

干旱地区经济-生态环境系统规划方法与应用

张振兴, 郭怀成, 陈 冰, 张 宁

(北京大学环境科学中心; 教育部水沙科学重点实验室, 北京 100871)

摘要:从干旱地区经济-生态环境系统的动态性、综合性、多目标性和不确定性等特征出发, 提出用不确定性多目标规划(IMOP)模型来解决干旱地区以水资源为核心的生态环境规划优化问题, 建立了干旱地区经济与生态环境系统不确定性多目标规划模型(IMOPMEES), 应用模糊算法退化形式进行多目标规划的求解。并以新疆和墨洛地区为具体研究对象, 采用 IMOPMEES 进行可持续发展规划, 应用交互式调整 and 情景分析的方法得到模型在两种情景下的优化方案。进而对两种情景进行综合分析比较, 为决策者提供科学合理的决策依据。研究表明 IMOP 模型可以充分反映干旱地区经济-生态环境系统的不确定性和动态性, 并有效地协调目标之间的冲突, 为干旱地区经济-生态环境规划工作提供了一种较为有力的工具。

关键词:干旱地区; 经济-生态环境系统; 规划; 多目标; 不确定性; 情景分析

Economic-Environmental System Planning for Arid Regions in China

ZHANG Zhen-Xing, GUO Huai-Cheng, CHEN Bing, ZHANG Ning (Center for Environment Science, Peking University; Key Laboratory for Water and Sediment Science, Ministry of Education, Beijing 100871, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(7): 1018~1027.

Abstract: The economic-environmental system in arid regions, of which water resource is an essential component, is characterized by as dynamic, complexity, multi-objectivity and uncertainty. Economic-environmental system planning is a very useful approach to harmonize economic development and environmental protection for fragile environmental systems such as those in arid regions. In this paper, an integrated approach, combining Inexact Multi-objective Programming (IMOP), Interactive Adjustment and Scenario Analysis, is applied to solve the economic-environmental system planning for arid regions, using the Hemoluo Prefecture, Xinjiang Uygur Autonomous Region as a case study.

The recent few years have witnessed the increasing use of the IMOP model worldwide in solving many optimization problems such as solid waste management planning, aquatic environment planning, economic development zone planning and land use planning. IMOP can reconcile multiple and often conflicting objectives, minimize system uncertainty and optimize system performance. In this study, the application of the IMOP to economic-environmental system planning for arid regions was explored. On the basis of IMOP, the Inexact Multi-objective Programming Model for Economic Environmental System (IMOPMEES) was built and solved with the fuzzy algorithm and its simplified form. The IMOPMEES model has 5 objective functions covering economic benefit maximization, plantation structure optimization, forest areas maximization, agriculture water consumption minimization and fertilization consumption minimization. The IMOPMEES model also has 14 constraints on such factors as water resource supply, total land area, foodstuff output and regional economy and so on. Among these constraints, water resource supply was the most significant constraint to reflect its strategic importance for arid regions. The

基金项目: UNDP 资助项目 (CPR/96/202/A/01/99)

收稿日期: 2000-10-04; **修订日期:** 2001-10-05

作者简介: 张振兴(1976~), 男, 江西人, 博士。主要从事环境规划、水资源规划研究。

IMOPMEES has proven to have the ability to simulate the characteristic of the economic-environmental system in arid regions, and a valuable tool for achieving the harmonization of conflicts between environmental and economic objectives.

Moreover, the Interactive Adjustment Method was used in the study to modify the model structure and the coefficients to reflect the features and the possible diverse bias of the local experts and decision-makers. The Scenario Analysis Method was applied to interpret the planning results in numerical form which results in the selection of a most practical and feasible scenario.

In applying the IMOPMEES model to the sustainable development planning for the Hemoluo Prefecture as a case study, two types of alternatives were produced and analyzed with the help of Scenario Analysis and Interactive Adjustment Method. Through comparison and analysis, the optimal alternative was selected which can provide a scientific and reliable foundation for policy making. The model was used to simulate a series of scenarios for 2005 and 2010, covering industrial production, plantations, gardening, stockbreeding as well as water resource consumption. Recommendations were made for the Hemoluo Prefecture to select the alternatives which emphasize the harmonization of environment protection, economic development and the sustainable utilization of water resource.

The case study confirms the practicability and operability of the IMOPMEES model and its applicability to economic-environmental system planning for arid regions.

Key words: arid regions; water resources; economic-environmental system; planning; multi-objective; uncertainty; scenario analysis

文章编号:1000-0933(2002)07-1018-10 中图分类号:Q143 文献标识码:A

可持续发展是国际社会的共识,同时也是我国两大基本战略之一^[1]。我国西部干旱地区,由于生态环境脆弱且存在相当部分的区域贫困,协调经济发展和生态环境保护对于实现可持续发展显得尤为重要。而进行经济-生态环境系统规划可以有效协调经济发展和环境保护的目标。目前国内进行干旱地区环境规划研究尚处于起步阶段,采用的规划方法对经济发展、水土资源利用和生态环境保护的相互影响作用关系的研究还不很深入,因而难以协调各个目标和反映系统的不确定性^[2]。

对于经济-生态环境系统这样的复杂系统,不确定性多目标规划(IMOP)和优化模型是非常有力的工具^[3]。IMOP可以综合的反映系统的动态性、多目标性和不确定性,从而科学、合理、高效的作出可操作的经济-生态环境系统规划。各种不确定系统规划模型在国内外已被成功地开发并应用于土地利用规划^[4]、水环境规划^[5]、经济开发区规划^[6]和固体废物管理规划^[7]等方面。

本研究构建了一套干旱地区以水资源利用为核心的经济-生态环境不确定多目标规划方法(IMOPMEES),以寻求经济发展和生态环境保护处于协调和总体最优状态,并以新疆和墨洛地区为例进行了研究。本研究将干旱地区经济-生态环境系统的众多组分(目标、约束和行为)综合构建在一个模型框架内,既能定性地反映系统特征,又能定量地进行规划,且突出反映其水资源的约束条件。模型的最终结果经过解译可得到具有很强操作性的方案,为决策者提供科学有效的决策依据。规划方案以水资源的合理分配为核心,对水资源在各个领域内的分配进行优化;为确保改善区域的生态环境,规划出各阶段的植被扩展面积;在水资源约束内,通过调整种植业、园艺业、畜牧业和工业的规模,以达到经济-生态环境系统的良性循环。

1 研究区概况

和墨洛地区位于新疆维吾尔自治区和田地区西部,地处东经 $78^{\circ}0' \sim 81^{\circ}32'$,北纬 $34^{\circ}20' \sim 39^{\circ}38'$ 之间,东西宽 $117 \sim 205\text{km}$,南北长约 565km ,总面积为 78142km^2 。和墨洛地区地处塔克拉玛干沙漠南缘,远离海洋,气候干燥,属于温带干旱荒漠气候,具有典型的大陆性气候特征。水资源贫乏,尤其是春季水资源短缺是和墨洛地区可持续的最重要的限制性因子。如何协调和墨洛地区生态环境和经济发展,对于和田地区

乃至新疆的经济发展、社会稳定都具有非常重大的意义。

2 研究方法

本研究主要应用 IMOP 模型、交互式调整 and 情景分析的方法进行干旱地区经济-生态环境系统规划。首先,通过系统分析识别经济环境协调发展的限制性因子,进而建立经济-生态环境系统不确定性多目标规划模型(IMOPMEES)。然后,引入交互式调整的方法以确保规划方案的实用性和可操作性。在 IMOPMEES 模型求解过程中,应用交互式调整的方法对该模型在两种情景下进行求解,一是以大农业发展为首的整体经济发展相互均衡协调共进为目标,并考虑到数学模型的局限性,适当的加入当地决策者和有关专家对生态环境系统结构的偏好,对模型进行分析、定参和求解;二是从经济生态环境系统本身结构特点和其内部要素间的相互作用关系出发,加入一些决策者和专家对经济发展倾向性的偏好,对相应的参数进行调整,加大水土开发的力度,适当放松水资源和生态环境的约束,以谋求更大的经济效益。最后,将计算出的数学结果应用情景分析的方法进行解译和比较分析,进行方案优选,为决策者提供科学、合理的决策依据^[8~11]。

2.1 IMOP 模型及算法

2.1.1 IMOP 模型一般形式 IMOP 模型的一般形式可以表示如下^[11]:

$$\text{Min } f_k^{\pm} = C_k^{\pm} X^{\pm}, k = 1, 2, \dots, u \quad (1)$$

$$\text{Max } f_l^{\pm} = C_l^{\pm} X^{\pm}, l = u + 1, u + 2, \dots, q \quad (2)$$

$$s. t. A_i^{\pm} X^{\pm} \leq b_i^{\pm}, i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

$$A_j^{\pm} X^{\pm} \geq b_j^{\pm}, j = m + 1, m + 2, \dots, n \quad (4)$$

$$X^{\pm} \geq 0 \quad (5)$$

式中, $X^{\pm} \in \{\mathcal{R}^{\pm}\}^{1 \times 1}$, $C_k^{\pm} \in \{\mathcal{R}^{\pm}\}^{1 \times 1}$, $C_l^{\pm} \in \{\mathcal{R}^{\pm}\}^{1 \times 1}$, $A_i^{\pm} \in \{\mathcal{R}^{\pm}\}^{1 \times 1}$, $A_j^{\pm} \in \{\mathcal{R}^{\pm}\}^{1 \times 1}$, 且 \mathcal{R}^{\pm} 表示不确定数的集合。

2.1.2 IMOP 模型特点及算法 IMOP 最主要特点是直接引入区间数表达不确定性信息,这样,数据获取、算法实现和结果表达均比随机多目标规划(SMOP)和模糊多目标规划(FMOP)清晰简洁^[7~9]。在规划过程中,得到的优化解也是以区间数表示,各个变量在其相应的模型解区间内进行组合构成决策空间,决策者就可以在决策空间内选取合理而满意的决策方案。

本研究应用基于目标偏离容忍水平(ODTL)的交互式算法的退化形式求解 IMOP 模型,其主要步骤有:初始 IMOP 模型描述,单目标子模型求解,建立目标偿付表,目标函数分解,IFLP 转换,建立辅助子模型,结果的交互反馈^[9~11]。

2.2 干旱地区经济-环境不确定性多目标规划模型

根据 IMOP 模型的要求,结合干旱地区经济-生态环境系统的特点,将规划区域按空间、功能分异划分为 n 个子区,将规划年限划为 m 个阶段,设待选行业有 g 个。由于西北干旱地区最大限制因子是水资源,故在本规划中重点予以考虑。具体的干旱地区经济-生态环境系统规划模型 IMOPMEES 为:

2.2.1 目标函数 (1)经济收益最大化

$$\begin{aligned} \text{Max } F_1 = & \sum_{v=1}^n \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k (NY_v \times \text{AGRINC}_{ij}^{\pm} \times \text{AGRAREA}_{ij}^{\pm}) + \\ & \sum_{v=1}^n \sum_{i=1}^m \sum_{j=k+1}^g (NY_v \times \text{HORTINC}_{ij}^{\pm} \times \text{HORTAREA}_{ij}^{\pm}) + \\ & \sum_{v=1}^n \sum_{i=1}^m (NY_v \times \text{SHPINC}_{ij}^{\pm} \times \text{SHP}_{ij}^{\pm}) + \sum_{v=1}^n \sum_{i=1}^m (NY_v \times \text{FINC}_{ij}^{\pm} \times \text{FAREA}_{ij}^{\pm}) + \\ & \sum_{v=1}^n \sum_{i=1}^m (NY_v \times \text{IND}_{ij}^{\pm}) - \sum_{v=1}^n \sum_{i=1}^m (\text{WLCOST}_{ij}^{\pm} \times \text{WLAREA}_{ij}^{\pm}) - \\ & \sum_{v=1}^n \sum_{i=1}^m (\text{FCOST}_{ij}^{\pm} \times \text{FAREA}_{ij}^{\pm}) \end{aligned}$$

(2) 区域种植结构最优化

$$\begin{aligned} \text{Max}F_2 = & \sum_{u=1}^n \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k (A_j^{\pm} \times \text{AGRINC}_{\bar{u}}^{\pm} \times \text{AGRAREA}_{\bar{u}}^{\pm}) + \\ & \sum_{u=1}^n \sum_{i=1}^m \sum_{j=k+1}^s (B_j^{\pm} \times \text{HORTINC}_{\bar{u}}^{\pm} \times \text{HORTAREA}_{\bar{u}}^{\pm}) \end{aligned}$$

(3) 森林面积最大化

$$\text{Max}F_3 = \sum_{u=1}^n \sum_{i=1}^m \text{FAREA}_{\bar{u}}^{\pm}$$

(4) 区域农业用水最小化

$$\begin{aligned} \text{Min}F_4 = & \sum_{u=1}^n \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k (\text{WATAGR}_{\bar{u}}^{\pm} \times \text{AGRAREA}_{\bar{u}}^{\pm}) + \\ & \sum_{u=1}^n \sum_{i=1}^m \sum_{j=k+1}^s (\text{WATHORT}_{\bar{u}}^{\pm} \times \text{HORTAREA}_{\bar{u}}^{\pm}) \end{aligned}$$

(5) 化肥用量最小化

$$\begin{aligned} \text{Min}F_5 = & \sum_{u=1}^n \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k (\text{AGRFTL}_{\bar{u}}^{\pm} \times \text{AGRAREA}_{\bar{u}}^{\pm}) + \\ & \sum_{u=1}^n \sum_{i=1}^m \sum_{j=k+1}^s (\text{HORTFTL}_{\bar{u}}^{\pm} \times \text{HORTAREA}_{\bar{u}}^{\pm}) \end{aligned}$$

2.2.2 约束条件

(1) 正播作物面积约束

$$\sum_{j=1}^k \text{AGRAREA}_{\bar{u}}^{\pm} \leq \text{SOIL}_{\bar{u}}^{\pm}$$

(2) 复播作物面积约束

$$\text{AGRAREA}_{\bar{u}}^{\pm} \leq \text{AGRAREA}_{\bar{u}}^{\pm}$$

(3) 总耕地面积约束

$$\text{SOIL}_{\bar{u}(t+1)}^{\pm} \leq \text{WLAREA}_{\bar{u}}^{\pm} + \text{SOIL}_{\bar{u}}^{\pm}$$

(4) 全年水需求和供应平衡约束

$$\begin{aligned} & \sum_{u=1}^n \sum_{j=1}^k (\text{WATAGR}_{\bar{u}}^{\pm} \times \text{AGRAREA}_{\bar{u}}^{\pm}) - \sum_{u=1}^n \text{WATIND}_{\bar{u}}^{\pm} + \\ & \sum_{u=1}^n \sum_{j=k+1}^s (\text{WATHORT}_{\bar{u}}^{\pm} \times \text{HORTAREA}_{\bar{u}}^{\pm}) + \\ & \sum_{u=1}^n (\text{WATF}_{\bar{u}}^{\pm} \times \text{FAREA}_{\bar{u}}^{\pm}) + \sum_{u=1}^n (\text{WATSH}_{\bar{u}}^{\pm} \times \text{SHP}_{\bar{u}}^{\pm}) + \\ & \sum_{u=1}^n \sum_{j=1}^2 (\text{WATPOP}_{\bar{u}}^{\pm} \times \text{POP}_{\bar{u}}^{\pm}) \leq \text{WATTOTAL}_{\bar{u}}^{\pm} \end{aligned}$$

(5) 春水需求与供应平衡约束

$$\begin{aligned} & \sum_{u=1}^n \sum_{j=1}^k (\text{WATAGRS}_{\bar{u}}^{\pm} \times \text{AGRAREA}_{\bar{u}}^{\pm}) + \sum_{u=1}^n \text{WATIND}_{\bar{u}}^{\pm} / 4 + \\ & \sum_{u=1}^n \sum_{j=k+1}^s (\text{WATHORTS}_{\bar{u}}^{\pm} \times \text{HORTAREA}_{\bar{u}}^{\pm}) + \\ & \sum_{u=1}^n (\text{WATFS}_{\bar{u}}^{\pm} \times \text{FAREA}_{\bar{u}}^{\pm}) + \sum_{u=1}^n (\text{WATSH}_{\bar{u}}^{\pm} \times \text{SHP}_{\bar{u}}^{\pm}) / 4 + \\ & \sum_{u=1}^n \sum_{j=1}^2 (\text{WATPOP}_{\bar{u}}^{\pm} \times \text{POP}_{\bar{u}}^{\pm}) / 4 \leq \text{WATSPR}_{\bar{u}}^{\pm} \end{aligned}$$

(6) 开荒投入、森林扩展及维护费用的资金约束

$$FCOST_{it}^{\pm} \times FAREA_{it}^{\pm} + WLCOST_{it}^{\pm} \times WLAREA_{it}^{\pm} \leqslant TOTALFUND_{it}^{\pm}$$

(7) 森林扩展面积上限约束

$$\sum_{i=1}^m FAREA_{it}^{\pm} \leqslant FLIM_{it}^{\pm}$$

(8) 森林扩展面积下限约束

$$FREQ_{it}^{\pm} \leqslant FAREA_{it}^{\pm}$$

(9) 开荒面积约束

$$\sum_{i=1}^m WLAREA_{it}^{\pm} \leqslant WLLIM_{it}^{\pm}$$

(10) 粮食总产量约束

$$FOODREQ_{it}^{\pm} \leqslant \sum_{u=1}^k \sum_{j=1}^m (AGROUT_{it}^{\pm} \times AGRAREA_{it}^{\pm}) + \sum_{u=1}^k (AGROUT_{it}^{\pm} \times AGRAREA_{it}^{\pm})$$

(11) 牲畜饲养量约束

$$SHP_{it}^{\pm} \leqslant \sum_{j=1}^k (AGRSHP_{it}^{\pm} \times AGRAREA_{it}^{\pm}) + FSHP_{it}^{\pm} \times FAREA_{it}^{\pm} + GRSSH_{it}^{\pm}$$

(12) 工业总产值经济约束

$$IND_{it}^{\pm} \times (1 + LI - RATIO_{it}^{\pm}) \leqslant IND_{it+1}^{\pm}$$

(13) 农业总产值经济约束

$$\sum_{j=1}^k C - ZW_{it}^{\pm} \times (1 + LZ - RATIO_{it}^{\pm}) \leqslant \sum_{j=1}^k C - ZW_{it+1}^{\pm}$$

(14) 牧业总产值经济约束

$$SHPINC_{it}^{\pm} \times SHP_{it}^{\pm} \times (1 + LS - RATIO_{it}^{\pm}) \leqslant SHPINC_{it+1}^{\pm} \times SHP_{it+1}^{\pm}$$

式中, $u=1, 2, \dots, n$ 代表各子区; $i=1, 2, \dots, m$ 为年限阶段; $j=1, 2, \dots, k$ 为待选种植业类型; $j=k+1, k+2, \dots, g$ 为待选园艺业类型; $j=1, 2$ 时分别代表城市人口、农村人口数量; A_{it}^{\pm} : 第 u 子区第 i 阶段作物 j 的权重(%); $AGRAREA_{it}^{\pm}$: 第 u 子区第 i 阶段作物种植面积(hm^2); $AGRFTL_{it}^{\pm}$: 第 u 子区第 i 阶段作物 j 化肥用量($1,000kg/(hm^2 \cdot a)$); $AGRINC_{it}^{\pm}$: 第 u 子区第 i 阶段作物 j 的净收益(万元/ $(hm^2 \cdot a)$); $AGROUT_{it}^{\pm}$: 第 u 子区第 i 阶段作物 j 的产量($1,000kg/(hm^2 \cdot a)$); $AGRSHP_{it}^{\pm}$: 第 u 子区第 i 阶段作物 j 的载畜量(万只羊单位/ $(hm^2 \cdot a)$); B_{it}^{\pm} : 第 u 子区第 i 阶段第 j 种园艺的权重(%); $FAREA_{it}^{\pm}$: 第 u 子区第 i 阶段林地扩展面积(hm^2); $FCOST_{it}^{\pm}$: 第 u 子区第 i 阶段单位面积林地扩展维护费用(万元/ hm^2); $FINC_{it}^{\pm}$: 第 u 子区第 i 阶段单位面积林地收益(万元/ $(hm^2 \cdot a)$); $FLIM_{it}^{\pm}$: 第 u 子区最大宜林面积(hm^2); $FREQ_{it}^{\pm}$: 第 u 子区第 i 阶段最小林地扩展面积; $FSHP_{it}^{\pm}$: 第 u 子区第 i 阶段林地载畜量(万只羊单位/ $(hm^2 \cdot a)$); $FOODREQ_{it}^{\pm}$: 第 i 阶段最小粮食生产量($1000kg$); $GRSSH_{it}^{\pm}$: 第 u 子区第 i 阶段林地载畜量(万只羊单位/ $(hm^2 \cdot a)$); $HORTAREA_{it}^{\pm}$: 第 u 子区第 i 阶段第 j 种园艺占地(hm^2); $HORTFTL_{it}^{\pm}$: 第 u 子区第 i 阶段第 j 种园艺化肥用量($1000kg/(hm^2 \cdot a)$); $HORTINC_{it}^{\pm}$: 第 u 子区第 i 阶段第 j 种园艺净收益(万元/ $(hm^2 \cdot a)$); IND_{it}^{\pm} : 第 u 子区第 i 阶段年均工业产值(万元/ a); NY_{it}^{\pm} : 第 i 阶段长度(a); POP_{it}^{\pm} : 第 u 子区第 i 阶段第 j 类人口数(万人); SHP_{it}^{\pm} : 第 u 子区第 i 阶段牲畜存栏量(万只绵羊单位); $SHPINC_{it}^{\pm}$: 第 u 子区第 i 阶段万只绵羊单位净收益; $SOIL_{it}^{\pm}$: 第 u 子区第 i 阶段耕地(hm^2); $TOTALFUND_{it}^{\pm}$: 第 u 子区第 i 阶段资金约束(万元); $WATAGR_{it}^{\pm}$: 第 u 子区第 i 阶段作物 j 的年灌水定额($10\,000m^3/(hm^2 \cdot a)$); $WATAGRS_{it}^{\pm}$: 第 u 子区第 i 阶段作物 j 的春季灌水定额($10\,000m^3/(hm^2 \cdot a)$); $WATF_{it}^{\pm}$: 第 u 子区第 i 阶段林地的年灌水定额($10\,000m^3/(hm^2 \cdot a)$); $WATFS_{it}^{\pm}$: 第 u 子区第 i 阶段林地春季灌水定额($10\,000m^3/(hm^2 \cdot a)$);

$WATHORT_{ij}^{\pm}$:第 u 子区第 i 阶段第 j 种园艺的年灌水定额($10\ 000\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$); $WATHORTS_{ij}^{\pm}$:第 u 子区第 i 阶段第 j 种园艺春季灌水定额($10\ 000\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$); $WATIND_{ij}^{\pm}$:第 u 子区第 i 阶段工业用水($10\ 000\text{m}^3/(\text{万元} \cdot \text{a})$); $WATPOP_{ij}^{\pm}$:第 u 子区第 i 阶段第 j' 类人口用水量($10\ 000\text{m}^3/(\text{万人} \cdot \text{a})$); $WATSHP_{ij}^{\pm}$:第 u 子区第 i 阶段畜牧用水($10\ 000\text{m}^3/(\text{万只绵羊} \cdot \text{a})$); $WATSPR_{ij}^{\pm}$:第 u 子区第 i 阶段春季可用水量($10\ 000\text{m}^3$); $WATTOTAL_{ij}^{\pm}$:第 u 子区第 i 阶段全年可用水量($10\ 000\text{m}^3$); $WLAREA_{ij}^{\pm}$:第 u 子区第 i 阶段开荒面积(hm^2); $WLCOST_{ij}^{\pm}$:第 u 子区第 i 阶段开荒单位面积费用($\text{万元}/\text{hm}^2$); $WLLIM_{ij}^{\pm}$:第 u 子区最大可开荒面积(hm^2).

3 情景分析

对 IMOPMESS 进行交互式调整求解后,应用情景分析方法将数字形式的解结合实际情况进行解译。因篇幅所限,本文仅以 3 个规划分区(和田区、墨玉区和洛浦区)中和田区的规划结果给予讨论。按照模型设计的两种情景,分两个时间段,从种植业、园艺业、牧业、工业、植被扩展和水资源等各方面对模型计算结果分别加以分析比较。需要说明的是,由于计算结果不是确定值,而是由上限和下限构成的区间数,这样使得结果更加符合实际,具有更强的科学性和可操作性。

3.1 种植业结构优化分析

按照和田种植业现状和未来发展趋势,将种植业分为小麦、水稻、棉花、绿肥(为论述方便起见,苜蓿、绿肥等养地作物通称绿肥)、瓜菜和玉米 6 种主要作物进行计算。由表 1 可看出,情景一下和田正播面积从 1998 年到 2010 年一直保持增长态势,这与和田正在进行的大规模水土开发有直接关系,也是和田摆脱贫困、寻求发展的一条途径。情景二,正播面积有大幅度提高,这是因为模型加大了经济发展的偏好,值得注意的是提高正播面积的同时生态环境承受的压力也会增大见表 2。两种情景下的正播总面积相对于和田最大可开垦耕地 $82276 \sim 91854\text{hm}^2$ 而言,仍然有相当大的发展余地,这是由于受到水资源的强烈约束和资金投入的约束,很大一部分可开垦土地无法进一步开发。

3.2 园艺业结构优化分析

和田园艺业(含蚕桑)历史悠久,素有瓜果之乡的美誉,是新疆自治区主要园艺生产基地之一。该区自然环境条件非常适合园艺作物生产。长期以来,园艺业就是和田农村的经济支柱之一,是增加农民收入、脱贫致富的主要手段,也是调整农业结构,保持生态平衡的主要措施之一。

情景一,2005 年园艺作物总占地面积比 1998 年有较大增长,达到了 $13536 \sim 15540\text{hm}^2$,这主要是由于第一阶段种植业用地面积增长不多,新开发土地主要用于增加园艺用地,以改善绿洲生态系统;2010 年园艺作物占地面积比 2005 年略有增长,第二阶段园艺主要在于提高单产,改善品种,加强园艺产品的后期加工,以提高商品率和附加值(见表 3)。情景二,园艺业的种植结构与情景一相比,变化不是很大。这主要是园艺业的经济效益和环境效益都比较高,经济收益和生态环境的不同偏好对园艺业影响比较小(见表 3)。

3.3 牧业发展分析

大力发展畜牧业是农村脱贫致富的主要手段之一。和田具有一定规模的天然草场,其载畜量基本上稳

表 1 情景一和田种植业结构(hm^2)

	小麦 Wheat	水稻 Rice	棉花 Cotton	绿肥 Green manure	瓜菜 Melon vegetables	玉米 Corn	正播 总面积 Total area
1998 年	12104	2110	8151	507	873	11035	23745
下限							
2005 年 Lower limit	9667	2766	9007	1569	815	9259	23823
上限							
Upper limit	12099	2900	9527	1744	921	11639	27191
2010 年 下限	10533	2766	17016	2337	1213	9925	33865
上限	12411	2900	18652	2441	1315	11804	37719

表 2 情景二和田种植业结构表(hm^2)

	小麦	水稻	棉花	绿肥	瓜菜	玉米	正播 总面积
2005 年 下限	11983	2110	13531	2009	1043	11462	30676
上限	13407	2279	23375	2841	1475	12669	43377
2010 年 下限	12473	2686	22656	2763	1434	11755	42012
上限	16129	3710	33295	4010	2082	15088	61226

定在 24.8~26.8 万只绵羊单位之间。山区畜牧业的发展方向主要是以草定畜,控制载畜量,调整畜群结构。畜牧业发展重点应该是农区畜牧业,随着种植业、园艺业和林业的发展,畜牧业发展的基础会更加坚实。苜蓿等养地作物种植面积的增加,可以为农区畜牧业提供更加充足的饲草;小麦、水稻和玉米等农作物产量的提高则可以提供更加丰富的饲料来源,以满足农区畜牧业进一步发展的需求。

情景一,随着人工草场的建立和粮食作物

种植面积的增加,农区载畜量在第一阶段和第二阶段都将得到较大提高。2005 年年终牲畜存栏量将达到 155.8~167.9 万只绵羊单位,2010 年年终牲畜存栏量将达到 208.0~246.0 万只绵羊单位。在存栏量快速提高的同时,还应着力提高总饲养量、出栏率和商品率,使和田区的畜牧业的质量和数量均得到迅速提高。情景二种植业、园艺业和植被扩展均有大幅度提高,故农区的载畜量变动较大,农区畜牧业迅速发展。畜牧业仍然以农区畜牧业为主来发展。无论是第一阶段还是第二阶段,畜牧业发展的不确定性比情景一均增加很多,即上下限波动范围较大。2005 年年终存栏量在 158~267 万只绵羊单位之间,2010 年年终存栏量在 159~312 万只绵羊单位之间。究其原因,一是种植业、园艺业和植被扩展的不确定性有所增加,进而引起农区载畜量的不确定性增加;二是不断发展变化的畜牧业市场条件难以精确的预测。

3.4 植被扩展分析

情景一,2005 年植被扩展面积为 981~1312hm²,2010 年植被扩展略微下降到 981~1016hm²。这是由于第一阶段植被扩展条件较好,而第二阶段可扩展区域变小,水土条件变差,而且第二阶段由于植被保存面积较大,植被维护费用加大,从而影响到扩展费用的继续增加。植被保存面积 2005 年达到 34230~42714hm²,2010 年将达到 39034~50515hm²,林地覆盖率 2010 年提高到 0.94%~1.20%,绿洲生态环境将得到明显改善。2005 年植被扩展费用和植被维护费用分别为 61.8~102.4 万元和 342.3~640.7 万元,2010 年则分别为 61.8~79.2 万元和 390.3~757.7 万元,这样 2005 年总费用达到 404.1~685.2 万元,2010 年总费用达到 452.1~837.0 万元。情景二,2005 年植被扩展面积为 981~1190hm²,2010 年植被扩展还是为 981~1190hm²。植被保存面积 2005 年达到 62339~68530hm²,2010 年维持在这一水平线上,两个阶段植被覆盖率均保持在 1.49%~1.64%,绿洲生态环境将得到明显改善。2005 年植被扩展费用和植被维护费用分别为 61.8~92.8 万元和 623.4~1028.0 万元,2010 年则分别为 61.8~92.8 万元和 623.4~1028.0 万元,这样 2005 年植被扩展和维护总费用达到 685.0~1121.0 万元,2010 年总费用达到 685.0~1121.0 万元。这主要是因为情景二在计算现有植被面积时,只强化了植被维护费用的约束,而事实上植被保存面积是受到人为和自然多方面因素综合作用的结果。

3.5 工业发展分析

情景一,2005 年工业生产总值保持在 70276.0~81837.5 万元,2010 年工业规模将达到 113016.0~119445.0 万元。情景二和田的工业将以更快的速度发展,同时由于种植业、园艺业和畜牧业等基础原料行业都有所发展变动,使得工业产值的不确定性比情景一有所增加。2005 年和田工业产值将为 76275~91066 万元,2010 年工业产值为 110161~135975 万元。情景二,无论是工业生产规模还是发展速度均高于情景一。分析情景二工业生产快速发展的原因:一是决策者对经济产出的过度追求,体现在模型中为工业产值尽可能达到最高,而对约束工业生产发展的资金、人才、原料和市场等条件则尽可能弱化。二是其他产业尤其是以棉花为代表的经济作物种植面积大幅度提高,为工业生产的快速发展提供了较好的物质基础。

3.6 社会经济效益分析

情景一,到 2005 年和田产业结构将发生较大变动,工业将取代种植业成为第一大产业,产值规模达到 70276~81837 万元,种植业产值为 40868~54476 万元,畜牧业产值为 18909~21528 万元,园艺业产值为

表 3 和田园艺业结构(hm²)

Table 3 the area of gardening in Hetian

	情景一 Scenario one				情景二 Scenario two			
	葡萄 Grapes	桑树 Mulberry	果林 Fruit woods	合计 Total	葡萄	桑树	果林	合计
2005 年 下限	9015	1366	3155	13536	8892	1588	3112	13592
2005 年 上限	10367	1544	3629	15540	10322	1678	3612	15612
2010 年 下限	8881	2034	3018	13933	9672	2405	3385	15462
2010 年 上限	10360	2037	3625	16023	11433	3489	4011	18933

9293~12239 万元。到 2010 年和田产业结构更趋合理。和田种植业、畜牧业、园艺业和工业总产值将达到 205655~239272 万元。工业产值将达到 113016~119443 万元,占总值的 50.2%~55.0%。工业以这种引人注目的速度快速发展是与和田种植业、畜牧业和园艺业的发展和商品率的提高为工业生产提供了足够的轻工原料密切相关的,可以说工业的成长不过是农业发展到一定程度后产业化和规模化的必然结果。2010 年种植业产值约为 57933~74750 万元,占总值的 28.2%~31.2%;畜牧业产值为 25247~31550 万元,占总值的 12.3%~13.2%;园艺业 9459~12528 万元,占总值的 4.6%~5.2%(见图 1)。

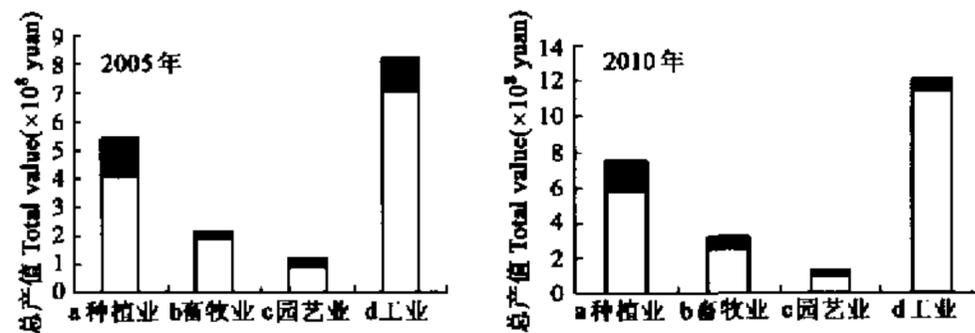


图 1 情景一下经济收益情况

Fig. 1 Economic profit at scenario one

a. Plantations b. Stockbreeding c. Gardening d. Industry

情景二着重考虑经济收益和扩大水土开发规模,因此无论是 2005 年还是 2010 年,和田各产业规模均比情景一要大。到 2005 年和田工业、种植业、畜牧业和园艺业总产值达到 158639~224133 万元。工业将取代种植业成为第一大产业,产值规模达到 76275~91066 万元,占总值的 40.6%~48.1%;种植业产值为 53897~86555 万元占总值的 33.9%~38.6%,畜牧业产值为 19178~34243 万元,占总值的 12.1%~15.3%,园艺业产值为 9289~12270 万元,占总值的 5.5%~5.9%。到 2010 年和田种植业、园艺业、畜牧业和工业总产值为 212509~310889 万元。工业产值将达到 110161~135975 万元,占总值的 43.7%~51.8%。2010 年种植业产值约为 72600~120325 万元,占总值的 34.2%~38.7%,畜牧业产值为 19299~40011 万元,占总值的 9.1%~12.9%;园艺业 10449~14577 万元,占总值的 4.7%~7.9%(见图 2)。

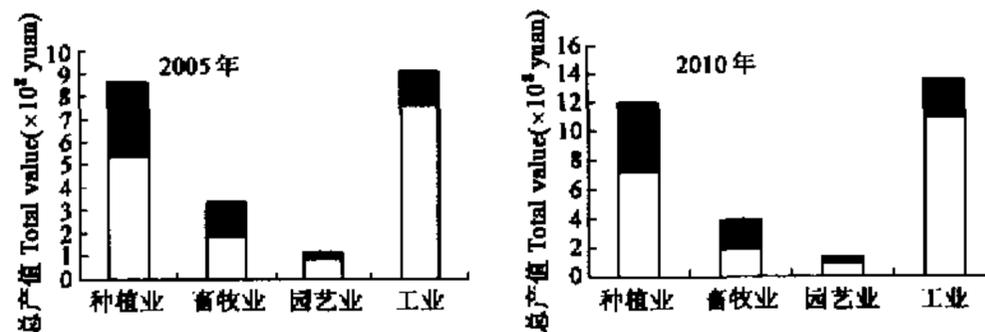


图 2 情景二下经济收益情况

Fig. 2 Economic profit at scenario two

图例同图 1 Legend is the same as fig. 1

3.7 水资源配置优化分析

情景一,2005 年种植业春灌用水为 8134~11462 万 m^3 ,全年用水为 32991~43752 万 m^3 ;2010 年种植业春灌用水为 10293~14095 万 m^3 ,全年用水为 43909~56572 万 m^3 。相比之下,产值最高的工业无论是春季用水还是全年用水都很少。从用水总量上分析,2005 年和 2010 年和田全年最大可利用水资源总量分别为 90211~104840 万 m^3 和 114097~124529 万 m^3 ,春季最大可利用水资源为 16330~18779 万 m^3 和 20564~22306 万 m^3 。情景一下 2005 年和 2010 年全年总用水量分别为 54351~71722 万 m^3 和 69175~90396 万 m^3 ,春季用水量分别为 11642~16064 万 m^3 和 14444~19553 万 m^3 。从总量上看,2005 年水资源无论是全

年水量还是春季水量均有一定剩余,但这是以提高灌溉效率和建设蓄水(如乌鲁瓦提水库)工程和引水工程(如干渠防渗工程)为前提的。

情景二水土开发规模很大,水资源需求量大为增加,水资源对工农业生产的约束作用表现得更加明显。2005年和2010年,春季用水量分别为13781~20886万 m^3 和16773~27449万 m^3 。从总量上看,无论是2005年还是2010年春季水需求的下限是可以得到保证的,但其上限就已经超越了春季最大可供水能力。从春季用水的配置情况看,种植业和园艺业是两个配额最大的产业。2005年其用水量分别占全部春季用水量的75.4%和15.3%;2010年则分别占总量的76.3%和13.2%。由此可见,过度的水土开发种植农作物对春季水资源产生了巨大的压力。2005年和2010年全年总用水量分别为69851~99849万 m^3 和85223~128965万 m^3 。种植业、林业和园艺业是全年耗水最多的3个行业,2005年其用水量分别占用水总量的58.6%,24.3%和10.0%;2010年其用水量分别占用水总量的66.1%,17.1%和8.2%。虽然仅仅从绿洲内部水量供需平衡而言,情景二的水资源勉强能够保持供需均衡。但是由于上游绿洲引水过多,必然引起下游水量急剧减少,长远看必将影响到和田河流域生态植被的繁衍生长,甚至反作用于绿洲的生态及气候环境。而且,单就绿洲内部而言,过多开采地下水以满足工农业用水,将会对地下水水量平衡产生不利影响。

3.8 化肥需求量分析

情景一,2005年和2010年化肥需求量分别为20877~28232t和24610~31428t,化肥需求量呈现稳中有升的态势。这主要是一方面种植面积不断扩大,另一方面单位面积需求量不断提高,所以对化肥的需求将不断上升。从各种作物对化肥的需求量上看,粮食作物的化肥需求量居绝对多数,2005年和2010年分别占总需求量的84%和78%。经济作物的化肥需求量占总量的比例则从15%上升到21%。

情景二,2005年化肥需求总量为25992.8~34420.6t,2010年化肥需求总量为29438.1~43758.5t。化肥需求量比情景一增加很多,这主要是因为情景二水土开发规模显著增大,相应的各类作物种植面积增加,化肥需求量自然也随之增加。从化肥需求的结构上分析,2005年粮食作物、经济作物和养地作物化肥需求所占比例分别为81.7%、17.6%和0.8%;2010年则分别为75.2%、23.9%和0.9%。

3.9 情景综合分析

从经济收益来看,情景二的经济产出要比情景一大。这是因为情景一将生态环境保护、水土平衡和经济发展指标均衡加以考虑,而情景二则侧重在水资源和生态环境的极限之内尽可能体现对经济产出的偏好。虽然情景二比情景一具有更高的经济产出,但是实现这么高的产出对资金和人才的要求很高,而资金投入有限和劳动力素质不高恰恰是限制和田社会经济发展的重要制约因子,所以情景一比情景二具有更强的可行性和可操作性。

从水资源保护和生态环境保护的角度来看,情景一绿洲内部用水量要比情景二绿洲内部用水量少的多。这样,情景一对蓄水工程和引水工程扩建的要求就没有情景二要求强烈,且不存在地下水过量开采的问题。而情景二已经存在水资源过度利用的现象,春季的林地和天然草场生态需水已经得不到满足,和田河的人水量也将大幅度减少。所以从水资源角度而言,情景一更具有可行性,就生态环境保护角度而言,情景一所承受的生态环境风险较低,生态环境的容余度较高。

无论是工农业经济发展,还是生态环境保护和水资源合理利用,情景一的发展模式都是较为合理的,更具有科学性和可操作性。这种发展情景既充分保证了生态环境与经济协调持续发展最终目标的实现,又考虑到了大量贫困人口存在的情况下,经济投入的可行性。另外,情景一还整合了当地决策者和专家对经济持续发展和改善生态环境的不同偏好,避免了过分强调经济发展或生态保护任何一方。如能按照这种优化情景进行发展,和田的经济与生态环境系统将处于最优状态,从而为整个地区的脱贫致富、经济腾飞奠定良好的物质经济基础和生态环境基础。

4 结论

本研究利用不确定性多目标规划(IMOP)、交互式调整和情景分析方法,成功地进行了和墨洛地区经济-生态环境规划优化研究。可见,以IMOP模型为核心的IMOPEES模型能够较好地反映经济-生态环境

系统的综合性、多目标性、动态性和不确定性等特征。规划结果以定量的区间数形式提供给决策者,既有明确的发展规模,又留下发展调节的余地,从而增强了方案的实用性。通过和田区的结果进行情景分析可知,以大农业发展为首的整体经济发展相互均衡协调共进为目标的情景一是其必然选择。总之,以 IMOP 为核心的 IMOPMEES 模型是一种解决干旱地区生态环境规划的有效方法。

参考文献

- [1] Wang W G (王维国), Yan C L (阎承琳). Introduce to Environmental System Modeling. *Journal of Dongbei University of Finance and Economics* (in Chinese)(东北财经大学学报), 2000, 1:70~72.
- [2] Haith D A (海思). *Environmental Systems Optimization* (in Chinese). Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1987.
- [3] Zou R (邹锐), Guo H C (郭怀成). An Environ-economic Harmonized Inexact System Programming for Agriculture Forestry Land-use in the Lake Erhai Basin. *Acta Scientiae Sircumstantiae* (in Chinese) (环境科学学报), 1999, 19(2): 176~193.
- [4] Wu S M, Huang G H, Guo H C. An Interactive Inexact-fuzzy Approach for Multi-objective Planning of Water Resource System. *Water Science & Technology*, 1997, 36(5): 235~242.
- [5] Guo H C and Zuo R. Water Environmental Planning for new Zone of Economic-technological Development in China. *J. of Chinese Geography*, 1998, 8(1): 32~39.
- [6] Huang G H, Baetz B W and Patry G G. A Grey Fuzzy Linear Programming Approach for Waste Management and Planning Under Uncertainty. *Civil Engineering Systems*, 1993, 10: 123~146.
- [7] Huang G H, Cohen S, Yin Y Y. Incorporation of Inexact Integer Programming and Fuzzy Relation Analysis for Integrated Environmental Impact Assessment and Adaptation Study under Uncertainty. *J. of Environmental Management*, 1996, 48: 45~68.
- [8] Zou R (邹锐), Guo H C (郭怀成). Method and Application of the Environmental Planning for Economic Development Zone Under Uncertainty 1. Inexact Multi-objective Mixed Integer Programming Model And Its Algorithm. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (in Chinese) (北京大学学报), 1999, 35(6): 794~801.
- [9] Zou R (邹锐), Guo H C (郭怀成), Liu L (刘磊). A New Method Based on the Objective-Deviation-Tolerance-Level for Multi-Objective Decision Making. *Journal of System Engineering* (in Chinese) (系统工程学报), 1998, 13(3): 41~47.
- [10] Zou R (邹锐), Guo H C (郭怀成), Liu L (刘磊). A Preliminary Study on the Inexact Man-model Interactive Environmental System Program Method for Economic Development Zone. *China Environ. Sci.* (in Chinese)(中国环境科学), 1997, 17(5): 397~403.