

成都平原不同秸秆还田模式下稻麦 轮作农田系统能值分析

黄春^{1,2}, 邓良基^{1,2}, 杨娟^{1,2}, 周伟^{1,2}

(1. 四川农业大学 资源学院, 四川 温江 611130; 2. 四川省土地资源信息实验室, 四川 温江 611130)

摘要: [目的] 探索成都平原高产条件下稻麦轮作农田系统适宜的秸秆还田模式, 为区域秸秆资源的农业循环再利用和农田系统的可持续发展提供一定的实践指导与科学依据。[方法] 在田间定位试验中, 设置了常规施肥(CF)、秸秆半量还田(CFS₁)、秸秆全量还田(CFS₂)和秸秆 1.5 倍量还田(CFS₃)4 种施肥模式, 应用能值分析方法探讨了不同农田系统的能值投入产出总量、结构及综合指标的变化。[结果] (1) 从能值结构看, 较 CF 模式, 秸秆还田模式降低了农田系统能值投入中工业辅助能的比重, 增强了系统的自给能力, 并提高了系统总能值产出; (2) 从能值指标看, 较 CF 模式, 秸秆还田模式提高了农田系统的净能值产出率、能值投入率、能值反馈率、能值生产力和能值—劳动生产率, 降低了环境负载率, 有效提升了农田系统的可持续发展性能, 增强了系统的发展潜力, 其中 CFS₂ 和 CFS₃ 模式的养分物质内部循环利用率较高, 环境负载率较小, 有利于农田系统的持续、高效运行。[结论] CFS₂ 和 CFS₃ 模式是成都平原稻麦轮作农田较优的秸秆还田生产模式。

关键词: 能值分析; 秸秆还田; 稻麦轮作; 成都平原

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)02-0336-08

中图分类号: X712, S181

Emergy Analysis of Farmland Eco-system with Different Straw Returning Modes of Rice—Wheat Rotation in Chengdu Plain

HUANG Chun^{1,2}, DENG Liangji^{1,2}, YANG Juan^{1,2}, ZHOU Wei^{1,2}

(1. College of Resources, Sichuan Agricultural University, Wenjiang, Sichuan 611130, China; 2. Key Laboratory of Land Information in Sichuan Province, Wenjiang, Sichuan 611130, China)

Abstract: [Objective] To find out a suitable straw returning mode for the rice-wheat rotation ecosystem with high yield in Chengdu Plain, and to offer a scientific basis for the efficient operation of regional farmland system. [Methods] Four treatments in field experiment was designed according to applied straw quantities, i. e., chemical fertilizer only(CF), chemical fertilizer plus a half of straw returning(CFS₁), chemical fertilizer plus total straw returning(CFS₂), chemical fertilizer plus 1.5 times of straw returning(CFS₃). Based on emergy analysis method, we studied the changes of total amount of emergy input and output, the structure of emergy input and output and the emergy indexes among different fertilization treatments. [Results] (1) The results showed that, as compared to CF mode, other straw returning modes lowered the proportion of the non-renewable industrial assistant emergy to the total emergy input and increased the level of self-supply ability and the total emergy output. (2) From the perspective of the emergy indexes, as compared to the CF mode, straw returning modes had higher levels of net emergy yield ratio, emergy input ratio, emergy feedback ratio, emergy productivity and emergy-labor productivity, and had lower levels of environmental load ratio. Straw returning modes effectively improve the sustainable development ability of farmland system, especially CFS₂ and CFS₃ modes had the lower environmental load ratio and the higher emergy sustainable index. [Conclusion] Modes of CFS₂ and CFS₃ are the suitable straw returning modes under a rice-wheat rotation in Chengdu Plain.

Keywords: emergy analysis; straw returning; rice-wheat rotation; Chengdu Plain

收稿日期: 2014-03-06

修回日期: 2014-03-28

资助项目: 四川省科技支撑计划项目“农田有机质提升关键技术应用与推广”(2013NZ0027)

第一作者: 黄春(1985—), 男(汉族), 四川省江安县人, 博士, 主要研究方向为农业废弃物循环利用。E-mail: 79412310@qq.com。

通信作者: 邓良基(1957—), 男(汉族), 四川省泸县人, 教授, 主要从事农业资源利用方面的研究。E-mail: auh6@sicau.edu.cn。

农作物秸秆是重要的有机肥源物质^[1-2]。在农业生产的基本循环中,秸秆还田对保持土地肥力、防止土壤侵蚀、维持作物可持续生产具有重要作用^[3]。然而,长期以来秸秆作为一类资源并没有得到充分的利用,大量的秸秆被胡乱丢弃、无控焚烧,不仅造成了巨大的资源浪费(全国约 23% 的秸秆被露天焚烧^[4],而每燃烧 1.00×10^6 t 秸秆约损失自然肥力 5.00×10^4 t^[5]),使本就短缺的资源更加紧张,而且导致了严重的环境污染,使区域生态环境日趋恶化^[6]。成都平原作为我国主要的粮油生产基地之一,其农田系统建设直接关系到我国农业综合生产能力的提高和粮食安全的保障。近年来,随着农业现代化、集约化程度的提高以及化肥工业的迅速发展,现代“石油农业”所特有的高投入和农田污染问题,已在成都平原粮区出现,由此导致了区域农田系统过度开发利用,土壤肥力不高、酸化加剧以及复合性污染日趋严重^[7],极大地制约了农田系统的可持续发展。同时,由于区域农作物秸秆产出量大,且小春作物收获后,茬口紧,导致农作物秸秆,特别是小春作物秸秆不能及时合理利用,秸秆就地焚烧、弃置乱堆现象时有发生^[8]。近年来,随着循环农业理念的引领,成都平原

二、三圈层的各个区(市)县均建立了较大面积的秸秆还田核心示范区,以带动区域秸秆资源的还田利用。但还田后的农田系统功能效益如何,目前还鲜见系统的分析报道。因此,本研究以农田系统为边界,利用能值分析这一生态经济学研究方法,定量分析成都平原不同秸秆还田模式下稻麦轮作农田系统的投入、产出水平,揭示不同农田系统的生产效率、环境负荷等状况,探讨秸秆还田下农田系统的可持续性,进而为高产条件下科学选择秸秆还田模式及区域农田可持续发展提供一定的实践指导与科学依据。

1 材料与方法

1.1 田间定位试验

田间定位试验于 2011 年 5 月在成都市都江堰市天马镇金陵村四川农业大学试验田开展($30^{\circ}57'0.99''$ N, $103^{\circ}44'3.69''$ E)。选取 2012 年 11 月至 2013 年 9 月的稻麦轮作试验数据进行分析。试验区属亚热带湿润季风气候区,年均气温 15.2°C ,年均降水量 1 200 mm,无霜期多年平均为 280 d。供试土壤为长期免耕的淹育型水稻土(由灰色冲积物发育而成)。土壤 0—20 cm 土层的主要化学性质详见表 1。

表 1 供试土壤主要化学性质

土层/cm	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	pH 值	碱解氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全磷/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全钾/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
0—20	39.6	6.98	176	11.6	58.2	1.87	0.86	32.2

表 2 为各试验处理的具体施肥情况。试验共设 4 个处理(表 2): (1) 常规施肥处理(CF); (2) 秸秆半量还田处理(CFS₁,按草谷比 1:1 计,下同); (3) 秸秆全量还田处理(CFS₂); (4) 秸秆 1.5 倍量还田处

理(CFS₃)。小区面积为 20 m^2 ($4 \text{ m} \times 5 \text{ m}$),重复 3 次,随机排列,四周设保护行。每个小区均单设进、排水口,田埂用 6 丝的薄膜相互间隔至犁底层,以防肥、水相互渗透。

表 2 试验处理施肥配方

kg/hm²

处理	水稻			麦秆	小麦			稻草
	氮肥	磷肥	钾肥		氮肥	磷肥	钾肥	
CF	180	75	75		180	135	135	
CFS ₁	180	75	75	2 625	180	135	135	3 750
CFS ₂	180	75	75	5 250	180	135	135	7 500
CFS ₃	180	75	75	7 875	180	135	135	11 250

注:所有无机肥均为折纯后的施用量;秸秆施用量根据区域稻麦常年产量计算(草谷比 1:1 计)。

供试无机肥料为市售尿素(46.4%N),过磷酸钙($12\% \text{P}_2\text{O}_5$)和氯化钾($60\% \text{K}_2\text{O}$)。根据当地小麦(水稻)种植的施肥习惯,在小麦季,磷、钾肥和稻草均以基肥形式一次性施入,而氮肥 50% 作为基肥,50% 作为拔节期追肥;在水稻季,除 50% 的钾肥在水稻扬花前施用外,其余无机肥在水稻移栽后立即施入各小区,而麦秆则在水稻移栽 4 d 后施入。所有肥料的施

用均为表施(秸秆为粉碎后表施),并根据当地水稻和小麦种植的田间管理措施对试验区进行统一管理,且作物收割时秸秆留茬高度低于 5 cm。小麦种植品种为内麦 863;水稻种植品种为福优 310(大田育秧)。小麦于 2012 年 11 月 5 日播种,按 150 kg/hm^2 麦种均匀播撒,于 2013 年 5 月 6 日收割测产。水稻于 2013 年 3 月 29 日播种育秧,5 月 13 日移栽,株距 \times

行距为 $13.3 \text{ cm} \times 26.7 \text{ cm}$, 每穴 3 苗, 在 9 月 8 日收割测产。在水稻生长过程中各小区均为独立灌排。在水稻和小麦生长过程中, 适时防治病、虫害。水稻和小麦均生长正常。

1.2 能值分析方法

能值分析方法是由美国生态学家 Odum 经过长期的研究, 综合系统生态、能量生态和生态经济原理, 于 20 世纪 80 年代末提出的。它是在传统能量分析的基础上, 将任何资源、产品或劳务形成所需的直接和间接的太阳能称为其所具有的太阳能值 (solar energy), 从而把各种形式的能量转化为统一的能值标准单位 (太阳能焦耳, solar emjoule, sej), 解决了传统能量分析方法中不同能量类别难于比较分析的瓶颈^[9]。该方法不但对认识生态系统能量的贮藏、流动及转化起到了很大的促进作用, 而且提供了一个可以把生态系统和经济系统进行定量分析的共同尺度, 从而为复合生态系统开拓了一条定量研究途径^[10]。农田系统的能值分析可分为 6 个步骤^[11-12]。

(1) 确定系统边界和内容。界定农田系统边界, 明确系统的主要能量来源, 并确定系统的主要成分及其相互间的能量流动关系。

(2) 资料收集与整理。通过调查、测定、计算和文献搜索, 收集与所研究农田系统的自然地理、经济状况、统计数据等各种资料, 获取系统的投入产出情况并整理分类。

(3) 绘制能量系统图。运用 Odum 提出的“能量系统语言”图例和生态系统图解方法, 绘制能量系统图 (图 1), 形成包括系统主要组分及相互关系的系统图解, 以求对研究对象有个整体观念。

(4) 编制能值分析表。列出所研究农田系统的主要能量输入和输出项目, 其中能量输入项目包括可更新环境资源 (太阳能、风能、雨水势能、雨水化学能等)、不可更新环境资源 (土壤表土层损失等)、不可更新工业辅助能 (化肥、农药、农膜、农机具等) 和可更新有机能 (人力、种子、秸秆等)。按照不同类别的资源进行归类, 并根据各类资源的能值转换率, 将不同度量单位的物质或能量转换为统一的能值计算单位, 编制系统能值分析表。需要指出的是, 在可更新环境资源投入中, 太阳光、雨水、风、地热等是同样气候、地球物理作用引起的不同现象, 为避免重复计算, 只取其中能值投入量最大的一项带入计算。

(5) 建立能值综合指标体系。在能值分析表和能值综合系统图的基础上, 进一步建立和计算出一系列反映农田系统的能值指标体系, 如太阳能值转换

率、净能值产出率、能值投入率、能值密度、环境负荷力和可持续发展指数等。

(6) 系统发展评价和策略分析。根据能值指标体系分析结果, 辨识所研究农田系统的优缺点和演变趋势, 制定正确可行的农田系统管理措施和发展策略, 以指导农田系统的可持续发展。

1.3 数据来源

原始数据主要来源于 3 个方面: 一是通过走访都江堰市气象局, 收集田间试验区气象方面的基础资料; 二是收集、整理试验区农田生产过程中的各类物力、人力投入数据; 三是通过田间定位试验, 获取农田生产中农作物籽粒和秸秆的产出数据。

2 结果与分析

2.1 能值投入产出分析

根据 Odum 创立的能量系统符号语言, 绘制出农田系统能量系统图 (以秸秆还田模式为例, 图 1)。按照能值分析方法的有关概念及分析步骤, 结合研究数据, 分析得出不同施肥模式下农田系统的能值投入和产出结构, 具体结果详见表 3—4。为了更直观地观察分析数据, 将不同施肥模式的能值分析数据进行汇总编制, 得出不同模式下农田系统能值分析汇总表 (表 5)。

2.1.1 能值投入结构分析

(1) 可更新环境资源投入。投入到农田系统中的可更新环境资源包括太阳光、雨水、风和地热, 其能值投入主要与试验区的面积大小、气候条件有关^[16]。由于可更新环境资源中的几种输入能量是同样气候、地球物理作用引起的不同现象, 因而为避免重复计算, 只取其中能值投入量最大的一项带入计算。由此, 在不同施肥模式下的农田系统中, 可更新环境资源的能值投入量相同, 均为 $3.26\text{E}+15 \text{ sej/hm}^2$, 即雨水化学能投入。

(2) 不可更新工业辅助能投入。农田系统的不可更新工业辅助能投入主要包括工业化肥、农药、柴油等工业消耗品投入。4 个农田系统中不可更新工业辅助能投入均约为 $1.74\text{E}+16 \text{ sej/hm}^2$, 仅在柴油投入上有一定的差异。在施肥管理模式, CF, CFS₁, CFS₂ 和 CFS₃ 处理的系统不可更新工业辅助能投入分别占其总辅助能值的 91.62%, 75.39%, 64.09% 和 55.74%, 占到其总能值投入的 78.18%, 66.06%, 57.22% 和 50.47%, 表明随着秸秆还田量的增加, 能值投入中工业辅助能的比重逐渐降低, 系统生产对于化肥等工业消耗品的依赖作用逐渐下降。

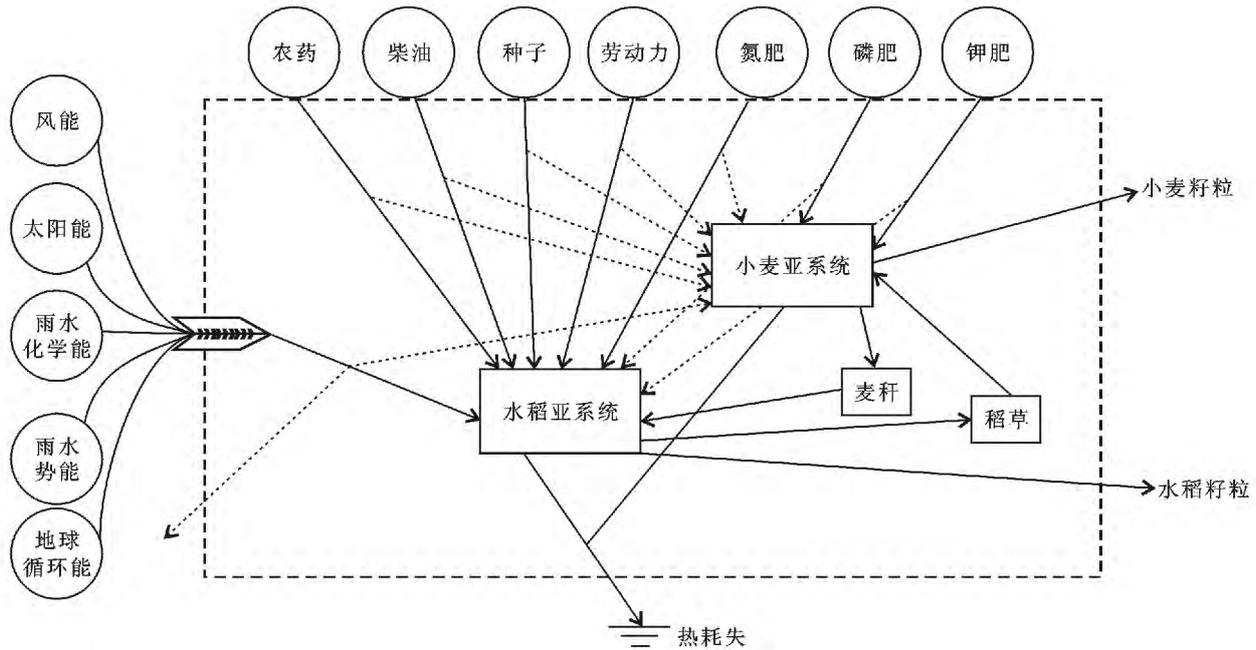


图 1 CFS₂ 处理下农田系统能量系统示意图

(3) 可更新有机能投入。可更新有机能主要包括种子、劳动力、稻草和麦秆等。4 个农田系统中可更新有机能投入的差异主要在于还田秸秆的投入。在施肥管理模式下,CF,CFS₁,CFS₂ 和 CFS₃ 处理的系统可更新有机能投入随着秸秆还田量的增加而增大,相应的其可更新有机能投入占总辅助能值和总能值投入的比例也逐渐增大,分别为 8.38%,24.61%,35.91%,44.26% 和 7.15%,21.57%,32.06%,40.07%。需要指出的是,CFS₁,CFS₂ 和 CFS₃ 处理的有机肥能值投入分别占其可更新有机能的 71.17%,82.95% 和 87.79%,表明秸秆还田处理的有机肥能值投入较高,提升了农田系统的物质内部循环利用,有利于系统的自我维持。

2.1.2 能值产出结构分析 由于不同管理模式农田系统的经济产量和秸秆产量不同,因而系统产出能值也存在较大差异。不同处理的总能值产出依次为: CFS₃>CFS₂>CFS₁>CF,能值产出量分别为 2.95E+16 sej/hm²,2.87E+16 sej/hm²,2.85E+16 sej/hm² 和 2.40E+16 sej/hm²,即总能值产出随着秸秆还田量的增加而增大。从能值产出结构来看,各处理的作物籽粒能值(有效能值产出)表现为:CFS₃>CFS₁>CFS₂>CF,分别占其总能值产出的 68.21%,70.58%,69.39% 和 71.57%,表明较 CK 处理,秸秆还田处理提高了作物经济产量和秸秆产量,更有利于区域农业生产发展。

表 3 不同施肥处理下农田系统的辅助能量投入与产出

序号	项目	折能系数	处理			
			CF	CFS ₁	CFS ₂	CFS ₃
投入	1 氮肥/kg		7.76E+05	7.76E+05	7.76E+05	7.76E+05
	2 磷肥/kg		1.75E+06	1.75E+06	1.75E+06	1.75E+06
	3 钾肥/kg		3.50E+05	3.50E+05	3.50E+05	3.50E+05
	4 农药/kg		2.25E+04	2.25E+04	2.25E+04	2.25E+04
	5 柴油/kg	4.02E+07	2.51E+09	2.72E+09	2.72E+09	2.73E+09
	6 水稻种子/kg	1.55E+07	2.33E+08	2.33E+08	2.33E+08	2.33E+08
	7 小麦种子/kg	1.57E+07	2.36E+09	2.36E+09	2.36E+09	2.36E+09
	8 劳动力/(人·d ⁻¹)	1.26E+07	1.13E+09	1.21E+09	1.25E+09	1.29E+09
	9 稻草/kg	1.42E+07		5.33E+10	1.07E+11	1.60E+11
	10 麦秆/kg	1.37E+07		3.60E+10	7.19E+10	1.08E+11
产出	1 水稻/kg	1.55E+07	1.27E+11	1.61E+11	1.56E+11	1.44E+11
	2 稻草/kg	1.42E+07	7.58E+10	9.71E+10	8.86E+10	9.41E+10
	3 小麦/kg	1.57E+07	8.40E+10	9.11E+10	9.21E+10	1.00E+11
	4 麦秆/kg	1.37E+07	7.51E+10	8.77E+10	1.05E+11	1.13E+11

注:农田生产中投入产出项的能量计算方法来自参考文献[12-15];由于氮肥、磷肥、钾肥和农药的能值转换率单位为 sej/g,因为在此表中未对此 4 项进行能量折算。各处理的具体施肥情况详见表 2。下同。

表 4 不同施肥处理下农田系统能值分析

序号	项目	能值转换率	太阳能值/(sej·hm ⁻²)			
			CF	CFS ₁	CFS ₂	CFS ₃
1	太阳能	1.00E+00	3.21E+13	3.21E+13	3.21E+13	3.21E+13
2	雨水化学能	3.50E+04	3.26E+15	3.26E+15	3.26E+15	3.26E+15
3	雨水势能	1.76E+04	2.09E+15	2.09E+15	2.09E+15	2.09E+15
4	风能	2.51E+03	1.70E+14	1.70E+14	1.70E+14	1.70E+14
5	地球循环能	5.80E+04	1.08E+15	1.08E+15	1.08E+15	1.08E+15
可更新环境资源投入			3.26E+15	3.26E+15	3.26E+15	3.26E+15
1	氮肥	6.37E+09	4.94E+15	4.94E+15	4.94E+15	4.94E+15
2	磷肥	6.54E+09	1.14E+16	1.14E+16	1.14E+16	1.14E+16
3	钾肥	1.84E+09	6.44E+14	6.44E+14	6.44E+14	6.44E+14
4	农药	2.68E+09	6.03E+13	6.03E+13	6.03E+13	6.03E+13
5	柴油	1.11E+05	2.78E+14	3.01E+14	3.02E+14	3.03E+14
不可更新工业辅助能投入			1.74E+16	1.74E+16	1.74E+16	1.74E+16
1	种子	3.35E+05	8.67E+14	8.67E+14	8.67E+14	8.67E+14
2	劳动力	6.37E+05	7.22E+14	7.71E+14	7.95E+14	8.19E+14
3	稻草	4.53E+04		2.41E+15	4.82E+15	7.24E+15
4	麦秆	4.53E+04		1.63E+15	3.26E+15	4.89E+15
可更新有机能投入			1.59E+15	5.68E+15	9.74E+15	1.38E+16
1	水稻	6.02E+04	7.64E+15	9.71E+15	9.41E+15	8.64E+15
2	稻草	4.53E+04	3.43E+15	4.40E+15	4.01E+15	4.26E+15
3	小麦	1.14E+05	9.58E+15	1.04E+16	1.05E+16	1.15E+16
4	麦秆	4.53E+04	3.40E+15	3.97E+15	4.77E+15	5.10E+15
能值产出			2.40E+16	2.85E+16	2.87E+16	2.95E+16

注:能值转换率来自参考文献[11-12,14-15];太阳能值转换率基于新的全球能值基线:15.83E+24 sej/a,即2000年前测算的太阳能值转换率需乘以1.6769进行校正。

表 5 不同施肥处理下农田系统能值分析汇总

序号	项目	表达式	处理/(sej·hm ⁻²)			
			CF	CFS ₁	CFS ₂	CFS ₃
1	可更新环境资源投入	E_{mR}	3.26E+15	3.26E+15	3.26E+15	3.26E+15
2	不可更新工业辅助能投入	E_{mF}	1.74E+16	1.74E+16	1.74E+16	1.74E+16
3	有机肥能值投入	E_{mR1}		4.04E+15	8.08E+15	1.21E+16
4	可更新有机能投入	E_{mT}	1.59E+15	5.68E+15	9.74E+15	1.38E+16
5	总辅助能值投入	$E_{mF} + E_{mT}$	1.90E+16	2.31E+16	2.71E+16	3.12E+16
6	总能值投入(E_{mU})	$E_{mR} + E_{mF} + E_{mT}$	2.22E+16	2.63E+16	3.04E+16	3.45E+16
7	作物籽粒(有效能值产出)	E_{mY1}	1.72E+16	2.01E+16	1.99E+16	2.01E+16
8	作物秸秆	E_{mY2}	6.84E+15	8.38E+15	8.78E+15	9.37E+15
9	总能值产出(E_{mY})	$E_{mY1} + E_{mY2}$	2.40E+16	2.85E+16	2.87E+16	2.95E+16
10	工业辅助能值/总投入能值	E_{mF}/E_{mU}	78.18%	66.06%	57.22%	50.47%
11	可更新有机能/总投入能值	E_{mT}/E_{mU}	7.15%	21.57%	32.06%	40.07%
12	工业辅助能值/总辅助能值	$E_{mF}/(E_{mF} + E_{mT})$	91.62%	75.39%	64.09%	55.74%
13	可更新有机能/总辅助能值	$E_{mT}/(E_{mF} + E_{mT})$	8.38%	24.61%	35.91%	44.26%
14	有机肥能值/可更新有机能	E_{mR1}/E_{mT}		71.17%	82.95%	87.79%

2.2 能值指标分析

根据不同管理模式农田系统的能值投入产出状况,计算出农田系统的主要能值指标(表6)。由表

6可以得出:(1)净能值产出率。净能值产出率(EYR)是农田系统中的产出能值与经济投入能值(购买能值)的比值,其值越高,说明系统相对产出量越

大,系统经济效益越好,市场竞争力越强。分析结果表明,CF, CFS₁, CFS₂ 和 CFS₃ 处理的农田系统 EYR 随着秸秆还田量的增加而增大,分别为 1.27, 1.50, 1.51 和 1.54。4 个农田系统的 EYR 均高于 1,说明各系统均存在能值利润,生产过程具有经济效益。与 CF 模式相比,秸秆还田模式下的农田系统具有更高的 EYR,这是由于秸秆还田模式提高了作物经济产量和秸秆产量,系统经济效益更好。因此,秸秆还田模式具有更强的市场竞争力。(2) 能值投入率。能值投入率是农田系统中的经济投入能值(购买能值)与从自然环境资源中无偿输入能值的比值,用于衡量系统经济发展程度,其值越大,表明系统经济发展水平越高。分析结果显示,CF, CFS₁, CFS₂ 和 CFS₃ 处理的农田系统能值投入率随着秸秆还田量的增加而增大,分别为 5.82, 5.84, 5.85 和 5.86。这表明较 CF 模式,秸秆还田模式对于每单位无偿环境资源的利用投入了相对较多的购买能值,其差异主要体现在劳动力投入上,因为定量秸秆还田比秸秆不还田花费了更多的人力,而这也说明秸秆还田模式对自然资源的开发程度更高。(3) 能值反馈率。能值反馈率是农田系统中还田有机肥的能值与经济投入能值(购买能值)的百分比,用以衡量系统的自组织能力。由于秸秆还田模式下农田系统增加了有机肥能值投入(秸秆覆盖还田),提升了系统物质循环强度,形成了循环农业生产模式,因而 CFS₁, CFS₂ 和 CFS₃ 处理的系统能值反馈率逐渐提高,分别为 21.24%, 42.42 和 63.55%,系统自组织能力逐渐增强。较秸秆还田模式,CF 模式下农田系统无有机肥还田,因此其能值反馈率为 0。(4) 能值生产力。能值生产力是农田系统单位土地面积的有效能值产出(作物籽粒能值),其值越大,说明系统有效能值产出越大,系统经济效益越好。在施肥管理模式下,农田系统能值生产力并未随着秸秆还田量的增加而增大,具体表现为 CFS₃ > CFS₁ > CFS₂ > CF,其中 CFS₃ 处理的系统能值生产力最高,达 2.01E+12 sej/hm²,CF 处理的最低,为 1.72E+12 sej/hm²。这与整个稻麦轮作周期各施肥处理的作物产量变化规律相吻合。(5) 能值—劳动生产率。能值—劳动生产率以太阳能值来表示劳动成果,比传统的劳动生产率更能全面和真实地反映与评价生产者的劳动效率。分析结果表明,CF, CFS₁, CFS₂ 和 CFS₃ 处理的农田系统能值—劳动生产率分别为 2.70E+14 sej/h, 2.97E+14 sej/h, 2.90E+14 sej/h 和 2.89E+14 sej/h,可见尽管定量秸秆还田比秸秆不还田花费了更多的人力,但其系统能值产出更大,因而

系统劳动效率得以提高。需要指出的是,在秸秆还田模式下,系统能值—劳动生产率随着秸秆还田量的增加而下降,但三者间差异不明显。(6) 环境负载率。环境负载率(ELR)是农田系统中投入的不可更新资源能值量与不可更新工业辅助能之和与可更新环境资源能值量的比值,用以衡量由于不可更新资源的输入和使用,对环境造成的压力和胁迫作用。从过去的研究案例中所得到的经验表明,ELR < 2,表明生态经济系统运行产生了相对较低的环境影响;2 < ELR < 10,表明系统运行产生了中度的环境影响;ELR > 10,则表明系统存在高强度的能值利用,系统经济活动对生态环境系统保持着较大压力,可能导致系统功能产生不可逆转的退化或丧失^[17]。分析结果显示,随着秸秆还田量的增加,施肥模式下农田系统的 ELR 从 3.58 逐渐下降至 1.02,可见 CF 模式下农田系统主要依靠不可更新工业辅助能的大量投入来获得较高的产量,其农业生态环境所受压力相对较大,应注意生态环境的保护,减少环境污染,而秸秆还田模式的可更新有机能投入较高,系统生产对不可更新工业辅助能的依赖相对较低,其所受环境压力也随之下降。同时,这也表明秸秆还田模式下农业环境资源还有进一步开发利用的潜力,可通过加大能值投入,特别是机械化投入,提高系统的运行效率。(7) 能值可持续发展指数。能值可持续发展指数(ESI)是农田系统的净能值产出率与环境负载率的比值,用以评价系统的可持续发展性能。根据已有研究成果,ESI < 1,表明系统是高度发展的消费驱动型生态经济系统,购入能值在能值总投入中所占比重较大,或对本地不可更新资源的利用率较高;1 < ESI < 10,则表明生态经济系统富有活力和发展潜力,系统发展可持续;ESI > 10,表示经济不活跃,资源的开发利用程度较低^[18]。

从表 6 中可以发现,CF, CFS₁, CFS₂ 和 CFS₃ 模式下农田系统 ESI 分别为 0.35, 0.77, 1.13 和 1.52,表明随着秸秆还田量的增加,农田系统的可持续发展性能不断增强,系统发展潜力不断增大。需要指出的是,按照以能值可持续发展指数对生态经济系统的分类标准,CF 和 CFS₁ 处理的农田系统属于消费驱动型生态经济系统,购入能值特别是工业辅助能在能值总投入中所占比重较大,系统运行对不可更新资源的利用率较高,系统发展不可持续,而这也一定程度上与两个系统生产过程中农田养分(如钾素)呈现亏缺的状况相印证(该成果尚未发表);相比之下,CFS₂ 和 CFS₃ 处理的农田系统则是可持续的,并具有较大的发展潜力。

表 6 不同施肥处理下农田系统能值评价指标体系

序号	项目	表达式	处理			
			CF	CFS ₁	CFS ₂	CFS ₃
1	净能值产出率(EYR)	$E_{mY}/(E_{mF}+E_{mT}-E_{mR1})$	1.27	1.50	1.51	1.54
2	能值投入率	$(E_{mF}+E_{mT}-E_{mR1})/E_{mR}$	5.82	5.84	5.85	5.86
3	能值反馈率	$E_{mR1}/(E_{mF}+E_{mT}-E_{mR1})$	0.00	21.24%	42.42%	63.55%
4	能值生产力/(sej·m ⁻²)	E_{mY1}/A	1.72E+12	2.01E+12	1.99E+12	2.01E+12
5	能值—劳动生产率/(sej·h ⁻¹)	E_{mY}/t	2.70E+14	2.97E+14	2.90E+14	2.89E+14
6	环境负载率(ELR)	$E_{mF}/(E_{mR}+E_{mT})$	3.58	1.95	1.34	1.02
7	能值可持续发展指数(ESI)	EYR/ELR	0.35	0.77	1.13	1.52

3 结果讨论

能值分析把环境资源的价值量化,从而阐明自然环境资源与经济的本质关系,是以往单纯的能量和经济分析所不能达到的,这对于各类资源的合理利用、制定经济发展方针及实施可持续发展战略具有重要意义^[19]。近年来,能值分析方法在农田系统研究上的应用也得到了广泛的关注和发展。邢开成等^[20]、熊凯等^[21]、赵桂慎等^[22]均应用能值分析方法评价了我国不同地区农田系统的发展水平,并针对性地提出了调控策略。可见,能值分析在研究农田系统运行效率上的作用已日益明显。本研究中,成都平原稻麦轮作农田系统在 CF 模式下的环境负荷率达到 3.58,高于 2005 年江苏省农田系统(2.83)^[23]、2006 年华北平原高产粮区(2.63)^[22]以及 2007 年湖北省集约农区(3.29)^[21]的环境负荷水平。这表明 CF 模式下成都平原稻麦轮作农田系统的发展已处于一种高投入高产出的状态,同时也反映出该模式下农田系统未来发展的环境压力较大。根据能值理论,系统外界能值过度输入以及对非更新资源高强度使用是导致系统环境恶化的一个重要原因^[24]。因此,CF 模式下农田系统环境负荷水平较高与大量不可更新资源如化肥、农药、燃油等投入比重较高有直接的关系,并由此导致了该农田系统的可持续发展能力相对较差。

秸秆是一种农田系统有机废弃物,然而其蕴藏着巨大的养分资源,作物吸收的养分近一半留在秸秆中^[2]。大量研究已表明,秸秆还田后在土壤微生物作用下发生腐解,释放出大量碳、氮、磷、钾以及中微量元素,从而能有效提升土壤肥力,促进作物增产^[25-27]。本研究中,较 CF 模式,秸秆还田模式提升了稻麦轮作农田系统的可更新有机能投入水平,使系统具有了良好的物质内部循环利用率和能值反馈特性,降低了系统生产对于不可更新工业辅助能的依赖,环境负荷较小,有利于系统的维持。这一规律在高雪松^[5]和蒋碧等^[16]的研究中也有体现。需要指出

的是,秸秆还田量的不同,其腐解速率及释放的养分量也不同,随之对农田系统的影响也会存在差异。本试验条件下,秸秆还田提高了农田系统的氮素、磷素和钾素物流强度,但在 CFS₁ 模式下农田系统钾素仍呈现出亏缺状态,亏缺量为 -76.69 kg/hm²,土壤钾库消耗较大,不利于系统的维持(该成果尚未发表)。因此,在本试验的施肥水平和常规田间管理条件下,无论从农田系统可持续发展能力还是养分平衡状况来看,CFS₂ 和 CFS₃ 模式都具有更优的系统运行结构,更有利于农田系统生产发展,是区域稻麦轮作农田较优的秸秆还田生产模式。

此外,鉴于秸秆还田后农田系统环境演变的长期效应以及对农作物生长影响的复杂性,农田系统的可持续性比较及适宜秸秆还田量的选择还需进行长期的定位试验研究。

4 结论

(1) 从能值结构看,CF, CFS₁, CFS₂ 和 CFS₃ 模式下农田系统不可更新工业辅助能投入占到其总能值投入的 78.18%, 66.06%, 57.22% 和 50.47%, 秸秆还田模式降低了能值投入中工业辅助能的比重,增强了系统的自给能力,并提高了系统总能值产出。

(2) 从能值指标看,较 CF 模式,秸秆还田模式提高了农田系统的净能值产出率、能值投入率、能值反馈率、能值生产力和能值—劳动生产率,降低了环境负载率,有效提升了农田系统的可持续发展性能,增强了系统的发展潜力,其中 CFS₂ 和 CFS₃ 模式的养分物质内部循环利用率较高,环境负载率较小,有利于农田系统的持续、高效运行,是成都平原稻麦轮作农田较优的秸秆还田生产模式。

[参 考 文 献]

- [1] Liu Hui, Jiang Gaoming, Zhuang Huiyong, et al. Distribution, utilization structure and potential of biomass resources in rural China: With special references of crop residues[J]. Renewable and Sustainable Energy Re-

- views, 2008, 12(5): 1402-1418.
- [2] 高利伟, 马林, 张卫峰, 等. 中国作物秸秆养分资源数量估算及其利用状况[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 173-179.
- [3] 谢光辉, 王晓玉, 任兰天. 中国作物秸秆资源评估研究现状[J]. 生物工程学报, 2010, 26(7): 855-863.
- [4] 曹国良, 张小曳, 王亚强, 等. 中国区域农田秸秆露天焚烧排放量的估算[J]. 科学通报, 2007, 52(15): 1826-1831.
- [5] 高雪松. 秸秆循环利用模式, 物流能流分析及功能评价[D]. 四川雅安: 四川农业大学, 2011.
- [6] 曹国良, 张小曳, 王丹, 等. 中国大陆生物质燃烧排放的污染物清单[J]. 中国环境科学, 2005, 25(4): 389-393.
- [7] 黄成毅. 成都平原耕地资源系统协同性分析与调控研究[D]. 四川雅安: 四川农业大学, 2011.
- [8] 肖瑶. 四川省秸秆焚烧与利用分析[J]. 绿色科技, 2013(11): 72-74.
- [9] Odum H T, Nilsson P O. Environmental accounting-EMERGY and environmental decision making[J]. Forest Science, 1997, 43(2): 305-305.
- [10] Castellini C, Bastianoni S, Granai C, et al. Sustainability of poultry production using the emergy approach: Comparison of conventional and organic rearing systems[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2006, 114(2): 343-350.
- [11] 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: 76, 383-384.
- [12] 刘玉振. 农业生态系统能值分析与模式构建: 以开封市为例[D]. 河南开封: 河南大学, 2007.
- [13] 骆世明. 农业生态学(面向 21 世纪课程教材)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 449-451.
- [14] 王闰平. 基于能值的山西省农业生态系统动态分析[D]. 湖南长沙: 湖南农业大学, 2009.
- [15] 王金照. 基于能值分析的陕西小麦, 玉米, 苹果, 大枣比较优势研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
- [16] 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, 2013, 30(6): 178-185.
- [17] 易定宏. 基于能值理论的农业生态系统分析[D]. 湖南长沙: 湖南农业大学, 2010.
- [18] 朱玉林. 基于能值的湖南农业生态系统可持续发展研究[D]. 湖南长沙: 中南林业科技大学, 2010.
- [19] 董孝斌, 高旺盛. 黄土高原丘陵沟壑区典型县域的能值分析[J]. 水土保持学报, 2003, 17(1): 89-92.
- [20] 邢开成, 龚宇, 王璞. 华北平原集约农区种植业生态经济系统的能值分析: 以河北沧州为例[J]. 生态环境, 2007, 16(2): 592-597.
- [21] 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.
- [22] 赵桂慎, 姜浩如, 吴文良. 高产粮区农田生态系统可持续性的能值分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 318-323.
- [23] 付晓, 吴钢, 尚文艳, 等. 辽宁省朝阳市农业生态经济系统能值分析[J]. 生态学杂志, 2005, 24(8): 902-906.
- [24] 孙奇, 孙鹏媛, 高永生, 等. 基于能值分析的河南省耕地生态经济系统可持续利用研究[J]. 中国农业资源与区划, 2010(3): 37-42.
- [25] Pan Genxing, Zhou Ping, Li Zhipeng, et al. Combined inorganic/organic fertilization enhances N efficiency and increases rice productivity through organic carbon accumulation in a rice paddy from the Tai Lake region, China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, 131(3): 274-280.
- [26] Zhao Yunchen, Wang Ping, Li Jianlong, et al. The effects of two organic manures on soil properties and crop yields on a temperate calcareous soil under a wheat-maize cropping system[J]. European Journal of Agronomy, 2009, 31(1): 36-42.
- [27] 戴志刚, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 不同作物还田秸秆的养分释放特征试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 272-276.