

# 不同发展路径下县南沟流域农业产业—资源系统优化

李茂森<sup>1</sup>, 王继军<sup>1,2</sup>, 成思敏<sup>2,3</sup>, 李 玥<sup>1</sup>, 乔 梅<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:**针对现阶段县南沟流域因资源利用率低导致的农业产业—资源系统运行相悖等问题,在清洁发展机制(CDM)以及国家生态文明建设理念、生态适宜性评价的基础上,按照县南沟流域可能发展路径(3 种模式,7 种情景)进行了系统优化。结果表明:农业产业—资源系统优化后,经济效益得到了不同程度的提高。其中在碳汇产业发展模式和生态经济系统优化耦合发展模式的 6 种情景即碳汇产业融入系统后,生产要素配置发生了重要改变,经济效益得到了显著提升;随着城市化、人类对美好和健康生活需求的提升,建立在特色、低碳、高产、高效下的农业产业—资源耦合系统将成为发展的趋势;相比较而言,现状发展模式优化的结果,导致生态林面积大幅度减少,不符合相关政策确定的方向,因而仅仅是理论上分析的结果。

**关键词:**发展路径; 适宜性评价; 农业产业—资源系统; 优化; 县南沟流域

中图分类号:F327

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)05-0275-07

## Optimization of the Agricultural Industry-Resources System from Different Development Paths in Xiannangou Watershed

LI Maosen<sup>1</sup>, WANG Jijun<sup>1,2</sup>, CHENG Simin<sup>2,3</sup>, LI Yue<sup>1</sup>, QIAO Mei<sup>1</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The agricultural resources of Xiannangou watershed were not used efficiently, the system of agricultural industry practices grows inconsistently with agricultural resources. To deal with these problems, three patterns and seven scenarios of the possible development paths of the agricultural industry-resource system were made. On the basis of clean development mechanism (CDM), country's ecological civilization in China and the ecological suitability evaluation, the system of Xiannangou watershed was optimized. The results indicated that the economic benefits of each phase increased at various degrees, especially in pattern II and III, in which carbon sink industry joined the system, the economic benefits of the watershed had been significantly improved, and the configuration of factors of production in the system had also changed significantly. With the improvement of urbanization and civil demand for happiness life, the agricultural industry-resource system will become the development tendency in terms of the features, low carbon, high efficiency and high yield. In comparison to the pattern I, it was just a theoretical result and can't be used in reality because the reduction of the ecological forest area didn't comply with relevant policies.

**Keywords:** development paths; suitability evaluation; agricultural industry-resource system; Optimization; Xiannangou Watershed

收稿日期:2017-12-08

修回日期:2017-12-20

资助项目:国家自然科学基金“基于 CDM 下的陕北退耕区域农业产业—资源系统耦合机制研究”(41571515);国家重点研发计划项目“黄土高原水土流失治理与生态产业协同发展技术集成与模式”(2016YFC0501707);国家重点研发计划课题“生态技术评价方法、指标与评价模型开发”(2016YFC0503702)

第一作者:李茂森(1992—),男,四川达州人,硕士研究生,研究方向:水土保持与荒漠化防治。E-mail:461907922@qq.com

通信作者:王继军(1964—),男,陕西渭南人,研究员,博士生导师,研究方向:流域生态经济。E-mail:jjwang@ms.iswc.ac.cn

1999 年,县南沟作为退耕还林的试点流域,认真落实党中央的“退耕还林(草)”政策,截至 2015 年,该流域共退耕还生态林 634.14 hm<sup>2</sup>,荒山造林 587.07 hm<sup>2</sup>,流域内的碳汇储量得到了显著增加<sup>[1]</sup>。但资源并没有得到充分合理利用,资源与产业不相协调现象依然存在<sup>[2-3]</sup>,资源短缺与资源浪费并存,其本质集结在以农用地为核心的第一产业与以农用地为承载的资源间的矛盾运动过程中,所以,本研究区域的农业产业—资源系统优化问题主要集中于农用地的优化配置及相关方面。

科学的农用地优化配置其目的则应是以生态适宜性为基础的农业产业经济效益最大化。随着清洁发展机制(简称 CDM)的实施与不断完善,碳汇这种农业中只具有生态服务功能的资源,实现其经济价值成为可能,即碳汇产业成为可能<sup>[4]</sup>。而将碳汇产业这种能使生态服务功能经济显化的产业融入到农业产业—资源系统优化中,对于现阶段以农用地为核心的农业生产与资源保护矛盾、农业资源利用率低、农业产业—资源系统内链网结构不完善、农业生态系统和社会经济系统处于相悖态势<sup>[5-6]</sup>的状况会起到很好的改善作用。

而随着国家对生态文明建设的重视和城镇化率的不断提高<sup>[7-8]</sup>,为了维持和提高农业生产力,流域农业必定朝着低碳、环保以及高效、高产的生产模式发展。为了促使这种改善和适应未来农业的发展模式,我们将碳汇产业融入到农业产业—资源系统优化中,根据对流域未来可能发展路径的预测,设计各发展模式下的不同情景。在保持生态系统稳定的前提下,发挥流域资源的最大使用价值,对流域的农业产业—资源系统进行优化。

## 1 研究区概况

县南沟流域位于延安市北部,安塞县沿河湾镇内

(东经 109°12′12″—109°22′12″,北纬 36°41′24″—36°46′12″)。流域内梁峁起伏、沟谷纵横,最高地海拔为 1 404 m,最低点海拔为 1 012 m,平均海拔为 1 219 m。该区域年降水量为 500~550 mm,降雨年分配不均,主要集中在 7—9 月,年平均气温 8.8℃,属暖温带大陆性干旱半干旱气候。流域内共有 5 个行政村(砖窑沟、方家河、畔坡山、崖窑、寨子湾)和 1 个自然村(何塌)。到 2015 年,共有农户 544 户,人口 2 534 人。流域内产业分为粮食、经济作物、果园和畜牧养殖业,其中粮食作物主要以玉米为主,其次为薯类,以及部分小米及杂粮类作物;经济作物主要为设施大棚、弓棚种植的蔬菜、瓜类等;果园主要以苹果为主,以及少量山杏、枣树、核桃等经济树种;畜牧养殖业主要为舍施养羊,以及个别养猪场、养鸡场等。流域林地绝大部分为刺槐林,多数从 1999 年退耕还林开始栽种,树龄基本在 10 a 以上。

## 2 研究方法和数据来源

### 2.1 农用地的适宜性结构

县南沟流域总面积为 4 426.04 hm<sup>2</sup>,现阶段土地利用类型中规模最大的为荒草地,面积 2 243.60 hm<sup>2</sup>;其次为林地,面积 1 589.30 hm<sup>2</sup>;流域耕地面积 377.37 hm<sup>2</sup>;果园面积 148.86 hm<sup>2</sup>;水域、居民区等非生产用地面积 66.91 hm<sup>2</sup>。从县南沟流域农用地生态适宜性评价结果得到各适宜性土地利用类型面积为:宜耕宜园地面积 225.46 hm<sup>2</sup>;宜耕地面积 405.68 hm<sup>2</sup>;宜林宜园地面积 156.96 hm<sup>2</sup>;宜园地面积 773.15 hm<sup>2</sup>;宜林宜草地面积 881.43 hm<sup>2</sup>;宜林地面积 409.91 hm<sup>2</sup>;宜草地面积 1 490.00 hm<sup>2</sup>;不适宜和非生产用地面积 83.43 hm<sup>2</sup><sup>[9]</sup>(表 1)。

### 2.2 农业产业经济系数确定

2.2.1 农业产业经济品经济系数的确定 利用本课题组县南沟流域研究数据,以近 5 a 农业产业经济品单位面积纯收入的年平均值作其经济系数(表 2)。

表 1 县南沟流域农用地适宜性

参 数	宜耕宜园地 面积/hm <sup>2</sup>	宜耕地 面积/hm <sup>2</sup>	宜林宜园地 面积/hm <sup>2</sup>	宜园地 面积/hm <sup>2</sup>	宜林宜草地 面积/hm <sup>2</sup>	宜林地 面积/hm <sup>2</sup>	宜草地 面积/hm <sup>2</sup>
高度适宜	110.71	353.80	18.99	443.64	322.12	357.73	1269.03
中度适宜	114.75	51.88	137.97	329.51	255.34	50.81	7.99
勉强适宜					303.97	1.37	212.98
小计/hm <sup>2</sup>	225.46	405.68	156.96	773.15	881.43	409.91	1490.00
比例/%	5.09	9.17	3.55	17.47	19.91	9.26	33.66

2.2.2 碳汇价值的确定 由于目前尚缺乏公认的碳汇价值的计算方法,国内对于碳汇价值的计算一般采用碳税法和造林成本法<sup>[10]</sup>,但由于碳税法相较于造林成本法价值量过高,因此取碳税率和造林成本的平均价值作

为碳汇价格<sup>[11]</sup>。碳汇率采用国家林业局的推荐使用价格 1 200 元/t C<sup>[12]</sup>,造林成本采用国家林业部公布的数据 240.3 元/m<sup>3</sup>,换算后为 260.9 元/t C<sup>[11]</sup>。

2.2.3 农业产业碳汇系数计算与碳汇经济系数确定 根

据农作物碳吸收计算公式<sup>[13-14]</sup>,得到粮食、经济作物碳汇系数分别为:粮食作物 2.787 t/(hm<sup>2</sup>·a),经济作物为 1.725 t/(hm<sup>2</sup>·a)。而苹果则参照苹果树异速生长方程<sup>[15]</sup>以其整个种植周期(以 25 a 计)年平均净碳汇量作为苹果产业碳汇系数 2.319 t/(hm<sup>2</sup>·a),其中果实碳汇系数为 1.207 t/(hm<sup>2</sup>·a)。

表 2 农业产业经济品经济系数

产业类型	农业产业经济品经济系数
粮食作物	10464.51
经济作物	144099.13
苹果园	29537.84
经济林	4500.00
生态林	0
草地	0
养殖业(羊)	400.00

流域内林地树种主要以刺槐为主,对于刺槐生物量的测算采用国家林业局公布的刺槐异速生长方程<sup>[16]</sup>,以退耕栽种时刺槐存活密度的均值(1 492 株/hm<sup>2</sup>)作为林分密度,由于在树龄 37 a 后生物量的连年生长量低于平均生长量<sup>[17]</sup>,所以以 37 a 作为刺槐生长年限,得到林业碳汇系数为 1.075 t/(hm<sup>2</sup>·a)。由于流域退耕还林栽种的经济林树种基本无管理且种植密度与生态林相同,所以本文经济林净碳汇效益与生态林相同。流域草地自从退耕还林以来一直处于封育状态,根据程积民等<sup>[18]</sup>对黄土高原草地植被碳密度的研究,以 0.288 t/(hm<sup>2</sup>·a)作为本文草地的碳汇系数。养殖业为碳排产业,流域养殖牲畜主要为山羊,年碳排量约为 0.010 t/(只·a)<sup>[19]</sup>。根据每 tC 的碳汇价值和各产业的碳汇系数可得农业产业碳汇经济系数(表 3)。

表 3 农业产业碳汇经济系数

产业类型	碳汇系数	碳汇经济系数
粮食作物	2.787	2035.76
经济作物	1.725	1260.03
苹果园	2.319	1693.91
经济林	1.075	785.23
生态林	1.075	785.23
草地	0.288	210.37
养殖业	-0.010	-7.30

2.3 优化模型的建立与求解

2.3.1 建模思路 为了解决现阶段县南沟流域农业产业—资源系统不相协调的现实问题以及规划流域未来最优发展模式,根据流域生态适宜性评价结果,以农用地土地利用类型适宜性范围设置约束条件,以农业产业经济收入最大化为目标构建目标函数,对于流域可能的不同发展情景,通过一定的方法和技术手

段得到最优解,最终得到优化配置的方案。

2.3.2 决策变量 决策变量包括农业产业和农业资源的配置量,具体分为两大类,一是分配给种植业、林业和牧草地的农用地使用面积,二是养殖业各牲畜的养殖数量。

2.3.3 目标函数 农业产业—资源系统最优化发展,必定是保持农业生态适宜性稳定下的农业产业经济效益最大化,所以目标函数的确定应是以农业生态适宜性为基础,实现农业产业经济效益最大化。目标函数为:

$$\max F(x)=\sum_{i=1}^n(C_i\cdot X_i)$$

式中: $F$  为流域纯收入(元); $i$  为农业产业类型; $C_i$  为第  $i$  种农业产业的经济系数; $X_i$  为第  $i$  种农业产业的农用地面积或数量(hm<sup>2</sup>,只); $n$  为农业产业的种类数量。

2.3.4 约束条件 以县南沟流域农用地生态适宜性评价结果为基础,结合流域的发展现状,产业结构与规模,以资源有效利用和可持续发展为前提,以实现流域生态经济效益最大化为目标,设置约束方程。

(1) 总农用地面积约束。各产业农用地面积之和应不大于适宜性农用地总面积。

$$\sum_{i=1}^mX_i\leqslant4342.59$$

式中: $X_i$  为第  $i$  种农业产业的农用地面积(hm<sup>2</sup>); $m$  为土地类农业产业的种类数量, $m=6$ 。流域适宜性农用地总面积为 4 342.59 hm<sup>2</sup>。

(2) 种植业面积约束。 $X_1$  为粮食作物面积, $X_2$  为大棚、弓棚、大田西瓜等经济作物面积,由于大棚、弓棚等经济作物对农用地要求苛刻只能在川地和坝地上种植,所以设置  $X_2$  应不超过现有川地、坝地适宜性耕地的总面积,即 58.08 hm<sup>2</sup>;根据生态适宜性评价的结果,粮食、经济作物总面积应不超过适宜性耕地的总面积,即 631.14 hm<sup>2</sup>; $X_3$  为苹果园面积,为了保证苹果园的高产应将其种植在高度适宜园地内,即  $X_3$  应不超过 573.34 hm<sup>2</sup>; $X_4$  为经济林面积,由于高度适宜园地种植苹果,所以经济林面积应不小于其余仅宜园地面积,即 329.51 hm<sup>2</sup>,果园和耕地总面积应大于只适宜于耕地和果园的总面积,即 960.03 hm<sup>2</sup>,且不大于适宜性面积的总和,即 1 093.77 hm<sup>2</sup>,即:

$$X_2\leqslant58.08$$

$$X_1+X_2\leqslant631.14$$

$$X_3\leqslant573.34$$

$$329.51\leqslant X_4$$

$$960.03\leqslant X_1+X_2+X_3\leqslant1093.77$$

(3) 生态林、草地面积约束。由于生态林和草地在水土保持与环境保护方便具有重要作用,根据县南沟农

用地生态适宜性评价的结果,县南沟流域生态林地面积  $X_5$  应大于仅宜林地面积,且不高干适宜性评价结果中宜林地总面积。同样草地面积  $X_6$ ,也应保持在县南沟农用地生态适宜性评价宜草地范围内,即:

$$409.91 \leq X_5 \leq 1448.30$$

$$1490.00 \leq X_6 \leq 2371.43$$

$$2781.34 \leq X_5 + X_6$$

(4) 养殖业牲畜约束。由于县南沟流域内几乎不种植人工草地,牲畜的饲料主要以刈割天然饲草为主。为了提高流域资源的利用率,加之流域内养殖类型主要为养羊,本文设定牲畜饲料量全部由天然草地提供,根据孔正红研究<sup>[20]</sup>县南沟流域改良后天然草地年产鲜草可达  $4\ 500\text{ kg/hm}^2$ ,根据对专家的咨询草地利用率以 50% 计,则流域天然草地载畜量为  $1.03\text{ 只/hm}^2$ 。为了保持生态稳定性,坡度  $25^\circ$ <sup>[21-22]</sup> 以上适宜性草地不作为饲草使用,所以令养殖业养羊数量  $X_7$  约束条件为:

$$X_7 \leq 1.03(X_6 - 458.97)$$

2.3.5 可能的发展路径 为了促进流域高效、稳定、可持续发展,在国家生态文明建设,以及城市化进程的背景下,根据县南沟流域发展现状,以流域生态适宜性评价结果为基础,可设置 3 个模式 7 种情景,分析碳汇产业融入前后流域农业产业—资源系统优化后各生产要素配置状况。

(1) 模式 I: 现状发展模式。情景 A,即现状情景。在此发展情景下不考虑碳汇产业的融入,目标函数经济系数  $C$  为农业产业经济品经济系数值,即目标函数为:

$$\max F(x) = \sum_{i=1}^n (C_{1i} \cdot X_i)$$

式中:  $C_{1i}$  为第  $i$  种农业产业的农业产业经济品经济系数。

(2) 模式 II: 碳汇产业发展模式。由于农业作物的部分碳汇最终被人类消耗或焚烧又释放回大气中,所以对农业作物是否具有碳汇价值还有待商榷,所以在此模式设置两个情景: 含农业经济品(粮食、蔬菜、水果)碳汇情景(B-1),不含农业经济品碳汇情景(B-2),此时目标函数中的经济系数  $C$  为碳汇经济系数和农业产业经济品经济系数的和,即目标函数为:

$$\max F(x) = \sum_{i=1}^n [(C_{1i} + C_{2i}) \cdot X_i]$$

式中:  $C_{2i}$  为第  $i$  种农业产业的碳汇经济系数。

情景 B-1,该模式情景下碳汇产业已经融入到农业产业—资源系统中,且农业作物的全部碳汇都具有经济效益。

情景 B-2,在该情景下,碳汇产业也已融入到农

业产业—资源系统中,但农业作物中除了粮食作物根系与果树的树体外其他不具有碳汇价值。由于粮食作物主要以玉米为主,大棚、弓棚则以蔬菜为主,参考《省级温室气体清单编制指南》(发改办气候[2011]1041号)玉米根冠比为 0.17,蔬菜为 0.25。由于粮食和经济作物在种植过程中使用的化肥、农药产生大量的碳排放,根系碳汇根本无法弥补这部分碳排,所以在此情景下粮食和经济作物碳汇价值为负值,得到粮食作物碳汇经济系数为  $-61.19\text{ 元}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,经济作物碳汇经济系数为  $-832.52\text{ 元}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,此时苹果园碳汇经济系数为果园总碳汇减去果实碳汇的值,其值为  $812.26/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

(3) 模式 III: 生态经济系统优化耦合发展模式。为了符合国家、社会以及流域发展的需要,在此模式下将根据流域未来发展趋势设置两种发展情景: 一种是以农林特产为主的农户普通种植情景(C-1),另一种是在城乡一体化进程下的企业(家庭农场)规模化种植情景(C-2)。此时目标函数中的经济系数  $C$  同样为碳汇经济系数和农业产业经济品经济系数的和,即目标函数为:

$$\max F(x) = \sum_{i=1}^n [(C_{1i} + C_{2i}) \cdot X_i]$$

情景 C-1,由于县南沟流域位于黄土高原丘陵沟壑区,流域内梁峁起伏,沟壑纵横,地形破碎,大规模机械化的农业发展形势很难实现,和平原区的农业相比,县南沟流域农业的发展受到了很大限制。但由于山区得天独厚的气候环境,为一些农林特色产业创造了很好的生产条件,使其可以生产出品质优良的农林作物,提高经济价值,如山地苹果、小米、荞麦等。

对于该模式的农业发展,粮食作物将不再以玉米、土豆为主,而是以小米、荞麦等五谷杂粮为主,对于适合于发展苹果的农用地将大力发展苹果产业。同时杂粮使用生态绿色的种植方式,即肥料以绿肥、农家肥为主,杀虫剂为低毒或无毒,从而生产出无公害、有机的特色农产品。通过对农户的走访,农林特产在销售价格上是以高于同类普通农产品 2~3 倍出售,而效益上将达到普通农产品的 1.5 倍,所以此时粮食作物的农业产业经济品经济系数可达到  $22\ 017.14\text{ 元}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

在 C-1 情景下也将设置含农业经济品碳汇(C-1-1)和不含农业经济品碳汇(C-1-2)两个亚情景。由于该情景下粮食作物种类及耕作方式的改变碳汇系数也随之变化,所以此时 C-1-1 粮食作物碳汇经济系数为  $4\ 028.53\text{ 元}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,C-1-2 粮食作物碳汇经济系数为  $382.06\text{ 元}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

情景 C-2,随着国家城镇化率的不断提高,农村人口

急剧减少已成为现阶段农村的主要社会现象,但随着农村人口的减少,为了维持和提高农业生产力,农业向高效、高产发展将成为必然趋势。采取个人、企业大规模承包的方式发展现代农业即是现阶段农村农业发展的普遍走向,也是未来农村农业发展的普遍方式。

在此情景下,由于全部采取雇佣劳力的方式,再加上个人、企业投资资金充足,流域内川、坝地将全面种植大棚等高效设施农业,其余耕地将继续发展农林特色产业,同时果园也将全面采用滴灌、粘虫板、防雹网等现代农业科技措施的管理方式。在此模式下由于常住农户减少,所以经济林主要发挥其生态价值,牲畜蓄养则以养殖厂的形式存在,但不在流域内而在地势更加平坦交通更加方便的区域。同时设置含农业经济品碳汇(C-2-1)和不含农业经济品碳汇(C-2-2)两个亚情景,同样由于经济作物种植方式的改变,此时 C-2-1 经济作物碳汇经济系数为 5 762.76 元/(hm<sup>2</sup>·a),C-2-2 经济作物碳汇经济系数为-3 389.69 元/(hm<sup>2</sup>·a),农业产业经济品经济系数见表 4。

表 4 C-2-2 农业产业经济品经济系数

产业类型	农业产业经济品经济系数
粮食作物	22017.14
经济作物	323374.47
苹果园	29537.84
经济林	0
生态林	0
草地	0
养殖业(羊)	0

2.4 数据来源与模型运算

各产业投入产出情况、经济收入和面积数据来自课题组 2010—2015 年调研数据的累积;果树以及刺槐碳汇价值的测算数据来自 2014—2015 年 8—10 月的野外测量、采样及室内试验;本模型运算使用线性规划软件 lingo 11.0 计算完成。

3 结果与分析

县南沟流域农业产业—资源系统的优化结果(表 5)可以看出,优化后各个模式流域的经济效益会显著提高。从各模式来看,由于对现阶段流域农业产业—资源系统的优化对系统生产要素进行了合理配置,改变了系统相悖态势,使模式 I 流域经济效益得到了显著提升;模式 II 由于碳汇产业的加入使碳汇具有了经济效益,不仅总的经济效益进一步提升,碳汇效益也得到了很大提高,同时系统生产要素配置也得到了进一步优化;而模式 III 在模式 II 发展的基础上改善了流域种植方式,提高了农业生产力,经济效益最有显著

(图 1);在碳汇产业融入系统以后,在是否含有农业经济品碳汇情景上,由于在含有农业经济品碳汇情景中,对粮食、经济作物进行了优化,生产效率提高,流域碳汇效益呈增长趋势。但在不含农业经济品碳汇情景中,由于生态林、草地等净碳汇产业的存在,流域碳汇效益则趋于稳定(图 2)。

模式 I,情景 A,虽然优化后流域经济效益得到了很大的提升,但生态林面积相比于优化前是有较大减少的,这主要是在以经济发展为主要目的的流域发展模式下,在没有碳汇产业的加入,生态林几乎不具有经济价值,致使部分生态林向经济林、果园、耕地和草地进行了转化,虽然该情景在生态适宜性范围内,但并不符合国家生态文明建设的需要,也不符合流域发展的持久稳定,所以该情景仅仅是理论上的结果,并不可能真正出现。所以,如何发挥生态林的经济效益是一个发展方向,碳汇产业的融入就很好的解决了这个问题。

模式 II,不管是否含有农业经济品碳汇,由于碳汇产业融入农业产业—资源系统,各个产业都附带了碳汇价值,从而导致流域各产业经济系数改变,流域生产要素进行了重新分配。在此模式下,生态林的碳汇经济效益已大于由草地所带来的畜牧业经济效益,生态林面积相比于模式 I 大幅度提高,流域生态效益显著提升。而且即使在不含农业经济品碳汇情景中,流域内粮食作物和经济作物都以碳源的形式存在,流域碳汇效益依然良好,所以此模式各个情景都能作为可行的发展情景使用。

模式 III,作为模式 II 发展下的最终状态,在情景 C-1 中由于黄土高原丘陵沟壑区本身的自然环境,根据因地制宜的原则选择了农林特色产业的发展情景。在此情景下流域农业产业—资源系统生产要素在优化配置上相较于模式 II 并没发生改变,但由于农林特产的高效益流域总的经济效益增长显著(图 2)。而且由于绿色、有机的生产方式,降低了耕作过程中的碳排放,流域碳汇效益也得到了相应提升。而在情景 C-2 个人、企业大规模承包的方式下,由于有更好的资金、技术和人力的投入使流域农业生产力得到了巨大提升,经济效益增长显著。不过在情景 C-2 不含农业经济品碳汇情景中,流域碳汇效益相比于情景 C-1 则有所减少,原因是高效的生产模式下大量农药化肥的使用导致了大量碳源物质的释放,在不含农业经济品碳汇情景下,流域经济作物产业成为了一个巨大的碳源,降低了流域的碳汇效益。但由于此情景下流域生态林、天然草地等净碳汇产业依然保持着较大规模,流域总的碳汇效益影响不大。

表 5 各情景优化结果

决策变量	优化前	模式 I	模式 II		模式 III			
		情景 A	情景 B-1	情景 B-2	情景 C-1-1	情景 C-1-2	情景 C-2-1	情景 C-2-2
$X_1$ 粮食作物面积/hm <sup>2</sup>	361.35	462.35	462.35	462.35	462.35	462.35	462.35	462.35
$X_2$ 经济作物面积/hm <sup>2</sup>	16.02	58.08	58.08	58.08	58.08	58.08	58.08	58.08
$X_3$ 苹果园面积/hm <sup>2</sup>	148.86	573.34	573.34	573.34	573.34	573.34	573.34	573.34
$X_4$ 经济林面积/hm <sup>2</sup>	33.33	467.48	467.48	467.48	467.48	467.48	0	0
$X_5$ 生态林面积/hm <sup>2</sup>	1555.97	409.91	1291.34	1291.34	1291.34	1291.34	1758.82	1758.82
$X_6$ 天然草地面积/hm <sup>2</sup>	2243.60	2371.43	1490.00	1490.00	1490.00	1490.00	1490.00	1490.00
$X_7$ 羊数量/只	770.00	1969.00	1061.00	1061.00	1061.00	1061.00	0	0
碳汇经济效益/万元	0	0	367.24	207.58	459.37	228.08	486.30	214.00
$F(x)$ 经济效益/万元	1094.48	3303.40	3634.32	3474.67	4260.59	4029.30	5075.95	4803.64

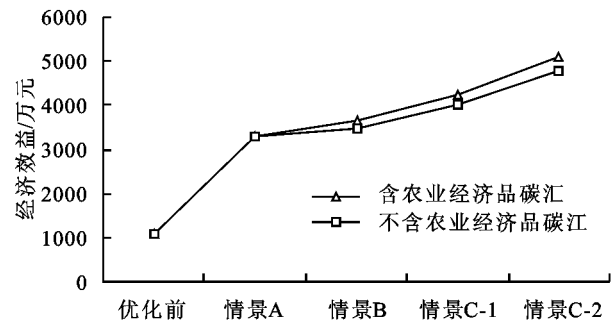


图 1 流域各模式经济效益变化

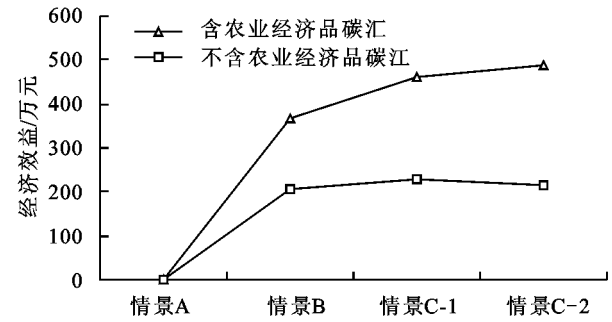


图 2 流域各模式碳汇经济效益变化

色的产品,而且在农业生产上,随着城乡一体化的不断推进,农业生产也将朝着高效、高产的方式转变。所以农林特产和高效、高产的农业发展模式是未来农业发展的主要方向。模式Ⅲ作为模式Ⅱ发展下的最终状态,从 C-1 情景的优化来看,绿色、有机的种植方式不仅能生产出绿色无公害的农业产品,同时也降低了农业生产过程中的碳排放,增加了碳汇效益,在满足国民对绿色食品需求的同时也满足了国家低碳发展的需要;但从 C-2 情景的优化来看,高效、高产的生产方式也必将带来高碳排,所以此情景在生产要素的配置上必须严格遵循生态适宜性评价的结果,保证生态林、草地等主要碳汇产业在流域中的主导地位,最大限度的发挥生产要素的使用价值。只有这样才能在大幅度提升流域经济效益的同时保持流域的碳汇效益与生态效益,保证流域发展的长久稳定。

参考文献:

[1] 顾文,赵阿丽,徐健,等. 基于碳汇生产理念下的县南沟流域退耕还林工程实施效果评价[J]. 水土保持研究, 2014,21(2):144-157.

[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] 顾文,王继军,张雯佳. 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[J]. 水土保持通报, 2014,34 (6):146-152.

[4] 王继军,王正淑,成思敏,等. 退耕区域发展碳汇产业的生态经济学思考[J]. 应用生态学报, 2017,28(12):4109-4116.

[5] 王继军. 黄土丘陵区纸坊沟流域农业生态经济系统耦合过程分析[J]. 应用生态学报, 2009,20(11):2723-2729.

[6] 董孝斌,高旺盛,严茂超. 基于能值理论的农牧交错带两个典型县域生态经济系统的耦合效应分析[J]. 农业工程学报, 2005,21(11):1-6.

[7] 黄勤,曾元,江琴. 中国推进生态文明建设的研究进展

4 结论

(1) 生态文明建设是我国今后发展的重要方向、重大领域和重大任务<sup>[23]</sup>。发展低碳农业不仅是中国农业本身可持续发展的需要,而且也是中国应对气候变化的战略选择<sup>[24]</sup>。将碳汇产业融入农业产业—资源系统,首先农业产业—资源系统生产要素配置将发生改变,生态林等具有较强碳汇能力的农业产业面积将得到不同程度的增加。其次,在经济利益的刺激下,农民将自发选择低碳生产的方式来进行农业活动,在大幅度提升流域碳汇效益的同时流域经济效益也会得到相应增长。这样的发展情景不仅符合国家生态文明建设的需求,也符合国家低碳发展的需求。

(2) 随着国家社会的不断发展,国民在农产品需求上将越来越倾向于选取绿色、有机、且具有地方特

[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(2): 111-120.

[8] 薛德升, 曾献君. 中国人口城镇化质量评价及省际差异分析[J]. 地理学报, 2016, 71(2): 194-204.

[9] 李茂森, 王继军, 陈超, 等. 基于 GIS 的安塞县县南沟流域农用地生态适宜性评价[J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 237-242.

[10] 谢高地, 李士美, 肖玉, 等. 碳汇价值的形成和评价[J]. 自然资源学报, 2011, 26(1): 1-10.

[11] 周萍, 刘国彬. 黄土丘陵区流域生物量和气体调节服务功能价值动态变化及评价[J]. 生态经济: 中文版, 2008(3): 26-31.

[12] 国家林业局. 《森林生态系统服务功能评估规范 (LY/T 1721—2008)》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[13] 李克让. 土地利用变化和温室气体净排放与陆地生态系统碳循环[M]. 北京气象出版社, 2002.

[14] 王正淑, 王继军. 县南沟流域种植业生态价值的测算与分析: 基于碳汇视角[J]. 水土保持研究, 2015, 22(6): 261-266.

[15] Wu T, Yi W, Yu C, et al. Carbon Sequestration by Fruit Trees-Chinese Apple Orchards as an Example [J]. Plos One, 2012, 7(6): e38883.

[16] 国家林业局应对气候变化和节能减排工作领导小组办公室. 造林项目碳汇计量与监测指南[M]. 北京: 中国林业出版社, 2008.

[17] 王正淑, 王继军, 刘佳. 基于碳汇的县南沟流域退耕林地补偿标准研究[J]. 自然资源学报, 2016, 31(5): 779-788.

[18] 程积民, 程杰, 杨晓梅, 等. 黄土高原草地植被碳密度的空间分布特征[J]. 生态学报, 2012, 32(1): 226-237.

[19] 国家发展改革委应对气候变化司. 2005 中国温室气体清单研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.

[20] 孔正红, 张新时. 安塞纸坊沟流域草地资源利用空间结构及其畜牧业发展潜力[J]. 草地学报, 2004, 12(3): 246-250.

[21] 黄志霖, 傅伯杰, 陈利顶. 黄土丘陵区不同坡度、土地利用类型与降水变化的水土流失分异[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(4): 11-18.

[22] 傅伯杰, 邱扬, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土地利用变化对水土流失的影响[J]. 地理学报, 2002, 57(6): 717-722.

[23] 谷树忠, 胡咏君, 周洪. 生态文明建设的科学内涵与基本路径[J]. 资源科学, 2013, 35(1): 2-13.

[24] 许广月. 中国低碳农业发展研究[J]. 经济学家, 2010(10): 72-78.

(上接第 274)

[14] 严凤霞, 张玲玲. 江苏省区域经济水平与用水效率的空间关联性分析[J]. 华东经济管理, 2015, 29(9): 30-34.

[15] 任家强, 汪景宽, 孔凡文. 基于空间自相关与主成分分析的城市土地集约利用空间差异研究: 以辽宁省为例[J]. 沈阳农业大学学报, 2012, 43(1): 39-43.

[16] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2002, 91: 217-232.

[17] 伍芬琳, 李琳, 张海林, 等. 保护性耕作对农田生态系统净碳释放量的影响[J]. 生态学杂志, 2007, 26(12): 2035-2039.

[18] Mosier A R, Duxbury J M, Frenney J R, et al. Mitigation Agricultural Emission of Methane[J]. Climatic Change, 1998, 40: 39-80.

[19] 智静, 高吉喜. 中国城乡居民食品消费碳排放对比分析[J]. 地理科学进展, 2009, 28(3): 429-434.

[20] 王文秀, 匡耀求, 黄宁生. 广东省能源消费碳排放空间自相关分析[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(3): 180-187.

[21] 官冬杰, 谭静, 张梦婕, 等. 重庆市人口与经济发展空间耦合分布研究[J]. 人文地理, 2017, 32(2): 122-128.

[22] 冯仲科, 毛海颖, 李虹. 环首都圈植被分布与可吸入颗粒物的空间相关性[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 220-227.

[23] 韩会庆, 李松, 俞洪燕. 贵州省贫困发生率与生境退化程度相关性分析[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2017, 40(3): 15-20.

[24] 邵红娟, 蔡广鹏, 韩会庆, 等. 贵州省贫困发生率与生态系统服务价值相关性分析[J]. 水土保持研究, 2016, 23(5): 274-277.

[25] 庞丽. 我国农业碳排放的区域差异与影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(12): 1-7.

[26] 李琦, 韩亚芬. 安徽省农业碳排放的脱钩效应及影响因素研究[J]. 安徽农业大学学报: 社会科学版, 2016, 25(2): 29-35.