xin^{1,2}, WANG Zhi³, FANG Guohua¹, GUO Yuxue¹, ZHOU Lei⁴

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Eastern Route for

South-to-North Water Diversion Projects Jiangsu Water Source Limited Liability Company, Nanjing 210029, China;

4. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

Abstract: This paper is to develop the joint optimization and dispatching model of the Jiangsu section of the east line of the South-to-North Water Diversion Project, to explore the multi-objective particle swarm optimization algorithm, and to propose the multi-attribute TOPSIS decision-making method and an optimal scheduling scheme based on the large pumping station projects. The results show that the optimal scheduling scheme can effectively improve the utilization efficiency of water resources, giving full play to the storage capacity of the three lakes and reduce the pumping cost. With the inflow of 50%, 75% and 95%, the water shortages were reduced by 1.02 billion m^3 , 1.64 billion m^3 , and 0.71 billion m^3 respectively, compared with the conventional dispatching. The pumping amount of the system could be reduced by 1.74 billion m^3 , 1.48 billion m^3 and 1.22 billion m^3 , respectively, which has significant social, economic and other comprehensive benefits.

Key words: multi-objective optimization; extended multi-objective particle swarm optimization algorithm, TOPSIS decision, pumping station group

收稿日期: 2017-04-06; 修回日期: 2017-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51609061); 江苏省研究生培养创新工程项目(2016B03257); 江苏省水利科技项目(2014012); 江苏高校优势学科建设工程项目

作者简介: 闻昕(1987-), 男, 江苏南京人, 博士, 讲师, 研究方向为水利水电系统规划与优化调度。

通讯作者: 方国华(1964-), 女, 安徽定远人, 教授, 博士生导师, 研究方向为水资源规划及利用、水利水电系统规划与优化调度、水利经济等教学科研工作。

1 研究背景

南水北调工程是缓解我国北方水资源严重短缺局面的重大战略性基础设施^[1]。江苏是南水北调东线的起点,境内干线总长404km,承担苏北六市以及北方省市的供水任务。自2013年底全线通水运行以来,工程运行调度主要依据《南水北调东线一期工程水量调度方案(试行)》,并逐年下达水量调度计划,尚未形成成熟完善的水资源配置格局和工程联合调度运行方案。

开展南水北调东线江苏段工程联合调度研究,形成基于“两线-三湖-四水源-六区间”的水资源调配空间格局,提出以大型泵站工程为核心的骨干枢纽联合调度方案,这不仅是特大型跨流域调水系统的多目标优化决策科学问题,也是当前南水北调东线江苏段科学运行与高效管理亟需解决的重大实际问题。

跨流域调水是实现水资源在特定区域内优化配置的重要手段,其结构形式往往是复杂多样的高维系统,涉及不同地区、不同水源和多样化的用水形式,具有多目标和多用途的特点。20世纪中叶以来,国内外学者围绕跨流域水资源优化调度开展了广泛的研究,并取得丰富成果^[2-5]。

总结国内外的研究,跨流域调水工程优化调度问题的研究思路大致可以分为三大类:一是简化复杂的跨流域调水系统,采用单一的模拟模型对简化后的系统进行工程规划调度决策研究;二是建立各种类型的大系统递阶结构模型,运用多种数学规划或模拟技术相结合的求解方法,进行该类工程的规划管理决策研究;三是从目标函数入手,将用水需求、运行成本等多目标问题简化为单目标或者少数目标问题来反映实际需求,再寻求解决。

近年来,随着模糊数学、决策支持系统与智能优化算法等新的理论方法不断发展和完善,将新的理论方法应用于跨流域水资源优化调度研究成为新的研究热点。南水北调东线工程江苏段是以梯级泵站为核心,耦合湖泊、河道、闸站等各类水利工程的跨流域调水工程,其优化调度问题包括大型泵站的站内优化问题、梯级泵站群的系统优化问题以及泵站与其它水利工程的联合优化问题。

近年来,国外学者对南水北调东线工程江苏段优化调度尚未展开,但统筹沿线生产生活、灌溉、航运、生态等多目标的水资源优化调度方案一直是国内学者对南水北调东线工程的研究热点。侍翰生

等^[6](2012年)以系统抽水量及缺水量最小为目标,建立求解多湖泊联合调度优化模型,确定了不同频率下江苏省最大出省水量;宋丹丹等^[7](2015年)结合江苏受水区水文水资源及水利工程的特点,建立了包括降雨径流模型、水量调配模型、工程调度模型等多个子模型,分析了受水区水资源量、需供水量的情况。

史振铜等^[8](2015年)建立库群水资源优化调度模型,并采用大系统分解-动态规划聚合算法对模型进行求解,以“单库”为子系统模型进行分解,然后根据动态规划优化原理对子系统的优化成果进行聚合,子系统模型和聚合模型均采用动态规划法进行求解,以获得系统最优调度方案;同年,王文杰等^[9]在对南水北调东线工程水资源系统概化的基础上,建立江苏段水量优化调度数学模型,模拟计算了3种不同保证率工况下的水量调配方案;于凤存等^[10](2016年)结合南水北调东线工程的自身特点,构建包含缺水量最小与系统总抽水量最小的多目标优化调度模型,得到南水北调东线工程湖泊群系统的最佳水量调配方案。

综上,在研究南水北调东线江苏段工程的优化调度问题时,鲜有学者将工程进行“两线-三湖-四水源-六区间”的水资源调配空间格局概化,也较少对多个优化目标同时进行考虑。本文建立以受水区缺水量最小和抽江水量最小为目标的南水北调东线工程江苏段多目标优化调度模型,采用改进的多目标粒子群算法进行求解,并采用一种基于组合赋权TOPSIS法的多属性决策方法对生成的Pareto最优解集^[11]进行评价,从而获得南水北调东线江苏段工程的最佳调度方案。

2 工程概况及系统概化

南水北调东线工程江苏段位于北纬 $32^{\circ}15' \sim 34^{\circ}30'$,东经 $117^{\circ}00' \sim 119^{\circ}45'$,地处淮河及沂沭泗流域的下游,涉及扬州、淮安、盐城、宿迁、连云港和徐州六市。工程输水干线404 km,建设9个梯级泵站,由洪泽湖、骆马湖、南四湖的下级湖3个湖泊进行调蓄,包括运河线和运西线两条输水路线,见图1。

根据南水北调东线江苏段主要组成以及骨干河渠间的连接关系进行系统概化,将受水区划分为了18个计算分区,其中安徽与山东两省分别作为一个计算分区,江苏省内的计算分区在江淮区间、洪泽湖区间、洪骆区间、骆马湖区间、骆微区间和南四湖区间的划分基础上细分为16个计算分区,见图2。

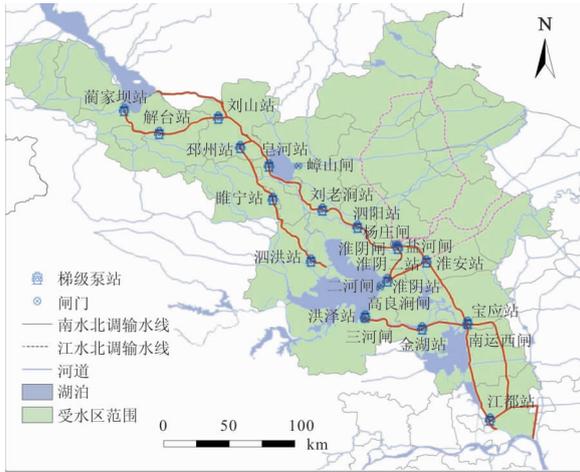


图1 南水北调东线工程江苏段输水线路图

3 南水北调东线工程江苏段优化调度模型建立

3.1 目标函数

南水北调东线工程主要承担河北、山东、安徽、苏北地区的供水任务,系统缺水量应作为衡量调度方案效果的一个重要指标。沿线用水户在充分利用淮水、沂沭泗水的前提下不足的部分由江水进行补充,工程的科学管理和高效运行也应有效控制抽江成本,抽江水量也应作为一个优化目标进行考虑。因此,本文综合考虑受水区缺水量最小和系统抽江水量最小两个目标,建立优化调度模型的目标函数,详见式(1)和式(2)。

(1) 目标1:受水区缺水量最小

$$OBJ_1 = \min \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^p (QR(i,t) - Q(i,t)) \quad (1)$$

式中: t 为时段序号; i 为分区编号; $QR(i,t)$ 为 t 时段 i 分区的需供水量, 10^8 m^3 ; $Q(i,t)$ 为 t 时段 i 分区的实际供水量, 10^8 m^3 。

(2) 目标2:抽江水量最小

$$OBJ_2 = \min \sum_{t=1}^T \left(\sum_{j=1}^m Q_{江都}(j,t) + \sum_{k=1}^n Q_{宝应}(k,t) \right) \quad (2)$$

式中: $Q_{江都}(j,t)$ 为 t 时段江都站的泵站 j 抽水量, 10^8 m^3 ; $Q_{宝应}(k,t)$ 为 t 时段宝应站的泵站 k 抽水量, 10^8 m^3 。

3.2 约束条件

本文选取泵站逐时段抽水量作为决策变量,包括湖泊水量平衡约束、泵站工作能力约束等约束条件。

(1) 湖泊水量平衡约束。湖泊在每一时段均应满足水量平衡约束,应满足如下水量平衡方程式:

$$V(i,t+1) = V(i,t) + Q(i,t) + DI(i,t) + PC(i,t+1,t) - DO(i,t) - W_1(i,t) - PR(i,t) \quad (3)$$

式中: i 为湖泊编号(1. 洪泽湖、2. 骆马湖、3. 南四湖); t 为时段数; $Q(i,t)$ 为 i 湖泊 t 时段的入湖径流量, 10^8 m^3 ; $DI(i,t)$ 为 i 湖泊 t 时段抽水入湖水量, 10^8 m^3 ; $PC(i,t)$ 为 t 时段下泄进入 i 湖泊的水量, 10^8 m^3 ; $W_1(i,t)$ 分别为 t 时段 i 湖泊的需水量, 10^8 m^3 , 为扣除当地可用水量后需由南水北调东线工程补充的水量; $DO(i,t)$ 分别为 t 时段 i 湖泊的抽湖北调水量, 10^8 m^3 ; $PR(i,t)$ 为 t 时段由 i 湖泊自流下泄的水量, 10^8 m^3 。

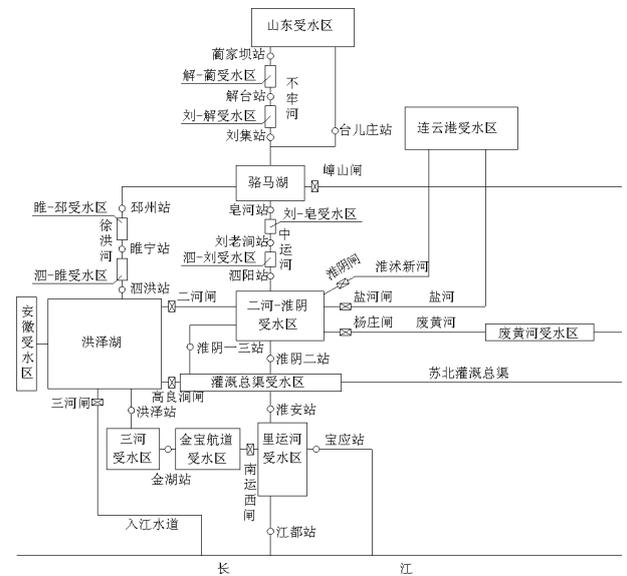


图2 南水北调东线工程江苏段系统概化图

(2) 泵站工作能力约束。北调抽水水量应不大于相应泵站最大工作能力:

$$\begin{cases} 0 \leq DO(i,t) \leq DO_{\max}(i,t) \\ 0 \leq DI(i,t) \leq DI_{\max}(i,t) \end{cases} \quad (4)$$

式中: DO_{\max} 、 DI_{\max} 分别为相应泵站最大抽水能力, 10^8 m^3 。

(3) 控制闸门最大过流能力约束。湖泊下泄水量应不大于相应控制闸门最大过流能力:

$$0 \leq PR(i,t) \leq PR_{\max}(i,t) \quad (5)$$

式中: $PR_{\max}(i,t)$ 为相应控制闸门的最大过流能力, 10^8 m^3 。

(4) 湖泊调蓄能力约束

$$V_{\min}(i,t) \leq V(i,t) \leq V_{\max}(i,t) \quad (6)$$

式中: $V_{\min}(i,t)$ 、 $V_{\max}(i,t)$ 分别为相应湖泊 t 时段的最小和最大蓄水能力, 10^8 m^3 。

在进行系统模拟时,当时段末库容 $V(i,t) < V_{\min}(i,t)$ 即认为产生缺水 $QR(i,t) = V_{\min}(i,t) - V(i,t)$, 确保湖泊水位始终在一定限制水位以上;当 $V(i,t) > V_{\max}(i,t)$ 时即认为产生弃水, 保证湖泊的防洪工程安全。

表1 调蓄湖泊北调控制水位表

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
下级湖	31.8	31.5~31.9	31.9~32.8	32.3~31.8
东平湖	39.3	39.3	39.3	39.3

(6) 其它约束。包括河道输水能力约束、非负约束等。

4 基于改进多目标粒子群算法的模型求解方法

本文利用改进的多目标粒子群(MOPSO)算法对南水北调东线工程江苏段优化调度模型进行求解。MOPSO算法是由 Coello 等^[12] 等于 2002 年提出, 随后国内外众多学者尝试各种努力改善 MOPSO 算法^[13-17], 但仍然存在局部收敛、Pareto 前沿分布不均匀等问题。本文所采用的方法主要作了如下改进:(1) 采用依据粒子群群体适应度值变化而进行调整的自适应策略以及线性调整学习因子策略;(2) 采用基于距离的方法维护外部档案集;(3) 基于 Sigma 选取策略选择全局向导^[18]。该改进算法收敛性好, 能够避免陷入局部最优、高效搜索外部存储库中新粒子能够获得均匀的 Pareto 前沿。

南水北调东线工程江苏段优化调度属于多目标优化问题, 本文首先采用 MOPSP 算法求解不同目标的函数值, 并根据目标函数值在 Pareto 支配关系基础上确定粒子群非劣解, 模型求解步骤如下:

Step1 初始化全局数据, 包括湖泊的特征参数、控制水位、泵站最大工作能力、各区间需供水量及湖泊来水情况等, 确定种群规模 N , 外部档案规模 N_p , 惯性因子初始值 w_{start} , 惯性因子迭代结束值 w_{end} , 学习因子 c_1 的初末值 c_{1s}, c_{1e} , 学习因子 c_2 初末值 c_{2s}, c_{2e} 和算法终止条件(一般为最大迭代次数)。

Step2 以相应泵站的设计输水能力为限生成准可行个体并组成初始种群, 对每个个体所代表的调度方案进行模拟运行, 统计系统缺水量及抽江水量, 计算每个粒子的多目标函数值(OBJ_1, OBJ_2)并记录。

(5) 北调控制水位约束。为了使当地的用水利益不致因北调抽水而受到损害, 在实际的试行调度方案中还规定了湖泊不同时间段的北调控制水位。一般情况下, 当湖泊水位低于此水位时, 停止抽湖泊既有蓄水北调。各湖泊分时段北调控制水位见表 1。

Step3 根据记录的多目标函数值, 依据 Pareto 支配关系确定粒子群非劣解, 并将其加入到外部档案 N_p 中, 确定粒子的初始 p_{best} 和 g_{best} 。

Step4 保证粒子在搜索空间飞行的条件下, 改变各个粒子的位置 x 和速度 v , 计算各个粒子的目标函数, 调整各个粒子的 p_{best} 。

Step5 根据新的非劣解维护外部档案 N_p , 同时为种群每个粒子选择新的 g_{best} 。

Step6 检查是否满足算法终止条件, 若满足终止条件, 停止迭代并输出结果, 否则 $t = t + 1$ 转到 Step4。

具体参数设置为: 粒子种群规模设置为 100, 迭代次数为 1000, 外部档案 N_p 设置为 100, $w_{start} = 0.9$, $w_{end} = 0.2$, $c_{1s} = 2.5$, $c_{1e} = 0.5$, $c_{2s} = 0.5$, $c_{2e} = 2.5$ 。

5 基于组合赋权-TOPSIS 的多属性决策方法

通过南水北调东线工程江苏段优化调度模型建立与求解, 可生成多属性指标集构成的非劣解集。本文首先建立优化调度方案多属性决策指标集, 通过组合权重法确定各指标的权重, 建立 TOPSIS 方案优选模型^[19], 研发组合赋权-TOPSIS 多属性决策技术方法, 从诸多可行方案中选取最佳均衡解, 详见图 3。

南水北调东线工程江苏段优化调度方案的决策选取需考虑经济、社会和生态多方面要求。本文选取抽江水量、运河线总抽水量、运西线总抽水量、受水区缺水量、需水满足度、湖泊汛末库容变化量 6 个指标。

本文采用了基于主客观的组合权重计算方法,

其中主观权重可由模糊层次分析法^[20]根据各指标的相对重要程度分析确定。客观赋权法通过优化调度多属性决策指标数据之间的相关关系求得权重的方法,CRITIC法^[21]不仅考虑指标变异对于权重的影响,也考虑指标间的冲突性,在应用效果上优于熵权法和标准离差方法等其他客观赋权法,故本文采用CRITIC法来计算多属性决策指标的客观权重。在分别确定主观、客观权重之后,按式(7)计算组合权重,结果见表2。

$$w_i = \frac{w_{subj,i} \cdot w_{obj,i}}{\sum_{i=1}^n (w_{subj,i} \cdot w_{obj,i})} \quad (7)$$

式中: w_i 为指标 i 的组合权重; $w_{subj,i}$, $w_{obj,i}$ 分别表示指标 i 的主观、客观权重。

表2 南水北调东线工程江苏段优化调度方案决策指标权重计算表

指标	抽江水量	运河线总抽水量	运西线总抽水量	受水区缺水量	需水满足程度	湖泊汛末库容变化量
权重	0.122	0.156	0.156	0.188	0.222	0.156

TOPSIS 是一种逼近理想解的排序方法,通过定义正理想方案和负理想方案,找出一个与正理想方案距离最近且离负理想方案距离最远的方案。该方法要求属性的效用函数具有单调递增(或递减)的特性。本文通过计算不同方案的相对接近度,并按照其大小对方案优劣进行排序,对南水北调东线江苏段工程多目标优化调度方案进行多属性决策。

6 南水北调东线工程江苏段优化调度结果分析

本文对南水北调东线江苏段历史长系列径流资料进行分析,确定 50%、75%、95% 3 个典型水文年,以月为计算时段,以水文年为计算周期,以洪泽湖、骆马湖以及下级湖入湖径流量资料为输入,各调蓄湖泊的起调水位为近年来对应时段多年平均水位,对南水北调东线江苏段进行优化调度研究。

采用前述优化调度模型迭代 1000 次后得到的 Pareto 前沿,在 50%、75%、95% 来水条件下受水区缺水量的目标值范围分别为 [0.157, 8.165]、[2.571, 35.045]、[37.561, 106.727], 抽江水量目标的目标值范围为 [1.339, 8.310]、[14.309, 42.824]、[57.502, 124.739], 详见图 4。

选择使受水区缺水量目标值最小的前 10 个方案作为待选方案,采用组合赋权-TOPSIS 方法进行多属性决策,得到不同来水条件下的最优调度决策

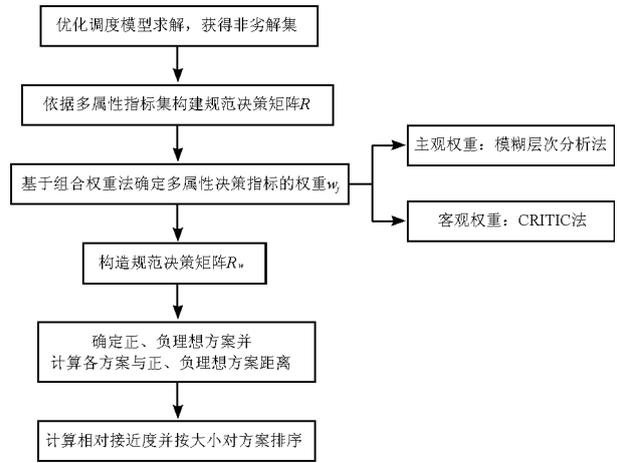


图3 基于组合赋权-TOPSIS的优化调度方案多属性决策方法流程图

方案,各方案下主要抽水线路年调水量详见表3。优化调度后,50%来水条件下受水区缺水量为 $0.177 \times 10^8 \text{ m}^3$, 抽江水量为 $8.059 \times 10^8 \text{ m}^3$, 供水保障程度达到 99.9%; 75% 条件下受水区缺水量为 $3.156 \times 10^8 \text{ m}^3$, 抽江水量为 $42.524 \times 10^8 \text{ m}^3$, 供水保障程度达到 98.7%; 95% 保证率下受水区缺水量为 $41.537 \times 10^8 \text{ m}^3$, 抽江水量为 $115.339 \times 10^8 \text{ m}^3$, 供水保障程度达到 78.3%。

本文依据工程现行调度方案,模拟不同来水条件下南水北调东线江苏段调度过程,从抽江水量、受水区缺水量、湖泊水量变化等方面对优化调度和常规调度结果进行对比分析,结果见图5。优化调度方案可进一步减少受水区缺水量,提高受水区的供水保障水平。50%来水条件下受水区缺水量经优化调度后比常规调度降低了 $10.243 \times 10^8 \text{ m}^3$, 需水满足度提升 8.18%; 75% 条件下缺水量减少了 $16.370 \times 10^8 \text{ m}^3$, 需水满足度提升 12.34%; 95% 条件下缺水量降低了 $7.137 \times 10^8 \text{ m}^3$, 需水满足度提升 5.64%。

同时,优化调度能更充分利用淮河流域及沂沭泗流域的天然来水,通过三大湖泊调蓄功能减少抽水成本,50%、75%和95%条件下抽江水量分别减少了 17.361×10^8 、 14.828×10^8 和 $12.226 \times 10^8 \text{ m}^3$, 运河线总抽水量分别减少 95.923×10^8 、 137.511×10^8 和 $233.258 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

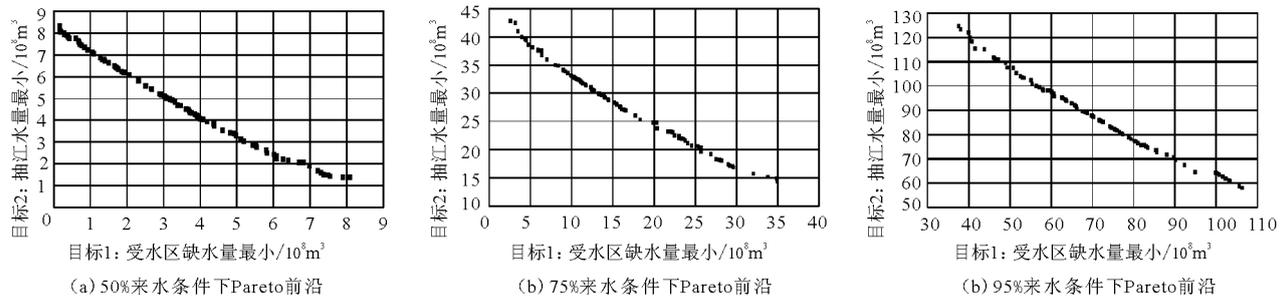


图 4 不同来水条件下优化调度模型 Pareto 前沿求解结果

表 3 不同来水条件下主要抽水线路年调水量

10^8 m^3

出入湖	总水量			出入河道	分水量		
	50%	75%	95%		50%	75%	95%
入下级湖	24.913	22.142	17.357	抽不牢河	2.651	4.190	7.181
				抽韩庄运河	22.262	17.952	10.176
出骆马湖	31.905	29.365	23.620	入不牢河	9.643	11.413	13.444
				入韩庄运河	22.262	17.952	10.176
入骆马湖	26.273	31.110	43.997	抽徐洪河	10.317	12.411	15.163
出洪泽湖	71.687	90.204	109.483	抽中运河	15.957	18.699	28.834
				入中运河	60.429	74.748	95.016
入洪泽湖	8.526	32.268	109.042	入徐洪河	11.258	15.456	14.468
				抽里运河	0.038	16.812	72.090
入里运河受水区	14.375	41.964	116.324	抽金宝航道-三河	8.488	15.456	36.951
				入里运河	3.490	23.871	78.274
				入金宝航道-三河	10.885	18.093	38.050

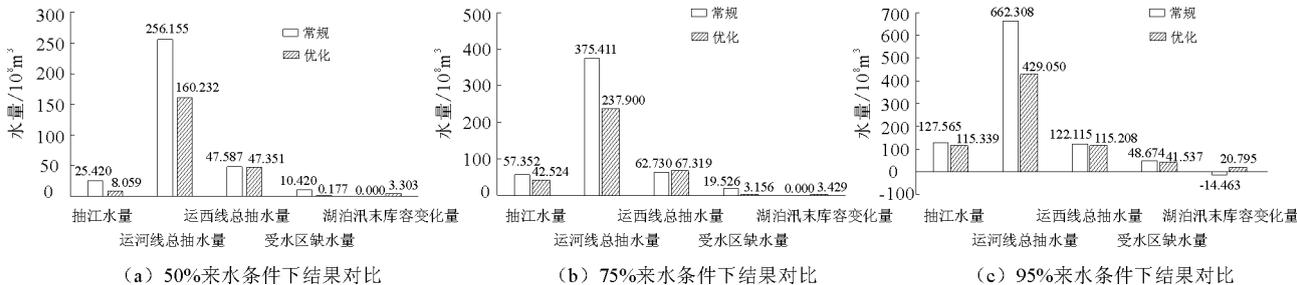


图 5 不同来水条件下南水北调东线江苏段优化调度与常规调度结果对比分析图

7 结论

本文研究南水北调东线江苏段工程联合调度问题,以系统缺水量最少、抽江水量最小为优化目标,构建了南水北调东线江苏段工程优化调度模型,采用改进多目标粒子群算法求解,利用基于组合赋权-TOPSIS方法对非劣解集进行多属性决策,提出南水北调东线江苏段的工程优化调度方案,主要结论如下:

(1)建立南水北调东线江苏段系统概化模型,形成“两线-三湖-四水源-六区间”的总体格局。以系统缺水量最少、抽江水量最小为优化目标,建立

湖泊水量平衡约束、泵站工作能力等约束条件,构建南水北调东线江苏段工程优化调度模型。

(2)研发改进多目标粒子群算法的模型求解方法,主要改进包括:1)采用依据粒子群群体适应度值变化而进行调整的自适应策略以及线性调整学习因子策略;2)采用基于距离的方法维护外部档案集;3)基于 Sigma 选取策略选择全局向导。新方法具有良好的收敛性,能够避免陷入局部最优,高效搜索外部存储库中新粒子能够获得均匀的 Pareto 前沿。

(3)选取抽江水量、运河线总抽水量、运西线总抽水量、受水区缺水量、需水满足度、湖泊汛末库容

变化量六个指标,构建南水北调东线工程江苏段优化调度方案多属性决策指标集,通过组合权重法确定各指标的权重,建立 TOPSIS 方案优选模型,建立了基于组合权重的 TOPSIS 方案优选模型。

(4)提出南水北调东线江苏段工程优化调度方案,该方案在提高供水保障水平、降低系统运行成本以及发挥湖泊调蓄作用等方面具有明显优势。在 50%、75% 和 95% 来水条件下,经优化调度后受水区缺水量与常规调度相比分别降低了 10.2×10^8 、 16.4×10^8 、 $7.1 \times 10^8 \text{ m}^3$,系统抽江水量分别减少了 17.4×10^8 、 14.8×10^8 和 $12.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

综上,本文针对南水北调东线江苏段工程联合调度问题,建立了基于“两线-三湖-四水源-六区间”的水资源调配空间格局,提出以大型泵站工程为核心的骨干枢纽联合调度方案,这可为南水北调东线工程江苏段的科学运行和高效管理提供科学支撑,具有显著的社会经济综合效益。未来可进一步围绕跨流域调水泵站群系统实时优化控制、水质水量联合调度等问题开展更深入的研究。

参考文献:

- [1] 黄红虎,谢伟东,张娟. 南水北调东线工程简介[J]. 能源研究与利用,2004(4):4-6.
- [2] Hu Zhineng, Chen Yazhen, Yao Liming, et al. Optimal allocation of regional water resources: From a perspective of equity - efficiency tradeoff [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2016, 109:102-113.
- [3] Hassan - esfahani L, Torres - rua A, Mckee M. Assessment of optimal irrigation water allocation for pressurized irrigation system using water balance approach, learning machines, and remotely sensed data [J]. Agr Water Manage, 2015, 153:42-50.
- [4] 彭安帮,彭勇,周惠成. 跨流域调水条件下水库群联合调度图的多核并行计算研究[J]. 水利学报,2014,45(11):1284-1292.
- [5] 杨柳,汪妮,解建仓,等. 跨流域调水与受水区多水源联合供水模拟研究[J]. 水力发电学报,2015,34(6):49-56.
- [6] 侍翰生,程吉林,方红远,等. 南水北调东线工程江苏段水资源优化配置[J]. 农业工程学报,2012,28(22):76-81.
- [7] 宋丹丹,杨树滩,常本春,等. 江苏省南水北调受水区水资源配置[J]. 南水北调与水利科技,2015,13(3):417-421.
- [8] 史振铜,程吉林,杨树滩,等. 南水北调东线江苏段库群水资源优化调度方法研究[J]. 灌溉排水学报,2015,34(4):14-18.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 胡旺,Gary G YEN,张鑫. 基于 Pareto 熵的多目标粒子群优化算法[J]. 软件学报,2014,25(5):1025-1050.
- [12] Coello C A C, Lechuga M S. MOPSO: a proposal for multiple objective particle swarm optimization [C]// Proceedings of the Evolutionary Computation on 2002 CEC 02 Proceedings of the 2002 Congress - Volume 02. IEEE Computer Society, 2002, 1051-1056.
- [13] Zhang Panpan, Chen Hongmei, Liu Xinggao, et al. An iterative multi - objective particle swarm optimization - based control vector parameterization for state constrained chemical and biochemical engineering problems[J]. Biochemical Engineering Journal, 2015, 103:138-151.
- [14] Soheyl S, Shafiei mayam M H, Mehrjoo M. Modeling a novel CCHP system including solar and wind renewable energy resources and sizing by a CC - MOPSO algorithm [J]. Applied Energy, 2016, 184:375-395.
- [15] Rezaei F, Safavi H R, Mirchi A, et al. f - MOPSO: An alternative multi - objective PSO algorithm for conjunctive water use management [J]. Journal of Hydro - environment Research, 2016, 14:1-18.
- [16] 黄敏,江渝,毛安,等. 基于全局最优位置自适应选取与局部搜索的多目标粒子群优化算法 [J]. 计算机应用,2014,34(4):1074-1079.
- [17] 刘召军,高兴宝. 融合自适应混沌差分进化的粒子群优化算法[J]. 纺织高校基础科学学报,2015,28(1):116-123.
- [18] Mostaghim S, Teich J. Strategies for finding good local guides in multi - objective particle swarm optimization (MOPSO)[J]. Swarm Intelligence Symposium, 2003,16(16):26-33.
- [19] Chen S M, Cheng S H, Lan T C. Multicriteria decision making based on the TOPSIS method and similarity measures between intuitionistic fuzzy values[J]. Inform Sciences, 2016,367-368:279-295.
- [20] 强跃,何运祥,刘光华. 基于模糊层次分析法的中小型水利水电工程施工风险评价[J]. 施工技术,2013,42(21):51-54.
- [21] 张立军,张潇. 基于改进 CRITIC 法的加权聚类方法 [J]. 统计与决策,2015,22:65-68.