

小流域多目标规划的实践与探索

柳林旺 雷元静 朱小勇 秦向阳

(水利部黄委会黄河上中游管理局·西安·710043)

文 摘 该文结合榆林沟流域1993~2000年综合治理与开发规划的实践,就小流域多目标规划模型设计和协调解等问题进行了探讨,并提出了一种可行的模型求解方法。

关键词 多目标规划 模型设计 求解方法 水土保持规划

Practice and Research on Multiple Objective Program at Small Watershed

Liu Linwang Lei Yuanjing Zhu Xiaoyong Qin Xiangyang

*(Administrative Bureau of the Upper and Middle Reaches of
Yellow River, the Yeouow River Commission of Water Conservancy, 710043, Xi'an Municipality)*

Abstract Based on practice of comprehensive harnessing and developing program at Yulin valley basin during 1993~2000, the model design and coordinated solution for the problem on multiple objective program at small watershed are studied. A feasible model solution method is advanced.

Keywords multiple objective program; model design; solution method; soil and water conservation program

小流域水土保持规划方法,从以定性为主的经验规划,逐步向以定量为主的系统优化发展。目前采用较多的线性规划方法,使规划由定性到定量,由有限几组方案的对比到数学模型的寻优求解,大大提高了规划的科学性,而现实小流域是一个生态、经济、社会的多效益、多产品、多功能目标系统,单目标模型很难予以准确的模拟。多目标规划方法,能充分体现小流域生态经济系统功能目标的多重性,因而有逐步取代单目标规划的趋势,但在实施性小流域规划的运用中,对于模型设计和协调求解等问题的处理,尚不成熟。我们结合榆林沟流域1993~2000年综合治理与开发规划的实践,就小流域多目标规划的模型设计和协调求解问题,作一新的探索。

1 试验流域概况

榆林沟流域是国家“八五”科技攻关“黄丘(I)副区沟道流域综合治理与开发研究”的试验示范小流域,位于陕西省米脂县中部,总面积65.6km²。流域内沟壑纵横,坡面破碎,沟壑密度

4. 37km/km²。年降水451.6mm。多年平均气温8.5℃,≥10℃积温3349℃,无霜期162天,土壤以黄土母质上发育的黄绵土、绵沙土为主。自然植被基本泯灭,形成以杨、槐、柳、柠条、苜蓿和草木樨等人工林草为主的植被景观。森林覆盖度22.9%,林草总盖度36.7%。

流域有人口9378人,其中有劳力3468个,人口密度143人/km²。流域土地利用情况如表1。农业用地占总土地面积的55.1%,林业用地占22.7%,牧业用地占14.0%。农耕地占的比重大。林牧业用地明显不足,而农地中坡耕地占一半以上,土地利用结构不够合理。流域有水土流失面积6288hm²亩,占总面积的95.8%,侵蚀模数达14600t/km²。经过近40年的治理,累计治理面积3169hm²亩,治理程度达50.3%。建成淤地坝121座,淤成坝地210.7hm²亩。水土流失得到一定控制,侵蚀模数减小到4178t/km²。但就整个流域看,生态失衡的局面尚未根本改变。严重的水土流失不仅使地表有机质丧失,生产力下降,而且使淤地坝迅速淤积,坝系整体安全受到严重威胁。

表1 榆林沟流域土地利用现状 hm²

项目	面积	所占比例(%)		项目	面积	所占比例(%)				
农业用地	梯田	1208.4	33.4	牧草地	人工草地	334.0	占牧业用地	36.3		
	坝地	210.8	5.8		天然草地	585.7		63.7		
	水地	24.4	0.7		合计	919.7	占总面积	14.0		
	林地	沟台	56.5	1.6	非生产用地	居民点	173.2	占非生产用地	45.9	
		坡地	2114.8	58.5		沟床	114.8			6.7
		合计	3614.9	占总面积		水面	9.6			1.8
乔木林		173.2	11.6	道路		18.2			3.4	
林业用地	灌木林	1035.7	69.5	陡坡	219.3		42.2			
	果园	264.7	17.8	合计	535.1		8.2			
	杂果林	16.6	1.1	累计	6559.9	占总面积	100.0			
	合计	1490.2	占总面积					22.7		

生态失衡及土地利用结构的不合理,导致经济系统处于不平衡的低水平状态。流域人口均口粮379kg,人均纯收入仅400元;牧畜饲草供应不足,每年重复“秋肥、春瘦”的消长模式;市场经济发育差,商品率仅16.4%。

2 治理与开发规划模型设计

2.1 数学模型

多目标规划的数学模型为:

求一组变量 $x_j(j = 1, 2, \dots, n)$ 的值,满足条件

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \text{ (或 } \geq b_i, = b_i)$$

$$x_j \geq 0, (j = 1, 2, \dots, m)$$

使 $F(x) = \sum \lambda_n f_n(x)$ 达到最优。

式中: x_j —决策变量; a_{ij} —决策变量系数; b_i —资源限制量; $F(x)$ —综合目标函数; $f_n(x)$ —单目标函数; λ_n —决策目标相应的权系数。

2.2 规划目标和目标函数设计

小流域生态经济系统是由生态系统和经济系统复合而成的统一整体,系统结构设计的战略目标有三个:即生态效益、经济效益和社会效益目标。该流域设计的目标为:

(1)生态效益目标。①有效地防治水土流失,使各项措施的减沙量最大;②实现土地的肥力

平衡,用地与养地相结合,保持土地较高的生产力。

(2)经济效益目标。①经济纯收入最大;②使土地的生产潜力尽可能地得到挖掘。

多目标优化问题,由于往往存在着目标冲突,要求各个目标同时实现最优十分困难。因此在具体设计中就应根据各目标的主次或轻重缓急的不同,将优先级最高的若干目标作为目标函数,其它目标转化为约束条件来处理。

在榆林沟流域示范区建设规划中,从“促进当地群众脱贫致富,减少入黄泥沙”的水土保持根本目的出发,选择纯收入和拦沙量最大作为目标函数,其数学表达式为:

$$\max f_1(x) = \sum_{i=1}^m a_i x_i (i = 1, 2, \dots, m)$$

$$\max f_2(x) = \sum_{j=1}^n a_j x_j (j = 1, 2, \dots, n)$$

式中: x_i —第 i 种生产利用面积; x_j —第 j 种拦(减)沙措施面积; a_i —第 i 种生产利用方式的单位面积纯收入; a_j —第 j 种措施单位面积拦(减)沙量。

2.3 决策变量设计

决策变量设计是实施性小流域规划模型设计的关键环节。一般以少而精作为基本原则,避免把通过一般计算即可确定的资源限量作为决策变量。为了使优化方案易于落实实施,土地利用变量设计应在保证土地适宜的前提下,同时反映出治理改良措施的差异。本规划设计决策变量如表 2。

表 2 榆林沟流域水土保持措施配置决策变量

土地类型	川水地	旱坝地、沟台地,旱梯田、人造平地			坡式梯田、梁峁盖地、塌地梯田,塄窝地		梁峁缓坡地、塌坡地、沟条地		梁峁中坡地		梁峁陡坡地,阴坡缓坡沟坡地	阳坡缓坡沟坡地、陡坡沟坡地	崖沟床等
	I	II	III W I	III	III T I	IV	IV T I	V	V T I	VI	VI	VII	
粮食作物	X_{11}	X_{21}	X_{211}	X_{31}	X_{321}	X_{41}	X_{421}	X_{51}	X_{521}	/	/	/	
经济作物	X_{12}	X_{22}	X_{212}	X_{32}	X_{322}	X_{42}	X_{422}	X_{52}	X_{522}	/	/	/	
果园	X_{13}	X_{23}	X_{213}	X_{33}	X_{323}	X_{43}	X_{423}	X_{53}	X_{523}	/	/	/	
乔木林	*	*	*	*	*	X_{44}	*	X_{54}	*	X_{64}	X_{74}	/	
灌木林	*	*	*	*	*	X_{45}	*	X_{55}	*	X_{65}	X_{75}	/	
人工草	*	*	*	*	*	X_{46}	*	X_{56}	*	X_{66}	/	/	
杂果林	*	*	*	*	*	*	*	*	*	X_{67}	/	/	
天然草	*	*	*	*	*	*	*	*	*	X_{68}	X_{78}	/	
暂未利用	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	X_{89}	

注: III W I——指沟台地、坝地等水利化后改为 I 级地; IV T I—IV 级地梯田化后改为 III 级地; x_{11} —粮食作物在 I 级地上的面积; x_{323} —果园在 III 改 I 级地上的面积。/——不适宜; *——不适宜; *——不考虑。

2.4 约束条件设计

(1)土地资源约束。各级土地的不同类生产利用面积之和等于该级地总面积。例如 V 级地有: $x_{51} + x_{52} + x_{53} + x_{54} + x_{55} + x_{56} + x_{521} + x_{522} + x_{523} = 887.1 \text{hm}^2$

(2)土地利用现状约束。即现有土地利用方式若基本合理,原则上予以保留。如现有 I 级地果园 1.7hm^2 ,则有: $x_{13} \geq 1.7 \text{hm}^2$

(3)粮食平衡约束。规划到 2000 年,流域人均占有粮食达到 400kg 小康标准,即有:

$$\sum A_i \cdot x_i - 400p_i \geq 0$$

式中: x_i, A_i —分别为第*i*种粮食种植面积及其单产; P_t —规划期末流域人口总数。

(4) 饲草供需平衡约束。即饲草生产量大于牲畜需要量。决策参数采用饲料单位,饲草需要量根据有关定额,为219标准饲养单位/羊单位·年。

$$\sum x_i \cdot P_i \cdot F_i - 219F_t \geq 0$$

式中: x_i —第*i*种产草地类; P_i —饲草利用率; F_i —折合标准饲料系数; F_t —规划期末牧畜总规模(羊单位)。

(5) 有机肥约束。肥料平衡根据协调型生态农业建设标准,即土地在满足肥料需要的条件下,有机肥施入量的比例不小于50%^[1]。粮食作物需纯肥8.6kg/100kg,经济作物及经济林需210kg/hm²。有机肥提供量根据有关资料并经实测核准,人年提供纯肥26.3kg/人,牧畜年提供6.8kg/羊单位。即有:

$$50\% \cdot x_i \cdot H_i - 26.3p_i - 6.77F_t \leq 0$$

式中: x_i —施肥面积; H_i —单位面积需肥量。

(6) 燃料平均约束。流域靠近神府东胜煤田,群众主要以煤为燃料,对薪柴的需求量较小。设计中只考虑非矿物燃料平衡。即:

$$\sum x_i \cdot P_i \cdot F_i - C_i \cdot P_t \geq 0$$

式中: x_i —第*i*种薪柴产出面积; P_i —薪柴利用率; F_i —折煤系数; C_i —人均年需薪柴量。

(7) 劳力平衡约束。根据国家的劳动义务工政策,每个劳动力年用于水土保持治理的投工数不超过30工日。即:

$$\sum W_i \cdot x_i - 30W_t \leq 0$$

式中: x_i —第*i*种治理措施面积; W_i —单位措施面积用工量; W_t —规划期内的劳动力总数。

(8) 投资约束。小流域治理与开发要充分考虑国家、地方政府以及当地群众治理投入的承受能力。通过投资来源分析,确定规划期内用于流域治理与开发的投资水平不超过6.5万元/km²。即有:

$$\sum I_i x_i \leq 65.6 \times 65000 (\text{元})$$

式中: x_i —第*i*种治理与开发措施面积; I_i —治理措施单位面积投资。

2.5 模型参数的确定

治理与开发措施投入定额参数,主要依据国家有关规定以及当地已建成水土保持项目投入情况,按照单位措施所投入的材料、劳务数量及价格等计算。农林牧等生产运行投入和产出定额参数,主要依据实地调查统计和实测资料,根据不同作物品种的种植比例、产品种类、产量、成本和价格等确定。措施拦(减)沙量指标参数根据天然地表地输沙模数乘以相应的减沙指标来计算。规划期末流域人口数量(P_t),采用自然增长率法模型预测获得。薪柴需求量(C_t)及牲畜发展总规模(F_t),分别以历年(1979~1993)的薪柴消耗量和牧畜数量为背景值,建立灰色预测GM(1,1)模型求解。规划期内劳动力总数,根据人口结构现状及预测期人口增长率推算。

3 模型求解与结果分析

3.1 模型求解方法

由于直接解决多目标问题的最优化十分困难,于是人们通常把多目标问题的协调解转化

为单目标问题的最优解。该方法需要对各个规划目标赋予权重,而权系数的确定,往往受目标函数量纲不统一的限制和规划者主观因素的干扰,因此具有较强的主观随意性。为了弥补求解方法的不足,规划者多通过对各目标赋予不同的权重,经过反复求解试验和分析比较,选择最佳方案。这一方法繁琐、费时,方案的选择也难免受规划者认识水平的影响。

本规划将目标函数效益系数序列进行标准化处理,运用统计均值法确定权系数,并采用线性加权和法建立综合单目标函数求解,在一定程度上消除了规划者的主观影响,且可一次性解决多目标问题。具体步骤为:

(1) 利用 $a'_i = a_i / \sqrt{\sum_{j=1}^m a_j^2}$ 和 $a'_j = a_j / \sqrt{\sum_{j=1}^n a_j^2}$ 分别模标准化 $\max f_1(x)$, $\max f_2(x)$ 效益系数序列,得 $\max f_1'(x)$ 和 $\max f_2'(x)$ 。

(2) 采用统计均值法确定各目标权系数。即请 m 位 ($m = 10$) 有关专家和规划决策者,对 n 个 ($n = 2$) 目标指标的重要性提出权重分配意见,每位专家或决策者提出权重分配为:

$$\lambda_k(\lambda) = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) (0 \leq \lambda_i \leq 1, \text{且} \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1)$$

统计量 $\bar{\lambda} = 1 / \sum_{k=1}^m \lambda_k(\lambda)$, 即为最终权重向量。经上述计算得: $\lambda_1 = 0.67$, $\lambda_2 = 0.33$ 。

(3) 采用 $100 \times [\lambda_1 f_1'(x) + \lambda_2 f_2'(x)]$ 转化为综合目标函数, 即有:

$$\max F(x) = 100 \times [\lambda_1 f_1'(x) + \lambda_2 f_2'(x)]$$

3.2 结果分析

经过计算机求解,得综合目标函数的优化结果如表3。

表3 水土保持措施综合配置优化方案

变量	优化值	变量	优化值	变量	优化值	变量	优化值	变量	优化值
X ₁₁	24.1	X ₃₁	0	X ₄₄	133.3	X ₅₄	22.7	X ₆₇	475.8
X ₁₂	0	X ₃₂	0	X ₄₅	0	X ₅₅	397.2	X ₆₈	0
X ₁₃	1.70	X ₃₃	180.3	X ₄₆	241.7	X ₅₆	92.3	X ₇₄	78.7
X ₂₁	1033.5	X ₃₂₁	162.4	X ₄₂₁	375.9	X ₅₂₁	76.1	X ₇₅	1407.4
X ₂₂	0	X ₃₂₂	0	X ₄₂₂	0	X ₅₂₂	298.8	X ₇₆	316.2
X ₂₃	372.3	X ₃₂₃	0	X ₄₂₃	0	X ₅₂₃	0	X ₈₉	1384.6
X ₂₁₁	19.6	X ₄₁	0	X ₅₁	0	X ₆₄	17.3		
X ₂₁₂	0	X ₄₂	0	X ₅₂	0	X ₆₅	288.5		
X ₂₁₃	0	X ₄₃	72.7	X ₅₃	0	X ₆₆	0		

从土地利用结构看,优化前农地占58.4%,林地占22.7%,牧草地占14.0%;优化后农地占30.0%,林地占51.6%,牧草地占9.8%。农林牧用地比例由原来的3.9:1.6:1调整为3.1:5.3:1。坡耕地有效地实行退耕,林草总面积大幅度增加,土地利用结构已趋于合理。从水土保持治理情况看,优化后治理与开发总面积达5708.7hm²,治理面积占总面积的87.0%。人均治理面积0.57hm²,其中基本农田0.19hm²,林草措施面积0.372hm²。预计到规划期末,人均占有粮食442kg,人均纯收入1012元,侵蚀模数由实施前的4178t/(km²·a)下降到811t/(km²·a),小流域生态经济系统平衡、稳定、协调发展,群众生活水平接近小康标准。

1993~1995年示范小流域初步建设表明,该模型设计指标切合实际,优化方案易于落实。治理与开发措施体系实施后,使流域出现了经济、生态效益同步增长的势头,侵蚀模数减少15.2%,人均占有粮食400kg,人均纯收入已达到600元以上,群众的温饱问题基本得到解决。⁴

结 论

(1)小流域是一个生态——社会经济的复合系统,多目标规划方法可以充分体现小流域生态、经济、社会的多效益、多产品、多功能目标特点,在榆林沟示范小流域建设规划中运用后,取得了良好的效果。

(2)由于目标冲突的存在,要求系统设计的各个目标同时实现最优并不现实,在模型设计中可根据各目标的主次或轻重缓急不同,把优先级最高的若干目标作为目标函数,其它目标转化为约束条件来处理。

(3)为了使规划方案切合实际,便于后期实施落实,决策变量应同时反映出不同的土地利用方式和治理改良措施,并将二者有机地协调与统一。

(4)将各单目标函数效益系数序列进行标准化处理,运用统计均值法确定权系数,并采用线性加权和法将多目标问题转化为综合单目标函数的最优化,是求解多目标优化问题的一个可行方法。

参 考 文 献

1 张壬午,王洪庆等.县级生态农业建设评价指标体系及其标准.农业环境保护,1992,11(3):111~117。

 (上接第46页)

5 陈禹. 信息系统分析与设计. 北京:电子工业出版社,1984

6 Peter F. Dale, John D. Mclaughlin 合著,赵言策等译. 土地信息管理(Land Information Management). 北京:科学技术文献出版社,1991. 2

7 王毓基等编著. 区域规划系统工程——原理与方法,湖南省科学技术规划办公室、湖南省系统工程学会, 1985. 8

8 刘闯. 在地理信息系统中土地评价模型的建模研究. 地域研究与开发,1990,9(3)

9 Coppock J T, Anderson E K. Editorial Review. Internatinal Journl of Geographic Information System, 1987,1(1)

10 Watershed Survey and Planning. FAO Watershed Management Field Manual,13/6. Roma, Italy:1990.