

# 吉林省大安市生态环境规划系统动力学仿真模型

汤 洁, 佘孝云, 林年丰

(吉林大学环境与资源学院, 长春 130026)

**摘要:**生态环境是人类生存和发展的基本条件,经济、社会发展的物质基础。如何保护和建设好生态环境,合理开发利用自然资源,是当今世界所面临的共同问题。针对吉林西部研究区的特点,要使生态环境和经济协调发展,必须统筹规划,突出土地盐碱地治理的重点,实施土、林、水综合治理。根据农业生态环境系统多目标、多层次、多变量、非线性的特点,应用系统动力学的原理与方法,建立系统动力学仿真模型,模拟封闭系统的动态变化,定量预测系统行为。并以吉林省大安市为例,采用系统动力学方法,开展了该区生态环境规划仿真研究,经过模型调控对比,提出了适合经济发展的最佳方案。

**关键词:**生态环境;系统动力学;大安市

文章编号:1000-0933(2005)05-1178-06 中图分类号:Q14,X144,X32 文献标识码:A

## A study on system dynamics model in eco-environment planning for Da'an of Jilin Province

TANG Jie, SHE Xiao-Yun, LIN Nian-Feng (College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130026, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 1178~1183.

**Abstract:** As the basic condition of exist and development of human being, environment is the physical base of the development of economy and society. How to protect and construct environment, and how to utilize natural resources reasonably are the problems we have to face. In view of the salinization in the western of Jilin province, soil, forest and water should be under controlled synthetically. Agroecological environment is a multi-target, multi-variable, multi-loop, nonlinearity feedback system. An integrated approach, system dynamics (SD), is applied to solve the eco-environment planning in this paper, the city of Da'an has been taken as a case to be studied.

SD is a new method in system analysis in modern times, while it has been increasingly used in solving many problems in recent years, such as sustainable development, eco-environment system, water resource carrying capacity, soil and water conservation, and so on. It is a simulating technique used with computer to simulate dynamic behavior of society, economy and environment, and a useful tool of scientific prediction.

On account of the complex and fragile environment, a model with system dynamics theory was established in the paper at first. It consisted of modules about population, land, planting, stockbreeding, environmental benefit and economy, which were integrated with a group of dynamics equations such as level equation, rate equation, assistant equation, etc. The program was written by DYNAMO language. System action at varying development schemes could be got through inputting original data and various velocities of variables. Finally, the model was applied to study eco-environment planning in Da'an of Jilin province, and the related indices in different schemes are obtained, from which the best scheme was put forward to coordinated development of society, economy and environment.

Comparing SD to other methods in studying agroecological eco-environment planning, different schemes are easier to get, the calculation is much more reasonable, and it can be factually simulated that the harmonious development status among

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(40072093, 40273047)

**收稿日期:**2004-06-08; **修订日期:**2004-12-26

**作者简介:**汤洁(1957~),女,吉林长春人,博士,教授,主要从事生态环境系统和信息管理研究。E-mail: tangjie@jlu.edu.cn

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 40072093, 40273047)

**Received date:** 2004-06-08; **Accepted date:** 2004-12-26

**Biography:** TANG Jie, Ph. D., Professor, mainly engaged in ecosystem and information management. E-mail: tangjie@jlu.edu.cn

society, economy and environment. Thus SD is an innovative and maneuverable method which can be used to study eco-environment planning.

**Key words:** environment; system dynamics; Da'an city

吉林省大安市位于全球三大盐碱地之一的松嫩平原中心地带,多年干旱少雨,蒸发量大,盐碱土地面积的比率相对较高。土壤沙化、草原退化、土壤肥力不断下降和水资源短缺问题日趋严重。该区的生态环境比较脆弱,严重制约着农牧业的发展。农业生态环境系统是一个多目标、多层次、多变量、非线性、多回路的复杂系统,以往的研究甚少涉及农业生态系统优化问题。我国自 20 世纪 80 年代初引进系统动力学后,已广泛研究与应用于可持续发展战略、经济、社会发展总体规划和水资源承载力研究等领域,而在农业生态环境规划方面研究很少。本文应用系统动力学的原理和方法开展了大安市生态环境规划仿真研究,建立了该区生态环境规划系统动力学仿真模型,经过政策模拟对比,提出了符合本地经济发展的最佳方案。

1 研究区自然概况

大安市地理坐标为(123°9'~124°22'E,44°57'~45°46'N),总面积 487,900hm<sup>2</sup>,人口(2000 年)为 425,254 人,是一个以农业为主的县级市。大安市属于中温带大陆性季风气候,年平均降水量为 413mm,6~8 月份降水量占全年 76.55%,年蒸发量高达 1466.3mm,干旱指数为 3.65。全年总辐射量 5326MJ/m<sup>2</sup>,年平均气温 4.6℃。气候具有光热充足,雨热同季,降雨不足,分布不均等特点。海拔 120~160m,地势平缓,起伏较小。土壤类型比较复杂,以苏打盐碱土为主。区内没有地表径流,东北与黑龙江省以嫩江为界<sup>[1]</sup>。

2 建立大安的系系统动力学仿真模型

系统动力学简称 SD(System Dynamics),1956 年由美国麻省理工学院福瑞斯特(Jay. w. Forrester)教授创始<sup>[2]</sup>。它以反馈理论为基础,以数学计算机仿真技术为手段,研究复杂系统的行为<sup>[3]</sup>。本文采用专用系统动力学仿真软件(Professional DYNAMO Plus)建立了模型,其空间边界为大安市全区,时间边界为 2000~2020 年,内容边界为人口、资源、环境、经济及其相关部分。设定 3 个模型假设:①假定全市为空间的封闭系统,模型不考虑各种产品的外部交换与调节;②鉴于大安市的人口迁移难以定量化,2000 年迁入人口数(14672 人)和迁出人口数(18298 人)相差不大。考虑到当地的经济状况,人口迁出和迁入不会有较大的变化。本模型忽略了人口迁入和人口迁出的差异,仅考虑自然增长率对人口变化的影响;③在未来 20a 内实现全市土地资源的合理利用,并以此确定耕地、林地和牧草地的变化速率。

根据系统动力学原理,结合大量历史数据,在对系统主要变量的变化特征进行细致分析的基础上,设计系统动力学因果反馈流程分析图(图 1)。

3 子系统分析

大安市的生态环境系统包括 6 个子系统,即人口、土地资源、种植业、畜牧业、生态效益、社会经济子系统,社会经济子系统仅考虑农业经济子系统。

3.1 人口子系统

人既是生产者,又是消费者,所以人口是资源开发和利用的结合点<sup>[4]</sup>。本系统设置变量为人口总数、人口变化量、人口增长率等,通过调控人口增长率可以减轻对生态系统的压力,寻求适当的人口控制目标。人口系统的主要方程:

$$\text{人口数量 } L \quad \text{POP. K} = \text{POP. J} + \text{DT} \times (\text{POPRD. JL} - 0)$$

$$\text{人口增量 } R \quad \text{POPRD. KL} = \text{POP. K} \times \text{POPR. K}$$

$$A \quad \text{POPR. K} = \text{TABHL}(\text{F1, TIME. K, 2000, 2020, 1}) / 1000$$

式中,POP. K 为现在人口总数,POP. J 为过去人口总数,PDPRD 为人口变化量,POPR 为人口变化率,F1 为人口的自然增长率,DT 表示时间间隔,L、R、A 分别表示水平方程、速率方程和辅助方程。

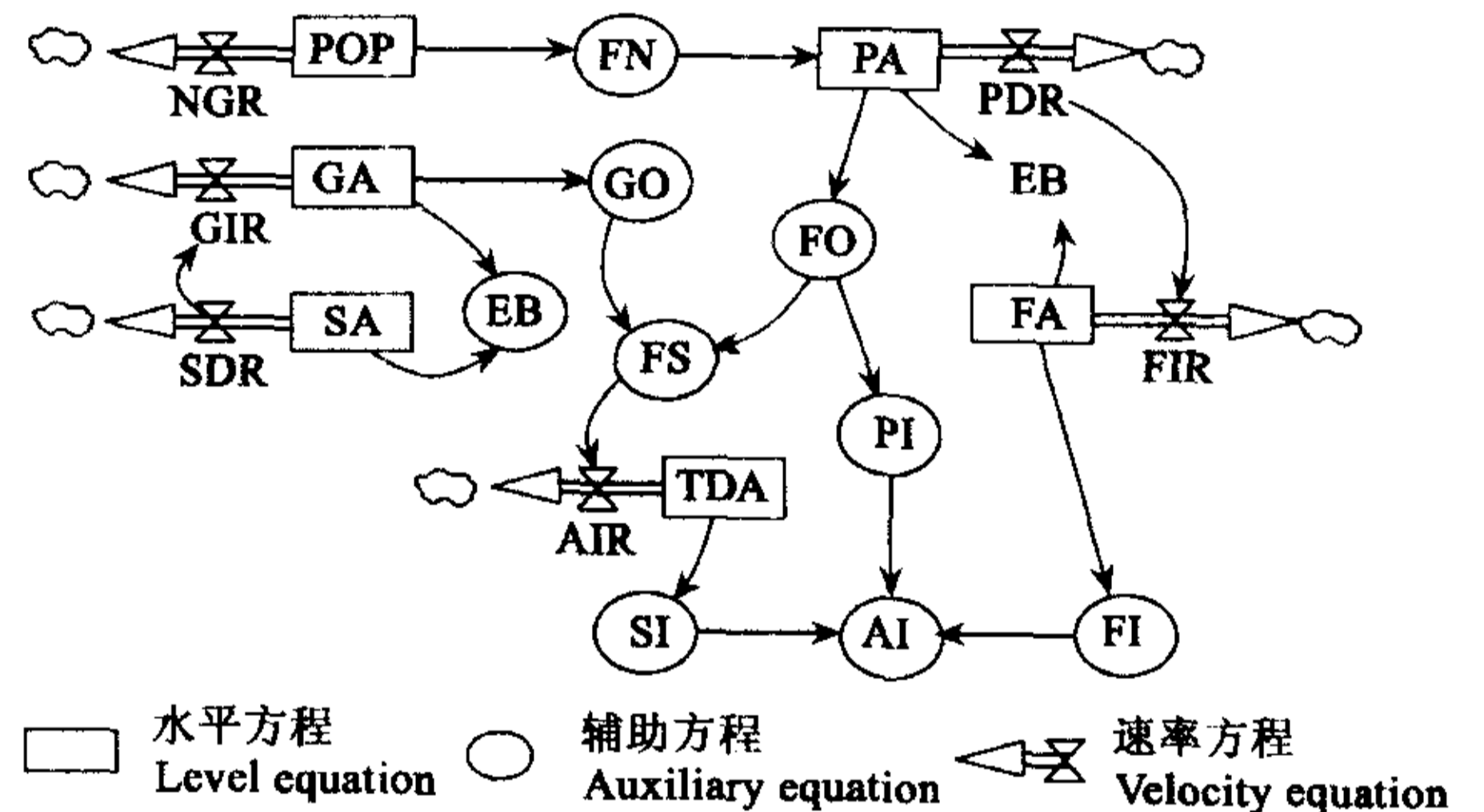


图 1 大安市生态规划系统模型结构流程图

Fig. 1 Flow chart of structure of ecology system of Da'an city  
 POP 总人口 Total population; FN 粮食需求 Food need; PA 耕地面积 Planting area; FO 粮食产量 Food output; FA 林地面积 Forest area; GA 草地面积 Grass area; SA 盐碱地面积 Saline land area; GO 产草量 Grass output; FS 饲料供给 Feed supply; TDA 牲畜量 Total domestic animal; PI 种植业收入 Planting income; SI 畜牧业收入 Stockbreeding income; FI 林业收入 Forest income; AI 农业收入 Agriculture income; EB 生态效益 Ecology benefit; NGR 自然增长率 Natural growth rate; GIR 草地增加率 Grass increasing rate; SDR 盐碱地减少率 Saline land decreasing rate; PDR 耕地减少率 Plantation decreasing rate; FIR 林地增加率 Forest increasing rate; AIR 牲畜增加率 Animal increasing rate

### 3.2 土地资源子系统

20 世纪 50 年代初,大安市水丰草茂,草原辽阔。几十年来,由于自然气候,人为因素的影响,草地面积不断缩小。到 2000 年总草地面积为 74,700hm<sup>2</sup>,占全市总面积的 15.31%。其中高覆盖草地,中覆盖草地,低覆盖草地分别占总草地面积的 0.11%,33.23%,65.66%。沙地面积为 64,800hm<sup>2</sup>。

根据 2000 年土地资源利用状况、当地实际资料情况和卫星遥感图像解译数据,对大安市的宜农、宜林、宜牧 3 种土地适宜类型进行分类,该地类面积 210,314hm<sup>2</sup>,占总土地面积的 42.86%。水域面积主要是泡沼,其水源来自于天然降水。由于降水是不确定因素,本文将水域面积定为常数。交通用地与居民用地随着人口增长而增加。土地利用现状见表 1。

土地子系统的主要方程:

$$A \text{ NUA.K} = \text{TSA} - \text{PA.K} - \text{FA.K} - \text{GA.K} - \text{WA} - \text{ML.K} - \text{TA}$$

式中,NUA.K 为未利用土地面积,TSA 为总土地面积,PA.K 为耕地面积,FA.K 为林地面积,GA.K 为草地面积,WA 为水域面积,ML.K 居民建筑用地,TA 为交通用地。

表 1 大安市土地利用类型  
Table 1 Land use types in Da'an

土地类型 Land types	面积 Area(hm <sup>2</sup> )	所占百分比 Percent (%)	土地类型 Land type	面积 Area(hm <sup>2</sup> )	所占百分比 Percent (%)
幅员面积(hm <sup>2</sup> )Total area	487,900	100.00	农村道路(km)Countyroad	492	
耕地(hm <sup>2</sup> )Plantation	84,314	17.28	水域(hm <sup>2</sup> )Water area	73,20	15.00
林地(hm <sup>2</sup> )Forest	51,30	10.51	未利用土地(hm <sup>2</sup> )Nonuse area	170,900	35.03
牧草地(hm <sup>2</sup> )Grassland	74,700	15.31	荒草地(hm <sup>2</sup> )Badland	11,300	2.32
交通用地(hm <sup>2</sup> )Traffic area	5,500	1.13	盐碱地(hm <sup>2</sup> )Saline land	138,50	28.39
铁路(km)Railway	134		沼泽地(hm <sup>2</sup> )Swamp	18,50	3.79
公路(km)Road	378				

\* 引自吉林省大安市国民经济统计资料(2000年)Quote from the country economy statistical data of Da'an city in Jilin Province (2000)

### 3.3 种植业子系统

(1)播种面积与农作物结构 在大安市经济系统中种植业的收入占有重要地位。种植业的发展需要通过调整农业内部结构,增加有机肥的投入,提高单产与粮食的商品率来实现。2000 年大安市的总播种面积为 84,314hm<sup>2</sup>,种植业内部结构(粮食作物:经济作物:其他作物)为 69.24:30.23:0.53,粮食作物内部结构(玉米:豆类:水稻:小麦)为 49.08:18.88:3.99:5.12。

粮食总产量、经济作物总产量为积累变量,它们的年变化量取决于播种面积及单产水平的影响:其中作物播种面积与耕地面积、复种指数有关;单产水平的变化要受到各类投入的影响,如增加有机肥、增加灌溉面积、秸秆还田、改良品种等,同时考虑到农牧互促的协同影响。

(2)土地生产潜力分析 土地生产潜力取决于作物生产力,其核心是光合作用的能力。计算土地生产潜力模型由单因素模型和多因素模型,根据大安市土地资源的特点,本文采用多因素衰减模型,考虑到光合有效辐射、温度、水分、土壤肥力因素对作物生产潜力的影响,对模型中函数关系和参数选择进行了研究,得出该区土地资源潜力模型:

$$Y = f(t) \times f\left[\frac{P}{E_0}\right] \times f(s) \times f(Q_e)$$

式中, $f(t)$ 为温度影响函数; $f(s)$ 为土壤肥力影响函数; $f(P/E_0)$ 为水分影响函数; $f(Q_e)$ 为光合有效辐射影响函数; $Y$ 为作物生产潜力。

种植业子系统主要方程:

$$A \text{ FE.K} = \text{CFPE.K} + \text{EFPE.K}$$

式中,FE.K 为种植业收入,CFPE.K 为粮食收入,EFPE.K 为经济作物收入。

### 3.4 畜牧业子系统

2000 年大安市农村经济收益分配情况中,牧业收入占农业收入的 25.65%,可见牧业收入是大安市的主要收入之一。但土地盐碱化、沙化已经严重制约着大安畜牧业的发展。近 5a 来,通过生物围栏、草原治涝工程等,改良草场 35.3 万 hm<sup>2</sup>,人工种草面积已达 0.79 万 hm<sup>2</sup>,使草原退化趋势有所减缓。因此

表 2 玉米、水稻、大豆气候生产潜力表

Table 2 Potential yields of corn, ripe and soy(kg/hm<sup>2</sup>)

作物名称 Crops type	光合生产潜力 Photosynthetic potential production	光温生产潜力 Light-temperature potential production	气候生产潜力 Climate potential production
玉米 Corn	29010	26955	7710
水稻 Ripe	25542	21246	6948
大豆 Soy	16893	19546	4491

大安市畜牧业生产潜力仍待开发,据 TM 影像解译,大安市高覆盖和中覆盖草地占总牧草地面积的 33.34%,低覆盖草地所占比例较大。而每年草地退化情况也较为严重,产草量低,超载放牧,管理不善等因素的存在使大安市畜牧业发展明显受阻。2000 年畜牧业猪、牛、羊出栏率分别为 49.6%、10.52%、54.91%。

畜牧业子系统的主要方程:

$$L \quad GA.K = GA.J + DT(GAI.JK - 0)$$

$$R \quad GAI.KL = TABHL(GAIQ, TIME.K, 2000, 2020, 1)$$

式中,GA.K 为草地面积,GAI.JK 为草地增量,GAIQ 为草地年递增量。

### 3.5 生态效益子系统

生态环境是人类生存和发展的基本条件,随着经济不断向前发展,人和资源的供需矛盾越来越突出,可持续发展的呼声也愈来愈高。利用生态系统的自我调节能力和生态系统之间的补偿作用,提高物种的再生能力,维持和改善人类赖以生存、生活和生产的自然环境及其生态系统的稳定性,使人们从中得到环境整体性的效益,即称为生态效益<sup>[5]</sup>。经济-生态渐渐成为此消彼长的发展趋势。从长远利益的角度出发,应该注重生态效益。治理盐碱化、沙化是涉及林、草、水域诸项因素的综合性工程,需要同时并进,交叉进行。本文中的生态效益主要包括林业、草业、种植业的生态效益、形成盐碱地损失的效益、覆盖率和盐碱地所占比重。植物有吸收二氧化碳、释放氧气、涵养水源、改良土壤(提供 N、P、K 元素)等作用,并将这些作用折合成经济价值,盐碱地损失也可折合成经济损失。

生态效益子系统主要方程:

$$A \quad GFSEE.K = PLANEE.K + GAEE.K + FAEE.K - SAALE.K$$

式中,GFSEE.K 为生态效益,PLANEE.K 为种植业生态效益,GAEE.K 为草地生态效益,FAEE.K 为森林生态效益,SAALE.K 为盐碱地损失生态效益。

### 3.6 社会经济子系统

据统计,在 2001 年大安市总收入中农业收入、牧业收入、林业收入分别占 53.38%、13.69% 和 0.35%,比 1995 年同期增长了 7.97%、10.94% 和 75%。种植业收入占农业收入的 90.32%,比 1995 年同期降低 3.72%。

经济子系统主要方程:

$$A \quad APE = PE.K + FE.K + FORE$$

式中,APE 为农业总收入,PE.K 为种植业收入,FE.K 为畜牧业收入,FORE 为林业收入。

## 4 模拟仿真结果运行与分析

通过对反馈关系图和各个子系统进行各变量间逻辑关系与系统结构分析,建立了系统动力学方程,显示其定量关系,并调试运行<sup>[6]</sup>。主要调控参量有耕地、林地、草地变化率和盐碱地变化率等,得出 2000~2020 年仿真结果共分 4 个方案,见表 3。

表 3 大安市生态环境规划仿真模拟结果

Table 3 Simulation results of environment planning in Da'an

指标 Index	基础方案 Base case					方案 1 Case 1			
	2000	2005	2010	2015	2020	2005	2010	2015	2020
农业收入(亿元) <sup>①</sup>	4.71	4.79	4.83	4.81	4.80	6.08	6.88	7.53	8.08
种植业收入(亿元) <sup>②</sup>	3.17	3.36	3.52	3.62	3.72	4.15	4.58	4.88	5.10
畜牧业收入(亿元) <sup>③</sup>	1.44	1.33	1.21	1.09	0.99	1.83	2.21	2.55	2.89
生态效益(亿元) <sup>④</sup>	20.6	19.4	18.3	17.3	16.5	23.6	27.1	31.3	36.4
人均收入(元) <sup>⑤</sup>	1107	1108	1109	1079	1059	1408	1567	1687	1782
植被覆盖率(% ) <sup>⑥</sup>	25.83	24.35	23.02	21.82	20.74	29.78	34.41	39.70	45.88
指标 Index	方案 2 Case 2				方案 3 Case 3				
	2005	2010	2015	2020	2005	2010	2015	2020	
农业收入(亿元)	6.22	9.18	12.6	16.0	6.45	9.01	11.9	13.30	
种植业收入(亿元)	4.79	7.81	11.4	14.9	4.62	6.91	9.63	1.08	
畜牧业收入(亿元)	1.33	1.21	1.09	0.99	1.74	2.00	2.21	2.40	
生态效益(亿元)	19.4	18.5	17.9	17.4	28.0	32.4	37.5	44.4	
人均收入(元)	1458	2090	2823	3528	1496	2070	2732	3035	
植被覆盖率(% )	24.35	23.2	21.82	20.74	39.08	45.36	51.85	61.08	

①Agriculture income(10<sup>8</sup>yuan); ②Planting income(10<sup>8</sup>yuan); ③Stockbreeding income(10<sup>8</sup>yuan); ④Ecology benefit(10<sup>8</sup>yuan); ⑤Income of per people(yuan); ⑥Vegetation coverage(% )

(1)基础方案——维持现状方案 按目前自然演化的方向发展,林地、耕地按人口自然增长率(3.2‰)增长;盐碱地按吉林西部历史发展的速率(2‰)增长;草地退化以西部平均退化速度(2‰)减少;作物产量以 2000 年平均产量为标准,牲畜增长率取

历史拟合值,水资源没有考虑节水技术和农田回归水的利用。

(2)方案1——重畜牧型方案 进行退耕还林、还草建设。按吉林西部中期退耕还林、还草计划和大安市中期发展规划,耕地按0.8%速度减少,草地和林地分别以3.8%和2%速度增加,盐碱地按4%速度减少。扩大畜牧养殖业的发展,提高饲料的供给量,降低粮食商品率。同时,增加各类畜禽饲养量,为种植业提供更充足的有机肥,促进种植业发展。

(3)方案2——重农型方案 重视种植业发展,合理利用水资源,通过增加肥料、秸秆还田、改良品种等措施来提高作物的单产,调整种植业外部结构、内部结构,减少玉米播种面积、增加豆类和经济作物的播种面积,提高粮食商品率。耕地面积以每年1.3%速度递增,林地以3.2%减少,草地、盐碱地退化均为速度2%。

(4)方案3——农牧互促、生态农业方案 严格控制人为因素引起的新的生态环境破坏,采取生物措施、工程措施和农艺措施相结合的办法治理土壤盐碱化。大力开展植树造林、改良草地、防风固沙和防止水土流失。耕地面积以1.6%增长,草地和林地面积分别以2%和10%递增,盐碱地面积以4.8%减少。通过调控粮食商品率、作物播种面积比例、秸秆还田率、经济林和控制人口实现即增加种植业收入又增加畜牧业和林业收入,建立起适应经济和社会可持续发展的良性循环生态系统。

对4种方案进行仿真运行后,将主要的状态变量数据和目标变量数据绘制成各种动态仿真模拟曲线图,构成一系列图系,如耕地、林地、草地、盐碱地动态模拟曲线图,农业种植业、畜牧业收入、人均收入动态模拟图和生态效益、植被覆盖率模拟曲线图(图2~图5)。

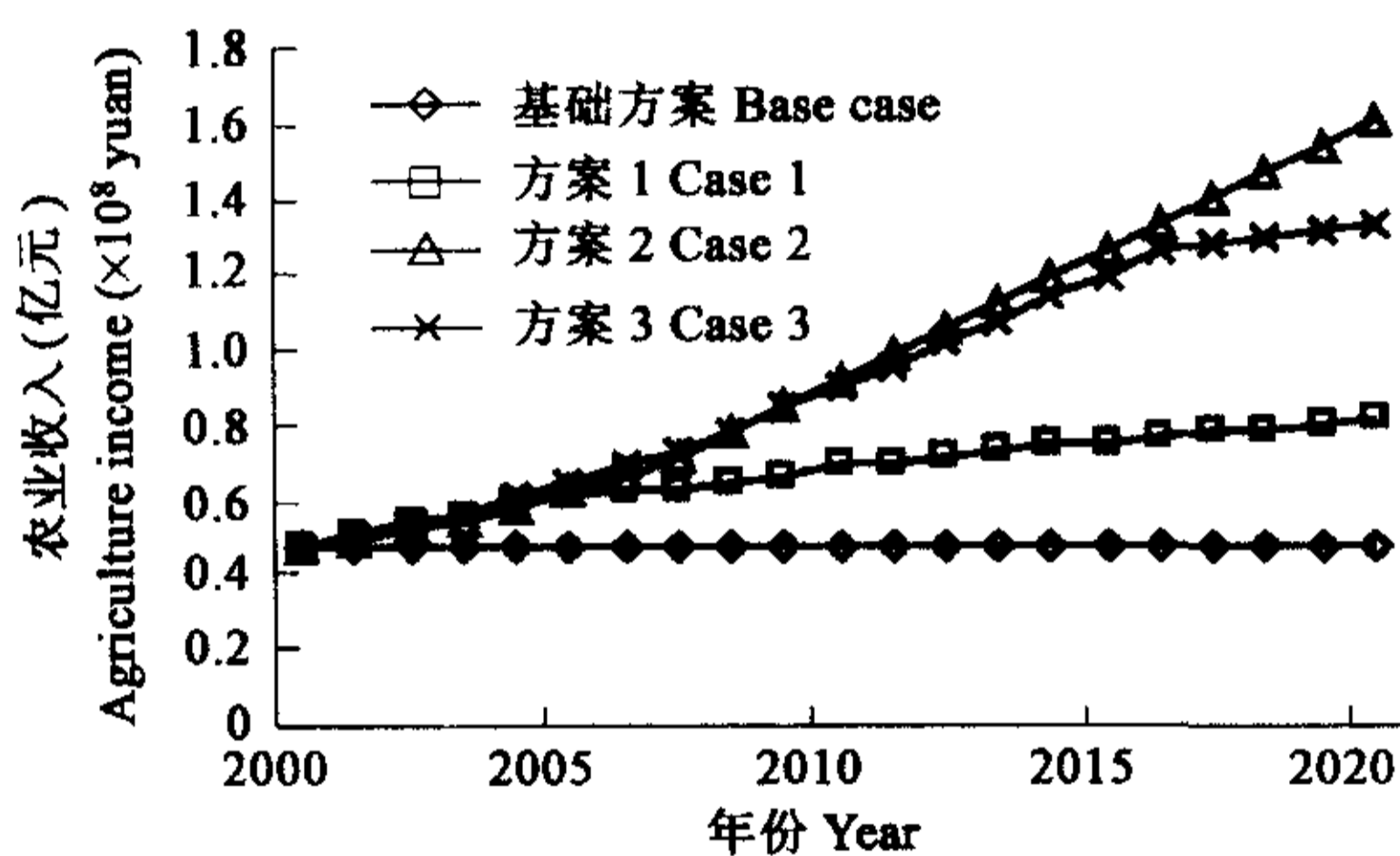


图2 农业收入预测曲线

Fig. 2 Curves of forecast of agricultural earning

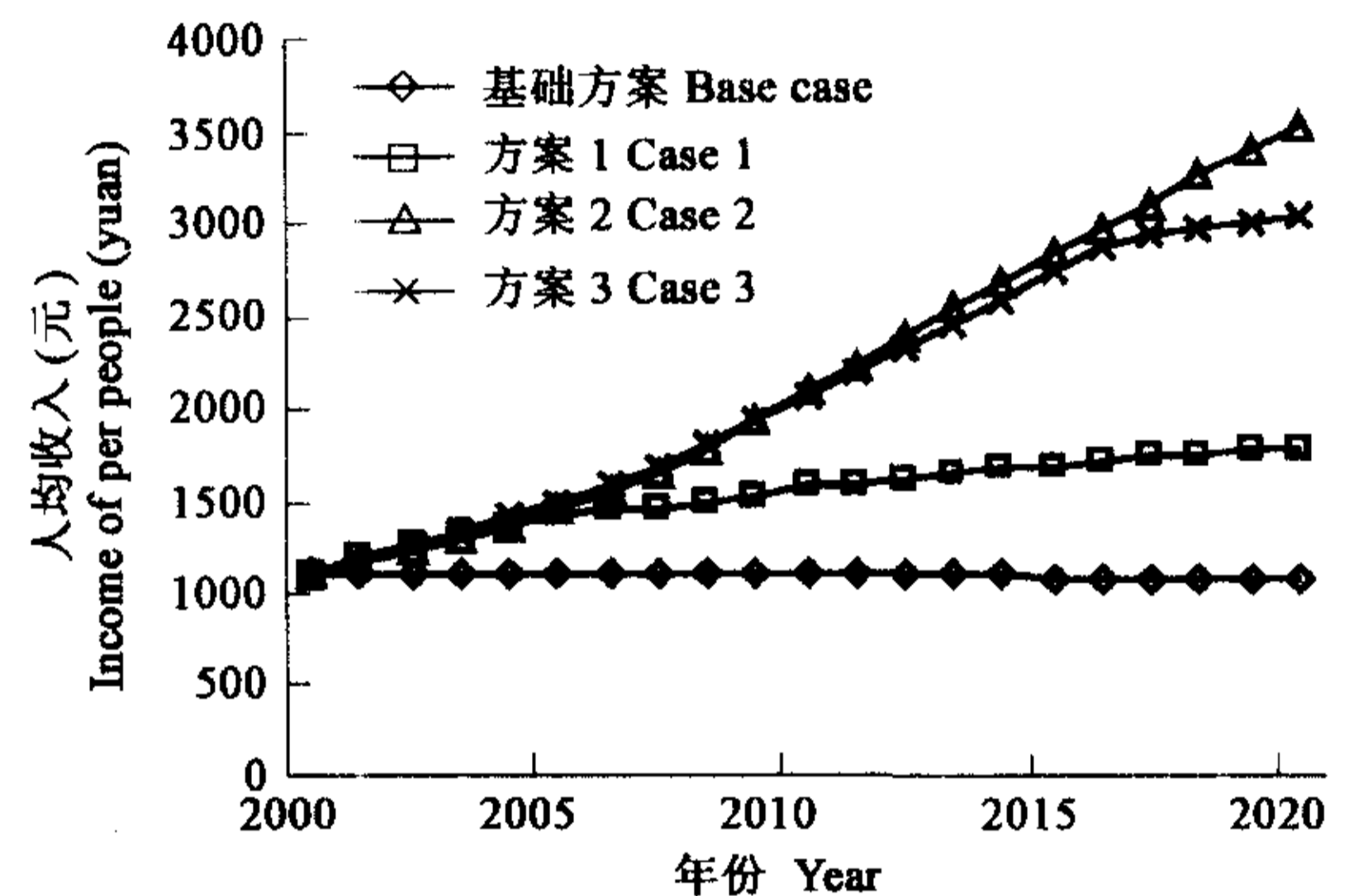


图3 人均收入预测曲线

Fig. 3 Curves of income forecast of per people

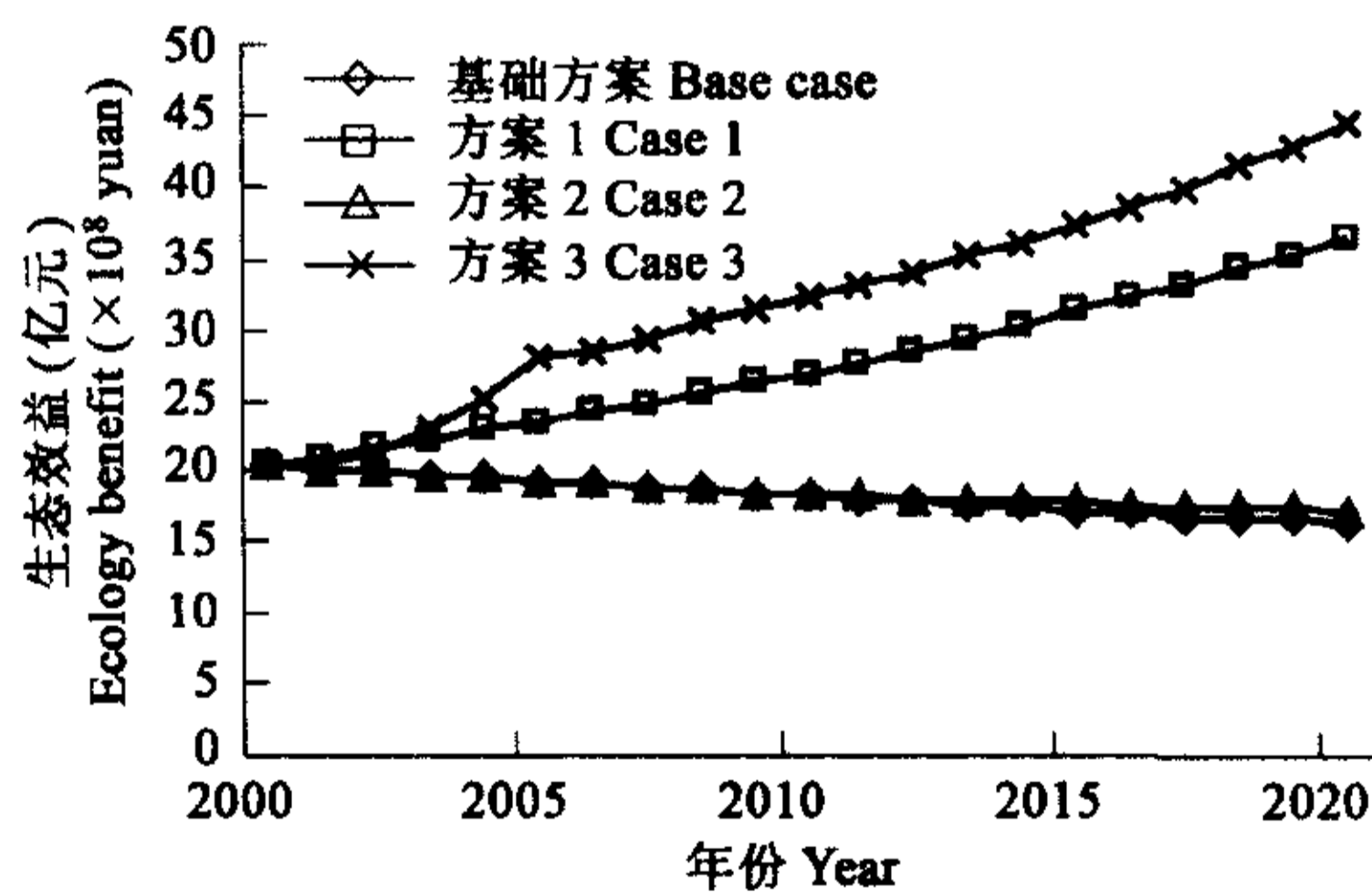


图4 生态效益预测曲线

Fig. 4 Curves of forecast of ecological benefit

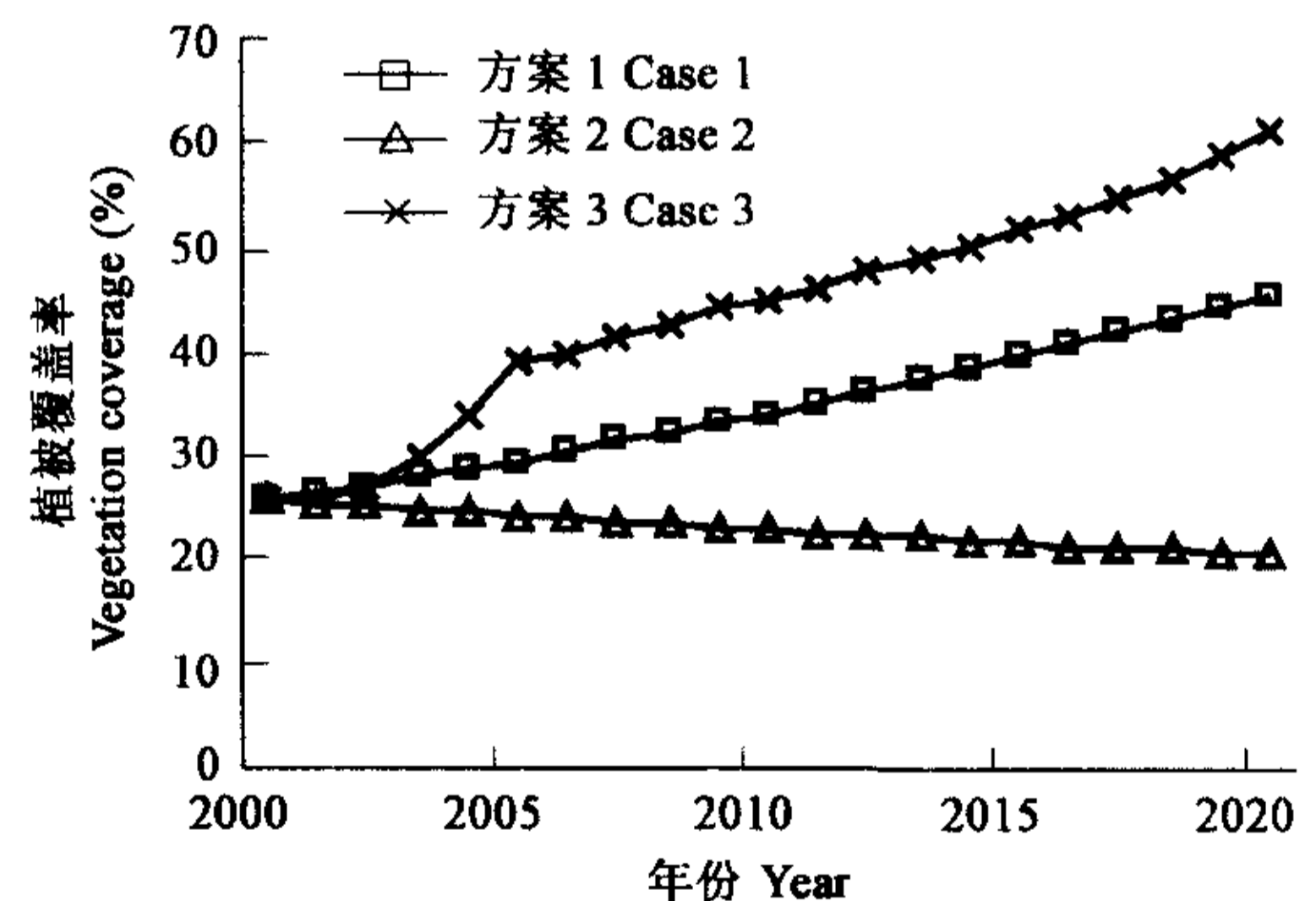


图5 植被覆盖率预测曲线

Fig. 5 Curves of cove rate of vegetation

## 5 结论

(1)应用系统动力学方法研究生态环境规划与其它方法相比,较容易得到不同的生态规划方案。计算结果显示,该方法能够较真实地模拟资源、环境与社会经济协调发展状况,具有一定参考价值。

(2)系统动力学模型能够定量描述人口、资源、环境与经济之间相互关系,帮助决策者了解和判断生态环境系统的动态行为,而不仅仅是某些参数的预测。对大安市的农业生态环境系统进行仿真模拟和多方案优选,认为方案3最为可取。通过不同决策在模型上进行模拟,清晰地反映人口、经济与生态环境相互关系,因此,用系统动力学模型研究生态环境规划具有较强可操作性。

(3)即使按人口自然增长率3.2%计算,2000~2020年,大安市人口从42.5万增加到45.3万,可见大安市产生环境问题不

是由于人口过多所造成的,而掠夺性开发和气候干旱是导致生态环境恶化的主要因素。2000年耕地面积比1995年同期降低8.20%,土地退化情况严重,引起土地退化主要因素有盐碱化、沙化问题突出。草地呈逐年退化趋势,必须开展草原治理工程,治理草原盐碱化,草原改良和建设人工草场。因此治理土地是保护大安市生态环境的重中之重,改变落后的粗放式经营方式,实行精确农业,提高植被覆盖率。

(4)本文应用系统动力学模型对大安市生态环境规划进行了仿真优化研究,获得了较好的结果。

#### References:

- [1] Pang Z G, Lv X G, Li Q S. Study on saline-alkalized land status appraising and developing countermeasures supported by 3S techniques. *Territory and Natural Resource Study*, 2000, 4:42~45.
- [2] Wang Q F. *System dynamics*. Beijing: Qinghua University Press, 1995.
- [3] Shang J W, Zhang Y, Liu R Z. System dynamics method study of strategic environmental assessment. *Journal of Northeast Normal University*, 2001, 33(1):84~89.
- [4] Li Y H, Zhao Y, Hu Y M. Land capacity in agriculture grazing ecotone of east Keerqin lands-the case of Keerqinzuoyihouqi. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22(3):23~28.
- [5] Li D. Mathematical model on Greenland ecological benefit. *Forest Economy*, 1995, 5: 67~69.
- [6] Yang J Q, Luo X X. Research of system dynamics model for sustainable utilization of water resource. *Urban Environment and Urban Ecology*, 1999, 12(4):26~29.

#### 参考文献:

- [1] 庞治国,吕宪国,李取生. 3S技术支持下的盐碱化土地现状评价与发展对策研究——以吉林省西部大安市为例. *国土与自然资源研究*, 2000,4:42~45.
- [2] 王其藩. 高级系统动力学. 北京: 清华大学出版社,1995.
- [3] 尚金武,张妍,刘仁志. 战略环境评价的系统动力学方法研究. *东北师范大学学报(自然科学版)*,2001,33(1):84~89.
- [4] 李月辉,赵弈,胡远满,等. 科尔沁沙地东部农牧交错带土地承载力研究. *生态学杂志*,2003,22(3):23~28.
- [5] 李德. 绿地生态效应定量分析的模型. *林业经济*,1995,5:67~69.
- [6] 杨建强,罗先香. 水资源可持续利用的系统动力学仿真研究. *城市环境与城市生态*,1999,12(4):26~29.