

基于双层分式规划的种植结构多目标模型研究*

李 茉 郭 萍

(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 构建了基于双层分式规划的种植结构多目标优化模型,并通过交互式模糊规划方法进行求解。该模型可以定量得到研究区域在最小灌溉水量情况下的最大种植收益,避免多目标模型求解过程中的主观性;可以兼顾并综合上层管理者和下层管理者的种植方案决策。将构建的模型及相应求解方法应用于黑河中游甘州区、临泽县、高台县的种植结构优化中,并将优化结果与实际结果进行对比,结果发现:优化的种植结构整体效益增加 3.2×10^8 元,整体用水量减少 $1.3 \times 10^9 \text{ m}^3$,单方水种植效益比实际增加了 1.94 元/ m^3 ,得到的结果验证了模型及求解方法的可行性。构建的模型与得到的优化结果可为黑河中游及类似地区作物种植结构优化提供理论依据与决策支持。

关键词: 种植结构 多目标优化 双层分式规划 交互式模糊规划

中图分类号: S11+7; N945.15 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)09-0168-07

引言

作物种植结构是农业和灌溉用水管理部门的重要参考数据^[1],种植结构优化可以促进水资源的优化配置,提高水资源的有效利用率^[2],缓解水资源的供需矛盾,从而使农业得以持续发展。

种植结构优化模型分为单目标模型和多目标模型2种,常用的优化方法有线性规划、非线性规划、动态规划、模糊优化、模拟退火方法、混沌优化等^[3]。为了避免种植结构单目标优化模型只注重区域经济效益的弊端,国内外学者开始进行种植结构多目标优化模型的研究^[4-5]。常见的多目标优化方法有目标权重法、灰色分析法、妥协约束法、熵权系数法、模糊优选理论、有序度熵模型、进化算法等^[6-13]。这些方法在种植结构优化模型的研究上起到了一定的指导意义,但上述方法多数在系数的计算、目标函数指标权重的确定上存在主观因素,缺乏理论依据。并且,在以往的种植结构多目标模型中,决策者只注重单一层次的种植综合效益,却忽略了该层次的规划对其它层次规划的影响,只有综合上下层决策者的规划,才能真正适应区域可持续发展的要求。为了解决上述问题,本文构建基于双层分式规划的种植结构多目标优化模型,并将其应用于黑河中游种植结构规划中,优选出种植结构调整方案,为种植结构的调整以及灌溉水资源的合理利

用提供决策依据。

1 基于交互式模糊规划的双层线性分式规划原理

对于 Sakawa 等^[14]提出的基于交互式模糊规划的双层线性分式规划的基本理论及求解方法,国外在近些年内取得了一定的研究成果,该理论及方法多被应用在经济模型中,在其他领域还没有被广泛应用。

1.1 双层线性分式规划

经典的双层线性分式规划模型可以表示如下^[15-16]:

上层规划

$$\max_{x_0} z_0(x) = \frac{c_0x + \alpha_0}{d_0x + \beta_0} \tag{1}$$

下层规划

$$\max_{x_i} z_i(x) = \frac{c_i x + \alpha_i}{d_i x + \beta_i} \quad (i = 1, 2, \cdots, k) \tag{2}$$

结构约束条件

$$x \in S = \{x \in \mathbf{R}^n \mid Ax \leq b, x \geq 0\} \tag{3}$$

其中, $x_i(i = 0, 1, \cdots, k)$ 为 n_i 维决策变量; $z_i = (x_0, x_1, \cdots, x_k)$,为第 i 层决策的目标函数, $i = 0, 1, \cdots, k$; $c_0, d_0, c_i, d_i(i = 1, 2, \cdots, k)$ 是 n 维行向量; $\alpha_0, \beta_0, \alpha_i, \beta_i(i = 1, 2, \cdots, k)$ 是常数; b 是 m 维列向量; A 是 $m \times n$ 矩阵, S 是非空集合,是 $\mathbf{R}^n$ 中的凸紧集,并保

收稿日期: 2013-09-14 修回日期: 2013-10-08
* 国家自然科学基金资助项目(91125017、41271536)
作者简介: 李茉, 博士生, 主要从事水资源管理相关研究, E-mail: limo0205@126.com
通讯作者: 郭萍, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源规划与管理、模型与优化以及决策支持系统研究, E-mail: guop@cau.edu.cn

证对于任意的 i , 都有 $\min\{\mathbf{d}_i\mathbf{x} + \beta_i \mid \mathbf{x} \in S\} > 0$ 。

本文定义上层规划的决策为 D_0 , 下层规划的决策为 $D_i (i = 1, 2, \dots, k)$ 。

1.2 将双层分式规划模型转换成双层线性规划模型

1.2.1 建立 D_0 和 D_i 的隶属度目标函数

(1) 本文隶属度函数均采用三角模糊隶属度函数的形式。令 D_0 的隶属度函数为^[17]

$$\mu_{z_0}(z_0) = \begin{cases} 0 & (z_0 < z_0^m) \\ \frac{z_0 - z_0^m}{z_0^* - z_0^m} & (z_0^m \leq z_0 \leq z_0^*) \\ 1 & (z_0 > z_0^*) \end{cases} \quad (4)$$

其中 $\max z_0(\mathbf{x}) = z_0^*$, $\min z_0(\mathbf{x}) = z_0^m$ 。

(2) 令 D_i 的隶属度函数为

$$\mu_{z_i}(z_i) = \begin{cases} 0 & (z_i < z_i^m) \\ \frac{z_i - z_i^m}{z_i^* - z_i^m} & (z_i^m \leq z_i \leq z_i^*) \\ 1 & (z_i > z_i^*) \end{cases} \quad (5)$$

令 $\max z_i(\mathbf{x}_i) = z_i^*$ 是 D_i 第 i 个目标函数的最大目标值, 决策变量为 $\mathbf{x}_i$, $\min z_i(\mathbf{x}_j) = z_i^m$ 是 D_i 第 i 个目标函数的最小目标值, 决策变量为 $\mathbf{x}_j$ ^[14]。

1.2.2 转换约束

对于任一隶属度函数 $\mu_{f_i}(f_i)$, 通常附带一个不等式, 即

$$\mathbf{d}_i\mathbf{y} + \beta_i t \leq 1 \quad (i = 0, 1, \dots, k) \quad (6)$$

其中 $\mathbf{y} = t\mathbf{x}$

t 为常数, 且 $t > 0$ 。式(6)为转换约束, 它可以将线性分式隶属度函数转换成普通线性函数。具体转化原理参照文献[18-19]。

1.2.3 D_0 的最小满意度约束

由于上层规划的决策 D_0 是以全局的角度进行决策的, 对于上层规划的隶属度函数 $\mu_{z_0}(z_0)$, D_0 通常会指定一个最小满意度水平 $\delta \in [0, 1]$, 可以通过 $\mu_{z_0}(z_0) \geq \delta$ 进行表示, 称其为上层规划的最小满意度约束, 根据式(4)和式(6), $\mu_{z_0}(z_0) \geq \delta$ 可以转换为^[19]

$$(\mathbf{c}_0 - \mathbf{d}_0\mu^{-1}(\delta))\mathbf{y} + (\alpha_0 - \beta_0\mu^{-1}(\delta))t \geq 0 \quad (7)$$

1.2.4 妥协约束

令 $\omega_i (i = 1, 2, \dots, k)$ 为下层规划第 i 个目标函数的重要性权重, 且 $\sum_{i=1}^k \omega_i = 1$ 。为了求出双层分式规划的 Pareto 最优解, 上、下层规划中的各决策者会寻求一个妥协的规划方案, 使其能够尽可能地满足^[19-20]

$$\frac{\mu_{f_0}(f_0)}{\omega_0} \cong \frac{\mu_{f_1}(f_1)}{\omega_1} \cong \frac{\mu_{f_2}(f_2)}{\omega_2} \cong \dots \cong \frac{\mu_{f_k}(f_k)}{\omega_k} \quad (8)$$

在这种情况下, 可以求解

$$\max_{\mathbf{y}, t} \min_i \frac{\mu_{f_i}(f_i)}{\omega_i}$$

因此有

$$\min_i \frac{\mu_{f_i}(f_i)}{\omega_i} = \lambda \Rightarrow \frac{\mu_{f_i}(f_i)}{\omega_i} \geq \lambda \quad (9)$$

经过转换得到妥协约束

$$\mu_{f_i}(f_i) - \lambda\omega_i \geq 0 \quad (i = 0, 1, \dots, k) \quad (10)$$

因此, 综合双层分式规划的原始模型及式(6)、式(7)、式(10), 可以将双层分式规划模型通过一系列转换变为普通线性规划模型

$$\max \lambda$$

约束条件:

结构约束 $\mathbf{A}\mathbf{y} - \mathbf{b}t \leq 0$

转换约束 $\mathbf{d}_i\mathbf{y} + \beta_i t \leq 1 \quad (i = 0, 1, \dots, k)$

上层规划的最小满意度约束

$$[\mathbf{c}_0 - \mathbf{d}_0\mu^{-1}(\delta)]\mathbf{y} + [\alpha_0 - \beta_0\mu^{-1}(\delta)]t \geq 0$$

妥协约束 $\mu_{f_i}(f_i) - \lambda\omega_i \geq 0 \quad (i = 0, 1, \dots, k)$

非负约束 $\mathbf{y} \geq \mathbf{0} \quad t > 0 \quad \lambda \geq 0$

其中 $\mathbf{0}$ 是零向量。

令 $\mathbf{y}^*$ 、 t^* 为上式的最优解, 那么 $\mathbf{x}^* = \mathbf{y}^*/t^*$, 则目标函数的满意度 $\mu_{z_i}[z_i(\mathbf{x}^*)] (i = 0, 1, \dots, k)$ 会被反馈给 D_0 。

1.3 同层规划及上、下层规划之间的交互

1.3.1 同层规划之间的交互

(1) 如果 $\mu_{z_i}[z_i(\mathbf{x}^*)] (i = 1, 2, \dots, k)$, 比期望值要低, 那么增加 ω_i 。

(2) 如果 $\mu_{z_i}[z_i(\mathbf{x}^*)] (i = 1, 2, \dots, k)$, 比期望值要高, 那么降低 ω_i 。

1.3.2 上下层规划之间的交互

定义满意度 Δ 及其上、下限值 Δ_U 、 Δ_L 。其中 Δ 满足

$$\Delta = \frac{\sum_{i=1}^k \omega_i \mu_{z_i}[z_i(\mathbf{x}^*)]}{\mu_{z_0}[z_0(\mathbf{x}^*)]} \quad (11)$$

如果 $\Delta \in [\Delta_L, \Delta_U]$, 那么模型计算得到的解即为最优解; 如果 $\Delta < \Delta_L$, 那么 D_0 要减小最小满意度 δ 值; 如果 $\Delta > \Delta_U$, 那么 D_0 要增加最小满意度 δ 值。

2 基于双层分式规划的种植结构优化模型

本文构建基于双层分式规划的种植结构优化模型, 该模型可以在有限水资源约束及保证当地粮食产量的情况下, 求解得到最小灌溉水量情况下的最大种植效益, 同时兼顾上层管理和下层管理的统筹规划, 最终得到适合区域可持续发展的最优种植结构优化方案。模型具体表达式如下:

上层规划

$$\max z_0(\boldsymbol{a}) = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K P_{ik} Y_{ik} a_{ik} - \sum_{i=1}^I W_i}{\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K m_{ik} a_{ik}} \quad (12)$$

下层规划

$$\max z_i(\boldsymbol{a}) = \frac{\sum_{k=1}^K P_{ik} Y_{ik} a_{ik} - W_i}{\sum_{k=1}^K m_{ik} a_{ik}} \quad \forall i \quad (13)$$

约束条件:

面积约束

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K a_{ik} \leq A_{\max} \quad (14)$$

$$a_{ik, \min} \leq a_{ik} \leq a_{ik, \max} \quad \forall i, k \quad (15)$$

水量约束

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K m_{ik} a_{ik} \leq Q_1 + Q_2 \quad (16)$$

粮食安全约束

$$\sum_{i=1}^I a_{ij} \geq A_{j, \min} \quad \forall j \quad (17)$$

非负约束

$$a_{ik} \geq 0 \quad \forall i, k \quad (18)$$

式中 $z_0(\boldsymbol{a})$ 、 $z_i(\boldsymbol{a})$ ——目标函数,元/ m^3
 i ——地区, $i=1,2,\cdots,I$
 k ——作物种类, $k=1,2,\cdots,K$
 j ——粮食作物种类, $j=1,2,\cdots,J$
 a_{ik} ——第 i 地区第 k 类作物种植面积, hm^2
 a_{ij} ——第 i 地区第 j 类粮食作物种植面积, hm^2
 P_{ik} ——第 i 地区第 k 类作物平均单价,元/kg
 Y_{ik} ——第 i 地区第 k 类作物单位面积产量, kg/hm^2
 m_{ik} ——第 i 地区第 k 类作物毛灌溉定额, m^3/hm^2
 W_i ——第 i 个目标种植业的中间消耗,元
 $A_{\max}$ ——最大总种植面积, hm^2
 $a_{ik, \min}$ 、 $a_{ik, \max}$ ——第 i 地区第 k 类作物的最小、最大种植面积, hm^2
 Q_1 、 Q_2 ——种植作物的地表水和地下水可利用量, m^3
 $A_{j, \min}$ ——第 j 类粮食作物的最小总种植面积, hm^2

模型的具体求解流程见图 1。

3 实例应用

3.1 研究区域

本文将所构建的模型及相应求解方法应用于黑

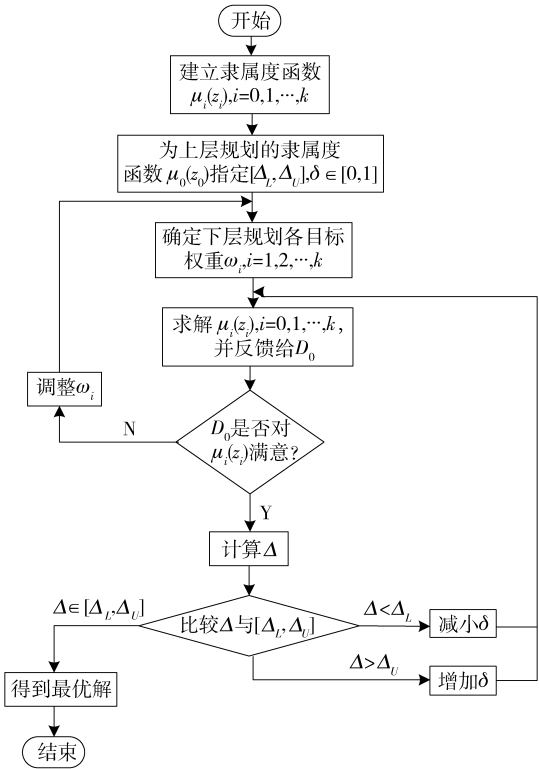


图 1 基于双层分式规划的种植结构多目标模型求解流程

Fig. 1 Solution flowchart of multi-objective optimization model of the planting structure based on two-level fractional programming

河中游甘州区、临泽县、高台县的种植结构优化中。农业约占甘、临、高三区(县)总用水的 90%。根据《黑河流域综合规划》报告中的规划目标,要保证黑河干流莺落峡、正义峡、狼心山和进入东居延海 4 个主要控制断面下泄水量的控制指标,需要适当减少中游农业用水,故对黑河中游进行种植结构优化具有实际意义。本文的优化对象为三区(县)的主要 3 类种植作物:夏禾,包括小麦、大麦和夏杂;秋禾,包括玉米、玉米制种、带田等;经济作物,主要指瓜菜等,优化典型年选取 2011 年。区域整体规划者注重的是全区域的综合效益最大,但是各子单元的规划者希望自己的区域获得最大的综合效益,因此有必要将上层决策者的规划与下层决策者的规划进行妥协整合,所以本应用将上层规划的目标函数定为甘、临、高三区(县)单位灌溉水量的最大种植效益,下层规划为三区(县)各自的单位灌溉水量的最大种植效益。模型目标函数及约束条件的基本参数见表 1 和表 2。根据实地调研确定各类作物的单位面积用水定额数据,单位面积产量数据根据《2011 年张掖统计年鉴》中各区(县)各类作物的产量及种植面积数据计算得到,根据《甘肃省张掖市水利发展“十二五”规划》报告,张掖盛产小麦、玉米、大麦、番茄、甜菜、油料、苹果等,其中小麦、大麦属于

夏禾,玉米属于秋禾,番茄、甜菜、油料、苹果属于经济作物类,本文以上述各种作物作为每类作物的典型作物来计算作物的平均价格,其中每种作物的价格数据来自农产品价格信息网,每类作物的价格按照所包含的各种作物的产量比例进行加

权。各区县种植业中间消耗数据来自《2011 年张掖统计年鉴》。甘、林、高三区(县)的地表水、地下水总可供水量分别为 $6.525\,6\times10^8\,\text{m}^3$ 、 $4.270\,7\times10^8\,\text{m}^3$ 、 $4.437\,6\times10^8\,\text{m}^3$ 。三区(县)的最大总种植面积 为 $1.246\times10^5\,\text{hm}^2$ 。

表 1 种植结构优化模型基础数据
Tab. 1 Basic data of planting structure optimization model

地区	单位面积毛用水量/($\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$)			单位面积产量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)			平均单价/(元 $\cdot\text{kg}^{-1}$)		
	夏禾	秋禾	经济作物	夏禾	秋禾	经济作物	夏禾	秋禾	经济作物
甘州区	2 779. 34	8 780. 17	11 823. 12	7 513. 86	8 753. 17	46 865. 29			
临泽县	2 650. 91	11 285. 51	12 272. 73	3 510. 96	8 372. 44	44 177. 39	2. 38	2. 27	3. 45
高台县	4 236. 80	10 491. 33	12 742. 45	6 676. 02	8 431. 19	37 604. 79			

表 2 种植结构优化模型基础数据
Tab. 2 Basic data of planting structure optimization model

地区	夏禾最小 面积/ hm^2	秋禾最小 面积/ hm^2	经济作物最小 面积/ hm^2	种植业中间 消耗/元
甘州区	1.13×10^4	3.94×10^4	7.5×10^3	$7.184\,4\times10^8$
临泽县	8.7×10^3	1.68×10^4	0	$4.359\,4\times10^8$
高台县	0	1.47×10^4	0	$5.963\,1\times10^8$

注:甘、临、高三区(县)经济作物最大总种植面积为 $2.54\times10^4\,\text{hm}^2$,高台县 3 类作物最大总种植面积为 $3.01\times10^4\,\text{hm}^2$ 。

3. 2 模型求解过程

根据基于双层分式规划的种植结构模型框架以及表 1 和表 2 提供的模型目标函数和约束条件的基础参数,并根据基于交互式模糊规划的双层线性分式规划原理对模型进行求解。求解的具体过程如下:

$$\mu_{z_0}(z_0)=\begin{cases} 0 & (z_0<1.423\,5) \\ \frac{1}{2.181\,6}\frac{13\,927a_{11}+7\,372a_{12}+144\,856a_{13}+4\,583a_{21}+2\,941a_{22}+134\,942a_{23}+9\,858a_{31}+4\,204a_{32}+111\,598a_{33}-175\,069}{2\,779a_{11}+8\,780a_{12}+11\,823a_{13}+2\,651a_{21}+11\,286a_{22}+12\,273a_{23}+4\,237a_{31}+10\,491a_{23}+12\,743a_{33}} & (1.423\,5<z_0<3.605\,1) \\ 1 & (z_0>3.605\,1) \end{cases}$$

下层规划 D_i : 下层规划各目标的目标值及相应自变量见表 3。所以

$$\mu_{z_1}(z_1)=\frac{z_1-1.843\,2}{2.255\,1}=\frac{1}{2.255\,1}\frac{12\,760a_{11}+3\,686a_{12}+139\,893a_{13}-71\,844}{2\,779a_{11}+8\,780a_{12}+11\,823a_{13}}$$
$$\mu_{z_2}(z_2)=\frac{z_2+0.209\,0}{4.847\,1}=\frac{1}{4.847\,1}\frac{8\,910a_{21}+21\,364a_{22}+154\,977a_{23}-43\,594}{2\,651a_{21}+11\,286a_{22}+12\,273a_{23}}$$
$$\mu_{z_3}(z_3)=\frac{z_3+0.319\,8}{5.564\,0}=\frac{1}{5.564\,0}\frac{17\,244a_{31}+2\,2494a_{32}+133\,813a_{33}-59\,631}{4\,237a_{31}+10\,491a_{32}+12\,743a_{33}}$$

(2) 假设 D_0 指定 $[\Delta_L,\Delta_U]=[0.5,1.0]$, $\delta=0.96$ 。其中 δ 是在不断的优选中得到的。关于 3 个

(1) 建立各层规划的隶属度函数
上层规划 D_0 :算得 $z^*=\max_{z_0}(a)=3.605\,1\,\text{元}/\text{m}^3$, 相应 $a^*=(a_{11},a_{12},a_{13},a_{21},a_{22},a_{23},a_{31},a_{32},a_{33})=(1.128\,1\times10^4,3.941\,1\times10^4,1.828\,9\times10^4,8.686\,0\times10^3,1.678\,3\times10^4,0,8.362\,0\times10^3,1.468\,1\times10^4,7.068\,0\times10^3)(\text{hm}^2)$, $z^m=\min_{z_0}(a)=1.423\,5\,\text{元}/\text{m}^3$, 相应的 $a^m=(1.128\,1\times10^4,3.941\,1\times10^4,0.750\,6\times10^4,8.686\times10^4,1.678\,3\times10^4,0,0,3.011\,1\times10^4,0)(\text{hm}^2)$ 。 a_{11} 、 a_{12} 、 a_{13} 、 a_{21} 、 a_{22} 、 a_{23} 、 a_{31} 、 a_{32} 、 a_{33} 分别代表甘州夏禾、甘州秋禾、甘州经济作物、临泽夏禾、临泽秋禾、临泽经济作物、高台夏禾、高台秋禾、高台经济作物。

所以 $\mu_{z_0}(z_0)=\frac{z_0-1.423\,4}{2.181\,6}$,即
 $(z_0<1.423\,5)$
 $(1.423\,5<z_0<3.605\,1)$
 $(z_0>3.605\,1)$
区(县)的重要性权重,本文根据专家意见及实地调研情况采用层次分析法计算获得,判断矩阵 $B=(b_{ij})_{n\times n}$ 及计算相关结果如表 4,判断矩阵重要性的比例标度参照文献[21]提出的改进层次分析法的比例标度。通过计算可得甘州区、临泽县、高台县的重要性权重分别为 0.433 2、0.268 1、0.298 8。对判断矩阵进行一致性检验,通过计算得到最大特征根 $\lambda_{\max}=$

$\left(\sum_{i=1}^n(BW)_i/\omega_i\right)n^{-1}=3.011\,8$,其中 W 为相应的特征向量。一致性指标 $C_I=(\lambda_{\max}-n)/(n-1)=0.005\,892$,平均一致性指标 $R_I=0.52$,所以判断矩阵的一致性比率 $C_R=C_I/R_I=0.011\,33<0.1$ 满足一致性要求。

根据双层分式规划模型转换成双层线性规划模型的方法原理将所构建模型转换成普通线性规划模型

表 3 下层规划各目标值的最大、最小值及对应的种植面积

Tab.3 Maximum value, minimum value and the corresponding planting areas of lower level

	a_1	a_2	a_3	$z^*/(\text{元}\cdot\text{m}^{-3})$	$z^m/(\text{元}\cdot\text{m}^{-3})$
a_{11}/hm^2	$1.128\ 1\times10^4$	$1.128\ 1\times10^4$	$1.128\ 1\times10^4$		
a_{12}/hm^2	$3.941\ 1\times10^4$	$3.941\ 1\times10^4$	$3.941\ 1\times10^4$		
a_{13}/hm^2	$1.828\ 9\times10^4$	$0.750\ 6\times10^4$	$0.750\ 6\times10^4$		
a_{21}/hm^2	$8.686\ 0\times10^3$	$8.686\ 0\times10^3$	$8.686\ 0\times10^3$		
a_{22}/hm^2	$1.678\ 3\times10^4$	$1.678\ 3\times10^4$	$1.678\ 3\times10^4$		
a_{23}/hm^2	0	$1.078\ 3\times10^4$	0		
a_{31}/hm^2	$1.543\ 0\times10^4$	$1.543\ 0\times10^4$	0		
a_{32}/hm^2	$1.468\ 1\times10^4$	$1.468\ 1\times10^4$	$1.468\ 1\times10^4$		
a_{33}/hm^2	0	0	$1.785\ 1\times10^4$		
$z_1/(\text{元}\cdot\text{m}^{-3})$	5.430 1	3.175 0	3.175 0	5.430 1	3.175 0
$z_2/(\text{元}\cdot\text{m}^{-3})$	-0.209 0	4.638 1	-0.209 0	4.638 1	-0.209 0
$z_3/(\text{元}\cdot\text{m}^{-3})$	-0.319 8	-0.319 8	5.244 2	5.244 2	-0.319 8

表 4 AHP 判断矩阵及权重计算相关结果

Tab.4 Basic parameters and the corresponding results of AHP

	判断矩阵元素			指标权重
	z_1	z_2	z_3	
z_1	1	1.8	1.3	0.433 0
z_2	0.555 6	1	1	0.268 1
z_3	0.769 2	1	1	0.298 8

注: z_1 、 z_2 、 z_3 分别代表甘州区、临泽县、高台县, $\omega_i = W_i / \sum_{i=1}^n \bar{W}_i$

且 $\bar{W}_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n b_{ij}}$ 。

$$\max = \lambda \tag{19}$$

结构约束

$$\begin{aligned} &y_{11} + y_{12} + y_{13} + y_{21} + y_{22} + y_{31} + y_{32} + y_{33} - 12.46t \leq 0 \\ &\quad - y_{31} - y_{32} - y_{33} + 3.01t \leq 0 \\ &y_{13} + y_{23} + y_{33} - 2.54t \leq 0 \\ &2\,779y_{11} + 8\,780y_{12} + 11\,823y_{13} + 2\,651y_{21} + 11\,286y_{22} + \\ &12\,273y_{23} + 4\,237y_{31} + 10\,491y_{32} + 12\,743y_{33} - 152\,339t \leq 0 \\ &-y_{11} + 1.13t \leq 0 \quad -y_{12} + 3.94t \leq 0 \quad -y_{13} + 0.75t \leq 0 \\ &-y_{21} + 0.87t \leq 0 \quad -y_{22} + 0.68t \leq 0 \quad -y_{32} + 1.47t \leq 0 \end{aligned}$$

转换约束

$$\begin{aligned} &2.181\,6(2\,779y_{11} + 8\,780y_{12} + 11\,823y_{13} + \\ &\quad 2\,651y_{21} + 11\,286y_{22} + 12\,273y_{23} + \\ &\quad 4\,237y_{31} + 10\,491y_{32} + 12\,743y_{33}) \leq 1 \\ &3.586\,9(2\,779y_{11} + 8\,780y_{12} + 11\,823y_{13}) \leq 1 \\ &4.847\,1(2\,651y_{21} + 11\,286y_{22} + 12\,273y_{23}) \leq 1 \\ &5.564\,0(4\,237y_{31} + 10\,491y_{32} + 12\,743y_{33}) \leq 1 \end{aligned}$$

上层规划的最小满意度约束

$$\begin{aligned} &8\,106y_{11} - 11\,017y_{12} + 120\,093y_{13} - 969y_{21} - \\ &20\,695y_{22} + 109\,239y_{23} + 985y_{31} - 17\,768y_{32} + \\ &\quad 84\,911y_{33} - 175\,069t \geq 0 \end{aligned}$$

妥协约束

$$\begin{aligned} &13\,927a_{11} + 7\,372a_{12} + 144\,856a_{13} + 4\,583a_{21} + \\ &\quad 2\,941a_{22} + 134\,942a_{23} + 9\,858a_{31} + 4\,204a_{32} + \\ &\quad 111\,598a_{33} - 175\,069t - \lambda \geq 0 \\ &12\,760a_{11} + 3\,686a_{12} + 139\,893a_{13} - 71\,844t - 0.43\lambda \geq 0 \\ &8\,910a_{21} + 21\,364a_{22} + 154\,977a_{23} - 43\,594t - 0.27\lambda \geq 0 \\ &17\,244a_{31} + 22\,494a_{32} + 133\,813a_{33} - 59\,631t - 0.3\lambda \geq 0 \end{aligned}$$

非负约束

$$y_{ik} \geq 0 (i = 1, 2, 3; k = 1, 2, 3) \quad \lambda \geq 0 \quad t > 0$$

3.3 结果分析及讨论

本文构建模型的优化结果见表 5, 其中 $a^* = y^*/t^*$, y^* 、 t^* 为模型 (19) 的最优解。 $t^* = 4.131 \times 10^{-6}$, $\lambda = 0.909\,7$ 。相应地, $z_0(a^*) = 3.566\,6$, $z_1(a^*) = 4.746\,4$, $z_2(a^*) = 2.082\,0$, $z_3(a^*) = 2.612\,1$ 。 $\mu_{z_0}(z_0) = 0.982\,3$, $\mu_{z_1}(z_1) = 0.696\,8$, $\mu_{z_2}(z_2) = 0.473\,5$, $\mu_{z_3}(z_3) = 0.529\,8$ 。 $\Delta = 0.6 \in [0.5, 1.0]$ 。将本文优化的结果与实际情况进行比较, 如表 6 和图 2。本文在三区(县)作物总种植面积不变的情况下对各区(县)的夏禾、秋禾及经济作物进行了优化调整, 在有限水资源约束及保证当地粮食产量的情况下, 获得了单位用水量下的最大种植效益, 并得到了兼顾整体和局部规划的决策方案。具体调整方案见表 6。从图 2 中可以看出甘州区优化的种植效益比当地实际效益提高了 1.015×10^9 元, 临泽县减少了 1.72×10^8 元, 高台县减少了 5.23×10^8 元, 三区(县)优化的整体效益比当地实际的效益提高了 3.2×10^8 元。甘州的用水增加了 $5.8 \times 10^7\ \text{m}^3$, 临泽县减少 $2.3 \times 10^7\ \text{m}^3$, 高台县减少 $4.8 \times 10^7\ \text{m}^3$, 整体用水减少 $1.3 \times 10^7\ \text{m}^3$, 如图 2 所示。整体单位用水量效益优化结果比实际增加了 $1.94\ \text{元}/\text{m}^3$ 。

表 5 基于双层分式规划的种植结构多目标模型求解部分结果

Tab.5 Results of the planting structure optimization model based on two-level fractional programming hm²									
参数	y_{11}	y_{12}	y_{13}	y_{21}	y_{22}	y_{23}	y_{31}	y_{32}	y_{33}
数值	0.047 56	0.166 15	0.060 98	0.036 62	0.070 75	0.016 21	0.035 25	0.061 89	0.029 80
参数	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{31}	a_{32}	a_{33}
数值	$1.128\ 1\times10^4$	$3.941\ 1\times10^4$	$1.445\ 3\times10^4$	8.686×10^3	$1.678\ 3\times10^4$	3.836×10^3	8.410×10^3	$1.468\ 1\times10^4$	7.020×10^3

表 6 2011 年优化种植结构方案与实际种植结构方案比较

Tab.6 Comparison between the optimal planting scheme and the actual planting scheme in 2011										hm ²
年份	面积									总面积
	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{31}	a_{32}	a_{33}	
2011(实际)	1.19×10^4	4.15×10^4	7.9×10^3	9.1×10^3	1.77×10^4	4.8×10^3	4.8×10^3	1.55×10^4	1.15×10^4	1.246×10^5
2011(优化)	1.13×10^4	3.94×10^4	1.45×10^4	8.7×10^3	1.68×10^4	3.8×10^3	8.4×10^3	1.47×10^4	7.1×10^3	1.246×10^5

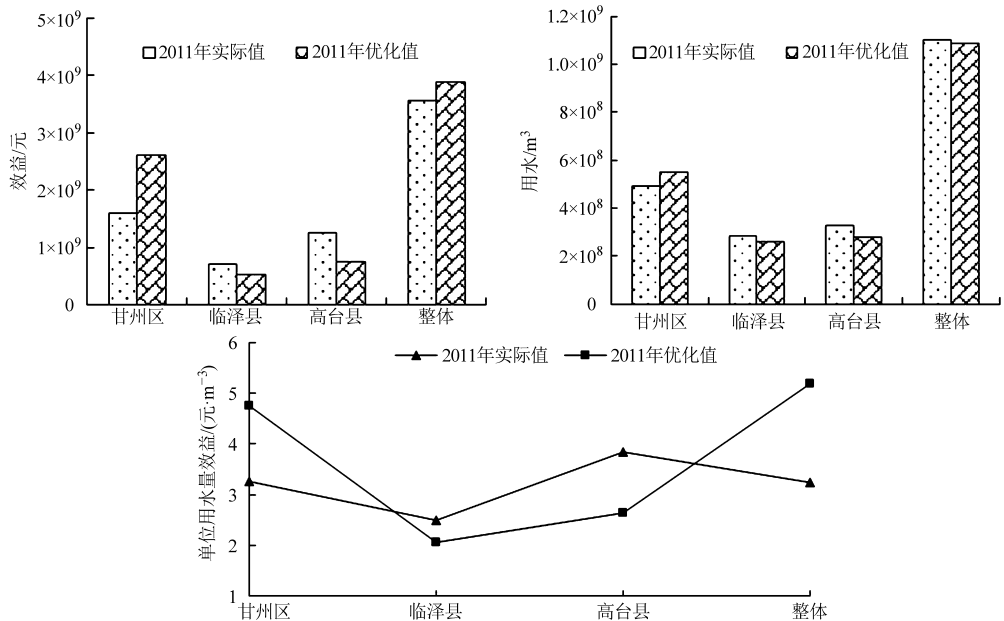


图 2 2011 年优化种植结构效益与实际种植结构效益比较

Fig.2 Comparison between the optimal planting benefit and the actual planting benefit in 2011

4 结束语

本文针对种植结构优化的多目标性及空间关联性,构建了基于双层分式规划的种植结构多目标模型,并对其解法进行系统研究,该模型可以实现在兼顾和协调上、下层管理决策方案的情况下,获得最小用水量下的最大种植效益以及相应的各类(种)作物的最优种植方案,使其能够满足区域可持续发展

要求。本文将所建立的模型及相应求解方法应用于黑河中游的甘州区、临泽县和高台县的种植结构优化中,并与当地的实际情况进行对比,优化的结果整体用水减少,效益增加显著,单位用水效益增加,并得到了各类作物种植面积的调整方案。得到的结果验证了本文构建的模型以及将基于交互式模糊规划的双层线性分式规划原理应用于种植结构优化上的可行性。

参 考 文 献

1 蔡学良,崔远来. 基于异源多时相遥感数据提取灌区作物种植结构[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 124 – 130.
Cai Xueliang, Cui Yuanlai. Crop planting structure extraction in irrigated areas from multi-sensor and multi-temporal remote sensing data [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(8): 124 – 130. (in Chinese)

2 李全起,陈雨海,周勋波,等. 不同种植模式麦田水资源利用率边际效益分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 90 – 95.
Li Quanqi, Chen Yuhai, Zhou Xunbo, et al. Effects of different planting patterns on water use efficiency and marginal profits of winter wheat [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 90 – 95. (in Chinese)

3 王玉宝. 节水型农业种植结构优化研究——以黑河流域为例[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
Wang Yubao. Optimization for water-saving crop planning and its application in Heihe river basin [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2010. (in Chinese)

- 4 马建琴, 陈守煜, 邱林. 作物种植结构与水量优化分配的多目标模糊模型与方法[J]. 农业科学与技术, 2004, 5(1): 5-10.
Ma Jianqin, Chen Shouyu, Qiu Lin. A Multi-objective fuzzy optimization model for cropping structure and water resources and its method [J]. Agricultural Science & Technology, 2004, 5(1): 5-10. (in Chinese)
- 5 张智韬, 刘俊民, 陈俊英, 等. 基于遥感和蚁群算法的多目标种植结构优化[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(2): 149-154.
Zhang Zhitao, Liu Junmin, Chen Junying, et al. Multi-objective optimization of crop planting structure based on remote sensing and ant colony algorithm [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(2): 149-154. (in Chinese)
- 6 牛凯. 中国农业结构调整的多目标线性规划模型研究[J]. 浙江农业学报, 2011, 23(4): 840-846.
Niu Kai. Studies of multi-objective linear programming model on Chinese agricultural structure adjustment [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2011, 23(4): 840-846. (in Chinese)
- 7 武雪萍, 吴会军, 庄严, 等. 节水型种植结构优化灰色多目标规划模型和方法研究——以洛阳市为例[J]. 中国农业资源与区划, 2008, 32(6): 16-21.
Wu Xueping, Wu Huijun, Zhuang Yan, et al. Planning model with grey multiple targets for optimization of water saving plantation structure and method study [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2008, 32(6): 16-21. (in Chinese)
- 8 曹连海, 吴普特, 赵西宁, 等. 近50年河套灌区种植系统演化分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 144-150.
Cao Lianhai, Wu Pute, Zhao Xining, et al. Analysis on the plantation on system evolution features of Hetao irrigation district in recent 50 years [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 144-150. (in Chinese)
- 9 汤瑞琼, 郭存芝, 董晓娟. 灌溉水资源优化配置的熵权系数模型研究[J]. 河海大学学报, 2000, 28(1): 18-21.
Tang Ruiliang, Guo Cunzhi, Dong Xiaojuan. An optimization model with entropic coefficients for management in irrigation water reosources [J]. Journal of Hohai University, 2000, 28(1): 18-21. (in Chinese)
- 10 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, 43(1): 12-15.
Chen Shouyu, Ma Jianqin, Zhang Zhenwei. 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)
- 11 周惠成, 彭慧, 张弛, 等. 基于水资源合理利用的多目标农作物种植结构调整与评价[J]. 农业工程学报, 2007(9): 45-48.
Zhou Huicheng, Peng Hui, Zhang Chi, et al. Optimization and evaluation of multi-objective crop pattern based on irrigation water resources allocation [J]. Transactions of CSAE, 2007(9): 45-48. (in Chinese)
- 12 Ma J Q, Chen S Y, Qiu L. A multi-objective fuzzy optimization model for cropping structure and water resources and its method [J]. Agricultural Science & Technology, 2004(1): 5-10.
- 13 Wang Y B, Wu P T, Zhao X N, et al. The optimization for crop planning and some advances for water-saving crop planning in the semiarid Loess Plateau of China [J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2010, 196(1): 55-65.
- 14 Sakawa M, Nishizaki I. Interactive fuzzy programming for two-level linear fractional programming problems [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2001, 119(1): 31-40.
- 15 Sakawa M, Nishizaki I, Uemura Y. Interactive fuzzy programming for two-level linear and linear fractional production and assignment problems: a case study [J]. European Journal of Operational Research, 2001, 135(1): 142-157.
- 16 杨丰梅. 线性分式——二次双层规划的一个充要条件[J]. 系统工程理论与实践, 2000, 20(3): 113-115.
Yang Fengmei. A necessary and sufficient condition for an optimal solution to linear fractional-quadratic bilevel programs [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2000, 20(3): 113-115. (in Chinese)
- 17 Emam O E. A fuzzy approach for bi-level integer non-linear programming problem [J]. Applied Mathematics and Computation, 2006, 172(1): 62-71.
- 18 Chakraborty M, Gupta S. Fuzzy mathematical programming for multi-objective linear fractional programming problem [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2002, 125(3): 335-342.
- 19 Mehmet A, Fatma T. Interactive fuzzy programming for decentralized two-level linear fractional programming (DTLLFP) problems [J]. Omega, 2007, 35(4): 432-450.
- 20 Shih H S. An interactive approach for integrated multilevel systems in a fuzzy environment [J]. Mathematical and Computer Modeling, 2002, 36(4-5): 569-585.
- 21 张晨光, 吴泽宁. 层次分析法(AHP)比例标度的分析与改进[J]. 郑州工业大学学报, 2000, 21(6): 85-87.
Zhang Chenguang, Wu Zening. Improvement and analysis of scale of AHP [J]. Journal of Zhengzhou University of Technology, 2000, 21(6): 85-87. (in Chinese)

12 Majidi K. Numerical study of unsteady flow in a centrifugal pump[J]. Journal of Turbomachinery, 2005, 127(4):363 – 371.

13 李仁年,权辉,韩伟,等. 变螺距叶片对螺旋离心泵轴向力的影响[J]. 机械工程学报,2011,47(14):158 – 163.

Li Rennian, Quan Hui, Han Wei, et al. Influences of variable-pitch blade on the screw centrifugal pump axial force[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(14):158 – 163. (in Chinese)

14 Zhao C X, Middelberg A P J. Two-phase microfluidic flows[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(7): 1394 – 1411.

15 李仁年,刘成胜,王秋红. 影响螺旋离心泵扬程的因素分析[J]. 兰州理工大学学报,2005,31(1):53 – 56.

Energy Loss Analysis of Impeller Flow of Screw Centrifugal Pump

Li Rennian Shen Zhengjing Han Wei Quan Hui Li Qifei

(School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The flow regime in screw centrifugal pump was simulated by the method of computational fluid dynamics (CFD), which can acquire the distribution of the pressure and relative velocity on the work side and back side of blade. The Rothalpy value along the streamlines of blade was used as a quantitative index of energy loss. The energy loss within the impeller field was analyzed from the perspective of energy loss when the transmission medium is pure water and solid-liquid two phase flow, in which the concentration of sand is 20% and the diameter of sand is 0.076 mm. The result shows that the front of impeller is a transition region of energy conversion, the screw part is the main region of energy increase, and the friction loss at the middle of screw part has an effect on the working capacity of screw part. Compared with pure water transmission medium, the working capacity of the impeller shows some improvement when the transmission medium is the solid-liquid two phase flow. And the energy of the two kind transmission media tends to become average at the outlet of impeller.

Key words: Screw centrifugal pump Impeller Solid-liquid two phase flow Energy loss

(上接第 174 页)

Multi-objective Optimization Model of Planting Structure Based on Two-level Fractional Programming

Li Mo Guo Ping

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

Abstract: A multi-objective optimization model of planting structure was developed by incorporating fractional programming and two-level programming. The proposed model was solved by interactive fuzzy programming. Two advantages the proposed planting structure model has two advantages: the maximum planting benefit with the minimum of irrigation water could be obtained quantificationally, and the subjectivity was avoided in the previous multi-objective optimization models; the optimal planting structure could be obtained by integrating the decisions from both the upper level and lower level in the study areas. The proposed model and the corresponding solution method were applied to the planting structure optimization in the middle reaches of Black River. The optimal results of planting structure were obtained, and the comparison between the optimal results and the actual results was also made. It shows that the planting benefit per unit of water increased by 1.94 yuan/m³, with the whole planting benefit increasing by 3.2 × 10⁸ yuan, and the total water consumption decreased by 1.3 × 10⁹ m³. The obtained results verified the feasibility of the model and its calculation method. The model and the corresponding results will provide theoretical basis and decision support to the study and similar areas.

Key words: Planting structure Multi-objective optimization Two-level fractional programming Interactive fuzzy programming