

# 大型灌区节水改造工程的水资源配置模型研究

李东

宁夏众基水利勘测设计有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i12.19241

**[摘要]** 本文旨在构建一个科学、高效、适应性强的水资源配置模型,以支撑大型灌区节水改造工程的规划与运行管理。研究首先系统梳理了大型灌区水资源配置面临的挑战,包括用水效率低下、供需矛盾突出、生态需水被忽视及管理机制粗放等问题。在此基础上,创新性地提出了一种融合多目标优化、不确定性分析与智能算法的水资源配置集成模型(Integrated Water Resources Allocation Model, IWRAM)。该模型以社会、经济、生态综合效益最大化为目标函数,将作物需水、工程输配水能力、地下水开采红线、河道生态基流等多重约束条件进行量化耦合,并引入区间数与随机变量处理来水、需水等关键参数的不确定性。

**[关键词]** 大型灌区; 节水改造; 水资源配置; 多目标优化; 不确定性; 智能算法

**中图分类号:** S274 **文献标识码:** A

## Research on Water Resources Allocation Model for Water-Saving Renovation Projects in Large-Scale Irrigation Districts

Dong Li

Ningxia Zhongji Water Conservancy Survey and Design Co., Ltd.

**[Abstract]** This paper aims to construct a scientific, efficient, and adaptable water resources allocation model to support the planning and operation management of water-saving renovation projects in large-scale irrigation districts. The research first systematically reviews the challenges faced in water resources allocation in large-scale irrigation districts, including low water use efficiency, prominent supply-demand contradictions, neglect of ecological water demand, and extensive management mechanisms. On this basis, it innovatively proposes an Integrated Water Resources Allocation Model (IWRAM) that integrates multi-objective optimization, uncertainty analysis, and intelligent algorithms. The model takes the maximization of comprehensive social, economic, and ecological benefits as its objective function, quantifies and couples multiple constraints such as crop water demand, engineering water conveyance capacity, groundwater extraction red lines, and river ecological base flow, and introduces interval numbers and random variables to handle uncertainties in key parameters such as incoming water and water demand.

**[Key words]** large-scale irrigation district; water-saving renovation; water resources allocation; multi-objective optimization; uncertainty; intelligent algorithm

### 引言

在我国,农业是第一用水大户,用水量长期超全国总用水量60%。大型灌区作为国家粮仓核心载体,以不足全国四分之一的灌溉面积生产近半粮食,战略地位重要。但长期以来,其存在工程设施老化、输配水效率低、田间用水粗放等问题,水资源浪费严重,加剧区域供需矛盾。当下,“水问题”交织,给大型灌区可持续发展带来挑战。国家推动大型灌区续建配套与现代化改造,“节水”是核心目标之一。节水改造不仅是硬件升级,更要实现水资源管理根本性转变,关键在于建立科学的水资源配置模型。

传统配置方法难兼顾多重目标、应对不确定性。所以,开展相关模型研究,是提升灌区管理水平、落实国家节水行动、保障水与粮食安全的迫切需求,具重要理论与现实意义。

### 1 大型灌区水资源配置问题分析

#### 1.1 用水效率低下与供需矛盾

大型灌区普遍存在“大水漫灌”的传统灌溉模式,田间水利用系数普遍偏低,通常在0.50左右,远低于发达国家0.70-0.80的水平。同时,骨干输水渠道年久失修,渗漏损失严重,渠系水利用系数也亟待提升。这种低效的用水方式,在干旱年份或用水高

峰期,极易引发上下游、左右岸之间的用水冲突,导致部分区域农作物受旱减产,威胁粮食安全。节水改造工程的核心任务,就是通过工程措施(如渠道衬砌、管道化)和农艺措施(如滴灌、喷灌)双管齐下,系统性地提升从水源到田间的全链条用水效率。

### 1.2 生态环境约束日益凸显

过去“以需定供”的水资源开发模式,过度挤占了维系河流健康、湖泊湿地和地下水系统所必需的生态用水。许多灌区下游河道断流、湖泊萎缩、地下水超采形成漏斗区,生态系统功能严重退化<sup>[1]</sup>。新时代的水资源管理必须坚持“绿水青山就是金山银山”的理念,将生态需水作为刚性约束纳入配置体系。这要求配置模型不仅要满足人类社会经济用水,还必须为河流、湿地等生态系统预留足够的水量,以维持其基本结构与功能。

### 1.3 水资源配置的不确定性

大型灌区的水资源系统是一个典型的复杂巨系统,其输入(如降雨、径流)、状态(如土壤墒情)和输出(如作物产量)均受到多种不确定性因素的影响。一方面,气候变化导致降水时空分布更加不均,极端水文事件频发;另一方面,社会经济发展、种植结构调整、水价政策改革等人为因素也使得用水需求呈现出高度的动态性和随机性。一个稳健的水资源配置模型必须能够有效刻画并应对这些不确定性,避免因对未来情景估计偏差而导致配置方案失效。

## 2 水资源配置集成模型(IWRAM)构建

### 2.1 模型总体框架

IWRAM模型以大型灌区为研究对象,时间尺度为灌溉季(或月),空间尺度细化至支渠或管理单元。模型以社会、经济、生态三大子系统为核心,通过水资源这一纽带进行耦合。其输入包括来水预报、作物种植结构、工程参数(如渠道输水能力、防冲率)、政策约束(如用水总量控制指标)等;其输出为各用水单元在各时段的最优配水方案。

### 2.2 目标函数

模型采用多目标优化框架,旨在协同实现以下三个目标:

#### 2.2.1 社会效益最大化

以保障区域粮食安全为核心,最小化因缺水造成的粮食减产损失。

$$\min Z_1 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T C_{ijt} \cdot \max(0, W_{ijt}^{\text{req}} - W_{ijt}^{\text{alloc}})$$

其中,  $C_{ijt}$  为作物  $j$  在单元  $i$ 、时段  $t$  的单位缺水损失系数;  $W_{ijt}^{\text{req}}$  和  $W_{ijt}^{\text{alloc}}$  分别为其需水量和分配水量。

#### 2.2.2 经济效益最大化

通过优化种植结构和配水,最大化灌区净经济效益。

$$\max Z_2 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T (P_j Y_{ijt} - K_{jt} W_{ijt}^{\text{alloc}})$$

其中,  $P_j$  为作物  $j$  的市场价格;  $Y_{ijt}$  为其产量(与供水量呈函数关系);  $K_{jt}$  为作物  $j$  在时段  $t$  的单位灌溉成本。

#### 2.2.3 生态效益最大化

确保关键生态节点(如下游断面、湖泊入口)的生态需水得到满足。

$$\max Z_3 = \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T E_{kt}$$

其中,  $E_{kt}$  为生态节点  $k$  在时段  $t$  的实际生态补水水量。

### 2.3 约束条件

**水量平衡约束:** 在任何时段,从水源引出的总水量等于各用户分配水量、输水损失及回归水之和。

**工程能力约束:** 各干、支渠的配水流量不得超过其最大输水能力,该能力与节水改造后的防冲率直接相关。

**作物需水约束:** 分配给各作物的水量应在最小生存需水与最大高产需水之间。

**用水总量控制约束:** 区域年度总取水量不得超过政府下达的红线指标。

**生态基流约束:** 关键断面的下泄流量必须大于或等于其生态基流要求。

**地下水开采约束:** 地下水开采量不得超过其可持续开采量,防止超采。

### 2.4 不确定性处理

为处理来水与需水的不确定性,模型采用区间-随机混合方法。将来水系列视为随机变量,服从特定的概率分布(如伽马分布);将作物需水系数等参数视为区间数,表示其可能的变化范围。通过蒙特卡洛模拟生成大量情景样本,然后在每个样本下求解确定性等价模型,最终得到一个鲁棒性强、风险可控的配置方案集。

## 3 模型求解方法与算法设计

### 3.1 问题复杂性分析

IWRAM模型是一个高维、非线性、多目标的混合整数规划问题。其复杂性主要体现在三个方面:(1)多目标性:社会、经济、生态三大目标之间存在内在冲突,不存在单一的最优解,而是存在一个帕累托(Pareto)最优解集;(2)非线性:作物产量与供水量之间通常呈现S型或二次型响应函数,使得目标函数和部分约束呈现非线性特征;(3)不确定性:模型参数(如来水量、需水系数)的随机性和模糊性,要求解法具备处理随机规划或区间规划的能力<sup>[2]</sup>。传统的基于梯度的数学规划方法(如单纯形法、序列二次规划)在处理此类问题时,往往面临收敛困难、易陷入局部最优等局限。

### 3.2 求解算法选择与设计

针对上述复杂性,本文设计了一套混合智能优化算法框架——MC-NSGA-II(Monte Carlo Simulation coupled with NSGA-II)。

#### 3.2.1 NSGA-II算法

作为一种经典的多目标进化算法,NSGA-II通过快速非支配排序(Fast Non-dominated Sorting)对种群中的个体进行分层,并利用拥挤度距离(Crowding Distance)来维持解集的多样性。其精英保留策略(Elitism)能够有效保证优秀个体不被破坏,从

而加速算法收敛。NSGA-II不依赖于目标函数的梯度信息,对问题的连续性、可微性无要求,非常适合求解IWRAM这类复杂的黑箱优化问题。

### 3.2.2蒙特卡洛模拟(Monte Carlo Simulation)

为了处理模型中的不确定性,本文将NSGA-II嵌入到蒙特卡洛模拟的框架中。具体步骤如下:(1)抽样:根据预设的概率分布(如来水的伽马分布)和区间范围(如需求系数的上下界),通过随机抽样生成N个(如N=1000)独立的情景样本。(2)情景求解:对于每一个情景样本,将其视为一个确定性的IWRAM子问题,并调用NSGA-II算法求解,得到该情景下的帕累托最优解集。(3)解集聚合与评估:将所有N个情景下的解集进行聚合,并计算每个解在所有情景下的期望目标值和方差。最终,筛选出那些期望综合效益高且方差(风险)小的鲁棒性解,作为推荐给决策者的最终方案。

该混合算法的优势在于,它不仅能够有效探索多目标优化问题的解空间,还能通过大量随机模拟,全面评估配置方案在各种可能未来情景下的表现,从而为管理者提供一个兼具高效性与稳健性的决策支持工具。

## 4 政策建议

### 4.1加速推进灌区数字化与智慧化基础设施建设

模型的生命力在于数据。当前多数大型灌区仍存在监测站点稀疏、数据采集自动化程度低、信息孤岛严重等问题,难以满足精细化配置模型对高时空分辨率数据的需求。因此,必须将“数字灌区”建设作为节水改造工程的核心组成部分。应系统性布设覆盖干、支、斗渠的流量在线监测设备,推广田间土壤墒情、气象、作物长势等物联网感知终端,并建立统一的数据汇聚、存储与共享平台<sup>[3]</sup>。唯有如此,才能实现对灌区水资源“取、供、用、排”全过程的实时动态感知,为IWRAM等智能模型提供精准、可靠的输入,使其从“纸上谈兵”转变为“实战利器”,真正服务于灌区的日常调度与应急管理。

### 4.2深化水权水市场改革

当前,农业水价普遍偏低,未能真实反映水资源的全部成本,特别是其机会成本和生态价值,导致用户缺乏内在节水动力。建议在明晰初始水权的基础上,全面推进农业水价综合改革。一方面,实行“定额管理、超定额累进加价”制度,对基本口粮作物保障低价用水,对经济作物及超量用水部分则执行更高水价,利用价格信号引导种植结构向节水高效方向调整<sup>[4]</sup>。另一方面,探索建立区域内的水权交易市场,允许节余水量在农户、合作社

或用水协会之间进行有偿转让,让节水者获得实实在在的经济收益。这种“谁节约、谁受益”的机制,能有效激活微观主体的节水积极性,使IWRAM模型优化出的高效配水方案在现实中得到用户的积极响应与配合,从而形成良性循环。

### 4.3强化生态用水的刚性约束与考核问责

过去,生态需水常被视为“软指标”,在用水紧张时首先被牺牲。为扭转这一局面,必须将其提升到与经济社会用水同等重要的地位。建议国家及省级层面,依据科学评估,明确划定各大灌区下游关键控制断面的生态基流红线,并将其作为不可逾越的“硬约束”纳入水资源配置的顶层设计。更重要的是,要将生态用水保障率、地下水水位变化、重要湿地面积等核心生态指标,纳入地方政府及相关水务部门的政绩考核体系,实行“一票否决”或重大扣分制。通过强有力的考核问责机制,倒逼管理者在制定年度配水计划时,必须优先保障生态用水,确保IWRAM模型中生态效益最大化的目标不被架空,真正实现人水和谐、可持续发展的长远目标。

## 5 结语

本文针对大型灌区节水改造工程水资源配置难题,构建IWRAM集成模型并设计MC-NSGA-II混合求解算法,得出主要结论:将社会、经济、生态多维目标统一纳入配置框架是灌区高质量发展必由之路,多目标优化模型能揭示目标权衡关系;节水改造工程需与先进模型结合,实现工程与管理深度耦合;有效处理系统不确定性是提升配置方案可靠性的关键,区间-随机混合方法优于传统方法。研究仍有深化空间,未来可从三方面展开:细化模型时间尺度至日甚至小时级别,实现近乎实时动态调度;引入前沿人工智能技术,探索数据驱动的自适应优化配置方法;拓展模型边界,探索跨部门、跨区域协同配置机制,实现更大范围水资源优化共享与协同发展。

### [参考文献]

- [1]李新三.水利水电工程中灌区节水改造技术研究[J].水上安全,2025,(18):91-93.
- [2]孙煜.灌区节水改造项目信息化建设的几点建议[J].北方经济,2025,(08):48-51.
- [3]刘继峰.灌区节水改造工程实践与优化方案[J].陕西水利,2025,(03):94-96.
- [4]蒋鹏飞.大中型灌区续建配套与节水改造探讨[J].农业灾害研究,2025,15(01):259-261.