

通渭县农林牧结构优化动态仿真模型的探讨

张 汉 雄

(中国科学院西北水土保持研究所)

提 要

本文应用福里斯特 (Forrester) 的系统动力学理论建立了甘肃省通渭县农业系统仿真模型, 以优化农林牧结构和预测未来发展。位于黄土高原丘陵沟壑区的通渭县, 是一个经济贫困地区, 调整农业系统的内部组成, 对提高该县农业生产水平是十分重要的。对该县的农业系统现状和存在问题诊断之后, 建立了系统网络图, 它包括种植业、林业、牧业、人口和资金 5 个子系统。该系统仿真方程包含 18 个状态方程、32 个流率方程、126 个辅助方程和 127 个参数, 并用动态模型 (DYNAMO) 语言编出计算程序。有若干个反馈回路的仿真方程有自调节功能, 可在 IBM PC/XT 计算机上通过人一机对话进行人工调控。一旦模型运行, 优化值和预测值都以图形或表格显示。

现代农业是一个包括农业、林业、牧业和与之有关的土地资源、气候、环境及社会经济条件等复杂的人工生态系统。农林牧结构, 是农业系统内各元素及子系统的有序组合, 它们之间相互促进与制约, 从而强化或抑制系统的功能。按照一般系统论的基本原理, 系统的结构决定其功能。农业系统的结构优劣, 决定农林牧综合发展的总体经济效益、社会效益、水土保持效益和生态效益水平。农业生态系统属开放系统, 它追求多目标统筹兼顾。农业结构调整, 就是对该系统的土地利用结构、耕地类型、农作物布局、农业产值结构和农业投资与劳力结构进行合理调整, 在动态优化过程中取得最佳的总体效益。因此, 准确诊断农林牧结构现状, 分析存在问题, 查病根, 寻出路, 改进系统内部的结构以提高其功能, 这对于当前黄土丘陵区农业结构调整、水土保持综合治理和农林牧综合发展有十分重要的意义, 也是该区农村脱贫致富、由传统农业向商品经济发展的主要途径。

为探索黄土丘陵区农林牧综合发展的途径, 本文应用系统动力学理论, 建立了通渭县农林牧结构优化动态仿真模型, 并在 IBM 计算机上进行调试计算。在实验研究中, 对系统结构与目标实施动态跟踪与调控, 并用统筹兼顾、模糊综合评审技术, 从 4 种仿真方案中优选出适于该县的农林牧综合发展模式, 还预测了各阶段的发展指标。研究表明, 动态仿真是农林牧结构优化的一种可行性较强的优化技术, 它为区域性的农业结构调整和农林牧综合发展规划提供了一种有用的模式。

一、通渭县农林牧结构现状与问题诊断

通渭县位于甘肃省东南部的华家岭山地东侧, 总面积 2,899 平方公里, 人口 36 万人。境内海拔高度 1,600—2,200 米, 由东南向西北地势逐渐升高, 是典型的黄土丘陵沟壑地貌。气候属温带

半干旱向半湿润过渡气候带，年雨量400—540毫米，雨量垂直分布随地形增高而递减，光热水等气候要素组合适于多种农作物和植物生长。全县天然植被稀少，沟壑密度较大，水土流失严重。平均侵蚀模数在9,100吨/平方公里，年土壤流失总量达2,370万吨，是甘肃省水土流失最严重的县份之一。

该县是生产粮食和油料的旱作农业区。长期单一粮食生产，广种薄收，加剧了水土流失，生态环境恶化，农林牧生产比例失调，发展缓慢；粮食产量低而不稳，群众温饱无保证，林牧业生产停滞不前，当前的自然资源优势没有充分利用。

近几年来，在党中央“种草种树、脱贫致富”的方针指导下，随着农村经济体制改革的深入进行，通渭县的农林牧结构调整取得了初步成效。3年来，全县修梯田4.2万公顷，退耕地5.8万公顷，种草4.6万公顷，造林9,266.7公顷；农林牧土地利用比例分别由1981年的64.6%、4%和31.4%调整到43.7%、8.2%和48.1%；农林牧副各业的户值分别由原来的72.5%、3.8%、23.7%和10%调整为62.6%、61.9%、26.1%和5.2%，种植业产值比重下降，林牧业比重增加。同时，生态环境也有了改善，森林覆盖率由3.7%增加到7.4%，土壤流失总量减少了4.4%。结构调整取得的初步效益，展示了农林牧结构趋向合理发展的良好开端。目前存在几个问题：

1、**土地利用结构以农为主，不能充分发挥土地资源的优势。**据该县土地资源清查结果，现有农地12.46万公顷，占总土地的40.0%，每人平均耕地0.35公顷，农地面积仍偏大，其中大部分坡耕地属宜林宜牧地，土地资源的优势没有合理利用，农林牧业生产仍处于落后状况。

2、**基本农田少，坡地土壤侵蚀严重。**农地面积的85%属 6° — 25° 的坡耕地，每公顷产量不足750公斤，易受干旱威胁，产量低而不稳。坡耕地土壤侵蚀模数高达12,000吨/平方公里，土壤瘠薄，是导致愈穷愈垦、环境恶化的主要原因。

3、**人口增长迅速，导致经济发展失调。**全县人口增长与粮食生产发展很不协调，1965—1975年，人口增长率为31.4%，同期粮食产量仅增长1.8%，每人平均有粮由222.5公斤降低到127.5公斤。人口对粮食需求增长的压力导致大量垦荒和破坏植被，农林牧业均处于徘徊和停滞状态，造成口粮、饲料、肥料和燃料俱缺的贫困状况。近年人口增长率降到12%，农林牧都有较大发展，但恢复生态平衡仍很困难。

4、**草场类型单一的草畜矛盾突出。**牧业用地中，人工种草仅占10%，其余均为天然荒山荒坡。由于干旱和土壤侵蚀，天然草场产草量很低，畜群超载过牧，加剧了草场退化，饲草资源匮乏，畜牧业发展极不稳定，羊只存栏大幅度减少。

5、**农业产值结构“一头沉”，增长缓慢。**该县农业经济结构仍属“一头沉”，表现在农业总产值以种植业为主（占62.5%），种植业产值以粮食为主（占90%）。以粮食生产为主的农业经济易受自然灾害影响，波动大，总体效益增加缓慢。

农业结构现状诊断表明，农林牧结构调整的效益是显著的，但要彻底改变结构的不合理状况，必须按照优化模型实施动态调控，以取得最佳的总体效益。

二、农业系统动态仿真的基本原理

农业系统是一个人工调控的生态经济系统，系统内各元素和各子系统间通过物质、能量和信息的传递与转化，产生系统响应与功能。农林牧结构优化的各种方法和数学模型，都是在自然资源与社会经济条件约束下，通过改变系统结构以寻求最大经济效益的途径。但农业系统属开放系统，它严格受制于环境系统（如气候、土地、经济基础等）和人为作用（如政策、科技等）的影

响,具有多层次、多因素,追求多目标,分析复杂,跟踪困难。以运筹学为主的管理科学(包括数学规划与寻优法等理论,如线性规划),其内涵与外表都偏重于数学形式,着重追求“最佳解”。但是由于农业系统的复杂性、参数多变性和难于调控性,它所提供的数学“最佳解”是难于实现的假设解,因而许多数学方法尚无获得最佳途径。

由美国福里斯特(Forrester)教授开发的系统动力学是研究社会经济系统的计算机仿真方法,被誉为“政策和策略的实验室”。八十年代以来,系统动力学原理在我国也普遍用于企业、城市和区域开发战略研究,并于1984年成功地用于海伦县农业生态系统的发展战略研究。

鉴于运筹学过分拘泥于最优解之不足,系统动力学理论则不依据抽象假设(如线性规划中某些参数确定),不追求最佳解,而以农业系统实际存在的结构现状为前提,寻求改善系统行为的机会和途径。从其方法来说,不以严格的数学逻辑推演求解,而是对实际系统结构观测的信息建立动态仿真模型,通过在计算机作实验来获得系统动态行动的描述,如各阶段农林牧的结构演变、产量与产值增长和生态效益变化等。

根据系统动力学原理,通渭县农林牧结构优化动态仿真实验的基本原理和思路是:

1、以反馈控制理论为基础,把农林牧系统中的有生命系统(如人、畜禽、作物和林草)和无生命系统(如土地、水、气候要素、土壤侵蚀和社会经济信息等)都作为信息反馈系统,并认为存在着信息反馈机构。正反馈使系统功能强化或失调,导致生态环境恶性循环;负反馈则有抑制系统功能,使之朝生态平衡的良性循环收敛。

2、以反映实际系统特征的结构模型为基础,建立各元素及子系统间的因果关系和量化关系的动态仿真模型,通过模拟实验、方案比较和可行性分析以达到结构优化目的。

3、计算机仿真,分瞻前顾后两阶段。瞻前用于验证模型的有效性,即用历史数据检验仿真结果的可信度;顾后即预测未来发展,研究可能出现的问题。

4、根据仿真的多种方案,进行经济效益、水土保持效益和社会效益多目标综合评审,选其优者作为该县农林牧发展的可行优化方案。在实施中,随着人的决策改变和环境信息变化,系统即进行反馈,调整结构或修改参数,获得新的动态响应。

农林牧结构优化动态仿真的过程系统见图1。

三、动态仿真模型

农林牧结构优化的动态仿真模型包括两部分,即农林牧系统流图和构造方程式。系统流图描述系统内部的因果关系和反馈网络;构造方程式则表达各类变量间的定量关系。二者相辅相成,融为一体。

(一)农林牧系统流图。通渭县生态经济系统是一个涉及范围广泛而复杂的大系统。根据系统观察和诊断分析,我们选择了对系统影响较重要的126个变量和127个参数作为研究对象(图2、图3和图4)。设所论变量全集为Q,则

$$Q = \{q_1, q_2, \dots, q_{126}\}$$

若将Q划分,则包括5个子系统,即

$$\pi(Q) = \{Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5\}$$

式中: Q_1 ——种植业单元集; Q_2 ——林业单元集;

Q_3 ——畜牧业单元集; Q_4 ——人口劳力单元集;

Q_5 ——副业资金单元集。

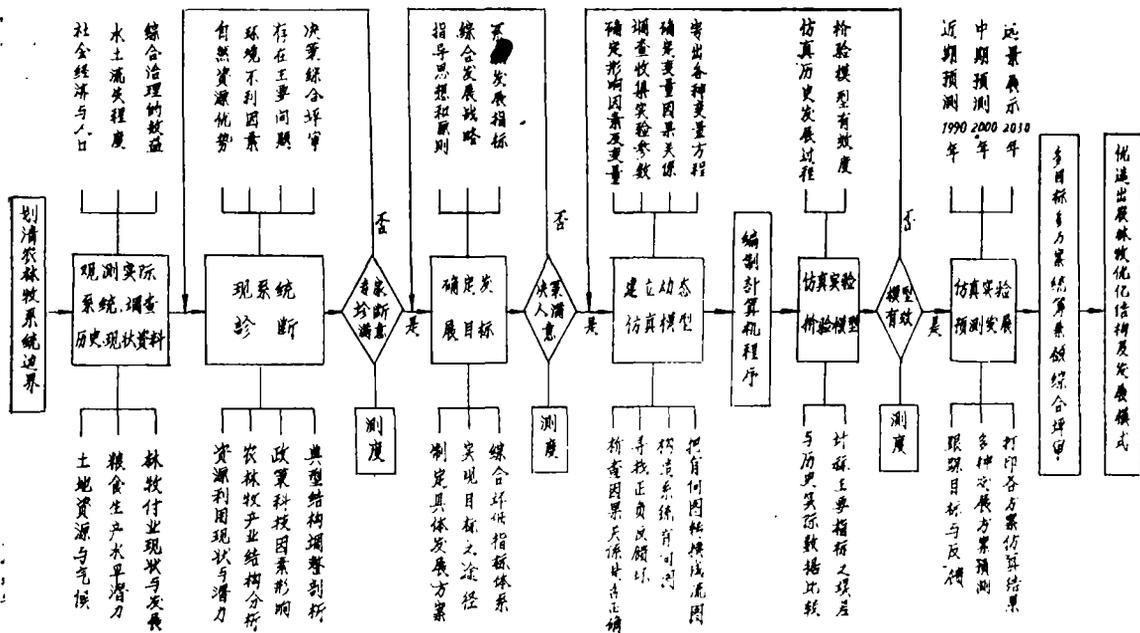


图1 农林牧结构优化动态仿真过程系统流程图

系统流程图属网络模型。根据福里斯特的流图构造原理，把组成系统的元素(变量)用带有正负号的箭头连接起来，即为系统有向图或因果关系图，它隐含系统的变量集合Q和关系集合C。准确构造因果关系图是建立仿真模型的基础。然后，按照有关规定将有向图中的所有变量进行参数和综合关系辨识，转换成系统流图，于是得到了该县农林牧子系统流图(图2、图3和图4)，即

$$\pi(Q) = \{X, V, P, R\}$$

$$\pi(C) = \{I, F\}$$

式中：

X——系统中的状态变量集合；V——辅助变量集合；

R——流率变量集合；P——参数集合；

I——信息流耦集合；F——物质(或资金)流耦集合。

该流图包含了18个状态变量、32个流率变量、126个辅助变量和127个参数。它们以实际系统的关系形成若干个反馈回路，通过人口、粮食、饲草、燃料、土地面积、投资和产值等主要物流通路构成负反馈环，产生自我调节特性，从而使系统能达到预期目标和实现结构优化目的。

(二) 构造方程。根据该县的系统流图和收集的实验参数，可写出模型的构造方程。构造方程按其性质和作用分6类：

1、状态方程，描写状态变量的动态行为，如人口、农林牧用地面积的变化等。

2、延迟流位方程，属高阶微分方程，仅有数值解，用于处理系统中的滞后效应，如果树木面积与产量的增长关系、造林面积与木材生长量的增长关系等。

3、流率方程，与状态变量有关的变化率，如人口增长率，牲畜出栏率和农地退耕率。

4、辅助方程，表征辅助变量与其它变量的关系，如粮食单产、总产，燃料总量和饲料增量。

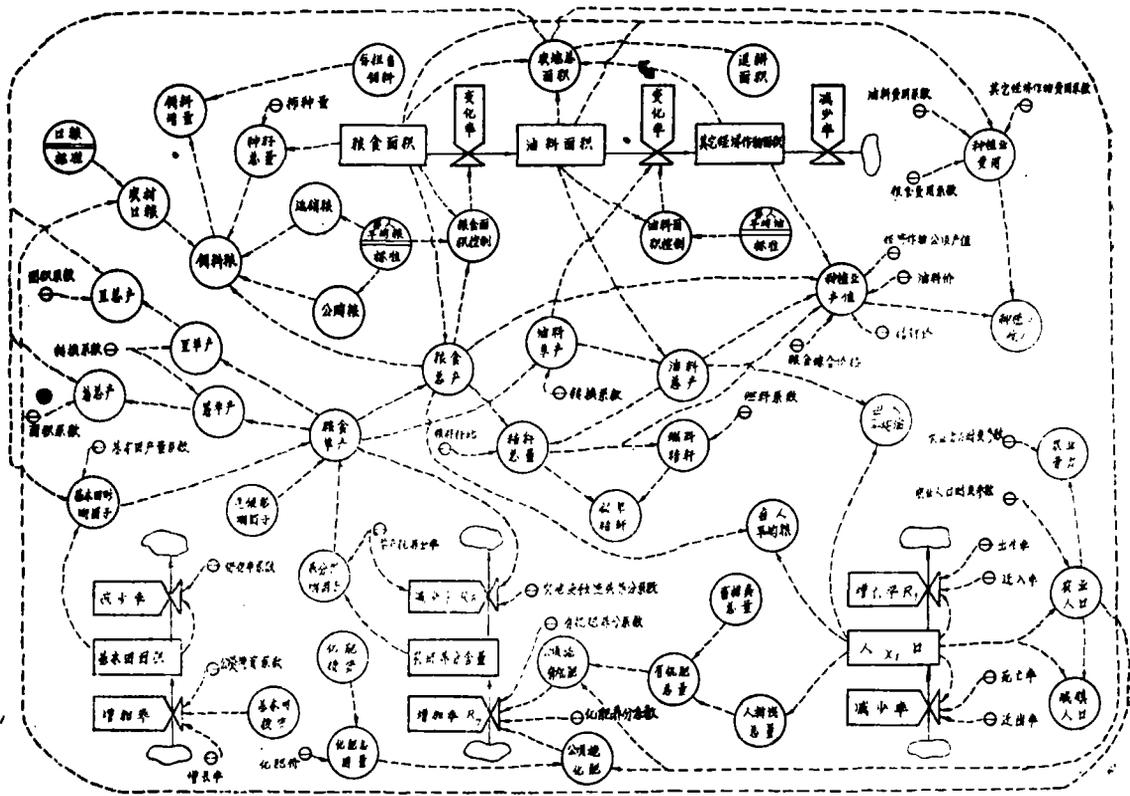


图2 种植业子系统流程图

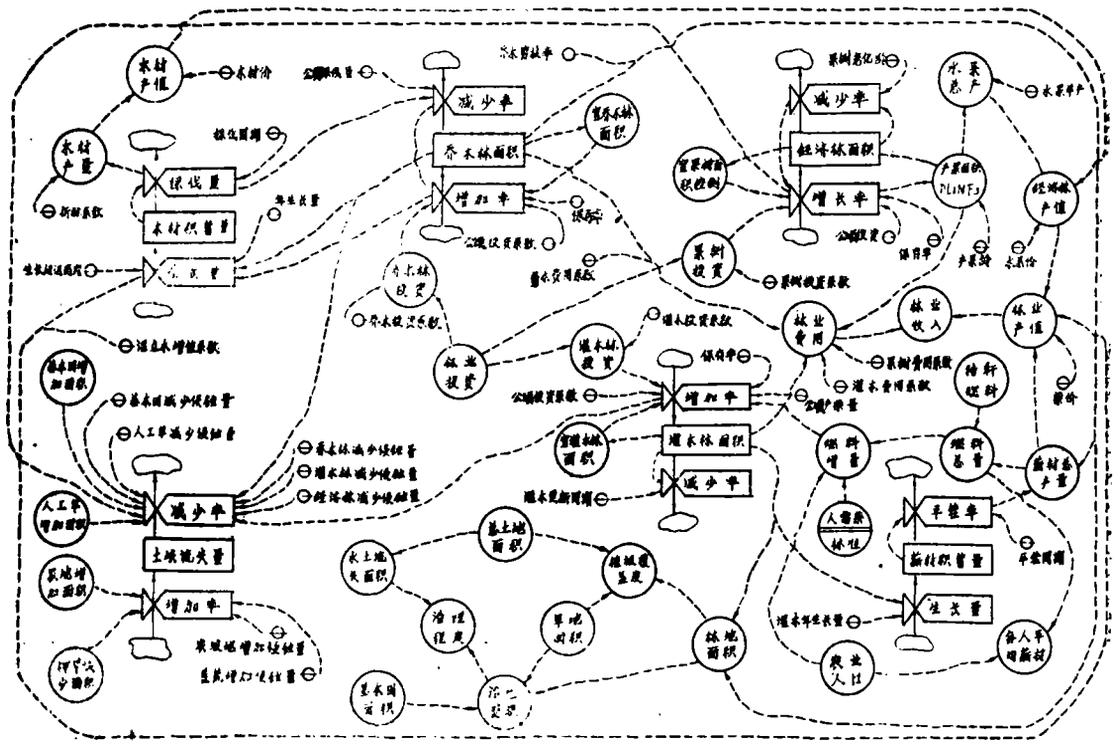


图3 林业子系统流程图

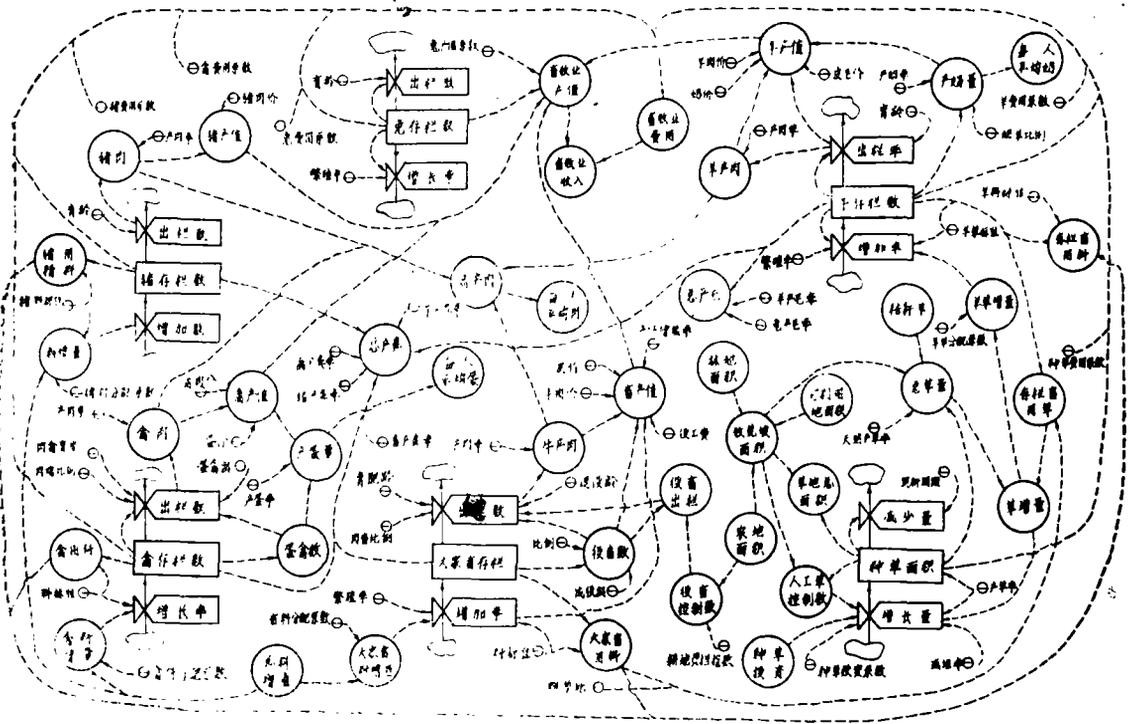


图4 畜牧业子系统流程图

5、表函数，是动态模型语言的专用函数，表示变量的函数关系。

6、参数。一类是固定参数，如价格、畜禽料标准等；另一类是时变参数，它随时间推移递增或递减，如每人平均粮食、燃料标准和农业人口比例等。

状态变量是系统流图中反馈网络连接纽带的，随着状态转移，其它方程即可由状态方程导出。状态方程的一般表达式是：

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

其差分形式可写成

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

本模型含18个状态方程，仿真寻优即求解，包括这18个状态方程的微分方程组。现给出10个主要状态方程的差分形式：

1、人口 X_1

$$X_1(t) = X_1(t-1) \cdot [1 + (m_1 + m_2) - (m_3 + m_4)] \cdot \Delta t$$

式中： m_1, m_2 —分别为人口出生率和迁入率；

m_3, m_4 —分别为人口死亡率和迁出率；

Δt —时间间隔，即仿真步长。

2、粮食播种面积 X_2

$$X_2(t) = X_2(t-1) + [F_2(t) \cdot V_{11}(t) - V_{30}(t-1)] / V_{30}(t) \cdot \Delta t$$

式中： V_{11}, F_2 —分别为t年的农业人口和每人平均粮；

V_{30}, V_{30} —分别为t年的粮食单产与总产。

3、基本农田面积 X_6

$$X_6(t) = X_6(t-1) \cdot [1 + V_7(t) \cdot P_2/152] \cdot \Delta t$$

式中： V_7, P_2 —分别为 t 年基本农田投资及增长率。

4、乔木林面积 X_7

$$X_7(t) = X_7(t-1) \cdot [1 + (V_{62}/35 - R_{12}/10) \cdot \Delta t] \quad X_7 \leq V_{67}$$

5、木材积蓄量 X_8

$$X_8(t) = X_8(t-1) \left(1 - \frac{\Delta t}{P_1}\right) + X_7(t-1) \cdot P_3 \cdot \Delta t$$

6、灌木林面积 X_{10}

$$X_{10}(t) = X_{10}(t-1) \cdot \left(1 - \frac{\Delta t}{P_4}\right) + (V_{64}(t)/27.5) \cdot \Delta t \quad X_{10} \leq V_{73}$$

式中： V_{62}, V_{64} —分别为 t 年的乔木林与灌木林投资；

P_1, P_3 —分别为乔木采伐周期和每公顷年生生长量；

R_{12} —木材年采伐量；

P_4 —灌木林更新周期；

V_{67}, V_{73} —分别为适宜乔木林与适宜灌木林的面积。

7、大家畜存栏数 X_{15}

$$X_{15}(t) = X_{15}(t-1) [1 + P_6 P_8 - P_7] \cdot \Delta t \quad X_{15} \geq V_{68}/25$$

8、羊存栏数 X_{17}

$$X_{17}(t) = X_{17}(t-1) \left[1 - \frac{\Delta t}{P_5}\right] + V_{66}(t)/P_9$$

式中： P_6, P_8 —分别为大家畜繁殖率和饲料增量系数；

P_7 —大家畜退役及屠宰出栏率；

V_{66}, P_8, P_9 —分别为羊饲草增量、育肥龄和食草标准；

V_{68} — t 年的农地面积。

9、人工种草面积 X_{16}

$$X_{16}(t) = X_{16}(t-1) \left(1 - \frac{\Delta t}{P_{10}}\right) + V_9(t) \cdot \Delta t/6.5$$

式中： V_9, P_{10} —分别为 t 年种草投资和人工草更新周期。

10、土壤流失量 X_{12}

$$X_{12}(t) = X_{12}(t-1) + [3.3V_{16} + 2.5R_{10} + 1.5R_{14} + 2.5R_{16} + 1.5R_{28} - 3.9R_6 - 1.5R_{27} - 2.5R_8 - 1.5R_{13} - 2.5R_{18}] \cdot \Delta t$$

式中： R_{10}, R_{14}, P_{10} —分别为乔木、果树和灌木减少面积；

V_{16}, P_{28} —分别为农地退耕和人工草地减少面积；

R_6, R_8, R_{13}, R_{27} —分别为每年基本农田、乔木林、果树、灌木林和人工草地的增加面积。

该模型含辅助方程118个，现仅列出几个主要辅助变量的方程：

1、粮食平均单产 V_{30}

$$V_{30}(t) = 0.65S_a + (RND + 0.5) \cdot [0.35S_a + (S_b - S_a) \cdot (1 - e^{-\frac{(t-1)}{10}})] \cdot (F_a + F_b)$$

式中： F_a, F_b —分别为基本农田和肥料影响因子；

S_a, S_b —分别为该县现状粮食单产与潜力单产；

RND—与气候影响有关的随机函数，其值为 $-0.5 \leq \text{RND} \leq 0.5$ 。

2、饲料粮增量 V_{31}

$$V_{31}(t) = V_{35}(t) - (V_{28}(t) + V_{34}(t) + V_{29}(t)) - V_{32}(t)$$

式中： $V_{35}, V_{28}, V_{34}, V_{29}$ —分别为 t 年的粮食总产、口粮、种子和公购粮，
 V_{32} —当年存栏畜用饲料。

3、饲料增量 V_{80}

$$V_{80}(t) = P_{11} \cdot X_{16}(t) + P_{12} \cdot V_{58}(t) + 0.45V_{38}(t) - V_{66}(t)$$

式中： P_{11}, P_{12} —分别为人工草和天然草的产草率；

V_{38}, V_{58}, V_{66} —分别为当年秸秆总量、存栏畜用草量和天然草场面积。

建立了系统流图和方程式，我们用 DYNAMO 语言编制出计算程序，于是可在计算机上进行动态仿真实验。（待续）

（这是黄土高原综合考察的一个单项成果，周晓东同志参加了部分工作）

参考文献

- [1] 胡玉奎：《系统动力学》，中国科技咨询服务中心预测开发公司，1984年6月。
- [2] 邓聚龙：《灰色控制系统》，华中工学院出版社，1985年。
- [3] 贺仲雄：《模糊数学及其应用》，天津科学技术出版社，1982年。
- [4] 王毓基等：《区域规划系统工程》，湖南大学出版社，1986年。
- [5] 席少霖等：《最优化计算方法》，上海科学技术出版社，1983年。
- [6] J.B.Dent and M.J.Blackie：《农业系统仿真》，粟文辉等译，农业出版社，1984年。
- [7] Jay W.Forrester：《系统学原理》，杨通宜等译，上海业余工业大学，1983年。
- [8] 陈锡康等：《经济数学方法与模型》，中国财政经济出版社，1982年。
- [9] Peter S.Gorden etc.： "Micro-DYNAMO System Dynamics Modeling Language", Addison-Wesley Publishing Company, 1984.

APPROACH TO THE OPTIMIZING DYNAMIC SIMULATION MODEL OF THE STRUCTURE OF AGRICULTURE, FORESTRY AND ANIMAL HUSBANDRY IN TONGWEI COUNTY OF GANSU PROVINCE

Zhang Hanxiong

(Northwest Institute of Soil and Water Conservation, Academia Sinica)

Abstract

To optimize structure of agriculture, forestry and animal husbandry of agricultural system and to predict their advances in the future, a dynamic simulation model on the agricultural system in Tongwei county is developed according to the systematic dynamic theory by Forrester. Tongwei county located in hilly region of Loess Plateau is a poor region, thus it is important to adjust the internal composition of the agricultural system to raise agricultural productivity in the county. After the existent conditions and problems of the agricultural system in the county being diagnosed, the systematic network diagrams, including crop planting, forestry, animal husbandry, population, fund, etc. are made. The systematic simulating equations, including 18 level ones, 32 rate ones, 126 auxiliary ones and 127 parameters, are programmed by means of DYNAMO language. The simulating equation model with several feedback loop is able to function automatically, and control artificially by person-computer conversation in IBM PC/XT computer. Once the model is run, all optimization values and predicting values are expressed in diagram or table.