

# 县南沟流域农业产业—资源系统耦合过程模型的建立与分析

刘罕奇<sup>1,3</sup>, 王继军<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**针对黄土丘陵区农业产业—资源系统演变轨迹发生变化的现实,参照农业生态经济系统耦合过程模型,建立农业产业—资源系统耦合过程模型。并对模型参数( $k_1, k_2, k_3, k_4$ )的变化过程及其代表的生态经济意义进行重点讨论,在此基础上对县南沟流域进行了实证。结果表明:不同参数 $k$ 值组合,形成了不同的农业产业—资源系统互动关系。退耕后,县南沟流域资源所依赖的环境系统的提升空间现已达到极限,产业发展未建立在资源的合理、有效利用上。现阶段资源系统发展态势与资源系统演化速度和产业系统演化速度都成负相关,产业系统发展态势与资源系统演化速度和产业系统演化速度都成正相关。将碳汇产业融入系统后,可使资源系统演化速度提升2.56倍,若通过“轮牧+舍饲”养殖模式进一步改良,可使资源系统演化速度提升4.66倍,使得资源得到合理、高效利用,加速产业结构优化升级。

**关键词:**农业产业—资源系统; 耦合过程模型; 碳汇; 半轮牧半舍饲; 县南沟流域

中图分类号:F062.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)05-0259-07

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2017.05.041

## Establishment and Analysis of Agricultural Industry-Resource System Coupling Process Model in Xiannangou Watershed

LIU Hanqi<sup>1,3</sup>, WANG Jijun<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In view of the development of agricultural industry-resource system in Loess Hilly region, we established a coupling process model of agricultural industry-resource system following the agricultural ecological-economic coupling process model, and we analyzed the coupling situation of system. We focused on the ecological and economic significance of model parameters ( $k_1, k_2, k_3, k_4$ ) and conducted an empirical study on the Xiannangou watershed. The results show that different parameter combination forms the different agricultural industry-resource system interactive relationship. After returning farmlands to the natural lands, the space of resources that relied on environmental systems has reached the limit now, and the development of industry is not based on the rational and efficient use of resources in Xiannangou watershed. The development trend of resource system is negatively related to the evolution speed of the resource system and the industrial system. The development trend of industry system is positively related to the evolution speed of the resource system and the industrial system. The account in of carbon sink can make the optimized system evolution speed increase by 2.56 times. On the basis of that, the agricultural system can be promoted by 4.66 times through rotational grazing and house feeding mode, which makes the resources be rationally and efficiently used and accelerates the optimization and upgrade of industrial structure.

**Keywords:** agricultural industry-resource system; coupling process model; carbon sequestration; rotational grazing and house feeding; Xiannangou watershed

收稿日期:2017-02-05

修回日期:2017-03-16

资助项目:国家自然科学基金(41571515);国家重点研发计划课题(2016YFC0503702);“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0501707)

第一作者:刘罕奇(1990—),男,山东淄博人,硕士研究生,研究方向:水土保持监测与评价。E-mail:liuhq@nwsuaf.edu.cn

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

退耕还林还草工程的实施,改变了退耕区农业产业—资源系统演变的原轨迹,农业产业系统发展未能与农业资源系统相适应,区域农业产业与资源(量)的一致性程度较弱,农业产业系统与农业资源系统发展处于相悖态势<sup>[1-4]</sup>,而系统的演替方向和速度直接影响区域的可持续发展。为解决系统发展的相悖态势,协调农业产业系统和农业资源系统的关系,就要对农业产业—资源系统进行优化耦合,其关键在于弄清农业产业—资源系统的耦合过程和演变规律。耦合过程模型从定量的角度可以较好地阐明农业产业系统与农业资源系统的相互作用关系,判定农业产业—资源系统各阶段的耦合态势,从而为系统结构优化提供依据<sup>[5-6]</sup>。从现有研究来看,大部分学者主要对系统耦合模式、系统耦合态势、系统耦合效应方面进行了分析,系统耦合过程模型研究相对滞后,且在已有的农业生态经济耦合过程模型的研究中,未能够将农业产业—资源系统单独考虑,而农业产业—资源系统作为农业生态经济系统的核心,其演变过程更能够直接地说明系统发展的耦合态势<sup>[5,7-18]</sup>。为充分开发利用农业资源,协调产业发展与资源利用的矛盾,必须分析农业产业—资源系统的耦合关系,建立农业产业—资源系统耦合过程模型,从而判定系统发展的耦合态势,这对于黄土丘陵区可持续发展方案的制定具有重要意义。

县南沟流域是黄土高原丘陵区退耕还林还草工程实施的典型代表流域,退耕还林还草工程实施后,农业产业—资源系统的耦合关系发生显著变化,林草资源量过剩,而依赖资源发展的产业规模过小且发展趋于稳定。在此,通过应用农业产业系统与农业资源系统耦合过程模型对县南沟流域发展耦合关系进行分析,旨在为协调好产业与资源的关系,为实现农业产业—资源系统良性循环提供依据。

## 1 研究区概况与资料来源

### 1.1 研究区概况

县南沟流域位于安塞县沿河湾镇(109°12'12"—109°22'12"E,36°41'24"—36°46'12"N),流域面积 50.64 km<sup>2</sup>,属典型暖温带干旱半干旱气候,年平均气温 8.8℃,年降水量 500~550 mm,降雨年际差异大,且年内分配不均,60%~80%降雨集中在 7—9 月。该流域包括 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),2015 年有农户 544 户,人口 2 534 人。自退耕以来,流域的土地利用结构发生

了显著的变化,耕地:林地:草地面积比由 1998 年的 1:0.38:5.48 变为 2015 年的 1:7.3:11.6。农户收入主要来自于种植业、果业、畜牧业、工副业等,种植业主要类型包括粮食作物、经济作物,人均纯收入总体呈上升趋势,由 1999 年的 1 300 多元/人增长至 2015 年的 6 645 元/人,农业总收入为 858 万元。

### 1.2 资料来源

1999 年县南沟流域成为退耕还林还草工程试点单元,开始实施退耕还林还草工程。因此,以 1998 年为基础年,选择 1998—2015 年为研究时段,探讨退耕还林还草工程实施后农业产业与农业资源系统的变化情况。本研究所用到的数据来源于 1998—2015 年课题组的调研资料以及 1998—2015 年《安塞县统计年鉴》。文中的图表分别用 Word2010,Excel 2010 制作,数据用 Excel 2010,MATLAB 7.0 和 SPSS 21.0 处理。

## 2 农业产业—资源系统耦合过程模型设计与分析

### 2.1 模型设计

2.1.1 基础模型设计 为使农业产业—资源系统及其互动过程定量化,借鉴农业生态经济耦合过程模型<sup>[6]</sup>,建立农业产业—资源系统耦合过程模型。用  $ai, ar$  分别表示农业产业系统与农业资源系统,  $ai(t), ar(t)$  分别表示时间  $t$  时农业产业系统与农业资源系统总量,则可用  $dai(t)/dt, dar(t)/dt$  分别表示  $t$  时农业产业系统与农业资源系统的演化速度。按照贝塔兰菲的一般系统理论<sup>[19]</sup>,农业产业—资源系统演化方程的形式为:

$$\frac{dar(t)}{dt} = k_1 \times ar(t) + k_2 \times ai(t) \quad (1)$$

$$\frac{dai(t)}{dt} = k_3 \times ar(t) + k_4 \times ai(t) \quad (2)$$

式中: $k_1, k_2$  分别是农业资源系统与农业产业系统对资源系统演化过程的影响系数,是资源系统与产业系统状态表征量对资源系统演变速度的贡献度; $k_3, k_4$  分别为农业资源系统与农业产业系统对产业系统演化过程的影响系数,是资源系统与产业系统状态表征量对产业系统演变速度的贡献度,它揭示了农业产业系统与农业资源系统的互动方向与强度,在特定区域  $k_1, k_2, k_3, k_4$  都是常数。通过已知的  $k_1, k_2, k_3, k_4$  计算出当年的农业产业系统与农业资源系统综合值,则可判定其耦合态势。

2.1.2 扩展模型 由于农业产业—资源系统在它的演变过程会受到农业系统外力的作用,从而改变其演

变轨迹。因此要重新探讨新背景下系统的演变轨迹,对耦合过程基础模型进行修正。以公式(1),(2)为基础,假设  $e_1, e_2$  分别为外力对农业资源系统与农业产业系统影响后导致其演变轨迹发生变化后的调整系数,通过对农业资源系统和农业产业系统演变轨迹的修正,可形成公式(3),(4)。

$$\frac{dar(t)}{dt} = k_1 \times (1 + e_1) \times ar(t) + k_2 \times ai(t) \quad (3)$$

$$\frac{dai(t)}{dt} = k_3 \times ar(t) + k_4 \times (1 + e_2) \times ai(t) \quad (4)$$

外力对农业资源系统与农业产业系统正向影响时,  $e_1, e_2$  取正, 逆向影响时,  $e_1, e_2$  取负。  $e_1, e_2$  主要根据外力对系统的演变轨迹的偏离程度来确定, 可用以下公式求得:

$$e_1 = \frac{\sum_{i=1}^m \Delta(p_i x_i)}{\sum_{i=1}^m (p_i x_i)} \quad e_2 = \frac{\sum_{j=1}^n \Delta(q_j y_j)}{\sum_{j=1}^n (q_j y_j)} \quad (5)$$

式中:  $x_i (i=1, 2, \dots, m)$  表示农业资源系统表征量;  $y_j$

( $j=1, 2, \dots, n$ ) 表示农业产业系统表征量;  $p_i, q_j$  分别为对应的权重;  $p_i x_i, q_j y_j$  分别为外力引起资源系统与产业系统偏离后的增量。

### 2.2 系统耦合过程分析

农业产业—资源系统耦合过程模型由基础模型和扩展模型共同构成。系统发展过程中, 农业产业系统与农业资源系统的互动关系由系数  $k$  值直接反映。通过对  $k$  值正负的分析, 表明相应系统发展对演化速度的促进或抑制作用, 反映系统间的耦合态势(表 1)。

为了更好地说明系统发展的耦合态势, 基于表 1 的分析, 分别从资源系统发展、产业系统发展、农业产业—资源系统发展角度对系统耦合态势进行划分。

(1) 基于资源系统发展角度。在  $k_1, k_2$  都为正的情境下, 无论是产业的发展还是资源的建设, 对资源系统的演化速度都起促进作用。在此阶段为满足资源系统建设、修复的需求, 首先考虑资源的发展, 可适当降低经济发展速度, 即产业的发展和资源的发展始终围绕着资源所依赖的生态系统的修复、建设、改良。

表 1  $k_1, k_2, k_3, k_4$  值分析

| 情境 | k 值   |       |       |       | 耦合效果评价   |
|----|-------|-------|-------|-------|--|
|    | $k_1$ | $k_2$ | $k_3$ | $k_4$ |  |
| 1  | +     | +     | +     | +     | 资源系统处于资源重建或恢复过程中, 产业发展与资源发展相互促进  |
| 2  | +     | +     | +     | -     | 资源系统处于资源重建或恢复过程中, 产业发展建立在资源利用的基础上, 但所确定的产业方向和类型已不能完全适应区域产业发展的需求                |
| 3  | +     | +     | -     | +     | 资源系统得到较好的改良, 但资源并未很好支撑产业发展   |
| 4  | +     | +     | -     | -     | 围绕资源系统的加速恢复与提高, 确定资源改良和产业发展方向和规模(不考虑产业发展情况, 就是说这个阶段以解决资源系统所依赖的环境的恢复为主要点)       |
| 5  | +     | -     | +     | +     | 资源环境进一步改善, 并很好支撑了产业的发展, 但产业发展已对资源系统局部链网结构产生破坏                                  |
| 6  | +     | -     | +     | -     | 基于资源利用的产业发展过度, 产业发展并未建立在对资源有效利用的基础上, 且产业类型和规模已达到极限                             |
| 7  | +     | -     | -     | +     | 资源系统的恢复和改良与产业系统对资源的利用相矛盾   |
| 8  | +     | -     | -     | -     | 资源系统尚待改良之中, 但建立在资源基础上的产业已超载, 且产业类型和规模已达到极限                                     |
| 9  | -     | +     | +     | +     | 资源系统得到较好的改良, 资源建设的空间已达到极限, 同时, 资源支撑产业的发展较强, 产业对资源的稳固和提高具有一定的作用                 |
| 10 | -     | +     | +     | -     | 产业发展与资源发展相互促进, 但对各此系统的有序发展却产生了一定的破坏  |
| 11 | -     | +     | -     | +     | 资源系统所依赖的环境建设局部已超出其适宜范围, 产业发展主要建立在非资源的利用基础上, 或者说依赖资源的产业受到限制, 资源态势对产业与资源演化造成逆向影响 |
| 12 | -     | +     | -     | -     | 资源系统所依赖的环境建设局部已超出其适宜范围, 对产业与资源发展造成逆向影响, 产业类型和规模已达到极限, 但产业发展对稳固资源系统链网结构有一定的作用   |
| 13 | -     | -     | +     | +     | 以产业发展为核心, 确定资源改良和产业发展方向和规模(不考虑资源系统, 就是说这个阶段以解决产业发展为主要点)                        |
| 14 | -     | -     | +     | -     | 资源系统所依赖的环境建设局部已超出其适宜范围, 资源浪费与利用不足相并存   |
| 15 | -     | -     | -     | +     | 资源系统所依赖的环境建设局部已超出其适宜范围, 产业发展完全没有建立在区域资源开发与利用基础上                                |
| 16 | -     | -     | -     | -     |  |

注:  $k$  值的正负用“+/-”表示, “-”表示该种耦合态势基本不存在。

在  $k_1 > 0, k_2 < 0$  的情境下,资源的开发、利用对资源所依赖的环境以及资源的演变依然起促进作用,资源还有进一步增长的空间。若  $|k_1| > |k_2|$ ,产业的发展对资源已经起到了一个局部破坏作用,建立在资源基础上的产业对资源的开发利用没有超越度;若  $|k_1| < |k_2|$ ,产业的发展已经超越了资源的发展速度,这种情况下产业的发展就对资源是一种破坏。整体上来说,产业在这个阶段对资源是一种局部破坏,处于可恢复阶段。

在  $k_1 < 0$  的情境下,资源发展的空间已经达到了极值,资源量趋于稳定,资源发展对资源系统的演化速度开始起抑制作用,产业发展应围绕对资源的开发、利用调整发展方向和规模。

(2) 基于产业系统发展角度。在  $k_4 > 0$  的情境下,产业的发展对产业系统的演化速度起促进作用。若  $k_3 > 0$ ,产业系统与资源系统相互支撑,产业发展建立在对资源的开发、利用上;若  $k_3 < 0$ ,资源支撑产业的发展较弱,产业系统的发展方向和规模需要进一步调整。此阶段以产业发展为主,保证在资源可利用阈值范围内,使得产业系统发展尽快进入成熟期。在  $k_4 < 0$  的情境下,产业的发展对产业系统演化速度起抑制作用。产业间竞争较大,产业系统需根据产业与产业、产业与资源的互动关系调整发展方向和规模。

(3) 基于产业系统与资源系统的耦合角度。产业系统与资源系统的互动关系由  $k_2, k_3$  反映,当都是正的时候,互相促进,当都是负的时候,互相抑制。除此之外,根据农业产业系统与农业资源系统各自的发展情况并结合产业与资源的结合程度,出现两种情况:① 资源系统对产业系统演化速度起抑制作用,产业系统的发展对资源系统演化速度起到促进作用。在此发展态势下,资源系统与产业系统发展类型和方向已经确定,但与资源利用相关的产业发展刚起步或规模较小。② 资源系统对产业系统演化速度起促进作用,产业系统的发展对资源系统演化速度起到抑制作用。在此发展态势下,资源利用型产业得到发展,而产业发展造成资源链网的局部破坏,使得资源系统发展受到抑制。无论是在资源系统建设初期产业系统对资源系统的过度利用,还是资源系统发展成熟期产业系统对资源系统开发利用不足的情况,都需调节资源系统与产业系统的互动关系,使资源利用发展的产业不断成长。

### 3 县南沟流域耦合过程分析

县南沟流域自退耕以来,流域生态林面积由退耕前的 149.6  $hm^2$  增加到 2015 年的 1 370.8  $hm^2$ ,碳汇潜在经济价值达到 476.3 万元,是退耕前的 8.5 倍,

碳汇发展潜力巨大。考虑到碳汇产业可能会是流域产业链网络结构优化的路径,本研究将引入碳汇产业,对流域农业产业—资源系统耦合过程进行综合评估。

#### 3.1 $ai(t), ar(t)$ 的计算

3.1.1 权重确定 各项指标在综合评价指标体系中的重要程度用权重来表示。为了使其具有可比性、更加符合农业产业—资源系统演变与实际情况,通过德尔菲法(Dalphi)确定各个指标权重赋值,其值介于 0—1 之间(表 2)<sup>[5,20]</sup>。

表 2 县南沟流域农业产业—资源系统综合评价  
指标体系与权重

| 系统   | 子系统       | 一级指标 | 权重                 | 二级指标         | 权重   |
|------|-----------|------|--------------------|--------------|------|
| 农业产业 | 资源系统 (ar) | 资源环境 | 0.4                | 林草覆盖率 $x_1$  | 0.22 |
|      |           |      |                    | 降雨量 $x_2$    | 0.14 |
|      |           |      |                    | 可灌溉面积率 $x_3$ | 0.11 |
|      |           |      |                    | 人口密度 $x_4$   | 0.32 |
|      |           |      |                    | 土壤侵蚀模数 $x_5$ | 0.21 |
|      | 农业资源      | 0.6  | 人均耕地面积 $x_6$       | 0.25         |      |
|      |           |      | 农林牧土地利用结构 $x_7$    | 0.21         |      |
|      |           |      | 园比重 $x_8$          | 0.26         |      |
|      |           |      | 牧草地比重 $x_9$        | 0.28         |      |
| 资源系统 | 农业产业 (ai) | 0.5  | 农业产业链与资源相关度 $y_1$  | 0.40         |      |
|      |           |      | 农村工副业贡献率 $y_2$     | 0.15         |      |
|      |           |      | 农业劳动力/非农业劳动力 $y_3$ | 0.10         |      |
|      |           |      | 商品加工贮藏率 $y_4$      | 0.20         |      |
|      |           |      | 碳汇 $y_5$           | 0.15         |      |
|      | 产业效益      | 0.5  | 农产品商品率 $y_6$       | 0.29         |      |
|      |           |      | 农业产投比 $y_7$        | 0.11         |      |
|      |           |      | 人均纯收入 $y_8$        | 0.41         |      |
|      |           |      | 粮食潜力实现率 $y_9$      | 0.19         |      |

3.1.2 数据标准化 为了消除数据的数量级以及量纲的不同而造成的影响,对数据用极差标准化的方法进行标准化处理<sup>[14]</sup>。通过公式(4),(5)得出  $ar, ai$  的值(表 3)。为更好地体现系统发展过程,在对农业产业系统和农业资源系统综合指数计算的基础上,对其进行非线性拟合(图 1)。

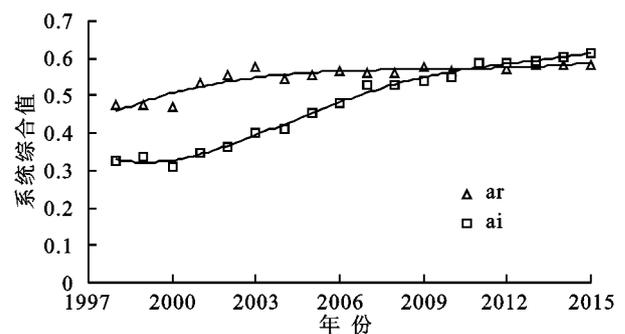


图 1 1998—2015 年县南沟流域农业产业—资源系统综合指数变化情况

由图 1 可以看出,在 1998—2015 年,县南沟流域农业产业系统和农业资源系统综合指数发展曲线呈 S 型,农业资源系统发展逐渐趋于稳定,农业产业系统发展处于上升态势。总体上,县南沟流域农业产业与资源状况明显改善,产业系统与资源系统综合指数明显提高。2015 年资源系统综合指数较 1998 年升高了 23.21%,产业系统综合指数升高了 88.20%。1999—2003 年由于退耕还林工程的实施,农业资源系统变化剧烈,资源系统综合指数明显提高,年平均

递增 7.57%,随后生态环境重建基本完成,资源系统发展态势平稳;2000—2007 年农业产业系统受农业资源系统影响,产业系统综合指数呈上升发展态势,年平均递增 9.98%,随后农业产业系统与农业资源系统相互调节,产业系统发展缓慢上升。

3.2  $k_1, k_2, k_3, k_4$  的确定及分析

根据县南沟流域 1998—2015 年各年份的  $ar(t)$ ,  $ai(t)$  值及各自拟合曲线,得出  $Var, Vai$ (表 3),按照公式(1),(2)回归得出  $k_1, k_2, k_3, k_4$ 。

表 3 县南沟流域 1998—2015 年农业产业—资源系统互动过程相关指标值

| 项目      | 1998 年  | 1999 年  | 2000 年 | 2001 年 | 2002 年 | 2003 年 | 2004 年 | 2005 年 | 2006 年 |
|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $ar(t)$ | 0.4747  | 0.4747  | 0.4721 | 0.5328 | 0.5544 | 0.5793 | 0.5470 | 0.5645 | 0.5651 |
| $ai(t)$ | 0.3263  | 0.3377  | 0.3121 | 0.3475 | 0.3660 | 0.4000 | 0.4126 | 0.4538 | 0.4831 |
| $Var$   | 0.0297  | 0.0244  | 0.0197 | 0.0156 | 0.0120 | 0.0090 | 0.0065 | 0.0045 | 0.0030 |
| $Vai$   | -0.0217 | -0.0040 | 0.0095 | 0.0192 | 0.0257 | 0.0293 | 0.0305 | 0.0298 | 0.0277 |
| 年份      | 2007 年  | 2008 年  | 2009 年 | 2010 年 | 2011 年 | 2012 年 | 2013 年 | 2014 年 | 2015 年 |
| $ar(t)$ | 0.5627  | 0.5605  | 0.5775 | 0.5664 | 0.5817 | 0.5731 | 0.5850 | 0.5836 | 0.5849 |
| $ai(t)$ | 0.5301  | 0.5282  | 0.5378 | 0.5524 | 0.5872 | 0.5875 | 0.5957 | 0.6044 | 0.6141 |
| $Var$   | 0.0019  | 0.0013  | 0.0010 | 0.0012 | 0.0017 | 0.0025 | 0.0036 | 0.0050 | 0.0067 |
| $Vai$   | 0.0245  | 0.0208  | 0.0169 | 0.0134 | 0.0108 | 0.0093 | 0.0096 | 0.0121 | 0.0172 |

根据县南沟流域 1998—2015 年农业产业系统和农业资源系统的演变过程,并结合产业系统与资源系统的耦合关系分析,可将农业产业—资源系统的发展划分为

三个阶段<sup>[21]</sup>:资源修复阶段(1999—2003)、产业适应阶段(2004—2010)、系统悖论阶段(2011—2015 年),分别对  $k$  值进行计算(表 4),对各阶段耦合态势进行判定。

表 4  $k_1, k_2, k_3, k_4$  及其标准误

| 时段        | $k_1$  |       | $k_2$  |       | $k_3$  |       | $k_4$  |       |
|-----------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
|           | 数值     | 标准误   | 数值     | 标准误   | 数值     | 标准误   | 数值     | 标准误   |
| 1998—2015 | 0.062  | 0.008 | -0.061 | 0.009 | 0.112  | 0.015 | -0.084 | 0.017 |
| 1998—2003 | 0.028  | 0.173 | 0.091  | 0.250 | -0.277 | 0.229 | 0.461  | 0.340 |
| 2004—2010 | 0.043  | 0.005 | -0.043 | 0.006 | 0.165  | 0.014 | -0.140 | 0.016 |
| 2011—2015 | -0.213 | 0.024 | 0.214  | 0.024 | -0.125 | 0.121 | 0.139  | 0.118 |

由表 4 可以看出,  $k_1, k_2, k_3, k_4$  的值在系统不同发展阶段取值有所差异。1998—2003 年流域实施退耕进行资源修复过程,此阶段以资源系统所依赖的环境建设为主,基于资源利用的产业发展受到抑制( $k_1 > 0, k_3 < 0$ )。2004—2010 年资源系统从低层次的水平经过生态建设不断的提升,  $k_1$  值有所上升,产业逐渐与资源相适应,产业链与资源相关度有所提升,产业的发展加大了对有限资源的利用,造成资源链网结局部破坏,从而对资源系统的演化起负面作用( $k_2 < 0$ );与此同时,产业发展脱离对现有资源利用的局限,各产业在新环境下逐渐趋于稳定,部分产业为争夺资源的利用而出现竞争,各产业间发展速度受到抑制( $k_4 < 0$ )。2011—2015 年资源系统在现有土地利用结构上已经处于稳定发展阶段,而现有资源结构未达到优化阈值且产业发展未建立在对资源的合理、有效利用上,由于没有得到及时有效的调整,产业与资源

的发展都受到了抑制( $k_1 < 0, k_3 < 0$ );而在系统融入碳汇产业之后,产业链与资源相关度提升,对产业演化速度起促进作用( $k_4 > 0$ )。从农业产业—资源系统演化过程的整体来看,1998—2003 年的资源修复过程使得产业系统发展受阻,但是其修复的资源为第二阶段的产业发展奠定了良好的基础;2004—2010 年经济适应阶段,产业结构根据资源发展状况进行调整,使产业发展与资源建设相适应;2011—2015 年是对第二阶段发展的稳固,但仍需对产业结构进行调整,使得产业系统与资源系统协同发展,现阶段耦合公式(3),(4)变为:

$$\frac{dar(t)}{dt} = -0.213 \times (1 + e_1) \times ar(t) + 0.214 \times ai(t) \tag{6}$$

$$\frac{dar(t)}{dt} = -0.125 \times ar(t) + 0.139 \times (1 + e_2) \times ai(t) \tag{7}$$

显示结果也表明:由于退耕政策的实施,使得人们超度退耕,资源改良已经超越了适宜发展空间,资源的增加对资源系统演化的贡献已经达到一个限制。产业的发展除了对资源利用外,更重要的是依赖农业系统外的经济收入,从而减少人类的生态足迹对资源的破坏,对资源系统的演化起促进作用。在此状况下,若要使产业系统与资源系统处于均衡发展状态,即资源系统演化速度为 0,产业系统与资源系统的关系为:  $ai(t) = 0.9953 \times ar(t)$ , 产业系统的最大演化速度为:  $Vai = 0.013 \times ar(t)$ 。若融入碳汇产业,将改变系数  $e_2$  且大于 0,使得农业产业—资源系统功能提升,产业系统演化速度增大。

### 3.3 优化情境下 $e_1, e_2$ 的确定及分析

对于县南沟流域,尽管已经计算了碳汇的潜在价值,但必定碳汇产业尚未成为现实,在上述分析过程中,并未考虑碳汇产业发展与其他相关产业或要素的关系。在此,将碳汇产业融入系统发展,从量变角度探讨各产业之间、产业与资源的结构变化,分析农业产业—资源系统耦合发展态势。

(1) 原系统融入碳汇产业情景。从系统各要素考虑,发展碳汇产业将会提高人均收入( $y_8$ )并增加产业链与资源量相关度( $y_1$ )。资源系统基本不受影响,产业系统改变了原演变轨迹, $e_2$  大于 0。公式(5)变为:

$$e_2 = \frac{q_5 \times \Delta y_5 + q_8 \times \Delta y_8}{\sum_{j=1}^q q_j y_j} \quad (8)$$

在融入碳汇产业后,县南沟流域经济纯收入可增加 1 243.6 万元,人均纯收入增加 4 924.4 元,根据表 1 指标,农业产业链与资源量相关度将增加 1 个标度,前者在上述分析时已考虑,后者需要补充修订。由计算得到  $e_2 = 0.1294$ ,现阶段公式(6),(7)为:

$$\frac{dar(t)}{dt} = -0.213 \times ar(t) + 0.214 \times ai(t) \quad (9)$$

$$\frac{dai(t)}{dt} = -0.215 \times ar(t) + 0.157 \times ai(t) \quad (10)$$

此时,产业发展对产业系统演化起到促进作用,同时也使资源系统演化速度提升为:  $Var = 0.0238$ ,是融入碳汇产业前的 3.56 倍。可以看出,碳汇产业的融入可以改善农业产业系统和农业资源系统的相悖态势,对于现阶段农业产业—资源系统的发展起到了促进作用,资源利用更加合理有效,加速了产业优化升级,使农业产业系统和农业资源系统的关系更加紧密。

(2) 碳汇产业+畜牧业“轮牧+舍饲”情景。退耕后,林草资源虽还没有达到最大化,但受禁牧政策的影响使得现有林草资源没有得到合理利用。在融入碳汇

产业的基础上,针对县南沟流域退耕政策实施使得流域林草资源富足的现状,采纳“轮牧+舍饲”的养殖政策,在保持现有生态环境的基础上,使得林草资源得到有序、合理利用,产业发展得到优化升级。此时系统演变轨迹发生了变化,其中产业系统中变化最大的指标是农业产业链与资源量相关度( $y_1$ )、农产品商品率( $y_6$ )、人均纯收入( $y_8$ ),这些指标都会提高,即产业系统改变了原演变轨迹, $e_2$  大于 0。公式(5)变为:

$$e_2 = \frac{q_1 \times \Delta y_1 + q_6 \times \Delta y_6 + q_8 \times \Delta y_8}{\sum_{j=1}^q q_j y_j} \quad (11)$$

县南沟流域 2015 年有草地 2 420.43  $\text{hm}^2$ ,林地 1 589.27  $\text{hm}^2$ ,其中生态林 1 370.8  $\text{hm}^2$ 。按照“轮牧+舍饲”管理方式,冬春舍饲,夏秋轮牧,极限放牧量按 1 000 只算(历史最大 1 070 只),为使林草资源稳固、持续发展,假设 600 只羊可以实现系统良性互动。每只羊按纯收入为 431 元,可对流域增加收入 25.86 万元,人均纯收入增加 102.05 元。根据表 1 指标,农业产业链与资源量相关度、农产品商品率都将增加 1 个标度,人均纯收入由于变化不大所以保持不变。通过计算得到  $e_2 = 0.0562$ ,公式(6),(7)变为:

$$\frac{dar(t)}{dt} = -0.213 \times ar(t) + 0.214 \times ai(t) \quad (12)$$

$$\frac{dai(t)}{dt} = -0.125 \times ar(t) + 0.165 \times ai(t) \quad (13)$$

此时,产业发展对产业系统演化进一步促进,资源系统演化速度提升为:  $Var = 0.0312$ ,是产业系统改良前的 4.66 倍,是单纯融入碳汇产业的 1.31 倍。可以看出,在融入碳汇产业并结合畜牧业“轮牧+舍饲”制度的实施,不仅产业系统结构得到优化改良,也使资源系统得到较好的开发利用,有效地促进了产业系统与资源系统的协同发展。

综合来看,现有资源利用模式与产业态势已形成了农业产业—资源系统相悖态势,无论是对农业产业—资源系统单纯地融入碳汇产业还是碳汇产业结合“轮牧+舍饲”养殖模式的优化方案,都有利于产业系统发展并促进资源系统的演化。

## 4 结论与讨论

通过构建农业产业—资源系统耦合过程模型,使得系统间耦合过程得以量化,通过对  $k$  值可能组合方式下所表征的生态经济意义的分析,明确了农业产业系统和农业资源系统的互动过程,为产业系统与资源系统优化发展方向和规模提供依据。

退耕后,县南沟流域农业产业—资源系统经过三

个发展阶段,资源所依赖的环境系统的提升空间已达到极限,产业发展未建立在对资源的合理、有效利用上。现阶段农业资源系统发展态势与资源系统演化速度和产业系统演化速度都成负向相关,农业产业系统发展态势与资源系统演化速度和产业系统演化速度都成正向相关。通过对县南沟流域耦合过程优化情景的模拟,得出通过融入碳汇产业可使农业产业系统发展和农业资源系统发展相互促进,资源系统演化速度提升 2.56 倍,且若通过“轮牧+舍饲”养殖模式进一步优化,可使农业产业系统发展速度在融入碳汇产业的基础上提升 0.31 倍,提升了产业发展与资源利用的相关度,扩大了产业发展的空间。

本研究所建农业产业—资源系统耦合过程模型比较成功地解释了县南沟流域的发展状况,但仍需在今后的实践和应用中对其进一步完善,并对模型参数不断地验证和修订,使模型更符合黄土丘陵区退耕区域的发展状况。通过模型对县南沟流域的分析,证实退耕还林还草工程实施过程及方案有待于根据黄土丘陵区实际发展状况进行优化,促进碳汇产业的发展,使农业资源得到合理、高效利用,加速产业优化升级,实现农业产业—资源系统的可持续发展。

#### 参考文献:

- [1] 王继军,谢永生,卢宗凡,等. 退耕还林还草下生态农业发展模式初探[J]. 水土保持学报,2004,18(1):134-137.
- [2] 卢宗凡,梁一民,刘国彬. 中国黄土高原生态农业[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1997.
- [3] 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.
- [4] 刘耀彬,陈斐,李仁东. 区域城市化与生态环境耦合发展模拟及调控策略:以江苏省为例[J]. 地理研究,2007,26(1):187-196.
- [5] 王继军,姜志德,连坡,等. 70 年来陕西省纸坊沟流域农业生态经济系统耦合态势[J]. 生态学报,2009,29(9):5130-5137.
- [6] 王继军,郭满才,姜志德,等. 农业生态经济系统耦合过程模型的建立及应用[J]. 生态学报,2010,30(9):2371-2378.
- [7] 刘兴元,王锁民,郭正刚. 半干旱地区农业资源的复合经营模式及生态经济耦合效应研究[J]. 自然资源学报,2004,19(5):624-631.
- [8] 周立华,樊胜岳,王涛. 黑河流域生态经济系统分析与耦合发展模式[J]. 干旱区资源与环境,2005,19(5):67-72.
- [9] 周立华,王涛,樊胜岳,等. 内陆河流域的生态经济问题与协调发展模式:以黑河流域为例[J]. 中国软科学,2005(1):114-119.
- [10] 曹洪华. 生态文明视角下流域生态—经济系统耦合模式研究:以洱海流域为例[D]. 长春:东北师范大学,2014.
- [11] 邵权熙. 当代中国林业生态经济社会耦合系统及耦合模式研究[D]. 北京:北京林业大学,2008.
- [12] 李崇明,丁烈云. 小城镇资源环境与社会经济协调发展评价模型及应用研究[J]. 系统工程理论与实践,2004,24(11):134-139.
- [13] 梁红梅,刘卫东,林育欣,等. 土地利用效益的耦合模型及其应用[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版,2008,34(2):230-236.
- [14] 乔标,方创琳. 城市化与生态环境协调发展的动态耦合模型及其在干旱区的应用[J]. 生态学报,2005,25(11):3003-3009.
- [15] 刘佳,王继军. 黄土丘陵区纸坊沟流域农业生态经济系统耦合态势[J]. 应用生态学报,2010,21(6):1511-1517.
- [16] 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.
- [17] 卢良恕,梅方权,许世卫. 中国解决温饱问题的成就及其发展战略[J]. 农业现代化研究,1990,11(4):2-25.
- [18] 夏自兰,王继军. 基于水土保持下的纸坊沟流域农业产业—资源系统耦合效应评价[J]. 自然资源学报,2011,26(10):1647-1657.
- [19] Bertalanffy L V. Clean coal technologies; A status report[J]. Electrical World, 1992(2):37-42.
- [20] 李芬,王继军. 黄土丘陵区纸坊沟流域近 70 年农业生态安全评价[J]. 生态学报,2008,28(5):2380-2388.
- [21] 刘罕奇,王继军. 黄土丘陵区县南沟流域农业产业—资源系统链网结构分析[J]. 水土保持研究,2017,24(2):207-212.