

关中“猪-沼-粮”循环农业的能值评价

孙 路, 田国成, 吴发启

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 应用能值分析法对临潼区的“猪-沼-粮”三位一体的循环农业、秸秆还田种植以及单一养殖进行能值流、能值的投入与产出以及能值指标进行横向对比分析, 结果表明: “猪-沼-粮”循环模式的能值自给率(ESR)为 0.005, 比单一生猪养殖业提高了 0.5%; 系统净能值产出率(EYR)分别增加了 10.84、5.43; 系统可持续发展性能指标(EISD)分别增加了 5.81、5.03; 环境负载率(ELR)分别降低了 10.76、0.97; 能值废弃率(EWR)比单一生猪养殖业降低了 8.63%, 该模式具有资源利用率高、低排放、环境压力小、系统可持续发展能力强等优点, 是生态经济效益最佳的生产模式, 适合在关中平原大力推广, 但仍需加大现代科技的投入和对系统的经济开发利用, 促进“猪-沼-粮”循环模式的进一步推广。

关键词: 猪-沼-粮; 循环农业; 生产模式; 关中平原; 能值评价

中图分类号: S181.4 **文献标志码:** A

Emergy evaluation of a Pig-Methane-Grain circular agricultural mode in Guanzhong Plain

SUN Lu, TIAN Guo-cheng, WU Fa-qi

(College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Based on the emergy analysis, characteristics of the emergy flow, the input and output of emergy, and e-emergy index were investigated in the “pig-methane-grain” circular agriculture, straw returning and single breeding. Horizontal comparison analysis showed that, the ESR of the mode of “pig-methane-grain” was increased by 0.5% compared with the single pig raising system, while the EYR was increased by 10.84 and 5.43, respectively. The EISD was increased by 5.81 and 5.03, respectively. The ELR was decreased by 10.76 and 0.97, respectively. The EWR was 8.63% less than that by the single pig raising. This was found to be the best production mode with optimal ecological economic benefit, low emission, small environment pressure and sustainable development. This mode was also found to be suitable for general extension in Guanzhong Plain and its vicinities. To promote economy development and advance the popularization of “pig-methane-grain” mode, modern technologies should be employed as well.

Keywords: Pig-Methane-Grain; circular agriculture; production mode; Guanzhong Plain; emergy analysis

20 世纪中后期以来, 人口增长, 环境污染和能源短缺等已成为困扰世界经济发展的重大难题。对此, 西方的一些科学家提出了以“循环经济”理论为指导的解决方式^[1-2]。“循环经济”是指在人、自然资源和科学技术的大系统内, 在资源投入、企业生产、产品消费及废弃的全过程中, 把传统的依赖资源消耗的线形增长的经济, 转变为依靠生态资源循环来发展的经济^[3]。显然, 当这一理论应用在农业生产中时, 可谓“循环农业”, 目前人们普遍认为“循环农业”是以生态经济原理为基础, 以“减量化、再循

环、再利用、可控化”为原则, 的现代农业生产模式^[4]。

关中平原是陕西省种植业和养殖业最为发达和集中的地区, 也是农作物秸秆与畜禽粪便等废弃物最多的地区。长期以来人们对秸秆的利用主要是作为生活燃料或作物收获后就地焚烧, 畜禽粪便则是就地堆腐后在播种时节施入农田, 但近年来, 为了简单、便捷, 人们已很少在农田中使用有机肥, 取而代之的是化肥。因此, 土壤肥力提升缓慢, 环境污染严重, 近十余年来, 随着国家沼气工程和秸秆机械化还

收稿日期: 2014-08-24

基金项目: “十二五”国家科技支撑项目(2012BAD14B11)

作者简介: 孙 路(1988—), 女, 陕西西安人, 在读硕士, 主要从事土地资源利用与管理研究。E-mail: 930845324@qq.com。

通信作者: 吴发启(1957—), 男, 陕西黄陵人, 博士生导师, 主要从事农业区域治理研究。E-mail: wufaqi@263.net。

田工程的大范围推广,对解决这些问题起到了积极的推动作用,随之而来形成了很多以户为单位的“循环农业”生产模式。“猪-沼-粮”作为关中平原大力推广的农业生产模式之一,以沼液、沼渣的利用为纽带,将养殖业与种植业组合在一起的废弃物资源利用最大化的循环生态系统,为此可视为循环农业的一种类型。那么,这一模式的优势是什么?能否在关中及相邻区域推广?本文在监测和调查的基础上,采用能值分析的方法,以秸秆还田种植、单一养殖模式作为对照,对“猪-沼-粮”循环模式能值的投入与产出、环境负载率等能值指标做以分析评价,试图回答以上问题。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省西安市临潼区东部的零口镇,该区面积 38.5 km²,其中耕地面积 32.29 km²,人口 3.6 万,是个农业大镇,属暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温 13.5℃,无霜期 219 d,年降雨量 591.8 mm。年日照时数 2 052.7 h,年总辐射量 4.7 × 10⁶ kJ·m⁻²·a⁻¹,土壤为瘠土。目前,零口镇有 300 多口沼气池,已初步形成全镇集中搞养殖的格局。本文所研究的“猪-沼-粮”、秸秆还田种植、单一养殖模式为全镇最常见的几种生产模式。

1.2 研究方法

1.2.1 样点选择 在研究区选取生产方式相同的 10 户“猪-沼-粮”循环模式、30 户秸秆还田种植模式、10 户单一养殖(猪)模式作为调查户,从 2012 年 6 月 13 日到 2013 年 6 月 8 日每月 1—3 日,定期逐户进行实地监测与调查。以户为单位整理三种生产模式各自的投入与产出数据。

1.2.2 监测与调查内容

1) 监测:监测是为了获得不同模式中各物质的实际投入与产出量数据。内容主要包括:化肥、农药、机械、电力等工业辅助能的投入量;种子、人工、有机肥、饲料等有机能投入量;粮食、生猪、沼渣、沼液等的产出量。

2) 调查:调查是在监测的基础上进一步完善。内容主要包括当地的气象及地理资料、人口数、畜禽数、各种建设费用、以及各种投入量的成分含量等。

1.2.3 能值分析方法 能值分析理论和方法是美国著名生态学家奥德姆(H. T. Odum)在 20 世纪 80 年代提出的,以能值为单位,把不同种类、不同单位、不同属性、不可比较的流动的或固定的能量或物质换算成同一标准的能值进行定量分析和比较研

究^[5-6],是以生态-经济为中心的评价方法^[7],能值单位为太阳能焦耳(Solar emjoules,缩写为 sej)^[6,8]。迄今为止,该理论方法在国内外已被广泛应用于农业、工业到产业园、城市复合体等各种产业系统类型,日益发展完善成为复合系统生态经济分析与评价的成熟方法^[9-15]。

1) 绘制系统能值图。

参考 H. T. Odum 的“能量系统语言”图例^[16],绘制三种生产模式的系统能值图(见图 1~图 3),其中循环模式能值投入项目包括:可更新自然资源 R(太阳能、雨水化学能、地球转动能等)、不可更新的自然资源 N(表土层净损失)、不可更新工业辅助能 F(机械、电力、化肥和农药等)以及可更新有机能 T(种子、仔猪和饲料、人工等)。系统能值反馈项目包括:沼渣、沼液、玉米籽粒及小麦秸秆、玉米籽粒。产出项目包括:生猪、沼气、玉米籽粒和小麦籽粒。由于反馈能值的投入成本均来自系统本身,故不属于投入能值,系统中产出的沼渣、沼液以及作物秸秆均被系统本身使用,故不属于能值产出。

2) 数据处理。

分类整理得到该研究的基础数据,通过参考骆世明^[17]及相关能流分析研究新成果中的能量折算系数,获得该研究的原始数据,借助蓝盛芳^[18]等研究成果中的太阳能值转换率(本文采用 9.26 × 10²⁴ sej·a⁻¹全球能值基准值)以及能值/货币比率计算出系统中各种投入、产出及反馈的能值。本研究的数据采用三种模式各自生产数据的平均值。

① 自然资源能值计算公式^[18]:

太阳光能能值 = 面积 × 太阳光平均辐射量 × 太阳能值转换率;

(1)

雨水化学能能值 = 面积 × 平均降雨量 × 吉布斯自由能 × 太阳能值转换率;

(2)

地球转动能能值 = 能值面积 × 热通量 × 太阳能值转换率;

(3)

风能能值 = 高度 × 密度 × 涡流扩散系数 × 风速梯度 × 面积 × 太阳能值转换率;

(4)

雨水势能能值 = 面积 × 平均海拔高度 × 平均降雨量 × 密度 × 重力加速度 × 太阳能值转换率;

(5)

表土层净损失能能值 = (面积 × 表土侵蚀速率 - 植被演替面积 × 表土形成速率) × 太阳能值转换率;

(6)

② 其他资源能值计算公式^[18]:

太阳能值 = 原始数据 × 太阳能值转换率

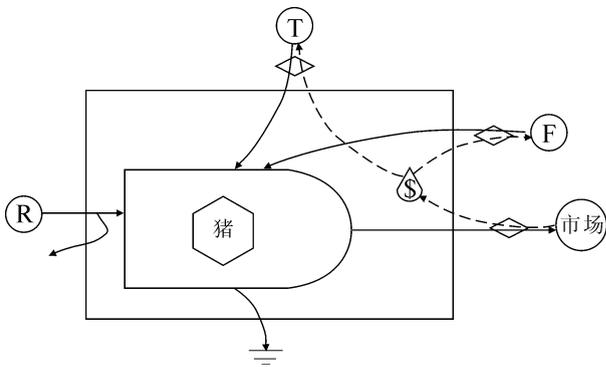
(7)

3) 能值指标计算。

根据三种模式能值投入与产出表,计算出评价

所需的主要能值指标,分析评价不同生产模式的经济和生态效益。

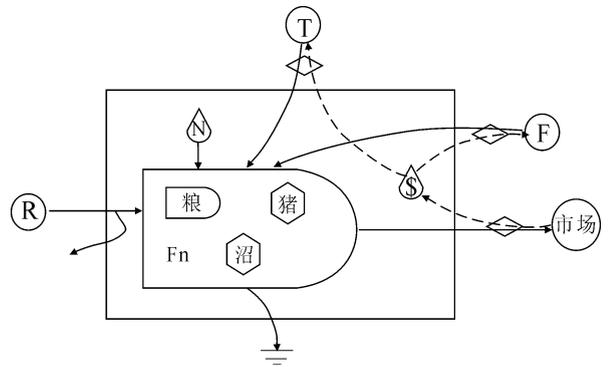
的废弃物能值就越多,对环境的破坏也就越大。该模式有较好的经济效益但环境的负荷很大。



R - 可更新自然资源 Renewable natural resources
T - 可更新有机能 Original energy
F - 不可更新工业辅助能 Nonrenewable natural resources
\$ - 货币 Currency

图 1 单一养殖(猪)模式系统能值图

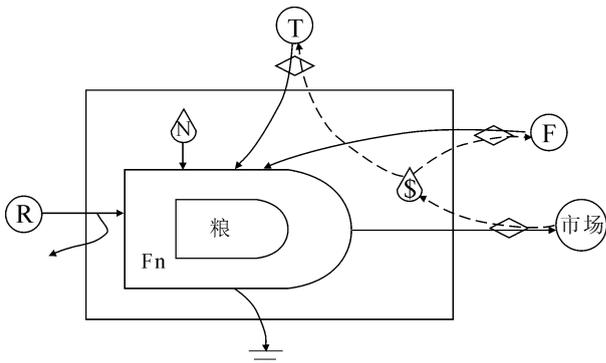
Fig.1 Energy analysis of the single pig breeding model



R - 可更新自然资源 Renewable natural resources
N - 不可更新自然资源 Nonrenewable natural resources
T - 可更新有机能 Original energy
F - 不可更新工业辅助能 Nonrenewable natural resources
Fn - 系统反馈能 Feedback energy
\$ - 货币 Currency

图 3 “猪-沼-粮”循环模式系统能值图

Fig.3 Energy analysis of the “Pig-Methane-Grain” circulation model



R - 可更新自然资源 Renewable natural resources
N - 不可更新自然资源 Nonrenewable natural resources
T - 可更新有机能 Original energy
F - 不可更新工业辅助能 Nonrenewable natural resources
Fn - 系统反馈能 Feedback energy
\$ - 货币 Currency

图 2 秸秆还田种植模式系统能值图

Fig.2 Energy analysis of the straw returning model

2 结果与分析

为实现文字精简,以下分析中将“猪-沼-粮”循环模式简称为循环模式,秸秆还田种植业模式简称为种植模式,单一养殖模式简称为单殖模式。

2.1 三种模式的能值流特征分析

单殖模式是传统的“资源-产品-污染物排放”的“单向单环式”线性农业^[19],由自然资源、有机能以及工业辅助能投入的能值供给仔猪的养殖,产出的生猪能值流入市场,排泄物就地堆腐,大量废弃物能值被浪费,生猪能值产生越多,消耗的资源和生产

种植模式是由农作物种植到秸秆再利用的种植业自身循环模式^[19]。由自然资源、有机能及工业辅助能投入的能值供农作物生产,籽粒通过出售将能值流入市场,秸秆通过粉碎还田将能值供给下一季农作物生长。其中农作物种植采用夏玉米(6月中旬播种,10月中旬收割)与冬小麦(10月中旬播种,翌年6月上旬收割)轮作模式。该模式无废弃物能值的浪费,物质能量的耗损率低,但由于化肥、农药能值的投入过量以及能值流经环节少,生态经济效益不佳。

循环模式由种植子系统、养殖子系统和沼气工程子系统组成,是以沼气工程子系统为核心,将养殖子系统所产生的的废弃物能值经过厌氧发酵转化成沼肥和沼气能值,这些能值又供种植子系统的生产,而种植子系统所产生的玉米能值又供养殖子系统的生产,实现了物质能量的多级循环利用。该模式能值的流转环节多,物质的能值被更充分的利用,具有较好的生态经济效益。

2.2 “猪-沼-粮”循环模式与单一养殖业模式投入产出比较分析

三种生产模式的能值投入与产出数据见表 1。对比循环模式,单殖模式中因猪圈面积相对很小,故单殖模式能值投入中的自然资源能忽略不计,即单殖模式中自然资源能投入为 0,而循环模式中有 $6.22 \times 10^{10} \text{ sej} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的自然资源能投入,占能值总投入的 0.5%,即循环模式对无偿的自然资源利

用率较高;单殖模式中不可更新工业辅助能和可更新有机能分别占系统能值投入的 53% 和 47%,循环模式中不可更新工业辅助能和可更新有机能分别占系统能值投入的 14.5% 和 85%,这是由于循环模式中增加了种植业和沼气工程,导致表现出与单殖模式中截然相反的结构特征,两种模式中的可更新有机能明显比例差异表明循环模式更有利于系统的物质循环和自我维持。除此之外,循环模式中各个子系统之间相互供给,系统有 $1.54 \times 10^{12} \text{ sej} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的反馈能值。

循环模式系统的产出能值为 $1.43 \times 10^{14} \text{ sej} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,其中生猪子系统的能值产出占总产出的

93.9%,种植业子系统能值产出占 0.55%,沼气工程能值产出占 5.6%,可见该循环模式是以养殖业为主,种植业和沼气工程为辅;单殖模式的产出能值为 $9.75 \times 10^{11} \text{ sej} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,其中生猪的产出占总产出的 98.7%,废弃物占 1.3%。对比分析可知,循环模式产出中养殖子系统所占比例虽比单殖中的低,却无废弃物产出,这是因为循环模式产出中还包括种植业与沼气工程,产生的废弃物都被系统内部转化并吸收。相同的养殖规模下,循环模式对生态环境的破坏极小,而单殖模式每年则要向自然环境中排放 $5.8 \times 10^{12} \text{ sej} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的废弃物,极大的污染了农村的生态环境。

表 1 三种农业模式能值的投入与产出

Table 1 Energy input and output of three Agricultural modes

项目 Item	太阳能值 转换率 ^[20-26] Transformity /(sej·unit ⁻¹)	猪-沼-粮 Pig-Methane-Grain		粮 Grain		猪 Pig	
		原始数据 Original data /(unit·a ⁻¹)	太阳能值 Solar energy /(sej·a ⁻¹)	原始数据 Original data /(unit·a ⁻¹)	太阳能值 Solar energy /(sej·a ⁻¹)	原始数据 Original data /(unit·a ⁻¹)	太阳能值 Solar energy /(sej·a ⁻¹)
可更新自然资源 Renewable natural resources							
太阳能 Solar energy	1.00	1.27×10^{13}	1.27×10^{13}	3.13×10^{12}	3.13×10^{12}	1.18×10^{11}	1.18×10^{11}
雨水化学能 Rainfall chemical energy	1.81×10^4	7.87×10^9	1.42×10^{14}	1.90×10^9	3.44×10^{13}		
地球转动能 Earth rotation energy	3.37×10^4	2.69×10^9	9.07×10^{13}	6.60×10^8	2.22×10^{13}		
雨水势能 Rainfall potential energy	1.03×10^4	6.40×10^9	6.60×10^{13}	1.60×10^9	1.65×10^{13}		
小计 Total			1.42×10^{14}		3.44×10^{13}		1.18×10^{11}
不可更新自然资源 Nonrenewable natural resources							
表土层净损失 Top soil los	7.26×10^4	3.43×10^8	2.49×10^{13}	8.51×10^7	6.18×10^{12}		
小计 Total			2.49×10^{13}		6.18×10^{12}		
不可更新工业辅助能 Nonrenewable natural resources							
氮肥(N) Nitrogen fertilizer	6.26×10^9	1.48×10^5	9.26×10^{14}	6.10×10^4	3.82×10^{14}		
磷肥(P ₂ O ₅) Phosphate fertilizer	6.43×10^9	3.99×10^3	2.57×10^{14}	1.50×10^4	9.65×10^{13}		
钾肥(K ₂ O) Potash fertilizer	1.81×10^9	8.78×10^3	1.59×10^{13}	1.50×10^4	2.72×10^{13}		
农药(纯) Pesticides	8.66×10^9	1.58	1.37×10^{13}	3.50×10^2	3.03×10^{12}		
农田机械 Agricultural machine	7.50×10^7	1.50×10^5	1.13×10^{13}	3.75×10^4	2.81×10^{12}		
柴油 Diesel	6.60×10^4	1.20×10^9	7.96×10^{12}	3.63×10^7	2.40×10^{12}		
电力 Electricity	1.70×10^5	7.20×10^7	1.22×10^{13}			7.20×10^7	1.14×10^{13}
水 Water	5.01×10^4	8.20×10^9	4.11×10^{14}	1.66×10^9	8.33×10^{13}	1.78×10^9	8.93×10^{13}
煤(养猪煮食) Coal	1.29×10^6					2.20×10^{10}	2.84×10^{16}
防疫费 Epidemic prevention fee	6.46×10^{12}	47.43	3.06×10^{14}			47.43	3.06×10^{14}
沼气池建设费 Methane tank construct fee	6.46×10^{12}	94.86	6.13×10^{14}				
猪圈建设费 Sty construct fee	6.46×10^{12}	237.15	1.53×10^{15}			237.15	1.53×10^{15}
政府补贴 Government subsidies	6.46×10^{12}	94.86	6.13×10^{14}				
小计 Total			4.72×10^{15}		5.97×10^{14}		3.03×10^{16}

续表 1

项目 Item	太阳能值 转换率 ^[20-26] Transformity /($\text{sej} \cdot \text{unit}^{-1}$)	猪-沼-粮 Pig-Methane-Grain		粮 Grain		猪 Pig	
		原始数据 Original data /($\text{unit} \cdot \text{a}^{-1}$)	太阳能值 Solar emery /($\text{sej} \cdot \text{a}^{-1}$)	原始数据 Original data /($\text{unit} \cdot \text{a}^{-1}$)	太阳能值 Solar emery /($\text{sej} \cdot \text{a}^{-1}$)	原始数据 Original data /($\text{unit} \cdot \text{a}^{-1}$)	太阳能值 Solar emery /($\text{sej} \cdot \text{a}^{-1}$)
		可更新有机能 Original energy					
小麦种子 Wheat seed	6.80×10^4	9.42×10^8	6.39×10^{13}	2.36×10^8	1.60×10^{13}		
玉米种子 Maize seed	6.30×10^4	1.98×10^8	1.24×10^{13}	5.78×10^7	3.64×10^{12}		
人工 Labor	3.80×10^4	5.51×10^8	2.09×10^{14}	3.00×10^6	1.14×10^{12}	5.48×10^8	2.08×10^{14}
仔猪 Pigs	1.73×10^6	1.13×10^{10}	1.96×10^{16}			1.13×10^{10}	1.96×10^{16}
玉米粒 Maize	2.70×10^4	1.38×10^{11}	3.73×10^{15}			1.38×10^{11}	2.86×10^{15}
精饲料 Feed grain	6.80×10^4	4.23×10^{10}	2.95×10^{15}			4.34×10^{10}	2.95×10^{15}
小麦麸 Wheat bran	2.70×10^4	4.47×10^{10}	1.21×10^{15}			4.47×10^{10}	9.25×10^{14}
人粪尿 Human excreta	2.70×10^4	1.51×10^9	4.08×10^{10}				
小计 Total			2.77×10^{16}		2.08×10^{13}		2.65×10^{16}
系统反馈能值 Feedback energy							
沼液 Biogas slurry	2.70×10^4	6.16×10^8	1.66×10^{13}				
沼渣 Biogas residue	2.70×10^4	1.43×10^9	3.86×10^{13}				
小麦秸秆 Wheat straw	3.90×10^4	3.02×10^{10}	1.18×10^{15}	6.34×10^9	2.36×10^{14}		
玉米秸秆 Maize straw	3.90×10^4	4.48×10^{10}	1.75×10^{15}	8.62×10^9	3.36×10^{14}		
玉米籽粒 Maize	2.70×10^4	4.29×10^{10}	1.16×10^{15}				
小计 Total			4.14×10^{15}		5.72×10^{14}		
总投入 Total energy input							
小麦籽粒 Wheat	6.80×10^4	3.14×10^{10}	2.14×10^{15}	6.59×10^9	4.27×10^{14}		5.68×10^{16}
玉米籽粒 Maize	2.70×10^4			8.25×10^9	2.23×10^{14}		
生猪 Pigs	1.71×10^6	2.12×10^{11}	3.62×10^{17}			2.12×10^{11}	3.62×10^{17}
沼气 Methane	4.25×10^5	5.04×10^{10}	2.14×10^{16}				
猪粪 Pig manure	2.70×10^4					7.48×10^{10}	2.02×10^{15}
猪尿 Pig urine	2.70×10^4					1.08×10^{11}	2.93×10^{15}
总产出 Total emery output			3.86×10^{17}		6.50×10^{14}		3.67×10^{17}

注:表中的几种可更新自然资源是在相同的气候、地球物理作用引起的不同现象,仅取数值最大值,以避免能值的重复计算;原始数据中除氮肥、磷肥、钾肥和农药的单位为 $\text{g} \cdot \text{a}^{-1}$,防疫费、沼气池建设费、猪圈建设费及政府补贴单位为 $\$$ 外,其余单位均为 $\text{j} \cdot \text{a}^{-1}$;2007 年陕西省能值货币比率 $6.46 \times 10^{12} \text{ sej} \cdot \$^{-1}$ [27]。

Note: In table 1, several renewable natural resources resulted from different phenomenon that were caused by same climatic, physical geography effects. In order to avoid repeated calculations, we only selected the maximal numbers. The unit of the original data was $\text{j} \cdot \text{a}^{-1}$, except for the $\text{g} \cdot \text{a}^{-1}$ unit of the nitrogen fertilizer, phosphate fertilizer, potash fertilizer and pesticides, the $\$$ unit of epidemic prevention fee, methane tank construction fee, sty construction fee and government subsidies. In 2007, the emery currency ratio of Shaanxi province was $6.46 \times 10^{12} \text{ sej} \cdot \$^{-1}$.

2.3 “猪-沼-粮”循环模式与秸秆还田种植业模式投入产出比较分析

种植模式总投入中自然资源、不可更新工业辅助能、可更新有机能分别占 6.2%、90.7%、3.1%。不可更新工业辅助能中氮肥、磷肥、钾肥、农药、机械及柴油、灌溉水分别占 64%、16.2%、4.5%、0.5%、0.9%、14%,表明种植模式中化肥与农药的投入为主;可更新有机能投入中人工投入占 5.5%,说明关中地区的种植模式人力投入少,农业的机械化程度较高。

循环模式种植业子系统总投入中,不可更新工

业辅助能中氮肥、磷肥、钾肥、农药、机械及柴油、灌溉水分别占 55.4%、15.4%、0.95%、0.81%、1.15%、26.29%,可更新有机能中人工投入占 7%,对比种植模式可知,循环模式中化肥的投入比例少 5.26%,但人工投入多 1.5%,这是因为沼肥的施用代替了部分化肥,从而降低了化肥投入增加了人工投入。

循环模式的种植子系统、种植模式能值产出分别为 $1.3 \times 10^{12} \text{ sej} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $9.7 \times 10^{11} \text{ sej} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,前者比后者多产出 $3.3 \times 10^{11} \text{ sej} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,综上所述,循环模式的种植业子系统比种植模式投入少,产

出高。

由表 1 可知,循环模式的产投比为 11.8,单殖模式为 6.48,种植模式为 0.99,说明循环模式的生态经济效益最高。

2.4 三种模式能值指标对比分析

通过系统能值分析,选取适合本研究的能值综合评价指标体系,体系由反映对环境贡献能力的生态效益指标(环境负载率 ELR、能值废弃率 EWR、能值反馈率 EFR)、对经济贡献能力的经济效益指标(能值自给率 ESR、能值投资率 EIR、净能值产出率 EYR)以及可反映生态经济综合效益指标(系统可持续发展性指标 EISD)共 7 个指标组成,见表 2。

1) 能值自给率(Energy self-sufficiency ratio):环境资源能值投入(包括可更新资源和不可更新资源能值投入)与输入总能值之比,用来描述资源环境对系统的贡献程度。循环模式的能值自给率比单殖模式高 0.005,比种植模式低 0.057,说明循环模式中无偿的资源环境利用率较高,即循环模式的自给自足能力较强,而单殖模式的最弱。

2) 净能值产出率(Energy yield ratio):系统产出能值与经济输入能值之比,是衡量系统生产效率的一种标准。循环模式、种植模式、单殖模式的净能值产出率分别为 11.888、1.052 和 6.463,说明循环模式的生产效率最高,种植模式的生产效率最低,在同样的条件下,循环模式的产品在市场上更具有竞争力。

3) 能值投资率(Energy investment ratio):辅助(购买)能值与环境无偿资源能值的比率,是衡量经济发展程度和环境负载程度的指标。由表 2 知,种植模式能值投资率最低,说明常种模式经济发展程度最低,对环境的依赖最强;单殖模式远高于其它模式,说明其经济发展程度最高,但另一方面也表明,经济投入过大,其生产的生猪市场竞争力弱;循环模式的能值投资率高于种植模式,但远低于单殖模式,说明其经济发展程度较高,对环境的依赖程度适中,较小的经济投入,使其生产的生猪市场竞争力强。

4) 环境负载率(Environmental loading ratio):系统中不可更新能值投入与可更新能值投入总量之比。由表 2 知,种植模式的环境负载率最高为 10.931,其次是单殖模式为 1.144,最后是循环模式为 0.170,说明循环模式生产过程中对环境的破坏最小,表现出显著的生态效益;但环境负载率值越低,另一方面又表明系统的科技发展水平不高,该循环模式的 ELR 指数 0.170,远低于 2000 我国农业系统(2.8)^[18],说明循环模式的科技发展水平还有待

大幅度提高。

5) 能值反馈率(Energy Feedback ratio):系统自身反馈能值与购买能值的比率,是衡量系统自组织能力的指标。循环模式和种植模式的能值反馈率均比单殖模式高,说明循环模式和种植模式系统的自组织能力强,而单殖模式的无自组织能力。

6) 能值废弃率(Energy waste ratio):系统废弃物能值与系统总能值投入之比,用于反映系统废弃物给当地带来的环境压力。由表 1 知,在不进行任何利用的条件下,单殖模式一年中将产生 4.9×10^{15} sej 的猪粪尿,占系统总投入能值的 8.63%(表 2),而循环模式通过增加的沼气工程将产生的猪粪尿全部发酵,进行重复改造利用,显著降低了对环境的污染。

表 2 三种模式的能值指标

Table 2 Energy indexes of three modes

能值指标 Energy index	表达式 Expression	不同模式 Different pattern		
		猪-沼-粮 Pig-Methane-Grain	粮 Grain	猪 Pig
能值自给率 ESR	$(R+N)/I$	0.005	0.062	0.000
净能值产出率 EYR	$Y/(F+T)$	11.888	1.052	6.463
能值投资率 EIR	$(F+T)/(R+N)$	193.931	15.229483676	287
环境负载率 ELR	$(F+N)/(R+T)$	0.170	10.931	1.144
能值反馈率 EFR	$F_n/(F+T)$	0.128	0.925	0.000
系统可持续发展性能 EISD	$EYR * EER/ELR$	5.909	0.098	0.874
能值废弃率 EWR	W/I	0.000	0.000	0.086

注:R-可更新自然资源;N-不可更新自然资源;T-可更新有机能;FN-系统反馈能值;I-总投入能值;Y-总产出能值;W-系统废弃物能值;EER-能值交换率,是系统输入能值与输出能值之比。

Note: R, renewable natural resources; N, non renewable natural resources; T, organic energy; F_n , feedback energy; I, total emergy input; Y, total emergy output; W, waste energy; EER, the rate of energy exchange, is the ratio of total input energy to total energy output.

7) 系统可持续发展性能(Emergy index for sustainable development):系统的净能值产出率与能值交换率的乘积与环境负载率的比值。这是采用路宏芳等^[28]提出的可同时兼顾社会效益与生态环境压力的系统可持续发展性能的复合评价新能值指标,值越高,意味着单位环境压力下的社会经济效益越高,系统的可持续发展性能越好。由表 2 知,循环模式系统的可持续发展性能的能值指数为 5.909,比单种、单殖模式分别高 5.811、5.034,这是因为循环模式充分利用了猪粪尿废弃资源,通过沼气工程,形成一个产气产肥,物质循环利用的产业链,降低了

系统对外界环境的压力,提高了系统的可持续发展能力。

综上所述:三种模式系统内部的经济发展程度,单殖模式最高、循环模式次之、种植模式最低,但就经济生产效率来说,循环模式最高、单殖模式次之、种植模式最低;循环模式对环境的压力最弱、单殖模式次之、种植模式最低;系统自身的自组织能力种植模式最强、循环模式次之、单殖模式最弱,说明循环模式的生态经济综合效益最佳。

3 结 论

分别以秸秆还田种植模式和单一养殖模式作为参照,应用能值理论对比分析了关中临潼区农户型“猪-沼-粮”循环模式的能值流特征、能值的投入与产出特征,以及生态经济效益综合特征,结果表明:

1) “猪-沼-粮”循环模式由三个子系统组成,能值流环节多,更有利于系统物质的循环和自我维持,能值产投比 11.8,比单一养殖和秸秆还田种植模式分别高 5.32、10.81。

2) “猪-沼-粮”循环模式的净能值产出率最高,分别增加了 10.84、5.43;环境负载率最低,分别降低了 10.76、0.97;能值废弃率最低,降低了 8.63%;系统可持续发展性能最高,分别增加了 5.81、5.03,说明该模式具有资源利用率高、低排放、环境压力小、系统可持续发展能力强等优势,生态经济综合效益最佳,可将农村地区生活方式由资源浪费型转变为清洁节约型,因此在关中平原地区应大力推广应用。

3) “猪-沼-粮”循环模式能值自给率为 0.005、能值投资率为 193.931、能值反馈率为 0.128,数值结果居中,说明该模式还有很大的优化空间,仍需加大现代科技的投入、以现代机械代替人工投入,进一步提高系统的生产效率及加大对系统的经济开发利用。

参 考 文 献:

- [1] 王圣宏. 国内外循环农业研究与发展比较分析[J]. 环境保护与循环经, 2010, 30(11): 15-17.
- [2] 唐建荣. 生态经济学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [3] 周 兵, 黄志亮. 论国外循环经济理论与实践[J]. 经济纵横, 2006, (4): 40-43.
- [4] 高旺盛, 陈源泉, 梁 龙. 论发展循环农业的基本原理与技术体系[J]. 农业现代化研究, 2007, 28(6): 731-734.
- [5] 徐国伟, 黄淑玲, 袁新田, 等. 我国农业生态系统的能值分析研究[J]. 赤峰学院学报, 2011, (4): 162-165.
- [6] Odum H T. Environmental Accounting: Emery and Environmental Decision Making[M]. New York: John Wiley and Sons, 1995.
- [7] 魏胜文, 陈先江, 张 岩, 等. 能值方法与存在问题分析[J]. 草业学报, 2011, 20(2): 270-277.
- [8] 张耀辉. 农业生态系统能值分析方法[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(3): 181-183.
- [9] 隋春花, 陆宏芳, 郑凤英. 基于能值分析的广东省生态经济系统综合研究[J]. 应用生态学报, 2006, 17(11): 2147-2152.
- [10] Ulgiati S, Odum H T. Emery Analysis of Italian Agricultural System the Role Energy Quality and Environmental Inputs[C]//Milan, Italy Elsevier, Amsterdam. Ecological Physical Chemistry Proceedings of 2nd International Workshop, 1992: 187-215.
- [11] Ulgiati S, Odum H T. Emery use, environmental loading and sustainability an energy analysis of italy[J]. Ecological Modeling, 1994, 73: 215-268.
- [12] Brown M T, Herendeen R A. Embodied energy analysis and emery analysis: a comparative view[J]. Ecological Economics, 1996, 19: 219-235.
- [13] 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.
- [14] 李海涛, 廖迎春, 严茂超, 等. 新疆生态经济系统的能值分析及其可持续性评估[J]. 地理学报, 2003, 58(5): 765-772.
- [15] 熊 凯, 杨钢桥, 蔡银莺. 基于能值理论的武汉市农田生态系统能值分析[J]. 农业现代化研究, 2010, 31(6): 738-741.
- [16] Odum H T. Systems Ecology[M]. New York: John Wiley & Sons, 1983.
- [17] 骆世明. 农业生态学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.
- [18] 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.
- [19] 赵金龙, 何 玲, 王 军. 谈循环农业的模式及其评价方法[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(6): 1766-1767.
- [20] 杨卓翔, 高 阳, 赵志强, 等. 基于能值分析的深圳市三个小型农业生态经济系统研究[J]. 生态学报, 2012, 32(11): 3635-3644.
- [21] 李 渝, 蒋大明, 陶宇航. 猪-沼-粮、菜(果)循环农业模式能值分析[J]. 贵州农业科学, 2011, 39(1): 148-151.
- [22] 蒋 碧, 李 明, 吴喜慧, 等. 关中平原农田生态系统不同秸秆还田模式的能值分析[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(6): 178-184.
- [23] 张 鑫. “四位一体”农业生态系统能流与能值分析[D]. 沈阳: 沈阳农业大学农学院, 2007.
- [24] 王红红, 吴发启, 李荣标. 黄土高原沟壑区农户果业生态系统的能值分析[J]. 西北农林科技大学学报, 2008, 36(7): 64-70.
- [25] Wu Xihui, Wu Faqi, Tong Xiaogang, et al. Emery-based sustainability assessment of an integrated production system of cattle, biogas, and greenhouse vegetables: Insight into the comprehensive utilization of wastes on a largescale farm in Northwest China[J]. Ecological Engineering, 2013, 61(partA), 335-344.
- [26] 陈绍晴, 陈 彬, 宋 丹. 沼气农业复合生态系统能值分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(4): 80-89.
- [27] 吴姝冬, 肖 玲, 马娟霞, 等. 陕西生态经济系统发展水平的能值分析[J]. 华中师范大学学报, 2009, 43(4): 683-687.
- [28] 陆宏芳, 蓝盛芳, 李 雷, 等. 评价系统可持续发展能力的能值指标[J]. 中国环境科学, 2002, 22(4): 380-384.