

# 黄土丘陵区退耕前后典型流域农业生态经济系统能值分析

周萍<sup>1,2</sup>, 刘国彬<sup>1\*</sup>, 侯喜禄<sup>1</sup>

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

**摘要:** 应用能值分析理论和方法, 从资源的投入和产出结构角度对黄土丘陵区退耕还林草政策实施前后纸坊沟流域农业生态经济系统的资源利用、环境压力、能值指标变化及生态经济效益进行比较研究。结果表明: 退耕前, 该流域农业生态经济系统农产品总产出能值为  $7.53E+18$  sej, 退耕后减小了  $1.50E+17$  sej, 单位面积农产品生产力由退耕前的  $5.38E+15$  sej/hm<sup>2</sup> 上升到退耕后的  $1.68E+16$  sej/hm<sup>2</sup>, 畜产品的产出能值有所下降。退耕后系统生产优势度指数由退耕前的 0.60 上升到 0.72, 系统稳定性指数由退耕前的 0.51 增加到退耕后的 0.53, 退耕后流域人口承载力较退耕前大。退耕前后该流域能值投入率及环境负荷几乎无变化, 净能值产出率由 0.11 增加到 0.29, 退耕前流域人均能值用量为  $5.16 \times 10^{15}$  sej, 退耕后增加到  $5.41 \times 10^{15}$  sej, 系统可持续发展指数由退耕前的 2.55 上升到退耕之后的 6.69。退耕后, 能值一货币比为  $2.21 \times 10^{12}$  sej/\$, 与退耕前相比变化不大。为了使该流域的农业生态系统更加持续稳定的发展, 需进一步调整农业结构, 优化资源投入配置, 提高资源生产效率, 减小环境负荷, 逐步走向系统可持续性不断增强的健康发展轨道。

**关键词:** 农业生态经济系统, 环境工程, 退耕生态, 黄土丘陵区, 退耕还林草政策, 能值分析

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.06.050

中图分类号: Q148, F323.214

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-6-0266-08

周萍, 刘国彬, 侯喜禄. 黄土丘陵区退耕前后典型流域农业生态经济系统能值分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 266-273.

Zhou Ping, Liu Guobin, Hou Xilu. Energy analysis of agricultural eco-economic system before and after grain for green in typical watershed in loess hilly region of China[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(6): 266-273. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

物质和能量是自然界最基本的代谢要素。自然系统、人类经济系统和社会系统各组分及其作用均涉及能量的流动、转换、贮藏与耗散。能量是反映物理世界、化学世界和生物世界运动变化的指标之一, 可用于表达和了解自然的本质、生命与环境及人与自然的关系<sup>[1,2]</sup>。而传统的能量分析有 2 个局限: 一是忽视了地球的基本动力, 即太阳能; 二是没有注意到能量的质量问题。为了进一步发展能量分析方法并有效地分析生态系统问题, 美国著名系统生态学家 H.T.Odum 根据能量在自然、人类社会系统及其相互关系中的普遍性和统一性原则, 综合系统生态、能量生态和经济生态学原理, 于 20 世纪 80 年代创造性地提出了能值 (Emergy) 理论和方法, 能值被定义为: 产品或服务形成过程中直接和间接消耗的一种类型的能量总和<sup>[3,4]</sup>。这是一种新的环境-经济系统的核算

方法, 以太阳能值 (Solar Emergy) 为度量标准衡量<sup>[5]</sup>, 将生态经济系统内流动和储存的各种不同类型的能量和物质转换为统一太阳能的能值 (单位为 sej) 基准<sup>[2,6]</sup>, 这样可以在生态系统层面定量分析系统内部及其与外部的物质、能量和信息流关系, 进一步评价该系统的结构和功能状况<sup>[3,7]</sup>。自能值理论提出以来, 美国<sup>[2,8]</sup>率先于 20 世纪 80 年代展开了能值研究, Ulgiati 等<sup>[3]</sup>、Brown 等<sup>[9]</sup>对意大利、泰国等国家的特定区域或流域生态经济系统进行了实证研究, 日本也于 20 世纪 90 年代迅速开展, 亚非拉发展中国家也有诸多学者投入到能值研究当中<sup>[10,11]</sup>。中国学者于 20 世纪 90 年代将能值理论应用于生态经济系统的分析并进行了一系列案例研究<sup>[8,11-13]</sup>。近年来, 能值理论与方法<sup>[8,13,14]</sup>已被应用于农业模式的比较研究中<sup>[15,16]</sup>, 并不断对其研究方法和指标体系进行完善<sup>[17,18]</sup>。但对水土流失严重的黄土丘陵区农业生态系统的能值研究尚不多见, 特别是近年来提出的西部大开发和退耕还林草政策的实施对农业生态系统影响的能值研究则更少。因此, 本文基于能值分析理论, 对黄土丘陵区纸坊沟典型流域在退耕政策实施前后农业生态系统的能值结构及发展水平进行对比分析, 通过定量研究系统投入-产出能值, 客观而准确地认识和评价农业生态经济系统能值投入产出间的关系和生产力水平及其自然资源对社会经济的真实贡献, 为生态脆弱区生态经济系统的可持续发展提供理论参考, 同时丰富能值理论。这对该区退耕还林草政策的进一步实施及产业结构调整 and 生态治理也有重要意义, 为农业环境资源合理开发, 农业可持续发展

收稿日期: 2007-12-02 修订日期: 2009-04-20

项目名称: 中国科学院西部行动计划“黄土高原水土保持与可持续生态建设试验示范研究 KZCX2-XB2-05”; 973 课题“水土流失环境效应评价理论与指标体系 2007CB407205”; 国家科技支撑课题“植被优化配置与可持续建设技术 2006BAD09B03”

作者简介: 周萍 (1981-), 女, 陕西汉中, 博士, 主要研究方向: 植被恢复和生态系统服务功能评价。成都 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 610041。Email: zhouping04@mails.gucas.ac.cn

\*通讯作者: 刘国彬 (1958-), 男, 陕西榆林人, 研究员, 主要研究方向: 水土保持与流域管理。杨凌 中国科学院水利部水土保持研究所, 712100。Email: gbliu@ms.iswc.ac.cn

及评价提供理论依据。

## 1. 研究区概况和研究方法

### 1.1 研究区概况

研究地设在黄土丘陵区安塞县纸坊沟小流域,位于 $109^{\circ}13'46''\sim 109^{\circ}16'03''E$ ,  $36^{\circ}42'42''\sim 36^{\circ}46'28''N$ ,是中科院安塞水土保持试验站水土保持与生态恢复长期研究与试验示范流域。纸坊沟流域在气候区划上属暖温带半湿润气候向半干旱气候过渡的地区,流域面积 $8.27\text{ km}^2$ ,流域内有纸坊沟,寺岷峁和瓦树塌3个自然村。1999年(退耕还林草政策实施之前)流域共有106户,523人,人口密度为每平方公里63.24人;2004年(退耕还林草政策实施之后)流域共有111户,514人,人口密度为每平方公里62.15人。流域内大部分土壤是在黄土母质上发育而成的黄土幼年土—黄绵土。年均气温为 $8.8^{\circ}\text{C}$ ,干燥度1.5,无霜期157~194 d,年平均降雨量为542.5 mm,但分布不均,7、8、9三个月降雨量占年降雨量的61.1%,且多暴雨。从20世纪70年代起,就在该流域进行水土流失综合治理和植被恢复研究。

### 1.2 能值分析步骤

1) 确定研究系统的边界和内容:本研究的系统边界为黄土丘陵区纸坊沟典型流域,研究对象为该区农业生态经济系统的能值流特征。

2) 资料收集整理并建立能值分析系统:查阅纸坊沟流域1999年和2004年统计年报资料,调查和搜集该区自然地理、社会和经济等方面的基础资料,分析研究区农业生态经济系统运行的主要成分和能值流,建立主要能值流的系统基础数据库。

3) 能值分析表的编制和能值指标体系的建立:运用Odum的能值理论,结合黄土丘陵区纸坊沟流域农业生态经济系统组成及特点,计算反映该研究区能值特征和用于系统功能评价的主要能量流、物质流、经济流,形成能值分析表。能量折算系数和太阳能值转换率见参考文献[13,19]。

4) 系统的可持续发展评价和策略分析:结合能值指标的具体涵义对系统的变化情况和可持续性进行评价。

### 1.3 能值分析相关指标

1) 系统生产优势度:用来衡量系统的整体功能和系统分离部分与连接部分的复杂性和均衡性<sup>[13]</sup>。其计算公式为:

$$C = \sum (Em_{yi} / Em_y)^2$$

式中  $Em_{yi}$ ——第*i*个子系统的产出能值,  $i=1, 2, 3, 4$ ;  
 $Em_y$ ——系统总产出能值。

2) 系统稳定性指数<sup>[13]</sup>:表示系统生产稳定性的大小,其计算公式为:

$$S = \sum [(Em_{yi} / Em_y) \ln(Em_{yi} / Em_y)]$$

3) 人口承载力 (population carrying capacity):表征了目前生活标准下系统在当前区域限定环境资源条件所能供养的人口数。

4) 能值投入率 (emergy investment ratio):为投入经济系统的人工辅助能值与总环境能值的比值。

5) 净能值产出率 (net emergy yield ratio):为人工辅助能值投入所对应的能值产出量。

6) 环境承载率 (environmental loading ratio):为系统不可更新能源投入能值总量与环境能源投入总量之比。

7) 能值使用强度即能值密度 (emergy density):为总能值使用量与国土面积的比值。

8) 人均能值用量 (emergy per capita):是指一个系统年能值用量与该系统内总人口之比。

9) 系统可持续发展指数 (emergy based sustainability index):为净能值产出率与环境负载率的比值<sup>[2,20]</sup>,是美国生态学家Brown M. T.和意大利生态学家Ulgiati. S.在1998年提出的用以评价系统可持续发展性能的综合性能评价指标<sup>[3]</sup>。

10) 能值货币比:是一个国家或地区单位时间内使用的总能值与GDP的比值。

11) 能值货币价值:指生态系统或生态经济系统物质和能量的能值折算成货币,相当于多少币值,也称为宏观经济价值。其折算方法是能值除以当年能值/货币比率。为了增强不同国家或地区之间的可比性,一般以美元为单位。

## 2 结果与分析

### 2.1 退耕前后流域农业生态经济系统的能值投入产出分析

#### 2.1.1 退耕前后流域农业生态经济系统的能值投入分析

能值分析结果显示,环境资源投入对该流域的贡献较大,太阳能和降雨能值在可更新环境资源中占有大的比例(表1)。该区光能资源丰富,雨热同季,有利于发展种植业。退耕还林草政策实施之后,虽然流域的耕地面积减少,但农业系统中投入的化肥能值较退耕前增加 $2.07\text{E}+16\text{ sej}$ ,化肥的大量使用有损土壤的结构和性质<sup>[21]</sup>,也不符合经济效益和生态效益,可通过秸秆还田和有机肥的深施技术等增加有机肥使用率,适量减少化肥、农药的投入,这有利于提高土壤肥力,促进能量和物质的转化效率。可更新资源能值是该区农业持续发展的关键,因此应充分开发自然环境资源,提高太阳能和降水的利用率。

#### 2.1.2 退耕前后流域农业生态经济系统的能值产出分析

退耕前后纸坊沟流域的农业生态经济系统的产出能值由农林牧畜产品能值构成(表2),退耕后,虽然农地面积减小,但总的能值产出有所增加。在农产品产出能值中,玉米作为该区的主要粮食作物,退耕前后分别占农产品产出能值的5.63%和13.2%,豆类由于其能值转换率较农作物的高,因此其产出能值占有相当大的比重,但缺乏种植规模,商品化水平低。退耕后,蔬菜的能值较退耕前增加 $4.67\text{E}+15\text{ sej}$ ,这主要是由于温室大棚蔬菜的种植面积增加了,且种上了大田蔬菜,使农民的经济收益大幅提高。农作物中能值产出与其种植面积不成比例。退耕前,该区的农产品总产出能值为 $7.53\text{E}+18\text{ sej}$ ,退耕后,流域的农地面积由1999年的 $140\text{ hm}^2$ 减小到2004年的

55.8 hm<sup>2</sup>, 但总的产出能值仅减小了1.50E+17 sej, 单位面积的农产品生产力由退耕前的5.38E+15 sej/hm<sup>2</sup>上升到退耕后的1.68 E+16 sej/hm<sup>2</sup> (表3), 这说明退耕还林草政策实施后, 农产品的种植结构发生改变, 更多的投入到高能值的产品生产中, 且提高了生产效率, 不但保证了农民的基本口粮, 还增加了农民收入。因此, 调整栽培品种, 投入相对较高的辅助能, 已成为适应本地自然资源、摆脱广种薄收的模式、改善农民经济的必要措施。该流域农产品除了满足农民自身的生活需要外, 大部分农产品以初级产品的形式流向市场, 二次升值少, 未真正形成产业, 且多种经营内部结构也不尽合理, 农产品的加工流通力度相对滞后, 市场占有率不高, 这对下一步退耕还林草政策实施后期该流域农业的发展有一定的导向作用。对于林业的发展, 退耕后, 林果产品所占比例明显增加, 林果产品产出能值由退耕前的4.97E+16 sej增加到退耕后的23.7E+16 sej, 黄土丘陵沟壑区是发展经济林果的最佳地带。林木产品产出能值也较退耕前增加6.5E+14 sej, 但该流域林业商品化开发利用强度仍不高, 丰富的资源潜力未能有效利用, 应适当加大林业的投入, 以提高林产品的产出能值。进一步提高丘陵沟壑区农村经济的发展和农民收入。实施退耕还林草政策后, 畜产品的产出能值有所下降, 在畜牧业中猪和羊的养殖数量

和出栏数最大, 但是羊对林草的破坏性也较大, 这也是长期以来滥牧而引起生态环境恶化的一个重要原因。因此, 要积极地调整产业结构, 按照因地制宜的原则发挥资源优势, 提倡舍饲养羊, 平衡草畜, 提高净能值产出率, 降低环境负载率, 对响应国家退耕还林草政策, 恢复和保护生态环境及增加农民收入, 实现生态和经济的双赢有一定的促进作用。

退耕前该流域的农业系统生产优势度指数为0.60, 退耕后由于农林牧业子系统组成结构的改变和调整, 此指数上升为0.72, 较衡东县的0.504和三水市的0.442高<sup>[13]</sup>, 这与该流域林业和牧业子系统的产出能值占总产出能值的比率较高有关。该流域农业生态经济系统的稳定性指数由退耕前的0.51增加到退耕后的0.53, 此指标在退耕前后均低于横东县(0.826), 表明纸坊沟流域农业生态经济系统自稳定性还不高, 应该继续加强系统结构调整, 以增强其自控、调节、反馈作用和稳定性。纸坊沟流域退耕前所能承载的人口下限为113人, 上限为900人, 当时的人口数目在此范围内, 退耕后人口承载力较退耕前大, 其下限为148人, 上限达1185人。2004年该流域地总人口为514人, 处于限域内, 并具有较大变化空间。但不盲目乐观, 考虑到环境保护和发展的持续性, 应该适度控制人口增长, 以牺牲环境为代价的发展将得不偿失。

表1 纸坊沟流域退耕前后农业生态系统能值投入

Table 1 Emery input of agri-ecosystem before and after grain for green in zhifangou watershed

项 目	退耕前			退耕后		
	原始数据/J·g <sup>-1</sup>	能值转换率/sej·j <sup>-1</sup>	太阳能值/sej	原始数据/J·g <sup>-1</sup>	能值转换率/sej·j <sup>-1</sup>	太阳能值/sej
太阳辐射能	1.66E+16	1	1.66E+16	6.43E+15	1	6.43E+15
风动能	3.04E+09	6.63E+02	2.02E+12	1.18E+09	6.63E+02	7.81E+11
雨水化学能	2.70E+13	1.54E+04	4.16E+17	1.04E+13	1.54E+04	1.61E+17
雨水势能	2.01E+13	8.90E+03	1.79E+17	7.78E+12	8.90E+03	6.92E+16
地球旋转能	1.37E+12	2.90E+04	3.98E+16	1.90 E+12	2.90E+04	5.51 E+16
可更新环境资源小计			4.56E+17			2.21E+17
表土层流失	2.09E+12	6.25E+04	1.31E+17	8.09E+11	6.25E+04	5.06E+16
不可更新环境资源小计			1.31E+17			5.06E+16
电力	3.90E+09	1.59E+05	6.21E+14	1.51E+09	1.59E+05	2.40E+14
燃油	2.98E+11	6.60E+04	1.96E+16	8.67E+10	6.60E+04	5.72E+15
氮肥	5.50E+06	4.62E+09 <sup>1)</sup>	2.54E+16	6.21E+06	4.62E+09 <sup>1)</sup>	2.87E+16
磷肥	1.86E+06	1.78E+10 <sup>1)</sup>	3.31E+16	2.84E+06	1.78E+10 <sup>1)</sup>	5.05E+16
有机复合肥	4.37E+06	2.80E+09 <sup>1)</sup>	1.22E+16	5.41E+06	2.80E+09 <sup>1)</sup>	1.51 E+16
农药	1.53E+05	1.62E+09 <sup>1)</sup>	2.47E+14	5.91E+04	1.62E+09 <sup>1)</sup>	9.57E+13
农用机械	1.04E+08	7.50E+07 <sup>1)</sup>	7.78E+15	4.01E+07	7.50E+07 <sup>1)</sup>	3.01E+15
农膜	6.52E+10	3.80E+08 <sup>1)</sup>	2.48E+19	2.53E+10	3.80E+08 <sup>1)</sup>	9.60E+18
工业辅助能小计			2.49E+19			9.69E+18
人力	3.30E+11	3.80E+05	1.26E+17	1.28E+11	3.80E+05	4.86E+16
有机肥	7.02E+07	2.70E+04	1.90E+12	1.04E+08	2.70E+04	2.82E+12
畜力	2.27E+09	1.45E+05	3.29E+14	8.79E+08	1.45E+05	1.27E+14
种子	5.96E+11	6.60E+04	3.93E+16	2.31E+11	6.60E+04	1.52E+16
有机能投入小计			1.65E+17			6.40E+16
总 计			2.51E+19			9.75E+18

注: sej=solar emjoules, 即太阳能焦耳, 1.66E+16=1.66×10<sup>16</sup>, 下同。上标为1) 的单位为sej·g<sup>-1</sup>。太阳辐射能、风动能、雨水化学能、雨水势能和地球旋转能是同样气候、地球物理作用引起的不同现象, 计算可更新资源时取雨水化学潜能和地球旋转能, 以免能值的重复计算。

表 2 纸坊沟流域退耕前后农业生态系统能值产出  
Table 2 Emergy output of agri-ecosystem before and after grain for green in zhifanggou watershed

项 目	退耕前				退耕后			
	产量/kg	原始数据/J	能值转换率 /sej · J <sup>-1</sup>	太阳能值/sej	产量/kg	原始数据/J	能值转换率 /sej · J <sup>-1</sup>	太阳能值/sej
玉米	1.07E+05	1.75E+12	8.51E+04	1.49E+17	1.32E+05	2.15E+12	8.51E+04	1.83E+17
谷子	4.58E+04	7.26E+11	3.59E+04	2.61E+16	2.44E+04	3.87E+11	3.59E+04	1.39E+16
糜子	4.47E+04	7.12E+11	3.59E+04	2.56E+16	6.00E+03	9.56E+10	3.59E+04	3.43E+15
豆类	4.22E+04	7.05E+11	6.90E+05	4.86E+17	1.13E+04	1.88E+11	6.90E+05	1.30E+17
高粱	1.42E+04	2.31E+08	8.30E+04	1.91E+13	—	—	8.30E+04	—
荞麦	6.08E+03	9.68E+10	8.30E+04	8.03E+15	1.40E+03	2.23E+10	8.30E+04	1.85E+15
马铃薯	2.92E+04	1.11E+11	2.70E+03	3.00E+14	1.05E+05	3.99E+11	2.70E+03	1.08E+15
大棚蔬菜	3.68E+04	9.21E+10	2.70E+04	2.49E+15	7.00E+04	1.75E+11	2.70E+04	4.73E+15
油料	5.03E+03	1.26E+10	8.60E+04	1.08E+15	—	—	8.60E+04	—
瓜类	1.40E+05	3.68E+12	5.30E+05	1.95E+18	7.50E+04	1.97E+12	5.30E+05	1.05E+18
大田蔬菜	—	—	2.70E+04	—	3.60E+04	9.00E+10	2.70E+04	2.43E+15
苹果	1.60E+04	5.36E+10	5.30E+05	2.84E+16	1.15E+05	3.85E+11	5.30E+05	2.04E+17
山楂	1.20E+04	4.02E+10	5.30E+05	2.13E+16	1.85E+04	6.19E+10	5.30E+05	3.28E+16
水果总计	2.80E+04	9.37E+10	5.30E+05	4.97E+16	1.34E+05	4.47E+11	5.30E+05	2.37E+17
人工草地	3.19E+04	1.58E+11	2.70E+04	1.18E+15	4.50E+04	3.38E+11	2.70E+04	9.11E+15
天然草地	3.16E+04	2.22E+11	1.90E+04	1.66E+15	9.92E+04	7.44E+11	1.90E+04	1.41E+16
木材		1.07E+11	4.40E+04	4.69E+15		1.21E+11	4.40E+04	5.34E+15
马			2.00E+06	8.41E+15			2.00E+06	0.00E+00
牛			4.00E+06	6.74E+17			4.00E+06	4.77E+17
驴			2.00E+06	4.01E+16			2.00E+06	6.07E+16
羊			3.17E+06	7.08E+17			3.17E+06	1.56E+17
猪			2.00E+06	5.00E+17			2.00E+06	4.06E+17
鸡			2.00E+06	1.56E+16			2.00E+06	2.35E+16
合 计				2.70E+18				2.78E+18

表 3 纸坊沟流域退耕前后农业生态系统产出能值指标比较  
Table 3 Comparison of emergy output of agri-ecosystem before and after grain for green in zhifanggou watershed

	林产品/sej	初级生产/sej	农产品单位面积生产力/sej · hm <sup>-2</sup>	次级生产/sej	系统生产优势度	系统稳定性指数	人口承载力下限	人口承载力上限
退耕前	4.70E+15	7.53E+17	5.38E+15	1.95E+18	0.60	0.51	113	900
退耕后	2.86E+16	1.66E+18	1.68E+16	1.12E+18	0.72	0.53	148	1185

2.2 退耕前后流域农业生态经济系统的能值指标的比较分析

能值指标体系是分析和比较系统得出结论的主要依

据，退耕前后纸坊沟流域农业生态经济系统发展水平的能值指标及该区与其他地区和国家的主要能值指标对比结果见表4。

表 4 纸坊沟流域农业生态系统能值分析指标及与各地指标比较  
Table 4 Comparison of emergy indices of agri-ecosystem in zhifanggou watershed and other regions and countries

指标	总能值 /10 <sup>20</sup> sej	能值投入率	净能值产出率	环境负荷率	能值密度 /10 <sup>11</sup> sej · m <sup>-2</sup>	人均能值 /10 <sup>15</sup> sej	可持续发展指数	能值货币比 /10 <sup>12</sup> sej · \$ <sup>-1</sup>
退耕前	0.027	0.455	0.11	4.31	3.09	5.16	2.55	2.19
退耕后	0.028	0.458	0.29	4.33	12.04	5.41	6.69	2.21
甘肃	1412	2.08	1.26	3.73	3.11	5.62	44.19	11.9
新疆	2691	2.14	1.32	0.483	1.25	11.7	64.1	14.7
内蒙古	7.1	4.56	1.04	3.13	5.93	29.5		27.1
江苏	3183	6.05	0.98	43.53	30.6	4.58	0.18	3.02
江西	548	0.46		2.64	3.28	1.25	1.19	2.26
浙江	2104	2.56	1.34	11.25	20.2	4.5		2.82
中国	71900	2.33	1.27	9.89	7.54	4.52		19.12
世界	202400	2.00		1.5	1.36	3.86		4.05
泰国	1590	8.52	1.08	1.04	2.15	3.18		3.5
美国	83200	7.00		9.32	7.00	29.25	0.48	2.55
日本	15300	0	0.75	0	41.09	12.64		2.14
意大利	12650			9.47	42.03	22.00		1.46
瑞典	4110			9.03	10	48.35		2.57

注：资料来源于Odum, 蓝胜芳等对有关地区和国家的研究<sup>[7,8,13]</sup>，其中瑞典的数据来源于<sup>[9]</sup>，意大利的数据来源于<sup>[22]</sup>，纸坊沟流域退耕前后的数据来自本研究。

### 2.2.1 能值投入率

能值投入率是衡量经济发展程度和环境负载程度的指标,若经济运行主要依靠本地资源或从外界环境中获取较多可更新资源时,其投入率较小,说明发展水平越低而对环境的依赖越强,利用外界资源、商品、资金和服务的能值比例较低,表明其对外开放和利用外界各类“资源”程度较低;反之则相反。同时,这一指标也受到发展政策、经济技术水平等因素的制约。退耕前后纸坊沟流域的能值投入率几乎无变化,且远低于其他地区、国家和世界的平均水平,说明该系统的外部投资力度比较小,但也表明该区具有良好的环境资源条件可供开发利用,且其产出的产品售价较低,市场竞争力较强。一个系统要具有竞争力,须具有低能值的可更新资源与高能值的能量适当搭配,即能值投资比值恰当,以获得较大的经济产出。

### 2.2.2 净能值产出率

净能值产出率是衡量系统生产效率的指标,该值越大,表明系统生产效率越高;同时净能值产出率反映了系统在获得经济输入能值上是否具有优势和区域经济活动的竞争力,一定程度上反映了系统的持续发展状况<sup>[13]</sup>。退耕前后,系统的净能值产出率由0.11增加到0.29,但仍低于其他西部地区及东部发达地区和国家的相应值。这说明该流域农业生态经济系统单位辅助能值投入所对应的能值产出量较低,即系统生产效率不高,在今后的治理工作中应该加强对该系统经济投入的强度,使其更具有竞争优势,良性发展。

### 2.2.3 环境负荷率

环境承载率表示单位可更新能值所承担的不可更新能值量,用以衡量自然环境的负荷程度,是对经济系统的一种警示。若系统长期处于较高的环境负荷率,系统将产生不可逆转的功能退化或丧失。从能值分析角度来看,外界能值输入和本地不可更新资源的过度开发是引发环境承载率(environmental loading ratio)上升的主要原因。该流域环境负荷退耕前后几乎无变化,且这一指标高于新疆、内蒙古、甘肃等西部地区,但低于江苏、浙江、中国平均水平及美国、意大利、瑞典等地。这说明流域的环境所承受的压力在生态环境承受范围之内,其资源开发和利用潜力仍较大。

### 2.2.4 能值密度

能值密度描述了单位时间某一单位面积的能值流动情况,可衡量某一国家或地区的能值使用集约情况及能值在空间的流动浓度。高度开发的国家或地区,其经济活动频繁,其能值交换和使用量较大,能值使用强度也必然高。但高的能值密度意味着土地是将来经济发展的限制因子。纸坊沟流域的该项指标在退耕前低于中国平均水平,而在退耕之后,又高于其他多数地区和国家,这与退耕后农业生态经济系统对资源的利用效率提高有关。一般来说,农业国家或地区的能值密度约为 $11.3 \times 10^{11} \sim 41.0 \times 10^{11} \text{ sej}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ <sup>[13]</sup>。能值密度越大,表

明该区域经济活动越频繁,经济发展程度越高,在等级中的地位也越高。

### 2.2.5 人均能值用量

人均能值用量是从生态学的角度反映人民生活水平、生活质量和经济发展程度的指标。这样能值可把各种形式的能物流、经济流转换为同一标准的能值加以比较研究。个人拥有的真正财富除了可由货币体现的经济能值外,还包括没有被市场货币化的自然环境无偿提供的能值。因此该指标比传统的人均收入更具有科学性和全面性。人均能值用量常被用来反映资源、财富和商品等真正财富的可利用程度,并不用来作为反映社会学意义上的生活质量标准(如较高的文化水平等)。从宏观生态经济能量学角度考虑,用人均能值用量来衡量人们的生存水平和生活质量的高低,比用传统的人均经济收入更具科学性和全面性。受总能值和人口数量的制约,退耕前纸坊沟流域人均能值用量为 $5.16 \times 10^{15} \text{ sej}$ ,退耕后该指标增加到 $5.41 \times 10^{15} \text{ sej}$ ,高于许多国家和地区,这是其人口相对较少,环境资源丰富所致,也说明该流域的发展潜力较大,但与发展国家和地区相比仍较低。

### 2.2.6 可持续发展指数

Ulgiaiti<sup>[3]</sup>对美国系统可持续发展指数(Emergy Based Sustainability Index,即ESI)长时间跨度(1945~1994年)分析后认为:作为一个相对评估指数,ESI<1时,系统是高消费驱动的经济系统;1≤ESI<10时,系统处于富有活力和发展潜力阶段;ESI≥10则是经济不发达的象征,表明系统对资源的开发利用程度不足<sup>[3]</sup>。纸坊沟流域的农业系统可持续发展指数由退耕前的2.55上升到退耕之后的6.69。表明与退耕前相比,退耕后该农业系统在较少增加环境负荷的情况下提高了生产效率,其可持续发展潜力增大,从而进一步说明退耕还林草政策的进一步实施对系统有优化作用。但与其他国家和地区相比,该流域的农业生态系统可持续发展指数还较低,因此,在退耕还林草政策的逐步实施和系统结构调整等方面尽量在减小对环境负荷前提下提高系统的产出能力,使流域的农业生态经济系统的可持续性增强。

### 2.2.7 能值货币比及能值货币价值

能值货币比值高,表示每单位经济活动所换取的能值量高,显示生产过程中使用自然资源所占的比重较大,经济开发程度较低;能值货币比值小的国家或地区,其自然资源对经济成长的贡献较小,表示该地区的资源开发程度大。农村地区很多的能值取自于无需付费的自然环境资源,因而农村能值货币比率较高。发达国家由于货币周转快速、GDP基数较大以及从外部购买资源,能值货币比通常较低。纸坊沟流域退耕之后,能值一货币比为 $2.21 \times 10^{12} \text{ sej}/\$$ ,与退耕之前相比变化不大,低于西部欠发达地区,而美国( $2.55 \times 10^{12} \text{ sej}/\$$ )、日本( $2.14 \times 10^{12} \text{ sej}/\$$ )、意大利( $1.46 \times 10^{12} \text{ sej}/\$$ )和荷兰( $2.23 \times 10^{12} \text{ sej}/\$$ )等国的能值货币比率均在 $2.55 \times 10^{12} \text{ sej}/\$$ 以下<sup>[2,3]</sup>。为进一步了解各能物流在整个系统中

的相对贡献,可将它们的能值再换算成相当的经济价值。将生态系统或生态经济系统物质和能量的能值折算成货币,相当于多少币值称之为能值货币价值,也称为宏观经济价值。其折算方法是能值除以当年能值/货币比率。为了增强不同国家或地区之间的可比性,一般以美元为单位。能值货币价值反映某一产品的实际价值,包括凝结在产品中的人类劳动和环境资源的价值,而市场价格只能反映产品的稀缺性。纸坊沟流域退耕前能值货币价值为1227.85\$,退耕后增加到1256.46\$。

### 3 讨论

纸坊沟流域在退耕还林草政策实施之后农业生态经济系统的结构明显优化,系统内部各子系统的自控、调节和反馈作用有所增强,系统生产力也有所提升,但资源利用效率与其他地区相比仍较低,结构也不太协调。为了使农业生态经济系统更加协调发展必须切合实际地发展林业和恢复植被,加强草地建设,恢复生态平衡,提高系统生态承载力;以生物措施和工程措施、传统方法和科学技术相结合,防治水土流失和自然灾害,保障农业生产;加强农业生态经济系统的对外开放程度和资金投入及农业基础设施建设,改善农业生产条件,增加有机肥投入,提高农业生产的生产率、稳定性和持续性;同时应因地制宜地调整农业生产结构,充分利用多种生物资源,把各级农业生产的各种有机物转化为植物的、动物的以及深加工的产品,建立可持续发展的生态农业模式<sup>[14]</sup>;同时也要积极引进科技人才,努力提升农村劳动力素质,提高农业生产科技水平和管理水平。

能值概念的提出为衡量和比较不同类别、不同等级层次上的能量动态提供了理论和方法基础,使传统的能量分析面临的不同能量的可加性和可比性问题得到解决<sup>[14]</sup>。该理论是把生态系统和经济系统统一起来进行定量分析的方法,可以定量评价自然和人类社会经济系统、资源与环境的真实价值以及它们之间的关系,客观地衡量资源、产品的宏观经济价值,能值理论为研究生态经济系统提供了新的思路<sup>[4,13]</sup>。但是,由于能值转换率计算起来比较复杂,尽管H.T.Odum等已计算出自然界和人类社会主要能量类型和物质的能值转换率,能够满足较大范围的能值分析需要,但由于生产水平和效益的差异而使能值转换率有一定程度的差别。为准确计算出各种产品的能值转换率,需要做更深入的研究。

1) 退耕还林草政策实施之后,纸坊沟流域的农业处于传统农业向以生态农业为主的现代农业的转型阶段。与其他地区相比其能值投入水平还较低,系统能值反馈率不高,能值利用率有待提高;能值产出率有所增加但与其他地区和国家相比还有一定的距离;农业机械化水平不高,自然资源没有得到充分利用,农业集约化水平低,这些都在不同程度上影响着该区农业发展。为了使其生态效益和经济效益同步提高和有效调节,首先,应加强农业生态经济系统的开放程度及流域与外界系统物

质,能量和信息的交流,合理利用系统外部资源,进一步加强系统能值投入;第二,加强农业基础设施建设,增强流域农业生态经济系统的能值投入;第三,普及和推广农业科学技术研究,提高农民的整体素质;第四,进一步调整农业产业结构,充分利用系统的环境资源,提高林业的能值产出贡献率。

2) 针对黄土丘陵区纸坊沟流域农业生态系统发展的特点,加强水土保持、减少表土流失应是当前及今后较长时间内首先予以解决的问题。未来一个时期该区可持续发展能力建设的总体方向应该是:(1)大力提高本地和外来能值的利用效率,高效利用本地太阳能、风能等免费能值,优化水土资源配置,提高土地和水资源的使用效率,保持系统总能值用量和能值密度持续增长。(2)增强系统开放性,加强系统以外能值的引入,更充分地利用区外资源,缓解本区的资源压力。农业生态经济系统是一个耗散结构,要维持系统的持续发展,系统必需是一个开放的系统,并不断有外界的能值反馈投入<sup>[13]</sup>。

(3)严格将系统的环境负荷降低到一个较低水平,加强本地生态系统功能结构调整,充分利用该区气候条件和光能资源丰富的优势,提高可更新环境资源利用效率,进一步发掘粮食生产潜力,保证基本的农产品生产基础上,积极配合国家“退耕还林还草”政策的实施,因地制宜采取适宜的生物措施、工程措施与具体的耕作措施,有效控制水土流失,提高生态和经济效益,逐步走向系统可持续性不断增强的健康发展轨道上来。

3) 自从H.T. Odum创立了能值分析理论以来,许多学者相继提出了20多种反映系统变化规律及其特征的能值指标。但评价指标体系仍不完善,尤其缺乏全面衡量系统可持续发展能力的综合指标,这种局面使得能值评价指标体系的研究成为能值研究的前沿焦点之一<sup>[13]</sup>。需加强能值理论与新兴研究领域及与地理信息系统、Exergy(火用)理论、数学模型及生态足迹等方法结合。

4) 该流域农业生态经济系统的可持续发展应立足本地,提高对资源环境的综合利用价值,遵循功率最大化原则<sup>[23]</sup>,争取在西部大开发中有所作为。同时在构建和谐社会中,应协调农村、农业及人与自然的和谐关系,优化资源投入配置,提高资源生产效率;防治农业和农村污染,减少外部性损失,进行生态恢复性投入,促进该流域社会主义新农村的建设。

### 4 结论

退耕还林草政策实施之前,纸坊沟流域农业生态经济系统的农产品总产出能值为 $7.53E+18$  sej,退耕后总产出能值减小了 $1.50E+17$  sej,单位面积的农产品生产力由退耕前的 $5.38E+15$  sej/hm<sup>2</sup>上升到退耕后的 $1.68E+16$  sej/hm<sup>2</sup>,这说明退耕还林草政策的实施,使农产品种植结构发生改变,生产效率得到提高,不但保证了农民的基本口粮,还增加了农民收入。而畜产品的产出能值有所下降。退耕前该流域的农业系统生产优势度指数为

0.60, 退耕后上升到0.72, 系统稳定性指数由退耕前的0.51增加到退耕后的0.53, 该流域退耕前所能承载的人口下限为113人, 上限为900人, 退耕后, 流域人口承载力较退耕前大, 其下限为148人, 上限达1185人。退耕前后该流域能值投入率及环境负荷几乎无变化, 系统的净能值产出率由0.11增加到0.29, 退耕前流域人均能值用量为 $5.16 \times 10^{15}$  sej, 退耕后该指标增加到 $5.41 \times 10^{15}$  sej, 系统可持续发展指数由退耕前的2.55上升到退耕之后的6.69。退耕后, 能值—货币比为 $2.21 \times 10^{12}$  sej/\$, 与退耕前相比变化不大。

#### [参 考 文 献]

- [1] Robert C, Ralphd A, Rudolf D G, et al. The value of the world's ecosystem services and nature capital[J]. *Nature*, 1997, 387: 253—260.
- [2] Odum H T. *Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making*[M]. New York: John Wiley and Sons, 1996: 88—156.
- [3] Ulgiati S, Odum H T, Bastianoni S. Emergy use, environment loading and sustainability: an emergy analysis of Italy[J]. *Ecological Modeling*, 1994, 73: 215—268.
- [4] Odum H T. Self-organization, transformation and information[J]. *Science*, 1988, 24(2): 1132—1139.
- [5] Brown M T, Ulgiati S. Emergy evaluation of natural capital and biosphere services[J]. *Ambio*, 1999, 28(6): 468—493.
- [6] Campbell D E. Emergy analysis of human carrying capacity and regional sustainability: an example using the state of Maine[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1998, 51: 531—569.
- [7] 严茂超. 西藏生态经济系统的能值分析与可持续发展研究[J]. *自然资源学报*, 1998, 13(2): 116—125.  
Yan Maochao. A study on emergy evaluation and sustainable development of Tibetan eco-economic system[J]. *Journal of Natural Resources*, 1998, 13(2): 116—125. (in Chinese with English abstract)
- [8] Brown M T, Herendeen R A. Embodied energy analysis and emergy analysis: a comparative view[J]. *Ecological Economics*, 1996, 19: 219—235.
- [9] Hau J L, Bakshi B R. Promise and problems of emergy analysis[J]. *Ecological Modelling*, 2004, (178): 215—225.
- [10] Ulgiati S, Brown M T, Bastianoni N, et al. Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainable use of resources[J]. *Ecological Engineering*, 1995, (5): 510—531.
- [11] 赵 晟, 李自珍. 甘肃省生态经济系统的能值分析[J]. *西北植物学报*, 2004, 24(3): 464—470.  
Zhou Sheng, Li Zizhen. Study on emergy analysis of Gansu ecological-economic systems[J]. *Acta Bot Boreal—Occident Sin*, 2004, 24(3): 464—470. (in Chinese with English abstract)
- [12] Odum H T, Odum E C. *Ecology and Economy: Emergy Analysis and Public Policy in Texas*[M]. Texas: The Office of Natural Resource and Texas Department of Agriculture, 1987: 163—171.
- [13] 蓝盛芳, 钦 佩, 陆宏芳. 生态经济系统能值分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.  
Lan Shengfang, Qin Pei, Lu Hongfang. *Emergy analysis of ecological economy system*[M]. Beijing: chemical industrial press, 2002. (in Chinese)
- [14] Hau J L, Bakshi B R. Promise and problems of emergy analysis[J]. *Ecological Modeling*, 2004, (178): 215—225.
- [15] 席运官, 钦 佩. 稻鸭共作有机农业模式的能值评估[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(2): 237—242.  
Xi Yunguan, Qin Pei. Emergy value evaluation on rice-duck organic farming mode[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(2): 237—242. (in Chinese with English abstract)
- [16] Ulgiati S, Brown M T. Monitoring patterns of sustainability in natural and man-made ecosystems[J]. *Ecological Modeling*, 1998, 108: 23—36.
- [17] Martin J F, Diemont, Stewart AW, Powell E, et al. Emergy evaluation of the performance and sustainability of three agricultural systems with different scales and management[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, 115: 128—140.
- [18] 陆宏芳, 彭少麟, 蓝盛芳, 等. 基塘农业生态工程模式的能值评估[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(10): 1622—1626.  
Lu Hongfang, Peng Shaolin, Lan Shengfang, et al. Emergy value evaluation of dike-pond agro-ecological engineering modes[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(10): 1622—1626. (in Chinese with English abstract)
- [19] 陈 阜. 农业生态学教程[M]. 北京: 气象出版社, 1998: 159—161.  
Chen Fu. *Tutorial of agricultural ecology*. Beijing: Meteorological Press, 1998: 159—161. (in Chinese)
- [20] Odum H T. *Emergy: A Basis for public policy*[M]. New York: Draft Copy, Prepared for John Wiley and Sons, 1994.
- [21] 李成亮, 孔宏敏, 何园球. 施肥结构对旱地红壤有机质和物理性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(6): 116—119.  
Li Chengliang, Kong Hongmin, He Yuanqiu. Effect of fertilization structures on soil organic matter and physical properties of upland field in red soil area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*. (in Chinese with English abstract)
- [22] Ulgiati S, Odum H T, Bastianoni S. Emergy use, environment loading and sustainability—An emergy analysis of Italy[J]. *Ecological Modeling*, 1994, 73: 215—268.
- [23] Enrico S, Sergio U. Emergy and exergy analysis: complementary methods or irreducible ideological options?[J]. *Science Direct*, 2005, 30(10): 1953—1988.

## Energy analysis of agricultural eco-economic system before and after grain for green in typical watershed in loess hilly region of China

Zhou Ping<sup>1,2</sup>, Liu Guobin<sup>1\*</sup>, Hou Xilu<sup>1</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Based on energy theory and method, resource utilization, environmental pressure, variation of energy indexes and efficiency of agricultural eco-economic system were analyzed before and after “grain for green policy” from resource input and output in zhifanggou watershed in loess hilly region of China. The results showed that the total energy output of agricultural products of agricultural eco-economic system was  $7.53\text{E}+18$  sej before grain for green in watershed, and decreased  $1.50\text{E}+17$  sej after this policy. The production of agricultural products per unit area increased from  $5.38\text{E}+15$  sej/hm<sup>2</sup> to  $1.68\text{E}+16$  sej/hm<sup>2</sup> and energy output of animal products decreased. The dominance index of system production increased from 0.60 to 0.72, the stability index of system increased from 0.51 to 0.53, and the population carrying capacity was also increased after grain for green. However, energy investment ratio and environmental loading were nearly stable. Net energy yield ratio increased from 0.11 to 0.29, and energy per capita also change from  $5.16\times 10^{15}$  sej to  $5.41\times 10^{15}$  sej. Index of system sustainable development also increased from 2.55 to 6.69. After grain for green, the ratio of energy-monetary was  $2.21\times 10^{12}$  sej/ \$, which changed little as compared with before returning farmland. For sustainable and stable development of agricultural ecosystem in zhifanggou watershed, adjusting agricultural structure, optimizing the allocation of resource input, improving resource productivity and reducing the environmental loading were all needed in the next step. In this way, the agriculture of zhifanggou watershed could develop more sustainable and healthy.

**Key words:** agricultural eco-economic system, environmental engineering, ecological restoration, loess hilly region, grain for green policy, energy analysis