

小流域综合治理中的多目标规划模型应用

方红远

王 哲 吴雪虎 严克玉

(扬州大学水利与建筑工程学院·江苏扬州市·225009)

(江苏省溧水县水利农机局)

摘 要 小流域综合治理的现代意义是强调水土流失治理与流域经济持续发展紧密结合,必须综合考虑水土保持工程和水利工程建设、生态环境质量改善,以及经济发展等多种因素。因此,在小流域综合治理规划中运用多目标决策方法是有实际意义的。该文针对具体小流域的治理,阐述了多目标规划模型的建立及求解,并对备选方案进行了较全面的评价。 中图分类号: S157.2

关键词: 小流域综合治理 多目标规划 非劣解 方案评价

Application of Multiobjective Planning Model to Small Watershed Comprehensive Harnessing

Fang Hongyuan

(Water Conservancy and Architectural Engineering College, Yangzhou University,
Yangzhou City, Jiangsu Province, 225009, RPC)

Wang Zhe Wu Xuehu Yan Keyu

(Water Conservancy Bureau of Lishui County, Jiangsu Province)

Abstract The contemporary sense of small watershed comprehensive harnessing is to stress the point that controlling soil and water loss must combine with the sustained development of watershed economy, and must consider all kinds of factors fully, such as soil and water conservation projects construction, improvement of eco-environment quality and economic development, ect. . Therefore, it is valuable to apply the multiobjective decision into small watershed comprehensive harnessing planning. The building and solving of multiobjective planning model for a specific watershed, and the comprehensive evaluating of the alternatives are described.

Keywords: small watershed comprehensive harnessing; multiobjective planning; pareto-solution; alternative evaluation

小流域综合治理涉及到水土保持、水利工程建设、流域经济发展以及生态环境改善等许多因素,其具体内容已从过去的单纯水土流失治理转变到现在的水土流失治理与流域农村经济持续发展紧密结合的综合性治理。这种综合治理的特点为统一勘测,一次规划,分期实施方案。以水土保持为基础,合理调整农村产业结构为手段,实行立体开发,全面治理,以达到尽快提高流域内农民生活水平的目的。

由于小流域综合治理追求的是高标准、高效益、规模化,因此,其规划工作就显得至关重要。规划目标的合理性和实际可达性,规划方案的科学性和经济性会直接关系到综合治理的成效。传统的单一规划思想方法已很难满足这种全面规划工作的需求,必须寻求更为科学的新方法。本文针对苏南丘陵区段林小流域综合治理工程,阐述如何使用多目标决策方法解决规划方案的优化问题。

1 模型结构

根据多目标决策原理, 一个多目标最优化问题可表示为^[3,4]:

$$\max \text{ 或 } \min_{X} F(X) \quad (1)$$

$$\text{s. t. } R = \{X \mid G(X) \leq 0\} \quad (2)$$

其中: $F(X) = [f_1(X), f_2(X), \dots, f_m(X)]^T$; $G(X) = [g_1(X), g_2(X), \dots, g_l(X)]^T$; $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in E^n$ 。

小流域综合治理规划所考虑的目标应有三类, 即经济效益目标、生态效益目标和社会效益目标。但一般而言, 经济效益和生态效益是小流域治理的基础目标和原动力^[1,2], 它们与社会效益有着一定的因果关系, 即经济效益和生态效益的实现, 必将改善小流域工农业生产基础, 为社会提供丰富的物质财富, 也会极大地满足社会各种需求, 这就产生了显著的社会效益。再考虑目标函数应易于量化, 所以, 小流域综合治理规划方案优化问题的主要目标可以考虑经济效益目标和生态效益目标两类。实现这些目标所受到的约束条件一般有流域内土地利用方式约束、经济生产活动约束、水利工程措施约束、水文气候及土壤条件约束、社会经济基础状况约束以及其它一些约束等。设小流域综合治理规划决策方案变量为 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$, 则此时的多目标决策模型可描述为:

$$\begin{cases} \max_X f_1(X) & (\text{经济效益}) \\ \max_X f_2(X) & (\text{生态效益}) \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{s. t. } R = \{X \mid g_1(X) \leq 0, g_2(X) \leq 0, g_3(X) \leq 0, g_4(X) \leq 0, g_5(X) \leq 0, g_6(X) \leq 0, \dots\} \quad (4)$$

式中: $g_i(X)$ ——第 i 类约束(即土地利用方式约束、经济生产活动约束...) 的函数表达式。

2 多目标规划实例研究

2.1 规划区域概况

苏南丘陵山区段林小流域综合治理示范区, 总面积为 4.32 km^2 。该流域属丘陵漫岗地形, 为亚热带季风气候区, 四季分明, 雨量充足。适宜种植水稻、三麦、油菜、西瓜、茶叶、银杏等农作物和经济作物。总耕地面积为 255.79 hm^2 , 现有人口 1764 人。流域内水利条件和农业生产条件均较差, 30% 的农田尚未平整。坡岗地面积比例较大, 且沿袭传统的粗放耕作方式。林被覆盖率仅为 2.2%, 水土流失较为严重。库塘河沟整治率较低, 当家塘坝也年久失修, 骨干建筑物工程不配套制约着全流域工农业生产发展, 农民人均年收入较低。

1996 年, 该流域被确立为综合治理示范区后, 即着手进行规划, 主要治理标准定为: 在规划期内, 治理程度应逐步达到治理面积的 95% 以上, 林草面积达宜林宜草面积的 95% 以上; 建设好基本农田, 改广种薄收为少种高产多收, 保持人均基本农田不少于 667 m^2 。小流域内农村人均年经济收入比治理前翻两番以上。工程配套率达 60% 以上, 且骨干工程配套率要达到 100%。拦沙挡土工程效益显著, 使流域年土壤侵蚀模数降到允许值 $1000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 以下。各项水土保持和水利工程措施要能防御 20 a 一遇的暴雨径流。小流域农村产业结构合理, 经济效益巨大, 文化、教育、技术及生产管理水大步提高, 人口素质明显改善。

2.2 决策变量设计

段林小流域内土地利用方式主要由农耕地、林地、水面占地、村庄道路、沟渠用地等构成。经济活动则以农业生产、经济果林种植及加工、工副业生产、生猪喂养及水产养殖等为主。所设计的决策变量应能充分反映流域内土地利用方式、经济活动规模、水利工程和水土保持工程设施等各项内容。现选择的决策变量是: 基本农田面积 $x_1(\text{hm}^2)$ 、坡耕地面积 $x_2(\text{hm}^2)$ 、经济果林

面积 $x_3(\text{hm}^2)$ 、水保用材林面积 $x_4(\text{hm}^2)$ 、水面积 $x_5(\text{hm}^2)$ 、人口增长率 $x_6(\%)$ 、生猪年存栏量 $x_7(\text{头})$ 、新建蓄水塘坝容量 $x_8(\text{m}^3)$ 、田间林地及坡面排水沟系统 $x_9(\text{m})$ 、坡改梯面积 $x_{10}(\text{hm}^2)$ 、拦沙挡土设施能力 $x_{11}(\text{m}^3)$ 。

2.3 约束条件

2.3.1 土地利用约束

(1) 农耕地及林地面积约束。综合治理区总土地面积为 432hm^2 ，扣除居民住房用地、道路、沟渠占地以及其它一些用地外，农耕地及林地面积宜控制在总面积的 $80\% \sim 85\%$ 范围内，则

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \leq 345.6 \quad (5)$$

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \geq 367.2 \quad (6)$$

(2) 耕地面积约束。根据治理目标要求，为了保证口粮及上缴征购粮任务以及蔬菜、饲料等用地，规划期内任何时候都应保证人均耕地不少于 667m^2 ；现按规划期 30a 计，目前人口为 $1\,764$ 人，则

$$x_1 + x_2 \geq 105.84(1 + x_6)^{30} \quad (7)$$

(3) 基本农田约束。基本农田属于高标准农田，稳产高产，经济效益好，且水土流失量易于控制，本应扩大面积，但考虑到治理区内水土条件限制以及人口增长率发展趋势，要求基本农田面积，不超过 133.4hm^2 即可，则

$$x_1 \leq 133.4 \quad (8)$$

2.3.2 经济生产活动约束

(1) 粮食产量约束。治理区内基本农田年产粮食 $1.2 \times 10^4\text{kg}/\text{hm}^2$ ，其它田地产粮水平一般为 $0.75 \times 10^4\text{kg}/\text{hm}^2$ 。区内年人均耗粮 240kg ，生猪饲养耗粮 $260\text{kg}/\text{头}$ ，每年承担上缴国家征购粮任务约为 $2.2 \times 10^5\text{kg}$ ，则

$$1.2 \times 10^4 x_1 + 0.75 \times 10^4 x_2 \geq 42.34 \times 10^4 (1 + x_6)^{30} + 260 x_7 + 22 \times 10^4 \quad (9)$$

(2) 生猪约束。发展生猪饲养业对小流域的农林生产有相当的促进作用，适当发展是必需的，根据发展要求，未来每年生猪存栏量不应低于目前数量，则

$$x_7 \geq 600 \quad (10)$$

(3) 饲草约束。饲草主要用于喂养生猪，每年每头生猪需干草约 $1\,200\text{kg}$ ，现以基本农田年作物秸秆 $1.05 \times 10^4\text{kg}/\text{hm}^2$ ，其它耕地年产 $0.75 \times 10^4\text{kg}/\text{hm}^2$ 计算，则有约束

$$1.05 \times 10^4 x_1 + 0.75 \times 10^4 x_2 \geq 1200 x_7 \quad (11)$$

(4) 经济果林生产用地约束。由小流域产业部门投入产出分析知，经济果林种植是一个适合本地条件且有着较大经济效益潜力的产业，到 2000 年，该产业部门每 100 元物质消耗可创造经济收入 330.35 元，故在土地资源及投入资金许可的情况下，应适当加以发展。根据总体规划目标，经济果林用地占整个农林用地面积比不应低于 40% ，则

$$x_3 \geq 0.4(x_1 + x_2 + x_3 + x_4) \quad (12)$$

(5) 坡改梯面积约束。根据发展规划，为了有效减少水土流失量，除采取适宜的耕作制度外，还应适当加大坡改梯面积。坡耕地中坡度在 6 以上的面积部分应改为梯田，按要求这部分面积将全部用于种植经济果林，且这部分坡度较陡耕地约占原总坡耕地面积的 15% 以上，则

$$x_{10} \geq 0.15(x_2 + x_3) \quad (13)$$

2.3.3 水利工程措施及水土资源约束

(1) 区内蓄水设施约束。蓄水设施约束主要是考虑在治理区内较合理的地形点增建或扩建当家塘坝。这种塘坝容积一般在 $1 \times 10^4 \sim 2 \times 10^4 \text{ m}^3$, 面积在 $0.667 \sim 1.334 \text{ hm}^2$ 左右, 兼顾经济合理和水产养殖效益, 塘坝水深一般不小于 1.5 m 。由于当家塘坝分散修筑在区内, 故宜于用总容积来控制。目前治理区内基本农田灌溉补水量为 $6 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 经济果林和坡耕地为 $3 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{hm}^2$; 区内已有小(二)型水库及各类蓄水塘坝, 可蓄水约 $1.31 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。为了降低用水成本, 灌溉缺水应由新建当家塘蓄水量提供, 则

$$x_8 \quad 0.6 \times 10^4 x_{1+} + 0.3 \times 10^4 x_{2+} + 0.3 \times 10^4 x_{3-} - 131000 \quad (14)$$

(2) 水面积约束。水面积决策变量 x_5 表示治理区内总水面积, 它应当是库塘河沟与增建扩建蓄水塘水面积之和。水面积的多少与土地利用和抗旱排涝有效容积有关, 需合理确定。目前治理区内已有水面积 50.0 hm^2 , 取蓄水塘平均水深为 2.5 m , 则

$$x_5 \quad 50 + x_8 / (2.5 \times 667) \quad (15)$$

(3) 拦沙挡土设施能力约束。确定拦沙挡土设施容量, 应结合治理区内各类土地使用面积的合理分配来考虑, 使全区总的水土流失量达到允许值以下。区内各种土地利用方式的地表剥蚀深度为: 基本农田和水保用材林地为 1.0 mm/a , 坡耕地及林果用地为 3.0 mm/a 。根据侵蚀模数和地表剥蚀深度之间的转换关系, 以总土壤流失量来控制的约束为:

$$10 \times (1.0 x_{1+} + 3.0 x_{2+} + 3.0 x_{3+} + 1.0 x_4) - x_{11} \quad 4322.16 \quad (16)$$

(4) 田间、林地及坡面排水系统约束。治理区内的骨干排水渠道都是经过整治修缮后的中等以上河道、渠道及新建骨干输排水渠道, 其排涝能力已达 20 a 一遇标准。但田间、林地和坡面排水系统尚需加以考虑, 必须与全区排涝标准相适应。这些沟渠形式主要以小沟和汇水农沟为主, 经综合考虑, 它们占地单宽约为 2.5 m 。据测算, 农田区内沟道占地约应为农田面积的 4.5% , 林地内占 3% , 则排水沟道需要的总长度应满足下面的约束:

$$2.5 x_9 / 667 \quad 0.045(x_{1+} + x_{2+}) + 0.03 x_3 \quad (17)$$

(5) 林被覆盖率约束。该流域林被覆盖率原仅为 2.2% , 水土流失严重, 整体抗御旱、涝灾能力较差, 根据总体治理标准, 综合治理后的林被覆盖率不低于 30% , 即

$$(x_3 + x_5) / 432 \quad 0.3 \quad (18)$$

2.3.4 社会经济状况约束

(1) 治理区内人口约束。区内目前人口密度为 $408 \text{ 人}/\text{km}^2$, 自然增长率为 6% , 考虑治理区内水土资源及经济发展条件, 尤其是土地利用中耕地面积的限制, 将人口增长率做为一个优化的决策变量后, 则其约束条件是未来的人口增长率不应超过目前的自然增长率, 即

$$x_6 \quad 0.006 \quad (19)$$

(2) 经济果林生产的经济可行性约束。治理区的水土资源特点表明, 发展经济果林是一项行之有效的致富措施。而以农业生态公司的形式, 建立经济果林的生产、加工和销售多种经营体系, 则能确保经济效益。农业生态公司这一经济实体(包括经济果林营造、仓储设施、一座中等规模的果品加工厂、苗圃设施、销售服务等)的投资必须进行经济可行性分析。由于生态公司的生产基础是经济果林, 故其经济分析主要以经济果林面积 x_3 计算。现考虑投资分 3 a 进行, 年利率取 15% , 年运行管理及动力费取总投入的 6% , 考虑从种植到盛果期必须经过 4 a , 根据动态经济分析原理, 农业生态公司的投资回收年限应满足:

$$-7.16 \ln \{ 0.00229 x_3 / [1162(1 - e^{-0.00042 x_3} - 0.000687 x_3)] \} + 4 \quad 8 \quad (20)$$

2.3.5 其它约束 其它约束主要指种植制度约束和耕作制度约束。坡耕地经坡改梯后, 全部

用于种植经济果林,其中一部分果林地最初的 1~2a 年里间套种一些经济作物,但都是短期的,且是辅助性的。与前面的约束条件相比,这些约束可不必特别考虑。

2.4 目标函数

2.4.1 经济效益目标 根据 1996 年的统计价值系数,可以得到表示治理区年国民收入总值(年净产值)的目标函数:

$$\max f_1(x) = 7500x_{11} + 3750x_{22} + 929.6 \times 10^4(1 - e^{-4.2 \times 10^{-5}x_3}) + 178.4x_{44} + 6000x_{55} + 135.61 \times 10^4(1 + x_6)^5 + 700x_{77} + 3.5x_{88} - 7.5x_{99} - 4497.8x_{1010} - 20x_{1111} \quad (21)$$

2.4.2 生态效益目标 由总体治理标准要求分析知,可以从年土壤流失量方面来衡量生态效益。则生态目标(单位 m^3)为

$$\min f_2(x) = 10 \times (x_{11} + 3x_{22} + 3x_{33} + x_{44}) - x_{1111} \quad (22)$$

2.5 模型求解及方案评价

2.5.1 模型求解 多目标决策模型的求解过程实质上是生成非劣解,现采用协调规划法求解上述模型。协调规划法(又称理想点法)寻求的是那些与理想解距离最小的可行解,即对于权重 W_i 和理想值 $f_i^*(X)$,可行解应满足下列目标:

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^m W_i^p [f_i^*(X) - f_i(X)]^p \right\}^{1/p} \quad (23)$$

模型(5)~(22)的求解过程如下:(1)采用专家打分法,确定与经济效益目标和生态效益目标相应的权重范围,并在该范围选择若干权重组合用于生成非劣解。(2)采用可变容差法求解与各单目标相应的非线性规划模型,并将相应解作为各单目标的理想点。(3)由于模型中各目标的单位不可公度,故在式(23)中必须将各目标值标准化。即

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^m W_i^p \frac{[f_i^*(X) - f_i(X)]^p}{[f_i^*(X) - f_i(X)]^p} \right\}^{1/p} \quad (24)$$

式中: $f_i(X)$ ——第 i 个目标最差值, $p=2$ 。(4)根据选择的若干权重组合,分别求解相应的模型,即可得到一系列非劣解。权重组合是针对经济效益目标和生态效益目标而言的。

根据上述方法,将经济效益目标和生态效益目标赋予不同权重,进行求解模型,可得到不同的可行解。表 1 为 3 种规划方案,分别代表经济效益权重较大方案、两种效益权重相等的适中方案和生态效益权重较大方案。

表 1 3种权重规划方案最优值

决策变量	经济效益方案	适中方案	生态效益方案
基本农田面积 x_1/hm^2	133.4	133.4	133.4
坡耕地面积 x_2/hm^2	20	23.8	22.7
经济果林面积 x_3/hm^2	213.44	173.42	140.
水保用材林面积 x_4/hm^2	0	17.67	56.70
区内水面积 x_5/hm^2	57.62	52.48	50.00
人口增长率 $x_6/\%$	6.0	6.0	6.0
生猪年存栏量 $x_7/头$	1600	1010	1010
新建蓄水塘坝容量 x_8/m^3	190000	81400	78600
田间林地及坡面排水沟长 x_9/m	53300	49197.1	44902.4
坡改梯面积 x_{10}/hm^2	35.38	28.58	24.79
拦沙挡土设施能力 x_{11}/m^3	4382.4	3942.6	2461.23

2.5.2 方案评价 在多目标决策分析中所求得的一系列可行方案,有着经济效益和生态效益

的不同倾向。可以将经济效益权重较大的方案称为经济效益方案, 将生态效益权重较大的方案称为生态效益方案, 而将经济效益和生态效益权重相等的方案称为适中方案。规划方案评价则是对上述方案实施后小流域在经济效益、生态效益和社会效益上的变化情况加以评价。用以选择小流域综合治理的实施规划方案和一些替代方案。

经济效益评价包括小流域年总净产值计算、流域产业结构合理程度评估、水土保持工程及水利工程投资的财务分析(分析益本比、投资回收年限)等内容。生态效益评价主要指方案实施后小流域增加的蓄水量和土壤流失减少量计算分析, 以及林被覆盖率的变化及其对小流域农业生态环境的影响评价。社会效益评价则是指规划方案对小流域内文化教育、科技、生产管理水平和人口综合素质的提高所起的促进作用的评价。

现对上述适中方案进行评价: 小流域全年产粮 1.7785×10^6 kg, 年净产值达 1.07091×10^7 元, 可使年人均收入比治理前翻近三番; 水利工程及水保工程、经济果林产业的投资回收年为 5 a, 具有显著的经济效益。林草面积达宜林宜草面积的 100%, 土壤侵蚀模数由治理前的 $3000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 可下降到 $800 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。各类蓄水设施的有效调蓄能力使区内水资源利用率得到提高, 每年增加蓄水量 $1.0 \times 10^5 \text{ m}^3$ 以上, 各项水利工程和水保工程使小流域的抗灾能力大大增强。产业结构更趋合理, 流域经济条件的改善使各项社会事业得以发展。表 2 为 3 种方案评价的具体指标值。

表 2 方案评价指标

评价指标	经济效益方案	适中方案	生态效益方案
年总净产值/ 10^4 元	1160.12	1070.91	1004.51
产业结构合理程度*	合理	合理	较合理
工程投资回收年限/a	6	5	5
流域每年增加蓄水量/ $(\times 10^4 \text{ m}^3)$	5	10	10
土壤侵蚀模数/ $(\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$	1000	800	750
林被覆盖率(包括经济果林)/%	49.4	44.2	45.5
人口增长率/‰	6.0	6.0	6.0
人均年收入/元	3606.6	3329.3	3122.8
粮食年总产值/ $(\times 10^4 \text{ kg})$	175.0	177.85	177.0

注: * 产业结构合理程度系根据流域内各产业部门投入产出分析结果评定。

3 结 语

小流域综合治理规划必须切实考虑水土资源状况、产业结构、社会经济条件及生态环境保护等因素, 只有这样, 规划方案实施后, 才能真正从根本上实现小流域综合治理的目标。运用多目标规划模型, 不仅可以从多目标多层次方面解决规划方案的优选问题, 而且这种模型能提供许多可行方案, 这对规划阶段进行多方案评价, 以提高规划成果的精度和可靠性是有益的。

参 考 文 献

- 唐德富, 包忠谟, 编. 水土保持. 北京: 水利电力出版社, 1994
- 陈炯新, 主编. 小流域水利规划手册. 北京: 水利电力出版社, 1991
- 洛克斯 D P, 斯蒂迪格尔 J R, 等, 著, 姚汝祥, 等, 译. 水资源系统规划与分析. 北京: 水利电力出版社, 1988
- 钱颂迪, 主编. 运筹学. 北京: 清华大学出版社, 1990