

DOI: 10.5846/stxb201501180147

刘振, 刘玲, 张淑敏, 孙涛, 宁堂原, 李传荣, 李增嘉. 秸秆利用循环模式的能值效率和持续发展能力. 生态学报, 2016, 36(15): - .

Liu Z, Liu L, Zhang S M, Sun T, Ning T Y, Li C R, Li Z J. Comparison of emergy efficiency and sustainable development capability between different agricultural circulation modes with straw utilization. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(15): - .

秸秆利用循环模式的能值效率和持续发展能力

刘 振¹, 刘 玲², 张淑敏², 孙 涛², 宁堂原^{2,*}, 李传荣¹, 李增嘉²

1 山东农业大学林学院, 泰安 271018

2 作物生物学国家重点实验室, 土壤资源高效利用国家工程实验室, 山东农业大学农学院, 泰安 271018

摘要:本研究用能值法分析了不同农业循环模式的能值效率和可持续发展能力,以期找到适合本地区发展的农业循环模式。以小麦玉米两熟农田、奶牛饲养系统和沼气发酵系统为研究对象,以常规施肥为对照模式(CK),设置玉米秸秆粉碎还田的农田循环模式、沼液还田的农沼循环模式和有机肥还田的农牧循环模式 3 种循环模式,用能值方法比较 4 种循环系统的能值效率和可持续发展能力。结果表明,4 种模式的净能值产出率(EYR)都大于 1,农田、农沼和农牧循环模式的 EYR 分别是对照模式的 1.13 倍、54.22% 和 50.2%,农田、农沼和农牧循环模式的能值投资率(EIR)分别是对照模式的 80.88%、4.25 倍和 5.85 倍,农田、农沼和农牧循环模式的环境负载率(ELR)分别是对照模式的 78.95%、3.71 倍和 1.76 倍,农田循环模式对环境的压力最小,农沼循环模式对环境的压力较大,4 种模式的 ELR 都在可接受范围内。农牧循环模式的产品安全性指标(EIPS)为 -0.015,最接近于 0,其产品安全性最高,而对照模式的产品存在一定的安全隐患。种植模式中农田循环模式可持续发展能力优于对照模式,复合循环模式中农牧循环模式要优于农沼循环模式。综上所述,农牧循环模式的发展潜力最大,是最适合本地区的秸秆利用循环模式。

关键词:循环模式;能值;环境负载率;可持续发展能力

Comparison of emergy efficiency and sustainable development capability between different agricultural circulation modes with straw utilization

LIU Zhen¹, LIU Ling², ZHANG Shumin², SUN Tao², NING Tangyuan^{2,*}, LI Chuanrong¹, LI Zengjia²

1 School of Forestry of Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

2 State Laboratory of Crop Biology, Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, College of Agronomic Sciences of Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

Abstract: Using emergy evaluation method, this paper compared the emergy efficiency and sustainable development capability of the different circular agriculture modes in North China. The emergy evaluation on four modes were conducted, which including wheat-maize cropping system with conventional fertilization (control), cropping system with crushed straw (farmland circulation mode), cropping-feeding (dairy cattle) system with dung used as fertilizer (farmland-livestock mode), and cropping-feeding-biogas system with biogas slurry used as fertilizer (farmland-biogas slurry mode). The results showed that the emergy yield ratios (EYR) of the 4 modes were higher than 1, the emergy yield ratios (EYR) of the farmland circulation mode, farmland-biogas slurry circulation mode, and farmland-livestock circulation mode, which were respectively 1.13 times, 54.22%, and 50.2% as much as those of control mode, whereas emergy investment ratios of the farmland circulation mode, farmland-biogas slurry circulation mode, and farmland-livestock circulation mode were respectively 80.88%, 4.25 and 5.85 times as much as those of control mode. The environmental loading ratios (ELR) of the

基金项目:“十二五”国家科技支撑项目(2012BAD14B07)

收稿日期:2015-01-18; 网络出版日期:2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ningty@163.com

farmland circulation mode, farmland-biogas slurry circulation mode, and farmland-livestock circulation mode were respectively 78.95%, 3.71 and 1.76 times as much as those of control mode. The environmental pressure of farmland circulation mode was the lowest, the farmland-biogas slurry circulation mode was the highest. But the ELRs of 4 modes were acceptable. The emergy index of product safety of the farmland-livestock circulation mode were -0.015 , its safety was the highest, the products of the control mode had some safety loophole. The farmland circulation mode had the strongest sustainable potential in 2 planting modes, the farmland-livestock circulation mode had the strongest sustainable potential in 2 comprehensive circulation modes. In conclusion, farmland-livestock mode has the strongest sustainable potential and is an ideal circular agriculture mode, which should be popularized in the region.

Key Words: circular agriculture; emergy; environmental load ratio; sustainable development capability

循环农业是相对于传统农业提出的一种新的发展模式,它的目标是追求资源低消耗、污染物低排放、资源利用高效率。用循环农业的理念指导农业生产,可从根本上转变农村发展方式,提高农业综合生产能力和农产品质量安全,保障农业和农民增收^[1]。作物秸秆是中国发展农业循环经济的重要物质基础,其综合利用符合新的能源产业政策^[2],是重要的可再生资源,近年来受到广泛关注^[3]。在循环农业理论指导下探讨秸秆的资源化利用策略与途径,能促进农田生态系统的良性循环^[4],围绕农田生态系统,秸秆肥料化利用模式的研究主要集中在秸秆还田耕作管理方式^[5-6]等方面。目前秸秆利用的成熟技术和方法较多,如秸秆能源利用技术、秸秆肥料利用技术、秸秆饲料利用技术以及秸秆工业原料利用技术等,其中秸秆饲料化技术在“种-养”产业链上的综合利用,通过技术革新与理念突破,构建秸秆循环利用的模式^[7-8],即农牧循环模式;还有学者研究了秸秆能源化利用的秸秆发酵产沼气关键技术和沼渣沼液综合利用技术^[9-10],即农沼循环模式。早在上世纪 20 年代,沼气利用模式已在全球范围内不断得到理论上的探讨和实践应用^[11-12],Zhou 等^[13]则以农业中沼气工程应用为对象进行能值分析,指出农业沼气工程相对于其他典型的农业生产系统而言具有较小的环境压力以及更强的可持续发展能力。Chen 等^[14]证明沼气生产过中程清洁能源机制与其他生物质能源利用模式相比更能够减少碳排放,市场竞争力更强。但是目前还没有形成大规模高效的循环利用模式和技术体系,因此亟需研究农田秸秆资源的循环利用及加环增值技术,延伸农田种植业的产业链,如果这种状况不能得到及时的改变,势必会严重制约农业的可持续发展。要解决这些问题,就要运用科学合理的定量分析方法进行分析评价,目前的研究方法主要是生命周期评价法、物质流分析法、模糊综合评价法、灰色关联度法、数据包络分析法等,这些方法都是建立在基于货币流的价值分析基础上,没有考虑系统环境资源的功能,当系统中的产品价格体系不完善时,不能对不同区域间或不同产品间的经济效益进行合理的比较评价,能值分析方法正好能弥补这些缺陷,也可以克服以往系统优化中各种资源评价指标不统一这一缺陷,而且具有严密的热力学和系统生态学科学理论基础和理论体系,综合性更强^[15-17]。因此本研究拟采用能值分析方法来探讨不同秸秆利用方式下的农田、农沼和农牧 3 种循环模式的能值效率和可持续发展能力,以期为华北地区农业循环模式的发展提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本研究选择山东省德州市平原县胡庄村为试验点,试验时间为 2012—2014 年。该试验点位于东经 $116^{\circ}26'$ 、北纬 $37^{\circ}09'$,地处黄淮海平原,属东亚暖温带亚湿润大陆性季风气候。年均气温 $12.1\text{—}13.1^{\circ}\text{C}$,年均降水量 $578.2\text{—}623.3\text{ mm}$,是典型的黄河冲积平原。采用冬小麦夏玉米一年两熟种植制度,耕层土壤类型为轻盐化草甸土,含有机质 2.58%、全氮 0.138%、碱解氮肥 77.5 mg/kg 、速效磷 26.9 mg/kg 、速效钾 145.2 mg/kg ,pH 为 7.7。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计

选择当地小麦-玉米一年两熟标准农田, 4 个小区, 3 次重复, 完全随机区组设计, 小区面积 980 m²。按照同等施氮量原则, 在小麦(济麦 22)季, 以常规施肥为对照(CK), 设置玉米秸秆粉碎直接还田的农田循环模式、玉米秸秆发酵后残留的沼液还田的农沼循环模式和玉米秸秆过腹之后有机肥(牛粪)还田的农牧循环模式 3 种循环农业模式。

4 种循环模式的能量流动如图 1—图 4 所示。

(1) 对照模式: 玉米收获后, 玉米秸秆全部运出, 然后进行常规施肥, 将化肥均匀撒施于试验小区中, 能量流动如图 1 所示;

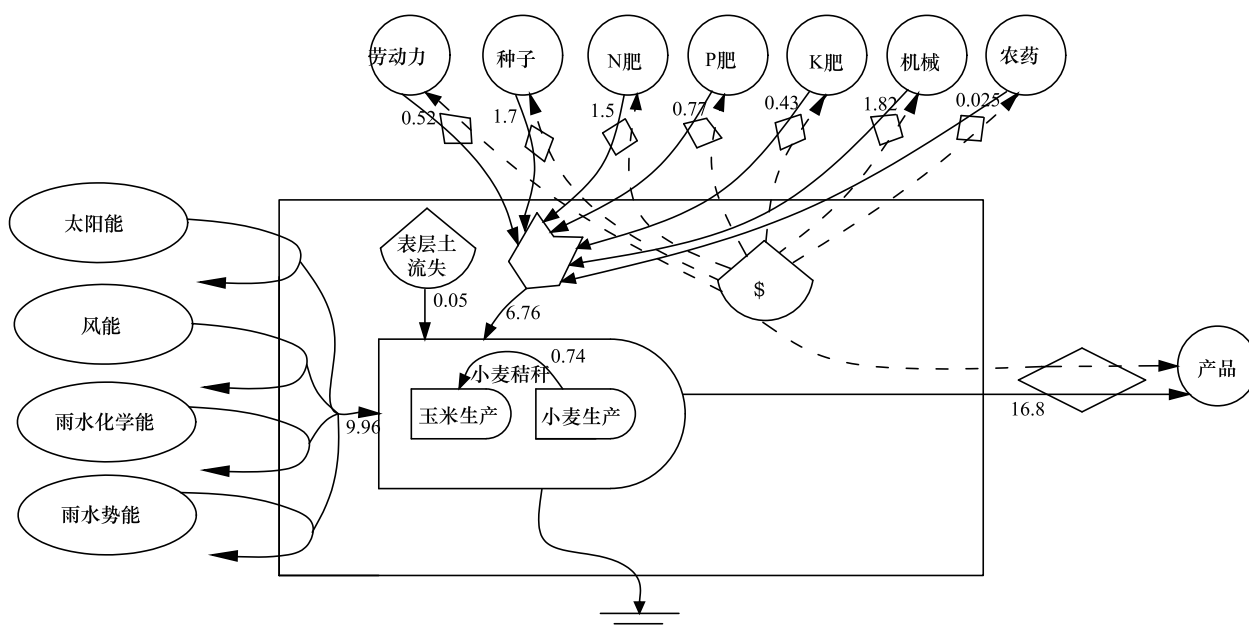


图 1 对照模式能量图解

Fig.1 Diagram of energy flow in control mode

本图中数据单位为 10¹⁴ Sej/a

(2) 农田循环模式: 播种前翻地, 深度为 20 cm, 将收获的玉米秸秆粉碎 3 cm 左右, 均匀撒施于试验小区中, 能量流动如图 2 所示;

(3) 农沼循环模式: 玉米收获后, 将试验小区中的玉米秸秆全部运至沼气池进行厌氧发酵, 往沼气池内投入菌种、尿素等, 产出的沼气作为能源用于居民做饭、照明、取暖等日常生活, 剩余的残渣进入到试验小区中, 形成农田-沼液循环系统, 能量流动如图 3 所示;

(4) 农牧循环模式: 玉米收获后, 将试验小区中的玉米秸秆运送至牛场青贮处理做成青贮饲料, 20 天之后, 在牛场中选择年龄、品种、体型、健康状况一致的奶牛 20 头, 每天每头奶牛饲喂 20kg 青贮饲料, 产出的牛奶出售, 牛粪等废弃物重新回到该试验小区中, 形成玉米秸秆过腹还田的农田-畜牧循环系统, 能量流动如图 4 所示。

4 种循环模式在玉米季(郑单 958), 小麦秸秆均全部还田, 全年施肥量如表 1 所示。

1.2.2 能值分析

Odum^[18] 给出了系统能值计算必须遵循的 4 条规则: (1) 对于稳态系统, 输入的能值将全部分配给输出的产品; (2) 对于多产品系统, 每个产品能值输出都等于输入的能值之和; (3) 当系统中一个路径分叉时, 输入的能值分配给每条路径的能值由该路径的能量或质量分率决定, 而每条路径所具有的能值转换率不变; (4) 在

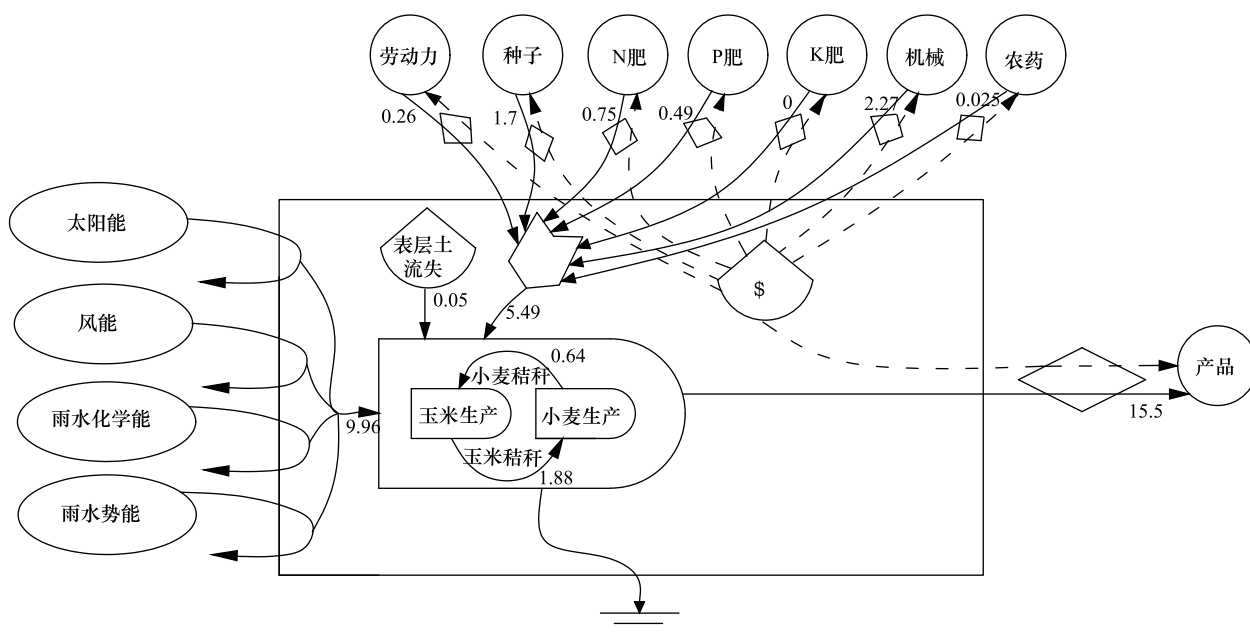


图2 农田循环模式能量系统图解

Fig.2 Diagram of energy flow in farmland circulation mode

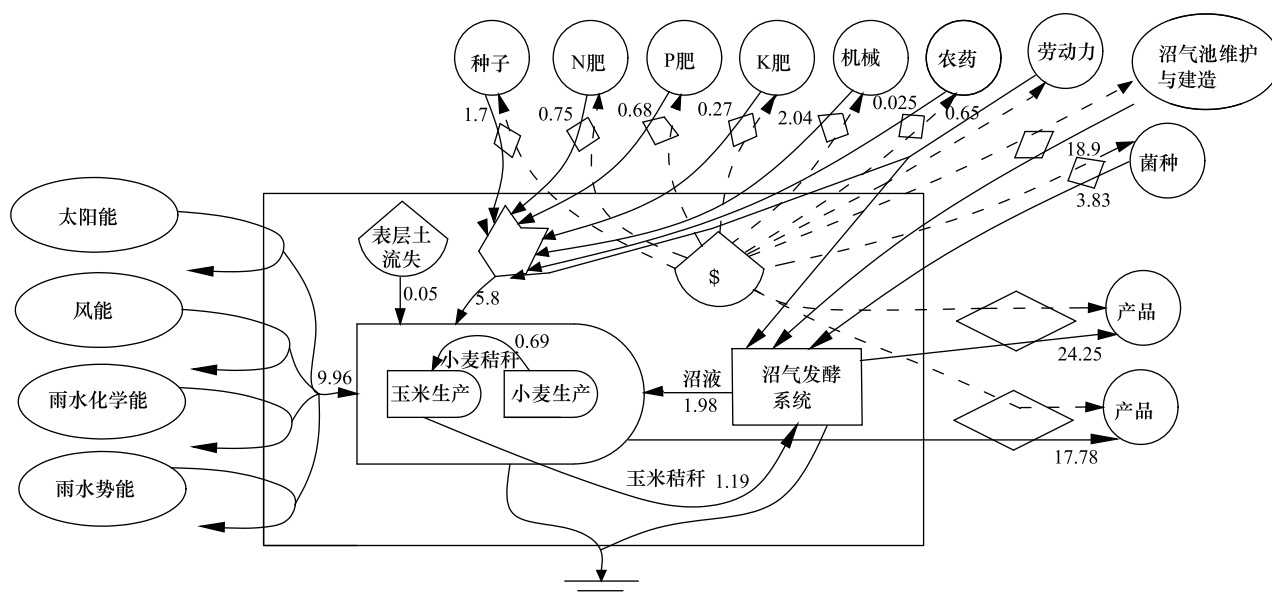


图3 农沼循环模式能量系统图解

Fig.3 Diagram of energy flow in farmland-biogas slurry circulation mode

一个系统中,输入的能值不能重复累加。本文遵循此规则,分别对系统的能值投入、流动和产出进行了计算,如图1-图4所示。

能值方法是通过产生某一资源或劳务的过程中直接或间接消耗的另一种能量类型多少进行评价,由于太阳能是最原始的能源形式,应用中常以太阳能值(Solar Emery)为标准度量,单位为太阳能焦耳(Solaremjoules,缩写为sej)^[19]。本研究中能值转换率的全球能值基准为 15.83×10^{24} sej/a^[18,20]。表2列出了本文研究的生态系统能值分析指标及表达式,通过绘制能值分析表,列出能值的投入和产出,计算能值指标,如表3—表6所示。

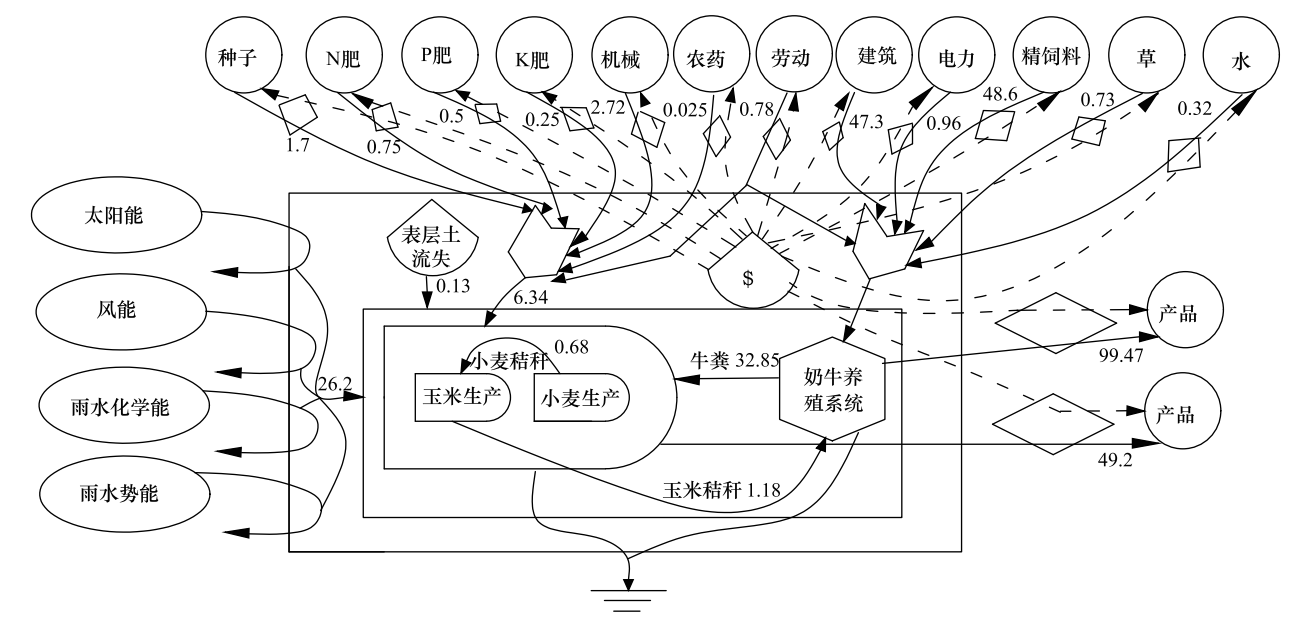


图 4 农牧循环模式能量系统图解

Fig.4 Diagram of energy flow in farmland-livestock circulation mode

表 1 不同循环模式的全年施肥量

Table 1 The annual application rates of organic manure and mineral fertilizer for the 4 types of circulation modes									
处理 Treatments	小麦季施肥 Fertilizer added to wheat						玉米季施肥 Fertilizer added to maize		
	玉米秸秆 Maize straw	沼液 Biogas slurry	有机肥 Cow manure	尿素 Urea (N)	过磷酸钙 Calcium superphosphate (P)	硫酸钾 Potassium sulfate (K)	尿素 Urea (N)	过磷酸钙 Calcium superphosphate (P)	硫酸钾 Potassium sulfate (K)
对照模式(CK) Control mode	0	0	0	120	60	75	120	60	75
农田循环模式 Farmland circulation mode	21050 *	0	0	0	15.79	0	120	60	0
农沼循环模式 Farmland-biogas slurry circulation mode	0	38340	0	0	46.2	17.87	120	60	75
农牧循环模式 Farmland-livestock circulation mode	0	0	20730 *	0	17.99	12.60	120	60	75

玉米秸秆 N、P、K 含量分别为 0.57%、0.20%、0.73%，含水量为 65.01%；沼液 N、P、K 含量分别为 0.3%、0.03%、0.15%；牛粪 N、P、K 含量分别为 0.58%、0.2%、0.31%，含水量为 28.23%；以上数据单位为 kg/hm²

表 2 生态系统能值分析指标汇总

序号 Order number	指标项 Indices item	表达式 Formulation
1	可更新资源能值 Renewable energy flow	R
2	不可更新资源能值 Nonrenewable energy flow	N
3	不可更新工业辅助能 Non-renewable industrial energy	F
4	购买的可更新有机能 Renewable organic energy	R ₁
5	系统反馈能量 Feedback energy in the system	R ₂
6	化肥、农药能值 Chemical fertilizer and pesticide energy	C
7	能值输出 Product energy	Y

续表

序号 Order number	指标项 Indices item	表达式 Formulation
8	能值产出率 Emergy yield ratio	$EYR = Y / (F + R_1)$
9	能值投资率 Emergy investment ratio	$EIR = (F + R_1) / (R + N)$
10	环境负载率 Environmental loading ratio	$ELR = (F + N) / (R + R_1)$
11	基于能值的产品安全性指标 Emergy index of product safety	$EIPS = -C / (F + R_1)$
12	可持续发展指数 Emergy-based sustainability index	$ESI = EYR / ELR$

本研究中主要计算以下能值指标:

(1) 能值产出率(EYR): 能值产出率是衡量系统产出对经济贡献大小和系统生产效率的指标,它是系统产出能值与总辅助能值投入的比率。农业生态系统 EYR 值越高,系统的生产效率越高,越具有区域竞争力。表达式为:

$$EYR = \text{系统产出能值 } Y / \text{经济反馈能值 } (F + R_1)$$

(2) 能值投资率(EIR): 能值投资率是指生态系统的反馈能值与环境无偿能值比。它是计量经济发展程度和环境负载程度的指标。其值越大表明系统经济发展程度越高,而对环境的依赖越弱。表达式为:

$$EIR = \text{经济反馈能值 } (F + R_1) / \text{环境的无偿能值 } (R + N)$$

(3) 环境负载率(ELR): 通常用来自系统的购买能值与系统不可更新环境资源能值之和除以系统可更新环境资源能值。一般来说,环境负载率越小,表明农业生态系统的环境承载压力越小,发展潜力越大。表达式为:

$$ELR = \text{系统不可更新能值总量 } (F + N) / \text{系统可更新能值总量 } (R + R_1)$$

(4) 基于能值的产品安全性指标(EIPS)^[21]: 此指标用于评估系统的产品安全性,定义为农业生产系统施用化肥、农药的能值(C)和经济反馈能值之比的负值,0 值为最安全,负值越大,说明产品的安全性越差,-1 为最不安全。表达式为:

$$EIPS = -[\text{化肥、农药能值 } (C) / \text{经济反馈能值 } (F + R_1)]$$

(5) 可持续发展指数(ESI): 能值可持续发展指标是系统净能值产出率与环境负载率的比值。但并不是 ESI 值越大,可持续发展能力就越强,当 $1 < ESI < 10$ 时,表明系统富有活力及发展潜力,当 $ESI > 10$ 时,则系统不发达,当 $ESI < 1$ 时,属于消费型系统^[22]。表达式为:

$$ESI = \text{净能值产出率 } EYR / \text{环境负载率 } ELR$$

1.3 数据分析

通过收集取样获得小麦、玉米、小麦秸秆、玉米秸秆、牛奶、牛粪、沼液等的数量,通过实地调查与资料收集的方法获得整年度系统能值分析的原始数据,能值转化率参考相关文献。

2 结果与分析

2.1 能值输入与输出

4 种不同模式的能值输入和输出情况见表 3—表 6。能值输入包括可更新资源、不可更新资源、不可更新工业辅助能和可更新有机能;能值输出为系统产出的全部产品。

从表 3—表 6 中可以看出,对照模式(CK)、农田循环模式、农沼循环模式和农牧循环模式的能值投入分别为 1.68×10^{15} Sej/a、 1.55×10^{15} Sej/a、 3.89×10^{15} Sej/a、 1.31×10^{16} Sej/a,对照模式和农田循环模式的投入都较低且相差不大,而农沼循环模式和农牧循环模式分别是对照模式投入的 2.32 倍和 7.8 倍,这是因为农沼和农牧循环模式均为复合循环系统,其经济反馈能值除农田中投入外,农沼循环模式还有沼气池建造和维护、菌种等,农牧循环模式还有建筑、电力、水、草等。其中可更新资源、不可更新资源、不可更新工业辅助能和可更新有机能占总能值投入的比例,对照模式分别为 59.29%、0.3%、27.02%、13.21%,农田循环模式分别为 64.26%、

0.32%、22.78%、12.65%, 农沼循环模式分别为 25.6%、0.13%、58.35%、15.89%, 农牧循环模式分别为 20%、0.1%、40.08%、39.77%。对照模式和农田循环模式的可更新资源投入的能值所占的比例最高, 是输入的主要能值, 说明了对照模式和农田循环模式对环境的依赖更大; 农牧循环模式中不可更新工业辅助能和可更新有机能所占比例基本相等且最高, 农沼循环模式主要依赖购买的不可更新工业辅助能的投入, 而农牧循环模式既依靠不可更新工业辅助能, 也依赖于牛粪等有机废弃物的能值投入。

表 3 常规施肥处理下对照模式能值分析

Table 3 Energy analysis table of control mode based on conventional fertilization treatment

资源 Resource	数量 Quantity	能量换算指数 Energy conversion factor	能量和物质流动 Energy or material flow	能值转换率 Transformity	能值/(Sej/a) Emergy	占总输入/ 总输出/% Of the total input/output
能值输入 Energy input						
可更新资源 Renewable resources (R)						
太阳辐射能 Sunlight	980 m ²	1.74×10 ⁷ J/m ²	1.71×10 ¹⁰ J	1 [19]	1.71×10 ¹⁰	
风能 Wind	980 m ²	1.36×10 ⁵ J/m ²	1.33×10 ⁸ J	1496 Sej/J [1]	1.99×10 ¹¹	
雨水化学能 Rain(chemical)	980 m ²	2.38×10 ⁶ J/m ²	2.33×10 ⁹ J	4.28×10 ⁵ Sej/J [1]	9.96×10 ¹⁴	59.29
雨水势能 Rain(geopotential)	980 m ²	1.24×10 ⁵ J/m ²	1.22×10 ⁸ J	1.69×10 ⁴ Sej/J [20]	2.06×10 ¹²	
小计 Sub-total					9.96×10 ¹⁴	59.29
不可更新资源 Non-renewable resources (N)						
表土层流失 Soil loss	980 m ²	8.16×10 ⁴ J/m ²	8.0×10 ⁷ J	6.25×10 ⁴ Sej/J [1]	5.0×10 ¹²	0.3
不可更新工业辅助能 Non-renewable industrial energy (F)						
氮肥 Nitrogen in fertilizer	23.52 kg			6.38×10 ¹² Sej/kg [20]	1.5×10 ¹⁴	8.93
磷肥 Phosphorus in fertilizer	11.76 kg			6.55×10 ¹² Sej/kg [20]	7.7×10 ¹³	4.58
钾肥 Potash in fertilizer	14.7 kg			2.92×10 ¹² Sej/kg [20]	4.29×10 ¹³	2.55
机械 Machine	19.21 \$			9.45×10 ¹² Sej/\$ [23]	1.82×10 ¹⁴	10.83
农药 Pesticide	100 kg			2.52×10 ¹⁰ Sej/kg [24]	2.52×10 ¹²	0.15
小计 Sub-total					4.54×10 ¹⁴	27.02
购买的可更新有机能 Renewable organic energy (R ₁)						
劳动力 Labor	4 人	1.05×10 ⁷ J/人	4.2×10 ⁷ J	1.24×10 ⁶ Sej/J [1]	5.21×10 ¹³	3.1
种子 Seeds	18.01 \$			9.45×10 ¹² Sej/\$ [24]	1.7×10 ¹⁴	10.12
小计 Sub-total					2.22×10 ¹⁴	13.21
合计 Total					1.68×10 ¹⁵	
能值输出 Product emergy (Y)						
玉米 Maize	902.36 kg	1.65×10 ⁷ J/kg	1.49×10 ¹⁰ J			
小麦 Wheat	638.62 kg	1.33×10 ⁷ J/kg	8.49×10 ⁹ J			
玉米秸秆 Maize straw	2940 kg	1.05×10 ⁶ J/kg	3.09×10 ⁹ J			
能值 Emergy			1.68×10 ¹⁵ Sej/a			

表 4 玉米秸秆粉碎还田处理下农田循环模式能值分析

Table 4 Energy analysis of farmland circulation mode based on straw crushing returning

资源 Resource	数量 Quantity	能量换算指数 Energy conversion factor	能量和物质流动 Energy or material flow	能值转换率 Transformity	能值/(Sej/a) Emergy	占总输入/ 总输出% Of the total input/output
能值输入 Energy input						
可更新资源 Renewable resources (R)						
太阳辐射能 Sunlight	980 m ²	1.74×10 ⁷ J/m ²	1.71×10 ¹⁰ J	1	1.71×10 ¹⁰	
风能 Wind	980 m ²	1.36×10 ⁵ J/m ²	1.33×10 ⁸ J	1496 Sej/J	1.99×10 ¹¹	
雨水化学能 Rain(chemical)	980 m ²	2.38×10 ⁶ J/m ²	2.33×10 ⁹ J	4.28×10 ⁵ Sej/J	9.96×10 ¹⁴	64.26

续表

资源 Resource	数量 Quantity	能量换算指数 Energy conversion factor	能量和物质流动 Energy or material flow	能值转换率 Transformity	能值/(Sej/a) Emergy	占总输入/ 总输出% Of the total input/output
雨水势能 Rain(geopotential)	980 m ²	1.24×10 ⁵ J/m ²	1.22×10 ⁸ J	1.69×10 ⁴ Sej/J	2.06×10 ¹²	
小计 Sub-total					9.96×10 ¹⁴	64.26
不可更新资源 Non-renewable resources(N)						
表土层流失 Soil loss	980 m ²	8.16×10 ⁴ J/m ²	8.0×10 ⁷ J	6.25×10 ⁴ Sej/J	5.0×10 ¹²	0.32
不可更新工业辅助能 Non-renewable industrial energy(F)						
氮肥 Nitrogen in fertilizer	11.76 kg			6.38×10 ¹² Sej/kg	7.5×10 ¹³	4.84
磷肥 Phosphorus in fertilizer	7.43 kg			6.55×10 ¹² Sej/kg	4.87×10 ¹³	3.14
钾肥 Potash in fertilizer	0			2.92×10 ¹² Sej/kg	0	0
机械 Machine	24.01 \$			9.45×10 ¹² Sej/\$	2.27×10 ¹⁴	14.65
农药 Pesticide	100 kg			2.52×10 ¹⁰ Sej/kg	2.52×10 ¹²	0.16
小计 Sub-total					3.53×10 ¹⁴	22.78
购买的可更新有机能 Renewable organic energy(R ₁)						
劳动力 Labor	2 人	1.05×10 ⁷ J/人	2.1×10 ⁷ J	1.24×10 ⁶ Sej/J	2.6×10 ¹³	1.68
种子 Seeds	18.01 \$			9.45×10 ¹² Sej/\$	1.7×10 ¹⁴	10.97
小计 Sub-total					1.96×10 ¹⁴	12.65
合计 Total					1.55×10 ¹⁵	
能值输出 Product emery(Y)						
玉米 Maize	946.1 kg	1.65×10 ⁷ J/kg	1.56×10 ¹⁰ J			
小麦 Wheat	683.34 kg	1.33×10 ⁷ J/kg	9.08×10 ⁹ J			
玉米秸秆 Maize straw	1400 kg	1.05×10 ⁶ J/kg	1.47×10 ⁹ J			
能值 Emery			1.55×10 ¹⁵ Sej/a			

表 5 沼液还田处理下农沼循环模式能值分析

Table 5 Emery analysis of farmland-biogas slurry circulation mode based on biogas slurry returning

资源 Resource	数量 Quantity	能量换算指数 Energy conversion factor	能量和物质流动 Energy or material flow	能值转换率 Transformity	能值/(Sej/a) Emergy	占总输入/ 总输出% Of the total input/output
能值输入 Energy input						
可更新资源 Renewable resources(R)						
太阳辐射能 Sunlight	980 m ²	1.74×10 ⁷ J/m ²	1.71×10 ¹⁰ J	1	1.71×10 ¹⁰	
风能 Wind	980 m ²	1.36×10 ⁵ J/m ²	1.33×10 ⁸ J	1496 Sej/J	1.99×10 ¹¹	
雨水化学能 Rain(chemical)	980 m ²	2.38×10 ⁶ J/m ²	2.33×10 ⁹ J	4.28×10 ⁵ Sej/J	9.96×10 ¹⁴	25.6
雨水势能 Rain(geopotential)	980 m ²	1.24×10 ⁵ J/m ²	1.22×10 ⁸ J	1.69×10 ⁴ Sej/J	2.06×10 ¹²	
小计 Sub-total					9.96×10 ¹⁴	25.6
不可更新资源 Non-renewable resources(N)						
表土层流失 Soil loss	980 m ²	8.16×10 ⁴ J/m ²	8.0×10 ⁷ J	6.25×10 ⁴ Sej/J	5.0×10 ¹²	0.13
不可更新工业辅助能 Non-renewable industrial energy(F)						
沼气池建造与维护 The biogas construction and maintenance	200 \$			9.45×10 ¹² Sej/\$ [24]	1.89×10 ¹⁵	48.59
机械 Machine	21.61 \$			9.45×10 ¹² Sej/\$	2.04×10 ¹⁴	5.24
氮肥 Nitrogen in fertilizer	11.76 kg			6.38×10 ¹² Sej/kg	7.5×10 ¹³	1.93
磷肥 Phosphorus in fertilizer	10.41 kg			6.55×10 ¹² Sej/kg	6.82×10 ¹³	1.75
钾肥 Potash in fertilizer	9.10 kg			2.92×10 ¹² Sej/kg	2.66×10 ¹³	0.68
农药 Pesticide	100 kg			2.52×10 ¹⁰ Sej/kg	2.52×10 ¹²	0.06

续表

资源 Resource	数量 Quantity	能量换算指数 Energy conversion factor	能量和物质流动 Energy or material flow	能值转换率 Transformity	能值/(Sej/a) Emergy	占总输入/ 总输出% Of the total input/output
小计 Sub-total					2.27×10 ¹⁵	58.35
购买的可更新有机能 Renewable organic energy (R ₁)						
种子 Seeds	18.01 \$			9.45×10 ¹² Sej/\$	1.7×10 ¹⁴	4.37
劳动力 Labor	5 人	1.05×10 ⁷ J/人	5.25×10 ⁷ J	1.24×10 ⁶ Sej/J	6.51×10 ¹³	1.67
菌种 Mushroom seeds	40.52 \$			9.45×10 ¹² Sej/\$ [24]	3.83×10 ¹⁴	9.85
小计 Sub-total					6.18×10 ¹⁴	15.89
合计 Total					3.89×10 ¹⁵	
能值输出 Product emergy (Y)						
玉米 Maize	924.86 kg	1.65×10 ⁷ J/kg	1.53×10 ¹⁰ J			
小麦 Wheat	694 kg	1.33×10 ⁷ J/kg	9.23×10 ⁹ J			
沼气 Biogas	650 m ³	3.12×10 ⁷ J/m ³	2.23×10 ¹⁰ J			
沼液 Biogas slurry	42000 kg	5.6×10 ⁵ J/kg	2.35×10 ¹⁰ J			
能值 Emergy			3.89×10 ¹⁵ Sej/a			

表 6 有机肥还田处理下农牧循环模式能值分析

Table 6 Emergy analysis of farmland-livestock circulation mode based on organic fertilizer returning

资源 Resource	数量 Quantity	能量换算指数 Energy conversion factor	能量和物质流动 Energy or material flow	能值转换率 Transformity	能值/(Sej/a) Emergy	占总输入/ 总输出% Of the total input/output
可更新资源 Renewable resources (R)						
太阳辐射能 Sunlight	2580 m ²	1.74×10 ⁷ J/m ²	4.49×10 ¹⁰ J	1	4.49×10 ¹⁰	
风能 Wind	2580 m ²	1.36×10 ⁵ J/m ²	3.51×10 ⁸ J	1496 Sej/J	5.25×10 ¹¹	
雨水化学能 Rain(chemical)	2580 m ²	2.38×10 ⁶ J/m ²	6.14×10 ⁹ J	4.28×10 ⁵ Sej/J	2.62×10 ¹⁵	20
雨水势能 Rain(geopotential)	2580 m ²	1.24×10 ⁵ J/m ²	3.2×10 ⁸ J	1.69×10 ⁴ Sej/J	5.41×10 ¹²	
小计 Sub-total					2.62×10 ¹⁵	20
不可更新资源 Non-renewable resources (N)						
表土层流失 Soil loss	2580 m ²	8.16×10 ⁴ J/m ²	2.11×10 ⁸ J	6.25×10 ⁴ Sej/J	1.32×10 ¹³	0.1
不可更新工业辅助能 Non-renewable industrial energy (F)						
建筑 Building	500 \$			9.45×10 ¹² Sej/\$ [24]	4.73×10 ¹⁵	36.11
电力 Electricity	10 \$			9.45×10 ¹² Sej/\$ [24]	9.45×10 ¹³	0.72
机械 Machine	28.81 \$			9.45×10 ¹² Sej/\$	2.72×10 ¹⁴	2.08
氮肥 Nitrogen in fertilizer	11.76kg			6.38×10 ¹² Sej/kg	7.5×10 ¹³	0.57
磷肥 Phosphorus in fertilizer	7.64 kg			6.55×10 ¹² Sej/kg	5×10 ¹³	0.38
钾肥 Potash in fertilizer	8.58 kg			2.92×10 ¹² Sej/kg	2.51×10 ¹³	0.019
农药 Pesticide	100 kg			2.52×10 ¹⁰ Sej/kg	2.52×10 ¹²	
小计 Sub-total					5.25×10 ¹⁵	40.08
购买的可更新有机能 Renewable organic energy (R ₁)						
种子 Seeds	18.01 \$			9.45×10 ¹² Sej/\$	1.7×10 ¹⁴	1.3
劳动力 Labor	6 人	1.05×10 ⁷ J/人	6.3×10 ⁷ J	1.24×10 ⁶ Sej/J	7.81×10 ¹³	0.6
精饲料 Concentrate feed	800kg			6.08×10 ¹² Sej/kg [1]	4.86×10 ¹⁵	37.1
草 Grass	100 kg	1.47×10 ⁷ J/kg	1.47×10 ⁹ J	4.98×10 ⁴ Sej/J [1]	7.32×10 ¹³	0.56
水 Water	1.5×10 ⁴ kg	4.94×10 ³ J/kg	7.41×10 ⁷ J	4.28×10 ⁵ Sej/J [1]	3.17×10 ¹³	0.24
小计 Sub-total					5.21×10 ¹⁵	39.77
合计 Total					1.31×10 ¹⁶	

续表

资源 Resource	数量 Quantity	能量换算指数 Energy conversion factor	能量和物质流动 Energy or material flow	能值转换率 Transformity	能值/(Sej/a) Emergy	占总输入/ 总输出% Of the total input/output
能值输出 Product emergy (Y)						
玉米 Maize	961.95 kg	$1.65 \times 10^7 \text{ J/kg}$	$1.59 \times 10^{10} \text{ J}$			
小麦 Wheat	740.43 kg	$1.33 \times 10^7 \text{ J/kg}$	$9.85 \times 10^9 \text{ J}$			
牛奶 Milk	4000 kg	$2.56 \times 10^6 \text{ J/kg}$	$1.02 \times 10^{10} \text{ J}$			
牛粪 Cow manure	3850 kg	$4.18 \times 10^6 \text{ J/kg}$	$1.61 \times 10^{10} \text{ J}$			
能值 Emergy			$1.31 \times 10^{16} \text{ Sej/a}$			

根据能值理论,处于平衡态系统,系统内部库存不变,系统能值产出等于系统能值投入,所以对照模式、农田循环模式、农沼循环模式和农牧循环模式的能值输出分别为 $1.68 \times 10^{15} \text{ Sej/a}$ 、 $1.55 \times 10^{15} \text{ Sej/a}$ 、 $3.89 \times 10^{15} \text{ Sej/a}$ 、 $1.31 \times 10^{16} \text{ Sej/a}$ 。4种循环模式均有能值产出进入市场,对照模式产出主要为小麦、玉米和玉米秸秆;农沼循环模式产出的沼气主要用于居民日常生活,剩余的沼液作为肥料返回到农田中;农牧循环模式中产出的牛奶出售为牛场赚取经济效益,此模式中产生大量牛粪等废弃物也是作为肥料返回到农田中。

2.2 主要能值指标比较与分析

从表7中看出,4种生态循环系统的净能值产出率都大于1,农田、农沼和农牧循环模式的EYR分别是对照模式的1.13倍、54.22%和50.2%,说明农田循环模式能值利用效率要高于其他3种循环模式,净能值产出率更高,能源生产与利用的效率更高,显示更强的经济活动竞争力。农田、农沼和农牧循环模式的EIR分别是对照模式的80.88%、4.25倍和5.85倍,说明农牧循环模式的经济发展程度最高。农田、农沼和农牧循环模式的ELR分别是对照模式的78.95%、3.71倍和1.76倍,农田循环模式对环境的压力最小,农沼循环模式对环境的压力更大一些,4种循环模式的环境负载率都在可接受范围内。基于能值的产品安全性指标(EIPS)检验了系统产出产品的安全性,在数轴上负值越接近0,产品安全性越高,越远离0,产品安全性越低。农牧循环模式的产品安全性指标为-0.015,最接近于0,其产品安全性是最高的,而对照模式的产品存在一定的安全隐患。农田循环模式的可持续发展指数最大,显示出了很强的可持续发展能力,农沼循环模式的可持续发展指数小于1,说明该循环模式属于消费型模式。种植模式中农田循环模式综合指标优于对照模式,复合循环模式中农牧循环模式要优于农沼循环模式。

表7 不同循环模式下生态循环系统能值评价指标比较

Table 7 Comparison table of the emergy indicators of different circulation modes

处理 Treatments	能值指标 Emergy indicators				
	能值产出率 EYR	能值投资率 EIR	环境负载率 ELR	基于能值的产品 安全性指标 EIPS	可持续发展指数 ESI
对照模式(CK) Control mode	2.49	0.68	0.38	-0.4	6.55
农田循环模式 Farmland circulation mode	2.82	0.55	0.3	-0.23	9.4
农沼循环模式 Farmland-biogas slurry circulation mode	1.35	2.89	1.41	-0.06	0.96
农牧循环模式 Farmland-livestock circulation mode	1.25	3.98	0.67	-0.015	1.87

EYR:能值产出率 Emergy yield ratio; EIR:能值投资率 Emergy investment ratio; ELR:环境负载率 Environmental loading ratio; EIPS:基于能值的产品安全性指标 Emergy index of product safety; ESI:可持续发展指数 Emergy-based sustainability index

3 讨论与结论

秸秆还田能够提高土壤有机质含量,增加土壤肥力,有助于土壤养分的可持续利用^[25]。对照模式和农田

循环模式中,资源投入基本相同,但是系统主产品——玉米和小麦产量农田循环模式高于对照模式,说明秸秆还田可以增加土壤养分,改善土壤理化性状,提高土壤有机质含量,减少碳排放,提高作物产量和品质,所以应减少化肥的使用,充分利用秸秆资源,减少环境污染。由于对照模式和农田循环模式的投入和产出均较低,模式单一,这两种模式并不能为当地创造出更多的生态效益和经济效益。而农沼循环模式和农牧循环模式是分别由农田和沼气发酵系统、农田和饲养系统组成的复合循环系统,两种循环模式具有良好的物质循环和能值反馈特性,能够充分利用玉米秸秆,充分利用其有机能,其本身产生的沼液、沼渣和牛粪等废弃物肥料化反馈到农田系统中,减少常规系统外界的工业辅助能的投入,使各项指标都能得到优化,提高了系统的能值效益和可持续发展能力。Bastinanoni 等^[26]报道意大利的一个农场由于系统内部的牲畜养殖为作物种植提供有机肥,使系统的环境承载力降低,净能值产出率提高,体现出系统内部的能值反馈有利于提高整个系统的能值效益的作用。研究已经证明,可更新能源的有效利用与工农业生产有着紧密的联系,是生产实践中的优先选择^[27],本研究两种复合循环模式在生产实践中充分利用沼液、牛粪等工农业生产中的废弃资源,使其发挥最大的利用价值。陆宏芳等^[28]用与本文相同的方法分别对珠江三角洲三水市的 3 种基塘农业生态工程模式进行了系统层和子系统层的比较研究,结果表明由于引入了畜牧业,提高了系统的综合效益和可持续性。本文农牧循环模式能值产出率、能值投资率、环境负载率、产品安全性和可持续发展能力都要优于农沼循环模式,这是在种植系统基础上,加入了奶牛养殖业,提高了系统的综合效益和可持续性,与上述研究结果一致。农沼循环模式能够有效地将农户种植业和日常生活等有机结合起来,使农业系统形成能流和物流合理转换的闭合生态链,在局部和整体上达到经济和环境等多重效益^[29-31]。但是本研究中的农沼循环模式中由于技术及装备制约,特别是产气量低,维护费用成本高等问题,影响了秸秆被直接作为原料发酵产生沼气,能值产出率相对较低,可持续发展能力不强。因此,政府应采取相应的优惠税收政策补偿沼气池的维护费用,支持沼气工程中的清洁能源等项目的发展,使沼气生产得到提升,为居民日常生活提供更多的服务。农牧循环经济是在农牧生态系统中,把初级生产和次级生产结合起来,在物质循环利用过程中,把“土壤-植物-动物”结合起来,使物质循环能量利用更趋向合理,这种循环是实现农牧经济生态系统的良性循环,是优质高产高效农牧业的中心环节^[32]。农牧业二者之间存在相互依赖又相互制约的营养物质的转化过程,虽然在此过程中会消耗对方一部分的能量,但也能促进双方的生产发展。实行农牧结合能够使养分资源在农业生态系统中的利用更趋于合理化,以减少资源的浪费^[33-34]。本研究中农牧循环模式中饲养子系统产出牛粪等大量废弃物,经循环利用作为有机肥返回到大田中,降低了生产成本,减少了社会购买能值的投入,其能值产出率是农沼循环模式的 90.4%,而其可持续发展能力是农沼循环模式的 1.95 倍,因此农牧循环的产品市场竞争力更强、发展潜力更大。席运官等^[21]研究表明,“稻鸭共作”有机农业模式比稻麦轮作常规的生产模式产品的安全性高,而化肥和农药的大量施用使作物中积聚大量有害物质,产品的安全性降低,这与本文中的研究结果一致,因此要减少化肥的使用,转而加大有机肥等绿色肥料的推广应用。两种复合循环模式相比较,农牧循环模式在加强畜牧业废弃物安全还田技术以及种植业产业链延伸技术等后,可持续发展能力更强。综上所述,农牧循环模式在本地区的发展潜力是最大的,我们要权衡当地的实际情况,在大力发展农牧循环模式的同时,积极弥补农沼循环模式的不足,实现多种秸秆利用模式共同良好的发展。

参考文献 (References):

- [1] 周连第, 胡艳霞, 王亚芝, 雷庆国. 京郊农业生物循环系统生态经济能值评估——以密云尖岩村为例. 生态学报, 2012, 32(23): 7346-7354.
- [2] 韩芹芹, 姜逢清, 杨跃辉. 我国发展循环经济的战略重点之一在农业. 乡镇经济, 2008, 24(2): 62-65.
- [3] 韦茂贵, 王晓玉, 谢光辉. 中国各省大田作物田间秸秆资源量及其时间分布. 中国农业大学学报, 2012, 17(6): 32-44.
- [4] 毕于运, 王道龙, 高春雨, 王亚静. 中国秸秆资源评价与利用. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2008: 5-5.
- [5] 刘世平, 聂新涛, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲. 稻麦两熟条件下不同土壤耕作方式与秸秆还田效用分析. 农业工程学报, 2006, 22(7): 48-51.

- [6] 刘巽浩, 高旺盛, 朱文珊. 秸秆还田的机理与技术模式研究. 北京: 中国农业出版社, 2001: 124-130.
- [7] 钟华平, 岳燕珍, 樊江文. 中国作物秸秆资源及其利用. 资源科学, 2003, 25(4): 62-67.
- [8] 高旺盛. 我国循环农业的原理、模式与技术途径// 中国农作制度研究进展 2008. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2008: 427-431.
- [9] 武少菁, 刘圣勇, 王晓东, 刘小二, 王森. 秸秆干发酵产沼气技术的概述和展望. 中国沼气, 2008, 26(4): 20-23.
- [10] 李世密, 魏雅洁, 张晓健, 赵连臣, 张大雷. 秸秆类木质纤维素原料厌氧发酵产沼气研究. 可再生能源, 2008, 26(1): 50-54.
- [11] Katuwal H, Bohara A K. Biogas: a promising renewable technology and its impact on rural households in Nepal. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(9): 2668-2674.
- [12] Chen Y, Yang G H, Sweeney S, Feng Y Z. Household biogas use in rural China: a study of opportunities and constraints. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(1): 545-549.
- [13] Zhou S Y, Zhang B, Cai Z F. Emergy analysis of a farm biogas project in China: a biophysical perspective of agricultural ecological engineering. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2010, 15(5): 1408-1418.
- [14] Yang J, Chen B. Emergy analysis of a biogas-linked agricultural system in rural China-A case study in Gongcheng Yao autonomous county[J]. Applied Energy, 2014, 118: 173-182.
- [15] Campbell D E. Emergy analysis of human carrying capacity and regional sustainability: an example using the state of Maine. Environmental Monitoring and Assessment, 1998, 51(1/2): 531-569.
- [16] Ulgiati S, Brown M T. Monitoring patterns of sustainability in natural and man-made ecosystems. Ecological Modelling, 1998, 108(1/3): 23-36.
- [17] Brown M T, Ulgiati S. Energy quality, emergy, and transformity: H. T. Odum's contributions to quantifying and understanding systems. Ecological Modelling, 2004, 178(1/2): 201-213.
- [18] Odum H T. Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making. United States: Wiley, 1995.
- [19] 陆宏芳, 蓝盛芳, 李谋召, 隋春花. 农业生态系统能值分析方法研究. 韶关大学学报: 自然科学版, 2000, 21(4): 74-78.
- [20] Odum H T, Brown M T, Williams S B. Handbook of Emergy Evaluation, A Compendium of Data Emergy Computation Issued in A Series of Folios. Gainesville: University of Florida, 2000: 32611-6450.
- [21] 席运官, 钦佩. 稻鸭共作有机农业模式的能值评估. 应用生态学报, 2006, 17(2): 237-242.
- [22] Ulgiati S, Odum H T, Bastianoni S. Emergy use, environmental loading and sustainability an emergy analysis of Italy. Ecological Modelling, 1994, 73(3/4): 215-268.
- [23] Brown MT, Arding J. Transformities working paper, center for wetlands, University of Florida, Gainesville, FL, 1991.
- [24] Yang Z F, Jiang M M, Chen B, Zhou J B, Chen G Q, Li S C. Solar emergy evaluation for Chinese economy. Energy Policy, 2010, 38(2): 875-886.
- [25] 陈芝兰, 张济平, 蔡晓布, 何建清, 彭岳林. 秸秆还田对西藏中部退化农田土壤微生物的影响. 土壤学报, 2005, 42(4): 696-699.
- [26] Bastianoni S, Marchettini N, Panzieri M, Tiezzi E. Sustainability assessment of a farm in the Chianti area (Italy). Journal of Cleaner Production, 2001, 9(4): 365-373.
- [27] Chen S Q, Chen B. Sustainability and future alternatives of biogas-linked agrosystem (BLAS) in China: an emergy synthesis. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(6): 3948-3959.
- [28] 陆宏芳, 彭少麟, 蓝盛芳, 陈飞鹏. 基塘农业生态工程模式的能值评估. 应用生态学报, 2003, 14(10): 1622-1626.
- [29] 武洲. 低碳农业与农村沼气. 吉林农业, 2010, (8): 18-24.
- [30] 李景明, 薛梅. 中国沼气产业发展的回顾与展望. 可再生能源, 2010, 28(3): 1-5.
- [31] 陈笑, 史剑茹, 孟蝶, 赵言文. 沼气与沼肥在农业和环境方面的运用与成效. 中国沼气, 2011, 9(1): 44-47.
- [32] 贾金龙, 李祝山, 王燕钧. 浅山旱作区农牧结合的轮作制研究. 青海农林科技, 1994, (2): 1-6.
- [33] 曾江海, 张玉铭. 一个农牧结合生态系统营养循环的源、库、流. 生态学杂志, 1994, 13(4): 42-46, 22-22.
- [34] 冷志杰, 孟军, 徐中儒, 葛家麒. 一个农牧结合生态系统物流模型的建立. 农业系统科学与综合研究, 1998, 14(1): 53-54, 58-58.