

系统工程原理在流域土地规划中的应用

——以山西省中阳县白草沟小流域为例

王礼先 刘晓波

(北京林业大学)

提 要

本文以白草沟小流域为例,应用系统工程原理进行系统诊断,建立了多目标数学规划模型,在满足目标函数,即经济纯收入最大、土壤流失量最小、投资最少、生物量最大的情况下,求出模型的最优解。

我国在治山治水、利用水土资源方面历史悠久,经验丰富。但长期以来,由于缺乏系统的分析与研究,使得小流域治理停留在以经验为基础的阶段;对流域的农林牧等各子系统的发展及相互关系的了解,也是处于定性的描述,缺乏模型化的定量分析。因此,对整个流域系统的研究,停留在传统研究的水平上,缺乏整体代、模型化、量化的分析。本文的目的,正是试图来解决这一问题,通过山西省中阳县白草沟小流域为示例,应用系统工程原理,进行流域规划,探索出一套科学的治理途径,为进一步的流域开发奠定基础。

一、系统概况

白草沟小流域位于东经 $111^{\circ} 07' - 111^{\circ} 19'$,北纬 $37^{\circ} 23' - 37^{\circ} 27'$,属黄土丘陵沟壑区。流域面积69.29平方公里,其中流域上游为土石山区,其面积为26.69平方公里,约占流域总面积的39%;中下游为黄土区,其面积为42.60平方公里,占流域总面积的61%。流域呈东西走向,向西汇入南川河。沟壑密度2.5公里/平方公里,沟壑面积17.66平方公里,占流域总面积的25.7%。

小流域内年平均气温 8°C ,年温差 29.4°C 。多年平均降水量为563毫米,7—8两月降雨最多,占全年降水量的47%。流域内分布的土壤主要有栗褐土、栗褐土性土、淋溶栗褐土、山地栗褐土。全流域有林地28.62平方公里,草地7.94平方公里,农地19.99平方公里,但其中林地面积集中于上游,其面积为26.69平方公里,主要树种为油松、白桦、栎树、杨树、刺槐等。

全流域22个自然村,人口1,577户、5,542人,共2,064个劳力。人口密度为80人/平方公里,每人平均耕地0.36公顷。1985年纯收入197.35万元(工副业112.62万元),每人平均收入356元(工副业收入203元/人),粮食总产量208.62万公斤,每人平均粮323公斤。

二、系统诊断

系统诊断,就是通过一系列的逻辑与数学分析,找出系统存在的问题,查出故障,然后根据

诊断结果，对症下药，从而使系统高效率、持续稳定地发展。

(一) 系统水土流失诊断。全流域水土流失面积64.99平方公里，占流域总面积的93.79%，每年约向南川河输送泥沙37万吨。中下游以沟蚀和耕地面蚀为主，其次是鳞片状面蚀和滑坡；上游也有程度不同的鳞片状面蚀。

影响水土流失的因素主要是地形、土壤、降雨、植被和人类活动这五大因素。本区地形破碎，坡度陡且变化大；黄土湿陷性强，胀缩明显，给水土流失提供了基本条件。65%降雨集中在7—9三个月，这种春季干旱、汛期暴雨集中的情况，给水土流失提供了强大的动力。植被是固持坡面、防止水土流失、改善生态环境的重要措施，但流域内植被分布极不均匀，中下游覆被率只有4.5%。人类对土地利用和经济活动不合理的布局 and 安排，造成水土流失日益加剧。

因此，要想控制水土流失，必须改善这些因素，降雨、地形、土壤要大面积地加以改变显然是非常困难的，而增加植被，合理利用土地，则是可以做到的。所以，通过水土流失的分析诊断，解决这一问题的关键是合理利用土地，提高植被覆盖率。

(二) 系统的灰色经济诊断：

1、关联度及系统发展系数。关联分析是对于一个变化系统发展态势的量化比较。其分析方法的实质是对数据列进行几何关系的比较，可用以下关系式表示：

$$\xi_i(K) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + 0.5 \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + 0.5 \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}$$

上式中， $\xi_i(K)$ 是第K个时刻比较曲线 $\{x_i\}$ 与参考曲线 $\{x_0\}$ 的相对差值，称为 x_i 对 x_0 在K时刻的关联系数。其中：

$\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 称为两个层次的最小差。第一个层次的最小差为 $\min_k |x_0(k) - x_i(k)|$ ，指在不同时刻中挑选出的最小差；第二层次最小差为各个第一层次中选出最小差的最小差。

$\max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 为两个层次的最大差。然后，求各个时刻关联系数的平均值，即为关联度：

$$\gamma_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \xi_i(K)$$

若 $\{x_i\}$ 与 $\{x_0\}$ 的关联度 γ_i 大，即表明 $\{x_i\}$ 是与 $\{x_0\}$ 发展趋势最接近的因素，或 $\{x_i\}$ 是对 $\{x_0\}$ 影响最大的因素。

发展系数。灰色数据列预测法是以一次累加生成的数据列（称为生成数据列）建立单序列的一阶线性微分拟合方法，即GM(1,1)模型。其相应的微分方程为：

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = u$$

系数a、u按最小二乘法求解：

$$\hat{a} = [x^{(1)}(B)^T \cdot x^{(1)}(B)]^{-1} \cdot x^{(1)}(B)^T \cdot y_n = \begin{Bmatrix} a \\ u \end{Bmatrix}$$

式中B为：

$$B = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2}(x^{(1)}(2) + x^{(1)}(1)), & 1 \\ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(3) + x^{(1)}(2)), & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(K) + x^{(1)}(K-1)), & 1 \end{pmatrix} \quad Y_N = [x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(K)]^T$$

获得时间响应函数为：

$$x^{(1)}(t) = \left(x^{(1)}(0) - \frac{u}{a} \right) e^{-at} + \frac{u}{a}$$

式中： $x^{(1)}(t)$ 为系统预测值（累加数据）； $x^{(1)}(0)$ 为系统初始值； a, u 为预测参数； e^{-a} 为系统发展指数； t 为时间值。

若 e^{-a} 的指数 $-at$ 为正值，则系统具有无限发展的态势，并随 $|a|$ 值的增大而发展速度增快；若 $-at$ 为负值，则系统发展趋于衰减，发展态势不佳，而且随着 $|a|$ 值的增大而衰减愈烈。故 a 为系统的发展系数。为便于比较，令 $c = -a$ 。

2、系统的灰色经济分析。根据关联度计算与预测分析，可以得到流域总产值与农林牧副其它业产值的关联度 γ_{0k} 及农林牧副其它业发展态势的 c 值：

关联度 γ_{0k} 与 c 值表

总产值与各业产值的关联度 γ_{0k}		各业 c 值	
农业	$\gamma_{01} = 0.87$	农业	$c_1 = 0.1067$
林业	$\gamma_{02} = 0.78$	林业	$c_2 = 0.2246$
牧业	$\gamma_{03} = 0.75$	牧业	$c_3 = 0.2165$
副业	$\gamma_{04} = 0.76$	副业	$c_4 = 0.0036$
其它	$\gamma_{05} = 0.75$	其它	$c_5 = 0.3037$

从上表可以看出， γ_{0k} 值中， γ_{01} 最大，说明流域经济是以农业为主体的经济结构，但 c_1 值小，说明农业发展态势缓慢，农业的经营管理还不够完善。从 γ_{0k} 与 c 值来看，林业和牧业具有很大的潜力；如果引起重视，这两业就能得以迅速发展。要促进整个系统的经济发展，必须农、林、牧、副、工多种经营，相互依赖，相互配合，形成网状的立体经济结构。目前，五业中，林牧业是一薄弱环节，同时也是副业、农业和各业发展的限制因素。既然林牧具有潜力，当然应该挖掘潜力，变劣势为优势，从而使农、林、牧、副各业形成一个整体结构。要改善该流域经济结构的现状，必须从土地利用的结构来加以考虑。因此，发展流域经济的关键在于如何合理利用土地。

(三) 土地分级。根据《山西省黄土区小流域（荒溪）水土流失综合因子调查方法细则（试行）》，对白草沟小流域以地块为单元进行了综合调查，全流域调查有962个地块单元。为了进一步的系统规划，须对地块进行质量评定，即土地分级。

根据王礼先、洪惜英等《山西省黄土区小流域（荒溪）水土流失综合因子调查方法细则（试行）》，参考山西省水土保持研究所在中阳县刘家湾小流域土地适宜性分级标准，参考阎树文、孙立达等《宁夏西吉县黄土区小流域水土流失综合治理的研究》中关于土地适宜性分级标准，并参考高志义等《黄土高原立地条件类型划分和适地适树研究报告》中关于晋陕黄土丘陵沟壑区划

分结果，特拟定土地质量评价标准（即土地质量分级标准，见下表）。

根据分级标准，流域土地分级结果如下：

流域土地分级结果表

土地级	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
面积(km ²)	0.4744	3.2458	3.4479	14.4877	10.0103	17.7268	15.7263	4.2086

流域土地质量分级表

指 标	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级	VI 级	VII 级	VIII 级
地貌部位	川地	阶地	梁崩坡山	梁崩坡山	梁崩顶	沟坡	沟坡	沟底道
利用现状	水田 水浇地	水平梯田 坝地	缓坡地 特用地 苗圃	坡旱地 果园 桑园 经济林地	人工草地 人工用材林 改良草地	天然林地 灌木林地 天然草地	疏林地 迹地 荒草坡	难利用地
坡 向	平坡	阴坡	阴坡	半阴	半阴	半阳	半阳	阳坡
坡 度	<3°	3°—7°	7°—15°	15°—20°	20°—25°	25°—35°	35°—45°	>45°
侵蚀类型	无	无	耕地面蚀	鳞片状面蚀	沟蚀	重力侵蚀	山洪	泥石流
侵蚀程度	无	无	轻 微 弱 度	一 般 中 度	严 重 强 度	很 严 重 极 强 度	非 常 严 重 剧 烈	非 常 严 重 剧 烈
侵蚀强度	无	无	弱 度	中 度	强 度	极 强 度	剧 烈	剧 烈
交通条件	好	好	较 好	中	中	较 差	困 难	困 难
母质类型	其 它	其 它	其 它	红黄土	红黄土	红 土	红 土	红 土

三、系统规划

要解决系统存在的问题，使系统能更有效、高速度、稳定地发展，必须对系统进行规划。按系统工程的原理，采用多目标数学规划方法对系统进行最优规划。

多目标数学规划的标准形式为：

$$(vp) \begin{cases} v - \min [f_1(x), \dots, f_p(x)]^T \\ g_i(x) \geq 0 \quad i = 1, \dots, m \end{cases}$$

式中： $x = [x_1, \dots, x_n]^T \in E_n$

即规划中的活动变量（决策变量）

$v - \min$ 表示对p个目标函数

$[f_1(x), \dots, f_p(x)]^T$ 求最小, 以区别于单目标优化, 且 $p \geq 2$

$g_i(x) \geq 0$ 为约束矩阵

(一) 目标函数的确定。根据系统诊断的结果及系统本身的运动规律来看, 系统的目的是最终达到经济效益高, 满足社会需要, 而且生态效益好, 从而使系统保持稳定发展的趋势, 保证系统平衡、协调的发展。

经济效益的指标通过“投入量”与“产出量”反映出来, 所以用纯效益和投资量表示比较合适。生态效益指标, 在水土流失严重的流域系统内, 首先要控制水土流失, 使生态的恶性循环向良性循环转化。在此基础上, 要求系统有大的能量流动, 即系统能够最有效地进行光合作用, 摄取能量, 为进一步的能流与物流提供物质基础, 为此选定土壤流失量最小和生物量最大作为系统的目标函数。

$$\text{即: } \begin{cases} \text{MAX} & \text{PROFIT} = \sum_j C_{p,j} X_j \\ \text{MIN} & \text{COST} = \sum_j C_{c,j} X_j \\ \text{MIN} & \text{EROSION} = \sum_j C_{e,j} X_j \\ \text{MAX} & \text{QPB} = \sum_j C_{q,j} X_j \end{cases}$$

式中: PROFIT—经济纯效益 (元)

COST—投资量 (元)

EROSION—土壤流失量 (吨)

QPB—生物量 (公斤)

$C_{p,j}, C_{c,j}, C_{e,j}, C_{q,j}$ 是价值系数,

$j = 1, 2, \dots, N$

X_j 为决策变量。

(二) 确定约束矩阵:

1、种植业约束。设第 u 级土地上第 i 种作物单位面积第 j 种产品的产量为 A'_{i-u-j} , 则第 j 种产品的产量约束:

$$R'_j \geq \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{u=1}^u A'_{i-u-j} X'_{i-u} \geq r'_j \quad (3-1)$$

$j = 1, 2, \dots, m,$

式中: R'_j, r'_j 为第 j 种农产品产量的上下限, 由于系统内粮食必须自给,

所以

$$\sum_{i=1}^{r_1} \sum_{j=1}^{u_1} \sum_{u=1}^u A'_{i-u-j} X'_{i-u} \geq \sum_{i=1}^{l_1} \sum_{u=1}^u S'_{i-u} X'_{i-u} + G_m + G_f + G_g + G_s \quad (3-2)$$

式(3-2)中, S'_{i-u} 为第u类地上种第i种作物的每公顷需种子量, $G_m, G_r, G_g,$

G_s 分别为系统内所需的口粮、饲料粮、公粮、商品粮。

设第r种到 h_1 种农产品的秸秆为 y'_j , 则秸秆总产量须满足:

$$\sum_{j=r}^{h_1} y'_j \geq Q'_f + Q'_o + Q'_m + Q'_g \quad (3-3)$$

式(3-3)中, 不等式右边各项分别为粗饲料、有机肥、燃料和其它用秸秆量。

2、林业约束。设第u级地上第i林种单位面积第j种产品的产量为 A^2_{i-u-j} , 则第j种林产品的总产量约束为:

$$R_j^2 \geq \sum_{i=1}^{n_2} \sum_{u=1}^u A^2_{i-u-j} X^2_{i-u} \geq r_j^2 \quad (3-4)$$

式中: R_j^2, r_j^2 为约束的上下限。

为建立良好的生态环境, 森林覆盖率要有一定的约束, 设为 b_0 ,

$$\text{则: } \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{u=1}^u X^2_{i-u} / L_0 \geq b_0 \quad (3-5)$$

式中: L_0 为系统的总面积。

根据系统需要, 林种之间要有适当的比例加以协调平衡, 设第r林种与第r+1林种的比例为 K_i , 则

$$\sum_{u=1}^u X^2_{r-u} / \sum_{u=1}^u X^2_{r+1-u} \geq K_i \quad (5-6)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, n_2 - 1,$

$$r + 1 = 2, 3, \dots, n_2,$$

3、畜牧业约束。设第j种畜禽在规划年度的数量为 X_j^4 , 且上下限分别为 R_j^4, r_j^4 ,

$$\text{则: } R_j^4 \geq X_j^4 \geq r_j^4 \quad (3-7)$$

$$j = 1, 2, \dots, n_4$$

畜禽结构也要协调平衡, 满足一定的比例关系, 设第i种畜(禽)与第j种畜(禽)数量比例为 K_i^4 , 则

$$X_i^4 / X_j^4 \geq K_i^4 \quad (3-8)$$

$$i = 1, 2, \dots, n_4 - 1$$

$$j = 2, 3, \dots, n_4$$

精饲料约束。设第*i*种畜（禽）的精饲料年需要量为 F_i^4 ，则

$$\sum_{i=1}^{n_4} F_i^4 X_i^4 \leq G_r \quad (3-9)$$

G_r 为种植业向畜牧业提供的精饲料量

产草量与需草量平衡。设第*i*种草在第u类地上的单位面积年产草量为 L_{i-u}^3 ，第*j*种畜或禽每年每头（1只）需草量为 l_j^4 ，

$$\text{则：} \sum_{i=1}^u L_{i-u}^3 X_{i-u}^3 + Q_r' \geq \sum_{i=1}^{n_4} l_i^4 X_i^4 \quad (3-10)$$

式（3-10）中： Q_r' 表示种植业提供粗饲料秸秆量。

4、劳力、畜力约束。设规划年度末的人口为 m^5 ，且劳力占总人口比例为 a_1^5 ，则劳力总数为

$$m_L^5 = a_1^5 m^5 \quad (3-11)$$

设 C_{i-u}^j 为第u类地上*j*业（种植业、林业、畜牧业）单位*j*种产品所需劳工日数，

$$\text{则：} \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^n \sum_{u=1}^u C_{i-u}^j X_{i-u}^j \leq a_1 m_L^5 \quad (3-12)$$

式中： $a_1 m_L^5$ 为系统可提供的总劳工日数

同理，设 g_{i-u}^j 为第u类地上*j*业（种植业、林业、畜牧业）生产单位*i*种产品所需畜工日数，

$$\text{则：} \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^n \sum_{u=1}^u g_{i-u}^j X_{i-u}^j \leq a_1' \sum_{i=1}^{K_4} X_i^4 \quad (3-13)$$

5、土地资源约束。设第*j*业（种植业、林业、牧业）第*i*种作物（林种、草种）的上下限面积约束为 R_i^j ， r_i^j ，

$$\text{则：} r_i^j \leq \sum_{u=1}^u X_{i-u}^j \leq R_i^j \quad (3-14)$$

$$i = 1, 2, \dots, n_j$$

$$j = 1, 2, 3$$

其它用地（村庄、交通等）约束：

设第*j*种用地类型在第u类地上的面积为

X_{j-u}^0 , 且有 n_s 种用途, 则

$$r_j^0 \leq \sum_{j=1}^{n_s} X_{j-u}^0 \leq R_j^0 \quad (3-15)$$

式中: R_j^0 , r_j^0 为约束条件的上下限。

土地类型(各土地级)约束。系统内部土地分成 u 类, 各类地面积是常数。设第 u 类地面积为 A_u , 则:

$$\sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^n X_{i-u}^j = A_u \quad (3-16)$$

式中: $u = 1, 2, \dots, 8$, 且当 $j = 4$ 时, 令 $X_{i-u}^4 = 0$

(因为此变量被定义为畜禽数量)

6、肥料平衡。有机肥的来源主要是人类、畜禽类、绿肥、秸秆还田, 则有机肥可供应总量为:

$$y_1 = y_1 + y_w^4 + \sum_{i=1}^{K_3} \sum_{u=1}^n m_{i-u}^3 X_{i-u}^3 + a_3 Q_0' \quad (3-17)$$

式中: y_1 , y_w^4 , $\sum_{i=1}^{K_3} \sum_{u=1}^n m_{i-u}^3 X_{i-u}^3$, $a_3 Q_0'$ 分别为人粪量、畜禽粪、绿肥及秸秆还田。

设 T_{i-u}^j 为第 u 类地上 j 业第 i 种作物单位面积需肥量, 则总需肥量为:

$$y_n = \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^n \sum_{u=1}^n T_{i-u}^j X_{i-u}^j \quad (3-18)$$

所以, 要求满足:

$$y_n \geq y_n \quad (3-19)$$

由此, 建立了一般情况下的土地利用规划模型, 对于具体的小流域, 还须收集参数, 并根据具体情况, 增删约束方程, 从抽象的符号模型转化为数据模型。以百草沟小流域为例, 我们建立了数据模型, 有 66 个决策变量 (X_{i-u}^j), 62 个约束方程式, 据此求出模型的最优解。

(三) 模型求解。利用上述模型, 在北京林业大学计算中心中型机 FACOM 上, 进行求解, 最后求得最优结果:

经济纯收入 PROFIT = 1,119 万元

土壤流失量 EROSION = 66,420 吨

投资 COST = 464.6 万元

生物量 QPB = 13,900 吨

那么按此结果, 小流域系统到 2000 年, 每人平均纯收入 1,700 元, 达到翻番的目的; 水土流失也得到控制, 从 37 万吨减少到 6.6 万吨。农林牧土地利用比例从 3 : 4 : 1 转变为 1 : 3 : 1, 林草覆盖率为 67%, 提高了 20%。规划实现后, 经济效益显著, 生态环境得到改善, 系统的整体功能越来越得到充分的发挥。

年 度	每人平均口粮 (公斤)	每人平均纯收入 (元)	土壤流失量 (万吨)	生物量 (吨)
1985年	323	153	37.0	9,184
2000年	574	1,700	6.6	13,900

四、结论及建议

1、应用系统工程的思路，把流域作为一个系统整体进行分析。通过系统诊断，确诊出系统的症结所在，通过系统规划，建立了流域土地利用的优化模型；

2、采用多目标的数学模型，克服了单目标单因素分析的不足，也符合流域综合治理开发的实际要求；

3、流域土地利用数学模型，具有一般性，适合于黄土丘陵沟壑区。对于具体小流域可根据调查所需参数，增加有关约束方程，即可建立起某一系统的土地利用规划模型。

4、本文初步探讨了系统工程的方法如何运用于流域系统，侧重于方法、步骤的研究，以起抛砖引玉之作用。模型所需参数，影响整个模型的精度与质量，在提高参数的精度上还需要作很多的基础工作。愿与同行的共同努力，使系统工程得以广泛地应用和推广。

参考文献

- [1] 邓聚龙：《灰色系统（社会·经济）》，国防工业出版社，1985年12月。
- [2] 阎文瑛、罗建军：“区域经济优势因素分析及最优经济模型的选择”，《农业系统科学与综合研究》，1986年第1期。
- [3] 清华大学编：《运筹学》，清华大学出版社，1984年。
- [4] 邵燮麟编：《控制论的模型化方法及应用》，上海科学技术文献出版社，1985年。
- [5] 秋山稷，西川智登：《系统工程》，机械工业出版社，1983年。

APPLICATION OF PRINCIPLE OF SYSTEM ENGINEERING TO THE LAND USE PLANNING OF A WATERSHED

—Taking White-Grass Gully in Zhongyang County of Shanxi Province
as an Example

Wang Lixian and Liu Xiaobao
(Beijing Forestry University)

Abstract

The principle of system engineering is used to diagnose White-Grass Gully watershed systematically, and multi-objective planning mathematical model is constructed. The optimal solutions of model are obtained when the objective function, that is, greatest pure economic income, least soil loss, minimum investment and maximum biomass, is contented.