

# 宁安县应用系统动力学模型 制定水土保持规划

陆洪斌 孙英杰 李成杰 李立新

(黑龙江省水土保持研究所牡丹江实验站·牡丹江市·157000)

张汉雄

(中科院西北水土保持研究所·陕西杨陵·712100)

## 提 要

该文应用系统动力学模型制定了黑龙江省宁安县水土保持规划的发展战略与实施方法。该模型由种植业、林业、牧业、渔业、人口和水土保持六个子系统组成,包括279个活性方程和229个参数。并用生态经济学方法,对3种发展战略的仿真结果进行多目标综合评审,为该县的水土保持规划和生态农业发展战略提供了科学依据。

关键词: 系统动力学 动态仿真 水土保持规划

## Application of System Dynamic Model in Soil and Water Conservation Program of Ningan County

*Lu Hongbin Sun Yingjie Li Chengjie Li Lixin*

*(Mudanjiang Experimental Station under Heilongjiang Province Institute of Soil  
and Water Conservation, Mudanjiang Heilongjiang 157000)*

*Zhang Hanxiong*

*(Northwestern Institute of Soil and Water Conservation, Academia Sinica and Ministry of Water Resources)*

## Abstract

The development strategies and application methods of soil and water conservation program in Ningan county of Heilongjiang province were made based on the system dynamic model. The model consists of such as six sub-systems as that of crop planting, forestry, animal husbandry, fishing, population and soil and water conservation, which include 279 active equations and 229 parameters. The multi-objective evaluation on the simulating results of three development strategies were carried out applying eco-economical methods, in order to provide scientific basis for the development strategies of ecological agriculture and the planning of soil and water conservation in the county.

**Key words** system dynamics dynamic simulation soil and water conservation program

## 一、自然资源概况

宁安县位于黑龙江省东南部,东自老爷岭,西止张广才岭,整个地势西南高,东北低,牡丹江纵贯南北,海拔高程在 242~1 559m,全县分为低山丘陵、丘陵漫岗、河谷盆地三个不同地貌类型。气候属寒温带大陆性季风气候,平均风速 3m/s,最大风速 20m/s,年平均气温 3.5℃,无霜期约 133 天,年降雨量在 500~600mm,主要农作物有小麦、玉米、水稻和大豆等。

全县总面积 1 178.4 万亩,其中耕地面积 166.5 万亩,占总面积的 14.1%,林地面积 620.0 万亩,占 52.7%,其它用地 389.3 万亩,占 33.2%,土地利用主要是林地和耕地。总面积中,属于县属的耕地为 139.2 万亩,林地 27.5 万亩。1990 年全县总人口 42.1 万人,农业人口 28.3 万人,农村劳动力 11.5 万人。县属行政单位有 11 个乡镇,312 个村和东京城林业局、宁安县农场及牡丹江军马场。

该县的自然条件十分优越,气候温和、雨量充沛,农林牧渔业发展均有很大生产潜力。由于该县雨量多,风力较大,土层较薄,丘陵漫岗的水蚀和风蚀都较严重。据全县土地利用现状调查统计,水土流失总面积达 139.58 万亩,其中耕地流失面积约 86.97 万亩。水土流失导致耕层土壤愈来愈薄,土地退化,生态环境恶化,农林牧业生产比例失调,使自然资源优势不能充分发挥和利用。

## 二、水土保持规划动态仿真模型

(一)研究目的与意义 应用系统动力学和生态经济学的理论与方法,对宁安县水土保持与农林牧产业的协调发展进行系统的定量分析,通过建立动态仿真模型拟制定出符合该县实际情况的水土保持及农林牧业发展规划,并对规划的经济效益、生态效益、社会效益和实施可行性进行综合评价。通过模型的系统分析,全面了解水土保持与自然资源的开发利用、环境保护及农林牧业协调发展的相互关系,并通过采取不同水土保持策略的计算机仿真分析,预测水土保持效益及各产业的发展趋势,寻求合理的土地利用结构和水土保持综合治理措施的优化方案,为制定宁安县的农业政策和发展战略提供科学依据。

(二)建模原理和方法 由于水土保持是一个在人为活动和社会经济条件影响下,合理利用土地资源,促进农林牧渔各业综合发展的大农业生态经济系统,制约因素多,系统结构复杂,追求多目标(生态、经济和社会效益)统筹兼顾,采用常规规划方法定量分析困难。加之,水土保持规划系统复杂,具有高阶次、非线性的特性,难于求其最佳解,而其最佳解往往是难于实现的假设解,应用性差。

系统动力学(System Dynamic,简称 SD)理论是研究社会经济或生态经济系统动态行为的计算机仿真方法,是研究政策和策略的有效工具,适用于模拟复杂系统的动态变化趋势和发展预测。因此,我们采用系统动力学方法进行宁安县水土保持规划。SD 模型的一般性建模与仿真方法和步骤是:

1. 明确研究对象,划清系统的边界。
2. 通过该县实地考察,分析水土保持与发展农林牧业的关系,调查分析存在的问题和解决问题的途径。
3. 确定水土保持规划目标体系。
4. 绘制水土保持系统的因果关系图,并转换为系统流图。
5. 根据流图和调查的资料,用 DYNAMO 语言写出 SD 模型的构造方程。
6. 计算机仿真实验,分瞻前顾后两个阶段,瞻前即模拟历史时期的系统动态变化,以检验模型的有效性;顾后即预测系统的未来发展,可进行多方案政策模拟试验。

7. 从多种仿真结果中,初选几种主要方案作为备选方案,应用多目标模糊综合评审方法,选其优者作为可行方案。

(三)SD 模型结构 根据该县水土保持与农业生态经济系统的实际状况,我们将系统分为种植业、林业、牧业、渔业、人口和水土保持 6 个子系统,它们之间相互制约与促进,通过总体协调,保持系统的稳态。各子系统的相互制约关系如图 1 所示。

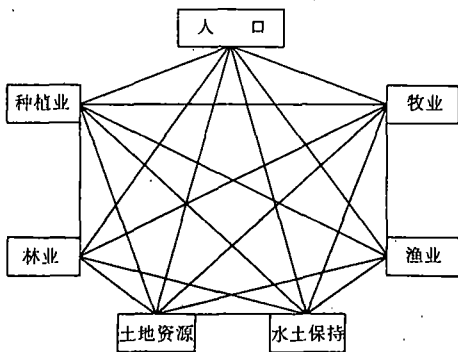


图 1 各子系统相互制约关系框图

3. 畜牧业和渔业的发展使饲料需求量增加,其供需平衡是发展上述两业的基础,同时牧渔业的发展会给种植业的发展提供更多的有机肥,从而促进种植业的发展。

4. 水土保持子系统直接影响土地资源的合理利用和开发,它对种植业、林业、牧业的发展有着极其重要的促进作用。

5. 人们生存需要大量农、畜产品和林产品,这种需求会进一步促进各业的发展。

SD 模型中主要子系统——种植业、林业和水土保持子系统的变量相互关系流图,如图 2、图 3 和图 4 所示。

(四)构造方程 SD 模型由系统流图和构造方程两部分组成,二者相辅相成融为一体。状态方程是 SD 模型的核心,它表示系统行为的状态变化,其它方程则由状态方程导出。状态方程的一般表达式为:

$$\frac{dx}{dt} = f(R_i, A_i, X_i, P_i) = R$$

其差分形式为:

$$x(t + \Delta t) = x(t) + f(R_i, A_i, X_i, P_i) \cdot \Delta t$$

该模型包含 279 个活性方程(模型方程篇幅较长,本文略),其中状态方程 32 个,流率方程 47 个,辅助方程 126 个,表函数 13 个。系统的阶数由状态方程的个数确定,因此该模型是一个高阶次的复杂大系统。模型中还包含 229 个参数,参数的来源由县统计资料和分析计算得到。

该模型在长城 0520C—H 计算机上应用 PD(Professional DYNAMO)Plus 软件运行。初始时间为 1980 年,仿真终止时间为 2000 年,步长为 1 年。从 1980—1988 年的运行结果中选择人口、耕地面积、粮食产量和农林牧渔各业产值等主要指标与该县的实际历史资料进行比较,误差 $\leq 2\%$ 的概率为 50%,误差 $\leq 5\%$ 的概率为 83.5%, $\leq 10\%$ 的概率为 93.5%,这说明模型有足够的有效性。

土地资源是种植业、畜牧业、林业和渔业发展的最重要的限制因素;人口是一种劳动力资源,同时又是物质产品的消费者;水土保持与种植业、林业、畜牧业、渔业各业之间和各业内部各变量之间的发展有着极其重要的相互促进和相互制约关系,这种关系是本模型研究的重点。将上述内部和外部关系具体化,其制约关系表现在以下几个方面。

1. 在总土地面积约束下,各类用地面积有其合理的结构。

2. 在一定的用地结构情况下,通过提高集约经营水平和物质投入水平,则可以提高各种作物产量,单位林地上的活立木蓄积量、单位养渔水面的产量等。

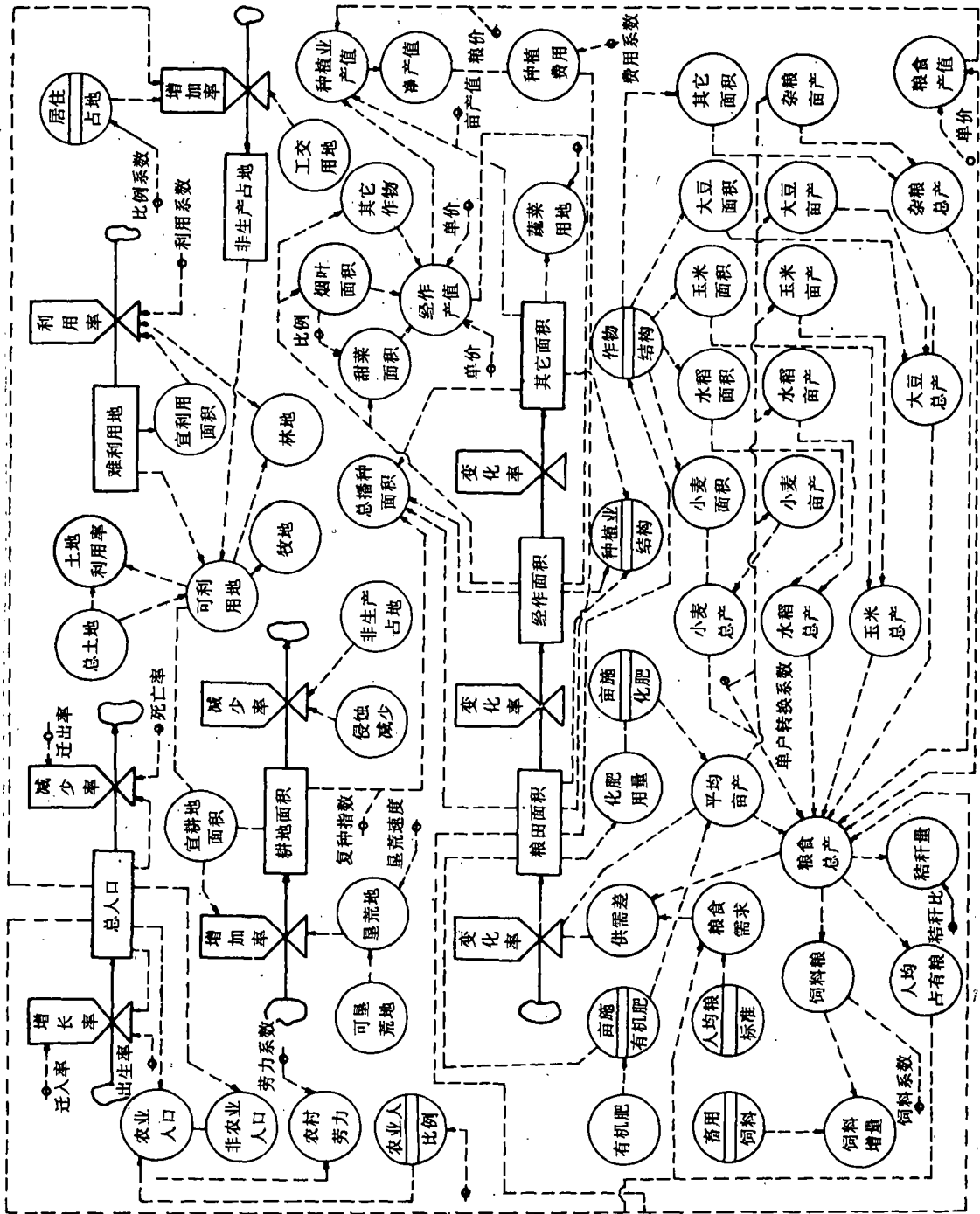


图2 种植业子系统流程图

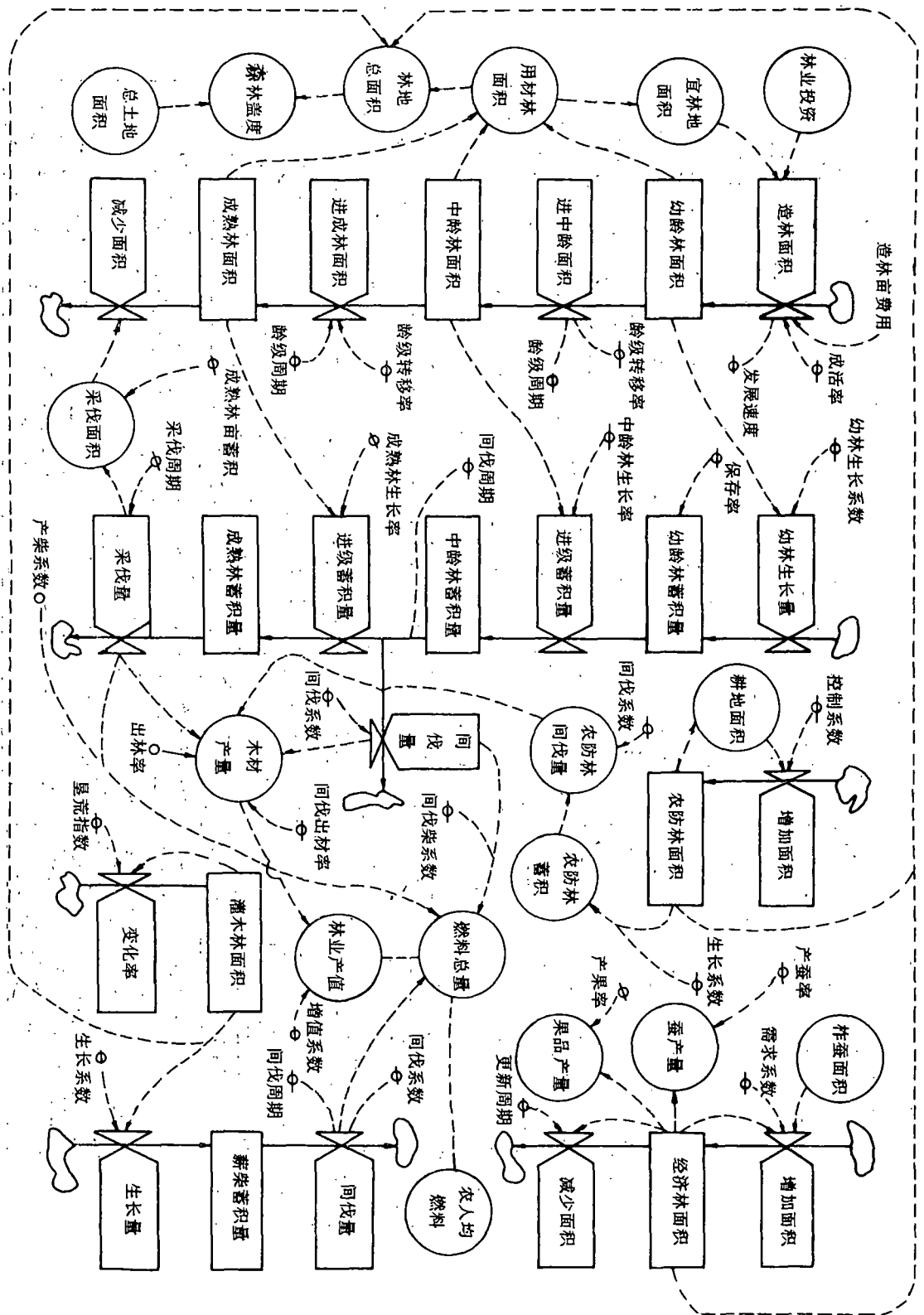


图 3 林业子系统流程图



### 三、仿真分析

(一)三种方案仿真结果论述 根据建立宁安县水土保持规划动态仿真模型的模拟,我们重点分析了与水土保持有关的各子系统,采用不同发展战略的可能发展趋势及其各子系统之间的相互影响和相互作用关系。在发展战略分析中,我们进行了多次运行方案的模拟,从中选择3种有代表性方案的主要指标(表1)加以论述:

表1 宁安县水土保持规划不同发展方案的动态仿真结果

仿真结果的 主要指标	单 位	1988年	1990年			1994年			2000年			
		现 状	仿 真 方 案									
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	
总人口	万人	42.73	42.90	42.90	42.90	45.31	45.31	45.31	48.37	48.37	48.37	
耕地面积	万亩	166.50	163.77	163.77	163.77	162.44	162.44	162.44	160.54	160.58	160.51	
林地面积	万亩	158.43	162.25	159.69	163.97	170.97	162.66	176.64	184.00	165.93	179.24	
粮田面积	万亩	112.64	113.06	114.29	112.11	119.21	112.22	116.90	132.76	136.97	126.43	
化肥投入	t	1856.0	1979.0	1996.0	1966.0	2294.0	2340.0	2258.0	2866.0	2939.0	2756.0	
有机肥投入	×10 <sup>4</sup> t	100.00	104.20	121.80	109.31	114.33	133.81	120.03	130.91	154.82	137.71	
粮食总产量	×10 <sup>4</sup> t	20.95	21.00	21.23	20.83	24.96	25.59	24.48	30.32	31.28	28.87	
农业总产值	万元	17971	21240	21570	21130	25530	26130	25390	32590	33590	32290	
大牲畜存栏	万头	6.88	5.98	7.13	6.37	6.68	8.09	7.23	8.07	9.83	8.73	
猪存栏	万头	6.91	7.54	10.99	7.92	8.01	11.64	8.40	8.76	13.10	9.19	
羊存栏	万只	4.23	5.07	2.98	3.90	5.51	2.88	3.64	6.24	4.02	2.96	
治理面积	万亩	45.81	51.20	46.89	55.53	65.65	57.05	74.42	89.32	73.54	105.65	
水保总投资	万元	72.40	138.75	126.25	144.37	716.63	652.67	767.25	1676.79	1511.00	1788.10	
国家投资	万元	15.37	34.69	31.56	36.84	179.89	163.16	191.82	418.96	377.63	449.37	
人均纯收入	万元	696.0	753.1	768.3	752.3	877.0	898.0	873.4	1086.0	1112.2	1070.5	
农防林面积	万亩	0.62	0.70	0.70	0.70	3.55	3.55	3.55	7.89	7.89	7.18	
水保林面积	万亩	0.74	1.74	1.40	1.97	9.19	6.00	10.49	22.69	18.32	25.48	
修梯田面积	万亩	1.14	1.41	1.41	1.41	4.23	4.23	4.23	14.10	14.12	14.11	
林带面积	万亩	0.35	0.50	0.50	0.50	2.60	2.60	2.60	6.05	6.05	6.05	
各业用地比例 **	农	%	63.20	58.70	57.90	58.40	56.60	56.62	56.20	51.0	50.80	50.20
	林	%	24.40	27.00	26.20	27.00	30.01	29.30	30.22	36.61	35.62	37.20
	牧	%	6.11	9.72	11.10	9.91	8.62	9.81	8.81	7.41	8.62	7.51
土地生产率	元/亩	55.31	65.38	66.38	65.03	78.57	80.42	78.14	100.30	103.38	99.38	

\* 农业总产值及各业产值均按1980年不变价格计算。

\*\* 指农林牧业用地占总土地的比例,因非生产地比例未列,故其总和不等于1。

第一方案,稳定粮食总产量,加快林业发展和水土保持的治理。到2000年,水土保持治理面积达89.32万亩。其中营造水土保持林22.68万亩,修梯田14.1万亩,农防林7.89万亩,林带6.05万亩等。平均每年治理面积为8.93万亩;水土保持总投资为1676.70万元,其中国家投资418.96万元,每年平均投资41.9万元。耕地面积为160.54万亩,化肥和有机肥的投入量分别为2865.9t和130.9万t,是现状的1.5倍和1.3倍。粮食平均亩产达229.62kg,总产量达30.32万t,分别比现状增加81.0%和69.1%。由于受到土地资源的限制和林地面积的增加,可放牧地减少与饲料供应不足影响了畜牧业的发展,规划年末大牲畜、猪和羊的存栏分别为8.07万头、8.75万头和

6.24 万只。农业总产值为 32590 万元,人均产值为 1 086.1 元。

第二方案:在确保粮食稳步增长的基础上,林牧业协调发展与水土保持低投入。到 2000 年,粮食总产量和农业总产值分别是现状的 1.5 倍和 1.9 倍,耕地面积为 160.58 万亩,化肥和有机肥的施用量分别是现状的 1.6 倍和 1.59 倍,畜牧业的发展趋向合理,大牲畜和猪的存栏分别是现状的 1.4 倍和 1.9 倍,羊的存栏基本上保持现状。粮食总产量达 31.28 万 t,农业总产值为 33590 万元,人均产值 1 112 元。

水土保持治理面积为 73.54 万亩,其中营造水土保持林 18.32 万亩,农防林 7.89 万亩,林带 6.05 万亩,修梯田 14.1 万亩,总投资为 1 511 万元,其中国家投资 377.63 万元,每年投资 37.8 万元。

第三方案:林牧渔业缓慢发展,种植业低投入,水土保持高投入。到 2000 年,水土保持治理面积为 105.65 万亩,其中营造水土保持林 25.49 万亩,林带 6.05 万亩,农防林 7.18 万亩,修梯田 14.1 万亩,水土保持总投资 1 788.1 万元,其中国家投资 449.37 万元,每年国家投资 44.94 万元。粮食总产量和农业总产值低于规划目标,化肥和有机肥的投入分别为 2 756.3t 和 137.7 万 t。分别是现状的 1.48 倍和 1.37 倍。畜牧业发展规模是大牲畜 8.73 万头,猪 9.19 万头,分别是现状的 1.27 倍和 1.3 倍,羊存栏数比现状减少 14% 倍。粮食总产量和农业总产值分别为 28.87 万 t 和 32 290 万元,人均产值 1 067.6 元,经济效益低于前两个方案。

上述三个仿真方案分析表明:第一方案由于加快林业发展和水土保持治理,虽然粮食总产量(30 万 t)达到规划目标,但牧业发展不平衡,投资较大,按照该县的经济实力和对水土保持投资的可能性分析,该方案的投资、投工均超出了该县财力和物力的承受能力,因而是不可取的。第二方案由于农林牧协调发展,粮食产量和农业总产值均达到规划目标,水土保持效益比较显著,其投资也较符合该县的实际经济状况。第三方案由于林牧业发展缓慢,种植业(化肥与有机肥)的低投入,水土保持治理高投入,粮食总产量没有达到规划目标,不符合该县社会经济发展的实际需求。为了全面合理的综合评价上述 3 种发展方案的综合效益与实施可行性,可采用多目标综合评审,选择目标期 1994 年和 2000 年的仿真结果进行评审。

(二)多目标评审 水土保持规划是一个涉及农、林、牧、渔各产业协调发展与合理利用土地资源,满足社会需求的综合规划,追求多目标统筹兼顾,要求经济效益、社会效益、生态效益总体最优,具有实施可行性。因此需对动态仿真模型模拟的 3 种水土保持规划方案进行多目标综合评审,以从中优选出能促进该县农林牧业综合发展的水土保持规划。

多目标模糊综合评审是对不同的评审因子进行综合定量分析,设  $A_{ij}$  为第  $i$  个评审因子第  $j$  个评审指标的评价函数,则多目标评审的模糊集为:

总体效益  $A = A_1(\text{经济效益})、A_2(\text{社会效益})、A_3(\text{生态效益})、A_4(\text{实施可行性})$

各目标的评价函数集为:

$A_{1j} = \{A_{11}(\text{农业总产值})、A_{12}(\text{总收入})\}$ 。

$A_{2j} = \{A_{21}(\text{粮食总产量})、A_{22}(\text{木材蓄积量})、A_{23}(\text{畜产品量})\}$

$A_{3j} = \{A_{31}(\text{林草覆盖度})、A_{32}(\text{治理面积})、A_{33}(\text{土壤流失量})\}$

$A_{4j} = \{A_{41}(\text{水保投工})、A_{42}(\text{水保投资})\}$

1. 模糊评分法:采用模糊百分制计量,一般指标选各方案同一指标,最大者为 100 分,求其相对百分数;个别指标如:水土流失量,水土流失面积和水保投资等,选其最小者为 100 分,其余依次类推。

2. 功效系数法:对各评审因子,分别求其功效系数,其值大者方案最优,功效系数按下式计算:



$$d_j = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n A_{ij}} \quad j = 1, 2, \dots, n$$

式中:  $d$  为功效系数;  $n$  为评审因子数;  $\Pi$  为连乘符号。

3. 权系数法: 对于各评审目标, 按其重要性分别赋以权系数, 权系数的总和为 1。然后按下式分别计算各评价方案的总功效系数, 其值大者方案最优。

$$D = \sum_{i=1}^m \alpha_i d_i \quad i = 1, 2, \dots, m$$

式中:  $D$  为总体功效系数;  $m$  为评审目标数;  $\alpha_i$  为各评审目标的权系数。该规划经专家评审, 选定各种效益的权系数为  $\alpha_1=0.25$ ,  $\alpha_2=0.25$ ,  $\alpha_3=0.3$ ,  $\alpha_4=0.2$ 。

多目标评审结果(表 2)表明, 第二方案在两个目标期均为最优方案, 与上述分析一致, 可作为该县水土保持规划的最佳可行方案。

表 2 三种规划方案多目标模糊综合评审结果

目标期(年)	方案	A <sub>1</sub> ( $\alpha_1=0.25$ )			A <sub>2</sub> ( $\alpha_2=0.25$ )				A <sub>3</sub> ( $\alpha_3=0.30$ )				A <sub>4</sub> ( $\alpha_4=0.20$ )			D	优序
		A <sub>11</sub>	A <sub>12</sub>	d <sub>1</sub>	A <sub>21</sub>	A <sub>22</sub>	A <sub>23</sub>	d <sub>2</sub>	A <sub>31</sub>	A <sub>32</sub>	A <sub>33</sub>	d <sub>3</sub>	A <sub>41</sub>	A <sub>42</sub>	d <sub>4</sub>		
1994	第一	97.7	97.9	97.8	97.2	99.9	79.2	91.6	95.7	96.2	86.8	92.8	89.2	89.1	89.1	93.0	3
	第二	100	100	100	100	99.8	100	99.9	89.5	90.9	73.9	84.4	100	100	100	95.3	1
	第三	97.0	97.0	97.1	95.0	100	82.1	92.0	100	100	100	100	80.9	80.8	80.8	93.4	2
2000	第一	97.6	97.9	97.7	96.9	99.9	77.8	91.0	93.0	91.0	84.5	89.4	88.3	88.3	88.3	91.7	2
	第二	100	100	100	100	99.8	100	99.9	83.7	78.8	69.6	77.1	100	100	100	93.1	1
	第三	96.1	96.4	96.2	92.3	100	80.2	90.5	100	78.9	100	92.4	78.6	78.6	78.6	90.1	3

#### 四、方案实施的几点建议

1. 严格控制人口的增长, 加强水土保持治理工作, 增强农田抗旱抗涝及其它自然灾害的能力。
2. 为保证粮食总产量稳步增长, 应增加农业投入和调整作物种植结构, 积极推广农业新技术和优良品种, 要有计划地扩大水稻和地膜玉米的种植面积, 以科技促进农业的发展。
3. 不断配肥地力, 在抓好有机肥和秸秆还田的同时, 推广应用玉米、草木樨 2:1 间作新技术。
4. 坚持肉蛋立足于自给有余, 在有条件的乡村大力发展畜牧业、猪和庭院经济等。
5. 大力改造小水面, 实行精养高产和推广稻田养鱼技术。
6. 保证规划方案的实施, 应在规划的基础上, 协调水土保持与农林牧渔的关系, 减少局部发展的盲目性, 保证宏观效益(目标)的实现, 促进农林牧协调发展。

#### 参 考 文 献

- [1] 张汉雄. 通渭县农林牧优化结构动态仿真模型. 《水土保持通报》, 1987 年, 第 3 期
- [2] 王其藩. 系统动力学. 北京: 清华大学出版社, 1988 年
- [3] 张汉雄. 动态仿真在水土保持规划中的应用. 《中国水土保持》, 1988 年, 第 9 期
- [4] 陈云林等. 2000 年黑龙江农村发展战略. 哈尔滨: 黑龙江省科学技术出版社, 1989 年