

张丛光, 韩建聪, 邱 凌, 等. 基于能值方法的“五配套”生态果园可持续性评价[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(2): 276–285.

ZHANG Cong-guang, HAN Jian-cong, QIU Ling, et al. Energy method-based evaluation of the sustainability of the "Five-in-One" ecological orchard system [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(2): 276–285.

基于能值方法的“五配套”生态果园可持续性评价

张丛光^{1,2}, 韩建聪¹, 邱 凌^{1,2*}, 朱铭强^{1,2}, 成 嘉^{1,2}

(1.西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2.农业部农村可再生能源开发利用西部科学观测实验站, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:为了揭示“五配套”生态果园模式的可持续发展潜力,以“猪-沼-粮”、沼气生态村及单一苹果种植模式为参照,应用能值方法对研究区内“五配套”生态果园系统进行能值评价和温室效应减排分析。结果表明:“五配套”生态果园整体上符合其他各类沼气循环农业系统的典型特征,即自我更新能力强、环境负载小、生产效率及投资收益率高、系统可持续性强。“五配套”系统的环境负荷率(0.16)明显低于单一苹果种植系统的环境负荷率(2.77),而能值产出率与“猪-沼-粮”系统类似,分别是 11.10 与 11.89,均显著高于单一苹果种植系统的 2.69,这表明该模式的建设对环境的破坏力较小,能够取得良好的经济和生态效益。然而,该系统的能值废弃率为 1.03×10^{-3} ,显著高于其他沼气系统,且能值投资率偏低(4.76),可见该模式对自然资源的利用程度较低,系统内能值流动性不强。系统的 ESI 指数为 69.10,相比沼气生态村系统和单一苹果种植系统具有更强的环境可持续性,充分体现了“五配套”生态果园模式良好的系统活力和发展潜能。此外,通过对系统生命周期温室气体排放量进行分析,发现其具有整体上的 GHG 减排效益,且潜力高达 $1\,251.99\text{ kg CO}_2\text{-eq} \cdot \text{a}^{-1}$,减排效益来源主要是猪粪发酵、沼肥农用以及燃煤替代。

关键词:能值分析;“五配套”模式;沼气循环农业;可持续性;生态系统评估

中图分类号:X820.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2018)02-0276-10 doi:10.11654/jaes.2017-1106

Energy method-based evaluation of the sustainability of the "Five-in-One" ecological orchard system

ZHANG Cong-guang^{1,2}, HAN Jian-cong¹, QIU Ling^{1,2*}, ZHU Ming-qiang^{1,2}, CHENG Jia^{1,2}

(1.College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2.Western Scientific Observation and Experiment Station of Development and Utilization of Rural Renewable Energy, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China)

Abstract: The "Five-in-One" orchard is a typical biogas-linked agro-ecosystem and circular agricultural model that has social, ecological, and economic benefits. To investigate the model's inherent energy characteristics and system performances, the present study evaluated the sustainability of the system's development and productivity using a pig-biogas-grain (PBG) system, biogas ecological village (BEV) system, and single apple planting (SAP) system. The project was located in Chengcheng County, Shaanxi, which is located on the Guanzhong Plain. The system was generally analogous to other biogas-linked circular agriculture models with higher self-renewal ability, smaller environment load, higher production efficiency, and stronger sustainability. The environmental load ratio of the studied "Five-in-One" orchard system was 0.16, which was significantly lower than that of the SAP system (2.77) and similar to that of the PBG system. In addition, the energy yield ratios of the "Five-in-One" orchard system and the PBG system were 11.10 and 11.89, respectively, which were both higher than that of the SAP system (2.69). This indicates that the construction of the "Five-in-One" orchard systems would be less harmful to the environment than traditional apple production systems and would provide favorable economic and ecological benefits. However, the "Five-in-One" system had a higher energy waste ratio (1.26%) than either the PBF or BEV systems and a lower energy investment ratio (4.76). This is likely because the development and utilization of local natural resources were low and the energy feedback of the system was weak. The ESI

收稿日期:2017-08-15 录用日期:2017-11-22

作者简介:张丛光(1992—),男,山东东平人,博士研究生,主要从事生物能源工程与技术研究。E-mail:qaulxj@hotmail.com

*通信作者:邱 凌 E-mail:xbgzzh@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(51576167)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (51576167)

value of the system was 69.10, which indicated better environmental sustainability than the BEC and SAP systems and fully reflected the strong vitality and development potential of the "Five-in-One" orchard system. Based on overall accounting, the reduction in greenhouse gas (GHG) emission was favorable, with a total reduction potential of as high as 1 251.99 kg CO₂-eq per year. The GHG reductions generated by biogas utilization and bio-slurry fertilization were 975.42 kg and 1 290.79 kg CO₂-eq, respectively, and the results suggested that anaerobic processes were the greatest contributor of the system to GHG reduction. Meanwhile the GHG emission of the other projects increased.

Keywords: energy analysis; the "Five-in-One" model; biogas-linked circular agriculture; sustainability; ecosystem assessment

根据国家统计局的有关数据,2014年以来,陕西省的苹果年产量已超过1000万t,其种植面积高达66.52万hm²^[1],在全国各省及自治区中位列第一,作为陕西省的六大支柱产业之一,苹果产业的稳步发展事关重大。西北“五配套”生态果园模式是近些年陕西省发展绿色有机苹果的重要支撑,是根据黄土高原地区独特的地理环境长期发展形成的,该模式的主要构成是^[2]:以一个0.33hm²(约5亩)的成龄果园为基本生产单元,在果园前后配套一口8~10m³的沼气池、一眼20~40m³的水窖、一座10~20m²的猪舍、一种节水保墒装置以及一栋10~15m²的简易看护房。实践证明,该模式是一类符合系统工程学、生态学及科学发展观原理,以生物种群互惠共生、相互促进、协调发展为基本特征的循环农业模式^[3]。目前,关于循环农业模式的评价方法^[4]已出现多种,如基于宏观尺度的层次分析法、主成分分析法、灰色关联度分析等,以及基于微观尺度的LCA法、能值分析法、生态碳足迹法等^[5-12]。能值分析法基于研究对象的自然价值,将系统内的全部生态流、经济流和物质流以统一太阳能值的形式进行表达,进而实现对系统各项性能的合理评估。基于能值分析评价循环农业模式的研究已相当广泛,针对“猪-沼-果”、“四位一体”、“猪-沼-菜”、“稻-鸭”及其他沼气循环农业等模式的评估^[13-20],同时还出现了一些由能值分析与生命周期评价、生态足迹等方法结合而成的新方法^[21-25],它们极大地丰富了循环农业系统评价理论的内涵。然而,截至目前运用能值方法评价“五配套”生态果园模式的研究鲜有报道。

本研究从西北“五配套”生态果园的结构、功能及运行机制出发,在深入掌握其功能原理及综合效益的基础上,运用能值分析方法研究全国优质苹果生产基地——澄城县东马店村“五配套”生态果园系统(简称“DFO”系统),通过对“五配套”生态果园系统进行能值评价,可以从能量的视角评估该模式的生产效率及可持续发展潜力,发现整套系统中潜在的优势与缺陷,为今后该模式的优化发展工作提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本文以东马店村(35°15'N, 109°57'E)“五配套”生态果园项目为研究对象,其研究区位于陕西省渭北高原东北部的澄城县。该地区属关中平原暖温带半湿润季风性气候,年平均气温约12℃,年平均降水量680mm,无霜期204d,昼夜温差较大,年平均日照时长约2616h。近年来,澄城县苹果种植面积已达2.67×10⁴hm²,年产量约40万t,产值高达18亿元,且约有1067hm²苹果园获得美国、欧盟及国内有机认证。东马店村共有农户138户,约600余人,耕地面积97.67hm²,其中苹果种植面积33.33hm²,主导产业为畜禽养殖和苹果种植,全村共建“五配套”沼气池123口,占总农户的90%以上,经过该模式的长期推广和应用,东马店村的养殖业与种植业均实现了快速发展,据调查,该村平均每户居民拥有“五配套”生态果园0.332hm²,每户平均年出栏生猪11.61头,取得了良好的经济效益。

1.2 研究方法

1.2.1 系统结构特征分析

西北“五配套”生态果园模式是以农户耕地为基础,以太阳能保温为动力,以户用沼气发酵系统为纽带,形成以农带牧,以牧促沼,以沼促果,果牧结合,配套发展的农业复合生态系统^[26]。“五配套”生态果园模式的构成要素为五个部分:沼气子系统、太阳能暖圈子系统、集水贮水子系统、节灌保墒子系统以及苹果种植子系统,各子系统的基本构架和功能流程如图1所示,即在种植面积约0.33hm²的成龄果园基础上,建一体积为8m³的沼气池,一座占地12m²的猪圈(该猪圈与卫生户厕共同构成太阳能暖圈子系统),一套由水窖和滴灌管道构成的节水滴灌系统,形成一整套能源-生态-经济良性发展的循环农业系统^[27]。

在“五配套”生态果园系统中,作为种植业和养殖业之间纽带的沼气发酵子系统,为果树的生长发育提

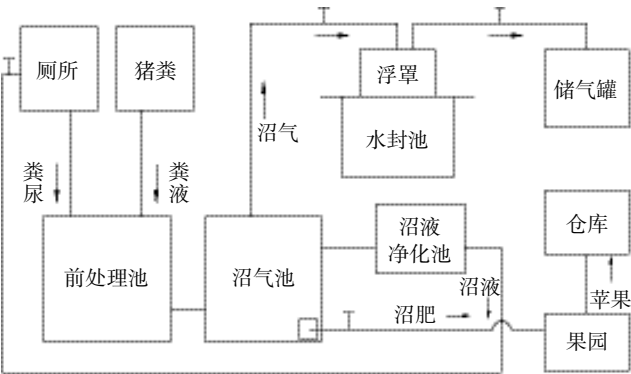


图 1 “五配套”生态果园系统流程图

Figure 1 Flow diagram of the "Five-in-One" orchard system

供了优质的沼肥——沼渣和沼液,它们是富含氮磷钾元素的有机肥,施用该有机肥后,苹果果树树势强壮,叶色浓绿,果实的商品率平均高达 85%,且售价高于市场均价的 25%左右^[27]。该模式的大规模推广,能够产生多方面的有益价值:拉动研究区种植业与养殖业的大力发展,增加农民收入并解决农村能源短缺问题,改善当地农业生态环境以及促进农村精神文明建设等^[28]。

1.2.2 “五配套”系统能值分析

东马店村“五配套”生态果园项目隶属于农业复合生态系统的范畴,因此其能值分析亦应遵循农业复合生态系统的一般规则和程序。本研究按照如下步骤对该系统进行能值分析:(1)根据 Odum^[29]提出的“能量系统语言”绘制“五配套”生态系统的能值流图,对

流经复合系统与各子系统的环境资源、购买的可更新有机能与不可更新工业辅助能、流经市场的物质能量及系统反馈资源加以可视化表达;(2)进行复合系统及各子系统的原始数据搜集并输入计算机进行存储,分析能量在各子系统间的流动特征;(3)建立东马店“五配套”生态系统的能值分析表,该表应包含序号、原始数据、太阳能值转化率或物质能量转换系数、计算单位、太阳能值与文献等;(4)建立反映系统不同性能的评价指标体系,对各指标予以解释和分析,并针对数据所反映的问题提出相应的策略或建议,为研究区内“五配套”模式的未来建设项目提供参考。

1.2.3 系统可持续性生产效率评价

为了便于分析同类农业复合生态系统的能值流动特征,本研究按照以“促进资源减量化、提高环境承载力、提升生产效率以及综合可持续发展”为模式发展目标的指标选取原则,引进以能值投入比重、能值产出率、能值投资率、环境负荷率、可持续发展指数等指标为主的系统可持续评估体系,如表 1 所示。

1.2.4 温室效应减缓潜力分析

以沼气为纽带的生态农业系统,往往能够体现出经济、社会及环境的多重效益,而温室气体减排是体现环境效益的重要指标,本研究按照生命周期评价的一般流程,对“五配套”生态果园系统进行了建设、生产及产物利用各阶段的温室气体排放追踪,以 CO₂、CO、CH₄ 和 N₂O 作为主要的温室气体排放物质,并按照 Wang 等^[22]、Wu 等^[30]采用的转换系数统一折算为以

表 1 “五配套”系统可持续性评价指标

Table 1 Energy indices of the "Five-in-One" orchard system

能值指标 Energy Indices	表达式 Expression	指标含义 Implication of indices
可更新资源能值流 Renewable energy flow	$R=RR+RP$	可更新资源能值
不可更新资源能值流 Nonrenewable energy flow	$N=NR+NP$	不可更新资源能值
可更新资源比率 Fraction of renewable energy	$R=(RR+RP)/T$	可更新资源占总投入比重
不可更新资源比率 Fraction of nonrenewable energy	$N=(NR+NP)/T$	总投入中不可更新资源能值投入比重
购买能值比率 Fraction of purchased energy	$P=(RP+NP)/T$	总投入中购买的能值投入比重
能值自给率 Energy self-support ratio	$ESR=(RR+NR)/T$	系统自然环境能值投入比重
净能值产出率 Energy yield ratio	$EYR=Y/(RP+NP)$	总产出与辅助能值投入之比
产出能值反馈率 Feedback ratio of yield energy	$FYE=B/(RP+NP)$	反馈能值与辅助能值之比
能值废弃率 Energy waste ratio	$EWR=W/T$	系统废弃资源能值占总能值投入的比重
环境负荷率 Environmental loading ratio	$ELR=(NR+NP)/(RR+RP+B)$	不可更新资源能值投入相对使用效率
能值投资率 Energy investment ratio	$EIR=(RP+NP)/(RR+NR)$	辅助能值与环境能值之比
系统可持续性指数 Energy sustainability index	$ESI=EYR/ELR$	系统产出对环境的依赖程度

注:RR—可更新自然资源, sej; NR—不可更新自然资源, sej; NP—购买的不可更新工业辅助能, sej; RP—购买的可更新有机能, sej; Y—系统总产出能值, sej; T—系统总投入能值, sej; B—反馈能值, sej; W—系统产生的废弃资源, sej。下同。
Note: RR—Renewable resources, sej; NR—Non-renewable resources, sej; NP—Non-renewable purchased resources, sej; RP—Renewable purchased resources, sej; Y—Yield, sej; T—Total input, sej; B—System feedback, sej; W—Wasted resources, sej. The same below.

CO₂为当量的温室效应潜值,其中CO₂、CO、CH₄、N₂O的转换系数分别为1、2、25和298。根据“五配套”生态果园系统的实际情况,本文将造成温室气体排放及减排的各类物质或原材料共分为8项,分别是基础建设、化肥施用、运输耗能、设备折旧、猪粪发酵、沼肥还田、沼气燃烧及由此引起的燃煤替代。

1.2.5 资料收集与数据处理方法

本研究采用实地入户调查和查阅报表年鉴的方式获取项目原始数据,在研究区的138户居民中选取了123户“五配套”生态果园模式户,让农户、村委工作人员填写模式清单调查问卷,并按地理分布情况随机挑选了30个模式户进行实地调查,确保调查问卷的可靠性,通过对获取的数据进行汇总、分析并以户为单位整理“五配套”模式的投入产出数据,得到最终的农户基本情况、畜禽养殖、沼气池和农资等的投入产出清单结果。此外,“五配套”系统运行期间的气象数据通过当地气象局、农业局等部门获得,利用Excel等软件进行数据的核算以及图表的绘制,所需能值转换率或物质折能系数参考相关文献^[31-35]。

2 结果与讨论

2.1 东马店村“五配套”系统能值流分析

东马店村“五配套”生态果园的能值流动情况如图2所示,整个系统的能量流入主要依靠自然资源、购买的有机能和工业辅助能,而系统的能量流出方向主要是货币市场和自然环境,一部分产出能值又反馈给系统继续利用,在“五配套”系统内部各子系统之间

也同时进行着大量的能量交换。东马店村“五配套”生态果园包含沼气发酵、太阳能暖圈、集水贮水、节灌保墒以及苹果种植五个模块,其中沼气发酵模块是连接养殖与种植系统的纽带,建于畜禽舍和卫生户厕下方,太阳能暖圈模块(包括卫生户厕和猪舍)产生的人畜粪便及冲洗水经进料管道进入沼气池,根据对东马店村项目的调查和计算,太阳能暖圈日产发酵原料约30~40 kg,即每年共计10 000~15 000 kg排泄粪便^[36],全部输入至沼气发酵模块。沼气发酵模块产生的沼液与沼渣,是营养物质丰富的有机肥料,可以替代一部分无机化肥和农药的施用^[9],系统每年产生的沼肥能值总量为 8.70×10^{16} sej(表2),全部作为系统反馈能值流入到沼肥利用子系统,即用于果园的肥料供应。此外,沼气发酵子系统每年还将生产能值总量达 3.85×10^{17} sej的沼气,除少部分用于系统自身运转外,其余绝大部分流入销售市场。

2.2 系统能值结构分析

2.2.1 能值投入及产出分析

东马店村“五配套”生态果园系统的能值核算情况如表2所示,系统的能值总投入为 8.08×10^{17} sej·a⁻¹,其中包含可更新自然资源投入 8.60×10^{16} sej·a⁻¹,不可更新自然资源投入 2.96×10^{16} sej·a⁻¹,购买的可更新有机能投入 4.68×10^{17} sej·a⁻¹,购买的不可更新工业辅助能投入 8.18×10^{16} sej·a⁻¹,分别占总投入的10.64%、3.66%、57.92%及10.12%。在可更新自然资源能值投入中,由降雨引起的能值贡献率高达67.91%,可见在整个“五配套”生态果园系统中,降水是影响苹果种植产业发展的最显著环境因子。在购买的可更新工业辅助能投入中,沼气池、水窖、太阳能暖圈及附属工程的建设与维护为主要项目,因此工业辅助能值投入集中于沼气发酵子系统、太阳能暖圈子系统与集水滴灌子系统,其余少量能值用于苹果种植子系统,如化肥、农药等。

综合而言,购买的可更新有机能对“五配套”生态果园模式的能值贡献最大,包括仔猪、饲料、人力和果苗等项目,而这些投入主要分布于养殖业子系统。在系统总能值投入中,购买能值(包括购买的可更新有机能与不可更新工业辅助能)投入占68.04%,自然资源能值投入仅占14.31%,因此在短期内,“五配套”生态果园项目的经济效益并不会立即显现,比较适合以政府投资为主体的中长期生态建设方案。此外,系统的可更新能值投入共计 5.54×10^{17} sej·a⁻¹,约占系统总能值投入的68.56%,说明东马店村“五配套”生态果

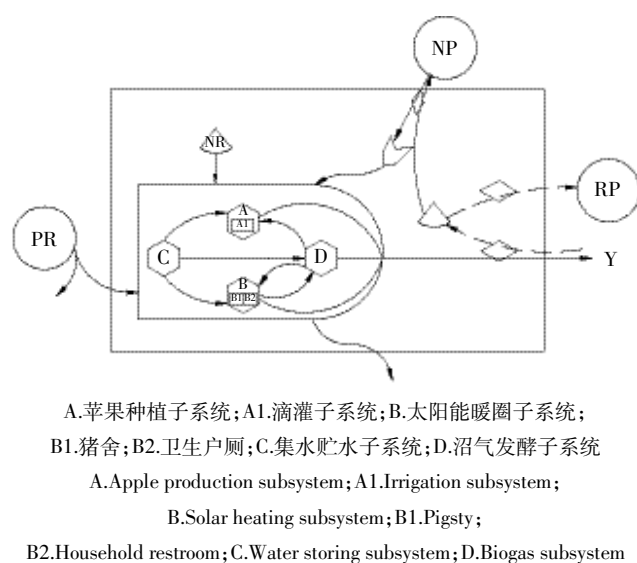


图2 “五配套”生态果园系统能值流

Figure 2 Energy flow of the "Five-in-One" orchard system

表 2 “五配套”生态果园系统能值核算表
Table 2 Energy accounting of the "Five-in-One" orchard system

分类 Category	项目 Item	单位 Units	原始数据 Raw data	能值转换率 Transformity/sej·unit ⁻¹	太阳能值 Solar emergy/sej·a ⁻¹	参考文献 References
RR	太阳光	J	1.80E+15	1.00E+00	1.80E+15	[29]
	雨水化学能	J	1.02E+12	1.54E+04	1.57E+16	[29]
	风能	J	2.98E+12	1.47E+03	4.38E+15	[29]
	地球旋转能	J	7.38E+11	2.90E+04	2.14E+16	[32]
	雨水势能	J	4.80E+12	8.89E+03	4.27E+16	[32]
	小计				8.60E+16	
NR	表土层净损失	J	4.74E+11	6.25E+04	2.96E+16	[32]
	小计				2.96E+16	
RP	人力	J	1.54E+11	3.08E+05	4.73E+16	[38]
	苹果种苗	J	2.55E+10	3.49E+04	8.90E+14	[39]
	仔猪	J	2.12E+11	1.71E+06	3.63E+17	[39]
	饲料	J	8.35E+11	6.80E+04	5.68E+16	[39]
	小计				4.68E+17	
NP	水窖建设	元	8.49E+03	8.32E+11	7.06E+15	[40]
	农业机械	J	1.00E+08	7.50E+07	7.50E+15	[39]
	沼气池建设	元	3.70E+04	8.32E+11	3.08E+16	[40]
	维修	元	5.99E+03	8.32E+11	4.98E+15	[40]
	农药	J	8.78E+02	1.62E+09	1.42E+12	[41]
	化肥	J	1.12E+03	2.80E+09	3.14E+12	[39]
	太阳能暖圈建设	元	9.57E+03	8.32E+11	7.96E+15	[40]
	附属工程	元	9.03E+02	8.32E+11	7.51E+14	[40]
	燃油	J	4.92E+08	6.60E+04	3.25E+13	[39]
	电力	J	1.43E+11	1.59E+05	2.27E+16	[38]
	小计				8.18E+16	
B	沼气(自用)	J	1.69E+10	4.17E+05	7.05E+15	[42]
	猪粪	J	1.76E+12	2.70E+04	4.75E+16	[43]
	尿及冲洗水	J	2.95E+08	6.38E+06	1.88E+15	[42]
	沼肥(折氮肥)	g	1.59E+07	4.62E+09	7.36E+16	[38]
	沼肥(折磷肥)	g	5.12E+05	1.78E+10	9.12E+15	[38]
	沼肥(折钾肥)	g	1.43E+03	2.96E+12	4.23E+15	[38]
	小计				1.43E+17	
Y	生猪	J	3.21E+11	3.36E+06	1.08E+18	[42]
	沼气	J	9.23E+11	4.17E+05	3.85E+17	[42]
	苹果	元	5.53E+06	8.32E+11	4.60E+18	[40]
	苹果枝叶	J	2.39E+10	3.49E+04	8.35E+14	[39]
	小计				6.07E+18	

园模式的系统可更新能力较强,有利于该模式在研究区内的大规模推广。

东马店村“五配套”生态果园系统总能值产出 6.07×10^{18} sej·a⁻¹,其中生猪、沼气、苹果和苹果枝叶分别占 17.79%、6.34%、74.50%、1.38%,因此苹果种植业和生猪养殖业是该模式的主要能值产出来源,两者对系统总产出的贡献率高于 90%,而其中能值产出最高

的是苹果,说明西北“五配套”生态果园模式的主要营利来源是苹果产业,这与刘娟娟等^[36]、高春雨等^[37]关于苹果在“五配套”系统中的经济效益高贡献率相符合。根据计算,可以发现果园残枝作为系统的废弃资源未被反馈利用,由此造成了约 12.6%的能值废弃率(废弃资源能值占总投入能值的比重),因此“五配套”模式应探索苹果枝叶等废弃物的资源化利用,如通过

炭化还田、腐化制有机肥等途径反馈到苹果种植子系统。

2.2.2 系统反馈能值分析

为方便“五配套”生态果园模式的特征分析,探究该模式与其他类型的沼气循环农业模式及单纯苹果种植模式的共性和差异,本文对比研究了其他两类沼气循环农业系统——“猪-沼-粮”(PBG)系统^[43]“沼气生态村”(BEV)系统^[42],以及一类单一苹果种植系统(SAP)^[39],三类对照系统的能值投入产出情况见表 3,其中沼气循环农业模式以各自的单元系统运行一年作为核算依据,单一苹果种植模式则以同等面积的果园系统运行一年作为核算依据。“五配套”系统的反馈能值为 1.43×10^{17} sej·a⁻¹,占系统能值总投入的17.70%,整体上反映了“五配套”生态果园具有较强的资源利用效率和自我更新能力,能够在较大程度上提高系统的能值效益,然而与其他沼气循环农业系统相比,在某些方面具有相对明显的差异。

如表 3 所示,“猪-沼-粮”系统、沼气生态村系统和单一苹果种植系统的反馈能值占系统能值总投入的比例分别为 11.31%、29.23%和 0%。“五配套”生态果园与沼气生态村、“猪-沼-粮”系统均是沼气循环农业系统,但其反馈能值比率却高于“猪-沼-粮”系统(图 2a),低于沼气生态村系统(图 2b),产生较大差异主要是由系统循环产业链和系统内的物种生物多样性不同造成的,如在沼气生态村系统中,由花卉苗木、果园和特色种植所生产的大量有机饲料反馈到养殖业子系统,且整体上其循环产业链的长度明显大于“五配套”系统,从而形成相对“五配套”生态果园更高比率的反馈能值以及系统稳定性。而在单一苹果种植系统中,反馈能值为 0,可见以沼气为纽带的复合系统由于连通了养殖业与种植业,形成了一定的能值反馈流,从而可以更为高效地实现部分农牧业产品及其

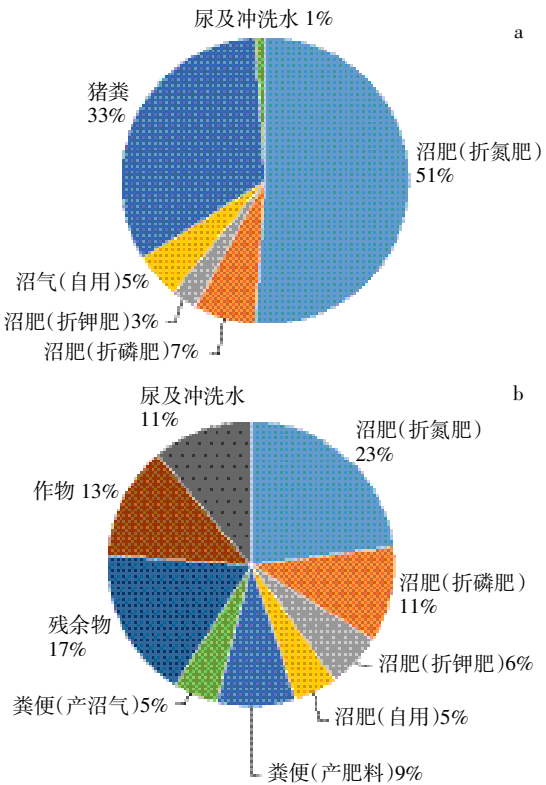


图 2 “猪-沼-粮”系统(a)和沼气生态村系统(b)的反馈能值结构
Figure 2 Feedback energy structure of the PBG system(a) and BEV systems(b)

他废弃物的资源化利用,提高系统的资源利用率与生产效率。

2.3 系统可持续性评价

2.3.1 资源利用及清洁生产分析

东马店村“五配套”生态果园系统与“猪-沼-粮”系统、沼气生态村系统、单一苹果种植系统的能值评价指标见表 4。资源利用及清洁生产是表征农业生态系统综合发展能力的重要表现,也是现阶段我国对农业生产效率和产品质量提出的新要求,它不仅要求农

表 3 “五配套”及三类对照系统的投入产出能值分析表
Table 3 Energy input and output of the "Five-in-One" orchard system and three control systems

项目 Item	“五配套”系统 DFO system/sej·a ⁻¹	“猪-沼-粮”系统 PBG system/sej·a ⁻¹	沼气生态村系统 BEV system/sej·a ⁻¹	单一苹果种植系统 SAP system/sej·a ⁻¹
RR	8.60E+16	1.42E+14	1.35E+18	1.97E+19
NR	2.96E+16	2.49E+13	1.15E+17	4.82E+18
RP	4.68E+17	2.77E+16	3.72E+19	4.44E+20
NP	8.18E+16	4.72E+15	5.75E+18	5.65E+21
B	1.43E+17	4.14E+15	1.83E+19	0
T	8.08E+17	3.66E+16	6.26E+19	6.12E+21
Y	6.07E+18	3.86E+17	1.91E+20	5.37E+20

业生产过程中注重一次资源的高效利用以及二次资源的重复利用,还要求不以更多化肥、农药等资源投入为代价。能值自给率反映了系统建设中环境资源投入的比重,由表 4 可知,“五配套”系统的 ESR 明显高于其他两类沼气循环农业系统,说明该系统对购买的资源投入依赖程度较小,对从自然环境中获取的资源比重较大,能够保持长期的发展稳定性。从废弃能值角度来看,东马店村“五配套”生态果园系统与沼气生态村系统相当,低于单一苹果种植系统,产生废弃能值的原因主要是苹果种植产生的残枝落叶未被有效利用,将来应考虑利用生物质炭化还田、腐化制成有机肥、提高系统内生物多样性(如香菇种植)等方法充分利用该类资源。

2.3.2 系统生产效率性能分析

对于大部分农业复合生态系统,唯有源源不断的经济效益才能从根本上解决发展问题,提高农业生产的积极性。经分析,东马店村“五配套”生态果园系统具有较高的能值产出率(11.10),相当于沼气生态村系统的 2.5 倍,单一苹果种植系统的 4 倍,这说明在投入同等能值的情况下,“五配套”系统的产出能值更高,产品所带有的价值量更高,如本研究区所生产的苹果等产品,由于大量采用有机肥,较少使用化肥而具有更高的品质效益,所生产的苹果口感和营养均优于其他地区。根据表 4 的指标数据,“五配套”系统的能值投资率明显低于“猪-沼-粮”系统和沼气生态村系统,能值投资率是表征系统对环境资源依赖程度的能值指标,该结果说明其能值投入中需要购买的能值比重相对其他两类系统较低,通过对能值投入结构的分析,可以发现“五配套”系统需要更多的太阳能和雨水能投入,这与太阳能暖圈子和集水贮水子系统的功能特征有关,这些子系统易受温度、水分等自然条件的影响,因此需要大量的能值投入以维持其正常

运转。

2.3.3 可持续发展性能分析

随着“减量化、再利用和再循环”原则在我国农业发展进程中的不断深化,环境友好发展已成为表征农业生态系统综合能力的重要体现。东马店村“五配套”系统的系统可更新率为 68.56%,除可更新购买的有机能值投入,人畜粪便和沼液、沼渣等有机物的反馈也为整个系统的可更新能力作出了不可忽略的贡献,东马店村“五配套”系统与“猪-沼-粮”系统、沼气生态村系统的可更新能力相似,均高于 50%,且相比单一苹果种植系统均有明显提高,这体现了沼气循环农业模式在自我更新方面的优越性,同时也表明种养产业结合的系统要比单一产业系统具有更强的活力和可持续性。东马店村“五配套”系统的环境负荷率与“猪-沼-粮”模式、沼气生态村基本持平,但明显低于单一苹果种植系统的环境负荷率(2.77),这表明“五配套”生态果园模式的建设对环境的破坏力较小,能够取得良好的生态效益,但据 Wu 等^[30]的研究可以发现,本文所研究的三类沼气循环农业系统的环境负荷率均处在较低水平,这表明该类系统的科技水平目前尚低,未来的建设应该更加注重沼气物联网、智慧农业等前沿技术的应用。

可持续性和稳定性是衡量沼气循环农业系统综合性能的根本体现,也是研究所有生态系统能值评估的落脚点。东马店村“五配套”生态果园系统、“猪-沼-粮”生态系统、沼气生态村复合系统和单一苹果种植系统的可持续发展指数分别是 69.10、69.93、43.16 与 0.97,由此可见,“五配套”生态果园系统与“猪-沼-粮”系统类似,其系统可持续性指数相当于沼气生态村系统的 1.6 倍、单一苹果种植系统的 71 倍,相比沼气生态村系统和单一苹果种植系统具有更强的环境可持续性,充分体现了“五配套”生态果园系统良好的

表 4 东马店村“五配套”系统的能值指标分析

Table 4 Energy indices of the "Five-in-One" system in Dongmadian Village

能值指标 Energy Indices	“五配套”系统 DFO system	猪-沼-粮系统 PBG system	沼气生态村系统 BEV system	单一苹果种植系统 SAP system
R%	68.56	84.97	86.77	26.48
ESR	0.14	5.0×10^{-3}	3.30×10^{-2}	0.23
EWR	1.03×10^{-3}	0	3.94×10^{-4}	1.33×10^{-2}
ELR	0.16	0.17	0.15	2.77
FYE	0.26	0.17	0.43	0
EIR	4.76	193.93	29.34	3.37
EYR	11.10	11.89	4.46	2.69
ESI	69.10	69.93	43.16	0.97

系统活力和发展潜能。

2.3.4 温室气体减排效益分析

如表 5 所示,“五配套”生态果园系统表现出整体核算上的 GHG 减排效益,其减排潜力高达 1 251.99 kg CO₂-eq·a⁻¹。除发酵原料、沼肥及沼气燃烧所替代的燃煤之外,其他均为温室气体排放项,且由化肥施用导致的温室气体排放最为严重(78.92%),基础建设和沼气燃烧亦分别造成了 14.02%和 7.05%的排放量。由此可见,大力实施“两减一增”及“有机肥替代化肥”等措施,将有利于以沼气为纽带的生态农业系统可持续发展。在 GHG 减排项中,燃煤替代和沼肥还田分别避免了-975.42 kg CO₂-eq 与-1 290.79 kg CO₂-eq 的 GHG 排放,是整个系统最为可观的环境效益来源。此外,将养殖模块产生的猪粪反馈于沼气模块进行厌氧发酵,带来了约 7%的温室气体减排量。

3 结论

(1)“五配套”生态果园作为一种典型的沼气循环农业模式,同“猪-沼-粮”、“猪-沼-菜”及其他种养结合模式类似,相比单纯的农作物种植系统,整体上具有自我更新能力强、环境负荷小、生产效率和投资收益率高、系统可持续性强等特征。

(2)“五配套”系统由沼气发酵、太阳能暖圈、集水贮水、苹果种植及节灌保墒五个部分构成,系统通常以县域或乡镇为尺度进行建设,其循环产业链较长,整体能值反馈率高达 26%,因此其内部反馈能值流更为复杂,具有良好的产业带动能力和系统稳定性。

(3)“五配套”生态果园模式的建设对环境的破坏力较小,能够取得良好的经济效益和生态效益,但自然资源开发程度较低,应注重引进更为先进的现代技

术,降低人工和传统资源投入,提升高品质能值生产效率,且该系统能值废弃率偏高,应进一步提高系统的生物多样性,逐渐丰富和调控各子系统间的能值反馈结构,以实现更优的能值产投效益。

(4)“五配套”生态果园系统表现出整体核算上的 GHG 减排效益,其减排潜力高达 1 251.99 kg CO₂-eq·a⁻¹,效益来源主要包括猪粪作为发酵原料的反馈投入、沼肥农用以及由沼气燃烧带来的燃煤替代。基于此,各类沼气工程常被纳入清洁发展机制(CDM)减排项目,产生了显著的综合效益。

参考文献:

[1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2016.
The People's Republic of China National Bureau of Statistics. Statistical yearbook of China[M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.

[2] 王 飞,蔡亚庆,仇焕广. 中国沼气发展的现状、驱动及制约因素分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 184-189.
WANG Fei, CAI Ya-qing, QIU Huan-guang. Current status, incentives and constraints for future development of biogas industry in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(1): 184-189.

[3] 王同军. “五位一体”生态果园模式的研究与应用[J]. 科学种养, 2014 (2): 56-56.
WANG Tong-jun. Research and application of the "Five in One" eco-orchard model[J]. Scientific Farming, 2014(2): 56-56.

[4] 韩 玉,龙 攀,陈源泉,等. 中国循环农业评价体系研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(9): 1039-1048.
HAN Yu, LONG Pan, CHEN Yuan-quan, et al. Research progress of e-valuation system for China circular agriculture development[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(9): 1039-1048.

[5] Akıncı H, Özalp A Y, Turgut B. Agricultural land use suitability analysis using GIS and AHP technique[J]. Computers and Electronics in A-

表 5 东马店村“五配套”生态果园系统温室气体减排效应分析
Table 5 GHG mitigation analysis of the "Five-in-One" system in Dongmadian Village

项目 Item	CO ₂ /kg	CH ₄ /kg	N ₂ O/kg	CO/kg	温室气体排放量 GHG emissions/kg CO ₂ -eq	排放比例 Mitigation percentage/%
基础建设	166.57	0.01	—	0.01	166.84	14.02
化肥施用	766.57	1.82	0.42	0.88	938.99	78.92
运输耗能	1.56	0	—	0.58	2.72	<1
设备折旧	0.31	0	0.01	0.03	3.35	<1
猪粪发酵	0	-7.26	—	—	-181.5	—
沼肥还田	-908.14	-2.23	-1.09	-1.04	-1 290.79	—
沼气燃烧	83.42	0	—	0.20	83.82	7.05
燃煤替代	-974.58	0	—	-0.42	-975.42	—
合计	-864.29	-7.66	-0.66	0.24	-1 251.99	—

注:“—”表示未经核算或无法获得的数据。
Note: “—” indicates missing data.

- griculture, 2013, 97(3):71-82.
- [6] 李超, 李文峰, 李林润. 基于灰色关联度模型的区域农业生态系统可持续发展水平评价[J]. 生态科学, 2014, 33(2):373-378.
- LI Chao, LI Wen-feng, LI Lin-run. Assessment of regional agro-ecosystem sustainable development based on grey correlation and models[J]. *Ecological Science*, 2014, 33(2):373-378.
- [7] Yue Q, Xu X R, Hillier J, et al. Mitigating greenhouse gas emissions in agriculture: From farm production to food consumption[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 149:1011-1019.
- [8] Montaud J M, Pecastaing N, Tankari M. Potential socio-economic implications of future climate change and variability for Nigerien agriculture: A countrywide dynamic CGE-Microsimulation analysis[J]. *Economic Modelling*, 2017(63):128-142.
- [9] Sain G, Loboguerrero A M, Corner-Dolloff C, et al. Costs and benefits of climate-smart agriculture: The case of the Dry Corridor in Guatemala[J]. *Agricultural Systems*, 2017, 151:163-173.
- [10] Montgomery B, Dragičević S, Dujmović J, et al. A GIS-based logic scoring of preference method for evaluation of land capability and suitability for agriculture[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, 124:340-353.
- [11] Scheepens A E, Vogtlander J G, Brezet J C. Two life cycle assessment (LCA) based methods to analyse and design complex (regional) circular economy systems. Case: Making water tourism more sustainable[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 114:257-268.
- [12] Ma F J, Eneji A E, Liu J T. Assessment of ecosystem services and dis-services of an agro-ecosystem based on extended emergy framework: A case study of Luancheng County, North China[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 82(1):241-251.
- [13] Wang X L, Li Z J, Long P, et al. Sustainability evaluation of recycling in agricultural systems by emergy accounting[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 117:114-124.
- [14] Lu H F, Wang Z H, Campbell D E. Emergy and eco-emergy evaluation of four forest restoration modes in Southeast China[J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(2):277-285.
- [15] 李渝, 蒋天明, 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.
- LI Yu, JIANG Tai-ming, TAO Yu-hang. Energy analysis of pig-methane-grain, vegetable(fruit) circular agricultural model[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2011, 39(1):148-151.
- [16] Lefroy E, Rydberg T. Emergy evaluation of three cropping systems in Southwestern Australia[J]. *Ecological Modelling*, 2003, 161(3):195-211.
- [17] Cheng H, Chen C D, Wu S J, et al. Emergy evaluation of cropping, poultry rearing, and fish raising systems in the drawdown zone of Three Gorges Reservoir of China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 144:559-571.
- [18] Yi T, Xiang P A. Emergy analysis of paddy farming in Hunan Province, China: A new perspective on sustainable development of agriculture[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 10(15):2426-2436.
- [19] 李轶, 吕续凤, 易维明, 等. 北方“四位一体”农村能源生态模式的能流分析及系统评价[J]. 可再生能源, 2009, 27(3):70-73.
- LI Yi, LÜ Xu-feng, YI Wei-ming, et al. Study on energy-flow analysis and assessment of "Four-in-One" energy-ecology model in rural area in the North of China[J]. *Renewable Energy*, 2009, 27(3):70-73.
- [20] 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 Yun-guan, QIN Pei. Emergy value evaluation on rice-duck organic farming mode[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(2):237-242.
- [21] Fang W, An H Z, Li H J, et al. Accessing on the sustainability of urban ecological-economic systems by means of a coupled emergy and system dynamics model: A case study of Beijing[J]. *Energy Policy*, 2017, 100:326-337.
- [22] Wang X L, Dadouma A, Chen Y Q, et al. Sustainability evaluation of the large-scale pig farming system in North China: An emergy analysis based on life cycle assessment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 102:144-164.
- [23] He J, Wan Y, Feng L, et al. An integrated data envelopment analysis and emergy-based ecological footprint methodology in evaluating sustainable development, a case study of Jiangsu Province, China[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 70:23-34.
- [24] 童悦, 毛传澡, 严力蛟. 基于能值-生态足迹改进模型的浙江省耕地可持续利用研究[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(5):664-670.
- TONG Yue, MAO Chuan-zao, YAN Li-jiao. Study on sustainable utilization of cultivated land in Zhejiang Province based on modified emergy-ecological footprint model[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, 31(5):664-670.
- [25] Buonocore E, Vanoli L, Carotenuto A, et al. Integrating life cycle assessment and emergy synthesis for the evaluation of a dry steam geothermal power plant in Italy[J]. *Energy*, 2015, 86:476-487.
- [26] 邱凌. “五配套”生态果园工程模式优化设计[J]. 农村能源, 2001, 97(3):14-16.
- QIU Ling. Optimum design for model of "5 Complete Sets" eco-orchard engineering[J]. *Rural Energy*, 2001, 97(3):14-16.
- [27] 李艳, 陈秀峰. 渭北黄土高原“果-畜-沼-窖-草”生态果园模式初探[J]. 中国沼气, 2003, 21(4):46-47.
- LI Yan, CHEN Xiu-feng. A Model of Eco-orchard in Northern Shaanxi Province[J]. *China Biogas*, 2003, 21(4):46-47.
- [28] 李典荣, 王淑荣, 李桂秀. 沼气生态农业是实现农业可持续发展的有效途径[J]. 可再生能源, 2004(4):57-58.
- LI Dian-rong, WANG Shu-rong, LI Gui-xiu. Biogas ecological agriculture is an effective way to realize the sustainable development of agriculture[J]. *Renewable Energy Resources*, 2004(4):57-58.
- [29] Odum H T. Environmental accounting: Emergy and environmental decision making[M]. New York, USA: John Wiley and Sons, 1996.
- [30] Wu X H, Wu F Q, Tong X G, et al. Emergy and greenhouse gas assessment of a sustainable, integrated agricultural model (SIAM) for plant, animal and biogas production: Analysis of the ecological recycle of wastes[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015, 96:40-50.
- [31] Odum H T. Self-organization, transformity, and information[J]. *Science*, 1988, 242(4882):1132-1139.

- [32] 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 Sheng-fang, QIN Pei, LU Hong-fang. Value analysis to ecological economic system[M]. Beijing: Chemical Industry Press. 2002.
- [33] Brown M T, Arding J. Tranformities working paper[M]. Gainesville, FL, USA: Center for wetlands, University of Florida, 1991.
- [34] Brown M T, Ulgiati S. Emergy evaluations and environmental loading of electricity production systems[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2002, 10(4): 321-334.
- [35] 骆世明. 农业生态学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.
- LUO Shi-ming. Agricultural ecology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2003.
- [36] 刘娟娟, 邱凌, 苑建伟. 黄土高原沼气生态果园经济效益评价[J]. 农机化研究, 2007(4): 49-52.
- LIU Juan-juan, QIU Ling, YUAN Jian-wei. Benefit evaluation of economy on loess altiplate biogas eco-orchard model[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2007(4): 49-52.
- [37] 高春雨, 毕于运, 赵世明, 等. “五配套”生态家园模式经济效益评价: 以陕西洛川县“果-畜-沼-窖-草”模式为例[C]//生态农业标准体系及循环农业发展全国学术研讨会论文集, 2007, 16(5): 1287-1292.
- GAO Chun-yu, BI Yu-yun, ZHAO Shi-ming, et al. Economic benefit evaluation of "Five in One ecological model: A case study based on "fruit-livestock-biogas-pit-grass" model in Luochuan County of Shaanxi[C]//National Academic Seminar of Eco-agriculture Standard System and the Development of Circular Agriculture of China, 2007, 16(5): 1287-1292.
- [38] 林聪, 魏晓明, 姜文腾. 沼气工程生态模式能值分析[C]//中国农村生物质能源国际研讨会暨东盟与中日韩生物质能源论坛论文集, 2008: 240-246.
- LIN Cong, WEI Xiao-ming, JIANG Wen-teng. Energy analysis of biogas project ecological model[C]// Proceedings of International Seminar on Rural Biomass Energy & ASEAN Plus Three(China, Japan and Korea) Forum on Biomass Energy, 2008: 240-246.
- [39] 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.
- WANG Hong-hong, WU Fa-qi, LI Rong-biao. Energy analysis of apple fruit industry ecosystem in the Loess Plateau[J]. *Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition)*, 2008, 36(7): 64-70.
- [40] 孟祥海, 周海川, 张郁, 等. 农牧渔复合生态养殖系统能值分析[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(1): 133-142.
- MENG Xiang-hai, ZHOU Hai-chuan, ZHANG Yu, et al. Emergy analysis of agriculture-livestock-fisheries compound ecological breeding system[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, 32(1): 133-142.
- [41] 王金照, 尚宗元, 王忠贤, 等. 陕北和关中农户苹果产业生态系统能值分析[J]. 林业经济, 2010(3): 94-98.
- WANG Jin-zhao, SHANG Zong-yuan, WANG Zhong-xian, et al. Emergy value analysis comparison of farmers' apple industry ecosystem in central and northern Shaanxi[J]. *Forestry Economics*, 2010(3): 94-98.
- [42] 段娜, 林聪, 刘晓东, 等. 以沼气为纽带的生态村循环系统能值分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊1): 261-268.
- DUAN Na, LIN Cong, LIU Xiao-dong, et al. Energy analysis of biogas-linked eco-village circulating system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(Suppl 1): 261-268.
- [43] 孙路, 田国成, 吴发启. 关中“猪-沼-粮”循环农业的能值评价[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(2): 246-252.
- SUN Lu, TIAN Guo-cheng, WU Fa-qi. Emergy evaluation of a Pig-Methane-Grain circular agricultural mode in Guanzhong Plain[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(2): 246-252.