

基于不确定性的旱作作物种植结构优化

刘 潇,郭 萍*

(中国农业大学水利与土木工程学院,北京 100083)

摘 要: 针对灌区规划问题,将模糊概念引入多目标线性优化模型。以甘肃民勤县为例,针对小麦、玉米、棉花、黑红瓜子、食葵、西甜瓜、白瓜子、辣椒几种作物,采用模糊多目标线性优化模型,从经济效益以及需水量两个角度对作物种植结构进行优化。结果显示,在语气算子不同的情况下优化结果也不同,如果要增加该地区的经济收益,就要将粮食作物的比重减少,而增加经济作物的种植比重。若要使需水量减少,则 to 增加棉花等需水量较小的作物的种植比重。并由此看出模糊优化方法在处理相关问题时的优越性。

关键词: 旱作作物;种植结构优化;经济效益;作物需水量;模糊模型;民勤县

中图分类号: S11+4;F323.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)06-0208-06

Planting structure optimization of dry crops based on uncertainty

LIU Xiao, GUO Ping*

(College of Water Conservancy and Civil Engineering , China Agricultural University , Beijing 100083 , China)

Abstract: Aiming at the planning problem of irrigation district, introduced the fuzzy concept into the multi-objective linear optimization model. This research applied the fuzzy multi-objective linear optimization model to optimize the planting structures of several crops from the aspects of economic efficiency and crop water requirement, taking Minqin County in Gansu Province as a case study. The results shown that: The optimal outcome of the model could be quite different under the condition of different tone operators. If we want to increase the regional economic benefits, the planting proportion of food crops should be reduced, while the proportion of economic crops should be increased. If we want to decrease the crop water consumption, should increase the planting proportion of low-water-consuming crops such as cotton. At the same time, we can see the advantages of the fuzzy optimal method to deal with related problems.

Keywords: dry crops; planting structure optimization; economic benefit; crop water requirements; fuzzy model; Minqin County

我国干旱、半干旱地区的水资源比较有限,在某些情况下可能会引起农业、工业、生活用水之间的矛盾,甚至在作物与作物之间也会产生争水的现象。近年来,有关专家提出了农业结构型节水的新理念^[1],即通过调整农业结构、合理布局,统筹安排,适水生长,科学地进行农业动植物间、物种间、品种间的水资源配置,实现水资源与农业生产的最优耦合^[2]。

在民勤地区,闫志忠^[3]在 2002 年通过对水资源现状及种植业结构现状的分析,提出了种植结构调

整的比例,并对“以水定植”的可行性进行了分析;李永涛^[4]2010 年以 Jensen 水分生产函数为基础,运用多目标规划的方法,建立了旱作条件下多种作物的种植结构优化系统;徐万林^[5]在 2011 年建立了一个基于大系统递阶分析理论的包含灌溉制度优化和种植结构优化的两层水资源优化模型,其中第二层基于非线性优化理论,建立了作物种植结构优化模型,采用非线性规划求解。

多年以来,传统的确定性优化方法已经成功地应用于解决确定性问题,但是,在现实生活中,常常

收稿日期:2013-05-25
基金项目:水利部公益性行业科研专项(201001061-3);国家自然科学基金(71071154);农业部公益专项“田间水分转化与高效调控技术研究”(201203077)
作者简介:刘 潇(1990—),女,硕士研究生,研究方向为水资源规划与管理。E-mail:0319xiaoxiao@163.com。
* 通信作者:郭 萍(1963—),女,教授,主要从事水资源规划与管理以及模拟与优化研究。E-mail: guop@cau.edu.cn。

存在很多非确定性的因素。例如,在灌区规划中,灌区的一些指标会受经济、人民生活水平、自然地理条件以及人们思想意识形态等诸因素的影响,因而所确定的指标值具有一定的不确定性,或者说具有一定的模糊性^[6],即建立的模型是一个模糊模型。

本文针对民勤灌区,建立了一个多目标线性优化模型,引入模糊优化方法,并进行求解。求解过程中,为了使二元定量对比符合我国汉语的习惯,给出相关的定量标度,引入语气算子和隶属度,并利用 Excel 的规划求解功能进行计算,得到灌区的优化种植结构。

1 研究方法

1.1 多目标线性规划模型

在资源有限的情况下,选择经济效益最大及需水量最小作为目标,对种植结构进行优化。采用确定性多目标线性规划模型如下:

(1) 目标函数:

$$\begin{cases} f_1 = \max(\sum_{i=1}^m y_i \cdot s_i \cdot p_i) \\ f_2 = \min(\sum_{i=1}^m ET_{ai} \cdot s_i) \end{cases} \quad (1)$$

式中, f_1 为经济效益(万元); f_2 为作物需水量(m^3); y_i 为第 i 种作物的单产($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); p_i 为第 i 种产品的价格($\text{元} \cdot \text{kg}^{-1}$); s_i 为第 i 种作物种植面积(hm^2); ET_{ai} 为第 i 种作物全生育期需水量(m^3)。

(2) 约束条件

1) 面积约束:

$$\sum_{i=1}^m s_i \leq S \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中, S 为种植面积(hm^2)。其余符号同前。

2) 产量约束:

$$\sum_{i=1}^m y_i \cdot s_i \geq R \quad (3)$$

式中, R 为农产品总量最少需求量(m^3)。

3) 单种作物种植面积约束:

$$s_{di} \leq s_i \leq s_{hi} \quad (4)$$

式中, s_{di} 为第 i 种作物最低种植面积(hm^2); s_{hi} 为第 i 种作物最高种植面积(hm^2)。

4) 水量约束:

$$\sum_{i=1}^m ET_{ai} \leq ET_a \quad (5)$$

式中, ET_{ai} 为第 i 作物全生育期最大需水量(m^3);

ET_a 为作物全生育期最大需水量(m^3)。

1.2 模糊优化模型

在灌区的规划管理中,有很多指标是通过综合的预测、估计以及分析从而确定的,具有一定的模糊性,所以在模型的约束中,引入模糊的概念,可以更好地为灌区的规划以及管理做好决策支持^[6]。设上述普通线性规划模型的最优解为 Z_0 , 在约束条件 $\sum_{i=1}^m s_i \leq S, s_i \leq s_{hi}$ 中不等式“ $\leq$ ”可以模糊化为大约小于等于“ $\lesssim$ ”。即将上文中叙述的多目标线性规划模型的约束条件改为:

1) 面积约束:

$$\sum_{i=1}^m s_i \lesssim S \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

式中, S 为种植面积(hm^2); R 为农产品总量最少需求量(万 t)。其余符号同前。

2) 单种作物种植面积约束:

$$s_{di} \leq s_i \lesssim s_{hi} \quad (7)$$

式中, s_{di} 为第 i 种作物最低种植面积(hm^2); s_{hi} 为第 i 种作物最高种植面积(hm^2)。

1.3 模型求解

该模型为多目标模糊模型,解该模型要先将多目标模型转化为单目标模型,再进行计算。自然语言与文字形容词的本质特点是其模糊性,它是人们使用经验知识对事物进行二元比较的重要手段。为了使二元定量对比符合我国汉语的习惯,给出相关的定量标度,引入语气算子和隶属度。为此,给出关于模糊概念与重要性的 10 个形容词级差:同样、稍稍、略为、较为、明显、十分、非常、极其、极端、无可比拟,并给出两个模糊标度边界值:0.5 与 1.0,分别对应着同样重要与无可比拟重要的两个描述重要程度的形容词。语气算子和对应的隶属度参见表 1。由指标的重要性排序一致性定理,得到的指标的重要性排序一致性标度矩阵 E ,按照 E 确定的指标关于重要性的排列顺序,运用经验知识,首先确定出各个指标的模糊语气算子,然后根据表 1 中的语气算子与相对隶属度的对应关系,将模糊语气算子转换为各指标的相对隶属度,得到指标的非归一化权向量 W' ,将其归一化,即可得到指标的归一化权向量 W ,进而就可以确定 λ_1 、 λ_2 的值^[7]。

综上所述,多目标模型转化为单目标模型为:

$$\text{Max} Z = \lambda_1 \frac{f_1}{f_{1\max}} - \lambda_2 \frac{f_2}{f_{2\min}} \quad (8)$$

表 1 语气算子与定量标度关系

Table 1 Relationship between tone operators and quantitative scale

语气算子 Tone operator	同样 Same	稍微 Slightly	略微 Somewhat	较为 Relatively	明显 Apparently	显著 Remarkable	十分 Unusual	非常 Very	极其 Most	极端 Extremely	无可比拟 Inapproachable
定量标度 Quantitative scale	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1
相对隶属度 Relative-membership	1	0.818	0.739	0.667	0.429	0.333	0.25	0.176	0.111	0.053	0

将模型转化为单目标后,再将模糊线性规划转化为普通线性规划,其原模型如下:

目标函数:

$$\begin{aligned} \text{Max } Z &= \lambda_1 \frac{f_1}{f_{1\max}} - \lambda_2 \frac{f_2}{f_{2\min}} \\ \begin{cases} \sum_{i=1}^m s_i &\leq S \\ \sum_{i=q}^m y_i \cdot s_i &\geq R \\ s_{di} &\leq s_i \leq s_{hi} \\ \sum_{i=1}^m ET_{ai} &\leq ET_a \end{cases} \end{aligned} \tag{9}$$

$$v_{D_i}(x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n) = \begin{cases} 1 & s_i \leq s_{hi} \\ 1 - \frac{1}{d_i}(s_i - s_{hi}) & s_{hi} \leq s_i \leq s_{hi} + d_i \\ 0 & s_{hi} + d_i \leq s_i \end{cases} \quad \text{其中 } i = 1, 2, 3, \cdots, n \tag{10}$$

同理,对于总面积约束,则有:

$$v_{D_a}(x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n) = \begin{cases} 1 & \sum_{i=1}^n s_i \leq S \\ 1 - \frac{1}{d_i}(\sum_{i=1}^n s_i - S) & S \leq \sum_{i=1}^n s_i \leq S + d_a \\ 0 & S + d_a \leq \sum_{i=1}^n s_i \end{cases} \quad \text{其中 } i = 1, 2, 3, \cdots, n \tag{11}$$

设目标函数对应的 X 中有一个模糊子集 Y ,令目标函数的伸缩值为 d_0 , d_0 为在约束条件 $s_i \leq s_{hi} + d_i, (i = 1, 2, 3, \cdots, n)$ 且 $\sum_{i=1}^n s_i \leq S + d_a$ 下,普通线性规划的目标最优值与 Z_0 之间的差值。 d_a 为总面积的伸缩值。其中,当目标函数不大于 Z_0 时,它的隶属函数的值为 0;当其介于 Z_0 与 $Z_0 + d_0$ 之间时,它的隶属函数也介于 0 到 1 之间;除此之外,它的目标函数为 1,则其目标函数的隶属度函数为:

$$v_F = \begin{cases} 1 & Z \geq Z_0 + d_0 \\ 1 + \frac{1}{d_0}(Z - Z_0) & Z_0 \leq Z \leq Z_0 + d_0 \\ 0 & Z \leq Z_0 \end{cases} \tag{12}$$

综上所述,模糊线性规划模型则转化为普通的线性规划模型,公式如下:

公式中各变量含义同上。

对于各种作物的面积约束,设 $X = \{x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n \mid x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n \in R^n, x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n \geq 0\}$,对于第 i 个约束条件, X 中有模糊子集 D_i ,使第 i 个约束条件的伸缩值是 d_i ,如果当第 i 个约束条件超过其伸缩值 d_i 时,它的隶属度为 0;如果第 i 个约束条件被完全满足时,它的隶属度为 1。其余条件下,隶属度都在 0 和 1 之间。那么第 i 个约束条件的隶属函数就可确定为:

$$\begin{aligned} \text{Max } &\lambda \\ \text{s. t. } &\begin{cases} v_{D_i}(x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n) \geq \lambda & i = 1, 2, 3, \cdots, n \\ v_{D_a} \geq \lambda \\ v_F \geq \lambda \\ 1 \geq \lambda \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \tag{13}$$

2 研究实例

2.1 研究区概述

民勤位于甘肃省西北部,河西走廊东北部,石羊河流域下游,东、西、北三面被腾格里和巴丹吉林大沙漠包围。南依武威市凉州区,西毗镍都金昌,东北和西北面与内蒙古的左、右旗相接。属温带大陆性干旱气候区。降水稀少,蒸发量大,年均降水只有

110 mm,蒸发量却多达 2 644 mm;昼夜温差较大,能达到 25.2℃;光照充足,年日照时数为 3 073.5 h;风沙多,平均每年有 37 d 的沙尘暴天气,最大风力达 11 级,属于典型的干旱荒漠气候^[8]。

选择占据灌区大部分面积的作物作为计算选择的作物。包括春小麦、玉米、棉花、黑红瓜子、食葵、西甜瓜、白瓜子、辣椒。

作物的经济数据包括产量($\text{kg}\cdot 666.7\text{m}^{-2}$),价格($\text{元}\cdot \text{kg}^{-1}$),单种作物总产值(万元),作物总产值(万元),种植面积范围(hm^2),单种作物种植面积范围(hm^2),农产品最低需求量。

其中,作物的产量、价格参考 2009 年、2010 年民勤县种植业收益情况调查表。它是根据搜集上来的信息进行调查分析得到的。

综合考虑两年的经济数据,确定规划时所用的相关参数。确定方法为取二者的平均值作为本文中计算的依据。结果见表 2。

另外,单种作物种植面积的范围根据 2002—2010 年武威市统计年鉴来确定,作物种植总面积以 2009 年为基准。作物需水量根据康绍忠主编的《西北旱区流域尺度水资源转化规律及其节水调控模式》^[9],胡志桥撰写的《石羊河流域主要作物的需水量及需水规律的研究》^[10]以及李甫斌撰写的《长辣椒需水量与灌溉制度》^[11]来确定的。三种资料中,当遇到某一种数据不一致时,即取平均值作为本文中的计算依据。作物最大需水量和作物最少需求总量则是根据 2002—2010 武威市统计年鉴,综合考虑多年数据选定。

旱作作物种植结构优化模型基础数据见表 2。

对于单种作物种植面积的伸缩量 d_i 的取值为 S_{hi} 的 5%, d_a 的取值为 5(见表 3)。

2.2 民勤灌区种植结构优化结果

使用上述模型对民勤县种植结构进行优化,其中变量即为作物种植面积,结果见表 4~表 8。

表 2 旱作作物种植结构优化模型基础数据
Table 2 Basic data for planting structure optimization model of dry crops

品种名称 Variety	Y 产量 Yield /($\text{kg}\cdot \text{hm}^{-2}$)	P 产品价格 Price /($\text{yuan}\cdot \text{t}^{-1}$)	ET /mm	作物最大需 水量 ET_a / 10^4m^3	s_h	s_d	作物最少需求 总量 R / 10^4t
小麦 Wheat	7050	2200	597.66	35	21	10.6	30
玉米 Maize	11700	1850	609.60		9.1	7.80	
棉花 Cotton	3750	7750	368.76		28.0	14.5	
黑红瓜子 Melon seeds	1650	10950	377.96		5.4	1.68	
食葵 Sunflower	6150	4250	582.30		18.0	14.8	
西甜瓜 Water melon	37500	1100	377.96		2.8	2.70	
白瓜子 White melon-seeds	1950	15750	377.96		2.0	0.90	
辣椒 Hot pepper	21300	1500	791.60		6.0	5.30	

表 3 旱作作物种植结构优化模糊模型伸缩量/ hm^2
Table 3 Expansion amount of planting structure optimization fuzzy model of dry crops

d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_a
70.00	30.67	93.34	18.00	66.67	9.33	6.67	20.00	333.35

表 4 ‘同样’情景下计算结果
Table 4 Calculation in situation ‘Same’

品种名称 Variety	变量 Variable	每种作物产值/万元 Output value / 10^4yuan	总产值/万元 Total output value / 10^4yuan	每种作物需水量 Water demand / 10^4m^3	总需水量 Total water demand / 10^4m^3
小麦 Wheat	706.70	10960.40	128134.17	4225.58	24666.69
玉米 Maize	520.03	11284.26		3171.50	
棉花 Cotton	1913.43	54939.00		7059.14	
黑红瓜子 Melon seeds	112.01	2014.36		423.53	
食葵 Sunflower	986.72	25537.40		5748.23	
西甜瓜 Watermelon	191.34	7892.50		723.53	
白瓜子 White melon-seeds	136.67	4197.38		516.80	
辣椒 Hot pepper	353.35	11308.88		2798.39	
λ	0.50				

表 5 ‘略微’情景下计算结果
Table 5 Calculation in situation ‘Somewhat’

品种名称 Variety	变量 Variable	每种作物产值/万元 Output value /10 ⁴ yuan	总产值/万元 Total output value /10 ⁴ yuan	每种作物需水量 Water demand /10 ⁴ m ³	总需水量 Total water demand /10 ⁴ m ³
小麦 Wheat	706.70	10960.40	142953.9	4225.58	28103.6
玉米 Maize	621.36	13481.42		3789.03	
棉花 Cotton	1911.43	54887.39		7052.51	
黑红瓜子 Melon seeds	368.69	6630.37		1394.06	
食葵 Sunflower	1228.73	31805.58		7159.14	
西甜瓜 Watermelon	191.34	7885.09		722.85	
白瓜子 White melon-seeds	136.67	4193.43		516.32	
辣椒 Hot pepper	409.35	13110.24		3244.13	
λ	0.52				

表 6 ‘明显’情景下计算结果
Table 6 Calculation in situation ‘Apparently’

品种名称 Variety	变量 Variable	每种作物产值/万元 Output value /10 ⁴ yuan	总产值/万元 Total output value /10 ⁴ yuan	每种作物需水量 Water demand /10 ⁴ m ³	总需水量 Total water demand /10 ⁴ m ³
小麦 Wheat	1425.40	22107.10	153335.76	8522.98	32262.65
玉米 Maize	617.36	13403.30		3767.07	
棉花 Cotton	1900.76	54569.33		7011.64	
黑红瓜子 Melon seeds	366.69	6591.95		1385.98	
食葵 Sunflower	1222.06	31621.28		7117.66	
西甜瓜 Watermelon	190.01	7839.40		718.66	
白瓜子 White melon-seeds	136.01	4169.13		513.33	
辣椒 Hot pepper	407.35	13034.27		3225.33	
λ	0.64				

表 7 ‘十分’情景下计算结果
Table 7 Calculation in situation ‘Unusual’

品种名称 Variety	变量 Variable	每种作物产值/万元 Output value /10 ⁴ yuan	总产值/万元 Total output value /10 ⁴ yuan	每种作物需水量 Water demand /10 ⁴ m ³	总需水量 Total water demand /10 ⁴ m ³
小麦 Wheat	1409.40	21860.16	151622.98	8427.77	31902.27
玉米 Maize	610.70	13253.59		3725.00	
棉花 Cotton	1879.43	53959.78		6933.32	
黑红瓜子 Melon seeds	362.68	6518.32		1370.50	
食葵 Sunflower	1208.06	31268.06		7038.15	
西甜瓜 Watermelon	188.01	7751.83		710.63	
白瓜子 White melon-seeds	134.01	4122.56		507.59	
辣椒 Hot pepper	402.69	12888.68		3189.31	
λ	0.87				

通过各表的对比可以发现：

(1) 由表可知,相对于 2009 年,优化过后的粮食作物比重减少,经济作物的比重增加。

(2) 棉花属于相对需水量较小的作物,所以当

需水量目标所占比重较大时,则棉花种植面积增大。

(3) 随着效益目标所占比例越来越大,经济作物所占比重都在增加,但当效益目标增大到一定程度时,作物种植结构基本不发生变化了。

表 8 ‘极其’情景下计算结果
Table 8 Calculation in situation ‘Most’

品种名称 Variety	变量 Variable	每种作物产值/万元 Output value /10 ⁴ yuan	总产值/万元 Total output value /10 ⁴ yuan	每种作物需水量 Water demand /10 ⁴ m ³	总需水量 Total water demand /10 ⁴ m ³
小麦 Wheat	1426.74	22128.93	153487.15	8531.39	32294.50
玉米 Maize	618.03	13416.54		3770.79	
棉花 Cotton	1902.76	54623.21		7018.56	
黑红瓜子 Melon seeds	366.69	6598.46		1387.35	
食葵 Sunflower	1222.73	31652.50		7124.68	
西甜瓜 Watermelon	190.01	7847.14		719.37	
白瓜子 White melon-seeds	136.01	4173.25		513.83	
辣椒 Hot pepper	407.35	13047.14		3228.52	
λ	0.62				

(4) 优化后的五个情景的总种植面积均小于或基本等于优化前 2009 年的种植面积,但是总产值却都高于 2009 年。

(5) 随着不同情境中的效益目标所占比重的增加,优化后的总产值和需水量都呈整体增加趋势。但需水量增加的比例明显小于总产值增加的比例。

(6) 当效益目标所占比重增加到一定程度后,不同情境下的种植总面积、需水量以及总产值的变化都趋于平稳。

3 结 论

本文以石羊河武威市民勤县为实例,对基础资料和数据进行分析和计算,得出春小麦、玉米、棉花、黑红瓜子、食葵、西甜瓜、白瓜子、辣椒等作物的经济效益以及需水量,利用语气算子决定相对隶属度,在不同情境下,分别使用 EXCEL 的规划求解功能,对确定性模型、模糊模型和隶属度模型进行规划,最后根据模糊求解算出优化结果。

综上所述,得出以下结论:

(1) 相对于确定性模型,模糊模型可以很好地处理现实生活中的不确定性问题,在无法确定民勤县的总种植面积以及各种作物的面积约束时,使用模糊算法,可以更加科学地处理这些问题。

(2) 本文在对民勤县种植结构进行优化时,采用经济与需水量的多目标优化模型,在不同语气算子的情境下,经济目标与需水量目标所占比重各不相同,这样对于决策者可以更好地选择最适合的种植结构模式,更有利于该地的经济收益以及消耗用水的平衡。

(3) 由前文可知,如果要增加该地区的经济收益,就要将粮食作物的比重减少,而增加经济作物的种植比重。若要使需水量减少,则要增加棉花等需水量较小的作物的种植比重。

(4) 即使要通过改变种植结构来增加一个地区的经济收益,也要考虑该地区的粮食安全问题,只有使一个地区的经济、社会、水资源、生态得到平衡,这个地区才能够健康稳定,并可以持续地发展下去。

参 考 文 献:

[1] 高明杰,罗其友.水资源约束地区种植结构优化研究——以华北地区为例[J].自然资源学报,2008,(2):204-210.

[2] 杨林娟.甘肃石羊河流域民勤绿洲水资源可持续利用对策[J].中国农业资源与区划,2007,(1):30-33.

[3] 闫志忠.调整种植结构发展节水农业[J].甘肃水利水电技术,2003,(3):171-172.

[4] 李永涛,龚道枝,梅旭荣,等.基于 VB 的旱作作物种植结构决策支持系统开发[J].干旱地区农业研究,2010,(3):90-95.

[5] 徐万林.基于水资源高效利用的农业种植结构优化[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2011.

[6] 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,(5):36-40.

[7] 陈守煜,伏广涛,周惠成,等.含水层脆弱性模糊分析评价模型与方法[J].水利学报,2002,(7):23-30.

[8] 孙 涛,王继和,刘虎俊,等.民勤绿洲生态环境现状及恢复对策[J].中国农学通报,2010,(7):245-251.

[9] 康绍忠,粟晓玲,杜太生,等.西北旱区流域尺度水资源转化规律及其节水调控模式——以甘肃石羊河流域为例[M].北京:中国水利水电出版社,2009.

[10] 胡志桥,田霄鸿,张久东,等.石羊河流域主要作物的需水量及需水规律的研究[J].干旱地区农业研究,2011,(3):1-6.

[11] 李甫斌.长辣椒需水量与灌溉制度研究[J].甘肃农业,2005,(11):98.