

# 多目标规划模型在水资源配置中的应用研究

廖云良<sup>1</sup> 汤辉<sup>1</sup> 李现飞<sup>2</sup>

1 云南省曲靖市罗平县水务局, 云南曲靖, 655800;

2 云南阡源工程设计有限公司, 云南昆明, 650041;

**摘要:** 本文探讨了多目标规划模型在水资源配置中的应用, 该模型通过寻求最优解集, 统筹经济、社会与生态目标, 有效解决了传统单一目标方法的局限性。文章系统分析了多目标模糊优选动态规划求解算法。结合区域配置、灌区优化等应用场景, 以阿岗水库至龙王庙水库引调水工程为例, 验证了模型能科学生成水量分配方案。研究表明, 多目标规划是应对复杂水资源管理挑战的有效工具。

**关键词:** 水资源配置; 多目标规划; 模糊识别; 相对优属度

**DOI:** 10.69979/3060-8767.26.05.022

## 引言

水资源作为基础性自然资源和战略性经济资源, 其合理配置直接关系到国家粮食安全、生态安全与经济社会可持续发展。随着人口增长、经济发展和气候变化影响加剧, 水资源供需矛盾日益突出, 如何在不同用水部门(如农业、工业、生活和生态)以及不同区域间实现水资源的科学分配, 成为全球性的重大课题。传统的水资源配置方法多侧重于单一目标(如经济效益最大化), 难以应对复杂水资源系统中多维度、相互冲突的目标需求。在此背景下, 多目标规划模型应运而生, 并逐渐成为解决水资源配置中多目标协同平衡问题的有效工具。

多目标规划模型能够同时考量经济效益、社会公平、生态保护等多重目标, 通过数学方法寻求最优解集, 为决策者提供多种可行的配置方案<sup>[1]</sup>。本文系统探讨多目标规划模型在水资源配置中的应用, 首先介绍多目标规划模型的理论基础与主要类型, 然后分析其在不同场景下的实践应用, 最后列出工程应用实例, 为水资源管理领域的理论研究和实践创新提供参考。

## 1 多目标规划模型的理论基础

多目标规划是数学规划领域的重要分支, 专门研究

在多个相互冲突的目标下寻求最优决策的问题。与单目标优化不同, 多目标规划不存在唯一的最优解, 而是通过寻找最优解集, 为决策者提供多种可行的权衡方案<sup>[2]</sup>。在水资源配置领域, 多目标规划模型通常包含三类核心目标: 经济效益目标(如供水效益最大化、成本最小化)、社会效益目标(如缺水率最小化、供水公平性最大化)和生态效益目标(如生态需水满足率最大化、污染物排放最小化)。

### 1.1 主要模型类型

根据处理不确定性的方式不同, 多目标规划模型可分为确定性模型和不确定性模型两大类。确定性多目标规划模型假设模型参数已知且固定, 适用于系统相对稳定、数据可靠度高的场景。例如, 某大型灌区通过构建线性多目标规划模型, 以农业灌溉效率最大化、工业用水保障率最大化和生态环境保护最大化为目标, 实现了水资源的高效配置<sup>[3]</sup>。然而, 实际水资源系统受气候、经济和社会等多重因素影响, 充满不确定性。为此, 学者们开发了多种不确定性多目标规划模型, 如模糊多目标规划、区间多目标规划以及随机规划等。水资源配置中常用的多目标规划模型类型及其特点见表1。

表1 水资源配置中常用的多目标规划模型类型及其特点

模型类型	处理不确定性的方法	适用场景	代表性研究
确定性多目标规划	假设参数确定不变	数据充足、系统相对稳定的场景	大型灌区水资源配置
模糊多目标规划	引入模糊集和隶属函数	参数边界模糊、依赖经验知识的场景	城市水资源配置
区间多目标规划	参数以区间数表示	数据有限但可估计范围的场景	灌区灌溉优化
基于 Me 测度的规划	引入必要性、可能性和可信性测度	多重不确定性共存的水资源系统	绿洲用水结构优化

### 1.2 多目标规划数学模型

与单目标模型不同, 多目标规划的目标函数为多个,

构成一个向量最优化问题<sup>[4]</sup>。p 个目标函数、m 个约束条件的多目标规划模型可以表示为:

$$optF(X) = [f_1(X), f_2(X), \dots, f_p(X)]^T \quad (1)$$

$$s.t. g_i(X) \leq b_i, i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

多目标性是多目标问题的基本特征，在单目标规划中，可以通过比较目标函数值的大小来确定可行解的优劣，而多目标规划中一般不存在绝对的最优解，决策者往往只能根据自己的偏好从多个有效解中选择出其中之一作为最后的满意解。

### 1.3 求解算法

水资源优化配置常常要求根据被控制过程的有限信息，做出多阶段过程的最优决策。由贝尔曼创立的动态规划理论与技术，是求解此类多阶段优化决策过程的有效途径<sup>[4]</sup>。但是动态规划只是成功解决了单目标优化问题，将模糊识别模式理论与动态规划最优化原理结合起来的多目标模糊优选动态规划理论，可以进行多目标问题的求解。

设第 t 阶段的 n 个方案之 m 个目标特征值矩阵为：

$$X^t = \begin{bmatrix} x_{11}^t & x_{12}^t & \dots & x_{1n}^t \\ x_{21}^t & x_{22}^t & \dots & x_{2n}^t \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1}^t & x_{m2}^t & \dots & x_{mn}^t \end{bmatrix} = (x_{ij}^t) \quad (3)$$

式中： $x_{ij}^t$  为阶段 t 方案 j 目标 i 的标准特征值， $t=1, 2, \dots, T$ ； $i=1, 2, \dots, m$ ； $j=1, 2, \dots, n$ 。

对于越大越优型和越小越优型目标，其目标相对优属度公式分别为：

$$r_{ij}^t = \frac{x_{ij}^t}{\max_{t,j} x_{ij}^t} ; r_{ij}^t = \frac{\min_{t,j} x_{ij}^t}{x_{ij}^t} \quad (4)$$

应用规格化公式将矩阵  $X^t$  变换为目标相对优属度矩阵为：

$$R^t = \begin{bmatrix} r_{11}^t & r_{12}^t & \dots & r_{1n}^t \\ r_{21}^t & r_{22}^t & \dots & r_{2n}^t \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1}^t & r_{m2}^t & \dots & r_{mn}^t \end{bmatrix} = (r_{ij}^t) \quad (5)$$

应用模糊优选模型，阶段 t 方案 j 的相对优属度为：

$$\varphi_t(s_{t-1}, d_t) = \frac{1}{1 + \left\{ \frac{\sum_{i=1}^m [\omega_i (1 - r_{ij}^t)]^p}{\sum_{i=1}^m (\omega_i r_{ij}^t)^p} \right\}^{\frac{2}{p}}} \quad (6)$$

以方案优属度为目标的多目标系统模糊优选动态规划后向递推的基本方程为：

$$\varphi_t^*(s_{t-1}) = F \cdot Opt_{d_t} \{ \varphi_t(s_{t-1}, d_t) \} + \varphi_{t+1}^*(s_t) \quad (7)$$

根据终点的边界条件，解得第 T 阶段的最优决策。逆向向前面各个阶段回代，可求得最优策略。

## 2 多目标规划在水资源配置中的应用场景

### 2.1 区域水资源综合配置

区域水资源配置涉及多部门、多用户的水量分配，需要在社会、经济、生态等多重目标间取得平衡<sup>[5]</sup>。多目标规划模型在这一领域展现出显著优势。

### 2.2 灌区用水优化

灌区作为农业用水的主要场所，其水资源配置效率直接影响区域粮食生产和生态环境。传统灌区管理往往侧重于单一的农业产量目标，忽视生态保护和水资源可持续性，导致地下水超采、生态退化等问题频发。多目标规划模型通过同时考虑粮食生产、经济效益和生态健康等目标，为灌区可持续发展提供了科学路径<sup>[6]</sup>。

### 2.3 多水源联合配置

随着水资源来源的多元化（如雨水集蓄、再生水利用、海水淡化等），多水源联合配置成为提高水资源保障能力的重要途径。多目标规划模型能够综合考虑不同水源的水质特性、供水成本及适用领域，实现水资源的优化利用<sup>[7]</sup>。

### 2.4 不确定性条件下的水资源配置

水资源系统受气候、水文、经济和社会等多重不确定性因素影响，如何在这些不确定性下制定最优的配置方案，是水资源管理的核心难点<sup>[8]</sup>。多目标规划模型通过集成不确定性理论，显著提高了配置方案的适应性和实用性。

## 3 应用实例

阿岗水库至龙王庙水库引调水工程水源为阿岗水库，阿岗水库总库容 1.2993 亿  $m^3$ ，本工程可调水量为 0.6 亿  $m^3$ 。引调水工程主要解决罗平县城、阿岗镇和九龙街道的用水问题。多年平均输水量为 0.6 亿  $m^3$ ，设计灌溉面积为 3.5 万亩，工程等别为 III 等，规模为中型。

供水量的多少对三个区域的经济、生态环境有不同程度的影响。要求在水量最优配置的决策中进行考虑，并满足约束条件。供水效益为越大越优指标，经济

发展和生态环境为定性指标,按照三个区域各自的有利性,确定经济发展和生态环境指标。最终得到罗平县城区、阿岗镇和九龙街道三个区域的相对优属度矩阵分别为:

$$R_A = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.35 & 0.48 & 0.61 & 0.74 & 0.87 & 1.00 \\ 0.00 & 0.06 & 0.12 & 0.18 & 0.24 & 0.30 & 0.36 \\ 0.00 & 0.02 & 0.04 & 0.06 & 0.08 & 0.10 & 0.12 \end{bmatrix}$$

$$R_B = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.46 & 0.59 & 0.72 & 0.85 & 0.98 & 1.00 \\ 0.00 & 0.02 & 0.04 & 0.06 & 0.08 & 0.10 & 0.12 \\ 0.00 & 0.10 & 0.20 & 0.30 & 0.40 & 0.50 & 0.60 \end{bmatrix}$$

$$R_C = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.42 & 0.55 & 0.68 & 0.81 & 0.94 & 1.00 \\ 0.00 & 0.10 & 0.20 & 0.30 & 0.40 & 0.50 & 0.60 \\ 0.00 & 0.05 & 0.10 & 0.15 & 0.20 & 0.25 & 0.30 \end{bmatrix}$$

供水效益、经济发展和生态环境重要性不同,考虑供水效益比经济发展指标略为重要,供水效益比生态环境指标明显重要,得到三线指标的权向量为

$$\omega' = (0.52 \quad 0.33 \quad 0.15)$$

根据两级模糊模式识别模型,按照最小二乘方准则,分别按照海明距离和欧氏距离计算得三个地区各方案的平均相对优属度矩阵为

$$\bar{u} = \begin{bmatrix} 0.000 & 0.094 & 0.207 & 0.360 & 0.529 & 0.684 & 0.803 \\ 0.000 & 0.166 & 0.299 & 0.453 & 0.605 & 0.731 & 0.768 \\ 0.000 & 0.153 & 0.314 & 0.516 & 0.709 & 0.851 & 0.914 \end{bmatrix}$$

矩阵 $\bar{u}$ 是求解三个地区多指标供水最优配置的依据,可用决策序列相对优属度总和最大、阶段模糊优选模型求解供水最优配置,根据递推方程最终可求解出最优解为:罗平县城区用水0.32亿 $m^3$ 、阿岗镇用水0.09亿 $m^3$ 和九龙街道用水0.19亿 $m^3$ 。

## 4 应用效果

多目标规划模型在阿岗水库至龙王庙水库引调水工程中的应用取得了显著的综合效益。

供水最优配置使供水效益提升约246万元,主要表现为模型有效改善了不同用水区域的配水公平性,降低了缺水风险,在区域间合理的分配水资源,使水资源供水效益达到最大化。在满足水资源供水效益的同时,引入经济发展和生态环境指标,优化水资源时空配置和改善区域生态环境<sup>[9]</sup>。有利的支撑了阿岗水库至龙王庙水库引调水工程项目水资源规划的研究。

## 5 结论

多目标规划模型作为解决复杂水资源配置问题的有效工具,通过统筹经济效益、社会公平和生态可持续

性等多重目标,为水资源科学管理提供了定量化决策支持。本文系统分析了多目标规划模型在水资源配置中的理论基础、典型应用及工程实践,得出以下结论:

(1) 多目标规划模型已形成较为完善的理论方法体系,从最初的确定性线性规划,发展到如今能处理多种不确定性的模糊规划、区间规划和随机规划等。模型求解算法也显著提高。可以解决更为复杂的工程问题。

(2) 多目标规划模型在区域水资源配置、灌区用水优化、多水源联合调度等领域展现出广泛应用价值。

水资源的稀缺性和不可替代性决定了其优化配置永恒价值。多目标规划模型作为实现这一目标的重要工具,将继续在水资源管理领域发挥核心作用,推动人水和谐社会的构建。

## 参考文献

- [1] 杜岚,汪健,汪浩男.基于系统动力多目标规划的水资源优化配置方案研究[J].浙江水利水电学院学报,2024,34(06):46-52
- [2] 张玉祥,穆振侠,田晓杰.基于CNSGA-III算法的乌苏市水资源优化配置[J].科学技术与工程,2023,23(32):58-64
- [3] 李敏,张洁.农田水利工程灌溉系统中的水资源优化配置与节水效益分析[J].城市建设理论研究,2025,2025(30):184-186
- [4] 邱林,王文川.水资源优化配置与调度[M].北京:中国水利水电出版社,2015
- [5] 左其亭,窦明,吴泽宁.水资源规划与管理[M].北京:中国水利水电出版社,2005
- [6] 吴凌琴,张猛,沈喜等.基于多目标优化的赣抚平原灌区水资源配水联合模型研究[J].节水灌溉,2025,2025(10):36-41
- [7] 王腊春,史运良,曾春芬.水资源学[M].南京:东南大学出版社,2014
- [8] 左其亭,窦明,吴泽宁.水资源规划与管理[M].北京:中国水利水电出版社,2005
- [9] 刘金铎.MIKE BASIN软件平台在双柏县水资源配置的应用[J].云南水力发电,2018,34(05):184-186

作者简介:廖云良(1978—),男,汉族,云南曲靖人,高级工程师,主要从事水资源管理工作。