

基于区间两阶段模糊随机模型的灌区多水源优化配置

李晨洋, 张志鑫

(东北农业大学水利与建筑学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 针对灌区水资源调度系统中的不确定性和复杂性, 该文以红兴隆灌区为研究区域, 构建区间两阶段模糊随机规划模型, 并将其应用到灌区地表水和地下优化配置中, 模型以灌区多水源联合调度系统收益最大为目标函数, 引入区间数、模糊数、随机变量表示系统中的不确定性, 对地表水和地下水在各作物之间配水目标进行优化。通过计算得到不同水源向不同作物配水的最优配水目标值及最优配置水量, 模型不仅可以充分考虑到不确定性因素对系统收益的影响, 而且可以将经济效益与处罚风险进行权衡。以 2006 年红兴隆灌区作物种植情况及灌溉情况为例进行研究分析, 得到系统最大收益值在 $1\,355.144 \times 10^6 \sim 2\,371.792 \times 10^6$ 元之间, 该优化结果以区间形式给出, 可以为决策者提供更为宽裕的决策空间, 从而获得最为科学的决策方案。

关键词: 灌溉; 水资源; 不确定分析; 区间两阶段模糊随机规划; 多水源; 优化配置

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.016

中图分类号: TV212.5⁺4; P641.8

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-12-0107-08

李晨洋, 张志鑫. 基于区间两阶段模糊随机模型的灌区多水源优化配置[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 107—114.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.016 <http://www.tcsae.org>

Li Chenyang, Zhang Zhixin. Multi-water conjunctive optimal allocation based on interval-parameter two-stage Fuzzy-stochastic programming[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(12): 107—114. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.016 <http://www.tcsae.org>

0 引言

随着人口和经济快速增长, 水资源污染与短缺日益突出, 干旱、洪涝灾害频繁发生, 人类对粮食需求不断增加^[1-2], 使得农业水资源供需矛盾不断加剧。灌区水资源优化配置是实现灌区高效用水的重要非工程措施, 对提高水资源综合利用效益, 实现水资源分配的效率与公平, 具有重要作用^[3-4]。近年来, 随着研究不断深入, 多种优化配置方法逐渐产生。例如, 邵东国等^[5]构建了基于水资源净效益最大的水资源优化配置模型; 栗晓玲等^[6]将多目标水资源优化配置模型用于石羊河流域水资源配置研究中; 高玉芳等^[7]运用混沌人工鱼群算法求解灌区优化配水问题; 余艳玲^[8]运用加速遗传算法求解灌区水资源优化配置问题; 李滕等^[9]将蚁群—粒子群混合算法应用到渭北工业区水资源优化配置中。以上研究将水资源配置系统简化为确定性系统, 忽略了系统的不确定性, 虽然优化结果可以为管理者提供决策方案, 但在水资源优化配置上却存在一定程度的局限性, 不能完全反映系统的不确定性, 导致使用价值降低^[10]。

在水资源系统规划与管理中, 存在着很多不确定性。例如, 降雨径流在时间和空间分布的不确定性, 规划期供水量、需水量的不确定性、系统费用和效益参数涨落的不确定性^[11-12]。固有的复杂性和存在于真实水资源体系

中的不确定性从本质上高于常规的确定性优化方法^[13], 使得以往的优化方法不再适用。学者针对系统中的不确定性和复杂性, 提出了更为有效的系统分析方法, 其中两阶段随机规划方法应用最为广泛, 该方法在单一水资源配置上已有成果, Huang 等^[14]将区间两阶段随机规划应用到水资源管理中; Li 等^[15]将不确定条件下的区间两阶段管理模型应用于灌区灌溉规划。近年来, 由于过度开发地下水, 出现地下水位下降, 水体污染等现象, 使多水源联合配水成为研究热点, 付银环等^[10]应用区间两阶段随机规划和作物水分生产函数进行灌区多水源联合优化配置; Zhang 等^[16]、Li 等^[17]将改进后区间两阶段随机规划模型用于三江平原水资源管理。在大量学者的不断努力下, 以两阶段规划为框架所构建模型逐渐成熟, 可以解决水资源系统中存在的不确定性。

灌区水资源调度系统同样存在不确定性, 包括水源可供水量、作物需水量的不确定性; 规划初期蓄水量、降雨量的不确定性; 作物价格涨落的不确定性等, 这些不确定性因素共同构成了灌区水资源系统的复杂性。以往将水资源系统简化为确定性的研究方法, 无法科学有效处理系统中的不确定性。本文针对灌区水资源系统中的不确定性, 构建灌区多水源、多作物配水模型, 模型以全灌区系统收益最大为目标函数, 以两阶段线性规划方法为基础, 建立区间 2 阶段模糊随机规划模型, 采用概率密度函数、离散区间和模糊集 3 种方法来解决不确定性问题。与传统的两阶段模型相比, 模型将多种水源用于作物灌溉, 同时尽可能多的考虑不确定因素, 将 3 种数学方法结合到两阶段优化框架中, 以期灌区管理者提供科学的种植结构和最优的配水方案。

收稿日期: 2015-11-07 修订日期: 2016-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51509036)

作者简介: 李晨洋, 女, 黑龙江人, 博士, 主要从事管理科学与工程、农业工程的研究。哈尔滨东北农业大学水利与建筑学院, 150030。

Email: cli703@163.com

1 模型建立及求解

1.1 建立区间两阶段模糊随机规划模型

灌区多水源联合调度的目标是将地表水和地下水合理分配给多种作物, 确保满足作物生长所需最优水量, 获得最大系统收益。因此, 本研究以灌区作物生长需水量为约束条件, 引入最大系统收益、缺水惩罚系数。研究分 2 个阶段确定作物最优配水目标值及最优配置水量: 第 1 阶段是在保证灌区水资源承载力、其他生态用水及作物充分灌溉的前提下, 按正常水平年, 初步确定各种作物生长所需的最优水量, 即预先配水目标值, 将其作为第 1 阶段的决策变量; 由于灌区规划初期蓄水量、天然净来水量及蒸发、渗漏损失量的不确定性, 第 2 阶段则会对第 1 阶段的配水目标进行调整, 若第 1 阶段配水量过少会导致作物因缺水而减产, 受到惩罚, 若配水过多会影响作物生长或造成水资源浪费同样会受到惩罚。为降低惩罚风险, 同时又使系统收益最大, 则需对第 1 阶段的实际配置水量适当调整, 将缺水量作为第 2 阶段决策变量。

在以往水资源规划中, 目标函数的确定主要有 2 种方式: 1) 在水资源有限的情况下, 寻求系统收益最大; 2) 在可供水目标已定的情况下, 寻求达到目标的资源耗费最小^[18]。同时由于作物预先配水目标值 W 的不确定性; 作物产量及价格变动导致单位水量作物收益值 (net benefit, NB) 和惩罚系数 C 的不确定性, 本研究将区间参数引入模型中, 来解决无法得到的不确定性参数或不能用概率分布来表示的变量。由此建立区间 2 阶段模糊随机规划模型

$$\max f^{\pm} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \text{NB}_{ij}^{\pm} \cdot W_{ij}^{\pm} - E \left[\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J C_{ij}^{\pm} \cdot D_{ijQ}^{\pm} \right] \quad (1)$$

式中 E 表示随机变量的期望值; D 表示未满足预先配水目标的缺水; f 表示系统总收益; i 表示不同水源, $i=1, 2$ 分别表示地表水和地下水; j 表示不同作物, $j=1, 2, 3$ 分别表示水稻、玉米和大豆; “-”表示区间参数的下限值, “+”表示区间参数上限值^[13]。水源可用水量通常包括规划初期蓄水量和净来水量, 为随机变量。由于预测年天然净来水量很难确定, 因此将不同来水水平下的缺水视为离散概率分布, 并假设不同水平的净来水量 q_k 的概率为 p_k , $0 \leq p_k \leq 1$, 且 $\sum_{k=1}^K p_k = 1$, k 表示预测年份不同水源的流量水平 ($k=1, 2, \dots, K$), $k=1$ 表示预测年份净来水最少, 为低流量水平, 缺水最大; $k=2$ 表示预测年份净来水适中, 为中流量水平, 缺水较少; 当 $k=K$ 时表示净来水最多, 为高流量水平, 缺水最少, 则^[19]

$$E \left[\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J C_{ij}^{\pm} \cdot D_{ijQ}^{\pm} \right] = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J C_{ij}^{\pm} \cdot \left(\sum_{k=1}^K p_{ik} \cdot D_{ijk}^{\pm} \right) \quad (2)$$

因此区间 2 阶段模糊随机规划模型可表示为

$$\max f^{\pm} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \text{NB}_{ij}^{\pm} \cdot W_{ij}^{\pm} - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J C_{ij}^{\pm} \cdot \left(\sum_{k=1}^K p_{ik} \cdot D_{ijk}^{\pm} \right) \quad (3)$$

式中 W_{ij}^{\pm} 表示水源 i 向作物 j 配水的预先配水目标值, 10^6 m^3 , 当预先配水目标值未满足时将会受到惩罚; NB_{ij}^{\pm}

表示水源 i 向作物 j 配水时, 单位水量的系统收益值, 元/ m^3 ; C_{ij}^{\pm} 表示作物 j 的预先配水目标未满足时, 单位缺水量的惩罚系数 ($C_{ij}^{\pm} > \text{NB}_{ij}^{\pm}$), 元/ m^3 ; D_{ijk}^{\pm} 表示当天然来水水平为 k 时, 水源 i 向作物 j 配水, 未满足预先配水目标的缺水量, 10^6 m^3 ; f^{\pm} 表示系统总收益, 10^6 元。

约束条件:

1) 水源可用水量约束

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (W_{ij}^{\pm} - D_{ijk}^{\pm}) \leq \sum_{i=1}^I (Q_i^{\pm} + q_{ik}^{\pm} - \text{QS}_i^{\pm}) \quad \forall i, j, k \quad (4)$$

式中 Q_i^{\pm} 为灌区水源 i 初期蓄水量, 10^6 m^3 ; q_{ik}^{\pm} 为灌区水源 i 在不同流量水平的天然净来水量, 10^6 m^3 , q_{ik}^{\pm} 具有显著的概率特征, 则净来水量 q_{ik}^{\pm} 的概率为 p_{ik} ; QS_i^{\pm} 为灌区 i 水源蒸发、渗漏等损失水量, 10^6 m^3 。 Q_i^{\pm} 、 q_{ik}^{\pm} 及 QS_i^{\pm} 都是不确定的, 则用满足一定隶属度的三角模糊数来表示, 文献[20]中提出的具有自对偶性的模糊可信度测度 C_r , 使模糊规划更为可行, 首先将上述约束写为 $A \cdot x \leq B$, $A \cdot x$ 为约束左端, $B = \sum_{i=1}^I (Q_i^{\pm} + q_{ik}^{\pm} - \text{QS}_i^{\pm})$, 将约束右端 B 用三角模糊集 ($B_0, B_{0.5}, B_1$) 表示, 3 个数分别代表变量最小可能值, 最可能值和最大可能值。根据模糊可信度理论, 将模糊约束的可信度性定义^[20]为

$$C_r(A \cdot x \leq B) = \begin{cases} 1 & A \cdot x \leq B_0 \\ \frac{2(B_{0.5} - B_0 - A \cdot x)}{2(B_{0.5} - B_0)} & B_0 \leq A \cdot x \leq B_{0.5} \\ \frac{B_1 - A \cdot x}{2(B_1 - B_{0.5})} & B_{0.5} \leq A \cdot x \leq B_1 \\ 0 & A \cdot x \geq B_1 \end{cases} \quad (5)$$

可信度水平 $\lambda \in [0, 1]$, 本研究假设可信度水平在最可能值和最大可能值之间, 即可信度水平 λ 应 ≥ 0.5 , 则可信度水平 $\lambda \in [0.5, 1]$, 由于 λ 值的不确定性, 将其用区间数表示, 则模糊约束 $A \cdot x \leq B$ 可以确定为

$$A \cdot x \leq B_{0.5} + (1 - 2\lambda^+) \cdot (B_{0.5} - B_0) \quad (6)$$

2) 水源最大供水约束

$$\sum_{j=1}^J W_{ij}^{\pm} \leq W_{i\max} \quad \forall i, j \quad (7)$$

式中 $W_{i\max}$ 为水源 i 最大可供水量, 10^6 m^3 。

3) 作物需水量约束

$$W_{j\min}^{\pm} \leq \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J W_{ij}^{\pm} \leq W_{j\max}^{\pm} \quad \forall i, j, k \quad (8)$$

式中 $W_{j\min}^{\pm}$ 和 $W_{j\max}^{\pm}$ 为灌区内作物 j 充分灌溉条件下的作物最小需水量和最大需水量, 10^6 m^3 。

4) 渠道输水能力约束

$$W_{ij}^{\pm} - D_{ijk}^{\pm} \leq c_{ij}^{\pm} \quad \forall i, j, k \quad (9)$$

式中 c_{ij}^{\pm} 为灌区内水源 i 向作物 j 配水, 两地间渠道可允许输送水量, 10^6 m^3 , 其中地下水渠道输水能力定义为提取后再通过渠道向作物 j 配水。

5) 水量平衡约束

地表水水量平衡约束为

$$Q_{ij}^+ + q_{ik}^+ - QS_i^+ - \sum_{j=1}^J (W_{ij}^+ - D_{ijk}^+) = Q_{im}^+ \geq Q_{i\min} \quad i=1,2,\dots,n. \quad (10)$$

地下水水量平衡约束为

$$Q_{ij}^+ + q_{ik}^+ - QS_i^+ - \sum_{j=1}^J (W_{ij}^+ - D_{ijk}^+) = Q_{im}^+ \geq Q_{i\min}. \quad (11)$$

$i = n+1, n+2, \dots, m$

式中 Q_{im}^+ 为规划期末水源 i 的蓄水量, 10^6m^3 ; $Q_{i\min}$ 为水源 i 应保证的最小蓄水量, 10^6m^3 。其中地下水应保证不低于正常地下水位, 并且地下水损失 QS_i^+ 取为 0。不同水源可用水量 $(Q_{ij}^+ + q_{ik}^+ - QS_i^+)$ 区间上下限值分别取最大可能值 B_1 和最小可能值 B_0 。

6) 非负约束

$$W_{ij}^+ \geq D_{ijk}^+ \geq 0 \quad \forall i, j, k. \quad (12)$$

1.2 模型求解

式 (3) 中 W_{ij}^+ 是以区间形式来表征系统中不确定性, 很难判断当 W_{ij}^+ 为何值时, 系统收益最大^[21]。因此, 本文将决策变量 z_{ij} 引入到模型中, 使得 $W_{ij} = W_{ij}^- + \Delta W_{ij} \cdot z_{ij}$, 其中 $\Delta W = W_{ij}^+ - W_{ij}^-$, $z_{ij} \in [0, 1]$ ^[11], 当 $z_{ij}=1$ 时, 作物调配水量达到预先配水目标的上限值, 系统收益最大, 但当作物配水目标不能满足时, 将会面临非常严重的惩罚风险; 当 $z_{ij}=0$ 时, 作物调配水量达到预先配水目标的下限值, 系统收益最小, 但惩罚风险也相对较小, z_{ij} 越大则水源向作物供水越多。求解模型的目的便在于找到决策变量的最优值 z_{ijopt} , 获得最优配水目标, 使得经济收益与惩罚风险相平衡。

对于最终区间 2 阶段模糊随机规划模型求解, 根据交互式算法^[14], 将模型分为 2 个子模型分别为灌区水资源系统收益上限模型和下限模型, 由于目标函数是系统收益最大值, 因此其上限子模型为

$$\max f^+ = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \text{NB}_{ij}^+ \cdot (W_{ij}^- + \Delta W_{ij} \cdot z_{ij}) - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K p_{ik} \cdot C_{ij}^- \cdot D_{ijk}^- \quad (13)$$

约束条件

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (W_{ij}^- + \Delta W_{ij} \cdot z_{ij} - D_{ijk}^-) \leq B_{0.5} + (1 - 2\lambda^-) \cdot (B_{0.5} - B_0) \quad \forall i, j, k, \\ \sum_{j=1}^J (W_{ij}^- + \Delta W_{ij} \cdot z_{ij}) \leq W_{i\max} \quad \forall i, j, \\ W_{j\min}^- \leq \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (W_{ij}^- + \Delta W_{ij} \cdot z_{ij}) \leq W_{j\max}^+ \quad \forall i, j, k, \\ W_{ij}^- + \Delta W_{ij} \cdot z_{ij} - D_{ijk}^- \leq c_{ij}^+ \quad \forall i, j, k, \\ Q_{ij}^+ + q_{ik}^+ - QS_i^+ - \sum_{j=1}^J (W_{ij}^- + \Delta W_{ij} \cdot z_{ij} - D_{ijk}^-) \geq Q_{i\min} \quad i=1, 2, \dots, n, \\ Q_{ij}^+ + q_{ik}^+ - \sum_{j=1}^J (W_{ij}^- + \Delta W_{ij} \cdot z_{ij} - D_{ijk}^-) \geq Q_{i\min} \quad i=n+1, n+2, \dots, m, \\ W_{ij}^- + \Delta W_{ij} \cdot z_{ij} \geq D_{ijk}^- \geq 0 \quad \forall i, j, k, \\ 0 \leq z_{ij} \leq 1. \end{cases} \quad (14)$$

式中 z_{ij} 、 D_{ijk}^- 为决策变量, 采用线性规划方法求解上限子模型, 得到 z_{ijopt} 、 D_{ijkopt}^- 和 f_{opt}^+ 。符合目标函数的下限模型为

$$\max f^- = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \text{NB}_{ij}^- \cdot (W_{ij}^- + \Delta W_{ij} \cdot z_{ijopt}) - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K p_{ik} \cdot C_{ij}^+ \cdot D_{ijk}^+ \quad (15)$$

约束条件

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (W_{ij}^- + \Delta W_{ij} \cdot z_{ijopt} - D_{ijk}^+) \leq B_{0.5} + (1 - 2\lambda^+) \cdot (B_{0.5} - B_0) \quad \forall i, j, k, \\ W_{j\min}^+ \leq \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (W_{ij}^- + \Delta W_{ij} \cdot z_{ijopt}) \leq W_{j\max}^- \quad \forall i, j, k, \\ W_{ij}^- + \Delta W_{ij} \cdot z_{ijopt} - D_{ijk}^+ \leq c_{ij}^- \quad \forall i, j, k, \\ Q_{ij}^- + q_{ik}^- - QS_i^- - \sum_{j=1}^J (W_{ij}^- + \Delta W_{ij} \cdot z_{ijopt} - D_{ijk}^+) \geq Q_{i\min} \quad i=1, 2, \dots, n, \\ Q_{ij}^- + q_{ik}^- - \sum_{j=1}^J (W_{ij}^- + \Delta W_{ij} \cdot z_{ijopt} - D_{ijk}^+) \geq Q_{i\min} \quad i=n+1, n+2, \dots, m, \\ D_{ijk}^+ \geq D_{ijkopt}^+ \geq 0 \quad \forall i, j, k. \end{cases} \quad (16)$$

式中 D_{ijk}^+ 为决策变量, 求解下限子模型, 得到 D_{ijkopt}^+ 、 f_{opt}^- , 由此即可求出模型最优解为

$$f_{opt}^+ = [f_{opt}^-, f_{opt}^+], \quad (17)$$

$$D_{ijkopt}^+ = [D_{ijkopt}^-, D_{ijkopt}^+]. \quad (18)$$

则最优配水目标 W_{ijopt} 为

$$W_{ijopt} = W_{ij}^- + \Delta W_{ij} \cdot z_{ijopt}. \quad (19)$$

最优配置水量 A_{ijopt}^{\pm} 为

$$A_{ijopt}^{\pm} = W_{ijopt} - D_{ijkopt}^{\pm} \quad \forall i, j, k. \quad (20)$$

2 案例分析

2.1 研究区概况

红兴隆分局位于三江平原腹地 ($129^{\circ}55' \sim 134^{\circ}12'E$, $45^{\circ}35' \sim 47^{\circ}17'N$)。总面积 88 万 km^2 , 其中耕地 41.8 万 km^2 , 所辖 12 农场与 4 市 7 县的土地穿插交错, 是黑龙江省占土地面积较大的灌区^[22]。然而, 红兴隆灌区主要种植水稻、玉米、大豆, 以井灌为主, 随着近年来作物用水量的增加, 作物价格变化, 致使地下水位不断下降, 种植结构单一, 使灌区用水危机加剧。所以, 本研究利用地表水和地下水联合供水来缓解红兴隆灌区地下水压力, 平衡惩罚风险与效益之间关系, 使系统受益最大; 同时通过收益区间变化、最优配水目标值和缺水量, 了解种植结构是否合理, 灌区渠道输水是否完备, 为管理者提供合理的管理意见。

2.2 数据来源

根据红兴隆管理局《经济与社会统计资料》(2000—2006 年), 得到不同作物单位面积灌溉用水量区间,

以 2006 年灌区作物种植面积^[23]数据为已知条件,通过文献[24]获得地表水和地下水供水比例,分别为 20%和 80%,及作物灌溉面积比例,水稻、玉米、大豆分别为 100%、10%、10%,单位面积灌溉用水量、种植面积、灌溉面积比例、供水比例四者相乘得到地表水和地下水向 3 种作物的供水量,作为第 1 阶段预测年作物预先配水目标值 W_{ij} ;通过黑龙江省用水定额标准^[25](较多参照)及多年试验数据,得到 3 作物单位面积最大灌溉用

水量和最小灌溉用水量(表 1),单位面积最大和最小灌溉用水量、灌溉面积比例与种植面积相乘,得到作物正常生长的最大需水量 $W_{j\min}$ 和最小需水量 $W_{j\max}$;地表水最大可供水量 W_{imax} 和最小蓄水量 Q_{imin} 分别为 $740 \times 10^6 \text{ m}^3$ 和 $120 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、地下水最大可供水量和最小蓄水量分别为 $1100 \times 10^6 \text{ m}^3$ 和 $324 \times 10^6 \text{ m}^3$ 及不同水源与作物之间渠道输水能力 c_{ij} ,即可输水量的最大值,数据来源于红兴隆灌区管理局统计资料。

表 1 灌区作物种植面积及单位面积灌溉用水量表
Table 1 Irrigation crops area and water per unit area in irrigation district

作物 Crops	种植面积 Crops area/hm ²	单位面积灌溉用水量 Irrigation water consumption per unit area/(m ³ ·hm ⁻²)	单位面积最小灌溉用水量 Minimum irrigation water consumption per unit area/(m ³ ·hm ⁻²)	单位面积最大灌溉用水量 Maximum irrigation water consumption per unit area/(m ³ ·hm ⁻²)
水稻 Rice	153 547	[5 893, 6 561]	[4 559, 4 689]	[6 600, 7 000]
玉米 Maize	77 332	[842, 1 305]	[900, 1 100]	[1 500, 2 000]
大豆 Soybean	58 770	[870, 1 443]	[900, 1 200]	[1 600, 2 600]

通过《经济与社会统计资料》(2006 年)得到 3 种作物单位面积产量,参考文献[24]及调研得到作物收购价格,2006 年水稻、玉米、大豆单位面积灌溉用水量分别为 6 332、1 185、1 292 m³/hm²,通过式(21)求得单位水量系统收益,该收益为两种水源共同供水时收益,但实际中由于地表水和地下水的使用成本不同,导致不同水源的系统收益值是不同的,则 2 种水源单位系统收益值根据式(22)、(23)求得,其中地表水和地下水使用成本分别为 0.4 元/m³和 1.1 元/m³;通过统计资料得到作物种植成本,通过调研得到因缺水减产将会导致系统收益减少 50%~70%,本次取最严重惩罚,则收益减少 70%,根据式(24)得到单位水量惩罚系数,同样由于使用成本不同则根据式(25)、(26)得到 2 种水源单位面积

惩罚系数(表 2)。

单位水量收益值=(单位面积产量×收购价格)/(单位面积灌溉用水量(2006 年)×灌溉面积比例)。(21)

地表水单位水量系统收益=单位水量收益值+(1.1-0.4)×20%。(22)

地下水单位水量系统收益=单位水量收益值-(1.1-0.4)×80%。(23)

单位水量惩罚系数=(种植成本+减产损失)/(单位面积灌溉用水量(2006 年)×灌溉面积比例)。(24)

地表水单位水量惩罚系数=单位水量惩罚系数+0.4。(25)

地下水单位水量惩罚系数=单位水量惩罚系数+1.1。(26)

表 2 灌区作物经济参数汇总表
Table 2 Summary of crops economic parameters in irrigated district

作物 Crops	单位面积产量 Yield per unit area/(kg·hm ⁻²)	收购价格 Price/(元·kg ⁻¹)	单位水量收益值 Benefits per units water/(元·m ⁻³)	种植成本 Costs/(元·hm ⁻²)	减产损失 Loss of benefits/ (元·hm ⁻²)	单位水量惩罚系数 Penalty coefficient per unit water/(元·m ⁻³)
水稻 Rice	8 480	[1.6, 2]	[2.14, 2.68]	9 526	[9 497.60, 11 872]	[3.00, 3.38]
玉米 Maize	8 997	[0.9, 1.1]	[68.33, 83.52]	5 010	[5 668.11, 6 927.69]	[90.11, 100.74]
大豆 Soybean	2 827	[2.2, 2.4]	[48.14, 52.51]	4 980	[4 353.58, 4 749.36]	[72.24, 75.30]

根据红兴隆气象局对灌区多年天然来水量(1987—2006 年)的统计数据,可知 1992、1999、2003、2005 年的天然来水量为 400~500 mm,1987、1990、1991、1994 年的天然来水量在 600 mm 以上,其他年份来水量在 500~600 mm 之间,中等流量水平的年份较多,高流量和低流量年份较少,因此,假设预测年份,低、中、高 3 种流量的来水水平出现的概率 p_{ik} 分别为 0.2、0.6、0.2,同时在红兴隆分局《农垦统计年鉴》、《管理水利年报》及走访调研中得到不同来水水平下,地表水和地下水可用水量。同时为反映水量的可信性水平,则将可供灌溉

总水量用三角模糊集表示。

2.3 结果与分析

2.3.1 预先配水目标及作物需水量确定

水源向作物供水的预先配水目标和作物最小和最大配水量如表 3 所示。由表 3 可知,水稻预先配水目标及需水量要远远高于玉米和大豆,并且地下水的渠道输水能力要高于地表水。

2.3.2 系统收益与惩罚系数确定

表 4 中数据为不同水源向不同作物配水,单位水量的系统收益值 NB_{ij} 和未满足预先配水目标的惩罚系数 C_{ij} 。

表 3 作物预先配水目标值、最大和最小配水量和渠道输水能力

Table 3 Target value of crop water distribution in advance, maximum and minimum water distribution and water conveyance capacity of channel

作物 Crops	预先配水目标		渠道输水能力		作物需水量	
	Target value of crop water distribution in advance/(10 ⁶ m ³)		Water conveyance capacity of channel/(10 ⁶ m ³)		Water demands of crop/(10 ⁶ m ³)	
	地表水 Surface water	地下水 Ground water	地表水与作物之间 Between surface water and crops	地下水与作物之间 Between ground water and crops	最小 Minimum	最大 Maximum
水稻 Rice	[180.97, 201.48]	[723.88, 805.94]	[155.00, 160.00]	[850.00, 870.00]	[700.02, 719.98]	[1 013.41, 1 074.83]
玉米 Maize	[1.30, 2.02]	[5.21, 8.07]	[2.30, 2.50]	[7.50, 8.70]	[6.96, 8.51]	[11.60, 15.47]
大豆 Soybean	[1.02, 1.70]	[4.09, 6.78]	[1.10, 1.70]	[4.80, 5.20]	[5.29, 7.05]	[9.40, 15.28]

表 4 单位调水量系统收益和系统惩罚系数

Table4 System net benefit and penalty rates per unit transferred water

元·m⁻³

水源 Water sources	水稻 Rice		玉米 Maize		大豆 Soybean	
	收益 Net benefit	惩罚 Penalty coefficient	收益 Net benefit	惩罚 Penalty coefficient	收益 Net benefit	惩罚 Penalty coefficient
地表水 Surface water	[2.28, 2.82]	[3.40, 3.78]	[68.47, 83.66]	[90.51, 101.14]	[48.28, 52.66]	[72.64, 75.70]
地下水 Ground water	[1.58, 2.12]	[4.10, 4.48]	[67.77, 82.96]	[91.21, 101.84]	[47.58, 51.95]	[73.34, 76.40]

2. 3. 3 不同来水水平时的可用水量确定

表 5 为预测年不同来水水平出现概率 p_{ik} 为 0.2、0.6、0.2 时，地表和地下水的可用水量。

表 5 不同流量水平下的可用水量

Table 5 Total available water in different flow levels

流量水平 Flow levels	概率 Probability	可用水量 Available water/(10 ⁶ m ³)	
		地表水 Surface water	地下水 Ground water
低 Low (L)	0.2	[240, 245, 250]	[804, 814, 824]
中 Middle (M)	0.6	[350, 353, 356]	[834, 846, 853]
高 High (H)	0.2	[470, 477, 484]	[934, 949, 964]

2. 3. 4 最优作物配水方案

在模型求解时，将模糊约束条件（6）的可信度水平 λ 取为[0.5,0.8]，求解式（13）～（18）得到模型结果。当 $\lambda=0.5$ 时，代表约束条件（4）的可信度 >0.5 ，相对应的违背约束的风险 $<50\%$ ，可用水量，即地表水和地下水之和，达到较高水平，不同作物缺水量取下限 D_{ijk}^- ，则对应系统收益上限值。而当 $\lambda=0.8$ 时，代表约束条件（4）的可信度 >0.8 ，违背约束风险 $<20\%$ ，可用水量较小，不同作物缺水量取上限 D_{ijk}^+ ，则对应系统收益下限值。当可信度水平为 0.5 时，系统收益最大，但缺水惩罚风险同样最大，当可信度水平为 0.8 时，系统收益相对较小，但惩罚风险相对较小。管理者可以根据自己想要达到的可信度水平对 λ 取值，以达到对系统收益和惩罚风险的不同侧重。

求解式（13）～（18）得到灌区地表水和地下水向不同作物配水的决策变量 z_{ijopt} 和 D_{ijkopt}^\pm ，然后据式（19）计算得到 3 种作物最优配水目标 W_{ijopt} ，据式（20）得到最优配置水量 A_{ijopt}^\pm 。将决策变量 z_{ijopt} 和 D_{ijkopt}^\pm 代入式（13）和式（15）得到系统最大收益值 f_{opt}^\pm ，见表 6。当 $z_{ij}=1$ 时，

最优配水目标为预先配水目标上限，系统最大收益较大，但预测年为枯水年时，作物配水量未能达到最优配水目标，会造成作物减产，经济惩罚风险较大；同理当 $z_{ij}=0$ 时，最优配水目标为预先配水目标下限，系统最大收益较小，惩罚风险相对较小。因此，最优配水目标与系统收益及惩罚风险相关联。

表 6 所示，对于水稻，地表水 z_{11} 为 0，即最优配水目标为预先配水目标下限值 $180.97\times10^6\text{ m}^3$ 。从表 3 中得到地表水与水稻之间渠道输水能力为 $[155.00\times10^6, 160.00\times10^6]\text{ m}^3$ ，即使取区间上限，配水目标也不能满足，因此为降低缺水风险，则需要放弃高收益，选择预先配水目标下限作为最优配水目标；而地下水 z_{21} 同样为 0，最优配水目标为 $723.88\times10^6\text{ m}^3$ ，从表 5 可得到当预测年净来水为高流量时，地下水可用水量为 $[934\times10^6, 949\times10^6, 964\times10^6]\text{ m}^3$ ，但需要保证地下水最小蓄水量为 $324\times10^6\text{ m}^3$ ，则地下水实际可用水量为 $[610\times10^6, 625\times10^6, 640\times10^6]\text{ m}^3$ ，则可用水量无法满足预先配水目标下限值，为降低缺水风险，选择预先配水目标下限作为最优配水目标。对于玉米， z_{12} 和 z_{22} 都为 1，由于可供水量充足，渠道输水能力较强，则惩罚风险较小，同时单位水量系统收益较大，因此将预先配水目标上限作为最优配水目标。对于大豆，地表水 z_{13} 为 1，最优配水目标为 $1.7\times10^6\text{ m}^3$ ，而渠道输水能力为 $[1.10\times10^6, 1.70\times10^6]\text{ m}^3$ ，当渠道输水能力取下限时，则会产生缺水，但最优配水目标却取上限值，说明相比惩罚风险，模型结果侧重高收益，愿意承担较小的惩罚风险；地下水同样符合该规律。 z 会受到很多因素影响，如水源可供水量、作物需水量、作物灌水时期等。枯水年地表水较少则地下水的使用将会增加，则作物地表水的 z 会变小，地下水 z 变大；当需水量较少时，则 z 值将会较小；又如若作物灌水时期不同，则各时期可供水量较为充足，与同时灌水相比 z 值相对较大。

表 6 作物配水方案
Table 6 Crop water distribution scheme

作物 Crops	水源 Water sources	来水水平 Flow levels	概率 Probability	最优配水目标 Optimal water distribution target/(10 ⁶ m ³)	缺水 Water shortage/(10 ⁶ m ³)	Z_{ijopt}	最优配置水量 Optimal allocation of water/(10 ⁶ m ³)
水稻 Rice	地表水 Surface water	低流量 Low	0.2	180.97	[54.69,64.09]	0	[116.88,126.28]
		中流量 Mid	0.6	180.97	[20.97,25.97]		[155.00,160.00]
		高流量 High	0.2	180.97	[20.97,25.97]		[155.00,160.00]
	地下水 Ground water	低流量 Low	0.2	723.88	[237.15,256.18]	0	[467.70,486.73]
		中流量 Mid	0.6	723.88	[203.15,226.18]		[497.70,520.73]
		高流量 High	0.2	723.88	[112.15,119.18]		[597.70,626.73]
玉米 Maize	地表水 Surface water	低流量 Low	0.2	2.02	0	1	2.02
		中流量 Mid	0.6	2.02	0		2.02
		高流量 High	0.2	2.02	0		2.02
	地下水 Ground water	低流量 Low	0.2	8.07	[0,0.57]	1	[7.50,8.07]
		中流量 Mid	0.6	8.07	[0,0.57]		[7.50,8.07]
		高流量 High	0.2	8.07	[0,0.57]		[7.50,8.07]
大豆 Soybean	地表水 Surface water	低流量 Low	0.2	1.70	[0,0.60]	1	[1.10,1.70]
		中流量 Mid	0.6	1.70	[0,0.60]		[1.10,1.70]
		高流量 High	0.2	1.70	[0,0.60]		[1.10,1.70]
	地下水 Ground water	低流量 Low	0.2	5.35	[0.15,0.55]	0.5	[4.80,5.20]
		中流量 Mid	0.6	5.35	[0.15,0.55]		[4.80,5.20]
		高流量 High	0.2	5.35	[0.15,0.55]		[4.80,5.20]

注：灌区地表水和地下水向水稻配水的决策变量 z_{11} 和 z_{21} 分别为 0 和 0，向玉米配水的决策变量 z_{12} 和 z_{22} 分别为 1 和 1，大豆配水的决策变量 z_{13} 和 z_{23} 分别为 1 和 0.5；当可信度水平为 [0.5,0.8] 时，系统最大收益 [1355.144×10⁶, 2371.792×10⁶] 元。

Note: Decision variable of distribution of surface water and groundwater is 0 and 0 to rice, 1 and 1 to maize, and 1 and 0.5 to soybean, respectively; When level of credibility is [0.5, 0.8], system maximum benefit is [1355.144×10⁶, 2371.792×10⁶] Yuan.

对于地下水向水稻配水（表 6），当预测年净来水分别为低流量（枯水年概率为 20%）、中流量（平水年概率为 60%）和高流量（丰水年概率为 20%）时，相对于最优配水目标 723.88×10⁶ m³，缺水分别为 [237.15×10⁶, 256.18×10⁶]、[203.15×10⁶, 226.18×10⁶] 和 [112.15×10⁶, 119.18×10⁶] m³。各典型年都存在不同程度缺水，随着可用水量增多缺水量有下降趋势，这是由于天然净来水增加，可用水量增加，缺水量便随之减少；对于地表水向水稻配水，当预测年净来水分别为低、中和高流量时，相对于最优配水目标 180.97×10⁶ m³，缺水分别为 [54.69×10⁶, 64.09×10⁶]、[20.97×10⁶, 25.97×10⁶]、[20.97×10⁶, 25.97×10⁶] m³，在中和高流量时缺水量相等，主要由于受到渠道输水能力的限制，尽管高流量时可用水量较多，但无法提供给水稻，因此缺水量相等。大豆 3 种来水情况下的缺水量相等原因与其相同，受到渠道输水能力限制。对于地表水和地下向玉米配水，3 种来水情况下都不存在缺水。模型将 3 种典型年出现的概率完全考虑其中，按所占比例进行计算，真实有效地反映了水资源系统中不同典型年来水的不确定性。

在预测年不同净来水条件下，水稻缺水最大，这主要由于水稻种植面积过大，水源可用水量难以满足其最优配水目标，大量缺水，将直接导致超采地下水以满足灌溉，会对地下水环境造成严重破坏。由表 6 可知，大豆地表水和地下水配置分别为 [1.10×10⁶, 1.70×10⁶]、[4.80×10⁶, 5.20×10⁶] m³，都已达到渠道输水能力上限值，虽然可用水量充足，但依然缺水，表明渠道输水能力同样是造成作

物缺水的重要原因之一，若将渠道输水能力提高，将有效提高水资源优化配置水平。

表 7 为 z 取为 0、 z_{opt} 、1 时系统最大收益值，即配水目标取为预先配水目标下限值、最优值及上限值时的系统最大收益，分别为 [1 178.776×10⁶, 2001.256×10⁶]、[1 355.144×10⁶, 2 371.792×10⁶] 和 [1 045.192×10⁶, 2 166.830×10⁶] 元。配水目标越大，则最大收益值的区间取值范围越大，这说明高收益伴随着高惩罚风险，反之亦然。模型结果可以有效地平衡收益与惩罚风险，并为灌区管理者提供最合理的配水方案。此外，系统最大收益值区间变化较大，可能还有其他两方面原因：1）模型求解的基础数据区间过大，通过模型求解后，最大收益值的区间会很大；2）由于水稻需水量很大，缺水时惩罚过于严重，导致收益区间过大。

表 7 不同配水目标下系统最大收益值
Table 7 Maximum system benefits under different water distribution targets

配水目标 Water target	决策变量 Decision variable	系统最大收益	
		系统最大收益下限 Lower limit of maximum system benefit/(10 ⁶ 元)	系统最大收益上限 Upper limit of maximum system benefit/(10 ⁶ 元)
下限值 Lower limit	0	1 178.776	2 001.256
最优值 Optimal value		1 355.144	2 371.792
上限值 Upper limit	1	1 045.192	2 166.830

3 结论与讨论

本文建立区间两阶段模糊随机规划模型，以此对红兴隆灌区地表水和地下水进行优化配置，模型使系统收

益与系统风险紧密联系在一起, 并且所得结果以区间形式给出, 为管理者提供合理的参考。对表 6 大豆不同水源最优配置水量分析, 地表水 $[1.10 \times 10^6, 1.70 \times 10^6]$ m^3 , 地下水 $[4.80 \times 10^6, 5.20 \times 10^6]$ m^3 , 不同水源都已达到渠道输水能力的上限值, 若渠道输水能力提高则最优配水目标及最优配置水量也将增加, 使系统收益增加。灌区基础设施建设不完善, 渠道输水能力较差, 导致作物缺水, 渠道输水能力的提高, 将极大提高水资源优化配置水平, 使系统收益增加; 不同来水水平下作物普遍存在缺水, 主要因为水稻种植面积过大, 需水量过大, 供给其他作物的水量减少, 当预测年为枯水年, 水稻会严重缺水, 惩罚风险相应会很大, 如预测年来水为低流量时, 地表水向水稻配水, 缺水量为 $[54.69 \times 10^6, 64.09 \times 10^6]$ m^3 , 因缺水造成系统惩罚非常大, 系统收益会大幅度减少, 因此, 管理者应适当调整作物的种植结构。

在研究灌区水资源优化配置中, 为获得基础数据或使计算方便, 笔者进行了一些必要假设, 比如, 假设 3 种作物灌水时期相同, 水源同时向作物配水。事实上, 作物种植时间不同可能会导致需水时期存在差异, 水稻需水时间要早于玉米和大豆, 水稻需要泡田, 尽管泡田水量已经考虑在模型中, 但同样会对模型结果产生影响, 由于水稻初期泡田, 水源会进行及时补充, 当中期水源向 3 种作物配水时, 水源压力将会减少, 使缺水量变小, 实际的系统最大收益要比计算结果大。同时, 红兴隆农场每年过境水量同样十分丰富, 但由于利用方式、方法及技术的限制, 目前利用很少, 若对过境水加以利用, 同样是解决作物缺水的重要途径。由于灌区农业化肥的使用, 生态环境造成非常严重的破坏, 在今后的研究中, 有待将灌区的经济效益与环境效益进行权衡, 使水资源优化配置更加符合实际。

[参 考 文 献]

- [1] 曾雪婷, 李永平, 乔祥利, 等. 基于不确定性规划的生态灌区水资源配置模型及运用[C]. 天津: 中国水利学会, 2014.
- [2] Lu H W, Huang G H, He L. An inexact programming method for agricultural irrigation systems under parameter uncertainty[J]. Stoch Environ Res Risk Assess, 2009, 23(8): 759—768.
- [3] 陈晓楠, 段春青, 邱林, 等. 基于粒子群的大系统优化模型在灌区水资源优化配置中的应用[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 103—106.
Chen Xiaonan, Duan Chunqing, Qiu Lin, et al. Application of large scale system model based on particle swarm optimization to optimal allocation of water resources in irrigation areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(3): 103—106. (in Chinese with English abstract)
- [4] 顾文权, 邵东国, 黄显峰, 等. 水资源优化配置多目标风险分析方法研究[J]. 水利学报, 2008, 39(3): 339—345.
Gu Wenquan, Shao Dongguo, Huang Xianfeng, et al. Multi-objective risk assessment on water resources optimal deployment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(3): 339—345. (in Chinese with English abstract)
- [5] 邵东国, 贺新春, 黄显峰, 等. 基于净效益最大的水资源优化配置模型与方法[J]. 水利学报, 2005, 36(9): 1050—1056.
Shao Dongguo, He Xinchun, Huang Xianfeng, et al. Optimal water resources deployment model based on maximal net benefit[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(9): 1050—1056. (in Chinese with English abstract)
- [6] 栗晓玲, 康绍忠. 石羊河流域多目标水资源配置模型及其应用[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 128—132.
Su Xiaoling, Kang Shaozhong. Multi-objectives allocation model of water resources and its application in the Shiyang River basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(11): 128—132. (in Chinese with English abstract)
- [7] 高玉芳, 张展羽. 混沌人工鱼群算法及其在灌区优化配水中的应用[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 7—11.
Gao Yufang, Zhang Zhanyu. Chaotic artificial fish-swarm algorithm and its application in water use optimization in irrigated areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(6): 7—11. (in Chinese with English abstract)
- [8] 余艳玲. 灌区水资源优化配置模型的建立及应用[J]. 云南农业大学学报, 2010, 25(5): 703—706.
Yu Yanling. Establishment and application of water resources optimal allocation model in irrigation district[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2010, 25(5): 703—706. (in Chinese with English abstract)
- [9] 李滕, 解建仓, 杨柳. 基于蚁群-粒子群混合算法的水资源优化配置研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2015, 43(1): 229—234.
Li Meng, Xie Jiancang, Yang Liu. Optimal allocation of water resources based on ant colony-particle swarm algorithm[J]. Journal of Northwest A&F University: NatSciEd, 2015, 43(1): 229—234. (in Chinese with English abstract)
- [10] 付银环, 郭萍, 方世奇, 等. 基于两阶段随机规划方法的灌区水资源优化配置[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 73—81.
Fu Yinghuan, Guo Ping, Fang Shiqi, et al. Optimal water resources planning based on interval-parameter two-stage stochastic programming[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(5): 73—81. (in Chinese with English abstract)
- [11] Maqsood Imran, Huang Guohe, Huang Yuefei. ITOM an interval-parameter two-stage optimization model[J]. Stoch Environ Res Risk Assess, 2005, 19(4): 125—133.
- [12] 刘年磊, 蒋洪强, 吴文俊. 基于不确定性的水资源优化配置模型及其实证研究[J]. 中国环境科学, 2014, 34(6): 1607—1613.
Liu Nianlei, Jiang Hongqiang, Wu Wenjun. Empirical research of optimal allocation model of water resources under uncertainties[J]. China Environmental Science, 2014, 34(6): 1607—1613. (in Chinese with English abstract)
- [13] 张静, 黄国和, 刘烨, 等. 不确定条件下的多水源联合供水调度模型[J]. 水利学报, 2009, 40(2): 160—165.
Zhang Jing, Huang Guohe, Liu Ye, et al. Dispatch model for combined water supply of multiple sources under the conditions of uncertainty[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(2): 160—165. (in Chinese with English abstract)

- [14] Huang G H, Loucks D P. An inexact two-stage stochastic programming model for water resources management under uncertainty[J]. Civil Engineering and Environmental Systems, 2000, 17: 95—118.
- [15] Li W, Li Y P, Li C H, et al. An inexact two-stage water management model for planning agricultural irrigation under uncertainty[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(7): 1905—1914.
- [16] Zhang L, Li C Y. An inexact two-stage water resources allocation model for sustainable development and management[J]. Water Resources Management, 2014, 28(10): 3161—3178.
- [17] Li C Y, Zhang L. An inexact two-stage allocation model for water resources management under uncertainty[J]. Water Resources Management, 2015, 29(3): 1823—1841.
- [18] 黄冠华. 模糊线性规划在灌区规划与管理中的应用[J]. 水利学报, 1991, 17(5): 36—40.
- [19] Wang D, Adams B J. Optimization of real-time reservoir operations with markov decision processes[J]. Water Resources Research, 1986, 22: 345—352.
- [20] Liu B. Uncertainty theory[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- [21] Hang G H. An interval parameter water quality management model[J]. Engineering Optimization, 2007, 26(2): 79—103.
- [22] 刘姣, 刘东. 基于混合遗传算法的红兴隆分局水资源优化配置[J]. 水土保持研究, 2013, 20(6): 177—181.
- [23] Liu Jiao, Liu Dong. Multi-objective Optimization of Hongxinglong branch bureau water resources based on Mixed Genetic Algorithm[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(6): 177—181. (in Chinese with English abstract)
- [24] 王秋梅. 三江平原水土资源优化配置研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学水利与建筑学院, 2009.
- [25] 刘东, 付强, 马永胜, 等. 三江平原井灌区水资源系统分析与可持续利用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [26] 黑龙江省质量技术监督局. 黑龙江省用水定额: DB23/T727-2003[S]. 哈尔滨: 黑龙江省质量技术监督局, 2003.

Multi-water conjunctive optimal allocation based on interval-parameter two-stage Fuzzy-stochastic programming

Li Chenyang, Zhang Zhixin

(College of Water Conservancy and Architectural, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Rapid population growth and economy development has led to increasing reliance on water resources. It is even aggravated for agricultural irrigation systems where more water is necessary to support the increasing population. In this study, an interval-parameter two-stage Fuzzy-stochastic optimization model was developed for dispatching the underground and surface water systems for different crops in Hong Xinglong irrigation of China under the conditions of uncertainty and complexity. In the model, the maximal system benefit was regarded as the objective function and 3 methods of probability density function, discrete intervals and fuzzy sets were introduced into the two-stage linear programming framework to resolve uncertain issues. The model allocated a predefined water to crops in the first stage, according to benefit and punishment for water shortage condition to adjust the water supply in the second stage, making the system reach the balance of systems benefit and the risk of punishment, the process of water allocation for multiple crops was simulated, meanwhile, the allocation of water from various sources was optimized. Because inflows water was of obvious probability characteristics in irrigation area, the model took into account of the random of inflow, and assumed that the probability of occurrence for high, middle and low levels were 0.2, 0.6 and 0.2. Since the quantity of stream flows, water requirement of crop and available water supply were uncertain, and uncertainties might also exist in system benefits and costs, the uncertain parameters of above-mentioned were described by interval variables. The available water in the irrigation area was represented by fuzzy sets based on credibility theory. The different probabilities, discrete interval number and fuzzy sets together were used to build the irrigation multi-water resource, multi-crop water distribution model. The model was solved by the method of linear programming, the optimal distribution scheme of water was achieved and the maximum benefit was $1\ 355.144 \times 10^6 - 2\ 371.792 \times 10^6$ RMB. It could reflect not only uncertainties in water resources system, but also provide an effective linkage between conflicting economic benefits and the associated penalties attributed to the violation of the predefined water distribution target. Meanwhile, the results were presented in the forms of interval number, proving a more broad decision space for decision makers. Moreover, the results indicated that farmer planted a large number of high-yield and high water consumption of crops such as rice and corn in irrigation area and single planting structure would lead to the risk of the decrease of crop production in dry year, the model was valuable for supporting the adjustment or justification of the existing irrigation patterns and identify a desired water allocation plan for agricultural irrigation under uncertainty. Compared with the other traditional two-stage model, this model had advantages: 1) it considered uncertain factors as much as possible, made the model more close to actual condition; 2) The model effectively relieved groundwater pressure of water supply by utilizing surface water and groundwater; 3) The model results would suggest managers reducing planting area of high water consumption crops; 4) Water resources management by system benefit would stimulate employee enthusiasm; and 5) The model data was relatively easy to access.

Keywords: irrigation; water resources; uncertainty analysis; interval-parameter two-stage Fuzzy-stochastic programming; multi-water resource; optimal allocation