

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtk.2018.0072

张珊,谭倩,蔡宴朋,等.基于模糊优选和可信性的农业水资源多目标优化配置模型[J].南水北调与水利科技,2018,16(3):79-85. ZHANG S, TAN Q, CAI Y P, et al. A multi objective optimization model for agricultural water resources based on fuzzy optimal selection and credibility[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(3): 79-85. (in Chinese)

基于模糊优选和可信性的 农业水资源多目标优化配置模型

张珊¹,谭倩¹,蔡宴朋²,张同¹,张田媛¹

(1. 中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100081; 2. 北京师范大学 环境学院, 北京 100875)

摘要: 干旱半干旱流域内社会、经济和生态问题多是由水资源匮乏或管理不当导致的, 因此寻求有效的水资源管理方法至关重要。针对农业水资源配置过程的多目标性和不确定性问题, 建立了一个多目标模糊可信性优化模型(MFCP)。该模型不仅通过定量分析不同目标在农业发展中的权重, 对决策变量的综合效益进行模糊优选, 还基于模糊可信理论处理了模糊参数。所开发的MFCP模型应用于甘肃省武威市民勤灌区进行实证研究, 构建了以经济、生态和社会效益为目标、以水土资源自然禀赋限制等为约束的水资源优化配置模型。结果表明, 可以通过减小玉米和葵花种植面积、增大瓜类和蔬菜的面积达到区域综合效益最优。以2015年为例, 与优化前现状相比, 优化后的方案在减少11.1%的种植总面积的情况下, 能节约水量12.6%、提高经济收益13.8%。

关键词: 资源利用; 作物种植结构; 多目标优化; 模糊定权; 模糊可信性

中图分类号: TV213 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)03-0079-07

A multi-objective optimization model for agricultural water resources based on fuzzy optimal selection and credibility

ZHANG Shan¹, TAN Qian¹, CAI Yanpeng², ZHANG Tong¹, ZHANG Tianyuan¹

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100083, China)

Abstract: Many economic, social and ecological problems in arid and semi-arid watersheds can be attributed to the scarcity and mismanagement of water resources. Therefore, it is extremely important to seek effective water resources management methods. In this research, a multi-objective fuzzy credibility programming (MFCP) model was developed for supporting agricultural water resources management. This model can conduct fuzzy optimal selection of the comprehensive benefits of the decision-making variables by quantitatively analyzing the weights of different objectives in agricultural development. It can also deal with fuzzy parameters based on the fuzzy credibility theory. The MFCP model was applied to Minqin County in Wuwei city, Gansu province. An optimization model for water resources was established with economic, ecological, and social benefits as the objectives, with the water and land resources endowment as physical restraints. Results showed that the comprehensive benefits of this region could be optimized by reducing the planting area of corns and sunflowers and increasing the area of melons and vegetables. Compared with the actual situation in 2015, the optimized scheme could save 12.6% water resources and increase economic revenue by 13.8%, while reducing the total planting area by 11.1%.

Key words: resource utilization; crop planting structure; multi-objective optimization; fuzzy weighting; fuzzy credibility

收稿日期: 2017-08-22 修回日期: 2018-03-05 网络出版时间: 2018-03-14
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180314.1526.004.html>
基金项目: 国家自然科学基金(51639009; 51779255; 51621061)

Funds: National Natural Science Foundation of China(51639009; 51779255; 51621061)

作者简介: 张珊(1994-), 女, 河北石家庄人, 主要从事水利工程方面研究。E-mail: zhangshan@cau.edu.cn

通讯作者: 谭倩(1981-), 女, 四川人, 博士生导师, 博士, 主要从事水资源与水环境方面研究。E-mail: qian_tan@cau.edu.cn

随着人口的日益增加、经济的迅猛发展,人们对粮食的需求不断提高。然而有限的水资源和耕地资源成为粮食产量增加和经济发展的瓶颈。中国作为人口、经济大国,其干旱面积约为 $3.32 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占总面积的 35%,超过了耕地面积的 1/3。对于没有灌溉就没有农业的干旱和半干旱地区,水资源储量的不足和相关管理模式的不完善,是制约当地发展的主要问题^[1-3]。不合理的配水方案不仅会造成水资源的浪费,也影响生态系统的格局与演变^[3]。调整作物种植面积和结构是实现农业水资源高效利用的有效途径。

截止目前为止,已经有很多学者利用优化模型对灌区的农业用水和耕地资源进行了规划管理^[2,4-6]。其中,线性规划、非线性规划、动态规划、混合整数规划和多目标规划等优化技术已经被广泛使用^[7-9]。由于农业水资源管理是一个复杂的问题,许多目标同时存在且需要并行处理,多目标规划对于农业水资源管理有着重要的作用。例如, Lu^[10] 等人构造了一个多目标区间随机规划模型,以经济和产量最大、废水和固体废物排放最少为目标,对干旱区的耕地和水资源进行了分配。Zhou^[11] 等人建立的多目标规划模型将经济目标和污染物排放目标转化成约束进行求解,得到了既增加收入又减小 COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 排放量的水资源配置方案。Li^[12] 等人建立了一个以经济效益最大、水短缺量和灌溉水污染物含量最小的多目标模型,采用最小误差法将多目标转化为三个单目标后进行求解,对干旱地区农业水资源进行了分配。Gal 和 Mart n^[13] 等人构造了一个多目标线性规划模型,优化了雨养农业和灌溉农业两种管理模式下的种植面积,实现了作物产量最大化的目标,减少了对环境的影响。现有研究已表明,多目标优化方法是处理农业水土资源分配过程中多重问题的有效工具之一,所考虑的目标涵盖经济收入、生产力、水质、生态服务、污染、劳动力和就业等方面。

然而,现有的水资源多目标规划模型仍存在很多的不足。首先,考虑生态的研究大都认为作物生产与生态环境是竞争关系,忽视了农作物作为生态系统植被的一部分,也有生态服务的功能^[15-16]。其次,由于各因素之间的复杂关系,很难有效处理多目标和不确定性同时存在时的水资源分配问题。为了克服这些不足,本研究建立了一个多目标模糊可信性规划(MFCP)方法。该方法采用模糊集理论,能客观分析各目标的重要程度并以此确定决策变量的综合效益,对多目标问题进行求解;同时还有效处理

了模型参数中的模糊信息。并且,将该方法应用于资源短缺和生态恶化问题十分严重的甘肃省民勤县进行实证研究,以经济、生态和社会为规划目标,产生了能促进区域农业水资源高效绿色利用的作物种植结构调整优化方案。

1 模糊多目标规划方法

MFCP 模型一般式如下所示:

$$\text{Max } F(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_t(x)) \quad (1)$$

约束条件:

$$\text{Cr}(AX \leq B) \geq \lambda \quad (2)$$

$$X \geq 0 \quad (3)$$

式中: $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$; $A \in \{R\}^{m \times n}$; $B \in \{-\}^{m \times 1}$; $x \in \{R\}^{n \times 1}$; $\{-\}$ 表示一组模糊参数; R 表示一组有确定值的参数; Cr 为可信性测度; λ 为置信水平; t 表示目标数,其中 $t \geq 2$ 。

该模型的求解方法主要分为两个步骤:第一步,基于各目标的重要程度(即目标的权重)确定决策变量的综合效益的相对优属度,将多目标问题转化为单目标问题;第二步,运用模糊集合理论中的模糊可信性原理,将具有模糊信息的参数转化为确定性参数。经过这两步计算,含有模糊参数的多目标优化问题就转化成了易于求解的确定性单目标线性优化问题。

在第一步中,确定目标 i 对于模糊概念“重要”的隶属度,再对各决策变量进行模糊优选^[17]。首先,建立目标对“优”的相对隶属度矩阵 $R_{ij} = (r_{ij})_{m \times n}$, 其中 $r_{ij} = a_{ij} / \max a_{ij}$ 为参数的相对隶属度,适用于参数为越大越优型; $r_{ij} = \min a_{ij} / a_{ij}$ 适用于参数为越小越优型, a_{ij} 表示样本 j 在目标 i 下的参数值。然后,计算非归一化的各目标权重向量 w 。在多目标决策过程中,各参数之间的重要程度存在着一定的差异,因此,在求解多个目标的权重时,不能忽略参数重要程度对方案优选的影响。 w 可以表示为:

$$w(i) = \frac{1}{1 + \left[\sum_{j=1}^n (1 - w_{ji})^p / \sum_{j=1}^n w_{ji}^p \right]^{\frac{2}{p}}} \quad (4)$$

式中: p 为距离参数,当 p 取 1 是表示汉明距离,当 p 取 2 时表示欧式距离; w_{ji} 是矩阵 W 中的元素,其中 $W = R^T = (w_{ji})_{n \times m}$; w_i 代表权重向量, $w = (w_1, w_2, \dots, w_m)$, 并且 $\sum_{i=1}^m w_i = 1$ 。继而可计算决策变量的综合效益相对于“优”的最大隶属度(称为优属度),并定义为综合效益系数(u_j),如下所示:

$$u_j = \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{i=1}^m [w_i (r_{ij} - 1)]^p / \sum_{i=1}^m (w_i r_{ij})^p \right\}^{\frac{2}{p}}} \quad (5)$$

第二步,引入模糊可信性原理处理参数中的模糊不确定性。模糊可信性线性规划基于可信性测度而建立模糊可信性约束模型,求解时,可以假设 ε 为三角模糊变量 (k_1, k_2, k_3) , 其中 $k_1 < k_2 < k_3$; $\mu(a)$ 为隶属度函数, a 为实数。 $a \leq \varepsilon$ 的可信性测度 Cr 可以表达为如下形式^[22]:

$$Cr \begin{cases} 1 & a \leq k_1 \\ \frac{2k_2 - k_1 - a}{2(k_2 - k_1)} & k_1 \leq a \leq k_2 \\ \frac{a - k_3}{2(k_2 - k_3)} & k_2 \leq a \leq k_3 \\ 0 & a \geq k_3 \end{cases} \quad (6)$$

令 K 代替 AX , 模型的约束可以转化为:

$$Cr\{K \leq B\} \geq \lambda \quad (7)$$

如果用置信水平表示决策者的满意程度, $\lambda = 1, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6$ 和 0.5 分别代表完全满足、大部分满足、基本上满足、比较满足、勉强满足和临界满足约束的几种情况^[26-28]。可以看出,只有置信水平大于 0.5 时,才能满足决策者的要求^[23]。经验证,在式(6)中当且仅当 $k_1 \leq x \leq k_2$ 时,置信水平大于 0.5 。基于上述可信性的定义和推理,对于每个 $\lambda \in [1 \geq \mu(x) \geq \lambda \geq 0.5]$ 都有^[24-25]:

$$\frac{2B - \underline{B} - K}{2(B - \underline{B})} \leq \lambda \Rightarrow K \leq B + (1 - 2\lambda)(B - \underline{B}) \quad (8)$$

式中: B 为三角模糊变量的中值; \underline{B} 为三角模糊变量的最小值。

将式(5)和式(8)结合,式(1) - 式(3)最终可以被转化成传统的容易求解的线性优化问题。转化后的公式可以表达为:

$$\text{Max } Z = \sum_{j=1}^n u_j x_j \quad (9)$$

约束条件:

$$\sum_{j=1}^n (a_j x_j) \leq b + (1 - 2\lambda)(b - \underline{b}) \quad (10)$$

$$x_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

2 实证应用

2.1 研究区概况

民勤位于中国西北部石羊河下游冲积平原,东、西、北三面被腾格里沙漠和巴丹吉林两大沙漠包围。民勤属于典型的大陆性荒漠气候,年均降水量仅 127.7 mm , 年均蒸发量却高达 2623 mm ^[1516]。石羊河是民勤县的主要水源,其水资源总量为 $1.661 \times 10^9 \text{ m}^3$, 其中包括 $1.561 \times 10^9 \text{ m}^3$ 的地表水资源以及 $1.00 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的地下水资源^[19]。民勤是甘肃省的商品粮基地,却也是中国水资源短缺和生态环境恶

化情况最严重的区域之一^[20]。民勤在很大程度上依赖于灌溉农业,灌溉用地面积约 200 km^2 。因地表水和地下水过度开采,支流干涸、地下水水位下降、自然植被退化、湿地和耕地减少以及沙漠化和盐碱化等一系列的问题层出不穷。从来水量来看,石羊河上游地区的过度用水导致民勤的可用水量明显减少;从种植结构上看,高耗水与低耗水作物的比例失调造成了水资源的高消耗。为了缓解民勤水资源短缺问题的进一步恶化,亟需对农业水资源利用进行管理。



图1 研究区示意图

Fig. 1 The study area

表1 研究区基础数据

Tab. 1 Basic data of the study area

作物种类	小麦	玉米	棉花	向日葵	瓜类	蔬菜
产量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	7 695	10 544	1 800	5 566	6 532	54 462
成本(元· hm^{-2})	5 250	9 520	11 340	3 598	13 265	21 547
价格/(元· kg^{-1})	2.09	2.36	16.40	8.41	13.71	2.29
需求量/($\text{kg} \cdot \text{人}^{-1}$)	250	350	40	113	72	164
最小种植面积/ hm^2	5 200	5 000	4 000	3 883	1 973	5 099
最大种植面积/ hm^2	140 000	10 452	11 856	11 650	3 960	7 648
灌溉定额/($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	5 100	5 550	3 900	3 981	3 750	4 750
种植面积/ hm^2	5 473	8 947	5 000	9 513	2 467	2 947

表1为2015年民勤六种主要作物的相关基础数据。由于地表水和地下水的可利用水量具有很强的随机不确定性,用确定值表示会与实际情况产生很大的偏差。因而根据多年的统计资料,将地表水和地下水量变化范围表示为三角模糊数,分别是 $[1.75, 2.54, 3.75]$ 和 $[1.10, 1.16, 1.19]$ 。农业用水配额约占研究区可用水资源总量的 75% 左右,民勤的灌溉水利用系数为 0.61 ,复种指数约为 1.28 。参考耕地红线确定了作物的最大种植面积;并采用2002-2015年间的历史最小种植面积作为允许的作物最小种植面积。

2.2 模型的建立

根据研究区的特点, 构建了适用于民勤地区的 MFCP 模型。规划期是一个日历年, 决策变量 x_j 代表了每一种作物的最佳种植面积。该模型的目标是使灌溉农业获得最大的经济、生态和社会效益。

具体计算中, 以总面积净效益乘以灌溉水利用系数得到的灌溉效益分摊值作为需要优化的经济目标^[18]。

$$\text{Max } FEN = \sum_{j=1}^J \epsilon (Y_j \times B_j - CT_j) x_j \quad (12)$$

式中: FEN 表示作物种植的年灌溉效益即经济效益(元); J 为作物品种, j 从 1 到 6 分别是小麦、玉米、棉花、向日葵、瓜类和蔬菜; 其中 Y_j 表示作物 j 单位面积产量 (kg/hm^2); B_j 表示作物单价 (元/ kg); CT_j 是作物 j 的单位面积成本 (元/ hm^2); ϵ 为灌溉水利用系数, 取值 0.61。

生态目标是最大限度地提高沙漠绿洲作物的生态服务功能。该生态服务功能是基于植被覆盖的分层投影来计算的^[15]。表达式如下:

$$\text{Max } FEL = \sum_{j=1}^J E_{sj} \times DE_j \times x_j \quad (13)$$

式中: FEL 表示年生态效益(m^2); E_{sj} 是利用分层投影的方法求得的作物 j 的生态功能(覆盖面积/株); DE_j 是作物 j 的种植密度(株/ hm^2)。

社会目标是使农田配水量最小, 以每种作物的毛灌溉定额与该作物灌溉总面积乘积的加和表示。模型表达式如下:

$$\text{Min } FSO = \sum_{j=1}^J I_j x_j \quad (14)$$

式中: FSO 表示年社会效益(m^3); I_j 是作物 j 的灌溉定额(m^3/hm^2)。

约束条件如下。

总面积约束:

$$S_{\min} \times RI \leq \sum_{j=1}^J x_j \leq S_{\max} \times RI \quad (15)$$

可用水量约束:

$$Cr \left\{ \sum_{j=1}^J I_j x_j \leq (Q_s + Q_g) \epsilon \right\} \geq \lambda \quad (16)$$

粮食安全约束:

$$x_j \times q_j \geq PD_j \times TP \quad \forall_j \quad (17)$$

作物种植面积约束:

$$S_{j\min} \leq x_j \quad \forall_j \quad (18)$$

非负约束:

$$x_j \geq 0 \quad \forall_j \quad (19)$$

式中: S_{\min} 表示用于作物种植的最小耕地面积 (hm^2); S_{\max} 表示最大允许的耕地面积 (hm^2); RI 指的是多种作物复种指数, 它表示在一年多熟的情况下, 种植作物的总面积与总种植面积的比值; $S_{j\min}$ 表

示作物 j 的最小种植面积 (hm^2); Q_s 和 Q_g 为三角模糊变量, 分别表示灌区地表水和地下水的可用水量 (m^3); PD_j 表示作物 j 的人均需求量 (人/ kg); TP 表示总人口数 (人)。

3 结果分析与讨论

根据收集整理的研究区 2015 年的基础数据, 运用所建立的模糊多目标规划方法, 对所构建的优化模型进行求解。首先求得六种作物的综合效益系数, 其中小麦 0.992, 玉米 0.995, 棉花 0.805, 向日葵 0.835, 瓜类 0.804 以及蔬菜是 0.995。本研究选取 1、0.95、0.9、0.85 和 0.8 五个约束满意程度较高的置信水平对种植结构进行研究。表 2 列出了不同置信水平下的种植结构优化结果。对比不同置信水平下民勤六种主要作物的种植面积可知, 水量变化对不同作物的影响程度不同。当置信水平从 1 降到 0.8, 可用水量约束不断放松, 违背可用水量约束的风险逐渐增大。在此过程中, 优化结果中只有瓜类的面积是不断增加的, 而其它作物的种植面积基本保持不变。这表明当可用水量增加时, 系统经过复杂的整合和寻优过程后择优选择增加瓜类的种植面积。尽管瓜类的综合效益在所有作物中最小, 但它的单位面积耗水量是六种作物里面最少的。这一现象说明对于该研究区来说, 水量是发展的瓶颈, 也是影响决策的关键因素。

表 2 不同置信水平 (λ) 下的种植面积
Tab. 2 Planting area under different confidence levels (λ) hm^2

作物种类	可信性置信水平				
	$\lambda=1$	$\lambda=0.95$	$\lambda=0.9$	$\lambda=0.85$	$\lambda=0.8$
小麦	5 749.17	5 749.17	5 749.17	5 749.17	5 749.17
玉米	5 000.00	5 000.00	5 000.00	5 000.00	5 000.00
棉花	4 887.16	4 887.16	4 887.16	4 887.16	4 887.16
葵花	4 481.58	4 481.58	4 481.58	4 481.58	4 481.58
瓜类	3 252.52	4 289.52	5 326.52	6 363.52	7 400.52
蔬菜	5 098.67	5 098.67	5 098.67	5 098.67	5 098.67

本研究选取 $\lambda=0.9$ 时的优化结果与基准年 2015 年未经优化的情况进行了比较(图 2)。从总量上来看, 2015 年的现实总耕地面积为 34 347 hm^2 , 田间耗水量为 1.58 亿 m^3 , 灌溉农业产生的效益为 7.27 亿元。MFCP 模型优化结果显示, 研究区域可种植面积已经超过了最优的土地的种植面积 30 543 hm^2 , 优化后可比优化前少占用 11.1% 的土地面积, 减少田间耗水量 12.6%。与此同时, 经济效益却能增加 13.8%。这一结果印证了 2015 年农业部倡导的“粮改饲”政策是合理的。

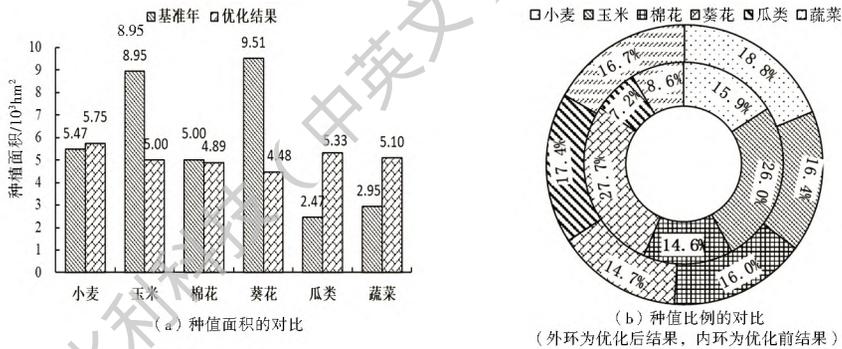


图 2 优化前后作物种植结构比较 ($\lambda = 0.9$)

Fig. 2 Comparison of crop planting structure before and after optimization when $\lambda = 0.9$

图 2(a) 对比了 MFCEP 模型结果和 2015 年现实作物种植面积。具体来说, 如果按照优化后的方案进行规划, 小麦种植面积应该从 5 473 hm² 增加到 5 749 hm², 蔬菜种植面积需要从 2 947 hm² 增加到 5 099 hm², 瓜类面积应从 2 467 hm² 扩大两倍以上达到 5 327 hm²。相反, 玉米、棉花和葵花的面积应该减少。在这三种作物中, 葵花的变动将是最大的, 从 9 513 hm² 减小到 4 482 hm²; 玉米其次, 将从现在的 8 947 hm² 降至 5 000 hm²; 棉花种植面积下降很小, 只有 13 hm²。分析结果发现, 除棉花之外, 其它五种作物种植面积的大小顺序与综合效益系数的排序并不相同。这是因为 MFCEP 模型结果是综合权衡决策目标以及水土资源供需等多重因素得出的。进一步说明该模型不但可以平衡不同目标之间的复杂权重问题, 还能充分反映现实中的制约条件和种植习惯。结合图 2(a) 所示的种植比例对比来分析, 优化后当地的种植结构将趋于平衡化。其中, 小麦的种植比例最大, 但也只是占总面积的 18.8%; 葵花的种植面积最小却也拥有 14.7% 的种植比例; 其它四种作物的比例也均在 16% ~ 18% 之间浮动。这表明, 通过优化, 当地将从大量种植高耗水、低产出粮食作物, 逐步向种植中低耗水、高产出的经济作物转变。具体体现在减少玉米和葵花的种植面积, 适当增加瓜类和蔬菜种植面积。同时较为平衡的种植格局更符合我国“不放松粮食生产, 积极发展多种经营”的方针, 为优化结果的实施赢得政策支持。

图 3 分别从经济效益、生态效益以及社会效益角度比较了优化结果和基准年的情况。从图 3(a) 可以看出, 优化后蔬菜将超越葵花成为经济效益最高的作物, 甚至超过了 2015 年葵花创造的最高经济效益值 2 51 亿元。同时, 优化后瓜类的经济效益相比优化前增加了 1 倍, 位列第二。图 3(b) 可以看出, 在生态效益方面, 优化前玉米和小麦所产生的生态效益分别位列第一和第二。采用 MFCEP 模型优化

后玉米产生的生态效益最多, 其次是小麦。图 3(c) 对比了两种方案的农田用水情况, 2015 年玉米和葵花消耗的水量最多, 而如果采取 MFCEP 模型结果, 小麦和玉米这两种粮食作物将成为主要的耗水作物。总体来看, 优化后研究区的总体经济效益能提高 13.8%, 作物用水量将降低 12.6%, 耕地占用将下降 11.1%。虽然优化后作物种植所带来的生态服务功能将降低 18%, 但是若把节省下来的水量和土地直接用作生态修复, 所能获得的生态效益可能比损失的农作物生态服务价值高得多; 而如果把节省下来的资源用于其他行业, 总体效益的提高也将是相当可观的。

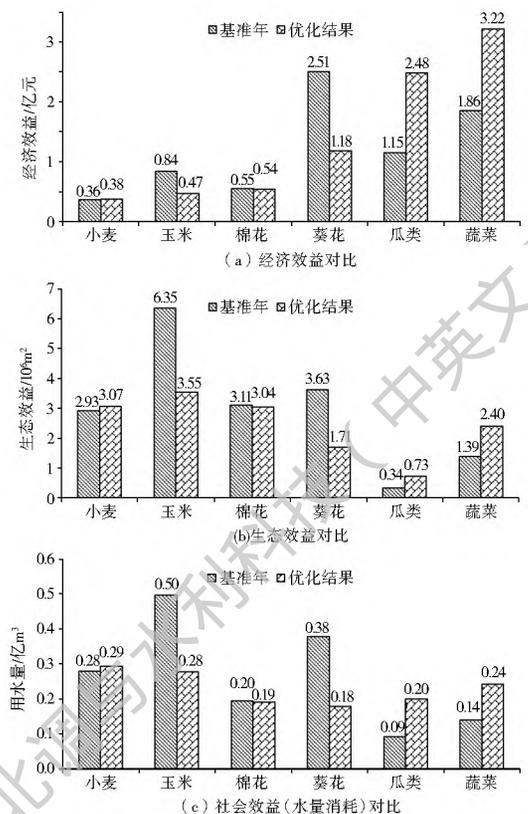


图 3 优化前后各项目标值对比 ($\lambda = 0.9$)

Fig. 3 Comparison of objectives values before and after optimization when $\lambda = 0.9$

MFCEP 模型不仅能帮助决策者制定种植结构

总体方案,且有助于减小实施过程的阻力。一方面,MFCP模型紧密结合实际,综合考虑了每种作物的历史种植情况以及自然资源量无法准确预知的事实,在构建模型时加入了种植面积约束和不确定可用水量约束。这使得优化后的结果不但可以把种植面积变化控制在可接受范围内,还增加了决策方案抵抗水量不足风险的能力。另一方面,为了保持土壤肥力,农民本就会在同一块土地上交替种植不同作物。MFCP模型能够给出一个科学、合理的种植结构调整方案,较易得到广大农民的支持。因此,经MFCP模型优化后的种植方案不管是从国家层面还是农民利益层面,都能提高效益并且具有较高的可行性。

4 结语

本研究针对农业水资源管理过程中多目标和不确定的复杂性问题,建立了一个多目标模糊可信性规划模型(MFCP)来支持农业用水管理,并应用于位于我国西北干旱与半干旱地区的民勤县进行实证研究。该模型耦合模糊优选法和模糊可信性规划方法,对多个目标进行客观定权并处理了模糊不确定性信息,解决了决策过程中需要同时处理多种目标和不确定性参数的难题。该模型在民勤进行实例应用时,利用分层投影算法将农作物自身产生的生态效益作为模型的生态目标,克服了以往研究中将作物生产与生态环境视为竞争关系的局限性。研究结果表明,当前民勤过多种植了玉米和葵花这类高耗低产的作物,这不仅造成了水、土资源的浪费,还影响了当地的综合收益。MFCP模型提供的优化方案,经调整作物的种植比例,呈现出多种作物并重的局面,符合当前的政策要求;且在减少11.1%的种植总面积的情况下,能节约水量12.6%、提高经济收益13.8%。这表明MFCP模型能为农业水资源的高效利用和区域的可持续发展提供有效的管理方法。

参考文献(References):

- [1] AREGAY F A, YAO L Y, ZHAO M J. Spatial preference heterogeneity for integrated river basin management: the case of the Shiyang River Basin, China[J]. Sustainability, 2016(10): 970.
- [2] TAN Q, HUANG G H, CAI Y P. Radial interval chance constrained programming for agricultural nonpoint source water pollution control under uncertainty[J]. Agricultural Water Management, 2011(10): 1595-1606.
- [3] XUE X, LIAO J, HSING Y T, et al. Policies, Land use, and water resource management in an arid oasis ecosystem[J]. Environmental Management, 2015(5): 1036-1051.
- [4] GUO P, CHEN X, TONG L, et al. An optimization model for a crop deficit irrigation system under uncertainty[J]. Engineering Optimization, 2014(1): 1-14.
- [5] DASA B, AJAY SINGHA, PANDAA S N, et al. Optimal land and water resources allocation policies for sustainable irrigated agriculture[J]. Land Use Policy, 2015: 527-537.
- [6] SCH? TZE N, KLOSS S, LENNARTZ F, et al. Optimal planning and operation of irrigation systems under water resource constraints in Oman considering climatic uncertainty[J]. Environmental Earth Sciences, 2012(5): 1511-1521.
- [7] TAN Q, HUANG G H, CAI Y P. Multi-Source Multi-Sector Sustainable Water Supply Under Multiple Uncertainties: An Inexact Fuzzy-Stochastic Quadratic Programming Approach[J]. Water Resources Management, 2013, 27(2): 451-473.
- [8] SINGH A. Review: Computer-based models for managing the water resource problems of irrigated agriculture[J]. Hydrogeology Journal, 2015(6): 1217-1227.
- [9] CAI Y P, HUANG G H, YE H S C, et al. A modeling approach for investigating climate change impacts on renewable energy utilization[J]. International Journal of Energy Research, 2012(6): 764-777.
- [10] LU S, GUAN X, ZHOU M, et al. Land resources allocation strategies in an urban area involving uncertainty: a case study of Suzhou, in the Yangtze River Delta of China[J]. Environ Manage, 2014 53(5): 894-912.
- [11] ZHOU M, CHEN Q, CAI Y L. Optimizing the industrial structure of a watershed in association with economic - environmental consideration: an inexact fuzzy multi-objective programming model[J]. Journal of Cleaner Production, 2013 42: 116-131.
- [12] LI M, GUO P. A multi-objective optimal allocation model for irrigation water resources under multiple uncertainties[J]. Applied Mathematical Modelling, 2014 38(19-20): 4897-4911.
- [13] GALÁN-MARTÍNA Á, VASKANAD P, ANTÓNAC A, et al. Multi-objective optimization of rainfed and irrigated agricultural areas considering production and environmental criteria: a case study of wheat production in Spain[J]. Journal of Cleaner Production, 2017(Part 2): 816-830.
- [14] 陈秉谱, 常兆丰, 乔娟, 等. 退耕还林和荒山禁牧的相对生态价值的估算——以甘肃省靖远县永新乡为例[J]. 干旱区地理, 2013(6): 1144-1152. (CHEN B P, CHANG Z F, QIAO J, et al. Estimation of relative ecological value of returning farmland to forest & mountain enclosure: A case of Yongxing Township of Jingyuan County, Gansu Province[J]. Arid Land Geography, 2013(. 6): 1144-1152. (in Chinese))
- [15] 常兆丰, 王大为, 段晓峰, 等. 民勤荒漠区几种主要植物的相对生态价值[J]. 干旱区资源与环境, 2015(09): 86-91. (CHANG Z F, WANG D W, DUAN X F, et al. Relative ecological values of several major plants in minqin desert area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015,

- 29(9): 86-91. (in Chinese))
- [16] 陈守煜, 马建琴, 张振伟. 作物种植结构多目标模糊优化模型与方法[J]. 大连理工大学学报, 2003(01): 12-15. (CHEN S Y, MA J Q, AND ZHANG Z W. A multi objective fuzzy optimization model for planting structure and its method[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2003, 43(1): 12-15. (in Chinese))
- [17] M I M S. Robust optimization under softness in a fuzzy linear programming problem[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 1998(1): 21-34.
- [18] 何凤. 石羊河下游民勤县节水生态型种植结构调整研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2013. (HE F. Study on the Structure adjustment of Water Saving and Ecological Structure in Mirqin County by Shiyang river downstream[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2013. (in Chinese))
- [19] 张帆, 郭萍, 任冲锋. 分式两阶段随机优化模型在作物种植结构优化中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2016(9): 111-114. (ZHANG F, GUO P, REN C F. Fractional two stage stochastic programming for crop structure optimization[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(9): 111-114. (in Chinese))
- [20] FENG AB Q, MIAO C Z, LIA Z, et al. Public perception of an ecological rehabilitation project in inland river basins in northern China: Success or failure[J]. Environmental Research, 2015: 20-30.
- [21] 方国华, 黄显峰. 多目标决策理论、方法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011. (FANG G H, HUANG X F. Multi objective decision theory, method and application[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese))
- [22] 刘宝碇. 不确定规划及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003. (LIU B D, Uncertain programming and application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese))
- [23] 李婷. 不确定性条件下基于水质模拟的流域水环境管理优化研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013. (LI T. Water quality simulation based optimization approaches for watershed management under uncertainty[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013. (in Chinese))
- [24] 张成龙, 郭萍, 赵建明. 不确定条件下的区间两阶段模糊可信性约束规划配水模型研究[J]. 中国农村水利水电, 2016(8): 97-101. (ZHANG C L, GUO P, ZHAO J M. An interval two stage stochastic fuzzy credibility constrained programming for optimal irrigation water allocation under uncertainty[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(8): 97-101. (in Chinese))
- [25] ZHANG, Y M, HUANG, G H, LIN, Q G, et al. Integer fuzzy credibility constrained programming for power system management[J]. Energy, 2012, 38(1): 398-405.
- [26] ZHANG, Y M, HUANG G. H Inexact credibility constrained programming for environmental system management[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2010, 55(4).
- [27] 李婷. 不确定性条件下基于水质模拟的流域水环境管理优化研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013. (LI T. Water quality simulation based optimization approaches for watershed management under uncertainty[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013) (in Chinese))