



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtq.2016.01.010

闫堃, 钟平安, 万新宇. 滨海地区水资源多目标优化调度模型研究[J]. 2016, 14(1): 59-66.

YAN Kun, ZHONG Ping an, WAN Xin yu. An optimal operation model for multi objective water resources schedule in coastal area[J]. 2016, 14(1): 59-66. (in Chinese)

滨海地区水资源多目标优化调度模型研究

闫堃, 钟平安, 万新宇

(河海大学 水文水资源学院, 南京 210098)

摘要: 针对滨海地区水资源系统的特点, 以加权相对总缺水深度最小和系统供水总成本最小为目标, 建立了平原河网、平原水库群和远距离调水工程体系的水资源多目标优化调度模型; 利用多目标粒子群算法(MOPSO)求解, 提出了各类约束条件的处理方法, 并得到非劣解集; 采用距理想解欧拉距离最小准则, 得到最好权衡两个目标的最佳协调解, 并取得相应的调度结果。以江苏沿海为背景开展实证研究, 验证了所建模型和求解方法的有效性。

关键词: 水资源优化调度; 滨海地区; 联合供水; 多目标模型; 多目标粒子群算法

中图分类号: TV 213 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)01-0059-08

An optimal operation model for multi-objective water resources schedule in coastal area

YAN Kun, ZHONG Ping an, WAN Xin yu

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The conflict between water supply and demand become more and more serious in coastal area of our country. Therefore, it is meaningful to make optimal and joint operation of limited fresh water resources so as to relieve the conflict. With the objective of minimizing the weighted sum of water deficit and the total water supply cost, a water resources multi objective optimal operation model was established according to the characteristics of the coastal area water resources system. The system consists of water supply projects in plain river networks, reservoirs and a water diversion project. A multi objective particle swarm optimization algorithm was employed to solving the model, the approach of processing various types of constrains was proposed, and the pareto solutions were obtained. The best coordinated solution for the two goals was obtained based on the rule that the Euler distance from the ideal solution is minimum, then the corresponding operation results were gained. The case study was carried out in the coastal areas of Jiangsu province, which proved that the proposed method is effective.

Key words: water resources optimal operation; coastal area; joint water supply; multi objective optimization model; multi objective particle swarm optimization

滨海地区地势平坦低洼, 不适宜建造大型的蓄水工程, 加上河道平缓, 水体流动性差, 自净能力弱, 形成了工程型和水质型混合缺水的局面。为此, 遵循充分利用当地水、尽量截留过境水、合理运用外引水的原则, 修建库容有限、来水靠人工抽引的平原水库群, 并与当地平原河网和远距离调水工程相互联

合, 实现分质供水、优水优用的水资源调度格局, 更具有现实意义。

目前国内对流域或区域的水资源调度研究成果比较丰富^[1-5], 对于滨海地区研究也有一定的成果, 如王维平等^[6]以滨海平原区地下水采补平衡和入海出境水量为约束条件, 建立水资源优化配置模型; 丁

收稿日期: 2015-02-06 修回日期: 2015-12-17 网络出版时间: 2016-02-27
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160227.1704.027.html>
基金项目: 国家自然科学基金(51179044; 51379055)

Fund: National Natural Science Foundation of China(51179044; 51379055)

作者简介: 闫堃(1990), 男, 河北怀来人, 主要从事水资源规划与管理方面研究。E-mail: hhuswyyk@163.com

通讯作者: 钟平安(1962-), 男, 安徽无为, 博士, 教授, 主要从事水资源规划与管理方面研究。E-mail: pazhong@hhu.edu.cn

涛等^[7]从河网目标控制水位动态控制角度,提出了滨海平原河网目标控制水位优化计算模型,以实现洪水资源的高效利用;万新宇等^[8]对沿海围垦区多水源多用户淡水资源联合调度技术以及围垦区水资源优化配置进行了初探;王文等^[9]系统对比分析了沿海地区常规水资源开发利用的多种方法,包括跨流域调水、修建滨海平原水库等,并指出了各种方法的特点与存在的问题。但从已有文献看,目前尚无针对滨海地区当地平原河网、平原水库群与远距离调水工程供水联合调度的相关研究。为此本文拟建立加权相对总缺水深度最小和供水总成本最小的多目标、多水源、多用户的滨海地区水资源优化调度模型,并利用多目标粒子群算法(MOPSO)进行优化调度模型的求解。

1 滨海地区水资源多目标优化调度模型

1.1 水资源系统概化

根据滨海地区的特点,本文将水资源系统结构概化^[10-11]为水源子系统、输水子系统和用水子系统见图 1。水源子系统:包括河网概化水库、平原水库和远距离调水工程三类,其中河网概化水库的来水主要是当地径流、过境水、远距离调水和灌溉回归水等;平原水库基本没有汇水面积,自然入流有限,其入流主要来自远距离调水和满足水质要求的河网概化水库的提水;远距离调水有直接使用、充蓄平原水库及河网概化水库的两重功能。用水子系统:考虑生活、工业、农业、生态四类用户,设有多个分区,总用户数有 K 个。输水子系统:是连接供水子系统和用水子系统的纽带,表征水资源系统的供需关系。基于优水优用原则,平原水库主要供给生活和工业用水,河网概化水库主要用于农业灌溉和生态用水,远距离调水可用于生活、工业、农业和生态。

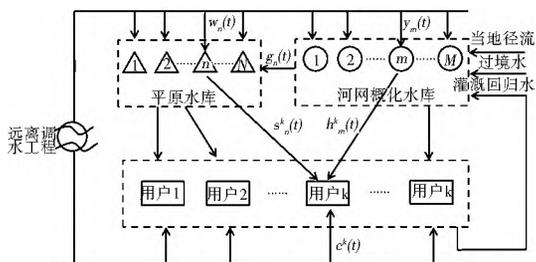


图 1 滨海地区水资源系统结构概化

Fig. 1 Schematic diagram of the coastal area water resources system

1.2 数学模型

1.2.1 目标函数

以研究区加权相对总缺水深度最小和供水总成本最小为目标。

目标函数一:加权相对总缺水深度最小。

$$\min f_1 = \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \rho^k \cdot \left[\frac{D^k(t) - (c^k(t) + \sum_{n \in \Omega_s} s_n^k(t) + \sum_{n \in \Omega_h} h_m^k(t))}{D^k(t)} \right]^2 \quad (1)$$

式中: K 为用水部门数; T 为调度时段数; $D^k(t)$ 为 k 用户第 t 时段的需求量; $c^k(t)$ 为远距离调水工程第 t 时段对 k 用户的直接供水量; $s_n^k(t)$ 为第 n 平原水库第 t 时段对 k 用户的供水量; Ω_s 为与 k 用户存在供需关系的平原水库的集合; $h_m^k(t)$ 为第 m 河网概化水库第 t 时段对 k 用户的供水量; Ω_h 为与 k 用户存在供需关系的河网概化水库的集合; ρ^k 为用户重要程度系数。

$$\rho^k = \frac{\sum_{f=1}^F b_{kf}}{\sum_{k=1}^K \sum_{f=1}^F b_{kf}} \quad (2)$$

模型采用专家打分法确定 k 用户的重要程度系数,专家人数为 F ,制定打分表,每位专家对于每个用户的赋分范围为 $1 \sim 10$ 分。式中, b_{kf} 为第 f 个专家对 k 用户的赋分值。

目标函数二:系统供水总成本最小。

$$\min f_2 = \sum_{k=1}^K [\alpha_k \sum_{t=1}^T c^k(t) + \sum_{n \in \Omega_s} \beta_n^k \cdot \sum_{t=1}^T s_n^k(t) + \sum_{n \in \Omega_h} \gamma_m^k \cdot \sum_{t=1}^T h_m^k(t) + \sum_{n=1}^N \lambda_n \cdot \sum_{t=1}^T W_n(t) + \sum_{m=1}^M \eta_m \cdot \sum_{t=1}^T y_m(t) + \sum_{n=1}^N \sum_{m \in \Omega_g} \mu_m^n \cdot \sum_{t=1}^T g_m^n(t)] \quad (3)$$

式中: α_k 为远距离调水工程给 k 用户供水的成本; β_n^k 为第 n 平原水库给 k 用户供水的成本; γ_m^k 为第 m 河网概化水库给 k 用户供水的成本;为 λ_n 远距离调水工程充蓄 n 平原水库的调水成本; η_m 为远距离调水工程充蓄 m 河网概化水库的调水成本; μ_m^n 为由第 m 河网概化水库向 n 平原水库提水的成本; $W_n(t)$ 为远距离调水工程第 t 时段对 n 平原水库的充蓄水量; $y_m(t)$ 为远距离调水工程第 t 时段对 m 河网概化水库的充蓄水量; $g_m^n(t)$ 为第 m 河网概化水库第 t 时段对 n 平原水库的提升水量; Ω_g 为与第 n 平原水库存在提水关系的河网概化水库的集合;其他变量意义同上。

1.2.2 约束条件

(1) 河网概化水库。

(a) 水量平衡约束。

$$V_m(t) = V_m(t-1) + I_m(t) + Q_m(t) + P(t) + y_m(t) - H_m(t) - G_m(t) - U_m(t) - \Delta_m(t) \quad (4)$$

式中: $V_m, V_m(t-1)$ 为第 m 河网概化水库第 t 时段末、初的蓄水量; $I_m(t)$ 为第 m 河网概化水库第 t 时

段的当地径流量; $Q_m(t)$ 为第 m 河网概化水库第 t 时段的过境水量; $P_m(t)$ 为第 m 河网概化水库第 t 时段的灌溉回归水量; $H_m(t)$ 为第 m 河网概化水库第 t 时段的供水量, 其中, $H_m(t) = \sum_{k \in \Omega_{m,k}} h_m^k(t)$, $\Omega_{m,k}$ 为与第 m 河网概化水库存在供需关系的用户集合; $G_m(t)$ 为第 m 河网概化水库第 t 时段向平原水库的提水量, 其中, $G_m(t) = \sum_{n \in \Omega_{m,n}} g_m^k(t)$, $\Omega_{m,n}$ 为与第 m 河网概化水库存在提水关系的平原水库集合; $U_m(t)$ 为第 m 河网概化水库第 t 时段的弃水量; $\Delta_m(t)$ 为第 m 河网概化水库第 t 时段的水量损失; 其他变量同前。

(b) 蓄水量约束。

$$V_{m, \min}(t) \leq V_m(t) \leq V_{m, \max}(t) \quad (5)$$

式中, $V_{m, \min}(t)$ 、 $V_{m, \max}(t)$ 为第 m 河网概化水库第 t 时段末允许的下限与上限蓄水量。

(c) 提水能力约束。

$$g_m^n(t) \leq g_m^n \quad (6)$$

式中: g_m^n 为第 m 河网概化水库可向 n 平原水库提升的时段最大水量。

(d) 允许提水量约束。

为了不影响平原水库水质, 河网概化水库向平原水库提水, 必须满足一定的水质标准。滨海平原河网水质具有季节性变化, 汛期由于降水量较大, 大量存于沟塘中的污水随着地表径流一起进入河网, 总体水质较差, 但洪水期会有部分时段水质良好, 非汛期的水质相对较好。必须在评价河网水库水质变化规律的前提下, 确定提水时机和提水量。

$$g_m^n(t) = \begin{cases} 0 & \text{水质不满足要求} \\ g_m^n & \text{水质满足要求} \end{cases} \quad (7)$$

(2) 平原水库^[12-13]

(a) 水量平衡约束。

$$V_n(t) = V_n(t-1) + w_n(t) + G_n(t) - S_n(t) - U_n(t) - \Delta_n(t) \quad (8)$$

式中: $V_n(t)$ 、 $V_n(t-1)$ 为第 n 平原水库第 t 时段末、初的蓄水量; $G_n(t)$ 为第 n 平原水库第 t 时段从河网的提水量, 其中, $G_n(t) = \sum_{m \in \Omega_{n,m}} g_m^n(t)$, $\Omega_{n,m}$ 为与第 n 平原水库存在提水关系的河网概化水库集合; $S_n(t)$ 为第 n 平原水库第 t 时段的供水量, 其中, $S_n(t) = \sum_{k \in \Omega_{n,k}} s_n^k(t)$, $\Omega_{n,k}$ 为与第 n 平原水库存在供需关系的用户集合; $U_n(t)$ 为第 n 平原水库第 t 时段的弃水量; $\Delta_n(t)$ 为第 n 平原水库第 t 时段的水量损失; 其他变量同前。

(b) 蓄水量约束。

$$V_{n, \min}(t) \leq V_n(t) \leq V_{n, \max}(t) \quad (9)$$

式中: $V_{n, \min}(t)$ 为第 n 平原水库防咸水位与库底之间的蓄水量, 滨海地区平原水库水位过低, 易使海水入侵, 为防止库水咸化, 定义防咸水位, 平原水库的蓄水位不得低于此水位; $V_{n, \max}(t)$ 为第 n 平原水库第 t 时段末允许的上限蓄水量。

(3) 远距离调水工程。

(a) 可调水量约束。

$$\sum_{k=1}^K c^k(t) + \sum_{n=1}^N w_n(t) + \sum_{m=1}^M y_m(t) \leq W_{\max} \quad (10)$$

式中: W_{\max} 为第 t 时段可远距离调引的最大水量; 其他变量同前。

(b) 调水工程能力约束。

$$c^k(t) \leq L_{k, \max} \quad (11)$$

$$w_n(t) \leq L_{n, \max} \quad (12)$$

$$y_m(t) \leq L_{m, \max} \quad (13)$$

式中: $L_{k, \max}$ 为远距离调水工程向 k 用户直供水时的工程时段输水能力; $L_{n, \max}$ 为远距离调水工程向 n 平原水库调水时的工程时段输水能力; $L_{m, \max}$ 为远距离调水工程向 m 河网概化水库调水时的渠道时段输水能力。

(4) 最小、最大需水量约束。

$$D_{\min}^k(t) \leq c^k(t) + \sum_{n \in \Omega_s} s_n^k(t) + \sum_{m \in \Omega_h} h_m^k(t) \leq D_{\max}^k(t) \quad (14)$$

式中: $D_{\min}^k(t)$ 为 k 用户第 t 时段的最小需水量; $D_{\max}^k(t)$ 为 k 用户第 t 时段的最大需水量。该约束条件保证供水量在用户需水允许破坏深度内且不超过其实际需水量。

(5) 非负约束。

$$c^k(t), s_n^k(t), h_m^k(t), w_n(t), y_m(t), g_m^n(t) \geq 0$$

式中变量含义同前。

2 多目标粒子群算法原理

多目标粒子群算法^[14-17] (MOPSO) 是以粒子群优化算法为基础来解决多目标问题^[18] 的一种方法。该算法通过构造一个外部档案集 N_p 来存储每次迭代过程所得到的非劣解集^[19-20], 防止丢失已得到的非劣解, 进而保证了算法的收敛性。在解决多目标问题上, 该算法具有其自身的优势, 采用高效的群集来并行地搜索非劣解并利用粒子的记忆功能跟踪群体的最优解 ($gbest$) 和自身的最优解 ($pbest$), 在搜索空间内进行搜索, 有很高的计算效率和执行速度。

2.1 粒子的编码及初始种群生成

根据滨海地区水资源调度模型的特点, 分别选取供水量和调水量作为两类决策变量, 设定每个粒子采用四维数组进行编码。其中, 河网概化水库、平

原水库、远距离调水工程等水源对各用户的供水量为第一类决策变量, 设定粒子 $pose1(i, j, k, n)$ 是第 n 个粒子中第 i 水源向第 j 用户在第 k 时段的供水量; 远距离调水工程、河网概化水库等调水水源对各受水水库的调水量为第二类决策变量, 粒子 $pose2(e, f, k, n)$ 是第 n 个粒子中第 e 调水水源向第 f 受水水库在第 k 时段的调水量。

利用生成随机数的方法生成初始种群, 即初始供水量和初始调水量。其中, 河网概化水库、平原水库与远距离调水工程的初始供水量在以水源工程能力约束与非负约束构成的解空间内随机产生; 远距离调水工程、河网概化水库等调水水源的初始调水量在以水源工程能力约束与非负约束的解空间内随机产生。

2.2 约束条件的处理

结合水资源优化调度模型约束条件多^[21], 相互制约关系复杂的特点, 选用可行解修正函数法来对每一次迭代的粒子进行修正, 使其满足调度模型的约束条件, 成为可行解, 进而优化出满意的最优解。

2.2.1 河网概化水库蓄水量下限类型约束处理

在每次迭代过程中, 以供水量作为决策变量的第 n 个粒子, 在第 k 时段不满足第 i 河网概化水库蓄水量下限时可进行如下修正:

$$pose1(i, j, k, n)' = pose1(i, j, k, n) \cdot \frac{V(i, k)_{\max} - V(i, k)_{\min}}{V(i, k)_{\max} - V(i, k)} \cdot \alpha$$

$$(j = 1, 2, \dots; i \in \Omega_M, j \in \Omega_i) \quad (16)$$

式中: $pose1(i, j, k, n)$ 、 $pose1(i, j, k, n)'$ 分别为第 n 个粒子本代修正前、后第 i 河网概化水库在第 k 时段向第 j 用户的供水量; $V(i, k)_{\max}$ 、 $V(i, k)_{\min}$ 分别为第 i 河网概化水库在第 k 时段的蓄水量上、下限; $V(i, k)$ 为第 i 河网概化水库在第 k 时段的蓄水量; α 为一个小于但非常接近 1 的数, 避免造成多次循环修正; Ω_M 为河网概化水库集合; Ω_i 为与第 i 河网概化水库存在供需关系的用户集合, 即需依次修正第 k 时段第 i 河网概化水库对相关用户的供水量。同理, 以调水量作为决策变量的相关粒子也需按此方法进行修正。

此外, 河网概化水库提水能力约束和允许提水量约束, 平原水库蓄水量下限约束, 远距离调水工程的可调水量约束和工程能力约束以及最大需水量约束均属于此类型的约束, 可按照上述方法对不满足约束条件的粒子进行修正。

2.2.2 最小需水量类型约束处理

处理最小需水量约束, 主要需要考虑两方面内容, 一方面是在增大粒子取值的过程中, 不能破坏最

大需水量约束等已对粒子形成的上限约束; 另一方面, 粒子出现位置的随机性不能受到破坏。当第 n 个粒子在第 k 时段向第 j 用户的供水量没有满足其最小需水量约束时, 首先需要判断与该用户存在供需关系的水源是否可以进一步向该用户增加供水。若可以, 则统计相关水源可增加的供水量和该用户的缺水情况, 可对供水量作为决策变量的粒子进行如下修正:

$$pose1(i, j, k, n)' = pose1(i, j, k, n) + q(j, k) \cdot \frac{c(i, k)}{W(k)} \quad (i = 1, 2, \dots; i \in \Omega_j) \quad (17)$$

式中: $pose1(i, j, k, n)$ 、 $pose1(i, j, k, n)'$ 分别为第 n 个粒子本代修正前、后第 i 水源在第 k 时段向第 j 用户供水量的取值; $q(j, k)$ 为第 k 时段第 j 用户的缺水量; $c(i, k)$ 为第 i 水源第 k 时段可增加的供水量; $W(k) = \sum_{i \in \Omega_j} c(i, k)$, 为与第 j 用户存在供需关系的所有水源的可增加的供水量之和, 其中, Ω_j 为与第 j 用户存在供需关系的所有水源的集合。

2.3 非劣解集的筛选

基于 Pareto 支配的多目标优化问题, 通过判断支配关系筛选非劣解, 粒子 x_1 支配粒子 x_2 , 即 x_1 为非支配粒子。当且仅当 x_1 在加权相对总缺水深度最小和供水总成本最小的目标上都不差于 x_2 , 即加权相对总缺水深度目标函数对应的适应度值 $fit_1(x_1) \leq fit_1(x_2)$, 供水总成本目标函数对应的适应度值 $fit_2(x_1) \leq fit_2(x_2)$; 并且 x_1 至少在其中一个目标上严格好于 x_2 , 即存在 $k = 1, 2$ 使得 $fit_k(x_1) < fit_k(x_2)$ 。将选出的所有非支配粒子存入构造的外部档案集 N_p 中, 形成非劣解集。

2.4 基于 Pareto 支配的最优粒子选择

最优粒子包括群体最优粒子和个体最优粒子, 二者的选取对于求解多目标粒子群算法至关重要, 它们将直接影响到算法的收敛速度和解集的分布性。本文采用随机选择的方法选取群体最优粒子 $gbest$, 即从存储于外部档案集 N_p 的所有非劣解中随机选取一个非劣解, 其中每个非劣解具有相同的被选择概率; 个体最优 $pbest$ 的选择是比较当前粒子与历史最优粒子的适应度值的支配关系, 从中选择非支配粒子作为个体最优, 如果彼此间不能相互支配, 则以 50% 的概率随机选择其中之一。

2.5 粒子速度和位置更新

粒子更新公式如下:

$$v_{i,d}^{k+1} = \omega \cdot v_{i,d}^k + c_1 \cdot r_1 \cdot (P_{i,d}^k - x_{i,d}^{k+}) + c_2 \cdot r_2 \cdot (P_{g,d}^k - x_{i,d}^k) \quad (18)$$

$$x_{i,d}^{k+1} = x_{i,d}^k + v_{i,d}^{k+1} \quad (19)$$

式(18)和(19)中, k 为当前迭代次数; $v_{i,d}^{k+1}$ 、 $v_{i,d}^k$ 分别为粒子 i 在第 $k+1$ 代和第 k 代中第 d 维上的速度分量; ω 为惯性系数, 其变化范围通常为 $0.4 \sim 0.9$; c_1 、 c_2 为学习因子, 通常取值为; $c_1 = c_2 = 2$; r_1 、 r_2 为 $(0, 1)$ 之间均匀分布的随机数; $P_{i,d}^k$ 为粒子 i 在第 d 维搜索空间中个体极值点所在位置; $P_{g,d}^k$ 为整个粒子群体在第 d 维搜索空间中的全局极值点所在位置; $x_{i,d}^k$ 、 $x_{i,d}^{k+1}$ 为迭代更新前和后在第 d 维搜索空间中粒子 i 的位置。

以供水量为决策变量的速度 $velo1(i, j, k, n)$ 与以调水量为决策变量的速度 $velo2(e, f, k, n)$ 均可采用式 (18) 进行更新, $pose1(i, j, k, n)$ 与 $pose2(e, f, k, n)$ 均可采用式(19)进行更新。

2.6 算法求解流程

针对本文提出的滨海地区水资源优化调度多目标模型, 基于 Pareto 的多目标粒子群算法求解流程如下。

步骤 1: 读取各项数据资料, 初始化算法各项参数, 包括确定粒子群的规模、最大迭代次数、两个加速因子的取值、惯性系数的变化范围等。随机生成河网概化水库、平原水库以及远距离调水工程等供水水源的初始供水量 $pose1(i, j, k, n)$, 并初始化相应的粒子速度 $velo1(i, j, k, n)$; 随机生成河网概化水库、远距离调水工程等调水水源的初始调水量 $pose2(e, f, k, n)$, 并初始化相应的粒子速度 $velo2(e, f, k, n)$ 。

步骤 2: 判断初始供水量与调水量是否满足滨海地区水资源优化调度多目标模型的约束条件, 如果满足则转步骤 4。

步骤 3: 调用修正函数, 对不满足约束的供水量与调水量进行修正, 使之成为可行解。

步骤 4: 计算两个目标函数相应的适应度值, 筛选出非劣解, 将它们存储到外部档案集 N_p 中, 形成初始的非劣解集。

步骤 5: 分别确定两类粒子初始的群体最优 $gbest$ 与个体最优 $pbest$ 。

步骤 6: 根据式(18)分别改变两类粒子的速度, 根据式(19)分别更新供水量与调水量, 判断是否满足约束条件, 如果满足则转步骤 8。

步骤 7: 调用修正函数, 将更新后的供水量与调水量重新修正成为可行解。

步骤 8: 重新计算适应度值, 分别调整选取两类粒子的 $pbest$ 。

步骤 9: 根据新的非劣解更新维护外部档案集 N_p , 同时分别为两类群体选取新的 $gbest$ 。

步骤 10: 根据是否达到最大迭代次数判断算法是否收敛, 如果未达到则转步骤 5, 如果达到了则算法结束, 输出结果。

该算法的流程见图 2。

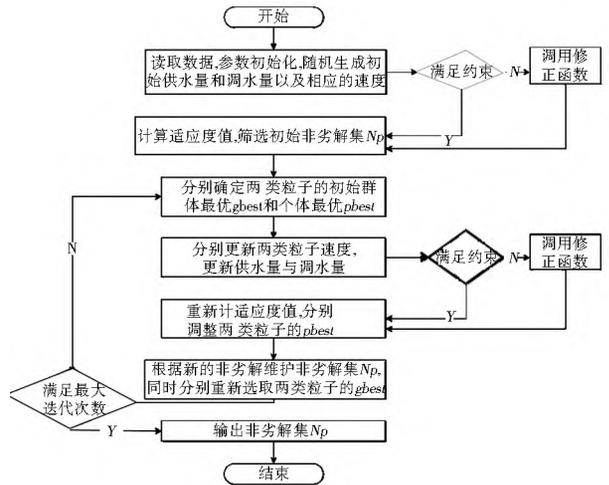


图 2 滨海地区水资源优化调度多目标粒子群算法流程
Fig. 2 Flow chart of multi objective particle swarm optimization algorithm of the coastal area water resources optimal operation

3 实例计算及结果分析

3.1 研究区水资源系统概化

江苏滨海某地区水资源联合调度工程主要包括当地平原河网概化水库、平原水库 A、平原水库 B 以及远距离调水工程, 通过四水源的联合调度来满足该地区的生活、工业、农业、生态需水。其中, 河网概化水库主要供给对水质要求较低的农业与生态用水, 当河网水质达到 0 类用水标准时可用于供给工业用水, 达到 0 类用水标准时可用于供给生活用水或提水充蓄平原水库; 平原水库主要供给对生活与工业用水, 协助供给农业用水; 远距离调水工程遵循对水质要求较高的用户优先供给的原则, 可同时直接用于供给生活、工业、农业、生态用水, 也可调水充蓄平原水库或河网概化水库。该地区水资源系统结构概化见图 3。

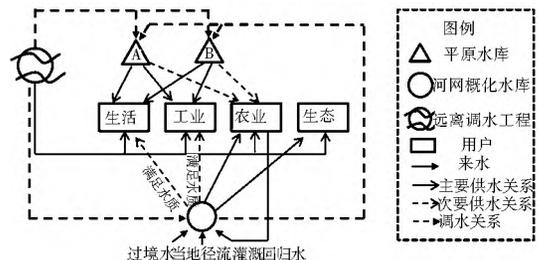


图 3 滨海某地区水资源系统结构概化

Fig. 3 Schematic diagram of a coastal area water resources system

3.2 多目标粒子群算法求解优化方案

以 1 年为调度期, 月为计算时段长, 共 12 个时段。该地区某年河网概化水库的来水过程见表 1,

其中,6 月- 9 月份为该地区的汛期,水质较差,为 Ⅲ 类水,非汛期水质较好,5 月与 10 月为 Ⅱ 类水质,11 月- 4 月份为 Ⅰ 类水质。各用户需水过程见表 2,根据专家打分法可知各用户的重要程度系数分别为生活 0.6、工业 0.2、农业 0.12、生态 0.08。该地区直供水成本和调水成本分别如表 3、表 4 所示。河网概化水库的调蓄能力为 2 000 万 m³,平原水库 A、B 的调蓄能力分别为 1 800 万 m³ 和 3 000 万 m³,远距离调水工程的月调水能力为 10 000 万 m³。

表 1 来水过程

Tab. 1 The inflow sequences

来水	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
当地径流量	0	0	125	376	380	2325	4141	3567	3543	475	234	0
过境水量	3 681	3 630	5 320	5 019	5 958	6 546	1 0088	6 251	8 253	6 809	6 506	6 168
灌溉回归水量	50	100	151	201	502	1054	1104	904	452	351	100	50

表 2 需水过程

Tab. 2 Water demand sequences

用户	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
生活	184	167	184	178	184	178	184	184	178	184	178	184
工业	677	677	677	677	677	677	677	677	677	677	677	677
农业	335	669	1 004	1 339	3 346	7 028	7 362	6 024	3 012	2 343	669	335
生态	2	2	3	11	15	16	12	12	12	5	2	2

表 3 直供水成本

Tab. 3 Cost of water supply per unit

用户	河网概化水库	平原水库 A	平原水库 B	远距离调水工程
生活	0.32	0.34	0.38	0.57
工业	0.28	0.32	0.35	0.53
农业	0.05	0.14	0.20	0.48
生态	0.00	/	/	0.41

表 4 调水成本

Tab. 4 Cost of water transfer per unit

受水水库	河网概化水库	远距离调水工程
平原水库 A	0.40	0.63
平原水库 B	0.44	0.58
河网概化水库	/	0.30

表 5 各方案优化结果

Tab. 5 The optimal results under different schemes

方案集	方案策略	加权相对总缺水深度平方和	供水总成本/亿元
方案 A	加权相对总缺水深度最小	0.10	7.79
方案 B	侧重考虑缺水深度的非劣解	0.13	7.46
方案 C	协调解	0.18	6.89
方案 D	侧重考虑供水成本的非劣解	0.27	6.31
方案 E	供水总成本最小	0.37	6.03

滨海某地区水资源联合调度模型综合考虑了社会目标与经济目标,表 5 中反映的即是该地区加权相对总缺水深度与供水总成本之间的关系。当减少供水总成本时,该地区的加权相对总缺水深度就会增加,二者呈现矛盾关系,一方的受益必须以另一方的缺损为代价。

3.3 目标协调及方案推荐

表 6 列出了该地区该年五种调度方案下各用户的缺水量以及相对缺水深度。总体看,通过水资源联合优化调度后,该地区的缺水情况较好。

由表 6 可以看出,与其余四种方案相比,方案 C 在 2 个目标中均有侧重,较好地协调了社会目标与经济目标,与方案 A 比较,虽然该年缺水量增加了

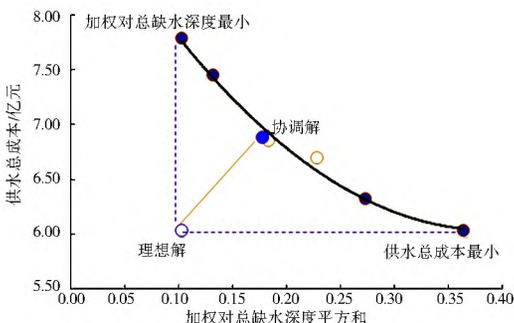


图 4 滨海某地区水资源联合调度非劣解集

Fig. 4 Pareto solutions of a coastal area water resources joint operation

表 6 方案缺水情况对比

Tab. 6 Comparison of water deficit under different schemes

用户	需水量 /万 m ³	缺水量/万 m ³					相对缺水深度				
		方案 A	方案 B	方案 C	方案 D	方案 E	方案 A	方案 B	方案 C	方案 D	方案 E
		°	»	¼	½	¾	° / 1	» / 1	¼ / 1	½ / 1	¾ / 1
生活	2 166.0	4.8	8.9	8.0	6.3	10.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
工业	8 119.2	707.9	519.8	622.6	853.0	1 134.0	0.09	0.06	0.08	0.11	0.14
农业	33 464.4	1 825.9	3 568.7	3 456.2	4 937.8	3 042.6	0.05	0.11	0.10	0.15	0.09
生态	96.4	10.3	6.8	22.3	14.1	17.8	0.11	0.07	0.23	0.15	0.18
合计	43 846.0	2 548.9	4 104.2	4 109.1	5 811.2	4 204.8	0.06	0.09	0.09	0.13	0.10

注:表中序号¹表示用户需水量,序号[°]、[»]、^¼、^½、^¾分别表示方案 A、B、C、D、E 的用户缺水量。

1 560 2 万 m³,但从相对缺水深度来看,增加的缺水量主要集中在重要程度系数较低的农业与生态用水,同时,该年节省了 0.9 亿元的供水成本,效益可观;与方案 B 比较,虽然两种方案在该年的总缺水量相近,但该方案的调度配置使得供水成本降低了 0.57 亿元;与方案 D 比较,虽然供水成本增加了 0.58 亿元,但方案 D 的缺水情况要差很多,尤其是重要程度系数较高的工业用户,也出现了相对较大的缺水;与方案 E 比较,虽然方案 E 在所有方案中供水总成本最少,但是其该年的总缺水情况也是最差的,尤其是重要程度系数较高的工业用水,由于对水质要求较高,通过河网概化水库供给的满足水质的水量有限,外加水价的限制,减少了平原水库对工业用户的供水量。

综上,方案 C 最好地权衡了两个目标,应为首先推荐的方案。在实际调度与配置中,决策者也可根据不同的偏好选择合适的调度方案。

4 结语

本文综合考虑了水量、水价、水质三个方面,以滨海地区加权相对总缺水深度最小和供水总成本最小为优化目标,建立了以滨海地区河网概化水库、平原水库以及远距离调水工程为供水工程的多目标、多水源、多用户的水资源联合调度优化模型。利用多目标粒子群算法进行模型求解,得到了不同策略下的方案集。通过计算各非劣解与理想解之间的欧拉距离得到能够最好权衡各个目标的协调解作为推荐方案,此外,决策者亦可根据自己的决策偏好,选择不同方案。通过江苏省某滨海地区的计算结果,验证了本文研究方法的有效性。

参考文献(References):

[1] 钟平安,王会容,刘静楠,等.深圳市水资源系统优化调度模型研究[J].河海大学学报:自然科学版,2003(6):616-620.(ZHONG

Ping an, WANG Hui rong, LIU Jing nan, et al. Optimal dispatching model for Shenzhen water resources system[J]. Journal of Hohai University, 2003(6):616-620. (in Chinese))

[2] 游进军,甘泓,王浩,等.基于规则的水资源系统模拟[J].水利学报,2005,36(9):1043-1049,1056.(YOU Jir jun, GAN Hong, WANG Hao, et al. Simulation of water resources system based on rules[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(9): 1043-1049, 1056. (in Chinese))

[3] 王维平,范明元,杨金忠,等.缺水地区枯水期城市水资源预分配管理模型[J].水利学报,2003(9):60-65.(WANG Wei ping, FAN Ming yuan, YANG Jir zhong, et al. Model for water resources pre-allocation during drought period in water deficient urban area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(9): 60-65. (in Chinese))

[4] 柴福鑫,邱林,谢新民.灌区水资源实时优化调度[J].水利学报,2007(6):710-716.(CHAI Fu xin, QIU Lin, XIE Xir min. Real time optimal dispatch of water resources for irrigation area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007(6): 710-716. (in Chinese))

[5] 王强,周惠成,梁国华,等.浑太流域水库群联合供水调度模型研究[J].水力发电学报,2014(3):42-54.(WANG Qiang, ZHOU Hui cheng, LIANG Guo hua, et al. Joint operation of multi-reservoir system in the Huntai Basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014(3): 42-54. (in Chinese))

[6] 王维平,陈芳林,范明元,等.滨海地区生态型水资源优化配置模型[J].水利学报,2006(8):991-995.(WANG Wei ping, CHEN Fang lin, FAN Ming yuan. Model for ecological oriented water resources optimal deployment in coastal area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006(8): 991-995. (in Chinese))

[7] 丁涛,楼越平,马小兵.滨海平原河网洪水资源利用研究[J].水利学报,2007(S1):356-359.(DING Tao, LOU Yue ping, MA Xiao bing. Research on flood water resources utilization in littoral plain river networks[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007(S1): 356-359. (in Chinese))

[8] 万新宇,钟平安,王建群.沿海围垦区水资源优化配置与联合调度[J].水利经济,2012(3):58-62.(WAN Xir yu, ZHONG Ping an, WANG Jian qun. Optimal allocation and joint operation of water resources in coastal reclamation areas[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2012(3): 58-62. (in Chinese))

[9] 王文,张鹭,杨云.沿海地区常规水资源开发利用方法与策略[J].水利经济,2014(4):35-38.(WANG Wen, ZHANG Lu, YANG Yun. Methods and strategies for development of conventional water resources in coastal regions[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2014(4): 35-38. (in Chinese))

[10] 游进军,王忠静,甘泓.概念化水资源系统及其面向对象构架

- 设计[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2007, 47(9): 1457-1461. (YOU Jir jun, WANG Zhong jing, GAN Hong. Conceptualization and object-oriented based design of water resources simulation[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2007, 47(9): 1457-1461. (in Chinese))
- [11] 游进军, 甘泓, 王忠静. 分层水资源网络及其应用[J]. 水利学报, 2007(6): 724-731. (YOU Jir jun, GAN Hong, WANG Zhong-jing. Hierarchical network of water resources system and its application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007(6): 724-731. (in Chinese))
- [12] 谷秀英, 曲兴辉, 王立强. 平原水库供水水源系统可靠性及风险分析方法[J]. 水文, 2007(1): 26-29. (GU Xiuying, QU Xinghui, WANG Li-qiang. Risk analysis of water supply source system and simulation method in plain reservoir[J]. Journal of China Hydrology, 2007(1): 26-29. (in Chinese))
- [13] 马俊德. 平原水库提高蓄水深度的研究[J]. 河海大学学报, 2002(4): 82-84. (MA Jun de, Study on feasibility of increase of water storage depth for plain reservoirs[J]. Journal of Hohai University, 2002(4): 82-84. (in Chinese))
- [14] 杨俊杰, 周建中, 方仍存, 等. MOPSO 算法及其在水库优化调度中的应用[J]. 计算机工程, 2007(18): 249-250. (YANG Junjie, ZHOU Jianzhong, FANG Rengcun, et al. Multi-objective Particle Swarm Optimization and Its Application in Optimal Regulation of Reservoir[J]. Computer Engineering, 2007(18): 249-250. (in Chinese))
- [15] 巩敦卫, 胡滢, 张勇. 基于多目标微粒群优化的异质数据特征选择[J]. 电子学报, 2014(7): 1320-1326. (GONG Dunwei, HU Ying, ZHANG Yong. Feature selection of heterogeneous data based on multi-objective particle swarm optimization[J]. Journal of Hohai University, 2014(7): 1320-1326. (in Chinese))
- [16] 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(5): 1025-1050. (HU Wang, Gary G. YEN, ZHANG Xin. Multi-objective particle swarm optimization based on Pareto entropy[J]. Journal of Software, 2014(5): 1025-1050. (in Chinese))
- [17] 王丽萍, 江波, 邱飞岳. 基于决策偏好的多目标粒子群算法及其应用[J]. 计算机集成制造系统, 2010(1): 140-148. (WANG Liping, JIANG Bo, QIU Feiyue. Multi-objective particle swarm optimization based on decision preferences and its application[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010(1): 140-148. (in Chinese))
- [18] 肖晓伟, 肖迪, 林锦国, 等. 多目标优化问题的研究概述[J]. 计算机应用研究, 2011(3): 805-808. (XIAO Xiaowei, XIAO Di, LIN Jinguo, et al. Overview on multi-objective optimization problem research[J]. Application Research of Computers, 2011(3): 805-808. (in Chinese))
- [19] 丁胜祥, 董增川, 王德智, 等. 基于 Pareto 强度进化算法的供水水库群多目标优化调度[J]. 水科学进展, 2008, 19(5): 679-684. (DING Shengxiang, DONG Zengchuan, WANG Dezhi, et al. MOP of feeding reservoir group optimal operation based on SPEA[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(5): 679-684. (in Chinese))
- [20] 朱浩鹏, 李为吉. 结构多目标优化非劣解集的遗传算法[J]. 西北工业大学学报, 2001(1): 152-155. (ZHU Haopeng, LI Weiji. Multiobjective structural optimization with pareto genetic algorithm[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2001(1): 152-155. (in Chinese))
- [21] 张玲, 徐宗学, 张志果. 基于粒子群算法的水资源优化配置[J]. 水文, 2009, 29(3): 41-45, 23. (ZHANG Ling, XU Zongxue, ZHANG Zhiguo. Rational allocation of water resources based on particle swarm optimization[J]. Journal of China Hydrology, 2009, 29(3): 41-45, 23. (in Chinese))

(上接第 41 页)

- [11] 张蕾. 城市地下水水质水位预警的研究[D]. 天津: 天津大学, 2008. (ZHANG Lei. Study on early-warning of water quality and water levels in urban groundwater[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese))
- [12] 白利平. 地下水污染预警方法与应用研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2009. (BAI Liping. Research on the early-warning method of groundwater pollution and its application[D]. Beijing: Beijing Normal University, 2009. (in Chinese))
- [13] 张伟红. 地下水污染预警研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007. (ZHANG Weihong. Study on the early warning of groundwater pollution[D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese))
- [14] HJ/T338—2007, 饮用水水源保护区划分技术规范[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007. (HJ/T338—2007. Technical guideline for delineating source water protection areas[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2007. (in Chinese))
- [15] Yunes M, Gorge T. Comparative identification of wellhead protection areas for municipal supply wells in Gaza[J]. Water Resource and Protection, 2010, 2: 105-114.
- [16] Rock G, Kupfersberger H. Numerical delineation of transient capture zones[J]. Journal of Hydrology, 2002, 269: 134-149.
- [17] 王金生, 王澎, 刘文臣, 等. 划分地下水源地保护区的数值模拟方法[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(4): 83-86. (WANG Jisheng, WANG Peng, LIU Wenchen, et al. Numerical simulation method for delineating protection zones of groundwater wellfields[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004, 31(4): 83-86. (in Chinese))
- [18] 李国敏, 徐海珍, 黎明, 等. 地下水源地保护区划分方法与应用[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011. (LI Guoming, XU Haizhen, LI Ming, et al. Methods of drinking groundwater protection area delineation and the application[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2010. (in Chinese))
- [19] 北京师范大学. 地下水型饮用水水源地保护区划分软件(GWSPZS) V1.0, 2012SR007564, 2012 (Beijing Normal University. Software for delineation of groundwater wellhead protection areas(GWSPZS). V1.0, 2012SR007564, 2012. (in Chinese))
- [20] 李志, 于孟文, 张丽玲, 等. 西辽河平原地下水资源及其环境问题调查评价[M]. 北京: 地质出版社, 2009. (LI Zhi, YU Mengwen, ZHANG Liling, et al. Investigation and assessment of groundwater resources and their environmental issues in the west Liaohe plain[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009. (in Chinese))