

系统动力学在水土保持规划中的应用

张汉雄

中国科学院
(水利部水土保持研究所·陕西杨陵·712100)

摘要 系统动力学(简称SD,亦称动态仿真)是现代最新的系统分析方法,即模拟社会经济、生态系统动态行为的计算机仿真技术,是科学决策和预测的有效工具。该文根据水土保持规划的特点,论述了动态仿真的基本原理、水土保持规划中的SD建模方法和水土保持规划SD软件及其应用。

关键词 水土保持规划 系统动力学 SD软件

Application of System Dynamics in Soil and Water Conservation Program

Zhang Hanxiong

(Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and
Ministry of Water Resources, 712100, Yangling District, Xianyang Municipality, Shaanxi Province)

Abstract System dynamics (or dynamic simulation, SD is its abbreviation) is a new method in system analysis in modern times. It is a simulating techniques used by computer to simulate a dynamic behavior of socioeconomics and ecosystem, and a useful tool of scientific decision and prediction. Based on the character of soil and water conservation program, the main principle of SD, the modelling method, the SD software and its application in program are discussed.

Keywords program of soil and water conservation; system dynamics; SD software

系统动力学(System Dynamics,简称SD,亦称动态仿真)是模拟社会经济、生态系统动态行为的计算机仿真技术,是国内外现代科学决策和预测的有效工具。自50年代创立以来,这一理论迅速发展,已相当成熟和完善,在国外广泛用于社会经济方面的宏观发展战略决策研究,被誉为“政策和策略的实验室”。我国自80年代初引入SD理论后,已有长足发展,已广泛在工业、农业、经济、军事和社会发展诸多领域应用,取得显著效果。它改变了传统的主观臆断决策和预测方法,避免了决策失误和盲目性,提高决策效率和准确性,从而节省大量人力、资金和时间,可获得工程项目投资10%的直接效益和更大的间接效益。近年来,我们应用SD方法成功

地进行了区域水土保持规划和水土保持生态系统研究,现将水土保持规划中的有关问题简介。

1 水土保持规划的特点

水土保持涉及生态系统的各个方面,水土保持规划是一个多层次、多专业的综合规划,必须用系统的思想和方法统观全局,统筹兼顾,以保持各业协调发展,促进生态环境良性循环和实现总体效益最佳。其主要特点是:

1.1 追求多目标统筹兼顾和总体效益最佳

水土保持规划的综合性之一是其多目标性,即要求生态效益、经济效益和社会效益的统一,既要求产值和收入最大,又要兼顾农民和国家对粮食、油料、木材、果品和畜产品的社会需求,以及满足一定的森林盖度与水土保持效益(图1)。如果顾此失彼,则生态系统总体功能降低;单纯追求经济效益将导致生态环境恶化,后患无穷;单纯为改善生态环境而经济效益差,则农民不易接受,实施困难。

1.2 层次多,影响因素复杂,系统分析调控困难

水土保持规划是一个多层次结构,影响因素多、各层次各因素之间相互制约,决定着农林牧业发展(见图1)。水土保持易受自然环境(土地资源、气候、水土流失)、经济条件和人为因素(如政策和科技)的影响,系统分析复杂,跟踪控制困难,有牵一发而动全局之势,一旦失误,调整恢复极为困难。例如“以粮为纲”的发展战略引起毁林垦荒、陡坡耕种和倒山轮种,则导致水土流失加剧、生态环境恶化,形成愈垦愈穷的贫困状况,长期难以恢复。而单纯造林种划,经济效益低,影响群众生活,造成经济发展失调,亦非良策。所以,水土保持规划要用系统分析方法,抓主要矛盾,调控和优化系统结构,以提高其总体功能。

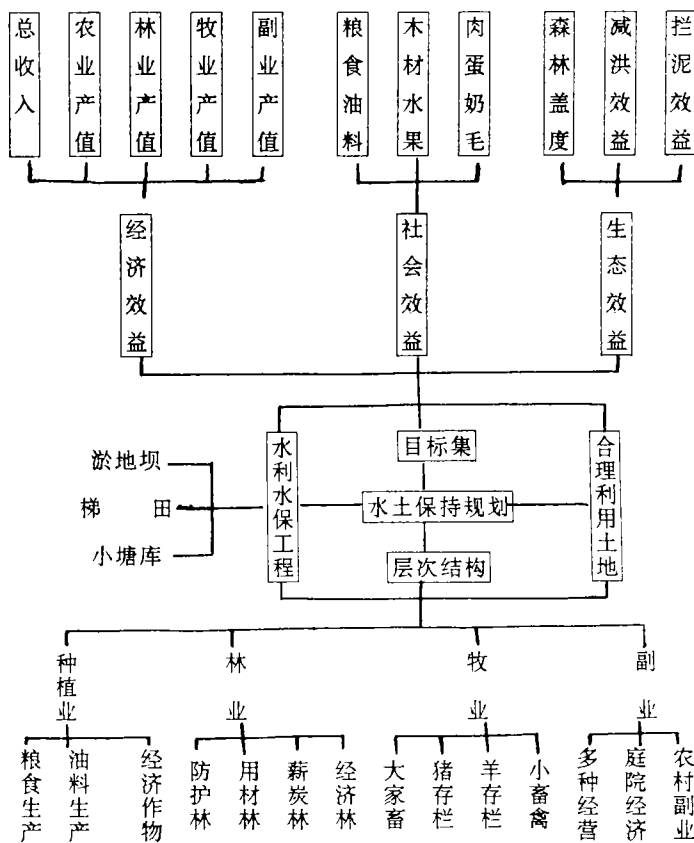


图1 水土保持规划的目标集与层次结构

1.3 效益滞后,动态性强

水土保持措施的效益一般需较长时间,如种草养畜需2~3年,林果需5年以上,生态效益需10年以上,近期效益不明显,效益滞后效应显著,故规划要作中长期规划才能体现其综合效益。

为观察逐年的实施情况和效益变化,需进行系统动态分析,而一般静态规划则难以准确预测。

1.4 随机干扰多、波动大,综合性强

农林牧业生产易受自然和人为因素的随机干扰,发展过程往往波动大,如气候灾害和政策、市场波动可导致耕地粮食等大幅增减。这些变化随机性强,难于预料,需用动态滤波和调控方法加以控制,使之保持动态平衡和稳定发展。因此,水土保持规划更适于采用系统综合性强的SD方法描述其系统结构与功能。

2 动态仿真的基本原理

SD方法以系统论、信息反馈控制论、决策论、系统力学和仿真技术为基础,以计算机仿真为手段,模拟系统的动态过程。线性规划属静态规划,偏重于追求最优解,而不考虑是否能实现;而SD则以仿真实系统的结构与功能为目标,研究复杂的非线性动态系统的时间响应,对于线性规划难于求解的复杂问题,如多目标规划、非线性高阶次优化和系统的时变参数与时滞效应问题,都可以通过仿真实实现。SD仿真的基本原理和方法是:

2.1 分析系统现状与问题,确定发展目标

首先应划清研究系统的范围,明确系统中包含的变量、参数及相互关系。然后,对系统的现状和发展历史进行诊断分析,确定存在问题与主要矛盾,选择对系统效能影响大的变量作为主要研究对象。在此基础上,根据自然条件和社会经济发展需要确定发展方向和分期发展目标。

2.2 建立SD模型

SD模型由系统结构流程图(即F图)和构造方程两部分组成,二者相辅相成,融为一体。流程图反映系图中各变量间的因果关系和反馈控制网络,正反馈环有强化系统功能,表现为偏离目标的发散行为;负反馈环则有抑制功能,能跟踪目标,产生收敛机制;二者组合使系统在增长与衰减交替过程中保持动态平衡,达到预期目标。故流程图以体现实际系统的结构特征和真实功能为前提,不存在任何假设或虚拟类比。

构造方程是变量间定量关系的数学表达式,可由F图直接确定或由相关分析给出,可以是线性或非线性函数关系。构造方程以状态方程1为纽带,流率方程、辅助方程、表方程、积分函数等均可由状态方程导出,其一般表达式为

$$\frac{dX}{dt} = f(X, V, R, P) = R(i)$$

其差分形式可写成

$$X(t + \Delta t) = X(t) + f(X, V, R, P) \cdot \Delta t \quad (2)$$

式中: X 为状态变量; V 是辅助变量; R 为流率变量; P 是参数; t 为仿真时间; Δt 是仿真步长。用DYNAMO语言将构造方程编成计算机程序,即可在计算机上进行仿真实验。

2.3 仿真实验

仿真实验分瞻前顾后两阶段,瞻前是仿真系统的过去行为,并与历史数据比较,以检验模型的有效性。顾后即在模型检验有效后仿真将来发展,以进行预测,改变控制变量进行多方案仿真优选。SD模型是有多重反馈回路的自控系统,可用于中长期(50年至100年)的发展预测。为评价仿真方案的优劣,可用多目标综合评审或其它决策方法对各方案的总体效益评价,选其优者作为可行的实施方案(见图2)。

3 水土保持规划的SD建模方法

根据动态仿真的基本原理,并考虑到水土保持规划的特点,其建模思路和程序是:

3.1 明确规划目标、范围、变量、调查收集有关资料

水土保持规划属大农业综合发展规划,一般包括农、林、牧、副业、土壤侵蚀与水利水保工程,与这些方面有关的自然资源。生产现状与历史发展资料都必须调查取得,主要有:

(1)土地资源利用现状,包括各类土地利用面积、土地类型面积及适宜性,宜农、宜林、宜牧面积,可发展水坝地面积。

(2)农、林、牧、副业生产现状和10年以上的历史资料,包括粮食及其它作物面积、产量与单产,乔木、灌木、经济林的面积、产量与生长量,天然草场和人工草地面积与产量,各类畜禽存栏数和肉、蛋、奶产量。

(3)农、林、牧、副业的年投资、产值、净收入,物质消耗与产投比。

(4)总人口、农业人口、农村劳动力数及人口增长率与减少率。

(5)分类土壤侵蚀面积与强度,不同土地利用的侵蚀量,减水减沙效益和梯田、坝库的拦泥减洪效益。

(6)参数类分固定参数与时变参数。固定参数如人均食粮标准,林木采伐周期和畜禽食草、食料标准等。时变参数如人均需粮油目标、粮油单产、牧畜禽出栏率和产果面积等。

3.2 分析系统问题,确定发展目标

应由领导(决策者)、有经验的农民和专家共同研究诊断,确定发展方向与目标,分析区域自然资源优势与劣势,主要矛盾和对策,制定不同类型的发展战略与目标,如农业型、林果型、牧业型,综合治理型等。

3.3 建立SD模型

应由熟悉系统的专业人员建模,准确构造系统有向图,并把此图构成的三元(正关系、负关系、无关系)矩阵转换为系统流图,要下功夫寻找正、负反馈环,使流图既合理,又有可控性。流图构造之后,再用 DYNAMO 语言编写计算程序即为 SD 模型。

3.4 模型检验

SD 模型需用专用 DYNAMO 软件在计算机上运行,用于检验模型的运行称基本运行,方案预测的运行称重复运行。规划一般可用人口、农林牧业用地面积及产值,粮食产量、畜存栏、土壤流失量等指标的仿真结果检验,若有效性大于90%,则可预测;否则,需修改模型。

3.5 仿真预测

按确定的发展战略目标和控制参数,可进行仿真预测。SD 模型有自调节功能,通过土地资源,人口、饲草饲料、资金等条件约束,使各业既受一定程度限制又保持协调发展,达到动态优化与预测目的。仿真规划可输出100多种数据,以表格、曲线图显示或打印,操作者可进行人机对话,观察各方案的动态趋势,初步筛选其优劣,或由参数调控修改方案或结构、重复运行。

3.6 多目标综合评审

为了对仿真的多种方案进行优选,可用多目标模糊综合评审方法对初选方案进行总体评价,选其优者作为可行方案。设水土保持规划的总体效益为 x ,则

$$x = \{A_1(\text{经济效益}), A_2(\text{社会效益}), A_3(\text{生态效益}), A_4(\text{可行性})\} \quad (3)$$

式中: A_i 是各评审因子对各种效益的隶属度; A_{ij} 为各因子效益 $(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im})$ 定义在论域 x 上的模糊子集,即

$$A_{1j} = (a_{11} \text{ 总产值}, a_{12} \text{ 总收入}, a_{13} \text{ 总费用}, a_{14} \text{ 产投比}) \quad (4)$$

$$A_{2j} = (a_{21} \text{ 粮产量}, a_{22} \text{ 木材产量}, a_{23} \text{ 畜产量}, a_{24} \text{ 林木蓄积量}, a_{25} \text{ 果产量}) \quad (5)$$

$$A_{3j} = (a_{31} \text{ 森林盖度}, a_{32} \text{ 植被盖度}, a_{33} \text{ 流失面积}, a_{34} \text{ 流失总量}) \quad (6)$$

$$A_{ij} = (a_{i1}, \text{规划总投资}, a_{i2}, \text{总投工}, a_{i3}, \text{实施可行性}) \quad (7)$$

按评审因子与指标层次,采用三种评审方法:

3.6.1 模糊评分法 对各评审指标均采用百分制模糊计量,产值、产量、盖度等指标最大者为100,投资、流失量最小者为100分。

3.6.2 功效系数法 它是层次效益的综合判定,由下式计算

$$R_i = \sqrt[m]{\prod_{j=1}^m a_{ij}} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

式中, R_i 为第 i 个因子的功效系数; a_{ij} 为第 i 个因子第 j 个指标的评审系数; n 为评审因子数; m 为评价指标数; Π 为连乘符号。

3.6.3 权系数法 用于区分各评审因子的重要性,分别赋予权重 d_i ,其总和为1,则总体功效系数 D 大者方案最优,由下式计算:

$$D = \sum_{i=1}^n d_i R_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

水土保持规划 SD 建模方法的过程系统见图2所示。

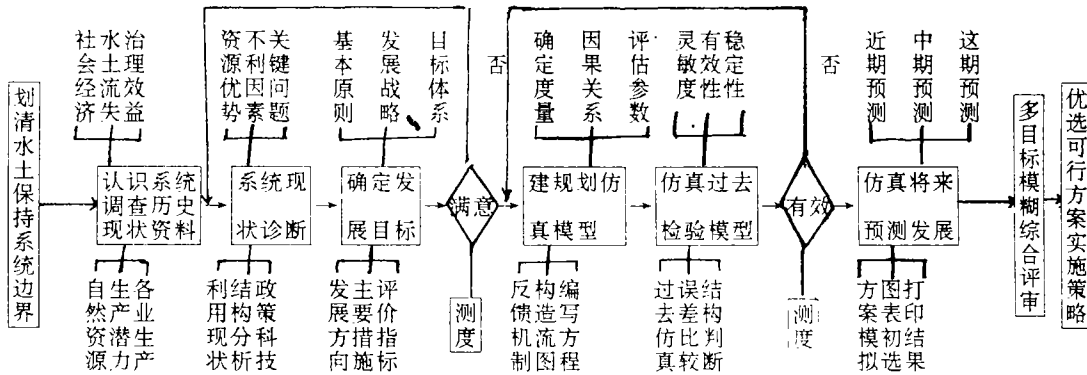


图2 水土保持规划 SD 建模过程系统框图

4 水土保持规划 SD 软件及其应用

近年来,我们应用 SD 理论和方法研究了农业生态系统、社会经济、水土流失与水土保持规划等方面的多项国家攻关课题和部门任务,均取得满意结果,提高了科学决策和预测的准确性,使长期以来困扰山区发展的经济失控问题得到科学论证。并获中科院科技进步一等奖和陕西省科技进步三等奖。用 SD 方法完成的主要项目有:(1)黄土高原农林牧综合发展与合理布局;(2)黄土高原森林植被建设优化模型;(3)黄土高原人口与粮食发展预测和对策;(4)晋陕峡谷区土地开发与水土保持前景和对策;(5)陕西省节水灌溉发展规划;(6)安塞县社会经济发展规划;(7)杏子河流域治理综合规划;(8)内蒙奈曼旗土地沙漠化发展预测与对策;(9)黄土高原丘陵沟壑区分区农林牧业发展与水土保持治理总体规划;(10)神府一东胜煤田开发与水土保持环境治理动态仿真研究等。这些研究项目均达到国内领先水平,解决了传统方法难以完成的科学决策与预测问题。

4.1 水土保持规划 SD 软件的操作使用

该软件系采用美国最新的软件 Professional DYNAMO Plus,经开发、扩充研制而成,具有完善的系统操作、图文显示与打印、建模、数据处理与联接功能,采用独特的建模技巧,能对各种实际系统进行逼真地仿真预测,有效性可达94%以上。针对一般水土保持规划的条件、要求和目标,SD 模型均作了详细的描述,将系统流图和程序参数化,使用者只要按提示输入数据或

参数,毋须构造复杂的流图和编程,即可得到一个完善的SD模型。这对初学者或不具备专业SD知识的人员,亦可完成建模与仿真运行,进行科学规划决策与预测,将有助于扩大SD的应用范围。

该软件分为4个模块,可按次序运行,亦可单独运行,运行环境为DOS2.0以上操作系统,内存大于256K的任何PC机。现对各模块功能与操作方法作一简介:

4.1.1 编辑模块(ED)。用以建立或修改模型。当把SD软件存放于C盘后,键入“ED模型名”,即进入编辑模块,并调用通用的规划SD模型,输入或修改必要的的数据或参数,即成为你所需的水土保持规划SD模型。该模型变量约350个,活性方程385个,最大容量为2000个活性方程。建好模型后即可退出编辑模块。

4.1.2 编译模块(compiler) 模型运行前都必须经编译,供仿真模块调用。键入“CMPL文件名”,即可对模型编译。编译时提示模型的语言错误或建模错误,需退回编辑模块改正后再编译。

4.1.3 仿真模块(simulor) 对模型进行仿真运算,即采用可变步长、三阶的龙格——库塔(Runge-kutta)法积分运算,精度很高。如为多方案仿真的重复运行,键入“SMLT模型名”即进入仿真模块,可对模型中的常量、控制参数和表函数进行修改,再进行仿真,仿真结果存入专用文件,以便查阅。

4.1.4 结果查阅模块(Viewer) 键入“view模型名”即进入该模块,以曲线图和表格形式提供用户需要看的仿真结果。图横坐标为时间,纵坐标为变量值,每张图可绘6个变量的动态曲线;表的横行为时间,纵行为变量,可显示每年或间隔任意年的表值。用户可通过图和表初选仿真方案,不满意者可多次修改参数,重复运行,直到满意为止。

4.2 水土保持规划SD软件的应用前景

目前,SD方法在社会经济和农业生态系统的应用已引起国家决策部门的极大重视,特别是对研究具有多目标、结构复杂,非线性系统更为有效。水土保持规划SD软件除用于水土保持规划外,只需对模型稍加修改,还可用于与水土保持有关的生态经济问题研究,这方面的潜在应用领域主要有:

(1) 流域或区域水土保持规划;(2)流域或区域农林牧综合发展战略、合理布局与预测;(3)流域开发治理的动态规划与效益预测;(4)流域坝系合理布设、运用的动态模拟;(5)森林资源与采伐供需平衡的动态模拟;(6)流域(区域)土壤侵蚀与水土保持治理的动态仿真;(7)人一地系统中人为活动与生态环境的动态演化规律;(8)区域(流域)水资源规划决策与节水灌溉农业发展预测;(9)粮、果、牧、副业基地建设优化布局与发展预测;(10)农、林、牧、水利、水保、水产工程项目投资决策与效益预测。

参考文献

- 1 王其藩编著,系统动力学,北京:清华大学出版社,1988
- 2 倪建华主编,区域资源开发模型系统,北京:中国科学技术出版社,1992
- 3 张汉雄,通渭县农林牧优化结构动态仿真研究,水土保持通报,1987,7(5)
- 4 洪斌等,应用系统动力学理论制定宁安县水土保持规划,水土保持通报,1993,13(1)