

基于清洁发展机制的县南沟流域 商品型生态农业系统优化

顾文^{1,2}, 王继军^{1,3}, 张雯佳³

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

2. 烟台市水利建筑勘察设计院, 山东 烟台 264000; 3. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 针对县南沟流域因资源利用率低导致的农业产业与农业资源系统运行相悖, 商品型生态农业系统链网结构不完整等问题, 在清洁发展机制(CDM)理念下, 根据可能发展路径, 设置了商品型生态农业发展的3个阶段5种情景并进行了系统优化。结果表明, 商品型生态农业系统优化后, 经济效益得到了不同程度提高, 土地利用结构发生了重要变化。阶段Ⅰ(情景A)、阶段Ⅱ(情景B1, B2)、阶段Ⅲ(情景C1, C2)的经济效益比现实状况分别提高了34.4%, 53.0%~55.2%, 72.8%~73.7%; 基于CDM下的农业经济系统与农业生态系统优化耦合阶段的农林牧土地利用结构为1:12.6:4.4, 林地比重较阶段Ⅰ、阶段Ⅱ提高了; 商品型生态农业系统发展过程表现出“现状发展态势→农业生态经济系统链网构建阶段→农业经济系统与农业生态系统优化耦合阶段”的发展趋势。

关键词: 商品型生态农业; 线性规划; 清洁发展机制; 情景设置; 县南沟流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)06-0146-07

中图分类号: F327

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.06.035

Optimization of Ecological Agricultural System with Commodity Based on Clean Development Mechanism

GU Wen^{1,2}, WANG Ji-jun^{1,3}, ZHANG Wen-jia³

(1. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shanxi 712100,

China; 2. Yantai Water Building Conservancy Investigation & Design Academy, Yantai,

Shandong 264000, China; 3. Northwest A&F University, Yangling, Shanxi 712100, China)

Abstract: The agricultural resources of Xiannangou watershed were not used efficiently, the system of agricultural practices grow inconsistently with agricultural resources, and the chain network structure of ecological agricultural system with commodity(EASC) was incomplete. In order to solve these problems, Three phases and five scenarios of the possible development path of ecological agriculture with commodity(EAC) was set on the principle of clean development mechanism(CDM), and further efforts were made to optimize the EASC. The results showed that the economic benefits of each phase had been improved and the land use structure had also been significantly changed after the optimized of EASC. The economic benefits of phase I to III had been improved by 34.4%, 53.0~55.2%, and 72.8~73.7%, respectively comparing with the actual state. On the principle of CDM, the coupling of agricultural economic system and agricultural ecosystem, a better land use structure(agriculture : forestry : animal husbandry = 1 : 12.6 : 4.4) was produced, implying that the proportion of forestry increased compared to phase I and phase II. The development progress of EASC with the development trend of the actual state→the modified chain network construction of EASC→the optimization of agricultural economic system and agricultural ecosystem coupling has its historical inevitability.

Keywords: ecological agricultural system with commodity (EASC); linear programming; clean development mechanism(CDM); scenario setting; Xiannangou watershed

收稿日期:2014-02-20

修回日期:2014-02-27

资助项目:中国清洁发展机制基金项目“黄土高原退耕区农户低碳生产模式与政策研究”(2012027); 科技部“十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD31B05)

作者简介:顾文(1990—),男(汉族),山东省临沂市人,硕士研究生,研究方向为水土保持与生态经济。E-mail:guwen1234567@126.com。

通信作者:王继军(1964—),男(汉族),陕西省渭南市人,研究员,主要从事生态经济方面的研究。E-mail:jjwang@ms.iswc.ac.cn。

伴随着退耕还林工程的实施,退耕区域生态系统结构与产业结构发生了重要变化,商品型生态农业得到了进一步的发展。在商品型生态农业的研究与实践过程中,人们主要侧重于概念及系统耦合关系的研究。比如王继军等人^[1]通过对农业生态经济问题的诊断,指出商品型生态农业模式能够解决流域生态经济系统建设中的主要问题及产生问题的症结。李奇睿等^[2]利用结构方程模型分析了安塞县及其南、中、北部商品型生态农业系统的耦合关系,发现生态环境改善未对系统耦合起到支撑,农业资源与农业产业相悖。李奇睿等^[3]还通过生态位评价对1998—2008年安塞县商品型生态农业系统演变过程进行了定量分析,结果表明安塞县商品型生态农业系统综合生态位显著提高,但通过提高资源利用效率,协调资源与产业的关系,可使商品型生态农业系统进一步发展;崔绍芳^[4]等通过耦合度模型对安塞县商品型生态农业系统进行了阶段划分,认为目前安塞县正处于退耕资源未得到利用的“过渡退耕”阶段。可见,资源利用效率不足、资源与产业相悖已经成为制约商品型生态农业系统健康发展的关键,商品型生态农业系统亟待优化。

清洁发展机制(CDM)是《京都议定书》中建立的发达国家与发展中国家之间合作减排温室气体的灵活机制,它实现了碳汇产品的商品化、市场化。将CDM引入商品型生态农业系统,退耕还林工程所带来的大量林地资源可通过碳汇形式实现其商品化,形成林地产业,从而完善商品型生态农业系统产业结构。可见,CDM是提高林地资源利用率、解决资源与产业之间相悖态势的良好途径。因此,本文试图在CDM框架下通过林草资源的合理配置,实现商品型生态农业系统链网结构的完善,从而实现商品型生态农业系统的良性循环。县南沟流域地处黄土高原腹地,退耕还林工程的实施使该流域水土流失得到有效控制,林草植被恢复率和覆盖度均得到大幅度提高,成为黄土丘陵沟壑区典型的退耕区域,适合发展退耕区碳汇产业。鉴于此,本研究选取县南沟流域为研究对象,依据县南沟流域特点,通过对可适模式的设计,将碳汇融入流域产业结构,对流域商品型生态农业系统进行优化,以期寻找出一种土地资源合理充分利用、经济效益最大化的土地利用方式,为制定流域发展规划提供借鉴。

1 研究区概况

县南沟流域位于黄土高原中部的安塞县,属于典型的黄土丘陵沟壑区(东经 $109^{\circ}12'12''$ — $109^{\circ}22'12''$,

北纬 $36^{\circ}41'24''$ — $36^{\circ}46'12''$)。流域总面积为 $5\,063\text{ hm}^2$,总人口 $2\,520$ 人。1999年开始实施退耕还林工程,目前有林地 $1\,549.80\text{ hm}^2$,占总面积的 30.55% ,荒草地 $2\,217.87\text{ hm}^2$,占总面积的 43.80% ,果园 276.47 hm^2 ,占总面积的 5.46% ,大牲畜 173 头,羊存栏 500 只,猪存栏 335 头。流域年降水量在 $500\sim 550\text{ mm}$,相对比较丰沛,但年内分配不均,降雨集中在7—9月份,属大陆性干旱半干旱气候。丰沛的降雨使得该流域自退耕还林工程实施以来,林草资源不断增加,从而使碳生产量不断增加,满足以碳汇角度发展商品型生态农业的基本要求。

2 问题诊断与优化思路

2.1 问题诊断

县南沟流域是一个有着6个行政单元的完整流域,目前流域内有以山地苹果为主、高效设施农业为辅的产业结构,但是各产业间尚未形成良好的链网结构。

(1) 主导产业发展滞后。根据安塞县政府和沿河湾政府对县南沟流域的规划,未来将山地苹果作为县南沟流域主导产业进行重点扶持。目前,仅有寨子湾一个行政单元已经形成以山地苹果为主导的果园产业,其果园面积占流域总果园面积的 63.08% ,每 1 hm^2 纯收入可达 $90\,000$ 元以上。而流域内其他行政单元的农民对经营管理果园的积极性不高,其每 1 hm^2 果园纯收入仅在 $15\,000\sim 30\,000$ 元之间,效益较低。县南沟流域有着适宜苹果生长的光照和水分等自然条件,故在流域下一步的发展中,应将果园产业的重点放在精细化管理上,逐步实现从一个行政单元的果园产业到整个流域的果园产业的过渡。

(2) 林草资源搁置浪费、养殖业发展滞后缺失。自退耕还林工程实施以来,流域内林草资源不断增加,目前流域内林草覆盖度已达 74.40% 。但由于退耕还林政策对放牧的限制,使得流域内丰富的林草资源长期以来搁置、浪费,未得到开发利用,严重阻碍了林草资源发挥其经济效益。目前流域内仅有 500 只羊左右,尚未形成规模化的养殖业,致使养殖业发展滞后,从而使以“种植业、林草资源→养殖业(牧业)→农家肥→果业、大棚业”为核心的商品型生态农业系统链网结构断裂,各产业间耦合效率低,严重阻碍了生态经济系统协调稳定发展。因此,县南沟流域在进行商品型生态农业的建设过程中,应逐步补充养殖业的“断裂带”,通过人工种草和适度开发林草资源来完善系统链网结构,以此促进农民增收、推动流域经济又好又快发展。

(3) 高效设施农业发展不足。以大棚种植为主的高效设施农业能通过有限的土地获得较高的经济效益,亦是政府大力支持的产业。但是,由于大棚对光照和水分供给的要求十分严格,流域内只有位于沟口附近的方家河与砖窑沟以及位于梁岭上的畔坡山村有大棚,且规模较小。经过调查,方家河以“西瓜+蔬菜”的种植模式效益较高,纯收入可达 105 000 元/hm²。可见,流域应在技术、自然条件允许的范围内尽可能拓展大棚产业。

2.2 优化思路

基于低碳生产理念,以农业生态经济系统良性循环为目标,通过提高林草资源的利用率及附加值,即完善“林草资源—养殖业(畜牧业)”链结,并使林草置于碳汇及其可交易的态势下,完善商品型生态农业系统链网结构,解决农业产业与农业资源相悖态势,实现商品型生态农业系统在现有认识、理念和技术水平上的资源与产业优化,促进农业生态经济系统的协调发展。

3 优化模型的建立及求解

商品型生态农业系统优化的目标是要通过对系统内部资源的重新配置、产业的重新调整来完善系统链网结构,使系统的结构更加完善、功能更加稳定、稳定性得到提高的同时,系统的生态经济效益趋于最大。以此为目标,通过线性规划(LP)对安塞县县南沟流域进行商品型生态农业系统优化。

3.1 决策变量设置

商品型生态农业系统是由农业资源系统和农业产业系统为核心耦合而成,因此选择可以表征两个子系统的变量为决策变量。共设置了 12 个决策变量: X_1 (生态林面积, hm²)、 X_2 (天然草地面积, hm²)、 X_3 (人工草地面积, hm²)、 X_4 (果园面积, hm²)、 X_5 (大棚种植面积, hm²)、 X_6 (口粮田种植面积, hm²)、 X_7 (饲料粮种植面积, hm²)、 X_8 (非生产地面积, hm²)、 X_9 (舍饲羊数量, 只)、 X_{10} (半舍饲半放牧羊数量, 只)、 X_{11} (猪数量, 头)、 X_{12} (大牲畜数量, 头)。其中,非生产地包括居民点、道路、水域、河滩等用地,大牲畜包括牛和驴。

3.2 目标函数

基于上述的研究理念与思路,本着充分、合理利用农业资源,保证区域生态平衡和粮食安全的原则,设计商品型生态农业系统优化的目的是实现经济效益最大化。因此,目标函数为:

$$\max F(x) = \vec{C} \cdot \vec{X}$$

式中: $F(x)$ ——商品型生态农业系统经济效益(元); $\vec{X} = [X_1, X_2, \dots, X_n]^T, \vec{X} \geq 0$ (hm², 头, 只); $\vec{C} = [C_1,$

$C_2, \dots, C_n]$ ——各决策变量的效益系数(元/hm², 元/头, 元/只)。

3.3 约束条件

针对县南沟流域自然现状与经济现状,结合安塞县及沿河湾镇政府对县南沟流域的农业生态经济发展战略规划,以实现流域生态经济协调发展下的经济效益最大化为目标,设置约束方程。

3.3.1 土地面积约束 流域现有总土地面积 5 063.80 hm²,以林草地为主。果园产业与大棚产业面积达到 311.47 hm²,粮田用地仅占 254.39 hm²,另外还有 730.27 hm²的非生产地。通过 2012—2013 年流域走访、调研,李慧茹^[5]关于县南沟流域景观格局的研究,结合该流域的发展规划得知,该流域果园面积最高可达 455 hm²,基本农田面积最大可达 395 hm²,大棚面积最大可达 45.7 hm²。另外根据王继军等^[6]关于“弹性资源”的介绍,确定县南沟流域果园与基本农田的弹性资源量为 784.47 hm²。

总土地面积约束:优化应保持流域总面积不变,即各种土地利用类型面积之和应等于流域总面积:

$$X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 = 5\ 063.80$$

基本农田面积约束:用于人工草地、饲料生产、口粮生产和大棚种植的用地面积之和应不超过流域最大基本农田面积,即

$$X_3 + X_5 + X_6 + X_7 \leq 395$$

果园面积和基本农田面积之和应不超过流域弹性资源量:

$$X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 \leq 784.47$$

果园与大棚面积约束:根据流域果园与大棚现状,结合政府对县南沟果园产业与大棚产业规划和流域土地适宜性,确定果园面积不应超过 455 hm²,大棚面积不超过 45.7 hm²,即

$$X_4 \leq 455$$

$$X_5 \leq 45.7$$

非生产地面积约束:非生产地包括内沟道、河滩、道路、水域等。由于县南沟流域在退耕十余年来非生产地面积一直保持稳定,因此设定非生产地面积维持现有状况。即

$$X_8 = 730.26$$

3.3.2 粮食需求与安全约束 口粮约束:根据唐华俊等^[7]关于人均粮食需求量的研究,并结合对流域粮食生产自给率的调查,确定流域内人均粮食需求量约为 231 kg/a。故有如下约束:

$$4\ 125 X_6 \geq 2\ 520 \times 231$$

猪肉、羊肉约束:根据《中国统计年鉴 2012 年》关

于城镇居民人均消费猪肉、羊肉的标准与流域内猪、羊肉的自给率水平,确定流域最低养殖猪、羊数量。另外为保证流域内现有产业不受破坏,确定流域内养殖猪、羊数量不低于现有值,即

$$87.5X_{11} \geq 2\ 520 \times 12.38$$

$$X_{11} \geq 335$$

$$18.75 \times (X_9 + X_{10}) \geq 2\ 520 \times 2.37$$

$$X_9 + X_{10} \geq 500$$

大牲畜约束:目前流域内大牲畜包括牛和驴,主要是一些相对高龄或文化程度较低的劳动者无法驾驭机动车和机械设备的代步、运输货物、耕地的工具,为保护农户已经形成的耕作习惯不被打破,设定流域内大牲畜数量不低于现有数量; $X_{12} \geq 173$

3.3.3 生态环境约束 在设置生态环境约束时引入了生态绿当量的概念。生态绿当量^[8]定义为其他绿色植被的绿量相对于等量森林面积的绿量的比率,其主体可以是草地、耕地、果园地等其他绿色植被。

指标选取及其量化。退耕还林工程的实施在改变土地利用结构的同时,也改变了商品型生态农业系统的功能,对小流域气候、水量、土壤等影响巨大。所以,在选择指标时既要表征各类生态系统本身的发展规律,又要体现其对生态、社会、经济的保护、增

益和调节功能。根据毛文永^[9]著作中日本专家通过调查法得到的评分分值,针对不同生态系统的服务,从大气、水、土壤、空间和生物等 5 个方面赋予不同的功能分值(表 1)。

由于表 1 中的各项功能分值已经考虑了各项环境子功能的权重,所以其生态服务总分值可以将各子功能的分值通过累加求得:

$$P = \sum_{i=1}^{17} F_i$$

式中: P ——生态服务总分值; F ——指标量值; i ——指标体系的指标数。

由此得出林地的生态功能服务价值分值为 164.15,相同面积及全年满种情况下,天然草地分值为 132.26,人工草地分值为 121.84,园地分值为 124.53,耕地分值为 113.55。

根据上述不同土地生态服务价值的计算,在全年满种的前提下,假定林地的绿当量为 1,定义

$$K_i = P_i / P_{林}$$

式中: K_i ——第 i 类地表绿色覆被生态系统的生态绿当量; P_i ——第 i 类地表绿色覆被生态系统的生态服务总分值; $P_{林}$ ——林地生态系统的生态服务总分值。

表 1 生态系统的各种环境保护功能的评价分值

项目	功能	评价分值				
		耕地	林地	天然草地	人工草地	园地
大气	大气组成改善-1	9.08	6.95	7.40	6.30	6.50
	大气组成改善-2	9.75	5.13	5.48	7.30	5.10
	大气净化-1	8.55	5.33	5.33	6.58	5.80
	大气净化-2	9.63	5.23	5.33	6.68	5.80
	气候缓和	9.28	5.23	4.90	6.46	5.40
	防噪声	8.75	4.13	3.70	5.83	4.00
水	洪水防止	9.56	7.18	6.30	5.60	5.80
	水源涵养	9.48	6.85	6.20	5.00	5.30
	水质净化	8.65	8.15	6.43	5.83	6.70
	防止土砂崩溃	8.95	7.73	7.18	7.15	5.40
土壤	防止表面侵蚀	8.85	8.38	7.73	6.78	5.30
	防止地面下沉	7.70	6.78	6.20	6.10	5.25
	污染物净化	8.13	7.28	7.40	6.30	8.10
空间	防止发生灾害	8.75	7.50	7.60	7.98	7.30
	提供避难地	8.95	9.25	6.75	9.28	9.50
	维持景观	8.45	9.45	7.93	7.75	7.00
	维持娱乐空间	8.16	9.45	8.70	6.78	4.70
生物	生物相的保护	7.83	6.63	5.10	5.00	4.60
	防止有害动植物	5.65	5.63	6.18	5.83	6.00

注:评价意义:10 为极大,7.5 为较大,5 为较小;大气组成改善-1 表示吸收 CO₂ 的生态服务功能;大气组成改善-2 表示制造 O₂ 的生态服务功能;大气净化-1 表示吸尘滞尘的生态服务功能;大气净化-2 表示吸收有毒气体的生态服务功能;耕地包括口粮田和饲料粮田,皆为旱地。

则在林地绿当量为 1.00 的情况下,天然草地的绿当量为 0.81,人工草地为 0.74,园地为 0.76,耕地为 0.69。但实际上由于地区之间的气候差异,同一时间不同地区、不同用地的绿当量是不同的,同一地区不同时间的各种用地的绿当量也是不同的。考虑到各地区作物有不同的生长期和熟制,各种土地类型绿当量还应乘以一个相当于全年满种的生产期系数^[10]。县南沟流域位于陕西省安塞县,为一年一熟区域,取全年满种的生长期系数为 0.46。则可以得到调整后的全年平均绿当量,天然草地为 0.37(草地考虑熟制),人工草地为 0.34,园地为 0.35,耕地为 0.32。

设流域总面积为 S ,流域最佳森林覆盖率为 R ,二者相乘得到流域最佳林地面积 $S_{林} = 2\ 228.07\ \text{hm}^2$,用流域实际林地面积 X_1 除以最佳林地面积得到流域实际林地绿当量 $k_{林}$ 。 X_i 为第 i 类土地利用类型面积,相对应绿当量为 g_i , K 为流域绿当量,即流域内具

有绿当量的各种用地的绿当量之和。由于县南沟流域位于黄土丘陵沟壑区第 II 副区,根据吴钦孝^[11]的研究,取流域最适宜森林覆盖率为 $R = 44\%$,林草覆盖率为 60%。计算公式为:

$$S_{林} = S \times R \quad k_{林} = X_1 / S_{林}$$

$$K = k_{林} + \sum_{i=1}^4 \left(\frac{X_i \cdot g_i}{S_{林}} \right)$$

用 K 与 1 的大小做比较,若 $K \geq 1$,则生态绿当量达标。

根据李慧茹^[5]的研究,确定适宜生态林面积不超过 2 579.8 hm^2 ,即:

$$X_1 \leq 2\ 579.8$$

3.4 经济系数与情景模式设置

3.4.1 经济系数 本研究所利用的经济系数是从本课题组 2012—2013 年两年流域调研数据和查阅有关文献所得(表 2)。

表 2 各决策变量的经济系数

元/ hm^2 ,元/头,元/只

X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}
1 350/2 535	0	15 365	45 000	73 560	10 845	9 525	0	900	1 000	1 200	450

注:生态林 X_1 的经济系数 1 350 为退耕还林补贴,而在 CDM 机制下,生态林将以生态产品碳汇的形式出售,根据黄怀雄等^[12]的研究,采用瑞典碳税率法和造林成本法的平均值,取 650 元/t,而根据本课题组及相关研究^[13],流域内生态林在成林后将稳定在 3.9 t/ hm^2 ,即 2 535 元/ hm^2 ;由于天然草地用于满足养殖业的需求,因此其经济效益体现在牲畜里;非生产地对商品型生态农业无直接贡献,其经济系数为 0。各变量经济系数的单位分别为单位土地利用类型面积(hm^2)和单位牲畜(只、头)所产生的经济价值(元)。

3.4.2 情景设置 依据对县南沟流域现状的诊断结果,县南沟流域存在资源浪费、商品型生态农业系统链网结构断裂的情况,结合商品型生态农业发展的阶段,按照 3 个阶段 5 种情景设置。

(1) 阶段 I 现状发展态势。该阶段设置一种情景(A),即现状态势情景。在现有发展态势下,林草资源由政府管制,严禁砍伐森林与放牧,林地价值体现在退耕补贴上。目前流域生态林面积超过退耕补偿面积,在无经济效益刺激的情况下,农户不会主动栽植生态林。此时,农民不利用现有荒草资源,仅依靠人工草地与饲料粮发展舍饲养殖。

该情景下对养殖业的约束^[14-17]:通过人工草地和饲料粮提供一定自给率水平下的养殖饲草和饲料,并利用秸秆补充饲草,但在现有发展态势下,秸秆利用率较低。即

$$X_{10} = 0$$

牛、羊对饲草的约束:

$$385X_9 + 2\ 870X_{12} \leq 8\ 195X_3$$

牛、羊对秸秆的约束:

$$231X_9 + 2\ 010X_{12} \leq 3\ 657X_7$$

羊、猪对饲料的约束:

$$38.5X_9 + 287X_{12} + 300X_{11} \leq 5\ 250X_7$$

该情景模式下的目标函数:

$$F(x) = 1\ 350 \times 1\ 415.8 + 0 \times (X_1 - 1\ 415.8) + 15\ 365X_3 + 45\ 000X_4 + 73\ 560X_5 + 10\ 845X_6 + 9\ 525X_7 + 900X_9 + 1\ 200X_{11} + 450X_{12}$$

(2) 阶段 II 农业生态经济系统“链网”构建阶段。

该阶段设置两种情景:全舍饲情景(B-1)和半舍饲半放牧情景(B-2)。在这个阶段,农民逐渐意识到草地资源的价值,在政策允许下通过刈草或放牧合理利用,并加大了对秸秆的利用率,形成完整的农业生态经济系统链网结构。

B-1 全舍饲情景:在该情景下,林草资源依然由政府管制,但允许农民在不破坏生态环境的前提下对天然草地进行刈割,并结合人工草地和作物秸秆进行全舍饲养殖。

该情景下对养殖业的约束: $X_{10} = 0$

牛、羊对饲草的约束^[18]:

$$500X_9 + 4\ 018X_{12} \leq 8\ 195X_3 + 565X_2$$

牛、羊对秸秆的约束:

$$115.5X_9 + 861X_{12} \leq 5\ 486X_7$$

羊、猪对饲料的约束:

$$38.5X_9 + 287X_{12} + 300X_{11} \leq 5\ 250X_7$$

该情景下的目标函数:

$$F(x) = 1\,350 \times 1\,415.8 + 0 \times (X_1 - 1\,415.8) + 15\,365X_3 + 45\,000X_4 + 73\,560X_5 + 10\,845X_6 + 9\,525X_7 + 900X_9 + 1\,200X_{11} + 450X_{12}$$

B-2 半舍饲半放牧情景:在该情景下,林草资源适当开放,农民可在夏秋季节在天然草地上进行放牧,春冬季节舍饲养殖。这种半舍饲半放牧的情景在利用天然草地方面较全舍饲充分,同时由于羊子活动量加大消耗量也增多。此情景更容易促进商品型生态农业系统链网结构的完善。

该情景下对养殖业的约束: $X_9 = 0$

牛、羊对饲草的约束:

$$746X_{10} + 4\,018X_{12} \leq 8\,195X_3 + 1\,130X_2$$

牛、羊对秸秆的约束:

$$172X_9 + 861X_{12} \leq 5\,486X_7$$

羊、猪对饲料的约束:

$$57.4X_9 + 287X_{12} + 300X_{11} \leq 5\,250X_7$$

该情景下的目标函数:

$$F(x) = 1\,350 \times 1\,415.8 + 0 \times (X_1 - 1\,415.8) + 15\,365X_3 + 45\,000X_4 + 73\,560X_5 + 10\,845X_6 + 9\,525X_7 + 1\,000X_{10} + 1\,200X_{11} + 450X_{12}$$

(3) 阶段 III 农业经济系统与农业生态系统优化耦合阶段。该阶段设置两种情景:全舍饲+碳汇情景(C-1)、半舍饲半放牧+碳汇情景(C-2)。在这个阶段,农业生态经济系统链网结构已经完善,农民为寻求高额经济效益,通过进一步加大对秸秆利用提高资源利用率。而在后退耕时代,如果停止发放退耕补贴,农民通过出售林地碳汇从生态林获得经济效益。

C-1 全舍饲+碳汇情景

该情景下对养殖业的约束: $X_{10} = 0$

牛、羊对饲草的约束:

$$500X_9 + 4\,018X_{12} \leq 8\,195X_3 + 565X_2$$

牛、羊对秸秆的约束:

$$115.5X_9 + 861X_{12} \leq 6\,400X_7$$

羊、猪对饲料的约束:

$$38.5X_9 + 287X_{12} + 300X_{11} \leq 5\,250X_7$$

该情景下的目标函数:

$$F(x) = 2\,535X_1 + 15\,365X_3 + 45\,000X_4 + 73\,560X_5 + 10\,845X_6 + 9\,525X_7 + 900X_9 + 1\,200X_{11} + 450X_{12}$$

C-2 半舍饲半放牧+碳汇情景

该情景下对养殖业的约束: $X_9 = 0$

牛、羊对饲草的约束:

$$746X_{10} + 4\,018X_{12} \leq 8\,195X_3 + 1\,130X_2$$

牛、羊对秸秆的约束:

$$172X_9 + 861X_{12} \leq 6\,400X_7$$

羊、猪对饲料的约束:

$$57.4X_9 + 287X_{12} + 300X_{11} \leq 5\,250X_7$$

该情景下的目标函数:

$$F(x) = 2\,535X_1 + 15\,365X_3 + 45\,000X_4 + 73\,560X_5 + 10\,845X_6 + 9\,525X_7 + 1\,000X_{10} + 1\,200X_{11} + 450X_{12}$$

4 优化结果与分析

本研究的计算结果是在线性规划软件 Lingo 11.0 中完成的。各决策变量优化后取值详见表 3。从表 3 可以看出,优化后各情景的经济效益较优化前均有不同程度的提高,整体而言,呈现出 3 个梯度。现状发展态势下的优化较优化前提高了 34.4%,在政府有限管制的农业生态经济系统“链网”构建的阶段 II 提高了 53.0%~55.2%,而在政府完全不管制的农业生态系统与农业经济系统优化耦合阶段 III 最高,达到 72.8%~73.7%。各阶段经济效益的提高得益于在充分利用自然资源的前提下,商品型生态农业系统链网结构均得到不同程度的完善。各阶段通过增加养殖业(养羊)来弥补对天然草地等的利用不足,同时林产品逐渐形成林产业,符合商品型生态农业系统对土地资源合理充分利用的内在要求。

阶段 I 是在政府管制情况下的优化,此阶段的情景 A 由于林草资源依然受到政府管护,农民刈割草地舍饲养殖的观念尚未形成,养殖业的发展主要依靠人工草地。但是流域内弹性资源有限,无法满足果园、大棚与养殖业的最大化,养殖业占用了 84.07 hm² 的基本农田用做人工草地是有待进一步改善的关键。

阶段 II 是政府在有限管制情况下的优化,在此阶段,林地资源依然受到保护,但是荒草地资源在合理范围内被利用,根据养殖的形式不同设置了全舍饲情景 B-1 与半舍饲半放牧情景 B-2。从表 3 中可以看出,此两种情景在草地得到利用的情况下,养殖业对基本农田的需求减少,果园与大棚两个相对收入较高的产业已经达到饱和。而由于刈割养殖与半放牧养殖对饲料、饲草的需求不同且天然草地对羊的承载力也不同,因此,通过合理改善舍饲养殖与半舍饲半放牧养殖的饮食结构,从而调整天然草地与饲料田的种植比例,可使养殖业发挥最大效益。

阶段 III 是政府在完全不管制情况下的优化,这个阶段是政府不再补助退耕林地,农民依靠退耕林地碳汇出售获取林地经济效益的阶段,是商品型生态农业

系统链网结构完善后系统内部优化耦合阶段。此阶段,因市场化后的林地碳汇价值高于退耕补偿价值,所以情景 C-1 与情景 C-2 的宜林地已全部造林,用于

养殖业的天然草地减少,所以此阶段较农业生态经济系统链网构建阶段增加了人工草地,但可供养殖的草地资源量仍减少,养殖规模下降。

表 3 各情景优化结果

决策变量	优化前	阶段 I		阶段 II		阶段 III	
		情景 A	情景 B-1	情景 B-2	情景 C-1	情景 C-2	
X_1 生态林面积/hm ²	1 549.80	1 549.80	1 549.80	1 549.80	2 579.80	2 579.80	
X_2 天然草地面积/hm ²	2 217.87	1 999.27	1 999.27	1 999.27	969.27	969.27	
X_3 人工草地面积/hm ²	0	84.07	72.27	37.02	96.24	81.05	
X_4 果园面积/hm ²	276.47	389.47	455.00	455.00	455.00	455.00	
X_5 大棚种植面积/hm ²	35.00	43.13	45.70	45.70	45.70	45.70	
X_6 口粮田种植面积/hm ²	194.39	141.12	141.12	141.12	141.12	141.12	
X_7 饲料粮种植面积/hm ²	60.00	126.67	70.37	105.62	46.40	61.59	
X_8 非生产地面积/hm ²	730.27	730.27	730.27	730.27	730.27	730.27	
X_9 舍饲羊数量/只	500	500	2 053	0	1 282	0	
X_{10} 半舍饲半放牧羊数量/只	0	0	0	2 503	0	1 426	
X_{11} 猪数量/头	335	357	357	357	357	357	
X_{12} 大牲畜数量/头	173	173	173	173	173	173	
$F(x)$ 经济效益/万元	2 053.66	2 759.55	3 141.33	3 186.27	3 548.78	3 567.13	

5 结论

(1) 纵观商品型生态农业系统发展过程,“现状发展态势→农业生态经济系统链网构建阶段→农业经济系统与农业生态系统优化耦合阶段”是其必然的发展趋势。目前流域正处在政府完全管制阶段,因此林草资源搁置、浪费,商品型生态农业系统链网结构不完善,农民收入水平较低。而在政府逐步放开对林草资源的限制,并引导农民合理充分利用草地资源、作物秸秆后,养殖业的进入完善了流域商品型生态农业系统链网结构,使流域“种植业、林草资源→养殖业→农家肥→果业、大棚业”的链网结构运行更顺畅。在退耕工程实施一定年限后,林地完全成林,政府不再向农户提供退耕补偿款,农户便在清洁发展机制(CDM)下通过向市场提供林地碳汇获取收益。所以,商品型生态农业系统有着从“阶段 I→阶段 II→阶段 III”的自然发展趋势。

(2) 就目前而言,流域内退耕补偿林地面积与现有林地面积相当,退耕补偿机制较为合理。经调研走访得知,安塞县政府正在对流域进行新一轮的退耕还林规划,其补偿机制如何尚不得知,但政府对流域的规划正是符合“现状发展态势→农业生态经济系统链网构建阶段”的发展趋势。

(3) 现状下流域农林牧土地利用结构为 1:6.31:7.66,现状发展态势阶段、农业生态经济系统链网构建阶段的土地利用结构较现状变化不大,主要是粮食

用地和牧草地内部种植结构的调整,而农业经济系统与农业生态系统优化耦合阶段的土地利用结构为 1:12.6:4.4 左右,变化较大。因为在 CDM 框架下,林地生产的大量碳汇可以获得高额经济效益,所以林地面积大量增加,致使土地利用结构发生重大改变。

(4) 虽然阶段 III(农业经济系统与农业生态系统优化耦合阶段)是商品型生态农业系统在现有技术水平和理念下所能达到的最高阶段,但其实现的必要前提是建立完善的碳交易市场。目前国内碳交易仅发生在生物质能源、风能建设和煤层气开发利用等方面,尚无退耕还林碳交易市场。因此,通过合理的方法对退耕还林工程碳汇进行精确测算,完善退耕还林工程碳交易市场,可提高农业经济系统与农业生态系统的优化耦合。

[参 考 文 献]

- [1] 王继军,权松安,谢永生,等.流域生态经济系统建设模式研究[J].生态经济,2005(10):136-140.
- [2] 李奇睿,王继军,郭满才.基于结构方程模型的安塞县商品型生态农业系统耦合关系[J].农业工程学报,2012,28(16):240-247.
- [3] 李奇睿,王继军.基于退耕背景下安塞县商品型生态农业系统演变过程分析[J].水土保持研究,2011,18(3):97-101.
- [4] 崔绍芳.退耕还林工程驱动下的安塞县商品型生态农业实施效果评价[D].陕西 杨凌:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,2013.

(下转第 161 页)

- derma, 2006,135:107-117.
- [13] Odeh I O A, McBratney A B, Chittleborough D J. Further results on prediction of soil properties from terrain attributes; Heterotopic Cokriging and regression-Kriging[J]. Geoderma, 1995, 67(3-4):215-226.
- [14] Webster R, Oliver M A. Sample adequately to estimate variograms of soil properties[J]. Journal of Soil Science, 1992,43(1):177-192.
- [15] Sumfleth K, Duttman R. Prediction of soil property distribution in paddy soil landscapes using terrain data and satellite information as indicators[J]. Ecological Indicators, 2008,8(5):485-501.
- [16] Menard S W. Applied logistic regression analysis[M]. Thousand Oaks; CA: SAGE Publication, Inc., 1995.
- [17] Ziadat F M. Analyzing digital terrain attributes to predict soil attributes for a relatively area[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005,69(5):1590-1599.
- [18] Wei Jianbing, Xiao Duning, Zhang Xingyi, et al. Topography and land use effects on the spatial variation of soil organic carbon: A case study in a typical small watershed of the black soil region in Northeast China [J]. Euras Soil Sci., 2008,41(1):39-47.
- [19] Liu Dianwei, Wang Zongming, Zhang Bai, et al. Spatial distribution of soil organic carbon and analysis of related factors in croplands of the black soil region, Northeast China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2006,113(1/4):73-81.
- [20] Zhang Xingyi, Sui Yueyu, Zhang Xudong, et al. Spatial variability of nutrient properties in black soil of Northeast China[J]. Pedosphere, 2007,17(1):19-29.
- [21] Yang Yuanhe, Mohammad A, Feng Jianming, et al. Storage, patterns and environmental controls of soil organic carbon in China[J]. Biogeochemistry, 2007,84(2):131-141.
- [22] Kravchenko A, Bullock D G. A comparative study of interpolation methods for mapping soil properties [J]. Agronomy Journal, 1999,91(3):393-400.
- [23] Panagopoulos T, Jesus J, Antunes M D C, et al. Analysis of spatial interpolation for optimising management of a salinized field cultivated with lettuce[J]. European Journal of Agronomy, 2006,24(1):1-10.
- [24] Hengl T, Heuvelink G, Alfred S. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-Kriging[J]. Geoderma, 2004,120(1/2):75-93.

~~~~~

(上接第 152 页)

- [5] 李惠茹. 陕北县南沟流域景观格局及动态研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2011.
- [6] 王继军,权松安,郭满才. 退耕还林还草中建立生态系统与经济系统“弹性资源”初论[J]. 水土保持通报,2004,24(5):95-98.
- [7] 唐华俊,李哲敏. 基于中国居民平衡膳食模式的人均粮食需求量研究[J]. 中国农业科学,2012,45(11):2315-2327.
- [8] 赵丹,李锋,王如松. 基于生态绿当量的城市土地利用结构优化:以宁国市为例[J]. 生态学报,2011,31(20):6242-6250.
- [9] 毛文永. 生态环境影响评价概论[M]. 北京:中国环境科学出版社,2003.
- [10] Perry J H, Ryan R J. The effect of urban leaf area on summertime urban surface kinetic temperatures: A Terre Haute case study[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2007,6(2):63-72.
- [11] 吴钦孝. 黄土高原的林草资源和适宜覆盖率[J]. 林业科学,2000,36(6):6-7.
- [12] 黄怀雄,赵红艳. 长株潭地区森林固碳释氧功能价值评价[J]. 林业调查规划,2010,35(2):136-138.
- [13] 马长欣,刘建军,康博文,等. 1999—2003 年陕西省森林生态系统固碳释氧服务功能价值评估[J]. 生态学报,2010,30(6):1412-1422.
- [14] 刘忠琛,刘正梅. 肉羊舍饲高效养殖技术要点[J]. 养殖与饲料,2003(5):15-17.
- [15] 圈养舍饲绒山羊调查研究课题组. 绒山羊舍饲圈养技术研究:基于陕西省榆林市推行绒山羊舍饲圈养的实证分析[J]. 中国畜牧杂志,2008(S):184-191.
- [16] 刘吉利,程序,谢光辉,等. 收获时间对玉米秸秆产量与燃料品质的影响[J]. 中国农业科学,2009,42(6):2229-2236.
- [17] 折凤霞,郝明德,臧逸飞. 黄土高原沟壑区苜蓿生产力及养分特性的研究[J]. 草业学报,2013,22(2):313-317.
- [18] 高阳,程积民,刘伟. 黄土高原地区不同类型天然草地群落学特征[J]. 草业科学,2011,28(6):1066-1069.