

多目标线性规划在小流域综合治理规划中的应用研究*

——以四川省石柱县密麻沟小流域为例

缪驰远 何丙辉** 陈晓燕 林尤莲

(西南大学资源环境学院 重庆 400716) (重庆市石柱县水利局 石柱 409100)

摘要 本研究以四川省石柱县密麻沟小流域为研究对象,通过分别建立4个子目标函数,利用专家权重法与方向性系数将多个子目标函数整合为1个目标函数,并应用EXCEL软件对多目标函数的规划模型进行线性求解。小流域经治理规划后土地利用趋于合理,生态平衡趋于协调,农、林、牧3业用地比例由原23.32:74.20:2.48调整为24.23:67.67:8.1,流域年土壤侵蚀模数由原1823 t/km²降为1628.4 t/km²。

关键词 线性规划 综合治理 水土保持

Study on the multiple objective linear planning applied in comprehensive control of small watershed—a case study from Mimagou small watershed in Shizhu County, Sichuan Province. MIAO Chi-Yuan, HE Bing-Hui, CHEN Xiao-Yan (College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China), LIN You-Lian (Shizhu Water Resources Bureau, Chongqing City, Shizhu 409100, China), *CJEA*, 2006, 14(3): 223~227

Abstract Based on the Mimagou small watershed in Shizhu County, Sichuan Province, through building the four objective sub-functions, the multiple objective functions were integrated as an objective function using the expert's weight and directional coefficient and applying EXCEL software, the optimal solution of the multiple objective function planning model was determined. From the result, the land use of watershed becomes more reasonable, the ecology balance tends to harmonious, the proportion of agriculture-forestry-stock is adjusted from 23.32:74.20:2.48 to 24.23:67.67:8.1, the soil erosion modulus in a year falls from the original 1823t/km² to 1628.4t/km².

Key words Linear planning, Comprehensive control, Water and soil conservation

(Received Nov. 26, 2004; revised Feb. 5, 2005)

小流域线性规划就是将规划对象作为1个系统,并认为系统中所有输入、输出关系为线性关系。根据规划对象的自然和社会经济特点,建立数学模型,求得最优解^[1]。多目标线性规划由单目标线性规划发展而来,它同时考虑数个目标函数,在确定出各目标重要程度的权重以后,可求得同时兼顾各目标利益时的合理解。与单目标规划相比,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^[2]。本研究以四川省石柱县密麻沟小流域为例,将经济效益、生态效益等分别列为不同目标函数,建立系统数学模型的优化治理模式,对多目标线性规划进行探讨。

1 治理区概况与治理方法

密麻沟小流域位于四川省石柱县黄水镇,面积34.39km²,海拔高度1135~1621m,地层出露为侏罗系沙溪庙组紫色岩、泥岩。年均气温11.7℃,年均降雨量1372.6mm,森林覆盖率47.72%。据2003年底统计,流域内总人口1349人,其中农业人口1320人。农林牧3大产业年收入依次为166万元、7万元和26万元,分别占流域总收入的78.68%、3.31%和12.32%,粮食总产55万kg,平均单产904.5kg/hm²,农业人均产粮416.67kg。土地利用分为农耕地、林地、荒山荒坡、水域面积和非生产用地5大类,分别占流域总面积的18.18%、57.87%、13.66%、1.86%和8.43%,流域土壤年均侵蚀模数为1823t/km²,年侵蚀总量5.24万t。

规划目标。流域生态经济系统设计分生态效益、经济效益和社会效益3个目标。因社会效益无法直接计算^[3],本流域治理规划目标以生态效益和经济效益为主。生态效益目标为各项措施减沙量最大,水

* 国家“十五”科技攻关重大专项“区域生态环境安全和生态经济系统重建关键技术研究示范”(2001BA04A)资助

** 通讯作者

收稿日期:2004-11-26 改回日期:2005-02-05

土流失最少;实现土地肥力的平衡,保持土地较高生产力^[4]。经济效益目标为纯收入最大,投资最省。

系统线性规划模型的建立。确定总体规划后,依据各项措施的单项规划和总体规划的原则、构想及流域自然资源现状,调整了 40 个约束条件,分别建立小流域 5 年农、林、牧、渔各业发展线性规划的单目标数学模型,把这些单目标函数作为子目标函数与相应的权重结合,建立 1 个新目标函数,即为所求的多目标函数。求一组变量 $X_j(j = 1, 2, 3, \dots, n)$ 的值,满足约束条件^[5]:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{40} a_{ij}X_j \leq b_j (\geq b_i) \\ X_j \geq 0 \\ f_m(X) = \sum_{j=1}^{40} c_{mj}X_j \end{cases}$$

使综合目标函数 $F(X) = \sum p_m \lambda_m f_m(X)$ 达到最优。式中, X_j 为决策变量, a_{ij} 为决策变量系数, b_i 为资源限制量, c_{mj} 为价值系数, $F(X)$ 为综合目标函数, $f_m(X)$ 为单目标函数, λ_m 为决策目标相应的权系数, p_m 为单目标函数方向系数。多目标模型线性规划求解比单目标更复杂,如徐新华^[3]先是分别求出所有单目标函数变量的最优解,再根据各单目标函数的权重与各单变量的乘积之和作为变量最终解,即 $X_{i\text{终}} = \sum_{i=1}^n \lambda_i X_{i1}$ (λ_i 为第 i 个单目标函数权重, X_{i1} 为第 i 单目标函数第一个变量的解)。笔者认为该方法欠说服力,因为规

划求解只能是针对单目标的,考虑多个因素时应以 1 种合理的方程转化为 1 个目标值,然后按约束条件对目标求极值。笔者构造了 1 个多目标模型,通过将多个单目标函数与各自的权重整合成 1 个函数 $F(X)$ 求解,由于单目标函数所求的方向性不同(有的为求最大值,有的为求最小值),故又加入了 1 个单目标函数的方向系数 p ,当求最大值时, p 为“1”,当求最小值时, p 为“-1”。在小流域土地质量分类及适应性评价研究基础上,按照选择影响大的因素设置变量的原则设置变量(见表 1)。根据小流域社会经济状况及规划后的生态和经济效益目标,并参考当地近期规划,确定 4 类约束方程。

表 1 模型决策变量说明

Tab. 1 The model decision variable declaration

变量名 Name	变量说明 Variable declaration	变量名 Name	变量说明 Variable declaration
X_1	1 级地种黄连公顷数	X_{21}	3 级地人工牧草公顷数
X_2	2 级地种黄连公顷数	X_{22}	4 级地人工牧草公顷数
X_3	3 级地修梯田种黄连公顷数	X_{23}	5 级地人工牧草公顷数
X_4	4 级地修梯田种黄连公顷数	X_{24}	2 级地薪炭林公顷数
X_5	1 级地种玉米公顷数	X_{25}	5 级地薪炭林公顷数
X_6	2 级地加修地埂生物带种玉米公顷数	X_{26}	6 级地薪炭林公顷数
X_7	3 级地修坡式梯田种玉米公顷数	X_{27}	3 级地混交林公顷数
X_8	4 级地修梯田种玉米公顷数	X_{28}	4 级地混交林公顷数
X_9	1 级地种洋芋公顷数	X_{29}	5 级地混交林公顷数
X_{10}	2 级地加修地埂生物带种洋芋公顷数	X_{30}	3 级地用材林公顷数
X_{11}	3 级地加修坡式梯田种洋芋公顷数	X_{31}	4 级地用材林公顷数
X_{12}	4 级地加修坡式过渡梯田种洋芋公顷数	X_{32}	5 级地防护林公顷数
X_{13}	3 级地种小杂粮公顷数	X_{33}	6 级地防护林公顷数
X_{14}	4 级地种小杂粮公顷数	X_{34}	2 级地粮草作公顷数
X_{15}	1 级地种蔬菜公顷数	X_{35}	3 级地粮草作公顷数
X_{16}	2 级地种油料作物公顷数	X_{36}	大牲畜头数
X_{17}	3 级地修坡式梯田种油料作物公顷数	X_{37}	奶牛发展头数
X_{18}	4 级地修坡式梯田种油料作物公顷数	X_{38}	猪发展头数
X_{19}	2 级地种天麻公顷数	X_{39}	鸡发展头数
X_{20}	3 级地加修地埂生物带种天麻公顷数	X_{40}	鸭鹅发展头数

第一类:土地约束

一级地公顷数:

$$X_1 + X_5 + X_9 + X_{15} = 199.2 \tag{1}$$

二级地公顷数:

$$X_2 + X_6 + X_{10} + X_{19} + X_{24} + X_{34} = 117 \tag{2}$$

三级地公顷数:

$$X_3 + X_7 + X_{11} + X_{13} + X_{20} + X_{21} + X_{27} + X_{30} + X_{35} = 215.6 \tag{3}$$

四级地公顷数:

$$X_4 + X_8 + X_{12} + X_{14} + X_{18} + X_{22} + X_{28} + X_{31} = 456.8 \tag{4}$$

五级地公顷数:

$$X_{23} + X_{25} + X_{29} + X_{32} = 136.17 \tag{5}$$

六级地公顷数:

$$X_{26} + X_{33} = 126.23 \quad (6)$$

第二类:生产发展约束

保持蔬菜自给,人均 66.67m²(人口按 0.5% 增长,到 2009 年为 1865 人):

$$X_{15} = 66.67 \times 1865 / 10000 \quad (7)$$

为满足粮食需求,人均粮田不低于 3333.35m²:

$$X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} \geq 621.67 \quad (8)$$

草场不少于 133.33hm²:

$$X_{21} + X_{22} + X_{23} \geq 133.33 \quad (9)$$

为满足农村能源需要,薪炭林应不少于 66.67hm²:

$$X_{24} + X_{25} + X_{26} \geq 66.67 \quad (10)$$

人均产粮不少于 750kg:

$$9000X_5 + 8250X_6 + 7500X_7 + 7500X_8 + 4500X_9 + 3750X_{10} + 3750X_{11} + \quad (11)$$

$$3000X_{12} + 3000X_{13} + 1500X_{14} + 9000X_{34} + 7500X_{35} \geq 2797500$$

洋芋总产量不低于 186500kg:

$$4500X_9 + 3750X_{10} + 3750X_{11} + 3000X_{12} \geq 186500 \quad (12)$$

流域每年可投基建工 118800 个:

$$15X_2 + 30X_3 + 450X_4 + 15X_6 + 30X_7 + 450X_8 + 15X_{10} + 30X_{11} + 30X_{12} + 30X_{13} + \quad (13)$$

$$30X_{14} + 30X_{16} + 30X_{17} + 30X_{18} + 30X_{19} + 30X_{20} + 30X_{21} + 30X_{22} + 30X_{23} + 15X_{24} +$$

$$15X_{25} + 15X_{26} + 15X_{27} + 15X_{28} + 15X_{29} + 15X_{30} + 15X_{31} + 15X_{32} + 15X_{33} \leq 118800$$

流域劳力每年可投生产用工 158400 个:

$$180X_1 + 180X_2 + 180X_3 + 180X_4 + 120X_5 + 120X_6 + 120X_7 + 120X_8 + 60X_9 + \quad (14)$$

$$60X_{10} + 60X_{11} + 60X_{12} + 90X_{13} + 90X_{14} + 225X_{15} + 90X_{16} + 90X_{17} + 90X_{18} +$$

$$135X_{19} + 135X_{20} + 30X_{21} + 30X_{22} + 30X_{23} + 105X_{24} + 105X_{25} + 105X_{26} + 135X_{27} +$$

$$135X_{28} + 135X_{29} + 135X_{30} + 135X_{31} + 135X_{32} + 135X_{33} + 120X_{34} + 120X_{35} + 18X_{36} +$$

$$20X_{37} + 12X_{38} + 5X_{39} + 5X_{40} \leq 158400$$

第三类:平衡约束

饲草平衡约束:

$$2400X_1 + 2100X_2 + 1800X_3 + 1800X_4 + 3000X_5 + 2700X_6 + 2400X_7 + 2400X_8 + 2400X_9 + \quad (15)$$

$$1800X_{10} + 1800X_{11} + 1500X_{12} + 4500X_{13} + 3000X_{14} + 7500X_{21} + 15000X_{22} + 15000X_{23} +$$

$$9750X_{27} + 8670X_{28} + 8670X_{29} + 2250X_{34} + 1500X_{35} - 4400X_{36} - 5110X_{37} - 1825X_{38} \geq 0$$

到 2009 年群众需薪炭 993112.5kg:

$$4950X_1 + 4290X_2 + 3630X_3 + 1650X_4 + 7500X_5 + 6000X_6 + 4500X_7 + 4500X_8 + \quad (16)$$

$$4800X_9 + 4320X_{10} + 4080X_{11} + 3360X_{12} + 4080X_{13} + 2400X_{14} + 9000X_{24} + 8100X_{25} +$$

$$8100X_{26} + 2360X_{30} + 2250X_{31} + 2138X_{32} + 2040X_{33} \geq 99311.5$$

饲料平衡:

$$7500X_1 + 6750X_2 + 6000X_3 + 6000X_4 + 9000X_5 + 8250X_6 + 7500X_7 + 7500X_8 + \quad (17)$$

$$4500X_9 + 3750X_{10} + 3750X_{11} + 3000X_{12} + 3000X_{13} + 2250X_{14} + 9000X_{34} + 7500X_{35} -$$

$$800X_{36} - 1095X_{37} - 500X_{38} - 108X_{39} - 110X_{40} \geq 0$$

第四类:畜牧业约束

大牲畜上限 250 头:

$$X_{36} \leq 250 \quad (18)$$

奶牛不超过 350 头:

$$X_{37} \leq 350 \quad (19)$$

猪不超过 300 头:

$$X_{38} \leq 300 \quad (20)$$

鸡不多于 1500 只:

$$X_{39} \leq 1500 \quad (21)$$

鸭鹅不多于 5000 只:

$$X_{40} \leq 5000 \quad (22)$$

分别确定纯收入、水土流失、基建投资和粮食产量为子目标函数,其纯收入方程为:

$$\begin{aligned} f_1(X) = & 12600X_1 + 9600X_2 + 9600X_3 + 8100X_4 + 1125X_5 + 1147.5X_6 + 2250X_7 + \\ & 975X_9 + 723.75X_{10} + 723.75X_{11} + 723.75X_{12} + 1200X_{13} + 1125X_{14} + 1800X_{15} + \\ & 975X_{16} + 723.75X_{17} + 723.75X_{18} + 1425X_{19} + 1350X_{20} + 60X_{24} + 150X_{25} + 150X_{26} + \\ & 150X_{27} + 150X_{28} + 150X_{29} + 855X_{30} + 750X_{31} + 750X_{32} + 697.5X_{33} + 1200X_{34} + \\ & 1200X_{35} + 140X_{36} + 660X_{37} + 223.2X_{38} + 15X_{39} + 21X_{40} \end{aligned} \quad (23)$$

水土流失量为:

$$\begin{aligned} f_2(X) = & 5X_1 + 20X_2 + 60X_3 + 100X_4 + 3X_5 + 12.2X_6 + 36.6X_7 + 61X_8 + 4.5X_9 + 18X_{10} + 53X_{11} + 90X_{12} + \\ & 50X_{13} + 80.25X_{14} + 5X_{15} + 18X_{16} + 53X_{17} + 90X_{18} + 11X_{19} + 33X_{20} + 2.7X_{21} + 5X_{22} + \\ & 5X_{23} + 12.225X_{24} + 15X_{25} + 30X_{26} + 50X_{27} + 80X_{28} + 15X_{29} + 2.7X_{30} + 4.5X_{31} + 15X_{32} + \\ & 30X_{33} + 11X_{34} + 20X_{35} \end{aligned} \quad (24)$$

基建投资为:

$$\begin{aligned} f_3(X) = & 67.5X_2 + 120X_3 + 1185X_4 + 67.5X_6 + 120X_7 + 1185X_8 + 67.5X_{10} + 105X_{11} + \\ & 105X_{12} + 105X_{13} + 105X_{14} + 105X_{16} + 105X_{17} + 105X_{18} + 135X_{19} + 135X_{20} + 150X_{21} + \\ & 150X_{22} + 187.5X_{23} + 137.4X_{24} + 137.4X_{25} + 137.4X_{26} + 412.5X_{27} + \\ & 412.5X_{28} + 412.5X_{29} + 375X_{30} + 375X_{31} + 405X_{32} + 30X_{34} + 30X_{35} \end{aligned} \quad (25)$$

粮食产量为:

$$\begin{aligned} f_4(X) = & 9000X_5 + 8250X_6 + 7500X_7 + 7500X_8 + 4500X_9 + 3750X_{10} + 3750X_{11} + 3000X_{12} + \\ & 3000X_{13} + 1500X_{14} + 1500X_{34} + 7500X_{35} \end{aligned} \quad (26)$$

2 结果与分析

2.1 模型求解

先采用“专家法”,按 $f_1(X)$ 、 $f_2(X)$ 、 $f_3(X)$ 、 $f_4(X)$ 4 个子目标函数的重要程度确定其权重系数 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 ,且要求 $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 = 1$,最终确定权重系数结果分别为 0.4、0.2、0.2、0.2,根据子目标函数极值的方向性,最终确定 $F(X) = \lambda_1 f_1(X) - \lambda_2 f_2(X) - \lambda_3 f_3(X) + \lambda_4 f_4(X)$,先将方程(23)、(24)、(25)、(26)进行整合,得方程:

$$\begin{aligned} F(X) = & 5039X_1 + 3822.5X_2 + 3804X_3 + 2983X_4 + 2249.4X_5 + 2093.06X_6 + 2368.68X_7 + \\ & 1250.8X_8 + 1289.1X_9 + 1022.4X_{10} + 1007.91X_{11} + 756X_{12} + 1049X_{13} + \\ & 712.95X_{14} + 719X_{15} + 365X_{16} + 257X_{17} + 250.5X_{18} + 540.8X_{19} + 506.4X_{20} - \\ & 30.54X_{21} - 31X_{22} - 38.5X_{23} - 5.93X_{24} + 29.52X_{25} + 26.52X_{26} - 32.5X_{27} - \\ & 38.5X_{28} - 25.5X_{29} + 266.46X_{30} + 224.1X_{31} + 216X_{32} + 273X_{33} + 771.8X_{34} + \\ & 1970X_{35} + 56X_{36} + 264X_{37} + 89.28X_{38} + 6X_{39} + 8.4X_{40} \end{aligned} \quad (27)$$

运用 EXCEL 的规划求解功能,分别设定相应目标单元和约束单元,最终求得综合方程 $F(X)$ 的最优解即最大值为 2193558.94,4 个子目标函数 $f_1(X)$ 、 $f_2(X)$ 、 $f_3(X)$ 、 $f_4(X)$ 的值为 3214925.09、56001.24、388258.96、4093684.29,其中决策变量值见表 2。

2.2 规划成果

通过计算获得 5 年后小流域农、林、牧、渔发展布局(种植业及林草布局产值见表 3)农地、林草、牧草和其他面积依次为 747.87hm²、2088.9hm²、250.33hm² 和 351.9hm²,分别占流域面积的 21.75%、60.74%、7.28% 和 10.23%;畜牧业中牛、猪、鸡、鸭(鹅)和大牧畜数量分别达 350 头、300 只、1321 只、152 只和 250

只,相应净收入为 23.1 万元、6.696 万元、1.9815 万元、3192 元和 2.6 万元。从规划结果看,密麻沟小流域经治理规划后土地利用趋于合理,农、林、牧 3 业用地比例由原 23.32 : 74.20 : 2.48 调整为 24.23 : 67.67 : 8.1, 养殖业有较大发展,林草覆盖度调整为 68.02%。规划实现后小流域群众人均纯收入 1723.82 元,比规划前提高 923.82 元;粮食总产达

表 2 决策变量取值

Tab.2 The value of decision variable

决策变量 Decision variable	取值 Value	决策变量 Decision variable	取值 Value	决策变量 Decision variable	取值 Value	决策变量 Decision variable	取值 Value
X ₁	149.20	X ₁₁	0	X ₂₁	0	X ₃₁	133.33
X ₂	0	X ₁₂	107.93	X ₂₂	123.73	X ₃₂	126.57
X ₃	0	X ₁₃	0	X ₂₃	9.6	X ₃₃	595.67
X ₄	0	X ₁₄	0	X ₂₄	0	X ₃₄	117
X ₅	22.65	X ₁₅	12.43	X ₂₅	166.67	X ₃₅	0
X ₆	0	X ₁₆	0	X ₂₆	333.33	X ₃₆	250
X ₇	215.6	X ₁₇	0	X ₂₇	200	X ₃₇	350
X ₈	225.07	X ₁₈	0	X ₂₈	266.67	X ₃₈	300
X ₉	10.92	X ₁₉	0	X ₂₉	133.33	X ₃₉	1321
X ₁₀	0	X ₂₀	0	X ₃₀	66.67	X ₄₀	152

4093.68429t,人均 2195kg,比规划前提高 1465kg;小流域水土流失得到有效控制,年土壤侵蚀模数由原 1823t/km² 降为 1628.4t/km²。

表 3 种植业及林草布局、产值表

Tab.3 The plantation and wood layout and output value

项目 Items	面积/hm ² Area							净收入/元 Net incoming
	一级 First class	二级 Second class	三级 Third class	四级 Fourth class	五级 Fifth class	六级 Sixth class	合计 Sum	
	黄 连	149.2	0	0	0	0	0	
玉 米	26.65	0	215.6	225.07	0	0	467.32	224017.05
洋 芋	10.92	0	0	107.93	0	0	118.82	63274.41
杂 粮	0	117	0	0	0	0	117	140400.00
蔬 菜	12.43	0	0	0	0	0	12.43	22380.00
油 料 作 物	0	0	0	0	0	0	0	0
天 麻	0	0	0	0	0	0	0	0
小 计	199.2	117	215.6	333	0	0	864.77	2329991.46
牧 草	0	0	0	123.73	9.6	0	133.33	0
薪炭林	0	0	0	0	166.67	333.33	500	75000
混交林	0	0	200	266.67	133.33	0	600	90000
用材林	0	0	66.67	133.33	0	0	200	157000
防护林	0	0	0	0	126.57	595.67	722.24	510402.50
小 计	0	0	266.67	523.73	436.17	929	2155.57	751402.50

随着计算机发展和小流域治理的深入,运用多目标规划模型理论解决小流域综合治理规划问题将变得更简便,运用多目标规划模型,不仅可从多目标多层次解决规划方案的优选问题,解决了单目标模型单一性的局限,且该模型能提供多种可行方案,对规划阶段进行多方案评价,最终提高规划成果的精度和可靠性。

参 考 文 献

- 1 李永贵,田玉柱.混合整数线性规划方法在小流域综合治理规划中的应用.北京水利,1996(4):20~22
- 2 翁文斌等.宏观经济水资源规划多目标决策分析方法研究及应用.水利学报,1999(2):1~11
- 3 许志云.浅谈小流域水土保持综合治理优化规划问题.水土保持通报,1996,16(1):97~101
- 4 王印传,张凤荣,孙丹峰.小流域土地利用规划的理论与方法探讨.水土保持学报,2002,16(2):118~121
- 5 齐元栋,曹步山.水土保持规划中新技术的应用.水土保持通报,1996,16(1):119~123