

小流域水土保持优化模式探讨

温 是

(黑龙江省水土保持科学研究所)

提 要

运用系统工程方法进行小流域综合治理的核心是建立数学模型。如何建立符合当地自然和经济规律的优化模型,以体现综合效益,是目前急需研究解决的问题。本文以黑龙江省克山县兴隆小流域的综合治理规划中的目标函数综合法为例,探讨了该方法的有效性。应用此一方法,使该小流域综合治理建模时选定的四项目标:1. 纯收入最大;2. 投资最省;3. 有效保持水土;4. 粮产量最高,均达到满意的程度。

关键词: 系统工程 优化模型 目标函数综合法 小流域综合治理

一、基本情况

(一) 自然情况 兴隆小流域地处世界三大片黑土之一的东北黑土侵蚀区,位于黑龙江省嫩平原北部克山县城西7 km处。地理位置东经 $125^{\circ}10'51''$ 至 $126^{\circ}08'18''$,北纬 $47^{\circ}50'$ 至 $48^{\circ}33'47''$ 。流域呈不规则六边形。总面积 12.641km^2 ,海拔 $217\sim 301\text{m}$,相对高差 83.7m 。地势南高北低,上游地形复杂。流域内属寒温带大陆性季风气候,寒暑变化明显。年平均气温 1°C ,最高气温 38°C ,最低气温 -42°C 。无霜期120天左右,全年日照 $2\,399\text{h}$ 。平均年降水量 510mm ,生长季干燥指数1.0。年有效积温 $2\,400^{\circ}\text{C}$ 。年5级以上大风平均25天~30天。流域内土壤为黑土,母质多为黄土状亚粘土。流域内现有林地 $2\,596$ 亩,其中人工林 638 亩,树种以落叶松、小黑杨为主,也有少量灌木柳。土地利用现状见表1。

表1 兴隆小流域土地利用现状统计表

项 目	农 业	林 业	牧 业	其 它
面积(亩)	14 644.5	2 596	120	1 601
百分比(%)	77.23	13.70	0.63	8.40

(二) 社会经济情况 兴隆小流域位于克山镇与古城镇之间,南有铁路,北有公路,具有发展商品生产的优越条件。流域内现有人口1 773人,劳力341人。有马、驴、骡183匹,羊130只,牛156头。试点前三年平均粮食总产 146.45万kg ,亩产 100kg ;平均总收入 $34.6\,018$ 万元,其中农业收入 29.67 万元,林业收入 0.173 万元,牧业收入 $0.8\,208$ 万元,工副业收入 3.938 万元,人均收入 197.6 元。

(三) 水土流失情况 全流域水土流失面积 $10\,234.5$ 亩,占总面积的54%,土壤侵蚀模数 $5\,000\sim 8\,000\text{t}/\text{km}^2\cdot\text{a}$ 。其中耕地侵蚀面积为 $7\,272$ 亩,占现有侵蚀面积的71%,耕地中侵蚀程度中度以上的有 $3\,772.5$ 亩,占耕地侵蚀面积的52.2%。流域内共有大小侵蚀沟48条,主沟道长

5 160m, 沟道总长28 740m, 沟壑面积843.42亩, 沟壑密度为2.27km/km²。

综上所述, 该流域存在的主要问题是: 土地利用不合理, 农、林、牧矛盾突出; 耕作制度不合理, 土地用养脱节, 土壤肥力衰退; 植被稀疏, 水土流失严重, 粮食产量下降, 群众生活困难, 生态环境日益恶化。

二、农林牧业综合发展的调整方向和途径

(一) **调整土地利用结构** 兴隆流域治理前农林牧业用地比例为77.23:13.7:0.63, 土地利用极不合理。针对这一实际情况, 注意了以农为主, 林牧结合, 将牧业做为突破口, 用多目标综合方法建立整体优化模型, 调整现有各业用地比例, 促使系统发挥整体最佳功能, 使系统输出最大。

(二) **提高单位面积产量** 1.建设水平梯田和坡式梯田, 加速坡耕地改造。对坡度较大的宜农地, 以地貌单元沿着等高线与坡面平行, 自下而上修筑水平梯田和坡式梯田, 在梯田埂坎上种植黄花菜, 串叶松香草、苕条等。2.大力推广粮草间、混、套种和复种, 扩大粮草间、套、轮作面积, 以草肥田, 以肥调水, 以草养畜积肥, 增施有机肥, 加速坡耕地改造培肥步伐, 使粮食作物单位面积产量显著提高。3.增加地表植被, 拦蓄降雨, 保水保土保肥。由于林草覆盖, 降低地表径流速率, 使耕地可以接纳更多的水, 以增加土壤水分, 减少泥沙下泄, 保住表层肥土。

(三) **发展林业生产, 改善环境, 增加收入** 按不同地类和立地条件, 采取工程措施和生物措施相结合, 布设不同林种、树种, 形成完整防护体系。林业发展以水土保持林为主, 乔灌结合, 生态经济效益兼顾。其林种配置主要有: 分水岭防护林, 坡面防蚀林, 道路防蚀用材林, 固沟防冲林, 农田防护林等。

(四) **种草养畜, 发展牧业生产** 在荒坡及部分退耕坡地上, 种植牧草, 并利用粮草间、套、轮作扩大豆科牧草种植面积, 以促进畜牧业的发展, 提高治理效益。

三、建立模型与求解

(一) 数学模型及求解途径

综合规划的数学表达式为:

$$\text{约束条件: } \begin{cases} \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \leq b_i & (\text{或} \geq b_i), \quad (j=1, 2, \dots, n) \\ x_i \geq 0 \end{cases}$$

$$\text{目标函数 } \text{MAX} F(x) = \sum \lambda_n f_n(x)$$

式中: x_j ——决策变量;

a_i ——约束条件中决策变量系数;

$F(x)$ ——综合目标函数;

$f(x)$ ——各目标在单目标情况下的目标值。

c_j ——决策变量系数;

b_i ——资源限制量;

λ_n ——决策目标相应的权系数;

求解途径是: 首先求单目标函数优化解, 并求出体现其中一个目标函数最优解时, 其它各目标函数的值。然后采用目标函数综合法, 先对目标函数 $f_1(x)$, $f_2(x)$, $f_3(x)$... $f_n(x)$ 按其重要程度求其相应的权系数 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$, 且 $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n = 1$, 再用 $F(x) = \lambda_1 f_1(x) + \lambda_2 f_2(x) + \lambda_3 f_3(x) + \dots + \lambda_n f_n(x)$ 作为综合目标函数, 求综合最优解。具体做法是, 解下列方程

组:

$$\begin{cases} \lambda_1 f'_1 + \lambda_2 f'_2 + \dots + \lambda_n f'_n = \alpha \\ \lambda_1 f''_1 + \lambda_2 f''_2 + \dots + \lambda_n f''_n = \alpha \\ \vdots \\ \lambda_1 f'''_1 + \lambda_2 f'''_2 + \dots + \lambda_n f'''_n = \alpha \\ \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = 1 \end{cases}$$

求出各目标相应的权系数 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 的值, 再由 $F(x) = \lambda_1 f_1(x) + \lambda_2 f_2(x) + \dots + \lambda_n f_n(x)$, 求得综合目标函数, 在满足同一约束条件的情况下, 求得综合优化解。

(二) 目标选择

小流域生态经济系统是由其生态系统和经济系统复合而成的统一整体, 其系统结构应为其系统目标服务, 以便发挥整体最佳功能。根据兴隆小流域自然条件, 社会经济情况, 土地利用现状, 水土流失状况, 以及治理要求, 确定四个目标。

第一, 小流域综合治理的目标, 首先是在合理利用土地的基础上, 不断提高当地群众的经济收入, 因此选经济纯收入最大作为目标之一。第二, 模型实施必须考虑国家以及政府和群众在经济和劳动力方面的承受能力, 因此选投资最省作为规划的另一目标。第三, 通过调整现有土地利用结构, 逐步达到合理利用土地资源, 有效防止水土流失, 不断提高土地生产能力是综合治理的一个主要方面, 因此选定土壤流失量最少作为其目标。第四, 兴隆小流域, 地处黑土区, 是国家商品粮基地, 改造低产田, 增加农业生产后劲, 促进粮食生产稳产高产, 是模型要解决的另一主要任务, 因此选粮食产量最大作为第四个目标。

(三) 参数确定

参数的选取关系到优化模型的成败。因为只有通过参数的合理选取, 才能使静态模型接近离散时间的动态系统, 也才能反映科技进步、社会发展对系统发展的影响。本模型的参数确定, 主要采用加权平均, 灰色系统GM(1,1)模型, 非线性回归预测方法分阶段估取和求算确定。

(四) 模型设计

1. 决策变量设计

在根据兴隆小流域土地质量分类及适宜性评价研究基础上, 本着抓要点, 筛选影响大的因素设置变量的原则, 设置了如下的决策变量:

- | | |
|-----------------------------|-----------------------------|
| x_1 ——1级地种小麦亩数; | x_2 ——2级地种小麦亩数; |
| x_3 ——3级地修梯田种小麦亩数; | x_4 ——4级地修梯田种小麦亩数; |
| x_5 ——1级地种玉米亩数; | x_6 ——2级地加修地埂生物带种玉米亩数; |
| x_7 ——3级地修坡式梯田种玉米亩数; | x_8 ——4级地修梯田种玉米亩数; |
| x_9 ——1级地种大豆亩数 | x_{10} ——2级地加修地埂生物带种大豆亩数; |
| x_{11} ——3级地修坡式梯田种大豆亩数; | x_{12} ——4级地修坡式过渡梯田种大豆亩数; |
| x_{13} ——3级地种小杂粮亩数; | x_{14} ——4级地种小杂粮亩数; |
| x_{15} ——1级地上蔬菜亩数; | x_{16} ——2级地上油料作物亩数; |
| x_{17} ——3级地修坡式梯田油料作物亩数; | x_{18} ——4级地修坡式梯田种油料作物亩数; |
| x_{19} ——2级地上亚麻亩数; | x_{20} ——3级地加地埂生物带种亚麻亩数; |
| x_{21} ——3级地上人工牧草亩数; | x_{22} ——4级地上人工牧草亩数; |
| x_{23} ——5级地上人工牧草亩数; | x_{24} ——2级地上薪炭林(间作放牧)亩数 |
| x_{25} ——5级地上薪炭林(间作放牧)亩数; | x_{26} ——6级地上薪炭林亩数; |

x_{27} ——3级地上混交林亩数;

x_{28} ——4级地上混交林亩数;

x_{28} ——5级地上混交林亩数;

x_{30} ——用材林在3级地上亩数;

x_{31} ——用材林在4级地上亩数;

x_{32} ——防护林在5级地上亩数;

x_{33} ——防护林在6级地上亩数;

x_{34} ——2级地上粮草作亩数;

x_{35} ——3级地上粮草作亩数;

x_{36} ——大牲畜发展头数;

x_{37} ——奶牛发展头数;

x_{38} ——猪发展头数;

x_{39} ——鸡发展头数;

x_{40} ——鸭鹅发展头数。

2. 约束方程建立

根据流域土地资源量, 人口与粮油、畜牧与饲料、产柴与用柴、产量与肥料, 劳力与用工、生产发展和政府及群众生活要求, 共分四大类, 构造了25个约束方程。

(1) 土地约束:

$$\textcircled{1} x_1 + x_5 + x_9 + x_{15} = 2\ 988; \quad \textcircled{2} x_2 + x_6 + x_{10} + x_{16} + x_{19} + x_{24} + x_{34} = 1\ 755$$

$$\textcircled{3} x_3 + x_7 + x_{11} + x_{13} + x_{17} + x_{20} + x_{27} + x_{30} + x_{35} + x_{21} = 3\ 234$$

$$\textcircled{4} x_4 + x_8 + x_{12} + x_{14} + x_{18} + x_{28} + x_{31} + x_{32} = 6\ 852$$

$$\textcircled{5} x_{25} + x_{29} + x_{32} + x_{23} = 2\ 042.5 \quad \textcircled{6} x_{26} + x_{33} = 1\ 893.5$$

(2) 生产发展约束:

保持蔬菜自给, 人均0.1亩(人口按12%增长, 到1992年为1 865人)。 $\textcircled{7} x_{15} = 186.5$

为满足政府对粮食生产的要求, 人均粮田不低于5亩。 $\textcircled{8} x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} \geq 9\ 325$

人工草场不少于2 000亩 $\textcircled{9} x_{21} + x_{22} + x_{23} \geq 2\ 000$

为建立一个良好的森林环境, 森林面积应不少于流域总面积的15%。 $\textcircled{10} x_{24} + x_{25} + x_{26} + x_{27} + x_{28} + x_{29} + x_{30} + x_{31} + x_{32} + x_{33} \geq 3\ 792$

为满足防止水土流失, 发展商品生产的需要, 薪炭林(间作放牧)应不少于1 000亩。

$$\textcircled{11} x_{24} + x_{25} + x_{26} \geq 1\ 000$$

除饲料粮外, 人均产粮不少于750kg。 $\textcircled{12} 500x_1 + 450x_2 + 400x_3 + 400x_4 + 600x_5 + 550x_6 + 500x_7 + 500x_8 + 300x_9 + 250x_{10} + 250x_{11} + 200x_{12} + 200x_{13} + 100x_{14} + 600x_{34} + 500x_{35} \geq 2\ 797\ 500$

小麦产量不低于559 500kg $\textcircled{13} 500x_1 + 450x_2 + 400x_3 + 400x_4 \geq 559\ 500$

大豆总产量不低于186 500kg $\textcircled{14} 300x_9 + 250x_{10} + 250x_{11} + 200x_{12} \geq 186\ 500$

流域每年可投基建工118 800个。 $\textcircled{15} x_2 + 2x_3 + 30x_4 + x_6 + 2x_7 + 30x_8 + x_{10} + 2x_{11} + 2x_{12} + 2x_{13} + 2x_{14} + 2x_{16} + 2x_{17} + 2x_{18} + 2x_{19} + 2x_{20} + x_{24} + x_{25} + x_{26} + x_{27} + x_{28} + x_{29} + x_{30} + x_{31} + x_{32} + x_{33} + 2x_{21} + 2x_{22} + 2x_{23} \leq 118\ 800$

流域劳力每年可投生产用工158 400个。 $\textcircled{16} 12x_1 + 12x_2 + 12x_3 + 12x_4 + 8x_5 + 8x_6 + 8x_7 + 8x_8 + 4x_9 + 4x_{10} + 4x_{11} + 4x_{12} + 6x_{13} + 6x_{14} + 15x_{15} + 6x_{16} + 6x_{17} + 6x_{18} + 9x_{19} + 9x_{20} + 7x_{24} + 7x_{25} + 7x_{26} + 9x_{27} + 9x_{28} + 9x_{29} + 9x_{30} + 9x_{31} + 9x_{32} + 9x_{33} + 8x_{34} + 18x_{36} + 20x_{37} + 12x_{38} + 5x_{39} + 5x_{40} + 8x_{35} + 2x_{21} + 2x_{22} + 2x_{23} \leq 158\ 400$

(3) 平衡约束:

饲草平衡约束:

$$\textcircled{17} 160x_1 + 140x_2 + 120x_3 + 120x_4 + 200x_5 + 180x_6 + 160x_7 + 160x_8 + 160x_9 + 120x_{10} + 120x_{11} + 100x_{12} + 300x_{13} + 200x_{14} + 650x_{27} + 578x_{28} + 578x_{29} + 150x_{34} - 4\ 400x_{36} - 5\ 110x_{37}$$

$$-1\ 825x_{38} + 100x_{35} + 1\ 500x_{21} + 1\ 000x_{22} + 1\ 000x_{23} \geq 0$$

流域内家禽、家畜、人口粪便，年提供有机肥3 357 000kg。

$$\textcircled{18} 2\ 500x_1 + 2\ 500x_2 + 2\ 000x_3 + 2\ 500x_4 + 1\ 500x_5 + 1\ 500x_6 + 1\ 400x_7 + 2\ 500x_8 + 1\ 300x_9 + 1\ 300x_{10} + 1\ 300x_{11} + 1\ 300x_{12} + 1\ 500x_{13} + 1\ 500x_{14} + 1\ 500x_{15} + 1\ 500x_{16} + 1\ 500x_{17} + 1\ 500x_{18} + 1\ 000x_{34} + 1\ 000x_{35} (6\ 714\ 000) - 21\ 600x_{36} - 21\ 900x_{37} - 14\ 400x_{38} - 500x_{39} - 900x_{40} \leq 3\ 357\ 000$$

兴隆流域交通便利，群众对薪炭需求不大，到1992年需薪炭993 112.5kg。

$$\textcircled{19} 330x_1 + 286x_2 + 242x_3 + 110x_4 + 500x_5 + 400x_6 + 300x_7 + 300x_8 + 320x_9 + 288x_{10} + 272x_{11} + 224x_{12} + 272x_{13} + 160x_{14} + 600x_{24} + 540x_{25} + 540x_{26} + 157.3x_{30} + 150x_{31} + 142.5x_{32} + 136x_{33} \geq 993\ 112.5$$

饲料平衡约束：

$$\textcircled{20} 500x_1 + 450x_2 + 400x_3 + 400x_4 + 600x_5 + 550x_6 + 500x_7 + 500x_8 + 300x_9 + 250x_{10} + 250x_{11} + 200x_{12} + 200x_{13} + 150x_{14} + 600x_{34} + 500x_{35} - 800x_{36} - 1\ 095x_{37} - 500x_{38} - 108x_{39} - 110x_{40} \geq 149\ 200$$

(4) 畜牧业约束：

大牲畜上限250头 $\textcircled{21} x_{36} \leq 250$

奶牛上限350头 $\textcircled{22} x_{37} \leq 350$ $\textcircled{23} x_{38} \leq 300$ $\textcircled{24} x_{39} \leq 1\ 500$ $\textcircled{25} x_{40} \leq 5\ 000$

3. 目标函数确定

纯收入 $f_1(x) = 84x_1 + 64x_2 + 64x_3 + 54x_4 + 75x_5 + 76.5x_6 + 60x_7 + 65x_8 + 48.25x_{10} + 48.25x_{11} + 32.5x_{12} + 80x_{13} + 75x_{14} + 120x_{15} + 65x_{16} + 48.25x_{17} + 48.25x_{18} + 95x_{19} + 90x_{20} + 4x_{24} + 10x_{25} + 10x_{26} + 10x_{27} + 10x_{28} + 10x_{29} + 57x_{30} + 50x_{31} + 50x_{32} + 46.5x_{33} + 80x_{34} + 80x_{35} + 140x_{36} + 660x_{37} + 223.2x_{38} + 15x_{39} + 21x_{40}$

粮食总产量最大 $f_2(x) = 500x_1 + 450x_2 + 400x_3 + 400x_4 + 600x_5 + 550x_6 + 500x_7 + 500x_8 + 300x_9 + 250x_{10} + 250x_{11} + 200x_{12} + 200x_{13} + 100x_{14} + 600x_{34} + 500x_{35}$

投资最省 $f_3(x) = 4.5x_2 + 8x_3 + 79x_4 + 4.5x_5 + 8x_7 + 79x_8 + 4.5x_{10} + 7x_{11} + 7x_{12} + 7x_{13} + 7x_{14} + 7x_{16} + 7x_{17} + 7x_{18} + 9x_{19} + 9x_{20} + 9.16x_{24} + 9.16x_{25} + 9.16x_{26} + 27.5x_{27} + 27.5x_{28} + 27.5x_{29} + 25x_{30} + 25x_{31} + 27x_{32} + 2x_{34} + 2x_{35} + 10x_{21} + 10x_{22} + 12.5x_{23}$

水土流失量最少 $f_4(x) = 0.333x_1 + 1.333x_2 + 4x_3 + 6.67x_4 + 0.2x_5 + 0.813x_6 + 2.44x_7 + 4.07x_8 + 0.3x_9 + 1.2x_{10} + 3.53x_{11} + 6x_{12} + 3.33x_{13} + 5.33x_{14} + 0.33x_{15} + 1.2x_{16} + 3.53x_{17} + 6x_{18} + 0.733x_{19} + 2.2x_{20} + 0.813x_{24} + 1x_{25} + 2x_{26} + 3.33x_{27} + 5.33x_{28} + x_{29} + 0.18x_{30} + 0.3x_{31} + x_{32} + 2x_{33} + 0.733x_{34} + 1.333x_{35} + 0.18x_{21} + 0.33x_{22} + 0.333x_{23}$

(五) 模型求解

将上述23个约束方程和四个目标函数，按电算要求输入长城0520计算机，采用多目标BASIC语言程序求解，在求得各目标优化解之后（略）求得综合最优解如下：

$$f_1(x) = 1\ 321\ 203 \quad f_2(x) = 6\ 090\ 172 \quad f_3(x) = 412\ 381 \quad f_4(x) = 39\ 918.13$$

$$F(x) = 7\ 863\ 674$$

$$\begin{aligned} x_1 &= 2\ 238 & x_2 &= 0 & x_3 &= 0 & x_4 &= 0 & x_5 &= 399.690\ 4 \\ x_6 &= 0 & x_7 &= 3\ 234 & x_8 &= 3\ 376.74 & x_9 &= 163.809\ 5 & x_{10} &= 0 \\ x_{11} &= 0 & x_{12} &= 1\ 619.286 & x_{13} &= 0 & x_{14} &= 0 & x_{15} &= 186.5 \\ x_{16} &= 0 & x_{17} &= 0 & x_{18} &= 0 & x_{19} &= 0 & x_{20} &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{array}{cccccc}
 x_{21} = 0 & x_{22} = 1\ 856 & x_{23} = 144 & x_{24} = 0 & x_{25} = 0 & \\
 x_{26} = 1000 & x_{27} = 0 & x_{28} = 0 & x_{29} = 0 & x_{30} = 0 & \\
 x_{31} = 0 & x_{32} = 1\ 898.5 & x_{33} = 893.5 & x_{34} = 1\ 755 & x_{35} = 0 & \\
 x_{36} = 250 & x_{37} = 350 & x_{38} = 300 & x_{39} = 1\ 321 & x_{40} = 152 &
 \end{array}$$

为了检验综合优化模型是否合理和稳定,除了根据两年来治理需要和反馈信息进行调整外,我们对变量、约束值进行了灵敏度分析,以及参数变化对优化设计的影响。通过分析,说明兴隆小流域优化模型是稳定、合理的。

四、结果分析

1. 土地利用趋于合理,生态平衡趋于协调,生态系统趋于良性循环,农、林、牧三业用地比例由原来的77.23:13.7:0.63调整为64.44:18.44:16.09,养殖业有较大发展,林草覆被可达30.57%。

2. 人民生活水平显著改善。规划实现后,经济纯收入可达到132.12万元,人均708元,比规划前的人均136元(不包括工副业收入)提高了572元。粮食总产达到304.5万kg,比规划前人均498kg提高了1 134.5kg。

3. 严重的水土流失得到有效控制。到1992年,流域的土壤侵蚀模数将由原来的7 000t/km²·y降为现在的2 000t/km²·y,减沙效益达70%以上。由此可见,所求结果完全符合建模时选定的四个目标。

注:本文得到巨仁先生,陈礼耕总工程师的精心指导,石长金和刘国君同志的大力帮助,在此表示感谢。

An Approach of the optimizing model for Xinglong small watershed on soil and water conservation, kesan county, HailongJiang province

Wen Shi

(Scientific Institute of soil and water conservation, HailongJing province, Bing
County, Hai long Jiang Province, 150400)

Abstract

The key for using system engineering to tackle a small watershed comprehensively is to form a mathematic model. How to formulate an optimizing model is a problem having to study urgently in order to obtain the overall benefit both under local condition and economical situation.

The paper followed a planning using an integration of goal functions for controlling Xing long Small watershed, Kesan county, Hai long Jiang Province to approach the efficiency of the method. Application of the method made the four goals, pure incomes, investment, soil and water conservation and food production maximum or minimum satisfisngly under controlling the small watershed.

Key Words: System engineering optimal model Unified method for target tuctin Comprehensive control of smallwatershed