

基于模糊可信度约束的不确定性农业 水资源规划模型研究

李小萌, 何理, 卢宏玮

(华北电力大学 可再生能源学院, 北京 102206)

摘要: 水资源短缺问题是制约农业经济发展的重要因素,因此在水资源规划中应着重考虑水资源利用效率与农业效益之间的平衡问题。研究提出了基于模糊可信度约束算法建立的农业水资源规划模型,通过调节用水量与农业效益之间的平衡关系,实现农业效益最大化。所建立的模型改进了以往规划方法的不足,并提出不同可信度水平 λ 值以及不同情景下的灌溉系统分析,可以为决策者提供重要参考依据。实例研究表明:乌鲁木齐某地农业灌溉系统中3类作物的灌溉配比对最终收益利润总和的影响较大,可信度水平 λ 是权衡收益与成本的重要因素。通过研究可信度水平 λ 值对模型的影响,可为决策者提供更多的水资源管理优化备选方案,并有效提高农业灌溉系统的社会、经济和环境效益。

关键词: 水资源规划; 农业灌溉; 可信度; 不确定性; 乌鲁木齐

中图分类号: TV212.54

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)04-0108-07

Research on plan model of water resources of uncertainty agriculture based on fuzzy and credibility constrained

LI Xiaomeng, HE Li, LU Hongwei

(School of Renewable Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The problem of water resources shortage is an important factor which constrains the development of agriculture economy so that the balance problem between the efficiency of water resources utilization and agriculture. The paper proposed to set up plan model of agriculture water resources based on the method of fuzzy credibility-constrained. The method realized the greatest agriculture benefit through regulating the balance problem between water demand and agriculture efficiency. The established model improved the shortcomings of planning method in the past, and set up an irrigation systems under different credibility levels of λ value and different scenarios, which can provide important reference for decision-makers. The results show that the irrigation ratio of three categories in the irrigation system of a place of Urumqi has greater impact on the final sum of the profit gain. The credibility level λ is the important factor to weigh the benefits and costs. The study on the impact of confidence level λ on the model can provide more options to optimize water management for decision makers and improve the social, economic and environmental benefits of agricultural irrigation system.

Key words: water resources management; agricultural irrigation; credibility; uncertainty; Urumqi

随着工业和农业经济的快速发展及水资源需求的增长,我国可利用水资源日益短缺,这已成为制约社会经济发展的一项重要因素。解决好水资源短缺问题,改善现有水资源规划方法,合理分配灌溉用水,协调经济和资源之间的平衡关系,是我国可持续发展战略的最重要内容^[1]。目前,诸多学者利用数

学模型解决水资源规划问题,以经济效益为目标函数建立数学规划模型进而得到最优解^[2-3]。但是,由于农业水资源规划系统中包含了诸多复杂因素,如水资源流量的波动、作物种植面积及产值、作物灌溉成本消耗、抽水井工作效率、地下水含水层的水流波动、人力资源的变化等^[4-5]。这些复杂因素导致

收稿日期:2014-02-20; 修回日期:2014-03-25

基金项目:环保部公益性行业科研专项(201309063)

作者简介:李小萌(1990-),女,北京人,硕士研究生,研究方向:水资源规划、城市环境总体规划。

通讯作者:何理(1976-),男,湖南人,教授,研究方向:地下水污染与控制、土壤修复、能源与城市环境总体规划等。

农业水管理系统中的不确定性,如自然事件的随机性特征、参数及目标的估测误差、目标及约束条件的模糊性等,都将使系统复杂化^[6],影响计算农业效益及配水量的误差,造成整体目标与真实值的偏离。合理地分析和解决系统复杂性及不确定性,不仅能够使水资源规划系统更加精细完善,为水资源分配提供更有利的方案,还能为决策者提供合理的规划建议^[7-8]。

近年来,大量用于处理系统不确定性的数学优化方法不断提出^[9-11],为水资源规划问题提供了重要的理论支持。在诸多优化方法中,模糊可能性理论作为替代概率论的一种切实可行的数学方法已被成功用于解决各领域的诸多不确定性问题^[12-15]。本研究将以新疆乌鲁木齐某地农业灌溉系统为例,建立一套基于模糊可信度约束方法的水资源规划模型(Fuzzy Credibility Constrained Programming, FC-CP)。该模型着重考虑灌溉用水及农业效益的平衡关系,通过水资源的合理分配实现规划系统利益的最大化。实例研究还将设置多个情景,详细分析模糊可信度约束方法对灌溉系统的影响。

1 模糊可信度约束规划(FCCP)算法

模糊可信度约束规划方法(Fuzzy credibility constrained programming)是用于系统模型中数据存在不确定性及无法获取精确的数据随机分布时的一种数学算法。模糊可信度理论始于刘保碇的《uncertainty theory》^[16]。经演变的模糊理论主要分为3种方法,分别为:可能性、必要性及可信度方法。考虑两个模糊变量分别为 \tilde{a} 和 \tilde{b} 服从关系函数 μ ,模糊事件 $\tilde{a} \leq \tilde{b}$ 的可能性定义为:

$$\text{Pos}\{\tilde{a} \leq \tilde{b}\} = \text{Sup}\{\min(\mu_a(x), \mu_b(y)) \mid x, y \in R, x \leq y\} \quad (1)$$

式中:Sup代表最小上界^[15]。 $\tilde{a} \leq \tilde{b}$ 的对立事件“ \tilde{a} 小于等于 \tilde{b} 不可能性是真”可以定义为:

$$\text{Nec}\{\tilde{a} \leq \tilde{b}\} = \text{inf}\{\max(\mu_a(x), 1 - \mu_b(y)) \mid x, y \in R, x < y\} \quad (2)$$

等价定义为:

$$\text{Nec}\{\tilde{a} \leq \tilde{b}\} = 1 - \text{Pos}\{\tilde{a} > \tilde{b}\} \quad (3)$$

考虑一组三角模糊数 (t, t, \bar{t}) ,关系函数为:

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x - t_1}{t_2 - t_1}, & \text{if } t_1 \leq x < t_2, \\ \frac{x - t_3}{t_2 - t_3}, & \text{if } t_2 \leq x \leq t_3, \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

将 \tilde{a} 与 \tilde{b} 代入上述三角模糊数中,成为 $\tilde{a} = (a_1, a_2, a_3)$ 与 $\tilde{b} = (b_1, b_2, b_3)$,则 $\tilde{a} \leq \tilde{b}$ 的可能性为:

$$\text{Pos}\{\tilde{a} \leq \tilde{b}\} = \begin{cases} 1 & \text{if } a_2 \leq b_2 \\ \delta = \frac{b_3 - a_1}{b_3 - b_2 + a_2 - a_1}, & \text{if } a_2 > b_2, a_1 \leq b_3 \\ 0 & \text{if } a_1 > b_3 \end{cases} \quad (5)$$

从公式(3)可知 $\tilde{a} \leq \tilde{b}$ 的必要性和可信度可以分别定义为:

$$\text{Nec}\{\tilde{a} \leq \tilde{b}\} = \begin{cases} 1 & \text{if } a_3 \leq b_1 \\ \delta' = \frac{b_2 - a_2}{a_3 - a_2 + b_2 - b_1} & \text{if } a_2 < b_2, a_3 > b_1 \\ 0 & \text{if } a_2 \geq b_2 \end{cases} \quad (6)$$

可能性和必要性方法存在一定的局限性,即它们并不是自对偶的。根据可能性的定义,存在这样一种情况:模糊事件并不是肯定会发生的,甚至当可能性的取值为1时(即当 $\text{Pos}\{\tilde{a} \leq \tilde{b}\} = 1$,存在 $a_2 \geq b_2$)。此外, $a_2 \geq b_2$ 在任何情况下利用可能性方法都无法定义,而必要性方法则可以反映这种情况。因此,可以综合这两种方法,采用刘保碇和刘彦奎提出的改进可信度理论,即将可能性与必要性取平均值:

$$\text{Cr}\{\tilde{a} \leq \tilde{b}\} = \frac{1}{2}(\text{Pos}\{\tilde{a} \leq \tilde{b}\} + \text{Nec}\{\tilde{a} \leq \tilde{b}\}) \quad (7)$$

可信度在很多研究中可以代替可能性及必要性,从而有效解决模糊问题^[17]。根据可信度的概念,模糊事件的概率可以表示如下:

$$\max \sum_{j=1}^n \tilde{c}_j x_j \quad (8)$$

$$\text{Cr}\left\{\sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} x_j \leq \tilde{b}_i\right\} \geq \lambda_i, (i = 1, \dots, m) \quad (9)$$

$$x_j \geq 0, (i = 1, \dots, n) \quad (10)$$

式中: $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 是向量模式的非模糊决策变量; \tilde{c}_j 是目标函数中的系数; $\tilde{a}_{ij}, \tilde{b}_i$ 是约束中的模糊系数。这里, i 是约束个数, j 是变量个数。公式(8)

是优化目标函数,公式(9)体现了约束 $\sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} x_j \leq \tilde{b}_i$ 的可信度应大于等于 λ_i 。根据公式(7)的定义,考虑2个模糊变量(分别为 \tilde{a} 和 \tilde{b})隶属于关系函数 μ 模糊集的可信度,以 $\tilde{a} \leq \tilde{b}$ 为特征,可得如下公式:

$$\text{Cr}\{\tilde{a} \leq \tilde{b}\} =$$

$$\begin{cases} 1 & \text{if } a_3 \leq b_1 \\ \frac{a_3 - 2a_2 + 2b_2 - b_1}{2(a_3 - a_2 + b_2 - b_1)}, & \text{if } a_2 \leq b_2, a_3 > b_1 \\ \frac{b_3 - a_1}{2(b_3 - b_2 + a_2 - a_1)} & \text{if } a_2 > b_2, a_1 < b_3 \\ 0 & \text{if } a_1 \geq b_3 \end{cases} \quad (11)$$

可信度方法可以在输入模糊集形式的数据以后能够体现事件的可靠性。相比于可能性理论和必要性理论,可信度方法的优点是,当模糊事件的可信度达到1时模糊事件会确定发生,而当可信度为0时事件一定不会发生^[18]。在可信度约束(9)中,基于可信度定义及模糊规律,可以有:

$$\sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} x_j = \left(\sum_{j=1}^n a_{ij1} x_j, \sum_{j=1}^n a_{ij2} x_j, \sum_{j=1}^n a_{ij3} x_j \right) \quad (12)$$

将 $\sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} x_j$ 替换为 $\tilde{t}_i = (t_{i1}, t_{i2}, t_{i3})$, 公式(9) 转化为:

$$\text{Cr}\{\tilde{t}_i \leq \bar{b}_i\} \geq \lambda_i, \quad (i = 1, \dots, m_1) \quad (13)$$

令 $\mu_i = \text{Cr}\{\tilde{t}_i \leq \bar{b}_i\}$ 表示变量 \bar{b}_i 对 \tilde{t}_i 的可信度。一般来说,为了使可信度有意义,该值应大于0.5。根据公式(11),对于每个 $1 \geq \mu_i \geq \lambda_i \geq 0.5$ 可有如下关系:

$$\frac{t_{i3} - 2t_{i2} + 2b_{i2} - b_{i1}}{2(t_{i3} - t_{i2} + b_{i2} - b_{i1})} \geq \lambda_i \quad (14)$$

在决策分析中,最好的反应决策者参数选择的方法是建立可能性的不同等级^[19]。通常情况下,对数据的选择来自人类的主观判断,因此决策者可以选择优先的约束可信度水平,例如:

表1 可信度水平分类表

可信度水平 λ	满足水平
$\lambda = 1.0$	完全满足约束
$\lambda = 0.9$	几乎满足约束
$\lambda = 0.8$	基本满足约束
$\lambda = 0.7$	非常满足约束
$\lambda = 0.6$	比较满足约束
$\lambda = 0.5$	满足约束/不满足约束

根据实际问题可以分别选取可信度 $\lambda = 0.8, 0.9, 1.0$ 等水平进行具体分析。总体来说,FCCP 模型可以分解为以下几个步骤:

步骤1. 列出模型公式(8)、(9)、(10);

步骤2. 根据案例实际情况,在约束函数中替换

模糊参数 \tilde{c}_j , 将约束转换为可信度约束,即公式(14);

步骤3. 在不同可信度水平下计算不同情境下的模型最优解;

步骤4. 根据最优解得出最佳分配方案。

2 FCCP 模型与案例应用

2.1 实际案例基本概况

本文主要针对新疆乌鲁木齐某灌区的地下水资源灌溉分配问题。该灌区土地面积约为 210 km², 规划为 4 块面积不等的子灌区, 分别为 6 242、6 579、4 378、4 326 hm²。灌区所采用的灌溉用水主要来源于为乌拉泊地下水水库, 乌拉泊洼地是一个典型的山前拗陷盆地, 地下水位埋深由山前带的 200 m, 向东北方向至乌拉泊水库变为 5m 左右。含水层厚度依次为 200, 150, 75, > 20 m, 渗透系数山前带为 20 m/d, 洼地中部 90 ~ 200 m/d, 在乌拉泊溢出带小于 10 m/d, 富水性尚佳, 单井出水量平均在 5 000 m³/d 以上。乌拉泊洼地是一个封闭的储水构造单元, 地下水储存量达 214 亿 m³, 调节储量达 7 000 万 m³, 是调蓄能力极强的天然地下水水库。该灌区主要种植作物为玉米、棉花和哈密瓜。每个灌区设有 3 处井, 井深约为 7 ~ 10 m。模型将分为 3 个规划年进行。为解决该灌区的地下水资源分配问题, 考虑农业灌溉、作物成本、政府补贴、地下水水资源利用等不确定性因素, 可以建立基于模糊可信度约束的不确定性水资源规划模型(FCCP)。

2.2 建立数学模型

规划采用模糊可信度规划方法, 以经济收益作为规划目标, 即: 模型目标最大值等于作物收益与作物种植灌溉成本之差。总收益来源于 4 个子灌区内 3 类作物的单位收益与灌溉面积之积。模型另外考虑了政府提供的农业补贴, 具体数据参考表 2。

表2 政府农业补贴参考取值表元/hm²

种植作物名称	政府农业补贴		
	第一规划年 (k = 1)	第二规划年 (k = 2)	第三规划年 (k = 3)
玉米	300.0	300.0	300.0
棉花	150.0	150.0	150.0
哈密瓜	0	0	0

2.2.1 目标函数

$$\max f = B - T \quad (15)$$

$$B = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^3 \sum_{w=1}^3 Q_{ijkw} W_{ijkw} n_{ijkw} +$$

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^3 \sum_{w=1}^3 S_{ik} A_{ijkw} n_{ijkw} \quad (16)$$

$$T = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^3 \sum_{w=1}^3 C_{ijkw} W_{ijkw} n_{ijkw} + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^3 \sum_{w=1}^3 M_{ik} A_{ijkw} n_{ijkw} \quad (17)$$

$$A_{ijkw} = W_{ijkw} D_{ijkw} \quad (18)$$

式中: $\max f$ 为每个规划年的最大利润值; Q_{ijkw} 为第 i 类作物在第 j 类灌区第 k 个规划年从第 w 个井取水带来的作物产值,元/ m^3 ; C_{ijkw} 为第 i 类作物在第 j 类灌区第 k 个规划年从第 w 个井取水的成本(元),一般包括输水、泵抽水等消耗; W_{ijkw} 为本模型的决策变量,代表第 i 类作物在第 j 类灌区第 k 个规划年从第 w 个井获取的配水量, m^3 ; n_{ijkw} 为第 i 类作物在第 j 类灌区第 k 个规划年从第 w 个井配水的有效利用系数; M_{ik} 为第 i 类作物在第 k 个规划年的物质消耗,元,包括化肥农药等; A_{ijkw} 为第 i 类作物在第 j 类灌区第 k 个规划年从第 w 个井取水的种植面积, hm^2 ; S_{ik} 为第 i 类作物在第 k 个规划年的单位政府补贴,元/ hm^2 。

2.2.2 约束条件

(1) 灌区配水量约束:

灌区配水总量不应超过供水量,表示为:

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^3 \sum_{w=1}^3 W_{ijkw} n_{ijkw} \leq U \quad (19)$$

灌区配水总量应大于最小供水量,表示为:

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^3 \sum_{w=1}^3 W_{ijkw} n_{ijkw} \geq L \quad (20)$$

式中: U 及 L 分别为最大和最小供水量, m^3 ,其值按每个规划年的不同条件进行调整。

(2) 面积约束:

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^3 \sum_{w=1}^3 A_{ijkw} n_{ijkw} \geq K_{ij} \quad (21)$$

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^3 \sum_{w=1}^3 A_{ijkw} n_{ijkw} \leq J_{jk} \quad (22)$$

种植面积需小于实际土地面积,由于不同的灌区种植面积不同,此约束主要根据灌区的土地面积决定。

(3) 物质消耗约束:

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^3 \sum_{w=1}^3 C_{ijkw} + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^3 \sum_{w=1}^3 M_{ik} A_{ijkw} \leq \sum_{i=1}^3 D_k \quad (23)$$

总消耗包括灌水成本和物质消耗之和,不能超过总成本预算。式中, D_k 表示第 k 个规划年内的预算总额(元)。

(4) 水位约束:

$$H_{0,jk} + \alpha_{jk} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^3 \sum_{w=1}^3 W_{ijkw} \leq H_{m,jk} \quad (24)$$

式中: α_{jk} 为水位下降系数(详细数据参考表 3)。有数据表明,过多的地下水开采导致地下水资源逐渐耗尽并带来一系列不良后果,因此本模型专门限制了地下水的开采利用。该灌区最初水位通常为 5~7 m 深,最终水位可达 10~12 m。

表 3 水位下降系数 α 参考取值表

$m, 10^{-5}$

规划年		灌区 1	灌区 2	灌区 3	灌区 4
1	初始	5.00	6.08	7.05	8.06
2	水位	5.02	6.11	7.09	8.09
3		5.08	6.09	7.08	8.09
1	最终 水位	(6.50,6.80,7.04)	(7.02,7.82,7.89)	(8.00,8.50,9.80)	(9.31,9.52,9.82)
2		(6.51,6.82,7.11)	(7.21,7.80,7.91)	(8.02,8.60,8.83)	(9.25,9.45,9.79)
3		(6.49,6.79,7.08)	(7.09,7.77,7.90)	(8.19,8.86,8.92)	(9.00,9.12,9.66)
1	水位 下降 系数	(0.33,0.36,0.39)	(0.29,0.32,0.35)	(0.34,0.39,0.42)	(0.32,0.38,0.41)
2		(0.33,0.36,0.39)	(0.29,0.32,0.35)	(0.34,0.39,0.42)	(0.32,0.38,0.41)
3		(0.33,0.36,0.39)	(0.29,0.32,0.35)	(0.34,0.39,0.42)	(0.32,0.38,0.41)

通常水位下降系数 α_{jk} 由于泵的抽吸误差或其他因素导致不确定性的存在,本研究将 α_{jk} 取模糊数并利用模糊可信度算法进行计算。因此,式(24)可改写为:

$$H_{0,jk} + \tilde{\alpha}_{jk} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^3 \sum_{w=1}^3 W_{ijkw} \leq \widetilde{H}_{m,jk} \quad (25)$$

式中: $H_{0,jk}$ 为第 j 灌区在第 k 个规划年的最初水位; $H_{m,jk}$ 为第 j 灌区在第 k 个规划年的最终水位。

本研究所需要的参数取值主要来源于 3 个部分:①统计年鉴,主要参考了 1995-2005 年《新疆统计年鉴》及《乌鲁木齐统计年鉴》;②参考文献,包括 2013、2014 年来相关区域的农业灌溉科研成果。③

本研究另采用了部分模糊参数,主要通过对其历史数据的分析归纳,得出其模糊隶属度分布特征,并将其应用到所建立的模型中。

3 结果与分析

模型运算结果如表4所示。整体来看,棉花相比于其他两类作物获得的配水量更多,最大配水量约为136 990 m³,而哈密瓜获得的配水量最小,普遍只有1 000 m³水量。此外,灌区2和灌区3普遍获得较多的配水量,而灌区1获得的配水量较少。这是由于4个灌区所处的不同地理位置、与地下水库的距离、水井的抽水和输水系统的运输能力等差异共同导致。具体来说,第一规划年内的3类作物普遍获得水量分配较平均,而第二规划年内大部分的水量被分配给玉米和棉花,哈密瓜所获得的水量很少;第三规划年内棉花的配水量有所增加,哈密瓜的配水量持续降低。由此可见,随着时间的推移,国家土地规划政策和相关用水制度对3类作物的灌溉水量约束加强。棉花相比于另外两类作物收益更高,因此所获得的水量更多,而哈密瓜相比之下成本高于另外两类作物,利润相比更低,因此为了达到系统利益最大化,便会减少或停止该作物的水量投入。下图1~5将分别对规划模型和模糊可信度方法的应用进行结果分析,为决策者提供多个对比方案。决策者可以根据当地实际情况,选择适宜的水量分配方案,以达到系统利益的最优化。

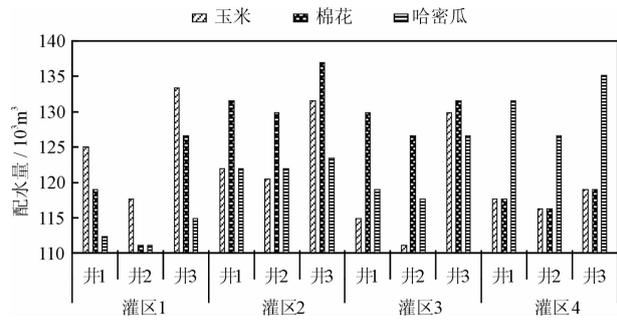
3.1 灌溉井分析

图1为不同灌区各个井的灌溉配水量分配图。由上文所述,当 $\lambda = 0.8$ 时获得的收益最大,由此可以分析此时各个井的灌水分配情况。每口井设有抽水蠕动泵,抽水泵之间的细微误差以及地下水位的各类不确定条件(含水层波动、水流变化、土壤条件等)所导致的地下水位系数模糊,是导致每口井对其灌溉范围的配水量不同的主要原因。从图1中,综合4个灌区可以得出,棉花一直都获得最多的配水量,说明棉花相对于其他两类作物需水量更大,相对收益也更高。同时,相对于其他两口井,3号井输出了更多的水。以灌区1为例,3号井所输出的水量最大,玉米的配水量约为1 330万 m³,分别为1号井和2号井玉米配水量的1.064和1.137倍;棉花配水量约为1 260万 m³,分别是1号井和2号井棉花配水量的1.059和1.135倍;哈密瓜配水量约为1 150万 m³,分别是1号井和2号井哈密瓜配水量的1.017和1.027倍。由此可以得出:①不同井之间

有微小的抽吸能力差异,3号井的抽水能力可能强于其它两个井;②每个灌区的3号井都是该灌区的主要灌溉井,另外两个井则主要用于辅助灌溉;③不同地区的地下水污染情况不同,1、2号井的地下水及水井内可能有更多的污染和腐蚀,需加强监测水平,甚至需要对周边土壤环境进行监测和修复;④地下水位的空间变化会对不同区域井的抽水能力造成影响,同样,地下水位存在的不确定性也是导致配水量差异的关键因素。

表4 最优配水方案

作物	时期	灌区	配水量		
			井1	井2	井3
10 ³ m ³					
玉米	第一规划年	灌区1	125.00	1.18	133.33
		灌区2	66.92	1.20	1.32
		灌区3	114.94	1.11	1.30
		灌区4	117.65	1.16	119.05
	第二规划年	灌区1	125.00	13.54	1.33
		灌区2	121.95	1.20	2.86
		灌区3	114.94	5.24	1.30
		灌区4	1.18	1.16	119.05
	第三规划年	灌区1	112.37	1.18	1.33
		灌区2	121.95	1.20	1.32
		灌区3	57.21	1.11	1.30
		灌区4	1.18	1.16	1.19
棉花	第一规划年	灌区1	1.19	49.04	1.27
		灌区2	131.58	129.87	136.99
		灌区3	1.30	67.48	1.32
		灌区4	24.95	116.28	1.19
第二规划年	灌区1	119.05	111.11	126.58	
	灌区2	131.58	129.87	136.99	
	灌区3	3.90	126.58	131.58	
	灌区4	1.18	116.28	115.12	
第三规划年	灌区1	119.05	111.11	126.58	
	灌区2	131.58	129.87	4.72	
	灌区3	129.87	126.58	131.58	
	灌区4	117.65	116.28	29.66	
哈密瓜	第一规划年	灌区1	112.36	1.11	75.53
		灌区2	1.22	1.22	73.44
		灌区3	119.05	64.03	1.27
		灌区4	1.32	1.27	1.35
第二规划年	灌区1	1.12	1.11	1.15	
	灌区2	1.22	1.22	1.23	
	灌区3	1.19	1.18	1.27	
	灌区4	1.32	1.27	1.35	
第三规划年	灌区1	1.12	1.11	1.15	
	灌区2	9.69	1.22	123.46	
	灌区3	1.19	1.18	1.27	
	灌区4	1.32	1.27	1.35	

图1 不同灌区及井配水量分配图($\lambda = 0.8$)

3.2 种植面积分析

图2、3、4表示的是各规划年内当可信度水平取0.8、0.9、1.0时不同灌区面积的最优分配值。在3个规划年内,种植面积始终优先给棉花。

第二规划年内玉米获得了更多的种植面积,而哈密瓜始终种植较少。这是由于,虽然棉花相对于其他两类作物需水量较大但收益更高,而哈密瓜的最低面积分配可能是由于配水量总额的限制,以及优化过程中3类作物配比之间的相互约束。对比4个灌区可以明显得出,3类作物的第二灌区一般可以获得更多的面积分配。

以棉花为例,第一规划年内棉花的种植面积较其他两类作物小,而灌区1从 $\lambda = 0.8$ 到0.9时,面积分配趋于稳定,但当 $\lambda = 1.0$ 时面积分配大量减少,灌区2的面积分配在 $\lambda = 1.0$ 时得到了明显提升,灌区3呈现出与灌区1相似的趋势,而灌区4则近似于灌区2。棉花的种植面积分配在第二规划年得到了提升,当 λ 取0.8~1时灌区1始终保持稳定,处于4个灌区面积分配的最大值(约为500 hm^2),灌区2次之,当 λ 从0.8变为1时,灌区面积由485 hm^2 下降了59.7%至195 hm^2 。灌区3的面积分配始终趋于平稳(约为200 hm^2),而灌区4的面积分配在 λ 取1时大量增加,从5 hm^2 增加到238 hm^2 。

在第三规划年内,经过整体规划的效益及成本考虑和调整,棉花的面积分配达到了最大值。 λ 取0.8~1.0时,灌区1的面积分配几乎持平,灌区2、3、4的面积分配在 λ 取0.8~0.9时均保持稳定,在 λ 取1.0时,分别减小72%、65%、38%。

总体看来,随着规划年的推进,整体种植面积趋于下降,这是由于国家土地规划的相关政策约束。4个灌区的种植面积逐渐趋于平衡,主要是由于随着时间的推进,在4个灌区之间逐渐寻求经济效益最优,得到最终的优化面积分配。

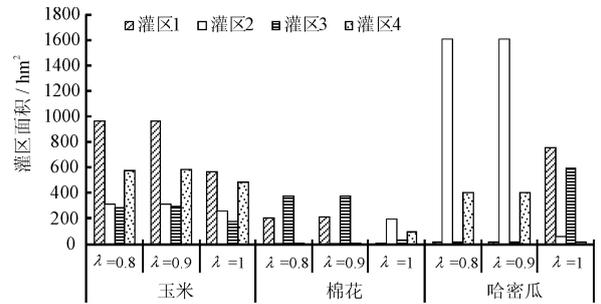


图2 第一规划年各灌区作物种植面积优化分配结果

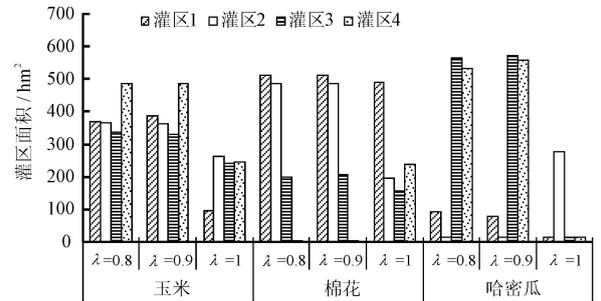


图3 第二规划年各灌区作物种植面积优化分配结果

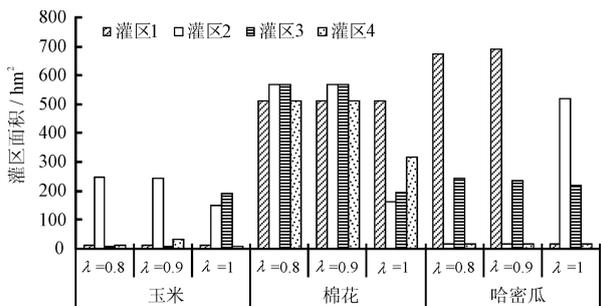


图4 第三规划年各灌区作物种植面积优化分配结果

3.3 可信度水平分析

图5为第二规划年内不同可信度水平计算得到的实际水量分配情况。结果表明,玉米的配水量在灌区1内从 λ 取0.8~1逐渐增加,在灌区2和灌区3中均为随着 λ 值的增大而下降,其配水量范围处于130000到170000 m^3 之间,但在灌区4内保持在237857 m^3 左右。棉花的配水量在灌区4中相比于其他3个灌区较特殊,配水量值趋于为0,而在其他3个灌区内分别占3类作物的较大一部分。棉花的配水量在灌区1、2中均是随 λ 值的增加而略有下降,灌区3内略有上升。哈密瓜的配水量则对 λ 的变化不敏感。由于 $\lambda = 1$ 代表系统需求条件下的最高可信度水平,因此 λ 的不同取值所得到的系统收益代表了不确定性约束条件下满足系统目标及约束水平的可信度水平。大部分作物的最优配水量均是随 λ 的增大而减小,也就是说,该区域农业总利润会随 λ 取值的增加而降低。这是因为可信度水平 λ

决策者对农业整体效益及成本消耗之间的均衡选择相关。 λ 取值低时 ($\lambda = 0.8$), 系统会有较低的风险, 约束相对宽松, 收益更高, 但同时系统的可靠性低; 较高的可信度水平 ($\lambda = 1$) 会带来更高的系统可靠性, 但同时会导致较高的违约风险。因此, 当 λ 取值较高时 ($\lambda = 1$), 系统在加强约束水平的同时利润也会随之降低。此外, 灌区 1 内的玉米配水量呈现相反趋势, 可能是由于棉花和哈密瓜配水量的增加及水资源容量的上限, 导致系统整体优化策略的调整。

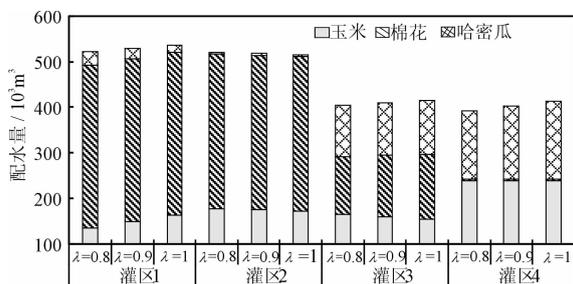


图 5 不同可信度水平下的水量分配情况

综上所述, 目标函数(即总体效益)对输入参数的变化及模糊可信度约束函数的调整较为敏感, 而每个区域所获得的配水量与该区域地下水库的可利用容量及相关成本密切相关。虽然对区域供应更多的水资源可以使灌溉收益更高, 但同时也会增加各项成本(运输、施肥、废水处理等)。因此权衡收益与水资源成本之间的矛盾关系尤为重要。可信度水平 λ 是权衡收益与成本的重要因素, 当 λ 取值为 0.8 时, 相对获得的收益更高但可靠性较低, 而当 λ 取 1.0 时, 可靠性更高但约束更紧导致成本增加。因此可以通过深入研究可信度水平 λ 值对模型的影响, 为决策者提供更多的水资源管理优化方案, 并根据 λ 的取值对整个系统问题进行优化决策。

4 结 语

(1) 新疆土地面积广阔, 但由于水资源分布不均、农业灌溉方式落后导致用水效率低下、农业用水匮乏。本研究考虑水位下降系数的不确定性, 引入模糊可信度算法, 提出了 FCCP 模型用于辅助灌区农业用水规划。所产生的决策方案能够更好地优化农业灌溉水资源配置, 预测农业种植效益, 提高区域农业产值, 为决策者提供科学高效的农业灌溉水分配方案。

(2) 本研究重点考虑了地下水水位的不确定性, 同时兼顾了水资源规划中各类作物的种植需

求、政府扶持政策以及整个地下水灌溉范围的经济效益。通过对乌鲁木齐某灌区农业灌溉系统的优化分析可以得出, 3 类作物(玉米、棉花、哈密瓜)的灌溉配比最终受利润总额的影响较大。当可信度水平取 0.8 或 0.9 时获得的结果为最优解, 即目标利润总值最大(约为 1.18×10^8 元)。

(3) 可信度水平 λ 是权衡收益与成本的重要因素。当 λ 取值为 0.8 时获得的收益更高但可靠性较低, 而当 λ 取 1 时可靠性更高, 约束更加严格, 成本消耗会随之提高, 但对于目标函数的满意度更高。因此深入研究可信度水平 λ 值对模型的影响, 可为决策者提供更多的水资源管理优化方案, 并参考 λ 值对整个模型进行优化决策。由于本研究只针对可信度水平为 0.8、0.9、1 时的系统进行了优化分析, 且本模型设置较为简洁, 因此未来的研究可进一步加强约束条件及力度, 并探讨引入其他方法解决更为复杂的水资源规划问题, 为决策者提供更多的参考依据。

参考文献:

- [1] 贺学海. 水资源管理模型的研究过程和发展趋势[J]. 水文地质工程地质, 1997, 24(5): 24-26.
- [2] 陈丹桂. 洛阳盆地地下水资源线性规划的解析法[J]. 地球科学, 1988, 13(6): 651-658.
- [3] 许拯民. 河南省鄆县水资源与农业种植结构调整优化规划研究[J]. 水利发展研究, 2005(7): 44-46.
- [4] 徐毅, 汤焯, 付殿峰, 等. 基于水质模拟的不确定条件下两阶段随机水资源规划模型[J]. 环境科学学报, 2012, 32(12): 3133-3142.
- [5] 张静, 黄国和, 刘焯, 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.
- [6] Beck M B. Water quality modeling: A review of the analysis of uncertainty [J]. Water Resources Research, 1987, 23(8): 1393-1442.
- [7] 陶涛, 刘遂庆, 李树平. 城市水资源管理模型的研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2005, 16(1): 60-62+66.
- [8] 潘根兴, 高民, 胡国华, 等. 气候变化对中国农业生产的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1698-1706.
- [9] Maqsood I, Huang G H, Scott Yeomans J. An interval-parameter fuzzy two-stage stochastic program for water resources management under uncertainty [J]. European Journal of Operational Research, 2005, 167(1): 208-225.
- [10] Huang G H. A hybrid inexact-stochastic water management model [J]. European Journal of Operational Research, 1998, 107(1): 137-158.

(3) 水力模型试验论证。为了验证上述计算成果的合理性,对图3的高堂拦河闸重建工程下游消能工布置进行水力模型试验^[10]。试验表明:①在各级洪水流量泄流运行时,一级消力池内形成稳定的水跃,消力池池深和池长满足运行的要求,池末尾坎出流沿下游陡坡段较平顺进入二级消力池;②二级消力池水流消能效果较好,出池水流较平顺与下游河道水流衔接。因此,本文计算初拟的拦河闸下游两级消力池布置和体型是合理的,得到了工程设计和施工的采用。

4 结 语

本文根据拦河闸下游消力池水力计算方法,对其下游两级消力池的布置进行分析,提出拦河闸下游两级消力池体型布置和水力计算方法:

(1) 根据拦河闸泄洪水力条件、闸址地形和地质条件、消力池两岸翼墙和堤围的安全、工程施工条件等,先确定一级消力池水平段池底板高程,再计算消力池末端尾坎的合理高度和水平段池长,使一级消力池内形成稳定的水跃;此外,在满足拦河闸泄流能力要求和工程布置的前提下,可适当加高尾坎的高度 H ,使 $(H + h) \geq 1.2 h_2$,以尽量减小消力池的池长,节省工程投资。

(2) 根据各级洪水流量的闸址下游水位,在满足二级消力池出流与下游河道水流为缓流衔接的条件下,先初拟二级消力池末端尾坎顶高程,然后再计算出二级消力池池深和池长,使二级消力池出流较

平顺与下游河道水流衔接。

本文成果得到了水力模型试验研究实例的验证,可供类似工程设计和运行参考。

参考文献:

- [1] 宋兵伟,贺清录,潘绍财. 高落差水闸消能工优化设计[J]. 水电能源科学,2011,29(11):126-128+215.
- [2] 王胜,李连侠,孙炯,等. 多级连续消力池水跃的水力特性模型试验[J]. 水利水电科技进展,2012,32(4):23-28.
- [3] 邓飞. 潮州供水枢纽西溪拦河水闸二级消力池设计[J]. 吉林水利,2009,(11):10-12.
- [4] 中华人民共和国水利部. SL 265-2001 水闸设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2001.
- [5] 谢景惠,陈菊清. 消力池最不利设计条件的分析与计算[J]. 水利水电技术,1995,(12):7-11.
- [6] 黄智敏,罗岸,陈卓英,等. 潮州供水枢纽东溪拦河闸消能工除险改造试验研究[J]. 广东水利水电,2010,(12):1-3.
- [7] 黄智敏,陈卓英,朱红华,等. 低水头拦河闸下游一、二级消力池布置研究[J]. 水利水电科技进展,2013,33(6):33-36.
- [8] 朱展毅. 乌石拦河闸除险加固工程消能建筑物的设计[J]. 广东水利水电,2003,(3):33-34+36.
- [9] 武汉水利电力学院水力学教研室. 水力计算手册[M]. 北京:水利电力出版社,1980.
- [10] 广东省水利水电科学研究院. 饶平县高堂水闸重建工程水工断面模型试验研究报告[R]. 广州:广东省水利水电科学研究院,2013.

(上接第114页)

- [11] Huang G H, Baetz B W, Patry G G. Grey integer programming: An application to waste management planning under uncertainty [J]. European Journal of Operational Research, 1995,83(3):594-620.
- [12] Liu B D, Iwamura K. Chance constrained programming with fuzzy parameters [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1998,94(2):227-237.
- [13] He L, Huang G H, Lu H W. A simulation-based fuzzy chance-constrained programming model for optimal groundwater remediation under uncertainty [J]. Advances in Water Resources, 2008,31(12):1622-1635.
- [14] Zhang Y M, Huang G H. Fuzzy robust credibility-constrained programming for environmental management and planning [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2010,60(6):711-721.
- [15] Zhang Y M, Huang G H, Lin Q G, et al. Integer fuzzy credibility constrained programming for power system [J]. Energy, 2012,38(1):398-405.
- [16] Liu Baoding. Uncertainty Theory [M]. Beijing: Uncertainty Theory Laboratory, 2012.
- [17] Dubois D, Foulloy L, Mauris G, et al. Probability-possibility transformations, triangular fuzzy sets, and probabilistic inequalities [J]. Reliable Computing, 2004,10(4):273-297.
- [18] Huang G H, Sun W, Nie X H. Development of a decision-support system for rural eco-environmental management in Yongxin County, Jiangxi Province, China [J]. Environmental Modelling & Software, 2010,25(1):24-42.
- [19] Zadeh L A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1999,100(1):9-34.