

流域土地可持续利用规划方法及应用研究

郭怀成, 张振兴, 于 湧

(北京大学环境学院, 北京 100871)

摘要: 土地利用既受自然环境条件的种种制约, 又对生态环境, 尤其是水资源和水环境, 产生深刻影响。因此, 进行系统规划优化土地利用结构、协调土地利用和其他经济活动及生态环境保护的关系是非常必要的。基于土地利用系统是一个本征性灰色系统, 本文以灰色多目标规划 (GMOP) 方法为核心, 提出了一套流域土地利用灰色多目标规划模型。该方法既可有效地处理信息的不完备性和系统的动态性, 又可全面地表达土地利用的多目标性。在对密云土地利用规划研究中, 通过应用交互式调整和情景分析方法, 得到该模型在两种情景下的优化方案, 并结合密云实际情况综合分析, 进行了方案筛选。

关键词: 流域; 土地利用; 灰色多目标规划; 密云; 情景分析

中图分类号: F301.24 **文章编号:** 1000-0585(2003)06-0671-09

1 前言

“十分珍惜和合理利用每寸土地”是我国的基本国策。我国要用仅占世界 7% 的土地养活占世界 22% 的人口, 进行土地利用规划是实现这一基本国策的重要方法。我国又是一个多湖泊水库的国家, 其中许多湖泊水库都面临着两个主要问题, 即泥沙淤积和水质恶化。造成这种现象主要是由于土地利用不合理, 从而导致了水土流失和非点源污染, 加大了入湖库的泥沙量及氮、磷污染负荷。因此, 对流域的土地利用进行合理的调整和配置、协调土地利用和其他经济活动以及环境保护的关系就成为亟待解决的重大问题。特别是对我国来说, 开展土地利用规划方法及应用研究更有着特殊意义和实践价值^[1]。

流域土地利用规划方面的研究在国内外都已得到开展, 并取得了可喜的成果, 如洱海流域农林土地利用规划^[2]、山地集水区土地利用规划^[3]、种植业用地结构优化研究^[4]、对土地利用/覆被变化研究^[5~8]以及土地利用与水资源平衡的关系研究^[9]等等。但是, 由于土地利用系统是一个力学巨系统, 也是一个本征性的灰色系统^[10], 具有不确定性、动态性和多目标性^[11]。灰色多目标规划方法具有有效处理不确定性、动态性和多目标性的特点, 因而可以用来较好地实现土地可持续利用规划。自邓聚龙 1982 年提出灰色系统理论^[12]以来, 灰色线性规划方法已在国内外得到广泛的应用^[13], 尤其是应用于水资源规划^[14]和农村社会经济发展^[15]等, 取得了良好的效果。

近年来, 由于生态环境的不断恶化, 使得土地利用规划的内容必然要与环境保护和生态平衡紧密地结合在一起, 并通过其将环境保护的内容具体落实到土地利用中^[16,17]。故本文以 GMOP 方法为核心, 针对流域土地利用系统的多目标性、动态性和信息不完备性,

收稿日期: 2003-04-08; 修订日期: 2003-07-15

基金项目: 北京市科委资助项目 (RK99-21)

作者简介: 郭怀成 (1953—), 男, 北京人, 教授, 博士生导师。主要从事环境科学研究和教学。

将流域土地利用系统作为一个有机整体, 构建了流域土地可持续利用灰色多目标规划模型, 并以北京市密云土地可持续利用为对象进行案例研究, 得到动态的土地利用结构调整, 以实现土地可持续利用和生态环境的良性循环。

2 研究方法

2.1 GMOP 模型及算法

GMOP 模型的一般形式:

$$\begin{aligned} \text{opt } f_k(x) &= \otimes(C_k)X^T \rightarrow \max(\min), k=1, 2, \dots, u \\ \text{s. t. } \otimes(A)X &\leq \otimes(B) \\ X &\geq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

其中: \otimes 表示灰色系数, $\otimes(C_k)$ 为第 k 个目标的价值向量。

$$\otimes(C_k) = [\otimes(c_{1k}), \otimes(c_{2k}), \dots, \otimes(c_{nk})]$$

$$\otimes(A) = \begin{bmatrix} \otimes(a_{11}) & \dots & \otimes(a_{1n}) \\ \dots & & \dots \\ \otimes(a_{m1}) & \dots & \otimes(a_{nm}) \end{bmatrix}$$

$$\otimes(B) = [\otimes(b_1) \otimes(b_2) \dots \otimes(b_n)]$$

GMOP 将灰色系统理论引入多目标规划生成灰色多目标规划, 并以灰区间数表达系统的灰度。在求解过程中, 通过将灰数白化, 可以反映系数改变的情况。因此, GMOP 模型可以有效地表达系统的信息不完备性、多目标性和动态性, 规划结果也具有更好的科学性、适应性和可操作性。

灰色线性规划一般解法是将灰色约束系数矩阵 $\otimes(A)$ 和灰色资源向量 $\otimes(B)$ 由灰变白, 从而得到白化的线性规划。这样, 一个 GMOP 模型通过白化就得到一系列确定性的多目标规划(MOP)模型。本文采用基于目标偏离容忍水平(ODTL)的交互式 MOP 算法^[18]。

2.2 流域土地可持续利用灰色多目标规划模型 (GMOPBLU)

以土地利用现状为基础, 按照全国农业区划委员会编制的《土地利用现状调查技术规程》将土地利用分为 10 种主要类型。根据土地利用系统特点, GMOPBLU 模型按照规划区的地理单元分异和数据的易得性, 分为 n 个规划子区, 设置 $10n$ 个变量, 经济效益、生态效益和环境效益 3 个目标和土地面积、土地利用现状、资源、环境及技术约束等 9 个方面共 24 个约束。

2.2.1 目标函数

$$(1) \text{ 经济收益最大化 } \text{Max} F_1 = \sum_u \sum_{i=1}^{10} (B_{ui} \times x_{ui})$$

$$(2) \text{ 环境效益最大化 (以水土流失最小化表达) } \text{Max} F_2 = \sum_{u=1}^n \sum_{i=1}^{10} (SL_{ui} \times x_{ui})$$

$$(3) \text{ 生态效益最大化 (以植被覆盖最大化表达) } \text{Max} F_3 = \sum_{u=1}^n (x_{u2} + x_{u3})$$

2.2.2 约束条件

$$(1) \text{ 土地总面积约束 } \sum_{i=1}^{10} x_{ui} = TL_u$$

$$(2) \text{ 宜农土地面积约束 } x_{ui} \leq SLA_u$$

$$(3) \text{ 无法利用土地面积约束 } x_{u10} \geq UL_u$$

(4) 宏观计划约束

$$\text{大农业用地约束 } \sum_{u=1}^n \sum_{i=1}^4 x_{ui} \geq AL \quad \text{耕地最小面积约束(基本农田保护)} \sum_{u=1}^n x_{u1} \geq TBF$$

$$\text{林地最小面积约束 } \sum_{u=1}^n x_{u4} \geq TL \times t/t' \quad \text{城镇用地面积 } \sum_{u=1}^n x_{u6} \leq UCL$$

$$\text{独立工矿用地面积 } \sum_{u=1}^n x_{u7} \leq UML \quad \text{交通用地面积 } \sum_{u=1}^n x_{u8} \leq UJL$$

$$\text{部门用地比例约束 } \sum_{u=1}^n x_1 : \sum_{u=1}^n x_2 : \sum_{u=1}^n x_3 : \sum_{u=1}^n x_4 = A_1 : A_2 : A_3 : A_4$$

$$\text{粮食产量约束 } \sum_{u=1}^n (s_u \times x_{u1}) + SI - SO \geq S$$

(5) 现状约束

$$\text{城镇用地面积 } x_{u6} \geq CL_u \quad \text{独立工矿用地面积 } x_{u7} \geq ML_u \quad \text{交通用地面积 } x_{u8} \geq JL_u$$

$$(6) \text{ 人口总量约束 } P_1 \times \sum_{u=1}^n \sum_{i=1}^5 x_{ui} + P_2 \times \sum_{u=1}^n \sum_{i=6}^7 x_{ui} \leq T_p$$

(7) 资源约束

$$\text{农业利用劳动力资源约束 } \sum_{u=1}^n \sum_{i=1}^{10} (L_{1i} \times x_{ui}) \leq L_a$$

$$\text{非农业利用劳动力资源约束 } \sum_{u=1}^n \sum_{i=5}^{10} (L_{2i} \times x_{ui}) \leq L_c$$

$$\text{资金投入约束 } \sum_{u=1}^n \sum_{i=1}^{10} (g_{ui} \times x_{ui}) + MI - MO \geq M$$

$$\text{用电量约束(能源约束)} \sum_{u=1}^n \sum_{i=1}^{10} (d_{ui} \times x_{ui}) \leq E$$

$$\text{水资源约束 } \sum_{u=1}^n \sum_{i=1}^{10} (b_{ui} \times x_{ui}) \leq W$$

(8) 环境约束

$$\text{水土流失约束 } \sum_{u=1}^n \sum_{i=1}^{10} (SL_{ui} \times x_{ui}) \leq TSL$$

$$\text{氮流失约束 } \sum_{u=1}^n \sum_{i=1}^{10} (NL_{ui} \times x_{ui}) \leq TNL \quad \text{磷流失约束 } \sum_{u=1}^n \sum_{i=1}^{10} (PL_{ui} \times x_{ui}) \leq TPL$$

$$\text{污水总量约束(工业及生活污水)} \sum_{u=1}^n \sum_{i=1}^{10} (WW_{ui} \times x_{ui}) \leq TWW$$

(9) 技术约束 $x_{ui} \geq 0$

其中： $u=1, 2, \dots, n$ ，代表各子区； $i=1, 2, \dots, 10$ ，分别表示耕地、园地、林地、牧草地、农村居民用地、城镇用地、独立工矿用地、交通用地、水域和未利用土地； B_{ui} 为第 u 子区第 i 种土地利用方式单位面积国内生产总值（元/ha）； SL_{ui} 为第 u 子区第 i 种土地利用方式单位面积年水土流失量（kg/ha）； TL_u 为第 u 子区土地总面积（ha）； SLA_u 为第 u 子区最大宜农地面积（ha）； UL_u 为第 u 子区无法利用土地面积（ha）； AL 为国民经济计划所规定的最少大农业用地面积（ha）； TBF 为基本农田保护面积（ha）； t 为规划期林地覆盖率（%）； t' 为换算系数； UCL 为宏观计划最大城镇用地面积（ha）； UML 为宏观计划最大独立工矿城镇用地面积（ha）； UJL 为宏观计划最大交通用地面积（ha）； A_1, A_2, A_3 及 A_4 为国民经济计划确定的大农业用地结构比例； s_u 为第 u 子区单位面积耕地粮食产量（t/ha）； SI 为粮食调进量（t）； SO 为粮食调出量（t）； S 为粮食需求量（t）； CL_u 为第 u 子区现状城镇用地面积（ha）； ML_u 为第 u 子区现状独立工矿用地面积（ha）； JL_u 为第 u 子区现状交通用地面积（ha）； P_1 为农用地平均人口预测密度（人/ha）； P_2 为城镇用地平均人口预测密度（人/ha）； T_p 为规划总人口（万人）； L_{1i} 为第 i 种农业用地单位面积劳动力数量（人/ha）； L_{2i} 为第 i 种非农业用地单位面积劳动力数量（人/ha）； L_a 为可供农业利用劳动力数量（万人）； L_c 为可供非农业利用劳动力数量（万人）； g_{ui} 为第 u 子区

第 i 种用地单位面积土地资金投入量 (元/ha); MI 为资金调入量 (万元); MO 为资金调出量 (万元); M 为资金需求量 (万元); d_{ui} 为第 u 子区第 i 种用地单位面积需电量 (度/ha); E 为可供电总量 (度); b_{ui} 为第 u 子区第 i 种用地单位面积需水量 (m^3 /ha); W 为水资源总量 (m^3); TSL 为总允许水土流失量 (t); NL_{ui} 为第 u 子区第 i 种土地利用方式单位面积年氮流失量 (kg/ha); TNL 为允许氮流失量 (t); NP_{ui} 为第 u 子区第 i 种土地利用方式单位面积年磷流失量 (kg/ha); TPL 为允许磷流失量 (t); WW_{ui} 为第 u 子区第 i 种土地利用方式单位面积年污水量 (t/ha); TWW 为允许污水排放量 (t)。

3 案例研究

为检验 *GMOPBLU* 模型的实用性, 本文以北京市密云土地利用系统为研究对象, 进行了案例研究。综合考虑密云土地利用现状、地理单元分布和数据的易得性, 将研究区域作为一个整体, 规划区面积为 $2\,223.6\text{ km}^2$ 。规划年限分为 1998~2010 年和 2010~2015 年 2 个阶段。考虑到密云城区面积不大, 独立工矿用地面积较小且二者之间在土地利用和土地覆盖相似性较大, 将城区用地和独立工矿用地设为一个变量。

3.1 研究区概况

密云位于东经 $116^{\circ}39'44''\sim 117^{\circ}30'25''$, 北纬 $40^{\circ}13'10''\sim 40^{\circ}48'$ 处, 是北京市远郊县, 距离市区 65km。北京市最大的水源——密云水库坐落于密云县的心脏位置, 占地 224 km^2 , 总库容 43.75 亿 m^3 , 是华北最大的水库。1982 年以来, 密云水库一直承担着向北京提供生产和生活用水的职能, 为北京的发展提供了良好的保障。密云土地利用对水库的水质水量都有巨大影响, 进行土地可持续利用规划、实现经济与环境的可持续发展已成为迫切需要解决的重要问题。

3.2 情景分析

为保证规划方案的实用性和可操作性, 本文引入情景分析的概念, 对密云 *GMOPBLU* 模型在两种情景下进行求解: 情景一是从土地利用系统特点出发, 综合考虑人口控制和科技进步等因素, 对模型进行分析、定参和求解; 情景二是充分考虑有关人员对于土地利用系统结构的偏好, 主要是对经济目标的偏好整合到模型中, 放宽人口、劳动力、水资源和环境约束。这两种情景分别对应于模型中进行灰数白化时所取的灰数的下限和上限。因此, 从模型计算角度看, 这是灰数白化的两个具体解, 从情景分析角度看, 则表示两种不同情景下的规划方案。通过情景综合比较分析, 最后筛选出适宜的土地利用规划方案。

3.2.1 土地利用结构 土地利用结构优化是土地利用规划的核心, 它的合理与否将直接关系到社会经济的发展。本文将结合密云社会经济发展状况对密云 9 种土地利用类型的数量变化逐一阐述。

• 耕地

情景一耕地面积及其所占比重缓慢减少 (见表 1), 一部分地势较好、地形平坦的耕地将被交通和城镇建设所占用, 一部分坡耕地则将要退耕还林。耕地面积虽不断减少, 但依然可以在不用大规模提高单位面积产量的前提下, 满足密云粮食需求和基本农田保护的要求。情景二下, 耕地面积大幅度下降 (见表 1), 这是因为情景二强调经济产出, 计算时采用粮食单产上限, 放宽了约束条件。因此大量耕地将被城镇建设和交通建设占用以谋求更大的经济产出。情景二下将出现过度使用耕地和过度施用化肥等问题, 这就会对耕地的可持续利用和水资源保护产生非常不利的影

表 1 密云土地利用结构现状与优化比较 (ha)

Tab. 1 Land use structure in two scenarios (ha)

	1999 年		2010 年				2015 年			
	面积	%	情景一		情景二		情景一		情景二	
			面积	%	面积	%	面积	%	面积	%
耕地	23532	10.56	22308	10.01	20000	8.97	21482	9.64	20000	8.97
园地	11114	4.99	12046	5.40	18053	8.10	12545	5.63	17504	7.85
林地	107182	48.09	129749	58.22	129214	57.98	134055	60.15	130351	58.49
牧草地	836	0.38	892	0.40	800	0.36	859	0.39	800	0.36
农村居民用地	6260	2.81	5577	2.50	6226	2.79	5370	2.41	5881	2.64
城镇用地	4350	1.95	4786	2.15	5600	2.51	5230	2.35	6200	2.78
交通过地	1278	0.57	1540	0.69	1800	0.81	1720	0.77	1860	0.83
水域	23009	10.32	23912	10.73	23912	10.73	23009	10.32	23009	10.32
未利用土地	45309	20.33	22060	9.90	17265	7.75	18600	8.35	17265	7.75
总计	222870	100	222870	100	222870	100	222870	100	222870	100

• 园地

由于生产周期较长,而市场却是瞬息万变,密云园地面积在历史上出现过大起大落的不合理现象。这说明如果没有一个好的规划和设想,生产的调整总是会滞后于市场的变化和现实的需求。情景一密云园地面积保持稳定的增长态势(见表 1)。园地同时具有较好的生态效益和经济效益,且对地形和土壤的要求不高。同时,密云又具有林果生产的优良传统并已经形成了以苹果、梨和桃等为主的规模化经营的林果基地。今后林果生产在不断增加面积,提高产量的同时,重点应该是林果生产的规模化和深加工。情景二下,第一阶段园地面积增长很快,第二阶段园地面积略微下降(见表 1)。园地面积的起落将会增加土地利用系统的不稳定性。

• 林地

情景一下林地面积增长很快,其中一部分来自退耕还林以外,大部分来自未开发利用土地的植树造林。林地面积的增加为密云生态环境保护提供了坚实的基础,也为林业生产和畜牧业生产发展提供了良好的条件。情景二林地面积在第一阶段依然增长很快,第二阶段增长放慢(见表 1)。由于优先考虑经济效益,而林地的经济产出较低,因此,情景二林地面积较情景一要少。

• 牧草地

密云是北京畜牧业生产的重点县。畜牧业已经逐渐成长为密云农业的支柱产业。由于密云畜牧业发展战略的调整,畜牧业不再是以天然牧草地和林地放牧为主,而是以现代化饲料和饲草喂养为主。天然牧草地经过 20 世纪 90 年代的大规模收缩以后,情景一下将比较稳定,情景二下有轻微的减少(见表 1)。牧草地维持在一个很低的水平主要是因为天然牧草地放牧不再是畜牧业发展的主要方向。较少的牧草地主要分布在河漫滩等适合于野生牧草生长的地区。

• 农村居民点用地

情景一下,由于小城镇建设、密云卫星城的发展和密云水库周边山区人口的外迁,农

村居民点的用地将缓慢减少（见表 1）。情景二下农村居民点用地比较稳定（见表 1），这是因为人口增长较快，住宅建设面临较大压力。考虑到密云水库边缘地区和自然保护区农村人口的外迁，平原地区的农村居民点用地的控制是不够严格的。

· 城镇及独立工矿用地

由于密云卫星城和翁溪庄、太师屯、古北口、西田各庄和河南寨等城镇的不断发展，城镇用地面积不断增加。小矿山开发由于政策控制将受到一定限制，独立工矿用地面积将比较稳定。在情景一下，城镇与独立工矿用地的总面积将以较快的速度增加（见表 1）。这既是密云社会经济发展和城市化的结果，又将促进社会经济发展。同时也要占用地形平坦的地区，对质量较好的耕地产生很大的压力。情景二下，为了追求更大的经济产出，也为了解决人口增加带来的压力，城镇及独立工矿用地面积增加很快（见表 1），这将占用大量高质量的耕地及菜地，影响农业生产的稳定性。

· 交通用地

两种情景下，交通用地面积都将快速地增加，情景二在第一阶段增加更为迅速（见表 1）。规划期内，密云将建成以高速公路、国道和市道为骨架，以卫星城为中心、各中心镇和风景旅游区为补充的公路网络。交通用地的增加是交通建设发展的前提，将为社会经济发展提供良好的交通条件。对于密云这样的山区县而言，发展交通具有非常重要的意义，可以增强密云与外界的联系，促进物资流通和信息交流。另一方面，交通用地的增加会对优质耕地产生较大的压力，山区公路网络的扩大也会对野生生物的生存环境产生一定的分割作用。

· 水域

密云除大型的密云水库外，还有中型水库 3 座、小型水库 20 座、塘坝 52 座、主要河流 10 余条以及京密引水渠一条，水域占地比重较大。两种情景下水域面积都将稳定在 2.3 万 ha 左右（见表 1）。由于密云水库是北京市的重要水源，因此稳定水库面积并保持水库水质将是密云土地利用调整时需要着重考虑的问题。密云水域的作用已远远超出密云土地利用系统本身，因此，对水域的约束主要来自上级系统和政策约束。

· 未利用土地

两种情景下，未利用土地都将大幅度地减少（见表 1），而情景二下减少幅度更大。这是因为大规模的荒山植树造林和小流域综合治理使得大面积的未利用土地成为了林地。这对密云水土保持进而保护密云水库水质具有非常大的意义。另一方面也需要大量的资金投入以满足土地开发的需要。

3.2.2 经济效益

在情景一下，密云经济保持较快的增长，2010 年、2015 年的国内生产总值将分别达到 100.9 亿元和 147.7 亿元，增长速度分别为 11.4% 和 7.9%。2010 年 GDP 构成中，农村地区为 25.3 亿元，城镇为 75.6 亿元。2015 年 GDP 构成中，农村地区为 31.1 亿元，城镇为 116.6 亿元。城镇用地和交通用地的增加为密云城镇区域的经济发展提供了良好的土地组织条件。园地面积的增加和耕地保护为农村经济发展提供了良好的土地基础。林地面积的快速增加为经济发展提供了良好的生态条件。

情景二下密云经济的发展速度比情景一要快，2010 年、2015 年的国内生产总值将分别为 114.9 亿元和 170.1 亿元，增长速度分别为 12.8% 和 8.2%。2010 年 GDP 构成中，

农村地区为 26.4 亿元，城镇为 88.5 亿元。2015 年 GDP 构成中，农村地区为 31.8 亿元，城镇为 138.3 亿元。可见，同情景一比较，情景二城镇经济发展更为快速。这就需要大量增加城镇用地和交通过地。

3.2.3 人口

情景一下预测密云人口 2010 年为 49.6 万，农业利用劳动力为 8.7 万，非农业利用劳动力为 13.6 万；2015 年人口为 54.2 万，农业利用劳动力资源为 9.0 万，非农业利用劳动力资源为 16.7 万。情景一的土地利用结构可以满足预测人口的土地需求，劳动力资源亦可满足需求。由于城镇人口和非农业劳动力增长较快，城镇就业面临较大压力。

情景二下密云人口 2010 年为 51.3 万，农业利用劳动力为 9.2 万，非农业利用劳动力为 13.7 万；2015 年人口为 55.5 万，农业利用劳动力资源为 9.5 万，非农业利用劳动力资源为 17.4 万。人口和劳动力增长都比情景一快，使得农村居民点用地维持较高水平，而城镇及独立工矿用地面积快速上升，同时也会产生更大的就业压力。

3.2.4 生态环境

情景一下由于林地和园地面积的大幅度增加，密云植被覆盖率增长较快，植被覆盖率的提高将为密云社会经济发展和水质保护提供良好的生态基础。情景一下工农业生产用水和人民生活用水将保持在 16000 万 m^3 左右，密云的可用水资源是可以满足这个要求的。从模型的求解过程可知，水资源对于密云土地结构调整具有强烈的约束作用，所以节约用水和发展节水型工业及第三产业是非常必要的。城镇生产及生活污水产生量将保持在规划的污水处理能力之内。土地利用调整将为密云环境保护提供良好的土地组织条件，水土、氮、磷流失量都将大幅度减少（表 2）。

情景二下，密云的植被覆盖率增长仍然较快。由于工农业生产快速发展以及城镇人口数量增加，工农业生产用水和人民生活用水将保持在 20600 万 m^3 左右，而满足这么高的水资源需求是相当困难的。城镇生产及生活污水产生量大幅度增加，对密云污水处理设施产生较大压力。水土、氮、磷流失量的大幅度减少，固然有利于密云水库水资源的保护，但这是以大量减少耕地为代价的。

表 2 密云生态环境指标

Tab. 2 Planning value of environment system

生态环境指标	2010 年		2015 年	
	情景一	情景二	情景一	情景二
植被覆盖率 (%)	63.6	66.1	65.8	66.3
污水产生量 (万 t)	1546	1809	1951	2313
水土流失 (万 t)	53	44	45	39
总氮流失 (t)	719	667	406	383
总磷流失 (t)	89	82	76	71

3.2.5 情景综合分析

通过以上具体分析可知，密云土地利用结构的调整，情景一较为缓和，而情景二较为激烈。显然，对土地利用结构进行大规模的调整，无论是对土地本身理化性质还是对生产的稳定性都会产生较大的不利影响。同时，情景二的耕地面积数量少，化肥需求高，农业生产稳定性将受到影响。而化肥需求高，显然与密云关于降低化肥使用量的既定政策相违背。尽管从经济产出来看，情景二要略优于情景一，但这是在耕地面积大量减少、建

设用地面积和资金需求大量增加的情况下取得的；同时，由于人口数量情景二亦多于情景一，使得土地利用系统承受的人口压力更大。因此，情景二实现难度较大，系统的不稳定性增加，这不符合土地可持续利用的原则。从环境保护来看，两种情景在植被覆盖、水土流失和氮、磷流失方面区别不大，且都可以满足密云水库水质保护的要求。情景二污水产生量较多，对污水处理设施产生较大压力。从水资源来分析，情景一比情景二承受的压力小；而情景二对水资源的强烈需求可能使得其经济目标和生态环境目标都难以实现。

总而言之，无论从土地利用结构来看，还是从经济、环境效益和水资源需求量来说，情景一的土地利用结构更为合理，更有利于流域生态系统的稳定和土地的可持续利用。因此，情景一更具合理性和可行性，故其可作为密云土地可持续利用规划的实施案。

4 结论

本文以灰色多目标规划 (GMOP) 方法为核心建立了 GMOPBLU 模型，并将其成功地应用于密云土地利用规划的案例研究之中。本文通过引入灰色数概念，来充分表达土地利用系统的信息不完备性；在对 GMOPBLU 模型的建立、求解和解译过程中，通过应用交互式调整和情景分析方法，以充分考虑当地专家和决策人员的意见，并将其整合于模型之中，从而保证了模型的实用性。总之，对于土地利用系统这样一个本征性的灰色系统而言，GMOPBLU 模型能够充分反映其多目标性、动态性和信息不完备性。因此，GMOPBLU 模型是进行土地利用规划的一种十分有效的工具。

参考文献：

- [1] 吴传钧,郭焕成. 中国土地利用. 北京:科学出版社,1994.
- [2] 邹锐,郭怀成,等. 洱河流域环境经济相协调的农林土地利用不确定系统规划. 环境科学学报, 1999, **19**(2): 176~193.
- [3] Adinarayana J, Krishna N R. An approach to land-use planning in a hilly watershed using geographical information systems. Land-Degradation-and-Rehabilitation, 1995, **6**(3): 171~178.
- [4] 王雷,等. 种植业用地结构优化模型及其应用研究. 地理研究, 1999, **18**(增刊): 128~135.
- [5] 蔡运龙. 土地利用/覆被变化研究:寻找新的综合途径. 地理研究, 2001, **20**(6): 645~652.
- [6] 吴月照,张妙娣. 北京市密云县土地资源评价与利用研究. 见:城市、区域与环境. 北京:海洋出版社,1993.
- [7] 何春阳,等. 北京地区土地利用/覆盖变化研究. 地理研究, 2001, **20**(6): 679~687.
- [8] 庄大方,等. 北京市土地利用变化的空间分布特征. 地理研究, 2002, **21**(6): 667~674.
- [9] Wilson K B. Water used to be scattered in the landscape: local understandings of soil erosion and land use planning in southern Zimbabwe. Environment-and-History, 1995, **1**(3): 281~296.
- [10] 王学萌. 灰色系统方法简明教程. 成都:成都科技大学出版社,1992.
- [11] Huizing H, Bronsveld K. Interactive multiple-goal analysis for land use planning. ITC-Journal, 1994, (4): 366~373.
- [12] 邓聚龙. 灰色系统理论教程. 武汉:华中理工大学出版社,1990.
- [13] 邓琦,周强,汪秉仁,等. 水资源灰色系统预测与决策. 北京:测绘出版社,1989.
- [14] Huang G H, Baetz B W, Patry G G. A grey fuzzy linear programming approach for waste management and planning under uncertainty. Civil Engineering Systems, 1993, **10**: 123~146.
- [15] 张沁文,王学萌,聂宏声. 农村经济灰色系统分析模型、方法、应用. 北京:学术期刊出版社,1989.
- [16] 何芳. 土地利用规划. 上海:百家出版社,1994.
- [17] 王万茂. 土地利用规划学. 北京:中国大地出版社,2000.
- [18] 邹锐,郭怀成,刘磊. 基于目标偏离容忍水平的多目标交互式决策方法. 系统工程学报, 1998, **13**(3): 41~47.

Sustainable basin land-use planning and its application

GUO Huai-cheng, ZHANG Zhen-xing, YU Yong

(College for Environmental Science, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Land resource is one of the most essential natural resources. Land-use is the linkage between human and nature and the basis of all other economic activities. Moreover, it is subject to and has serious impact on natural environment. There are a variety of lakes and reservoirs in China. A large population live in the basins of these lakes and reservoirs. Too much sediment and heavy water pollution are the key problems to these basins, both of which are correlated closely with land-use. Thus it is very important to optimize basinland-use structure.

The grey multi-objective programming (GMOP) model was employed worldwide to solve many optimization problems such as economic development planning in countryside and water resource planning. GMOP can reconcile multiple and often conflicting objectives, address information insufficiency and optimize system performance. At the meantime, land-use system is characterized by dynamic, multi-objectivity and information insufficiency. Therefore, GMOP is a very useful tool to optimize basin land-use structure.

In this study, GMOP is applied to solve sustainable basin land-use system planning, taking Miyun County as a case study. Centered in GMOP, the Grey Multi-objective Programming to Basin Land-use (GMOPBLU) model was built and solved with the interactive adjustment method. The GMOPBLU model has the ability to simulate the characteristics of the land-use system, and is a valuable tool for achieving the harmonization of conflicts between environmental and economic objectives.

The Interactive Adjustment Method was also used in the study to modify the model structure and the coefficients to reflect the features and the possible diverse preference of the stakeholders and decision-makers. The Scenario Analysis Method was applied to interpret the planning results.

In the present study, GMOPBLU model was used to the sustainable land-use planning in Miyun County 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 case study confirmed the practicability and operability of the GMOPBLU model. It showed that GMOPBLU model is a useful tool for sustainable basin land-use planning.

Key words: basin; land-use; grey multi-objective planning; Miyun County; scenario analysis