

黄显峰, 康海根, 周引航, 等. 基于改进云模型的山丘区水资源多目标优化配置方案评价[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(8): 232-244. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.08.017

HUANG Xianfeng, KANG Haigen, ZHOU Yinhang, et al. Evaluation of multi-objective optimal allocation schemes for water resources in hilly regions based on improved cloud model [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(8): 232-244. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.08.017

基于改进云模型的山丘区水资源多目标 优化配置方案评价

黄显峰¹, 康海根¹, 周引航¹, 苏 静²

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京市六合区水务局, 江苏 南京 211500)

摘 要:【目的】山丘区地形起伏和降雨时空分布不均, 导致产汇流速度快, 水资源难以有效收集, 低地易洪涝、高地易干旱等问题, 需结合山丘区的联合调配供水系统, 缓解水资源供需矛盾。【方法】基于山丘区的联合供水方式, 构建山丘区水资源多目标配置模型, 并对 NSGA-II 算法的交叉、变异和同一非支配层排序过程 3 个方面进行改进, 用于模型求解。构建水资源综合评价体系, 基于层次分析法对云模型进行改进, 对方案集进行评价, 比选得到综合最优的水资源多目标优化配置方案。最后将理论方法应用于南京市六合区, 开展实例研究。【结果】(1)采用改进 NSGA-II 算法求得六合区 2025 年和 2035 年的 Pareto 解集, 分别以经济效益、社会效益、生态效益及协调最优为筛选条件进行筛选, 得到 2025 年和 2035 年各 7 个配置方案集。(2)2025 年与 2035 年的 7 个方案集经云模型等级评分后得到的最佳方案集均为方案四, 即经济与社会协调最优方案, 得分分别为 89.87 分、90.95 分。【结论】构建山丘区水资源多目标优化配置模型, 通过三个维度改进传统 NSGA-II 算法, 显著提升了解集的质量与合理性。建立多层次评价指标体系, 创新性地采用改进云模型对方案进行量化评估, 比选获得最优方案。该方法为山丘区水资源高效配置提供了“模型构建-算法优化-方案比选”的完整技术路径, 可为决策者提供参考依据, 缓解水资源供需矛盾, 促进山丘区的综合协调发展。

关键词: 山丘区; 水资源优化配置; 改进 NSGA-II 算法; 方案评价; 改进云模型;

多目标优化; 帕累托最优解; 层次分析法

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.08.017

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV213.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)08-0232-13



Evaluation of multi-objective optimal allocation schemes for water resources in hilly regions based on improved cloud model

HUANG Xianfeng¹, KANG Haigen¹, ZHOU Yinhang¹, SU Jing²

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

2. Water Affairs Bureau of Liuhe District of Nanjing City, Nanjing 211500, Jiangsu, China)

收稿日期: 2025-05-06; 修回日期: 2025-07-13; 录用日期: 2025-07-17; 网络出版日期: 2025-09-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(520031111)

作者简介: 黄显峰(1980—), 男, 副教授, 硕士研究生导师, 博士, 主要从事水资源规划与利用、河流管理与保护等方面研究。E-mail: xfhuang@hhu.edu.cn

通信作者: 康海根(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事水资源规划等方面研究。E-mail: poison5264@163.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Abstract: [Objective] The undulating terrain and uneven spatiotemporal distribution of rainfall in hilly regions result in rapid runoff generation and concentration, making it difficult to effectively collect water resources. This leads to issues such as frequent flooding in lowlands and droughts in uplands. Therefore, a coordinated water allocation and supply system for hilly regions is required to alleviate the conflict between water supply and demand. [Methods] Based on the integrated water supply approach in hilly regions, a multi-objective optimal allocation model for water resources in hilly regions was established. The Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II) was improved in three aspects: crossover, mutation, and sorting processes within the same non-dominated layer, for solving the model. A comprehensive evaluation indicator system for water resources was developed. The cloud model was improved using the Analytic Hierarchy Process (AHP) for evaluating the set of schemes and selecting the overall best multi-objective optimal allocation scheme for water resources. Finally, the theoretical method was applied to the Liuhe District, Nanjing City, to conduct a case study. [Results] (1) The improved NSGA-II algorithm was employed to obtain the Pareto solution sets for Liuhe District in 2025 and 2035. These sets were screened based on economic, social, ecological benefits, along with optimal coordination, resulting in seven allocation scheme sets for each year. (2) After the seven scheme sets for 2025 and 2035 were evaluated using the cloud model rating, the optimal scheme set for both 2025 and 2035 was scheme 4, representing the optimal coordination between economic and social benefits. The scores were 89.87 and 90.95, respectively. [Conclusion] A multi-objective optimal allocation model for water resources in hilly regions is established. By improving the traditional NSGA-II algorithm in three aspects, the quality and rationality of the solution sets are significantly enhanced. A multi-level evaluation indicator system is established. An improved cloud model is innovatively applied to quantitatively evaluate the schemes, and the optimal scheme is selected through comparison. This approach provides a complete technical pathway of “model construction-algorithm optimization-scheme comparison and selection” for efficient water resource allocation in hilly regions. It can provide a reference for decision-makers, alleviate water supply-demand conflict, and promote comprehensive and coordinated development in hilly regions.

Keywords: hilly regions; optimal allocation of water resources; improved NSGA-II algorithm; scheme evaluation; improved cloud model; multi-objective optimization; Pareto optimal solution; Analytic Hierarchy Process (AHP)

0 引 言

我国山丘区所占陆域面积广阔,其水资源的合理利用对我国高质量发展有着举足轻重的意义。相较于地势平坦地区,山丘区的水资源分布特点和地形使其面临着更大的挑战^[1-2]。水资源的有限性使其难以同时兼顾经济发展、社会建设和生态保护的多重需求^[3-4]。因此,优化水资源利用结构、推进水资源合理配置以及配置方案的优选,是协调山丘区经济发展、社会建设和生态保护的关键^[5-6]。

水资源多目标优化配置研究最早由国外学者发起,其初期研究主要集中于水量分配优化与水库调度管理等基础性问题^[7-8]。随着社会经济的发展,学者们不断从多个角度细化水资源配置的研究,构建多种模型并提出或优化算法来提高模型求解效率。OLIVEIRA 等^[9]将经典遗传算法应用于多水库的运行调度,并利用模拟来评估多个运行调度策略,改进现有的水库调度规则;MOHAMMED 等^[10]为缓解埃塞俄比亚裂谷湖盆地(RVLB)的水资源矛盾,建立以经济效益最大化和基尼系数最小化为目标的优化模型,使用 NSGA-II 算法进行求解,为 RVLB 提供一个综合

的水资源分配方案。DENG 等^[11]、DONG 等^[12]分别以经济效益最大化与水资源分配公平最大化、经济最大化和 COD 排放量最小建立多目标水资源配置模型,并使用 NSGA-II 算法求解;何灏川等^[13]、杜佰林等^[14]、陶洁等^[15]、方国华等^[16]以经济效益最大、总缺水量最小、COD 排放量最小为目标,分别采用改进灰狼算法、基于模拟退火粒子群算法、改进的第三代非支配排序遗传算法(A-NSGA-III)、改进粒子群算法对模型进行求解来优化水资源配置。除此之外,基于动态规划的神经网络模型^[17]、概念性 GIS 数据模型^[18]、多目标蚁群算法(MOACO)^[19]等多种技术在水资源配置领域均有较好的表现。由此可见,当前研究通过多维度探索水资源系统复杂性,构建了多样化、创新性强的多目标配置模型,同时引入或改进算法进行模型求解,为水资源优化配置奠定了坚实的理论基础。然而,上述研究在模型结果的评价与优选方面仍存在显著局限性。

水资源多目标优化配置的结果通常是多个配置方案,对方案进行评价,可以反馈模型计算结果的科学性与合理性。目前有多种综合评价方法被引入并应用于水资源配置方案的评价。RADMEHR 等^[20]、单宝

英等^[21]、赵钦等^[22]、何英等^[23] 分别基于 AHP-TOPSIS 法、熵权法、TOPSIS 法、熵权-TOPSIS 法构建方案优选评价体系, 并应用于灌区水资源优化配置方案的优选; LIM 等^[24] 引入了水资源指数 (WRI), 用于评估连续 7 d 内流域水资源可用性 (WRA) 与水资源容量 (WRC) 的比较。王庆杰等^[25] 将灰色关联分析法应用于新疆克孜河流域的水资源配置方案评价, 为流域解决水资源问题提出建议; 吴泽宁等^[26] 采用能值量化方法表征农业水资源配置的一系列指标, 从而评价配置方案的优劣; 龚艳冰等^[27] 将基于模糊 TOPSIS 模型的评价方法应用于天津市的水资源配置方案评价。此外, 投影寻踪动态聚类法^[28]、基于 IFCBP 模型的集成评价方法^[29]、TOPSIS 与人工神经网络结合的评价方法^[30] 等多种评价方法均为水资源配置方案的最终决策提供了依据。上述方法为区域水资源优化配置方案评价体系的构建及其评价方法的应用提供了实践指导和参考价值。

云模型在不同领域的指标权重计算、性质分析、效果评估等方面都有所应用。ZHAO 等^[31] 引入了博弈论组合赋权-正态云模型, 用于评估隧道围岩质量, 主要利用云模型处理评估中的不确定性, 提高了评估结果的准确性和一致性; 龚禹璐等^[32] 将 FCM、云模型、LSTM 相结合, 应用于灾害易损性评估; 陈泳江等^[33] 将 FMECA-模糊层次分析法引入云模型进行优化, 并将其应用于云南某大坝的安全性分析, 得到了与实际评估一致的结果; 朱倩等^[34] 采用层次分析法和改进熵权法计算组合权重, 再通过云模型评价方法对果园运输小车的适应性进行了研究。与此同时, 云模型在水利现代化评价^[35]、水文变化指标 (IHA) 评价^[36]、洪水资源利用风险评价^[37]、水利工

程效益评价^[38]、水利工程项目成本风险评价^[39] 等水利相关领域也有良好的表现, 但仍缺少在水资源多目标配置评价方案优选方面的研究。水资源多目标配置方案的评价要求实现定量数据与定性概念之间的转换, 从而通过评分实现方案的优选, 而云模型具有这一潜力^[40]。

鉴于此, 本文考虑山丘区特有的联合供水方式, 构建山丘区水资源多目标优化配置模型, 并用改进 NSGA-II 算法进行求解, 构建基于改进云模型的水资源多目标优化配置方案综合评价指标体系, 利用改进云模型对配置方案进行多指标评价, 优选综合最优方案。最后基于南京市六合区现状进行验证, 以期为山丘区水资源优化配置提供理论参考和决策依据。

1 山丘区水资源多目标优化配置模型

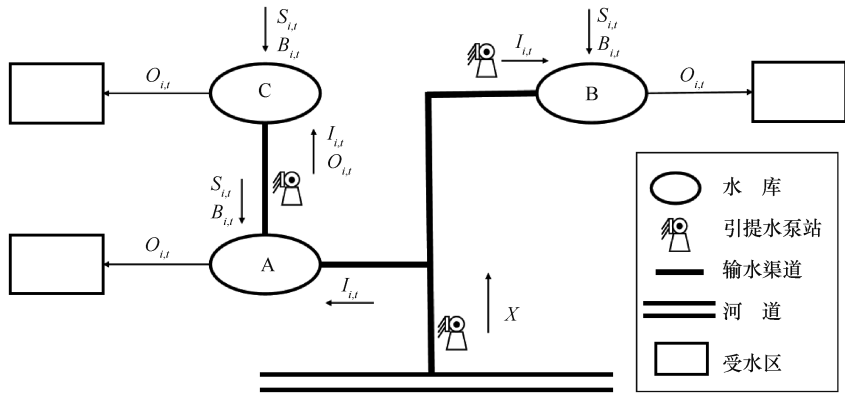
1.1 山丘区联合调配供水系统

在构建山丘区水资源多目标优化配置模型时, 考虑供水工程间的协同关系和供水网络的空间拓扑结构, 着重分析山丘区供水系统内部的联合调配关系, 以避免基于单体计算导致的供水量重复计算以及供-受水区空间匹配失衡。

以简易的联合调配供水系统为例, 展现联合调配过程 (见图 1): 泵站从河道提水至输水渠道, “并联” 的两个水库 (A、B) 通过泵站从输水渠道补水, A 水库也可通过泵站与输水渠道向与其 “串联” 的 C 水库输水, 最终向各个受水区联合供水。

1.2 目标函数

为了实现各方面均衡发展, 本次水资源多目标优化配置将从经济、社会、生态 3 个角度建立模型的目标函数。



X —河道可提水量的上限; $I_{i,t}$ —水库 i 在 t 时段内的提水量; $S_{i,t}$ —水库 i 在 t 时段内天然来水量; $B_{i,t}$ —水库 i 在 t 时段内补水量; $O_{i,t}$ —水库 i 在 t 时段内的输水量; $Q_{i,t}$ —水库 i 在 t 时段内的供水量

图 1 联合调配示意

Fig. 1 Schematic diagram of coordinated allocation

设有 m 个供水水源($m=1, 2, 3, \dots, M$) (包括水库塘坝、河道等), n 个受水区($n=1, 2, 3, \dots, N$), 用水性质划分为 k 个用水类型($k=1, 2, 3, \dots, K$)。

(1)经济效益目标。以供水带来的区域经济净效益总量最大作为经济效益目标, 目标函数如下

$$\max E = f_1(e, c, Q) = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K Q_{mnk,t} (e_{mnk,t} - c_{mnk,t}) \quad (1)$$

式中, E 为供水产生的经济净效益总量; $Q_{mnk,t}$ 为在 t 时段内第 m 个供水水源向第 n 个受水区的 k 用水类型的供水量; $e_{mnk,t}$ 为在 t 时段内第 m 个供水水源向第 n 个受水区的 k 用水类型供水产生的效益; $c_{mnk,t}$ 为在 t 时段内第 m 个供水水源向第 n 个受水区的 k 用水类型供水产生的成本。

(2)社会效益目标。以受水区各用水类型缺水率的平方和最小作为社会效益目标, 目标函数如下

$$\min P = f_2(D, Q) = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K [(D_{nk,t} - Q_{nk,t})/D_{nk,t}]^2 \quad (2)$$

式中, P 为受水区各用水类型缺水率平方和; $D_{nk,t}$ 为在 t 时段内第 n 个受水区的 k 用水类型的需水量; $Q_{nk,t}$ 在 t 时段内第 n 个受水区的 k 用水类型的供水量。

(3)生态效益目标。以化学需氧量(COD)排放量最小为生态效益目标, 目标函数为

$$\min W_{\text{COD}} = f_3(r, Q) = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K r_{nk} \sum_{m=1}^M Q_{mnk,t} \quad (3)$$

式中, W_{COD} 为供水产生的污水中 COD 的排放量; r_{nk} 为第 n 个受水区的 k 用水类型的 COD 排放系数。

1.3 约束条件

根据目标函数和受水区情况, 结合供水水源的相关参数, 约束条件如下

(1)水库节点的约束。约束条件如下

水量平衡约束

$$V_{m,t+1} = V_{m,t} + \Delta T_t (I_{m,t} - Q_{m,t} - W_{m,t}) \quad (4)$$

式中, $V_{m,t}$ 、 $V_{m,t+1}$ 分别为第 m 个水库在 t 时段内初、末期的水库蓄水量; $I_{m,t}$ 、 $Q_{m,t}$ 、 $W_{m,t}$ 分别表示水库 t 时段内的入库流量、下泄流量、损失流量; ΔT_t 为单个时间段。

水库水位约束

$$(Z_{m,t})_{\min} \leq Z_{m,t} \leq (Z_{m,t})_{\max} \quad (5)$$

式中, $(Z_{m,t})_{\max}$ 、 $(Z_{m,t})_{\min}$ 分别为水库在 t 时段内的上、下限水位。

下泄流量约束

$$(Q_{m,t})_{\min} \leq Q_{m,t} \leq (Q_{m,t})_{\max} \quad (6)$$

式中, $(Q_{m,t})_{\max}$ 、 $(Q_{m,t})_{\min}$ 分别为水库在 t 时段内的上、下限下泄流量。

水库调蓄能力约束

$$(V_{m,t})_{\min} \leq V_{m,t} \leq (V_{m,t})_{\max} \quad (7)$$

式中, $(V_{m,t})_{\max}$ 、 $(V_{m,t})_{\min}$ 分别为水库在 t 时段内的上、下限库容。

(2)河道节点的约束。约束条件如下

$$Q_{\text{in},t} - Q_{\text{div},t} \geq Q_{\text{eco}} \quad (8)$$

式中, $Q_{\text{in},t}$ 为河段上游在时间 t 的来水流量; $Q_{\text{div},t}$ 为时间 t 的取水流量; Q_{eco} 为最低生态流量。

(3)需水量约束。约束条件如下

$$\sum_{m=1}^M Q_{mnk,t} \leq D_{nk,t} \quad (9)$$

(4)供水量约束。约束条件如下

$$\sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K Q_{mnk,t} \leq W \quad (10)$$

式中, W 为供水水源的可供水量。

(5)非负约束, 所有水量均不为负数。

1.4 模型求解算法设计

1994 年, SRINIVAS 等^[41] 提出非支配排序遗传算法(NSGA), DEB 等^[42] 对 NSGA 算法进行改进, 提出 NSGA-II 算法。本文选择改进 NSGA-II 智能算法作为水资源多目标优化配置模型的求解方法, 改进策略包括以下三个方面。

(1)改进交叉过程。采用自适应交叉算子, 表达式如下

$$PC_t = \varepsilon - 2e^{-\frac{t}{T}} / (1 + e^{-\frac{t}{T}}) \times pc \quad (11)$$

式中, PC_t 为第 t 次迭代后的交叉概率; T 为最大迭代次数; pc 为初始设置的交叉概率; ε 为测试过程中表现最佳的参数(本文测试结果为 $\varepsilon = 1.5$ 效果最好)。

(2)改进变异过程。采用自适应变异算子, 表达式如下

$$PM_t = 2e^{-\frac{t}{T}} / (1 + e^{-\frac{t}{T}}) \times pm \quad (12)$$

式中, PM_t 为第 t 次迭代后的变异概率; pm 为初始设置的变异概率。

(3)改进同一非支配层排序过程。考虑邻域密度的拥挤距离计算表达式如下

$$d_{\rho_i} = (1 - k \times \rho_i / \rho_{\max}) \times d_i \quad (13)$$

式中, d_{ρ_i} 为个体 i 考虑邻域密度的拥挤距离; k 为调节系数, 调节范围在 0 到 1; ρ_i 为 i 的邻域密度; $\rho_{\max}$ 为所有个体中邻域密度的上限值; d_i 为 NSGA-II 算法中 i 的拥挤距离。

2 基于改进云模型方法的配置方案评价

2.1 综合评价指标体系

水资源多目标优化配置的最终目的是优选出综合最优方案。为此,需对各方案开展对比分析,这属于典型的多属性决策范畴。因此,构建一套科学合理的综合评价指标体系,并筛选出具有代表性的指标,是实现对配置方案有效评价的核心环节^[43]。

结合研究区域的发展现状,基于方案优选这一核心目标,并与目标函数相协调,选择经济效益、社会效益、生态效益作为3个子系统,下设9个具体的评价指标,最后形成核心目标-子系统-评价指标的框架结构。该框架不仅涵盖了优化模型中的核心目标,还根据实际管理需求和方案可操作性进行了扩展,旨在全面反映方案的可实施性和综合效益。评价指标体系如表1所列。

2.2 基于改进云模型的指标权重计算

2.2.1 云模型简介

云模型融合了模糊性和随机性双重特性,能够实现定性概念与定量数据之间的转换。若原始数据和相关内容具有随机性和模糊性,难以准确描述其特征,可以通过分析计算数据集合的3个特征值(期望 E_x ,熵 E_n ,超熵 H_e),达成其分布规律的刻画。云模型具备双重计算能力,既可实现指标权重的量化分析,又能完成指标等级的确定性评价。各类功能的实现手段为云发生器,一般包括正向、逆向和条件云发生器。根据样本值 x_i 与样本数 n ,可依次求期望 E_x 和样本方差 S^2 ,随后可求得熵 E_n 与超熵 H_e 。计算公式为

$$E_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \tag{14}$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n x_i \tag{15}$$

$$E_n = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sum_{i=1}^n |x_i - E_x|^2 \tag{16}$$

$$H_e = \sqrt{S^2 - E_n^2} \tag{17}$$

式中, E_x 为期望; x_i 为第*i*个云滴的数值; n 为样本总数(云滴数量); S^2 为样本方差; E_n 为熵; H_e 为超熵。

2.2.2 指标权重计算

采用主客观组合赋权法计算评价指标权重,其中客观权重通过熵权法计算,主观权重的计算采用基于层次分析法(AHP)改进的云模型方法。传统云模型的权重确定包括3步:通过专家问卷获取初始权重,使用逆向云发生器转化为特征值,再通过正向云发生器模拟计算得出均值作为最终权重。虽然直接采用专家意见作为初始权重的处理方法在决策过程中具有简便高效的优势,但会引入显著的主观性偏差^[43]。

为避免产生过大的主观差异,首先利用层次分析法计算专家初始权重得出新的权重,即通过专家问卷调查获取各子系统相对重要性的判断矩阵,利用特征向量法计算初始权重向量,并通过一致性检验确保专家判断逻辑合理;随后,对初始权重进行修正,最终生成综合权重,作为后续云模型计算的初始权重。借助逆云发生器计算出3个特征值,使用正云发生器补充生成云滴,基于最大隶属度原则求得权重^[35],并计算正态随机数与确定度,最后对生成的云滴进行归一化处理,即可得到主观权重。熵权法适用于数据充足的情况,通过规范化指标样本数据,计算每个指标的熵值和信息效用价值,进而确定各指标的客观权重。将计算的主客观权重组,组合权重^[44]的计算公式为

$$\omega_i = \omega_j \omega'_j / \sum_{i=1}^m \omega_j \omega'_j (i = 1, 2, \cdots, m) \tag{18}$$

式中, ω_i 为组合权重; ω_j 为客观权重; ω'_j 为主观权重。

表1 水资源多目标优化配置方案综合评价指标体系

Table 1 Comprehensive evaluation indicator system for multi-objective optimal allocation schemes of water resources

核心目标	子系统	评价指标	指标正逆
水资源多目标优化配置方案优选	经济效益 M ₁	供水净效益总量 C ₁ /亿元	正 向
		农业供水净效益 C ₂ /亿元	正 向
		工业供水净效益 C ₃ //亿元	正 向
		城镇公共供水净效益 C ₄ /亿元	正 向
	社会效益 M ₂	缺水率平方和 C ₅	逆 向
		人均配置水资源量 C ₆ /m ³	正 向
	生态效益 M ₃	COD 排放量 C ₇ /万 t	逆 向
		氨氮排放量 C ₈ /万 t	逆 向
		生态供水占比 C ₉ /%	正 向

2.3 指标等级计算

水资源多目标优化配置方案评价采用云模型 X 条件云发生器计算各指标等级隶属度的方式来实现^[45]: (1) 系统采集相关数据资料, 整理评价目标的具体指标参数, 并划分各指标的等级评价区间; (2) 计算各指标的 3 个特征值(E_x 、 E_n 、 H_e), 随后分别求出正向和逆向指标的隶属度, 对每个指标相应的隶属度进行归一化处理, 即求得各指标在不同等级下的隶属度; (3) 基于级别特征值法进行百分制量化, 输出整体评价结果。

2.4 改进云模型方法评价流程

基于改进云模型的山丘区水资源多目标优化配置方案评价流程如图 2 所示。

3 实例研究

3.1 研究区概况及数据情况

3.1.1 研究区概况

六合区位于长江下游南京市北岸, 是典型的山丘区地形, 水资源时空分布不均的特点显著。六合区现有河道 50 条, 河道总长 369.49 km, 包括长江水系的长江六合段、滁河六合段及其支流以及淮河水系的蔡

桥河, 共有 56 座中小型水库, 其中, 5 座中型水库, 26 座小(Ⅰ)型水库, 25 座小(Ⅱ)型水库。红山窑枢纽提水泵站从长江提水补充至干渠, 是六合区四座中型水库最重要的补水来源。在红山窑枢纽提水泵站的基础上, 4 座中型水库各建设了一座补库泵站从干渠中提水。此外, 六合区建设了单灌、单排、灌排 3 种小型泵站 800 余座。六合区水系结构图如图 3 所示。

3.1.2 数据来源及结果

基于六合区当前水利设施、水资源开发利用水平及其开发潜力, 开展未来可供水量的预测, 2025 年、2035 年可水量分别为 50 016.6 万 m^3 和 54 893.7 万 m^3 。以 2024 年作为现状水平年进行需水量预测, 2025 年、2035 年作为近期、远期规划水平年, 结合《南京市水资源公报》《南京市六合区水资源公报》《2024 年南京市用水定额汇编》等资料, 采用趋势预测法和定额法计算规划水平年的需水量, 不同水平年各用水部门的需水预测结果如表 2 所列。

3.2 模型求解结果

以六合区 2025 年与 2035 年的需水量预测数据、联合调配供水系统、模型参数等内容为基础, 依据改进 NSGA-II 算法对构建的六合区水资源多目标优化配

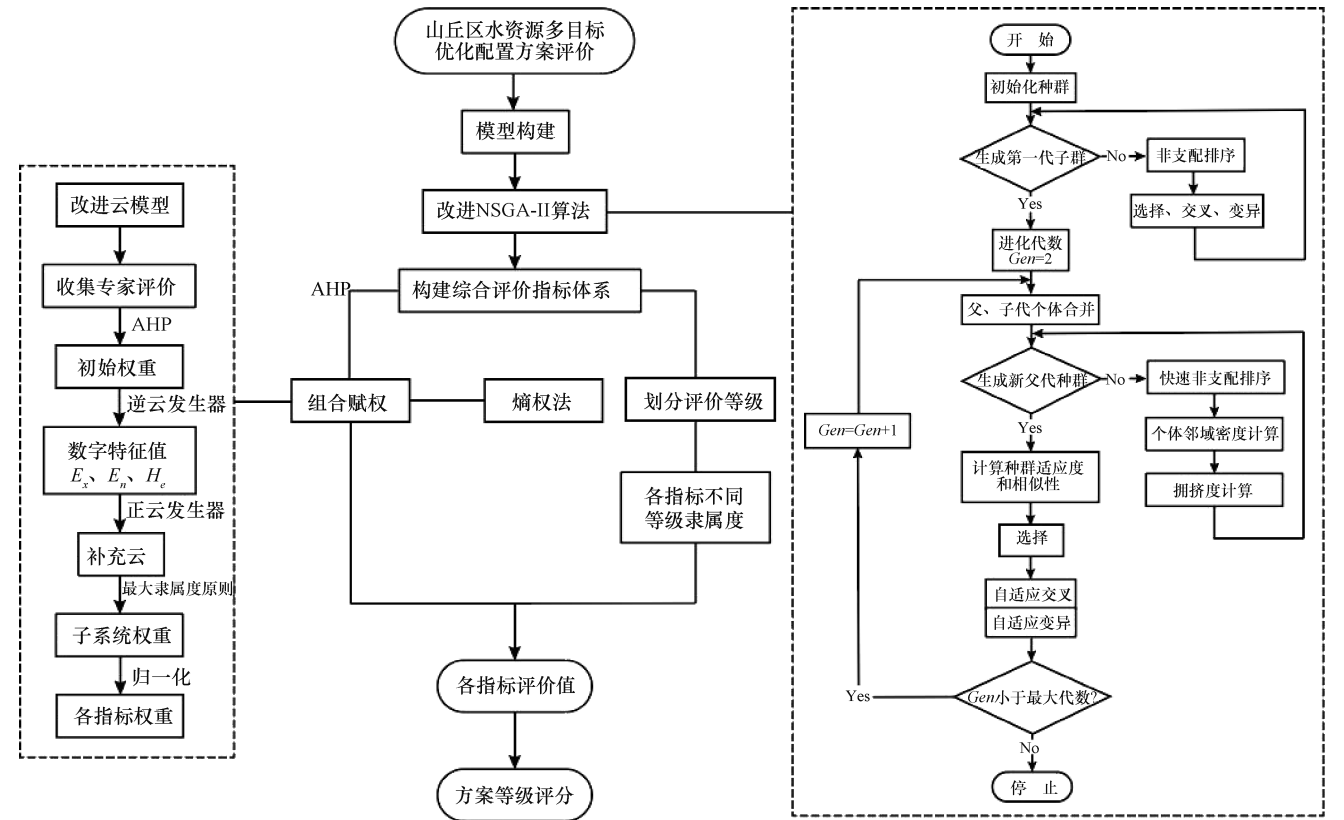


图 2 评价流程

Fig. 2 Evaluation flowchart



图3 六合区水系结构

Fig. 3 River system structure of Liuhe District

置模型进行求解，得到六合区 2025 年和 2035 年的 Pareto 解集，Pareto 最优解的分布情况如图 4、图 5 所示。

以经济效益、社会效益、生态效益及协调最优为筛选条件，方案 1—7 分别为：经济效益目标最优方案，社会效益目标最优方案，生态效益目标最优方案，经济与社会协调最优方案，经济与生态协调最优方案，社会与生态协调最优方案，经济、社会、生态协调最优方案。各方案结果如表 3 所列。

3.3 配置方案评价

3.3.1 评价指标等级划分

将水资源多目标优化配置方案分为 4 个等级：优秀（Ⅰ）、良好（Ⅱ）、合格（Ⅲ）和不合格（Ⅳ），按等级四分法确定评价指标体系中各指标的具体等级标准及其对应范围，2025 年和 2035 年评价指标体系中各指标的等级标准和等级范围如表 4 所列。

3.3.2 指标权重计算

（1）主观权重计算。采用改进云模型方法计算的权重分布如图 6—9 所示。由图可知，3 个子系统和

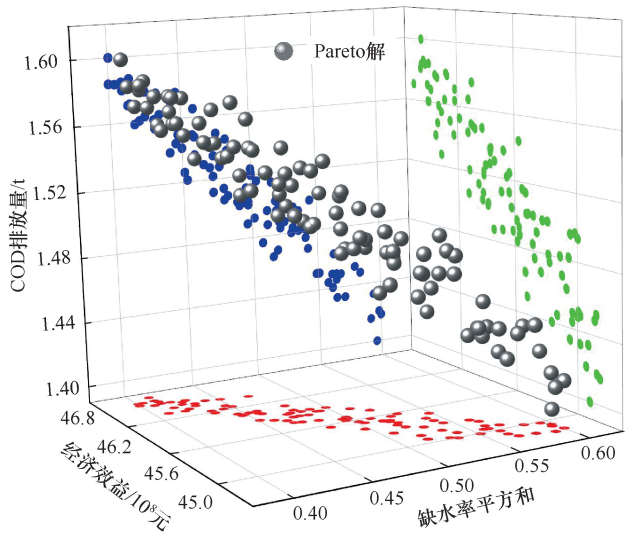


图4 2025 年 Pareto 解分布情况

Fig. 4 Pareto solution distribution in 2025

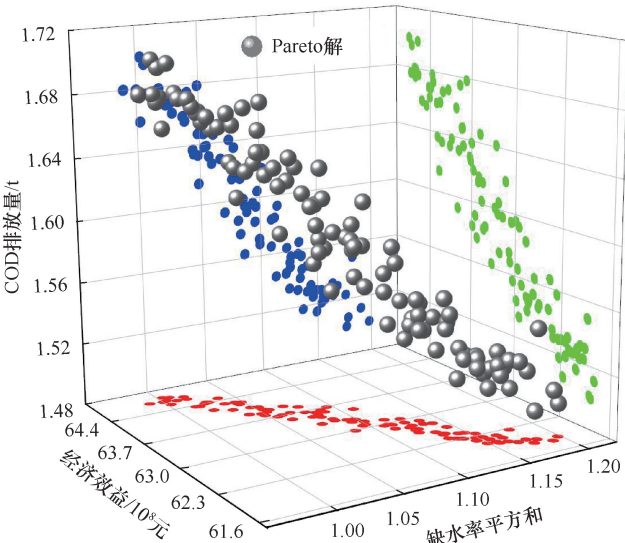


图5 2035 年 Pareto 解分布情况

Fig. 5 Pareto solution distribution in 2035

9 个评价指标的模拟隶属度均呈正态分布。通过求均值的方法可得经济效益子系统、社会效益子系统和生态效益子系统的权重分别为 0.431 0、0.290 8 和 0.278 2，同时可得 9 个评价指标在各子系统下的指标权重。最后将这 9 个权重按照子系统权重进行分配，得到整体下的主观权重，如表 5 所列。

表2 2025 年和 2035 年六合区需水预测结果

万 m³

Table 2 Water demand prediction results for Liuhe District in 2025 and 2035

10⁴ m³

年 份	生活需水	农业需水	工业需水	公共需水	生态需水	合 计
2025	3 401.8	46 024.0	1 034.9	1 817.4	1 970.2	54 248.3
2035	3 830.2	51 647.7	1 078.7	1 919.7	1 797.6	60 273.8

表 3 不同方案情况下水资源多目标优化配置结果

万 m³

Table 3 Multi-objective optimal allocation results of water resources under different schemes									10 ⁴ m ³
年 份	项 目	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6	方案 7	
2025	生 活	3 401.8	3 401.8	3 186.9	3 401.8	3 278.7	3 221.7	3 278.7	
	农 业	40 358.8	39 438.3	38 547.3	40 191.2	38 744.2	38 517.8	39 100.6	
	工 业	887.1	866.4	866.6	894.3	851.0	845.8	894.3	
	公 共	1 626.0	1 716.9	1 599.8	1 638.1	1 656.4	1 629.3	1 604.0	
	生 态	1 767.3	1 865.8	1 798.7	1 780.2	1 898.8	1 970.2	1 897.4	
	合 计	48 041.0	47 289.2	45 999.3	47 905.6	46 429.1	46 184.8	46 775.0	
2035	生 活	3 830.2	3 830.2	3 527.4	3 830.2	3 615.7	3 629.0	3 577.4	
	农 业	42 790.0	41 757.0	40 608.8	42 079.0	40 977.6	40 724.1	41 376.4	
	工 业	871.2	849.6	846.5	884.1	833.5	828.0	878.7	
	公 共	1 620.1	1 716.0	1 620.2	1 652.0	1 651.8	1 622.8	1 596.5	
	生 态	1 522.7	1 612.5	1 555.3	1 552.4	1 642.6	1 797.6	1 641.3	
	合 计	50 634.2	49 765.3	48 158.2	49 997.7	48 721.2	48 601.5	49 070.3	

表 4 2025 年、2035 年水资源多目标优化配置方案评价指标等级划分标准

Table 4 Classification criteria for evaluation indicators of multi-objective optimal allocation schemes of water resources in 2025 and 2035

子系统	指 标	评价等级							
		I		II		III		IV	
		2025 年	2035 年	2025 年	2035 年	2025 年	2035 年	2025 年	2035 年
M ₁	C ₁	46.7~47.6	64.8~66.2	45.8~46.7	63.4~64.8	44.8~45.8	61.8~63.4	43.8~44.8	60.2~61.8
	C ₂	29.1~29.9	44.9~46.4	28.3~29.1	43.4~44.9	27.7~28.3	42.6~43.4	27.1~27.7	41.8~42.6
	C ₃	1.6~1.7	1.7~1.8	1.5~1.6	1.6~1.7	1.4~1.5	1.5~1.6	1.3~1.4	1.4~1.5
	C ₄	4.4~4.6	4.7~4.8	4.2~4.4	4.6~4.7	4.1~4.2	4.5~4.6	4.0~4.1	4.4~4.5
M ₂	C ₅	0.3~0.4	0.9~1.0	0.4~0.5	1.0~1.1	0.5~0.6	1.1~1.2	0.6~0.7	1.2~1.3
	C ₆	664.2~679.3	646.3~663.6	649.1~664.2	629.0~646.3	636.0~649.1	614.7~629.0	622.9~636.0	600.4~614.7
M ₃	C ₇	1.3~1.4	1.4~1.5	1.4~1.5	1.5~1.6	1.5~1.6	1.6~1.7	1.6~1.7	1.7~1.8
	C ₈	1.6~1.7	1.6~1.7	1.7~1.8	1.7~1.8	1.8~1.9	1.8~1.9	1.9~2.0	1.9~2.0
	C ₉	4.3~4.6	3.7~4.1	4.0~4.3	3.3~3.7	3.7~4.0	3.0~3.3	3.4~3.7	3.0~2.7

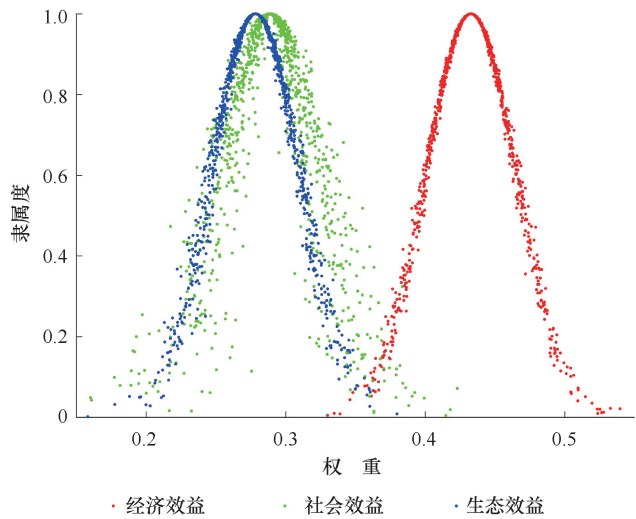


图 6 各子系统权重分布

Fig. 6 Weight distribution of subsystems

(2)组合权重。客观权重采用熵权法求得，基于主观权重和客观权重的结果，权重计算结果如表 5 所列。

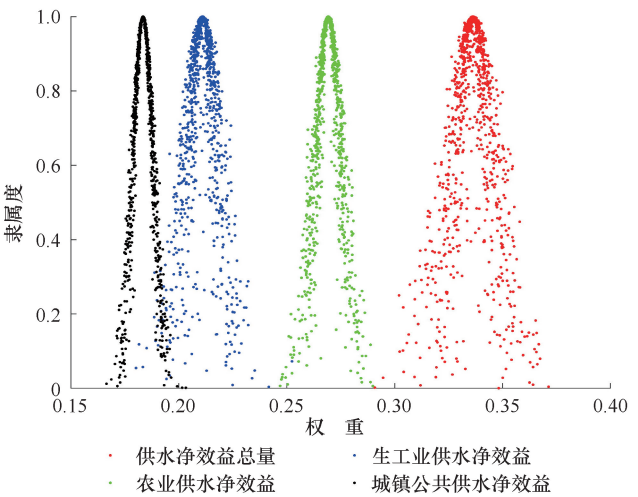


图 7 经济效益子系统下各指标权重

Fig. 7 Indicator weights under economic benefit subsystem

3.3.3 指标等级计算

依据云模型评价方法和级别特征值法得到 2025 年和 2035 年 7 个水资源多目标优化配置方案的等级评分，从而选出最佳方案，计算结果如表 6 所列。

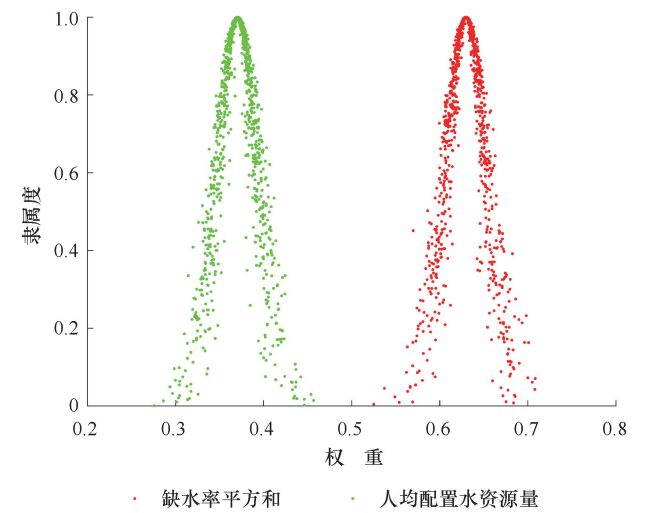


图 8 社会效益子系统下各指标权重

Fig. 8 Indicator weights under social benefit subsystem

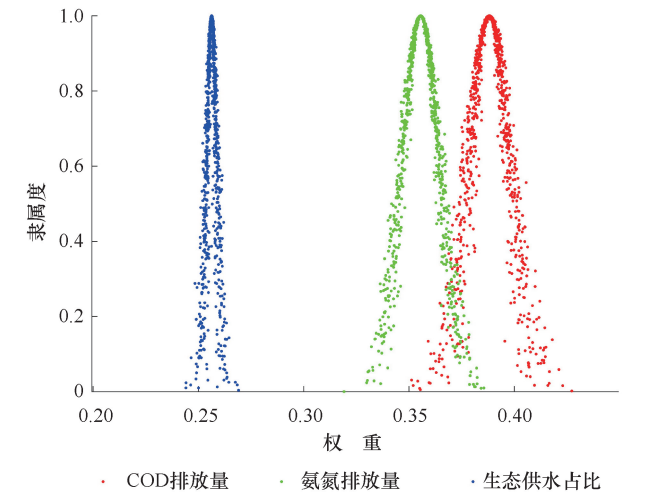


图 9 生态效益子系统下各指标权重

Fig. 9 Indicator weights under ecological benefit subsystem

表 5 子系统与评价指标权重计算结果

Table 5 Calculation results of subsystems and evaluation indicator weights					
indicator weights					
指 标	主观权重	2025 年 客观权重	2035 年 客观权重	2025 年 组合权重	2035 年 组合权重
C ₁	0.144 9	0.116 2	0.114 7	0.148 1	0.145 8
C ₂	0.116 0	0.108 9	0.100 1	0.111 1	0.101 9
C ₃	0.090 9	0.099 1	0.107 2	0.079 2	0.085 5
C ₄	0.079 2	0.129 5	0.112 3	0.090 2	0.078 0
C ₅	0.182 9	0.134 6	0.140 9	0.216 6	0.226 1
C ₆	0.107 8	0.160 2	0.152 6	0.152 0	0.144 4
C ₇	0.107 9	0.078 4	0.088 4	0.074 4	0.083 6
C ₈	0.099 0	0.081 4	0.081 6	0.070 9	0.070 9
C ₉	0.071 3	0.091 7	0.102 2	0.057 5	0.063 9

表 6 2025 年和 2035 年水资源多目标优化配置方案云模型等级评分

Table 6 Cloud model rating scores of multi-objective optimal allocation schemes of water resources in 2025 and 2035							
年 份	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6	方案 7
2025	85.02	87.94	71.59	89.87	78.88	77.22	81.15
2035	89.74	87.55	73.96	90.95	83.03	81.81	84.42

由表 6 可知, 2025 年和 2035 年评分最高的均为方案 4, 是各自年份的综合最优方案, 即经济与社会协调最优方案。2025 年与 2035 年方案 4 各指标在对应评价等级下的隶属度如表 7 所列。

基于最大隶属度原则, 由表 7 可知, 2025 年方案四的 3 个子系统的评价等级分别为良好、良好、合格。对此评价结果进行具体分析如下。

(1) 在经济效益子系统下, 供水净效益总量

表 7 2025 年与 2035 年方案四各子系统及评价指标对应评价等级隶属度

Table 7 Membership degrees of evaluation grades for subsystems and evaluation indicators of scheme 4 in 2025 and 2035										
子系统 与指标	2025 年 指标值	2035 年 指标值	2025 年隶属度				2035 年隶属度			
			I	II	III	IV	I	II	III	IV
M ₁			0.008 1	0.781 9	0.203 8	0.000 2	0.005 4	0.993 2	0.001 4	0
C ₁	45.92 亿元	64.67 亿元	0.021 9	0.978 1	0	0	0	1	0	0
C ₂	28.94 亿元	44.18 亿元	0.001 3	0.998 7	0	0	0	1	0	0
C ₃	1.55 亿元	1.67 亿元	0.001 3	0.996 2	0.002 5	0	0.024 8	0.974 4	0.000 8	0
C ₄	4.11 亿元	4.64 亿元	0	0.033 0	0.966 0	0.001 0	0.001 4	0.992 3	0.006 3	0
M ₂			0.004 7	0.634 8	0.360 4	0.000 1	0.590 8	0.409 2	0	0
C ₅	0.50	0.99	0.000 2	0.386 3	0.613 3	0.000 2	0.968 0	0.031 9	0	0
C ₆	662.32 m ³	638.21 m ³	0.011 2	0.988 8	0	0	0	1	0	0
M ₃			0	0.003 6	0.760 2	0.236 2	0.063 7	0.294 7	0.641 4	0
C ₇	1.52 万 t	1.68 万 t	0	0.009 6	0.989 4	0.001 0	0.000 1	0.088 6	0.910 8	0.000 5
C ₈	1.89 万 t	1.71 万 t	0	0.000 3	0.502 7	0.497 0	0.196 1	0.803 3	0.000 6	0
C ₉	3.72%	3.10%	0	0	0.788 2	0.211 8	0	0	0.999 8	0.000 2

(C_1)、农业供水净效益(C_2)、工业供水净效益(C_3)三个指标评价等级均为良好,说明该方案在整体、农业、工业上的效益令人满意,整体水资源配置效率较高,这主要得益于节水灌溉技术的应用以及工业用水循环利用率提升;城镇公共供水总效益(C_4)指标为合格,说明当前供水更倾向于农业和工业供水以支撑当地经济的发展。

(2)在社会效益子系统下,缺水率平方和(C_5)指标为合格,但其余方案中仅方案二该指标评价优于它,这是由于云模型评价等级边界值的计算差异导致;人均供水量(C_6)指标为良好,说明该方案优化了水资源调度并增加了供水能力,使其供水量充足。

(3)在生态效益子系统下,COD 排放量(C_7)、氨氮排放量(C_8)、生态供水占比(C_9)3个指标为合格。这是由于较大的供水量导致工业和生活污水排放量相应增加,尽管单位水体的污染物浓度可能下降,但总量仍较高。而生态供水占比虽评价等级不高,但也远高于现状年的生态用水占比,且距离理想生态需水量仍有差距。

至于 2035 年方案 4,3 个子系统的评价等级分别为良好、优秀、合格,具体的分析如下:

(1)在经济效益子系统下,供水净效益总量(C_1)、农业供水净效益(C_2)、工业供水净效益(C_3)、城镇公共供水总效益(C_4)四个指标评价等级均为良好,说明该方案通过优化水资源配置模式,实现了整体经济效益的提升,同时也注重各用水类型的供水分配。城镇公共供水总效益(C_4)优于 2025 年水平,表明方案在保障民生需求的同时提升了经济效益,这主要得益于阶梯水价政策促使居民节水意识增强以及城镇管网漏损率显著降低。

(2)在社会效益子系统下,缺水率平方和(C_5)指标为优秀,说明该方案注重了各受水区和各用水类型的公平性;人均供水量(C_6)指标为良好,但低于 2025 年,这是由于供水量的增长速度小于人口增长速度。

(3)在生态效益子系统下,COD 排放量(C_7)指标为合格,氨氮排放量(C_8)指标为良好,优于 2025 年水平,这说明供水向绿色行业、低污染行业倾斜,且各行业单位用水的污染物排放在减少;生态供水占比(C_9)指标为合格,劣于 2025 年水平,这主要是因为供水总量增加的情况下,生态补水增速低于经济用水增速以及生态流量标准要求的提高。

4 结果讨论

在相同算例条件下,改进的 NSGA-II 算法在多个

方面表现出显著优势。其收敛精度相较于传统 NSGA-II 更高,能更快速地逼近 Pareto 最优前沿,且解集分布更均匀,结构更完整,Pareto 解呈现出更清晰的梯度性和连续性,体现出更强的收敛性能与全局搜索能力。同时,算法的稳定性也明显提升,在多次运行中均能获得较一致的解集,表明其鲁棒性较好。

此外,改进算法在运行时间方面明显优于标准 NSGA-II,大幅缩短了计算过程所需时间,在保持优化质量的前提下提高了运算效率。这使得该算法特别适用于对时间敏感、求解精度要求高的多目标优化问题。但是,该算法在参数设置方面可能相对较为敏感(如交叉概率、变异概率等),不恰当的参数设定可能影响其全局搜索性能。此外,在高维目标函数或大规模问题中,仍可能存在计算复杂度上升较快的问题,需要进一步的结构优化或并行化设计加以应对。

基于 AHP 改进的云模型与熵权法构成的主客观组合赋权方法,兼顾了专家经验判断与客观数据驱动的优势,避免了单一赋权方式的片面性。它既保留了专家知识的灵活性,也引入了客观数据的稳定性,使最终结果更加科学、可信,在多指标综合评价中展现出良好的科学性与适应性。传统云模型依赖于专家打分的原始权重,可能引入较大主观性偏差。而引入 AHP 改进后的流程通过构造判断矩阵、计算特征向量、进行一致性检验等步骤,提升了权重的逻辑一致性和可信度。再结合云模型的模糊性和随机性处理能力,能够有效缓解专家意见的离散性影响。该方法适用于数据充足但需融合专家判断的复杂系统评价。然而,其也存在一定局限性。虽然采用了判断矩阵与一致性检验,但本质上 AHP 依然建立在主观判断的基础上,其权重结果仍易受到专家选取范围与经验水平的影响。且主客观赋权方法逻辑链条较长,需要良好的数据质量与严格的专家调查流程,若某一环节处理不当,可能导致整体权重失真。因此,在实际应用中需结合问题特点与数据特性,合理设计参数与流程,以最大限度发挥该组合赋权方法的综合优势。

未来,随着人工智能与计算机科学的不断发展,在水资源调度领域引入基于强化学习的参数自适应调节机制,将成为多目标优化算法演化的重要趋势。鉴于水资源调度过程中常面临流量时变、目标函数不稳定等复杂情况,结合强化学习或预测模型对 NSGA-II 算法参数进行实时动态调整,不仅能够增强算法对水文突变等不确定情形的响应能力,还能显著提升其在复杂工况下水资源配置方案的优化效率与调度结果的稳定性。同时,随着遥感、物联网等技术的快速发

展,水资源与能源系统管理中不断涌现出大量非结构化数据,未来可进一步探索将云模型与深度神经网络、图神经网络以及自然语言处理(NLP)等人工智能技术融合,构建基于历史案例与专家文本的自动赋权系统,从而在提升决策效率与模型适应性的同时,显著降低人工作业负担,增强权重结果的解释性与智能化水平。

5 结 论

提出基于改进云模型的山丘区水资源多目标优化配置方案评价方法,并将模型与算法应用于南京市六合区得出以下结论。

(1)针对山丘区水资源现状,结合山丘区的供水特点以及工程间的联合调配模式,提出山丘区水资源多目标优化配置模型。在模型的求解算法方面,从三个角度对传统的 NSGA-II 算法进行改进,求解出的解集真实合理。

(2)构建水资源多目标优化配置方案综合评价指标体系,结合改进云模型方法对 2025 年、2035 年的 7 个初选方案进行综合评价,优选出最佳方案均为方案四,得分分别为 89.87 分、90.95 分。

(3)基于改进云模型的山丘区水资源多目标优化配置方案评价,可以优选水资源多目标优化配置方案,为山丘区水资源优化配置提供理论参考和决策支持,具有重要的现实意义和实用价值。

参考文献 (References) :

[1] 王佳月,辛良杰,戴尔阜.中国典型山区农业水土资源匹配格局变化:以太行山区、横断山区、黔桂喀斯特山区为例[J].地理研究,2020,39(8):1879-1891.
WANG J Y, XIN L J, DAI E F. Spatio-temporal variations of the matching patterns of agricultural land and water resources in typical mountainous areas of China[J]. Geographical Research, 2020, 39(8): 1879-1891.

[2] 王华,周国华,赵万民,等.“山—水—城”空间格局的分析框架与研究展望[J].地理学报,2024,79(6):1478-1502.
WANG H, ZHOU G H, ZHAO W M, et al. The analysis framework and research prospect of “mountain-water-city” spatial pattern[J]. Acta Geographica Sinica, 2024, 79(6): 1478-1502.

[3] 王利,贺华翔,游进军,等.基于水资源配置模型的供水安全韧性评价:以北京市为例[J].水利水电技术(中英文),2024,55(11):62-75.
WANG L, HE H X, YOU J J, et al. Evaluation of water supply safety resilience under the perspective of water supply risk: A case study of Beijing[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(11): 62-75.

[4] 向扬,李治军.基于改进 TOPSIS 模型的山西省水资源承载力与

协调发展分析[J].水利水电技术(中英文),2024,55(4):48-58.

XIANG Y, LI Z J. Evaluation and coordinated development of water resources carrying capacity in Shanxi Province based on the improved TOPSIS model[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(4): 48-58.

[5] 李牧翰,赵喜萍,张志卓,等.面向高质量发展的缺水地区水资源优化配置模型及应用[J].人民黄河,2024,46(2):73-79.
LI M H, ZHAO X P, ZHANG Z Z, et al. Model and application of optimal allocation of water resources in water-deficient areas for high-quality development[J]. Yellow River, 2024, 46(2): 73-79.

[6] 孙才志,郑靖伟.基于 MRIO 与 SNA 的中国水资源空间转移网络分析[J].水资源保护,2020,36(1):9-17.
SUN C Z, ZHENG J W. Analysis of China's water resources spatial transfer network based on MRIO and SNA[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1): 9-17.

[7] CHRISTENSEN G S, SOLIMAN S A. Long-term optimal operation of a parallel multireservoir power system[J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 1986, 50(3): 383-395.

[8] MAASS A, HUFSCHEMIDT M M, DORFMAN R, et al. Design of Water-Resource Systems; New Techniques for Relating Economic Objectives, Engineering Analysis, and Governmental PlanningHarvard University Press, 1962.

[9] OLIVEIRA R, LOUCKS D P. Operating rules for multireservoir systems[J]. Water Resources Research, 1997, 33(4): 839-852.

[10] MOHAMMED M, BIRHANU B, ABEGAZ F. Multi-objective optimization of water resources allocation in rift valley lakes basin (Ethiopia): Tradeoffs between efficiency and equity[J]. Discover Water, 2025, 5(1): 8.

[11] DENG L L, GUO S L, YIN J B, et al. Multi-objective optimization of water resources allocation in Han River basin (China) integrating efficiency, equity and sustainability[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 798.

[12] DONG Z, ZHANG J, ZHANG K, et al. Multi-objective optimal water resources allocation in the middle and upper reaches of the Huaihe River Basin (China) based on equilibrium theory[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 6606.

[13] 何灏川,宋松柏,王小军,等.基于改进灰狼算法的庆阳市水资源优化配置[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2020,48(12):136-146.
HE H C, SONG S B, WANG X J, et al. An improved GWO for optimal allocation of water resources in Qingyang[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2020, 48(12): 136-146.

[14] 杜佰林,张建丰,高泽海,等.基于模拟退火粒子群算法的水资源优化配置[J].排灌机械工程学报,2021,39(3):292-299.
DU B L, ZHANG J F, GAO Z H, et al. Optimal allocation of water resources based on simulated annealing particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(3): 292-299.

[15] 陶洁,王沛霖,王辉,等.基于 A-NSGA-III 的引江济淮工程河南段水资源优化配置研究[J].水利水电科技进展,2023,43(6):

- 111-119.
- TAO J, WANG P L, WANG H, et al. Research on water resources optimal allocation in Henan Section of Yangtze River to Huaihe River Water Diversion Project based on A-NSGA-III algorithm [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2023, 43(6): 111-119.
- [16] 方国华, 王雪, 方应学, 等. 基于改进粒子群优化算法的区域水量水质联合配置模型[J]. *水资源保护*, 2022, 38(3): 58-64.
- FANG G H, WANG X, FANG Y X, et al. Regional water quantity and water quality joint allocation model based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(3): 58-64.
- [17] CHANDRAMOULI V, RAMAN H. Multireservoir Modeling with Dynamic Programming and Neural Networks [J]. *Journal of Water Resources Planning & Management*, 2001, 127(2): 89-98.
- [18] MCKINNEY D C, CAI X M. Linking GIS and water resources management models: An object-oriented method [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2002, 17(5): 413-425.
- [19] SIDIROPOULOS E, FOTAKIS D. Spatial water resource allocation using a multi-objective ant colony optimization [J]. *European Water*, 2016, 55: 41-51.
- [20] RADMEHR A, BOZORG-HADDAD O, LOÁICIGA H A. Integrated strategic planning and multi-criteria decision-making framework with its application to agricultural water management [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12: 8406.
- [21] 单宝英, 郭萍, 张帆, 等. 基于遗传算法与方案优选的多目标优化模型求解方法[J]. *中国农业大学学报*, 2019, 24(6): 157-165.
- SHAN B Y, GUO P, ZHANG F, et al. A multi-objective optimization model solving method based on genetic algorithm and scheme evaluation [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(6): 157-165.
- [22] 赵钦, 白清俊, 聂坤堃, 等. 基于NSGA-III算法与TOPSIS决策下的区域水资源多目标优化配置[J]. *排灌机械工程学报*, 2022, 40(12): 1233-1240.
- ZHAO Q, BAI Q J, NIE K K, et al. Multi-objective optimization allocation of regional water resources based on NSGA-III algorithm and TOPSIS decision [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2022, 40(12): 1233-1240.
- [23] 何英, 唐晓宇, 彭亮, 等. 南疆丰收灌区水资源多目标优化配置方案优选[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(6): 117-126.
- HE Y, TANG X Y, PENG L, et al. Optimized selection of the solution for multi-objective optimal allocation of water resources in Fengshou Irrigation Areas of South Xinjiang [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(6): 117-126.
- [24] LIM F H, LEE W K, ISHAK A M, et al. Multi-criteria evaluation for long-term water resources augmentation planning with consideration of global change [J]. *Environmental Advances*, 2023, 12: 100375.
- [25] 王庆杰, 岳春芳, 李艺珍. 基于权重融合的灰色关联分析水资源配置方案评价研究[J]. *中国农村水利水电*, 2019(4): 31-34.
- WANG Q J, YUE C F, LI Y Z. The evaluation of water resources allocation schemes based on weight-fusion grey relational analysis method [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2019(4): 31-34.
- [26] 吴泽宁, 郭溪, 郇晓雨. 区域农业水资源配置效果评价指标及其能值量化方法[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(8): 13-19.
- WU Z N, GUO X, HUAN X Y. Index and energy quantification method for evaluating the effect of regional agricultural water resource allocation [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(8): 13-19.
- [27] 龚艳冰, 巢妍. 基于模糊组合赋权的水资源配置方案综合评价方法[J]. *统计与决策*, 2021, 37(13): 179-183.
- GONG Y B, CHAO Y. Comprehensive evaluation method for water resource allocation schemes based on fuzzy combination weighting [J]. *Statistics and Decision*, 2021, 37(13): 179-183.
- [28] YUE C F, WANG Q J, LI Y Z. Evaluating water resources allocation in arid areas of northwest China using a projection pursuit dynamic cluster model [J]. *Water Supply*, 2019, 19(3): 762-770.
- [29] 李东林, 左其亭, 马军霞. 基于不确定性双层规划的水资源配置及和谐评价[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(3): 350-360.
- LI D L, ZUO Q T, MA J X. Water resources allocation and harmony evaluation-case of uncertain bi-level planning [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2020, 56(3): 350-360.
- [30] 卢兴旺, 于志民, 田杰. 基于模糊BP神经网络的水资源合理配置综合评价研究[J]. *中国农村水利水电*, 2009(4): 4-6.
- LU X W, YU Z M, TIAN J. Research on comprehensive evaluation of rational water resource allocation based on fuzzy BP neural network [J]. *China Rural Water Conservancy and Hydropower*, 2009(4): 4-6.
- [31] ZHAO B, SHAO Y B, YANG C, et al. The application of the game theory combination weighting-normal cloud model to the quality evaluation of surrounding rocks [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2024, 12: 1346536.
- [32] 龚禹璐, 崔龙飞, 陈静, 等. 基于模糊C聚类-云模型-LSTM网络的分接开关气象易损性评估预警[J]. *现代电力*, 2025, 42(2): 385-392.
- GONG Y L, CUI L F, CHEN J, et al. Meteorological vulnerability assessment and warning of on-load tap changer based on fuzzy-C means-cloud model-LSTM network [J]. *Modern Electric Power*, 2025, 42(2): 385-392.
- [33] 陈泳江, 汪魁, 赵明阶, 等. 基于云模型-模糊FMECA法的水库大坝安全性分析[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2024, 43(4): 30-36.
- CHEN Y J, WANG K, ZHAO M J, et al. Safety analysis of reservoir dams based on cloud model-fuzzy FMECA method [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2024, 43(4): 30-36.
- [34] 朱倩, 周红宇, 张敏祥. 基于改进熵权-云模型的果园运输车适应性评价研究[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(36): 15420-15426.
- ZHU Q, ZHOU H Y, ZHANG M X. Adaptability evaluation of orchard transporter based on improved entropy weight cloud model [J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(36): 15420-15426.

[35] 黄显峰,刘展志,方国华. 基于云模型的水利现代化评价方法与应用[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(6): 54-61.
HUANG X F, LIU Z Z, FANG G H. Evaluation and application of water conservancy modernization index system based on a cloud model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(6): 54-61.

[36] XIE X, ZHANG J Y, LIAN Y Q, et al. Cloud model combined with multiple weighting methods to evaluate hydrological alteration and its contributing factors[J]. Journal of Hydrology, 2022, 610: 127794.

[37] 李宛谕,黄显峰,阎玮,等. 基于组合权重云模型的调水工程洪水资源利用风险评价[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(5): 57-65.
LI W Y, HUANG X F, YAN W, et al. Risk assessment of flood resources utilization in water transfer project based on combined weight and cloud model [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5): 57-65.

[38] 杨子桐,黄显峰,方国华,等. 基于改进云模型的南水北调东线工程效益评价[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(4): 60-66.
YANG Z T, HUANG X F, FANG G H, et al. Benefit evaluation of Eastern Route of South-to-North Water Transfer Project based on improved cloud model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(4): 60-66.

[39] 周兰庭,袁志美,徐长华,等. 基于改进云模型的水利工程项目成本风险管理研究[J]. 水电能源科学, 2019, 37(4): 152-154.
ZHOU L T, YUAN Z M, XU C H, et al. Research on cost risk management of water conservancy project based on modified cloud model[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(4): 152-154.

[40] 张海晨,曹骏,李嘉明,等. 基于改进云模型的湿陷性地基渡槽稳定状态评估[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(1): 144-156.
ZHANG H C, CAO J, LI J M, et al. Aqueduct stability state assessment based on AHP-entropy weight improved cloud model[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(1): 144-156.

[41] SRINIVAS N, DEB K. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms[J]. Evolutionary Computation, 1994, 2(3): 221-248.

[42] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.

[43] 黄显峰,周引航,张启凡,等. 基于云模型的水光互补清洁能源基地容量配置方案优选[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(1): 44-51.
HUANG X F, ZHOU Y H, ZHANG Q F, et al. Capacity allocation scheme optimization based on cloud model for a hydro-photovoltaic complementary clean energy base [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(1): 44-51.

[44] 沈时,王栋,王远坤,等. 水资源承载力综合评价的组合权重-MNCM法[J]. 南京大学学报(自然科学), 2021, 57(5): 887-895.
SHEN S, WANG D, WANG Y K, et al. Combined weight-MNCM evaluation method for water resources carrying capacity[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2021, 57(5): 887-895.

[45] 杨子桐,黄显峰,方国华,等. 基于云模型的堤防工程风险评价方法与应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2019, 52(7): 572-580.
YANG Z T, HUANG X F, FANG G H, et al. Risk assessment method and application of embankment engineering based on cloud model[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2019, 52(7): 572-580.

(责任编辑 王 璐)