

陕西省西坡村农果复合生态经济 系统能量流特征*

吴发启** 朱丽¹ 王红红²

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

摘要 以陕西省淳化县西坡村农果复合系统为例,对比分析了2008和2010年农业、果业、畜牧业、人类子系统的能流路径、能流投入、产出结构和能量循环指数.结果表明:2008—2010年间,研究区农果复合系统总投入下降了1.6%,总产出却增长了56.7%,产投比增加了59.4%.各子系统(农业子系统、果业子系统、畜牧业子系统和人类子系统)的能量产投比分别增长了36.6%、21.0%、10.0%和3.8%;西坡村仍需坚持“稳定农业、发展畜牧业和强化果业”的发展方针,以促进农果复合系统的发展和优化升级.

关键词 能流 农果复合系统 产投比

文章编号 1001-9332(2014)01-0195-06 **中图分类号** S181 **文献标识码** A

Energy flow characteristics of the compound agriculture-fruit farming system in Xipo Village, Shaanxi, Northwest China. WU Fa-qi, ZHU Li, WANG Hong-hong (College of Resources and Environmental Science, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2014, 25(1): 195-200.

Abstract: Taking the crop-fruit farming system in Xipo Village in Chunhua, Shaanxi Province as a case, the energy flow path, input and output structure, and the indices of energy cycle for the agriculture, fruit, stockbreeding and human subsystems were compared between 2008 and 2010. Results showed that during the study period the total investment to the agriculture-fruit farming system (CAF) decreased by 1.6%, while the total output increased by 56.7%, which led to a 59.4% increase of the output/input ratio. Energy output/input ratio of the agriculture, fruit, stockbreeding, human subsystems increased by 36.6%, 21.0%, 10.0% and 3.8%, respectively. The Xipo Village still needed to stabilize the agriculture, develop stockbreeding and strengthen fruit to upgrade the compound agriculture-fruit farming system.

Key words: energy flow; compound agriculture-fruit farming system; output/input ratio.

能量是生态系统赖以存在和发展的基础.应用能量流动方法对农业生态系统特征进行分析,能够客观、全面和定量地反映系统各成分间最本质的关系^[1].能量流动分析是农业生态系统功能研究的一个重要内容,并受到国内外农业生态学者的广泛重视^[2].能量的转化与流动是生态系统的重要功能之一,对其展开研究有利于认识系统内各组分间的关系,这对于提高系统生产力、制定区域生产规划等十分必要^[3].近年来,对能量流动分析的研究多集中

在农田(种植业)生态系统、区域农业生态系统和自然-社会-经济复合生态系统三方面^[4],并从不同深度和规模层次对农业生态系统进行了定量和半定量研究^[5].以往的能量分析将各种性质和来源不同的能量以统一能量单位表示后进行比较和数量研究,以利于不同类型的能量进行比较和加减^[6];能流分析主要用于计算系统能量的产投比及各组分间的能流状况,一方面显示出投入能对产出能形成的效率,另一方面也对系统内各组分间以及系统内外的能量流交流进行分析,分析结果得出的综合指标体系既反映生态效益,也体现了经济效益^[7].将自然系统、人类社会和经济系统结合起来进行定量分析,对系统内的资源利用、当地循环模式现状及其发展的可

* 中国科学院知识创新工程项目(KZCX1-06)、国家重点科技计划项目(2001BA508B20)和“十二五”国家科技支撑项目(2012BAD14B11)资助.

** 通讯作者. E-mail: lf2220526@sohu.com

2013-04-18 收稿,2013-10-23 接受.

持续性进行评估,可为当地的经济政策制定提供科学依据.目前国内外学者对农业生态系统及农田生态系统能量流的研究进行了大量报道^[8-11],但大部分以省、县等区域为研究对象,以村为单位、对能量流进行横向对比的报道甚少.本研究以淳化县西坡村为研究对象,对比分析该地区农业子系统、果业子系统、畜牧业子系统、人类群体子系统和农果复合系统的能量投入与产出特征,分析了农果复合系统的投入产出情况、以及运行效率和环境负荷,以期为黄土高原中南部农村地区农业产业结构优化和效益提高提供依据^[5,12-13].

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地区概况

西坡村隶属于陕西省咸阳市北部的淳化县(34°43′—35°03′ N, 108°18′—108°50′ E),地形北高南低,呈长条状,属黄土高原区.年均气温 9.8 °C,1月平均气温-4.3 °C,7月平均气温 23.1 °C,年无霜期 138 d,≥10 °C 活动积温 3218 °C,太阳年辐射总量 505.86 kJ·cm⁻²,年日照时数 2372.1 h,年均降水量 606.6 mm,全县地表水常流量 0.98 m³·s⁻¹,平均径流深 58 mm,径流总量 5706×10⁴ m³,地下水埋深达 100 m 以上,人畜用水困难.土壤为黄土母质发育的黄鹮土,地带性黑垆土仅存于塬心,自然植被存在于沟坡,多为草本、灌木,源面上基本为人工植被.该村土地总面积 259.89 hm²,其中,基本农田面积 69.54 hm²,果园面积 159 hm²,人均果园面积 0.27 hm²,人均耕地面积 0.069 hm².作物主要有小麦、玉米、油菜等,主栽果树为红富士(14年)和秦冠(20年),畜禽养殖主要为猪、鸡、奶羊等^[14].

1.2 系统结构的确定

通过调查各子系统能量的投入、输出项,对能量值进行计算,分析各子系统的能量流动情况,进而汇总分析复合系统的能量流动特征.

对研究区农户进行广泛调查后认为,系统由农业、果业、畜牧业和人类群体 4 个子系统组成.农业子系统主要包括小麦、玉米、谷子、油菜和土豆;果业子系统包括秦冠和富士 2 个苹果品种;畜牧业子系统由猪、鸡、羊、驴等组成;人类群体子系统可划分为老年人、成年人和儿童^[5].

1.3 系统的调查

2008 和 2010 年 4—11 月,分别对西坡村 34 户典型农户采用每个月定期访问和发放调查记录本的形式进行调查,调查内容主要包括:人口、畜禽、土地

利用、经济来源与消费;劳动力、畜力、种子、有机肥等有机能的投入量,以及农机、燃油、电力、化肥、农药等无机能的投入量;粮食、果品和肉、蛋、粪便等的产出量,取各项的平均值以户为单位进行分析.在当地的农贸市场调查苹果、作物、畜禽的市场价格,进行系统经济效益的分析评价^[15].

1.4 能量计算

由亚子系统、子系统到复合系统逐级计算、汇总计算能量.农业和果业子系统能量产投比的计算公式为:

$$E_{有} = \sum_{i=1}^n (E_{i有} A_i) \quad (1)$$

$$E_{无} = \sum_{i=1}^n (E_{i无} A_i) \quad (2)$$

$$E_{投} = E_{有} + E_{无} \quad (3)$$

$$E_{产} = \left(\sum_{i=1}^n E_i' A_i \right) \quad (4)$$

$$\text{能量产投比} = E_{产} / E_{投} \quad (5)$$

$$CREF = E_{有} / E_{投} \quad (6)$$

式中: $E_{有}$ 为子系统有机能投入; $E_{无}$ 为子系统无机能投入; $E_{投}$ 为子系统总投能; $E_{产}$ 为子系统总产能; $E_{i有}$ 为第*i*种作物单位面积有机能投入量; $E_{i无}$ 为第*i*种作物单位面积无机能投入量; E_i' 为第*i*种作物单位面积能量产出; A_i 为第*i*种作物种植面积; $CREF$ 为能流循环指数,指有机能投入占总投入能量的比重,反映了农业生态系统内子系统之间的协调关系和能量利用状况,是反映系统稳定性、自我维持能力和持续发展的重要指标^[5,8,11,16].

在畜禽种类、数量等调查的基础上,按李中魁^[17]、王幼民^[18]提出的方法,计算各畜种的饲料、饲草消耗量及粪便产量,再乘以相应的折能系数^[16,19],计算畜牧业子系统能量.主要投入物质的折能系数参考闻大中^[20]、骆世明^[1]的方法和标准来确定.

1.5 数据来源与处理

本研究所采用的数据资料主要源自于农户调查和调查所在地农业局、果业局和气象局收集的数据.采用 Excel 软件进行数据处理和分析.

2 结果与分析

2.1 各子系统能量流动特征

2.1.1 农业子系统 2008 和 2010 年,西坡村农业子系统年均总投能分别为 9.9×10¹⁰ 和 9.83×10¹⁰ J·hm⁻²,期间下降 0.7%.其中,有机能投入分别为

5.53×10^{10} 和 $5.51 \times 10^{10} \text{ J} \cdot \text{hm}^{-2}$, 期间下降了 0.4%, 分别占总投能的 56% 和 57%; 无机能投入分别为 4.37×10^{10} 和 $4.32 \times 10^{10} \text{ J} \cdot \text{hm}^{-2}$, 期间下降了 1.1%, 分别占总投能的 44% 和 43% (表 1). 说明该区农业子系统的投入以有机肥投入为主, 无机能投入以氮、磷肥的施用为主; 其投能总体水平高于 1985 年黄土高原的平均水平 ($3.78 \times 10^{10} \text{ J} \cdot \text{hm}^{-2}$)^[21]. 该子系统能流循环指数由 2008 年的 0.56 提高到 2010 年的 0.57, 说明该子系统的稳定性、自我维持能力和持续发展能力相对稳定并趋于增强^[5].

2.1.2 果业子系统 2008 和 2010 年, 果业子系统总投能分别为 15.45×10^{10} 和 $17.95 \times 10^{10} \text{ J} \cdot \text{hm}^{-2}$, 期间增长 16.2%; 其中, 有机能投入分别为 9.05×10^{10} 和 $11.7 \times 10^{10} \text{ J} \cdot \text{hm}^{-2}$, 期间增长 29.3%, 分别占总投能的 59% 和 65%; 无机能投入分别为 6.40×10^{10} 和 $6.25 \times 10^{10} \text{ J} \cdot \text{hm}^{-2}$, 下降了 2.3%, 分别占总投能的 41% 和 35% (表 2). 说明西坡村果业子系统投入以

有机能投入为主, 并逐渐加大了有机能投入力度. 2008 和 2010 年该子系统总产值分别为 38.90×10^{10} 和 $54.70 \times 10^{10} \text{ J} \cdot \text{hm}^{-2}$, 期间增长 40.6%, 与系统总投入的增加幅度相比, 系统总产出的增幅较大; 能量产投比分别为 2.52 和 3.05, 增长 21.0%; 能流循环指数分别为 0.59 和 0.65, 提高了 11.3%, 说明期间果业子系统的稳定性有所提高^[5].

2.1.3 畜牧业子系统 不同畜禽种类的能量产投比不同(表 3). 在各能量投入项中, 饲料投入占很大比重, 2008 和 2010 年西坡村饲料投入分别占总能量投入的 99.1% 和 99.5%, 说明饲料能的多寡决定畜禽子系统的投能水平. 畜牧业子系统能量输出以畜禽粪便为主, 分别占总输出的 97.3% (2008 年) 和 96.8% (2010 年). 整个畜牧业子系统的能量产投比分别为 11.47 和 12.62, 主要由农户的畜禽种类、饲养数量和方法不同所致^[5].

2.1.4 人类子系统 由表 4 可以看出, 2008—2010 年, 西坡村人类群体子系统总投能增长 2.9%, 总

表 1 农业子系统的能量输入与产出

Table 1 Energy input and output in agricultural subsystem

| 项目 Item | 年份 Year | O | I | O/I | Tin | Tout | Tout/Tin | CREF |
|-------------|-------------------|-------|-------|-------|------|-------|----------|------|
| 小麦 Wheat | 2008 | 3.29 | 2.23 | 1.48 | 5.52 | 6.38 | 1.16 | 0.60 |
| | 2010 | 2.96 | 2.46 | 1.20 | 5.42 | 9.74 | 1.80 | 0.55 |
| | 增长率 Increment (%) | -10.0 | 10.3 | -18.4 | -1.8 | 52.7 | 55.5 | -8.4 |
| 玉米 Corn | 2008 | 1.61 | 1.53 | 1.05 | 3.14 | 6.97 | 2.22 | 0.51 |
| | 2010 | 1.84 | 1.4 | 1.31 | 3.24 | 8.85 | 2.73 | 0.57 |
| | 增长率 Increment (%) | 14.3 | -8.5 | 24.9 | 3.2 | 27.0 | 23.1 | 10.8 |
| 油菜 Rape | 2008 | 0.63 | 0.61 | 1.02 | 1.24 | 1.87 | 1.51 | 0.51 |
| | 2010 | 0.71 | 0.46 | 1.54 | 1.16 | 2.06 | 1.78 | 0.61 |
| | 增长率 Increment (%) | 12.7 | -24.6 | 49.5 | -5.7 | 10.2 | 16.8 | 19.4 |
| 总计 Total | 2008 | 5.53 | 4.37 | 1.27 | 9.90 | 15.22 | 1.54 | 0.56 |
| | 2010 | 5.51 | 4.32 | 1.28 | 9.81 | 20.65 | 2.10 | 0.57 |
| | 增长率 Increment (%) | -0.4 | -1.1 | 7.9 | -0.7 | 35.7 | 36.6 | 1.8 |

O: 有机能 Organic energy ($\times 10^{10} \text{ J} \cdot \text{hm}^{-2}$); I: 无机能 Inorganic energy ($\times 10^{10} \text{ J} \cdot \text{hm}^{-2}$); Tin: 总投能 Total input energy ($\times 10^{10} \text{ J} \cdot \text{hm}^{-2}$); Tout: 总产值 Total output energy ($\times 10^{10} \text{ J} \cdot \text{hm}^{-2}$); Tout/Tin: 能量产投比 Energy input-output ratio; CREF: 能量循环指数 Index of energy cycle. 在计算总投能时未计算太阳辐射能, 故此表能量产投比会出现大于 1 的结果 The total input energy excluded the solar radiant energy, so some ratios of output to input were bigger than 1. 下同 The same below.

表 2 果业子系统的能量输入与产出

Table 2 Energy input and output in fruit subsystem

| 项目 Item | 年份 Year | O | I | O/I | Tin | Tout | Tout/Tin | CREF |
|-----------------------|-------------------|-------|-------|------|-------|------|----------|------|
| 秦冠苹果 Qinguan apple | 2008 | 5.70 | 3.30 | 1.73 | 9.00 | 21 | 2.33 | 0.63 |
| | 2010 | 6.40 | 3.61 | 1.77 | 10.01 | 34 | 3.40 | 0.64 |
| | 增长率 Increment (%) | 12.3 | 9.4 | 2.6 | 11.2 | 61.9 | 45.6 | 1.0 |
| 富士苹果 Fushi apple | 2008 | 3.35 | 3.10 | 1.08 | 6.45 | 17.9 | 2.78 | 0.52 |
| | 2010 | 5.30 | 2.64 | 2.01 | 7.94 | 20.7 | 2.61 | 0.67 |
| | 增长率 Increment (%) | 58.2 | -14.8 | 85.8 | 23.1 | 15.6 | -6.1 | 28.5 |
| 总计 Total | 2008 | 9.05 | 6.40 | 1.41 | 15.45 | 38.9 | 2.52 | 0.59 |
| | 2010 | 11.70 | 6.25 | 1.87 | 17.95 | 54.7 | 3.05 | 0.65 |
| | 增长率 Increment (%) | 29.3 | -2.3 | 32.4 | 16.2 | 40.6 | 21.0 | 11.3 |

表 3 畜牧业子系统的能量输入与产出

Table 3 Energy output and input of livestock subsystem

| 项目 Item | 年份 Year | Tin | Tout | Tout/Tin | CREF |
|--------------|-------------------|-------|-------|----------|------|
| 猪 Pig | 2008 | 5.91 | 42.4 | 7.17 | 1 |
| | 2010 | 6.32 | 44.73 | 7.08 | 1 |
| | 增长率 Increment (%) | 6.9 | 5.5 | -1.3 | 0 |
| 羊 Sheep | 2008 | 0.47 | 1.76 | 3.74 | 1 |
| | 2010 | 0.5 | 2.34 | 4.68 | 1 |
| | 增长率 Increment (%) | 6.4 | 33.0 | 25.0 | 0 |
| 鸡 Chicken | 2008 | 0.61 | 0.34 | 0.56 | 1 |
| | 2010 | 0.5 | 0.43 | 0.86 | 1 |
| | 增长率 Increment (%) | -18.0 | 26.5 | 54.3 | 0 |
| 总计 Total | 2008 | 6.99 | 44.50 | 11.47 | 1 |
| | 2010 | 7.32 | 47.50 | 12.62 | 1 |
| | 增长率 Increment (%) | 4.7 | 6.7 | 10.0 | 0 |

表 4 人类子系统的能量输入与产出

Table 4 Energy output and input of human being subsystem

| 年份 Year | Tin | M | D | Tout | Tout/Tin | CREF |
|----------------------|-------|------|------|------|----------|-------|
| 2008 | 9.83 | 0.31 | 0.79 | 1.10 | 0.11 | 0.67 |
| 2010 | 10.11 | 0.42 | 0.82 | 1.24 | 0.12 | 0.54 |
| 增长率 Increment (%) | 2.9 | 35.5 | 3.8 | 12.7 | 11.5 | -19.4 |

M: 人工能 Manpower ($\times 10^{10} \text{ J} \cdot \text{hm}^{-2}$); D: 人粪尿 Dejecta ($\times 10^{10} \text{ J} \cdot \text{hm}^{-2}$).

产值增长了 12.7%, 其中, 2008 和 2010 年, 人工能产出分别占总产值的 28.2% 和 33.9%; 粪尿占总产出能的 71.8% 和 33.9%; 能量产投比分别为 0.11 和 0.12, 期间提高了 11.5%. 说明人类群体子系统是典型的耗能群体, 而提高人类群体子系统能量产投比的途径是提高人口素质和劳动生产率.

表 5 2008 和 2010 年农果复合系统能量输入与产出

Table 5 Energy output and input of compound agriculture-fruit system in 2008 and 2010

| 项目 Item | 年份 Year | O | I | O/I | Tin | Tout | Tout/Tin | CREF |
|---|-------------------|-------|-------|-------|-------|--------|----------|------|
| 农业子系统 Agricultural subsystem | 2008 | 5.53 | 4.37 | 1.27 | 9.90 | 15.22 | 1.54 | 0.56 |
| | 2010 | 5.51 | 4.32 | 1.28 | 9.81 | 20.65 | 2.10 | 0.57 |
| | 增长率 Increment (%) | -0.4 | -1.1 | 7.9 | -0.7 | 35.7 | 36.6 | 1.8 |
| 果业子系统 Planting subsystem | 2008 | 9.05 | 6.40 | 1.41 | 15.45 | 38.90 | 2.52 | 0.59 |
| | 2010 | 11.70 | 6.25 | 1.87 | 17.95 | 54.70 | 3.05 | 0.65 |
| | 增长率 Increment (%) | 29.3 | -2.3 | 32.4 | 16.2 | 40.6 | 21.0 | 11.3 |
| 畜牧业子系统 Livestock subsystem | 2008 | 6.99 | 0 | 0 | 6.99 | 44.50 | 11.47 | 1 |
| | 2010 | 7.32 | 0 | 0 | 7.32 | 47.50 | 12.62 | 1 |
| | 增长率 Increment (%) | 4.7 | 0 | 0 | 4.7 | 6.7 | 10.0 | 0 |
| 人类子系统 Human subsystem | 2008 | 6.61 | 3.22 | 2.05 | 9.83 | 0.31 | 0.79 | 1.10 |
| | 2010 | 6.73 | 4.04 | 1.67 | 10.11 | 0.42 | 0.82 | 1.24 |
| | 增长率 Increment (%) | 1.8 | 25.5 | -18.7 | 2.9 | 35.5 | 3.8 | 12.7 |
| 农果复合系统 Compound agriculture- fruit system | 2008 | 28.18 | 13.99 | 2.01 | 42.17 | 98.93 | 2.35 | 0.67 |
| | 2010 | 28.98 | 12.51 | 2.32 | 41.49 | 155.00 | 3.74 | 0.70 |
| | 增长率 Increment (%) | 2.8 | -10.6 | 15.0 | -1.6 | 56.7 | 59.4 | 4.5 |

2.2 农果复合系统能量流动特征

用于西坡村农果复合系统生产的能量投入中, 有机能种类主要为人力、畜力、有机肥、种子和苗木等, 无机能种类主要为柴油、电力、机械、化肥、农药和塑料薄膜等, 产出则为水果、粮食、蔬菜和粪便等. 从表 5 可以看出, 2008 年, 果业子系统是农果复合生态系统中最大的耗能系统, 年净消耗能量 $15.45 \times 10^{10} \text{ J} \cdot \text{hm}^{-2}$, 分别是农业、畜牧业和人类子系统利用能量的 1.57、2.21 和 1.57 倍. 农业子系统年均产能 $15.22 \times 10^{10} \text{ J} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占系统产能总量的 15.4%; 果业子系统年均提供经济产品(果品)的能量为 $38.9 \times 10^{10} \text{ J} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占系统产能总量的 39.3%; 人类子系统年均产能 $0.31 \times 10^{10} \text{ J} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占系统产能总量的 0.3%; 畜牧业子系统年均产能 $44.5 \times 10^{10} \text{ J} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占系统产能总量的 45.0%, 从供给系统有机肥、提高农业和果业子系统秸秆、树叶等物质的利用效率来讲, 畜牧业子系统是连接农业和果业子系统的主要桥梁. 2010 年, 果业子系统仍是农果复合生态系统中最大的耗能系统, 年净消耗能量 $17.95 \times 10^{10} \text{ J} \cdot \text{hm}^{-2}$, 分别是农业、畜牧业和人类子系统利用能量的 1.83、2.45 和 1.78 倍. 农业子系统年均产能 $20.65 \times 10^{10} \text{ J} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占系统产能总量的 13.3%; 果业子系统年均提供经济产品(果品)的能量为 $54.7 \times 10^{10} \text{ J} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占系统产能总量的 35.3%; 畜牧业子系统年均产能 $47.5 \times 10^{10} \text{ J} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占系统产能总量的 30.7%; 人类子系统年均产能 $0.42 \times 10^{10} \text{ J} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占系统产能总量的 0.3%. 2008—2010 年,

西坡村农果复合系统有机能投入分别为 28.18×10^{10} 和 $28.98 \times 10^{10} \text{ J} \cdot \text{hm}^{-2}$, 期间提高了 2.8%; 无机能投入分别为 13.99×10^{10} 和 $12.51 \times 10^{10} \text{ J} \cdot \text{hm}^{-2}$, 降低了 10.6%; 总投入量分别为 42.17×10^{10} 和 $41.49 \times 10^{10} \text{ J} \cdot \text{hm}^{-2}$, 降低了 1.6%; 能量产出总量分别为 98.93×10^{10} 和 $155 \times 10^{10} \text{ J} \cdot \text{hm}^{-2}$, 增长了 56.7%; 能量产投比分别为 2.35 和 3.74, 增长了 59.4%; 说明黄土高原的农果复合系统是一个低投入、高产出的系统, 2008 和 2010 年系统能流循环指数分别为 0.67 和 0.70, 期间增长 4.5%, 说明 2010 年的农果复合系统的稳定性、自我维持能力和可持续发展能力均好于 2008 年。

3 结 论

农业生态系统的结构状况反映了系统中环境资源利用的合理性和系统内部生态经济关系的协调性, 从而决定系统整体结构的功能水平^[22-24]。在生态系统中, 有机能的能量投入比重越大、系统的能流循环指数越大, 系统越稳定、越能够自我维持和持续发展。2008—2010 年, 研究区农业子系统的有机能和无机能的投入都有所下降, 而系统产投比和能量循环指数呈上升趋势, 说明研究区对农业的重视程度有所加强, 系统呈现低投入、高产出的情况; 与农业子系统相比, 果业子系统的能量循环指数的增幅较大, 主要是由于果业子系统的有机能投入大幅提高, 系统的稳定性得到改善, 系统经济效益较高; 畜牧业是连接农业和果业子系统的主要桥梁, 其能量投入以有机能投入为主, 产投比增加 10%, 且产出中以粪便产量最大, 应在现有基础上扩大畜牧业子系统的饲养规模, 大力发展畜牧业, 优化养殖结构, 以进一步协调各子系统之间的关系。研究期间, 农果复合生态系统总能量投入降低了 1.6%, 而总能量产出却增长 56.7%, 能量产投比提高了 59.4%, 能量循环指数提高了 4.5%, 说明 2010 年农果复合系统相对于 2008 年具有更强的系统稳定性。但总体上, 该地区农户农果复合生态系统中有机能投入仍较低, 应当加强畜禽养殖, 提供充足的有机肥源, 同时调整系统的投能结构, 使农果复合生态系统稳定、持续的发展, 产业结构仍需继续坚持“稳定农业、发展畜牧业和强化果业”的发展方针^[8,25]。

参考文献

[1] Luo S-M (骆世明). *Agroecology*. Beijing: China Agriculture Press, 2001 (in Chinese)

- [2] Lu H-F (陆宏芳), Lan S-F (蓝盛芳), Chen F-P (陈飞鹏), *et al.* Advances in energy analysis of agro-ecosystems. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2004, **15**(1): 159-162 (in Chinese)
- [3] Tripathi RS, Sah VK. Material and energy flows in high-hill, mid-hill and valley farming systems of Garhwal Himalaya. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2001, **86**: 75-91
- [4] Wang J (王 嘉), Wang Z (王 植), Ju H-Y (琚慧媛), *et al.* Advances in energy analysis method of agro-ecosystems. *Journal of Shenyang University (沈阳大学学报)*, 2007, **19**(2): 78-82 (in Chinese)
- [5] Wang H-H (王红红). Research on Functional of Crop-fruit Ecological System in Middle-South of Loess Plateau. PhD Thesis. Yangling: Northwest A&F University, 2008 (in Chinese)
- [6] Zhao G-S (赵桂慎), Jiang H-R (姜浩如), Wu W-L (吴文良), *et al.* Sustainability of farmland ecosystem with high yield based on energy analysis method. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (农业工程学报)*, 2011, **27**(8): 318-323 (in Chinese)
- [7] Li Y (李 阳). Energy Flow Analysis and Present Situation Evaluation of Different Patterns about Farmland Circulation in Oasis Irrigation Area of Hexi. PhD Thesis. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2011 (in Chinese)
- [8] Wu F-Q (吴发启), Liu H-B (刘海斌), Sun B-S (孙宝胜), *et al.* Energy flow of ago-fruit ecosystem in the Loess Plateau of Shaanxi Province. *Chinese Journal of Eco-Agriculture (中国生态农业学报)*, 2008, **7**(4): 1005-1010 (in Chinese)
- [9] Alam MS, Roychowdhurg A, Waliuzzaman KM, *et al.* Energy flow in the family farming system of a traditional village in Bangladesh. *Energy*, 1999, **24**: 537-545
- [10] Smil V. *China's Energetics: A System Analysis, Energy in the Developing World*. Oxford: Oxford University Press, 1980
- [11] Fan J-L (范锦龙), Pan Z-H (潘志华), Zhao J (赵举), *et al.* Ecological management model of agriculture-pasture ecotone based on the theory of energy and material flow: A case study in Houshan dryland area of Inner Mongolia. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2004, **15**(4): 579-583 (in Chinese)
- [12] Gibbs D, Deutz P. Reflections on implementing industrial ecology through eco-industrial park development. *Journal of Cleaner Production*, 2007, **15**: 1683-1695
- [13] Wu F-Q (吴发启), Liu B-Z (刘秉正). *Agroforestry Systems Configuration in the Loess Plateau*. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2003 (in Chinese)

- [14] Zhou Z-L (周正立). Research on Function of Agrofruit Ecological System in the South of Loess Plateau. PhD Thesis. Yangling: Northwest A&F University, 2003 (in Chinese)
- [15] Chen D (陈栋), Zou D-S (邹冬生), Liu F (刘飞), *et al.* Energy analysis of Guangzhou National Agricultural Science and Technology Area. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2007, **15**(4): 161-165 (in Chinese)
- [16] Meng Q-Y (孟庆岩), Wang Z-Q (王兆骞), Jiang S-Q (姜曙千), *et al.* Analysis of energy flow of rubber-tea-chicken agroforestry system in tropical area of China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 1999, **10**(2): 172-174 (in Chinese)
- [17] Li Z-K (李中魁). Integrated Management, Monitoring and Evaluation for Small Watershed. Xi'an: Xi'an Cartographic Press, 1996 (in Chinese)
- [18] Wang Y-M (王幼民). Comprehensive Control and Benefits Analysis of Gully Region in Loess Plateau. Beijing: Beijing Forestry Press, 1990 (in Chinese)
- [19] Li X-T (李新通), Zhu H-J (朱鹤健). Study on the sustainability of UCCO mosaic agroforestry system. *Journal of Fujian Normal University* (Natural Science) (福建师范大学学报·自然科学版), 1999, **15**(2): 101-108 (in Chinese)
- [20] Wen D-Z (闻大中). Research method of agricultural ecosystem. *Rural Eco-Environment* (农村生态环境), 1986, **18**(1): 52-56 (in Chinese)
- [21] Gao D-M (高德明), Chen L-J (陈丽娟), Hu F (胡芬), *et al.* Energy flowing of agricultural ecosystem in dryland farming experimental site between eastern Shanxi and western Henan provinces. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 1997, **17**(5): 529-536 (in Chinese)
- [22] Su X (苏鑫), Wang J-J (王继军), Guo M-C (郭满才), *et al.* Coupling relationship of agricultural economic system in Wuqi County based on structural equation model. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(4): 937-944 (in Chinese)
- [23] Woodwell JC. A simulation model to illustrate feedbacks among resource consumption, production, and facts of production in ecological-economic system. *Ecological Modelling*, 1998, **112**: 227-247
- [24] Wang J-J (王继军), Zheng K (郑科), Zheng S-Q (郑世清). The index system of reviewing effects of ecological agriculture construction in the medium scale areas. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2000, **7**(3): 243-247 (in Chinese)
- [25] Chen D-D (陈冬冬), Gao W-S (高旺盛), Sui P (隋鹏), *et al.* Dynamic analysis on energy efficiency of modern planting system and grain production: A case study of Luancheng, Hebei. *Progress in Geography* (地理科学进展), 2008, **27**(1): 99-104 (in Chinese)

作者简介 吴发启,男,1957年生,教授,博士研究生导师。主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: lf2220526@sohu.com

责任编辑 杨弘
