

农业环境科学学报 2006,25(2):442-447

Journal of Agro-Environment Science

基于面源污染控制的农业土地利用系统优化

刘建昌, 张珞平, 洪华生, 陈能汪

(厦门大学环境科学中心, 近海海洋环境科学国家重点实验室, 福建 厦门 361005)

摘要:以福建省九龙江西溪五川流域为例,借助区间数系统优化模型和 AGNPS 模拟模型,对现有农业生产土地利用方式和管理措施性土地利用方式进行了系统分析,探讨通过土地利用的调整,实现低成本控制农业面源污染的最佳途径。结果表明,五川流域目前的土地利用模式不能满足面源污染控制和经济效益最大化的共同要求,其农业生产习惯和面源污染控制措施也需要适当调整。总体上现有土地利用的经济收益低于最佳土地利用优化的下限收益,环境效益一般的坡草地、香蕉地、果园、菜地和村庄用地所占比例过多。农业面源污染控制性措施的用地规划不够,应加大保护性耕作和建立多水塘系统等措施的用地量。

关键词:系统规划; 土地利用; 面源污染控制; 农业

中图分类号: X830.2 文献标识码: A 文章编号: 1672-2043(2006)02-0442-06

An Inexact System Programming for Agricultural Land Utilization Based on Control of Non-point Source Pollution in Wuchuan Catchment

LIU Jian-chang, ZHANG Luo-ping, HONG Hua-sheng, CHEN Neng-wang

(State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Environment Science Research Center of Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: An interval numbers optimization model and AGNPS model (Agricultural Non-point Source Model 5.0) were adopted to study the relationship between land use and agricultural nutrient pollution control with the minimal cost in Wuchuan Catchment of upstream Xixi River in Jiulong River Watershed, Fujian Province. Both land utilization pattern of agricultural processes and land use pattern of pollution control practices implemented were analyzed systematically. Results indicated that the current land utilization patterns of the catchment needed to be improved, and that the situation of farming habits and management practices should be ameliorated too. The total profit on the basis of the current land use patterns was less than the optimal lower value of system interval. The field scale occupied by pollution control practices with poor environmental effectiveness was too much, such as sloping grassland, banana field, orchard, vegetable and residence. The village should promote the land use with pollution control practices. The area of conservation tillage and multi-pond system are encouraged to increase for their high environmental and economical effectiveness. To achieve a reasonable and applicable program, the decision maker can integrate the solutions of the model with his or her experience and other updated information jointly.

Keywords: inexact system programming; land utilization; non-point source pollution; agriculture

面源污染因形成过程受地理、气候、土壤等多种因素影响,具有随机性大、分布范围广、影响因子多、形成机理复杂、潜伏滞后性强等特点^[1],使其监测、控

制和管理难度较大。目前面源污染控制的研究多限于通过模拟模型,如 AGNPS、ANSWERS、BASINS、SWAT 等^[2-4],研究其发生过程,提出污染控制措施,以美国的最佳管理措施(Best Management Practices, BMPs)最具有代表性^[5]。这种设计方法是建立在发达国家流域农业人口较少的基础之上,往往只注重控制的环境效果。由于我国流域农业人口密集,环境保护与经济矛盾的矛盾突出,面源污染的发生与当地

收稿日期: 2005-04-17

基金项目: 福建省“十五”重大科技攻关项目(2002H009); 福建省发展与改革委员会项目(ZB2003JWKJ001)

作者简介: 刘建昌(1974—),男,硕士生,主要研究方向为农业非点源污染控制。E-mail: ljcy@xmu.edu.cn

农村对经济利益的不断追求息息相关,如果没有将面源污染控制与经济投入结合起来,管理措施将难以有效实施。因此,如何通过土地利用模式的改变,达到既能控制农业面源污染,又能实现经济收益最大化,具有重要意义。本文通过对流域农业土地利用的不确定性系统规划,探讨低成本控制面源污染的途径,以期对我国面源污染控制工作有所借鉴。

1 研究区概况

五川流域位于福建省九龙江西溪中上游,南靖县城东南部,涉及五个行政村和一个作业区、二个果场,总面积 1 800 hm²。年均降雨量 1 705 mm,雨量集中在 3—9 月。2000 年拥有人口 8 366 人,人均收入约 2 500 元左右。流域属丘陵台地,土地利用类型多样,无工业污染点源,以种植业、畜禽和水产养殖业为主,畜禽养殖散养居多。作物种植结构、土壤特性可代表九龙江流域的基本情况,该流域所在的南靖县,农田化肥、有机肥的施用量居九龙江流域之首。这些年开展了以流域为单元的水土流失治理,年土壤侵蚀模数下降到了 475 t·km⁻²。

本研究选取该流域中心农事活动密集区域为试验区,面积 956 hm²,其中林地占 30.0%,荒地、坡草地 5.7%,毛竹 6.9%,果园(含芒果、荔枝等 5 类)22.3%,香蕉 19.3%,蔬菜 1.6%,甘蔗 5.6%,水稻田 1.8%,鱼塘 2.5%,村庄 4.5%。

2 模型方法

优化模型采用区间数不确定性系统规划模型。控制面源污染与农业土地利用方式紧密结合,是触一动的系统工程,涉及到多个环境和经济因素。系统分析与系统优化正是解决这种问题的有利工具。因各类土地利用的环境经济因素通常存在不确定性,如某种土地利用的利润、水土流失量等都不是确定的值,而是一个范围,所以应采用不确定性系统优化模型。不确定性系统优化模型分为随机优化模型、模糊优化模型和区间数优化模型三种。随机模型在建立过程中需要许多关于参数概率分布的数据。模糊系统优化模型则只能解决模型约束条件右边项的不确定问题。区间数模型能够在建模过程中将实际系统中的不确定因素直接反映在模型中,通过模型的求解可以得到一组行为区间,管理者在进行实际决策时,就可结合各种新的信息,根据经验、偏好在行为区间中确定具体行动方案^[8-10]。

区间数不确定性系统规划模型的抽象形式如下:

$$\min f^{\pm} = C^{\pm} X^{\pm} \tag{1}$$

$$\text{st } A^{\pm} X^{\pm} < B^{\pm} \tag{2}$$

$$X^{\pm} \geq 0 \tag{3}$$

式中: $A^{\pm} \{R_{j,m}^{\pm}\}$ 为技术系数矩阵,代表不同土地利用的单位面积的面源污染排放强度; $B^{\pm} \{R_{j,m}^{\pm}\}$,代表流域所能承受的非点源污染负荷; $C^{\pm} \{R_{j,1,x}^{\pm}\}$ 代表费用系数; $X^{\pm} \{R_{j,n,x}^{\pm}\}$ 为决策变量; f^{\pm} 为目标函数。 $f^{\pm}, C^{\pm}, X^{\pm}, A^{\pm}, B^{\pm}$ 等均为区间数。模型(1)~(3)的求解过程分为两步,先是构建具体的区间数优化模型,再是分别求解上下限子模型。现将具体的子模型构造与求解过程描述如下。

设目标函数 f 的 N 个区间系数 $C_j^{\pm}(j=1,2,\dots,N)$ 中,有 K_1 个非负,其余 K_2 个为负数。现令前 K_1 个系数为非负,即 $C_j^{\pm} \geq 0(j=1,2,\dots,K_1)$,后 K_2 个系数为负数,即 $C_j^{\pm} < 0(j=K_1+1,K_1+2,\dots,N)$,则求解目标函数上限的子模型可构造如下:

$$\min f^+ = \sum_{j=1}^{K_1} c_j^+ x_j^+ + \sum_{j=K_1+1}^N c_j^+ x_j^- \tag{4}$$

$$\text{st } \sum_{j=1}^{K_1} |a_{ij}^-| \text{Sgn}(a_{ij}^-) x_j^+ / b_i^+ + \sum_{j=K_1+1}^N |a_{ij}^+| \text{Sgn}(a_{ij}^+) x_j^- / b_i^- \leq 1 \tag{5}$$

式中: Sgn 为符号函数,当其自变量为正时,函数取值+1;当自变量为负时,取值-1;当自变量为零时,取值 0。求解模型(4)~(5)就可得到 $x_j^+(j=1,2,\dots,K_1)$ 和 $x_j^-(j=K_1+1,K_1+2,\dots,N)$ 以及相应的目标函数最优解上限 f^+ 。同理可得 $x_j^-(j=1,2,\dots,K_1)$ 和 $x_j^+(j=K_1+1,K_1+2,\dots,N)$ 以及相应的目标函数最优解下限 $f^{[1]}$ 。

3 现有土地利用方式的优化

3.1 具体模型

根据上述抽象形式,结合五川流域的实际,以所有土地利用的利润最大为目标,以纳污水体容许排放的各类污染物的量、可利用的土地总面积、最小林地面积、最大竹林面积和最大水塘面积等为约束,构造具体的不确定性优化模型如下:

$$\max f^{\pm} = \sum_{i=1}^7 (\text{LAND}_i)^{\pm} (\text{ECOPROFIT}_i)^{\pm} \tag{6}$$

$$\text{st } \sum_{i=1}^7 (\text{LAND}_i)^{\pm} (\text{LOSS}_i)^{\pm} \leq (\text{PERMISSION}_i)^{\pm} \tag{7}$$

$$(\text{LAND}_i)^{\pm} \leq 285.90 \tag{8}$$

$$(\text{LAND}_{3,9})^{\pm} \leq 100.00 \tag{9}$$

$$\sum_{i=1}^{10} (\text{LAND}_i)^{\pm} \leq 956.47 \tag{10}$$

$i=1,2,\dots,10; j=1,2,\dots,5$ (11)
 式中: $LAND_i$ 指不同土地利用的面积; $ECOPROFIT_i$ 指不同土地利用方式的利润, $LOSS_j$ 指不同土地利用下污染物 SS、TN、DN、TP、DP 的流失模数, $PERMISSION_j$ 指附近纳污水体对各污染物的允许容量。

3.2 模型参数

本文根据现场问卷调查获得各类土地利用的利润, 经过实际监测得出各类地块的排污能力。氮、磷(包括可溶态)等采用原子吸收分光光度法测定, 泥沙量采用过滤烘干称重法测定^[7]。表 1 和表 2 是各类土地利用的模型参数。

3.3 优化结果

表 1 现有土地利用优化模型参数(1)

Table 1 Model parameters for each land utilizing as usual (1)

土地利用类型	类型编号	经济产出 /万元·hm ⁻² ·a ⁻¹		土壤侵蚀模数 /t·hm ⁻² ·a ⁻¹		总氮流失模数 /kg·hm ⁻² ·a ⁻¹	
		上限(+)	下限(-)	上限(+)	下限(-)	上限(+)	下限(-)
林地	Land 1	0.80	0.50	3.73	2.95	16.20	5.31
荒地、坡草地	Land 2	0.30	0.20	20.16	7.13	21.38	20.52
毛竹	Land 3	8.25	1.50	5.04	4.57	15.94	12.91
果园(芒果等 5 项)	Land 4	8.25	6.00	5.04	4.57	22.74	17.09
香蕉	Land 5	11.25	5.25	8.09	5.13	69.58	56.84
蔬菜	Land 6	15.00	7.20	8.09	5.13	77.71	52.26
甘蔗	Land 7	6.00	3.75	7.04	4.57	36.58	25.00
水稻田	Land 8	1.80	0.85	7.04	4.57	39.40	31.70
鱼塘	Land 9	18.00	11.25	7.04	4.57	9.51	0.00
村庄	Land 10	2.25	0.75	7.04	4.57	82.07	75.13
控制流失量	—	—	—	4 841.38	3 873.11	26 407.70	21 126.16

表 2 现有土地利用优化模型参数(2)

Table 2 Model parameters for each land utilizing as usual (2)

类型编号	现有面积/hm ²	可溶氮流失模数 /kg·hm ⁻² ·a ⁻¹		总磷流失模数 /kg·hm ⁻² ·a ⁻¹		可溶磷流失模数 /kg·hm ⁻² ·a ⁻¹	
		上限(+)	下限(-)	上限(+)	下限(-)	上限(+)	下限(-)
Land 1	285.90	7.80	3.76	0.70	0.33	0.05	0.01
Land 2	54.37	13.08	11.39	3.01	2.34	0.26	0.02
Land 3	66.28	12.19	7.74	2.78	1.51	1.56	0.26
Land 4	213.06	17.17	14.56	1.67	1.36	0.62	0.54
Land 5	184.68	54.27	47.10	3.77	3.51	2.23	1.98
Land 6	14.83	53.64	49.26	3.42	3.03	2.39	2.07
Land 7	53.53	30.65	22.93	1.93	1.20	0.71	0.43
Land 8	16.97	31.50	23.64	4.50	0.30	0.35	0.06
Land 9	23.61	7.33	0.00	0.28	0.00	0.11	0.00
Land 10	43.25	70.12	63.20	8.60	4.92	3.93	2.68
—	956.45	22 365.75	19 010.89	717.49	631.39	87.23	68.04

通过编程求解模型(6)~(11), 可得优化的土地利用组合。区间上限的组合值为林地 285.90 hm², 毛竹 100 hm², 果园 62.79 hm², 稻田 407.78 hm², 鱼塘 100.00 hm², 其他土地面积为 0 hm², 所能达到的最大利润额 4 105.71 万元·a⁻¹。区间下限组合值为林地 768.38 hm², 果园 30.04 hm², 鱼塘 100.00 hm², 其他土

地利用面积为 0 hm², 这种土地利用组合的最大利润为 1 689.39 万元·a⁻¹。根据模型的敏感性分析, 考虑非点源污染控制, 各类土地利用环境经济效果的顺序为:(当区间上限时) 鱼塘 > 果园 > 毛竹 > 林地 > 稻田 > 坡草地 > 香蕉地 > 甘蔗地 > 蔬菜地 > 村庄用地;(当区间下限时) 鱼塘 > 果园 > 林地 > 坡草地 >

稻田 > 甘蔗地 > 毛竹 > 香蕉地 > 蔬菜地 > 村庄用地, 在安排利用土地时应综合考虑费效比顺序。将上限最优值和下限最优值组合在一起就是各类土地利用构成成套方案时应参考的规划区间, 这一区间整合了实施管理措施的环境和经济效果。

4 非点源污染控制措施性土地利用方式的优化

4.1 管理措施制定

利用 2002 年 5—9 月份共 8 场次全降雨过程调试和 2 场降雨来验证模拟模型 AGNPS 5.0 (Agricultural Non-point Source Model 5.0), 通过对模型的敏感参数分析, 可知不同形态的氮磷及其他污染物输出所对应的敏感性参数不同, 见表 3 所示。其中 CN 曲线数和降雨量 RA 是最敏感的两个参数, 降雨量是属于自然因子无法控制, CN 曲线数主要是与植被的覆盖率、土壤质地和耕作措施有关^[7]。根据参数敏感性, 可提出相应的面源污染管理措施。

表 3 AGNPS 模型参数的敏感性分析结果
Table 3 Sensitivity analysis outcome of parameters

类型	估算因子	显著性参数	备注
水文	径流量	CN, RA	RA——降雨径流, EI——降雨侵蚀力, MA——曼宁燥率系数, K——土壤侵蚀因子, C——作物种植因子, P——水土保持因子, Fert——化肥施用量, FA——施肥在表层土壤的残留率, LS——土地坡度, SL——土地坡长, CN——SCS-CN 曲线数
	峰值流量	CN, RA, MA	
侵蚀	泥沙量	RA, CN, EI, MA, K, C, P, LS	
营养盐	颗粒态氮	CN, RA, EI, K, C, P, LS, MA	
	可溶性的氮	CN, RA, Fert, FA	
	总氮	CN, RA, Fert, FA	
	颗粒态磷	EI, CN, RA, MA, SL, K, C, P, LS, FA, Fert	
	可溶性的磷	CN, RA, FA, Fert	
	总磷	CN, RA, FA, Fert	

注: 显著性大小由左向右排列。

措施 1: 等高耕作代替顺坡耕作。

措施 2: 建立多水塘系统。

措施 3: 化肥过量施用严重, 削减化肥施用量 30%。

措施 4: 坡耕地改为林地。

措施 5: 从试验区溶解态氮和沉积物分布看, 越靠近流域出口, 负荷越大, 因此, 把这些土地改种绿肥, 或种植草地过滤带, 绿肥的施肥水平按模型中提供的最低标准考虑。

措施 6: 村庄的畜禽粪便、生活污水是农村生态环境差的主要原因, 把现有村庄的污染负荷削减 30%。

措施 7: 由于农业上大力提倡保护性耕作, 如免耕、作物留茬增加覆盖度等措施减少水土流失, 考虑作物收获后留茬 30%, 那么收获后植被覆盖度将增加 50%(只考虑甘蔗、水稻、蔬菜)。

4.2 具体模型

考虑五川流域的特征, 以所有措施总投入最小为目标, 以所期望污染削减百分率为约束, 构造具体的管理措施的不确定性优化模型如下:

$$\min f^* = \sum_{i=1}^7 (PRACT_i) \cdot (ECOCO_i)^* \quad (12)$$

$$st \sum_{i=1}^7 (PRACT_i) \cdot (REDUCT_{ij})^* \cdot (PERM_j)^* \quad (13)$$

$$0 \leq (PRACT_i)^* \leq 1 \quad (14)$$

$$i=1,2,\dots,7; j=1,2,\dots,5 \quad (15)$$

式中: $PRACT_i$ 表示 7 种措施; $ECOCO_i$ 表示各措施的投入, $REDUCT_{ij}$ 表示各措施对沉积物、可溶氮、颗粒氮、可溶磷、颗粒磷的期望削减率; $PERM_j$ 表示沉积物、可溶氮、颗粒氮、可溶磷、颗粒磷的期望削减率。

4.3 参数确定

根据现场问卷调查获得各类措施的经济费用, 经过运行模拟模型 AGNPS 5.0 可得出各措施的削减污染效果, 依照各措施所在土地的实施面积, 可得下列不确定性系统优化模型的参数^[12], 见表 4 和表 5。

4.4 优化结果

通过计算机编程求解(12)~(15), 可得到预设削减率为 10%~15%时各个管理措施的使用情况。区间上限时方案组合为: 23.24%的措施 1, 21.83%的措施 2, 26.44%的措施 3, 100%的措施 7, 其他为 0%(百分率表示该种措施在各自土地利用类型上的使用面积百分比), 所需总投入为 9.86 万元。区间下限时方案组合为: 100%的措施 1, 100%的措施 2, 3.28%的措施 3, 21.79%的措施 5, 100%的措施 7, 其他为 0%, 所需总

表 4 实施各类措施的土地利用优化模型参数(1)

Table 4 Model parameters for land using with each management practice (1)

措施	不同措施费用/万元		不同措施的沉积物削减率/%		不同措施的颗粒氮削减率/%	
	下限(-)	上限(+)	上限(+)	下限(-)	上限(+)	下限(-)
措施 1	3.198	3.838	4.26	3.62	3.98	3.38
措施 2	11.651	17.925	—	—	14.34	12.19
措施 3	17.529	104.967	—	—	—	—
措施 4	13.384	40.152	—	—	10.64	9.04
措施 5	89.535	268.875	17.66	15.01	21.91	18.62
措施 6	12.906	32.265	—	—	—	—
措施 7	1.936	7.744	9.01	8.11	6.08	6.47

注:费用栏为问卷调查结果;削减率栏为“—”时,削减率看作为 0。

表 5 实施各类措施的土地利用优化模型参数(2)

Table 5 Model parameters for land using with each management practice (2)

措施	不同措施的可溶氮削减率/%		不同措施的颗粒磷削减率/%		不同措施的可溶磷削减率/%	
	上限(+)	下限(-)	上限(+)	下限(-)	上限(+)	下限(-)
措施 1	—	—	—	—	—	—
措施 2	14.98	12.73	14.98	12.73	14.95	12.71
措施 3	25.45	22.01	—	—	100	70
措施 4	—	—	—	—	—	—
措施 5	33.75	28.69	—	—	—	—
措施 6	4.95	4.46	—	—	7.12	6.41
措施 7	—	—	6.73	6.06	—	—

注:削减率栏为“—”时,削减率看作为 0。

投入为 91.52 万元。

通过不确定系统模型的敏感性分析可知,管理措施的费效比的好坏依次为:措施 7>措施 2>措施 1>措施 5>措施 3>措施 6>措施 4,在各自土地利用类型面积上实施这些措施也应该按这样的顺序。可知,推荐的最好的控制面源污染的管理措施应为措施 7,其次为措施 2。措施 3 和措施 6 环境控制效果较好,但因其投入成本较高,所以排序较后。将上限最优值和下限最优值组合在一起就是各处措施在构成成套方案时所选用的决策区间,这一区间整合了实施管理措施的环境和经济效果,具有较大的可接受性。决策者可以依照生产经验、个人偏好、参数变化和新信息,决定实施最佳管理措施的组合。

5 结论和建议

现有土地利用模式不能满足农业面源污染控制和经济效益最大化的共同要求,需要进一步调整。一方面,到 2000 年底,该流域收入总额为每年 2 091.5 万元,高于最佳土地利用下限 1 689.39 万元,低于最佳土地利用的上限 4 105.71 万元。因为实际收入还包括该流域的非农业收入,所以总体上现有土地利用的

收益低于最佳土地利用规划的下限收益。另一方面,环境经济效益一般的坡草地、香蕉地、果园、菜地和村庄用地所占比例过多,而环境经济效益较好的鱼塘、毛竹、稻田等用地偏少。同时,现有土地利用模式营养盐污染流失过大,对附近水域造成极大威胁,不能满足农业面源污染控制的总体要求。

从农业面源污染的控制措施用地来看,流域当前耕作方式、作物种类、村庄建设需要进一步改善。保护性耕作,如作物留茬 30%,作为农业面源污染控制最佳管理措施之一,具有较好的环境经济效果,应提倡使用。建立在当地自然特征和生产习惯上的多水塘系统,不仅在截留沉积物、吸收营养盐方面具有极大的潜力,而且由于能以“猪舍-鱼(鸭)塘-田地”生态模式进行管理,具有良好的经济收益。等高耕作、生态村庄建设、在流域出口汇水较急区域设立田地缓冲带、减少农药化肥施用量等措施,也需要逐步推广。降低各类控制措施的实施成本,改善经济作物用地的环境经济效果,也是当务之急。

系统优化模型的精度依赖于输入数据的准确性,因此在建模、求解过程中应充分考虑面源污染控制系统的不确定因素,并将这些不确定信息整合到了模型

中,力争能对实际系统很好地反映,从而提高规划的合理性和可操作性。在模拟模型 AGNPS5.0 基础上使用不确定性区间系统优化模型,对基于控制农业面源污染的措施性土地利用方式进行优化设计,能够全面考虑流域环境、经济和技术等诸多因素的影响,这种设计过程具有较大的优势和科学性。

参考文献:

- [1] 贺缠生,傅伯杰,陈利顶.非点源污染的管理及控制[J].环境科学,1998, 19(5):87- 91.
- [2] Young R A, Onstad C A, Bosch D D, et al. AGNPS: A nonpoint- source pollution model for evaluating agriculture watersheds[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1989, 44(2): 168- 173.
- [3] Beasley D B, Huggins L F, Monke E J. ANSWERS: A model for watershed planning[J]. Transaction of American Society of Agricultural Engineers, 1980, 23:938- 944.
- [4] Whittemore R C. The BASINS model[J]. Water Environment Technology, 1998, 10(12):57- 61.
- [5] Arnold J G, Allen P M, Bernhardt G A. Comprehensive surface-ground- water flow model[J]. Journal of Hydrology, 1993, 142:47- 69.
- [6] US Environmental Protection Agency. National management measures to control non- point source pollution from agriculture[R]. U.S.EPA Contract # 68- C99- 249 Work Assignment # 0- 29, 2000. 1- 8.
- [7] 张玉珍.九龙江上游五川流域农业非点源污染研究[D]. 厦门:厦门大学, 2003.101- 143.
- [8] Huang G H. A hybrid inexact- stochastic water management model[J]. European Journal of Operational Research, 1998, 107: 137- 158.
- [9] Huang G H, Sae- lim N, Liu L, et al. An interval- parameter fuzzy- stochastic programming approach for municipal solid waste management and planning[J]. Environmental Modeling and Assessment, 2001, 6: 271- 283.
- [10] Huang G H, Moore R D. Grey linear programming, its solving approach, and its application[J]. International Journal of Systems Science, 1993, 24: 159- 172.
- [11] 邹 锐,郭怀成,刘 磊.洱海流域环境经济相协调的农林土地利用不确定性系统规划[J]. 环境科学学报, 1999, 19(2): 186- 193.