

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

周惠成¹, 彭 慧^{1*}, 张 弛¹, 肖建民²

(1. 大连理工大学土木水利学院水资源与防洪研究所, 大连 116024; 2. 黑龙江省水利厅, 哈尔滨 150001)

摘 要: 农业系统实质是社会-生态-经济复合系统, 水资源约束条件下的作物种植结构应统筹经济、社会、生态三大目标进行优化调整。针对作物种植结构调整多目标决策过程中, 在数据处理、模型构建、决策者偏好等方面存在的模糊性, 该文将交互式模糊多目标优化算法应用于求解作物种植结构优化调整模型, 实现与决策者之间的反复协商, 直至得到决策者满意的调整方案; 并应用耗散结构理论和模糊数学理论, 建立基于相对有序度熵的种植结构调整合理性评价模型。经实例研究验证了本文模型与方法的可行性, 为可持续发展种植业研究以及灌溉水资源的合理利用提供理论依据。

关键词: 水资源; 种植结构调整; 多目标优化; 合理性评价

中图分类号: S11⁺ 1; S11⁺ 7

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2007)9-0045-05

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, 23(9): 45-49.

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 the CSAE, 2007, 23(9): 45-49. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

中国水资源短缺, 每年因干旱缺水所造成的粮食减产达数百亿千克, 使粮食安全受到威胁, 水已成为影响作物产量的最重要因素^[1]。因此, 在水资源不足的地区, 必须统筹考虑社会经济发展、生态环境保护等因素, 优化作物种植结构, 合理配置有限的水资源, 将有限的水土资源最优分配给不同作物, 取得最佳的综合效益, 以实现农业的可持续发展。

自 20 世纪 80 年代以来, 多目标决策技术在农业水土资源优化利用中得到广泛应用。1988 年, C. T. de Wit 等人^[2]提出交互式目标规划模型(Interactive Multiple Goal Linear Programming, IMGLP), 该模型根据各目标约束的正、负偏差变量和其优先因子来构造, 并且能够实现与决策者之间的交互, 为解决多目标规划的常用方法。随后, 荷兰学者 R. Rabbinge 等人应用 IMGLP 模型获得了欧洲共同市场的满意土地利用规划方案^[3];

Lu 等人运用 IMGLP 模型制定出青石山流域合理可行的水土资源利用方案^[4]; 程智强等人利用 IMGLP 模型制定了北京市合理的作物种植结构方案^[5]。

然而, 农业系统是一复杂巨系统, 运用数学规划模型求解农业系统问题, 是对实际问题的抽象和概化, 在数据处理、模型构建以及决策者偏好等方面存在很大的模糊性, 多目标模糊决策被逐渐运用到农业系统决策管理中^[6]。2000 年, 陈守煜等人提出了作物种植结构优化的多目标模糊优化模型, 但是该模型将经济、社会、生态效益转化成一综合效益系数, 以此系数为权重来优化种植布局, 无法实现与决策者的交互^[7]。1983 年, Sakawa 首次提出交互式模糊多目标优化算法(Interactive Fuzzy Multiple Linear Programming, IFMLP), 该法利用模糊集理论将目标函数转换成相对隶属度函数, 并通过与决策者之间反复协商直至获取满意的目标权重, 进而得到隶属度-柏拉图(Membership-Pareto)最优解^[8]。本文探讨 IFMLP 算法在农作物种植结构优化调整中的应用, 并结合耗散结构理论和模糊数学理论, 建立相对有序度熵模型来评价调整方案的合理性, 优选出种植结构调整方案, 以期作为作物种植结构调整以及灌溉水资源的合理利用提供决策依据。

1 多目标作物种植结构优化模型

水土资源约束条件下的种植业, 在具有巨大的社会效益的同时, 还具有气体调节、气候调节、水源涵养等生态服务功能, 其生态效益也是不可忽视的。农业系统实质是经济子系统、社会子系统以及生态环境子系统

收稿日期: 2006-12-29 修订日期: 2007-04-16

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重点项目“东北地区水资源全要素优化配置与安全保障技术研究”; 大连理工大学青年教师培养基金项目(893222)

作者简介: 周惠成(1958-), 男, 吉林农安人, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源可持续利用与防洪减灾决策支持系统研究。大连 大连理工大学土木水利学院水资源与防洪研究所, 116024。

Email: hezhou@dlut.edu.cn

*通讯作者: 彭 慧(1981-), 女, 山东泰安人, 博士生, 主要研究水资源优化配置及生态环境需水量。大连 大连理工大学土木水利学院水资源与防洪研究所, 116024。Email: shuchang517@sohu.com

复合而成的生态经济系统^[9]。根据文献[10]的生态经济系统理论,并参考作物种植结构调整的最新研究成果^[6,7],确定以实现灌区经济效益、社会效益、生态效益三者的综合效益最大为目标,建立作物种植结构优化调整模型。

经济效益反映资源充分利用程度和生产效率的高低,净效益反映投入与产出的效益差值,是衡量经济效益的最直接指标。社会效益主要体现社会的分配公平和社区间的和谐关系,难于直接衡量与计算,而粮食增产是农民增收的最主要方式,增收意味着农民生活质量的提高,对灌区的社会稳定和安定团结起着直接作用,因此,本文选用粮食产量来间接衡量社会效益,作为一种近似处理方法。生态效益为一定性指标,也难于定量计算。陈仲新等人^[11]参考 Costanza 等人的研究成果曾对中国生态系统服务价值进行估算,本文参考该研究成果,确定用农作物的生态服务价值指标来衡量生态效益。

通过上述分析,在考虑水量、面积等约束条件下,建立经济效益、社会效益和生态效益最大的多目标优化模型如下:

$$\begin{aligned} \max_{X \in R} f(X) &= [f_1(X), f_2(X), f_3(X)] \\ \text{s. t. } R &= \{X | G(X) \leq 0, X \geq 0\} \end{aligned} \quad (1)$$

式中 X ——决策向量(农作物的种植面积); $f_1(X)$, $f_2(X)$, $f_3(X)$ ——经济效益,社会效益,生态效益目标函数; G ——约束条件集,表示水土约束,政策约束等。

2 交互式模糊多目标优化算法

交互式模糊多目标优化算法求解上述多目标模型的步骤概况如下^[12-14]:

1) 分别求解单目标优化问题 $f_p(X)$, $p = 1, 2, 3$, 获取最优解 X_p 、最优值 f_p , 并构建多目标优化问题的支付表,以确定每个目标函数的最大值 $f_p(X)^M$ 、最小值 $f_p(X)^m$ 。

2) 在 $[0, 1]$ 区间把目标函数 $f_p(X)$ 转换成目标相对隶属函数 $\mu_p(f_p(X))$, 其中对极大化和极小化的模糊目标函数分别采用式(2)、(3)进行转换。

$$\mu_p(f_p(X)) = (f_p(X) - f_p(X)^m) / ((f_p(X)^M) - f_p(X)^m) \quad (2)$$

$$\mu_p(f_p(X)) = (f_p(X)^M - f_p(X)) / ((f_p(X)^M) - f_p(X)^m) \quad (3)$$

3) 根据二元模糊比较决策分析法^[15]确定归一化后的目标权重 λ_p^* 。令迭代次数 $s = 1$ 。

4) 令 $\lambda_p^s = \lambda_p^*$, 求解模糊线性规划(式(4))得到满意解 X_p^s , 以及 $f_p^s(X)$ 、 λ_p^s 。

$$\begin{cases} \min \lambda_p^s (1 - \mu_p(f_p(X))) \\ X \in R \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} \min \lambda_p^s \mu_p(f_p(X)) \\ X \in R \end{cases} \quad (4)$$

5) 将第4步中获得的解信息提供给决策者,若满意则停止迭代, X_p^s 为一满意解;否则,重新按照决策者的偏好计算目标权重 λ_p^{s+1} 。令 $s = s + 1$, 返回第4步。

3 种植结构调整合理性评价模型

由协同论知,协同导致有序,不协同导致无序,在耗散结构中序参量决定系统的有序程度及演变方向,耗散结构由无序走向有序的机理关键在于其内部序参量之间的协同作用^[16]。由于农业系统符合耗散结构要求,因此其能否良性发展取决于经济子系统、社会子系统和资源环境子系统的序参量能否产生协同作用^[17]。由于“有序”与“无序”之间不存在绝对分明的界限,具有中介过渡性,属于模糊概念,本文结合模糊集理论^[15],定义相对有序度来说明子系统的有序程度。但是,子系统的相对有序度并不能反映子系统间的协同程度,不能表明农业系统整体的演变情况。系统的演化方向常由熵变理论来判别,根据系统极大熵原理^[18],定义系统的相对有序度熵,利用农业系统相对有序度熵的变化对种植结构调整方案的合理性进行评价。

评价模型的建立过程如下:

1) 确定经济、社会和生态三大子系统的序参量后,首先对各个序参量进行无量纲化处理,以消除量纲对评价结果的影响,对越大越优型和越小越优型序参量分别采用公式(5)、(6)进行无量纲化处理。

$$r_{ij} = (x_{ij} - x_{ij\min}) / (x_{ij\max} - x_{ij\min}) \quad (5)$$

$$r_{ij} = (x_{ij\max} - x_{ij}) / (x_{ij\max} - x_{ij\min}) \quad (6)$$

式中 r_{ij} —— j 子系统第 i 个序参量的相对隶属度; x_{ij} —— j 子系统第 i 个序参量值; $x_{ij\max}$ 、 $x_{ij\min}$ ——分别为 j 子系统第 i 个序参量的阈值上、下限。

2) 确定子系统对有序的相对隶属度,简称子系统相对有序度 u_j

$$u_j = \left[1 + \left[\sum_{i=1}^m [w_{ij}(1 - r_{ij})]^2 / \sum_{i=1}^m (w_{ij}r_{ij})^2 \right] \right]^{-1} \quad (7)$$

式中 u_j —— j 子系统的相对有序度, $u_j \in [0, 1]$; m —— j 子系统的序参量总个数; w_{ij} —— j 子系统第 i 个序参量的权重。

3) 确定农业系统的相对有序度熵 $E(t)$

$$E(t) = \sum_{j=1}^n k \ln u_j \quad (8)$$

式中 $E(t)$ ——第 t 个方案的农业系统的相对有序度熵; n ——子系统的总个数; k ——比例系数,通常取

$k = -1$ 。

当 $E(t+1) > E(t)$ 时, 表明系统熵增加, 无序度加大, 系统结构处于不稳定状态, 系统演变于恶性循环过程中, 第 $t+1$ 个种植结构调整方案不合理; 当 $E(t+1) < E(t)$ 时, 表明系统熵减少, 有序度增强, 系统处于良性循环状态, 第 $t+1$ 个种植结构调整方案合理; 当 $E(t+1) = E(t)$ 时, 表明一定时间间隔内, 系统熵无变化, 一般来说, 系统处于定态, 第 $t+1$ 个种植结构调整方案趋于合理。

4 应用实例

4.1 灌区概况

兴凯湖灌区位于黑龙江省兴凯湖农场辖区内, 区内有兴凯湖、八五七、八五八、庆丰和八五四 5 个农场。2002 年灌区总人口 3.66 万, 国内生产总值 15.44 亿元, 耕地面积 13.64 万 hm^2 , 地下水、地表水分别可提供灌溉水量 1.59 亿 m^3 、2.87 亿 m^3 。该区水土资源协调, 是中国重要的粮食生产和储备基地。

4.2 灌区现状

2002 年灌区有井灌水田面积 4.25 万 hm^2 , 渠灌水田 4.09 万 hm^2 , 旱田 5.30 万 hm^2 。由于灌溉管理不规范, 地下水灌溉由农民承担打井及年运行费, 水管理单位不收取任何费用; 而地表水灌溉征收的水资源费为 300 元/ hm^2 。农民在经济利益趋动下, 盲目无序开采地下水资源, 致使地下水严重超采, 灌溉保证率大大降低; 同时由于地下水水温低, 有机质含量少, 影响水稻的产量和米质, 而灌区靠近兴凯湖, 湖水灌溉比地下水水温高, 水源稳定, 是灌溉农作物的优质水源。因此进行地表水、地下水联合调度, 合理配置灌溉水资源, 优化调整作物种植结构, 以寻求最优的水土资源分配, 已成为本区发展的新课题。

4.3 规划调整可行方案

以灌区主要种植的农作物水稻 (x_1)、大豆 (x_2)、小麦 (x_3) 和玉米 (x_4) 为研究对象, 采用地表水、地下水联合调度的方式, 建立多目标农作物种植结构调整模型如下:

1) 净经济效益最大(万元)

$$\max f_1(X) = 3525x_1 + 1575x_2 + 270x_3 + 1500x_4$$

2) 粮食产量最大(万 kg)

$$\max f_2(X) = 6750x_1 + 2250x_2 + 3000x_3 + 6000x_4$$

3) 生态服务价值最大(万元)

$$\max f_3(X) = 55485x_1 + 3290x_2 + 968x_3 + 1857x_4$$

上述目标函数的约束条件为:

1) 水量约束(万 m^3)

$$5739x_1 + 750x_2 + 300x_3 + 1200x_4 \leq 44601$$

2) 面积约束(万 m^2)

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \leq 13.64$$

$$2.77 \leq x_1 \leq 7.78$$

$$1.09 \leq x_2 \leq 5.88$$

$$0 \leq x_3 \leq 1.56$$

$$0 \leq x_4 \leq 0.51$$

可行调整方案生成的迭代过程如下:

1) 方案 1 的调整策略: 考虑到灌溉成本, 认为经济目标“稍稍”重要于社会目标, “略微”重要于生态目标, 由二元模糊比较决策分析法确定归一化后的目标权重 $\lambda^1 = (0.402, 0.329, 0.269)$, 求解式(4)得出发展井灌水稻 2.77 万 hm^2 , 渠灌水稻 4.11 万 hm^2 , 渠灌旱田 6.75 万 hm^2 。在该调整方案下, 决策者对经济效益基本满意, 但认为粮食产量以及生态效益较低。

2) 方案 2 的调整策略: 地表水水质优良, 灌溉保证率高, 确定归一化后的目标权重 $\lambda^2 = (0.290, 0.378, 0.332)$, 发展渠灌水稻 5.01 万 hm^2 , 井灌水稻 1.98 万 hm^2 , 井灌旱田 6.65 万 hm^2 。决策者对粮食产量基本满意, 但认为经济效益较低。

3) 方案 3 的调整策略: 采用地表水连续灌溉易使地下水位抬升, 从而造成土壤潜育化和次生盐渍化, 并且灌区运行费用太高, 综合考虑社会经济、生态环境等因素, 考虑在水稻泡田期采用井灌, 生育期采用渠灌, 这样既不影响米质量又能降低灌溉成本, 确定归一化后的目标权重 $\lambda^3 = (0.301, 0.332, 0.367)$, 发展水稻 7.03 万 hm^2 , 旱田 6.60 万 hm^2 。决策者对该调整方案基本满意, 则迭代结束。该灌区作物种植结构调整的可行方案集见表 1 所示。

表 1 灌区作物种植结构调整的可行方案集

Table 1 Trade-off procedures for crop pattern restructuring of the irrigation district

可行 方案	目标权重	可行解						
		水稻 / 10^4 hm^2	大豆 / 10^4 hm^2	小麦 / 10^4 hm^2	玉米 / 10^4 hm^2	净经济效益 / 10^4 元	粮食产量 / 10^4 t	生态效益 / 10^4 元
1	(0.402, 0.329, 0.269)	6.88	5.88	0.36	0.51	34367.00	63.79	402296.53
2	(0.290, 0.378, 0.332)	6.99	4.59	1.55	0.51	33022.44	65.16	405101.85
3	(0.301, 0.332, 0.367)	7.03	5.05	1.55	0.00	33151.19	64.52	408245.44

4.4 调整方案合理性评价

结合兴凯湖灌区特点及序参量的确定原则,并消除序参量间的相关性,最终确定经济系统的序参量为种植业总产值,社会系统的序参量为人均粮食产量,资源环境子系统的序参量为地下水资源开采率、地表水资源利用率、生态服务价值。结合专家意见并根据二元模糊比较决策分析法确定归一化后的序参量权重 $w_{11} = 1$; $w_{21} = 1$; $w_{3j} = (0.333, 0.333, 0.334), j = 1, 2, 3$ 。2002 年种植方案及调整方案的序参量见表 2 所示。由式(7)(8)分别计算出 2002 年种植方案、3 个可行调整方案下的子系统相对有序度、农业系统相对有序度熵值,如表 3 所示。

由表 3 可以看出,2002 年由于灌区仅考虑社会经济发展,忽视生态环境保护,导致经济、社会、生态三大子系统不能协同发展,农业系统向恶性方向演化,种植结构不合理。进行种植结构调整后,3 个可行方案的农业系统相对有序度熵值均小于 2002 年方案的系统相对有序度熵值,这说明三大子系统间的协同程度提高,该区农业系统逐渐向良性方向发展,3 个调整方案均比 2002 年种植方案合理;且方案 3 的农业系统相对有序度熵值小于方案 1、2 的相对有序度熵值,因此方案 3 为最优作物种植结构方案。

灌区作物种植结构的满意方案与 2002 年种植方案的综合对比结果,见表 4 所示。

表 2 灌区作物种植结构调整评价模型参数表
Table 2 Evaluation model parameters for crop structure adjustment in the irrigation district

方案	种植业总产值/ 10^4 元	人均粮食产量/kg	地下水资源开采率/%	地表水资源利用率/%	生态服务价值/ 10^4 元
2002 年方案	9.44	19186.20	153	22	241401.30
调整方案 1	8.95	17429.46	75	26	402296.53
调整方案 2	8.81	17804.06	75	26	405101.85
调整方案 3	8.75	17629.48	75	26	408245.44

表 3 现有方案与调整方案的灌区农业系统相对有序度熵值对比

Table 3 Comparison of the optimum relative order degree entropy of agriculture system between the existing and adjustment plan

方 案	经济子系统	社会子系统	生态子系统	农业系统相对有序度熵值
2002 年方案	0.5070	0.4930	0	无穷大
调整方案 1	0.5182	0.2458	0.2359	3.505
调整方案 2	0.3482	0.4125	0.2392	3.371
调整方案 3	0.3195	0.3863	0.2941	3.316

表 4 灌区种植结构调整满意方案及灌溉水资源合理配置与现有方案的对比

Table 4 Comparison of the optimum alternative with the existing alternative for crop pattern restructuring in the irrigation district

方 案	调整方案					现有方案				
作物种类	水稻	大豆	小麦	玉米	合计	水稻	大豆	小麦	玉米	合计
面积/ 10^4 hm^2	7.03	5.05	1.55	0	13.64	8.34	3.92	1.04	0.34	13.64
地下水量/ 10^4 m^3	12028.9	3406.5	465.6	0	15901	24375.45	2940	312	408	28035.45
地表水量/ 10^4 m^3	26050.5	2649.5	0	0	28700	23464.86	0	0	0	23464.86
净经济效益/ 10^4 元			33151.19					36346.65		
粮食产量/ 10^4 t			64.52					70.00		
生态效益/ 10^4 元			408245.44					241401.3		

5 结论与讨论

1) 种植结构调整为一多目标决策问题,以实现灌区综合效益最大为目标,建立多目标作物种植结构模型,并针对多目标决策过程中在数据处理、模型构建、以及决策者偏好等方面存在的模糊性特点,将交互式模糊多目标优化算法应用于求解作物种植结构调整模型,通过与决策者之间进行协商反复,直至优选出决策者满意

的调整方案。

2) 作物种植结构合理与否与该地区农业的可持续发展密切相关。农业系统是一耗散结构,应用耗散结构理论和模糊数学理论,建立了基于相对有序度熵的农作物种植结构合理性评价模型。通过农业系统相对有序度熵值的变化,对农业系统演化方向进行了判别,进而确定了作物种植结构调整方案的合理性。

3) 作物种植结构调整是项复杂的系统工程,不仅

要考虑土地资源约束、水资源的时空分布规律和作物本身各生育阶段的需水、缺水规律,还必须结合市场和社會的需求特点,统筹考虑经济社会发展及生态环境保护等多方面问题。因此,要将该方法运用到实际决策过程中,还需进一步收集经济、社会与生态环境等方面的基础资料,完善多目标种植结构调整模型。

[参 考 文 献]

- [1] 黄永基,陈晓军. 我国水资源需求管理现状及发展趋势分析[J]. 水科学进展, 2000, (6): 215– 220.
- [2] De Wit C T, van Keulen H, Seligman N G, et al. Application of interactive multiple goal programming techniques for analysis and planning of regional agricultural development[J]. *Agricultural Systems*, 1988, 26(3): 211– 230.
- [3] Rabbinge R. Long-term options for land use in the European community[J]. *Agricultural Systems*, 1992, 40(3): 195– 210.
- [4] Lu Jianbo, Wang Zhaoqian, F W T Penning de Vries. Application of interactive multiple goal programming for red soil watershed development: A case study for Qingshishan watershed[J]. *Agricultural Systems*, 2002, 73, 313– 324.
- [5] 程智强,邱化蛟,程 序. 资源边际效益与种植业结构调整目标规划[J]. 农业工程学报, 2005, 21(12): 16– 19.
- [6] Gupta A P, Harboe R, Tabucanon M T. Fuzzy multiple-criteria decision making for crop area planning in Narmada river basin[J]. *Agricultural Systems*, 2000, 63, 1– 18.
- [7] 陈守煜,马建琴. 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.
- [8] Sakawa M, Seo F. Interactive multiobjective decision-making in environmental systems using the fuzzy sequential proxy optimization technique[J]. *Large Scale System*, 1983, (4): 223– 243.
- [9] 刘凤琴,顾培亮. 农业可持续发展系统动态评价研究[J]. 系统工程, 1999, 17(3): 31– 35.
- [10] 冯尚友. 水资源持续利用与管理导论[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [11] 陈仲新,张新时. 中国生态系统效益的价值[J]. 科学通报, 2000, 45(1): 17– 23.
- [12] Sakawa M. Fuzzy sets and interactive multiobjective optimization[M]. New York: Plenum Press, 1993: 149– 173.
- [13] Chih-Sheng Lee, Shui-ping Chang. Interactive fuzzy optimization for an economic and environmental balance in a river system[J]. *Water Research*, 2005, 39(1): 221– 231.
- [14] 尚松浩. 水资源系统分析方法及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [15] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [16] 畅建霞,黄 强,王义民,等. 基于耗散结构理论和灰色关联熵的水资源系统演化方向判别模型研究[J]. 水利学报, 2002, (11): 107– 112.
- [17] 崔和瑞,赵黎明,薛庆林. 基于耗散结构理论的区域农业可持续发展系统分析[J]. 系统辩证学学报, 2005, 13(1): 60– 65.
- [18] Single V P. The use of entropy in hydrology and water resources[J]. *Hydrology Processes*, 1997, (2): 587– 626.

Optimization and evaluation of multi-objective crop pattern based on irrigation water resources allocation

Zhou Huicheng¹, Peng Hui^{1*}, Zhang Chi¹, Xiao Jianmin²

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Water Resources Department of Heilongjiang Province, Harbin, 150001, China)

Abstract: The agriculture system is an economic and environmental compound system: consequently, the three major economic, social and environmental factors should be considered in the optimal water resources allocation along with corresponding crop pattern under the constraints of availability of land and water resources. An interactive fuzzy approach is applied to develop a sustainable crop pattern for solving multi-objective programming involving vague information related to data, model formulation, and the decision maker's preferences. Furthermore, a model of relative order degree entropy is formulated to evaluate the reasonability of crop pattern alternatives. The case shows that the optimization and evaluation models for multi-objective crop pattern presented in this paper are suitable, and can supply theoretical references for a sustainable crop pattern and irrigation water resources allocation.

Key words: water resources; crop pattern optimization; multi-objective optimization; reasonability evaluation