

南方双季稻区生物质炭还田模式生态效益评价

陈春兰^{1,2}, 侯海军^{1,2}, 秦红灵^{1,2*}, 王 聪^{1,2}, 沈健林^{1,2}, 魏文学^{1,2}

(1.中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 湖南 长沙 410125; 2.中国科学院桃源农业生态试验站, 湖南 常德 415700)

摘要:应用生态经济系统能值分析理论与方法, 引入环境污染指数和能值反馈率 2 个新的指标, 分析了无秸秆还田(CK, 即常规施肥处理)、低量秸秆还田(LS)、高量秸秆还田(HS)、低量秸秆源生物质炭施用(LC)和高量秸秆源生物质炭施用(HC)5 种秸秆还田模式的能值效益, 从农业可持续发展水平来评价南方双季稻区最佳管理模式。结果表明: 秸秆还田显著增加了农田温室气体能值产出, LS、HS 处理分别是 CK 处理的 1.94 倍和 2.92 倍, 分别减少了 8.13% 和 10.80% 的水稻生物量能值产出。秸秆源生物质炭还田温室气体能值产出与常规施肥处理(CK)差别不大, 但明显低于秸秆直接还田, 减少了 49.10%~59.36%。秸秆源生物质炭还田增加了水稻生物量能值产出, 比常规施肥处理(CK)增加了 4.32%~10.49%, 比秸秆直接还田增加了 16.96%~20.27%。5 种秸秆还田模式, 能值产投比早稻季依次为: LC>HC>CK>HS>LS, 晚稻季依次为: HC>LC>CK>LS>HS。综合评价双季稻生态系统可持续发展水平, 早稻和晚稻季节 HC 均高于其他模式。因此, 从能值效益角度, 高量秸秆源生物质炭还田是该区域双季稻生产中最优的秸秆还田模式, 可以大力推广。

关键词: 秸秆还田; 生物质炭; 能值; 可持续发展水平; 双季稻田

中图分类号: S181 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-6819(2016)01-0080-12 **doi:** 10.13254/j.jare.2015.0180

引用格式:

陈春兰, 侯海军, 秦红灵, 等. 南方双季稻区生物质炭还田模式生态效益评价[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(1): 80-91.

CHEN Chun-lan, HOU Hai-jun, QIN Hong-ling, et al. Emergy Evaluation of a Double Rice System with Biochar-returning in South China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(1): 80-91.

Emergy Evaluation of a Double Rice System with Biochar-returning in South China

CHEN Chun-lan^{1,2}, HOU Hai-jun^{1,2}, QIN Hong-ling^{1,2*}, WANG Cong^{1,2}, SHEN Jian-lin^{1,2}, WEI Wen-xue^{1,2}

(1.Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2.Taoyuan Station of Agro-ecology Research, Chinese Academy of Sciences, Changde 415700, China)

Abstract: Emergy theory and method, including two new indices (environmental pollution index and emergy feedback rate), were used to evaluate the best fertilization management practice in double rice ecosystem. The emergy efficiency of five straw returning models as conventional fertilization without straw (CK), low amount of straw at $3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (LS), high amount of straw at $6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (HS), low amount of biochar at $24 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (LC) and high amount biochar at $48 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (HC) were analyzed. The results showed that straw treatments significantly increased the emergy outputs of greenhouse gases, but reduced the emergy outputs of rice biomass. For LS and HS treatments, emergy outputs of greenhouse gases were 1.94 times and 2.92 times than that of CK treatment, while emergy outputs of rice biomass decreased 8.13% and 10.80%, respectively. However, biochar treatments obviously reduced emergy outputs of greenhouse gases compared with straw treatments. The emergy outputs of greenhouse gases of LC and HC treatments decreased about 49.10%~59.36% compared with that of straw treatments. Moreover, the emergy output of rice biomass in LC and HC treatments increased 10.49% and 4.32% than that of CK treatment, and increased 20.27% and 16.96% than that of straw treatments. In early rice season, the emergy input-output ratio of five straw returning models was in the order of LC>HC>CK>HS>LS, and in late rice season, the order was HC>LC>CK>LS>HS. The sustainable development levels of double rice ecosystem in HC treatment were highest in both early and late rice seasons. Therefore, the model of high amount of biochar at $48 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ was the best fertilization management practice in the region.

Keywords: straw returned; biochar; emergy; sustainable development level; double paddy field

收稿日期: 2015-07-23

基金项目: 国家科技支撑项目(2012BAD14B03); 国家“973”计划项目(2012CB417106); 国家自然科学基金面上项目(41271280); 湖南省自然科学基金(13JJ3126)

作者简介: 陈春兰(1981—), 女, 四川广安人, 硕士, 工程师, 主要从事农田生态环境研究。E-mail: ccl@isa.ac.cn

* 通信作者: 秦红灵 E-mail: huiui@isa.ac.cn

秸秆还田因能够改善土地质量,促进养分循环利用,在全世界被广泛采用^[1-3]。然而,秸秆还田也可能增加温室气体排放,并带来环境问题^[4]。高利伟等^[5]通过海量数据分析发现,2006 年我国作物秸秆资源数量超过 7.6 亿 t,其中秸秆还田占 24.3%,即还田量达 1.85 亿 t;2010 年农业部公布的中国作物秸秆专项调查报告^[6]提出 2009 年全国农作物秸秆产出量为 8.2 亿 t,其中秸秆直接还田 1.02 亿 t。陈春兰等^[7]研究表明半量稻草还田促进了水稻生产力及其稳定性的提高;然而稻草还田显著增加了周年甲烷(CH₄)排放的总量,增加幅度为 25.9%~92.8%^[8]。张斌等^[9]研究结果显示,施用生物质炭量为 40 t·hm⁻² 时,可实现稻田稳产目标,并可显著降低稻田 CH₄ 和 N₂O 痕量温室气体排放的综合温室效应,且在连续两年内具有稳定的持续效应。大量研究证明,秸秆源生物质炭还田在提高土壤生产力^[10-13]、增加作物产量的同时^[14],减少温室气体排放^[9,15-17],已经在农田管理中作为一种替代稻草直接还田的技术被广泛采用。但目前对稻田生态系统秸秆源生物质炭还田的效应评价还比较少。

20 世纪 80 年代末,美国著名生态学家 Odum^[18]在系统生态、能量生态和生态经济理论的基础上提出了能值分析理论,此分析方法以生态系统可持续发展为目标,有效地评价生态效益和经济效益^[19-20]。目前,大部分的能值研究主要考虑能值的产投比^[21-22],对系统生产过程可能带来的环境危害关注较少。

双季稻是中国南方重要的农业生产模式,60%的秸秆直接还田或直接在田间焚烧,带来一系列的环境问题^[23-24]。因此,目前亟待对双季稻秸秆还田模式进行生态和经济效益进行评价,找到较好的利用秸秆的方法。本研究应用能值理论方法对南方双季稻生产系统进行生态效益评价,对不同秸秆还田模式进行对比分析。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于湖南省长沙县金井镇的中国科学院亚热带农业生态研究所长沙农业环境观测研究站,试验田地处 113°19'52" E,28°33'04" N,海拔 80 m,多年平均温度 17.5 ℃,多年年均降雨量为 1 330 mm,降雨多集中在每年的 3—8 月,占年降雨量的 60%以上,无霜期约为 274 d,属亚热带季风气候区。试验田土壤类型为铁聚水耕人为土(俗称麻沙泥),成土母质为花岗岩风化物。

试验采用随机区组设计,设置 5 个处理(表 1),

表 1 不同处理管理措施
Table 1 Management of different treatments

管理措施		CK	LS	HS	LC	HC
早稻	灌溉/m ³ ·hm ⁻²	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000
	N/kg·hm ⁻²	120	120	120	120	120
	P ₂ O ₅ /kg·hm ⁻²	40	40	40	40	40
	K ₂ O/kg·hm ⁻²	100	100	100	100	100
	ZnSO ₄ /kg·hm ⁻²	5	5	5	5	5
	农药/mL·hm ⁻²	750	750	750	750	750
晚稻	灌溉/m ³ ·hm ⁻²	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000
	N/kg·hm ⁻²	150	150	150	150	150
	P ₂ O ₅ /kg·hm ⁻²	40	40	40	40	40
	K ₂ O/kg·hm ⁻²	100	100	100	100	100
	ZnSO ₄ /kg·hm ⁻²	5	5	5	5	5
	农药/mL·hm ⁻²	750	750	750	750	750

每个处理 3 次重复。对照(CK),即施氮磷钾肥常规施肥处理,无秸秆还田和生物质炭施用;低量秸秆还田(低秸,LS),即早、晚稻季各施用稻草 3 t·hm⁻²(以干重计);高量秸秆还田(高秸,HS),即早、晚稻季各施用稻草 6 t·hm⁻²(以干重计);低量秸秆源生物质炭施用(低生物质炭,LC),即在试验开始时(本试验为早稻季)一次性施入秸秆源生物质炭(购于河南三利有限公司)24 t·hm⁻²,约相当于耕层土重 1%;高量秸秆源生物质炭施用(高生物质炭,HC),即在试验开始时一次性施入秸秆源生物质炭(购于河南三利有限公司)48 t·hm⁻²,约相当于耕层土重 2%。稻草在试验地翻耕前铡成 10 cm 长小段,均匀撒施于土表。生物质炭在早稻翻耕前一次性均匀撒于土表,并通过翻耕与表层土体混匀。试验小区田间管理措施均采用常规管理模式,且各小区完全一致(表 1)。

1.2 研究方法

1.2.1 数据资料的收集

以 2012 年一个完整的生产年度为界限,分早稻季和晚稻季分别记录、收集生产过程中的各项投入和支出数据,利用长沙农业环境观测研究站的小气候气象站收集并记录当天的气象数据(如太阳辐射、降水等)。采用静态暗箱—气相色谱法于上午 9:00—11:00 点间测定稻田 CH₄、N₂O 和 CO₂ 排放通量^[25](静态箱尺寸为 0.64 m×0.64 m×1 m,采集气体时箱中罩有植株,早稻品种为湘早 45,密度为 25 穴·m⁻²,晚稻品种为 T-优 207,密度为 20 穴·m⁻²)。研究中的生产资料、要素及农产品的能量折算系数主要参考闻大中^[26-28]、骆世明等^[29-30]的研究结果。能值计算的方法是以太阳能

值转换率为基准,各项投入与产出的太阳能值转换率主要参考 Odum^[18]、蓝盛芳等^[31]的论著。

1.2.2 编制能量系统表

能值投入包括可更新的自然资源、不可更新的自然资源、不可更新工业辅助能和可更新有机能 4 部分。可更新的自然资源包括太阳能、风能、雨水势能、雨水化学能等;不可更新的自然资源包括表土流失能;不可更新工业辅助能包括生产中投入的农药、化肥、灌溉等;可更新有机能包括在生产中投入的人力、种子、秸秆和生物质炭等。能值产出包括籽粒、秸秆和温室气体产出。其中太阳光能=系统土地面积×太阳光平均辐射量;风能=高度×密度×涡流扩散系数×风速梯度×面积(式中:空气密度为 $1.29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 涡流扩散系数为 $12.95 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 风速梯度为 $3.93 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$);雨水化学能=土地面积×降雨量×吉布斯自由能 G ×密度(式中:吉布斯自由能 G 为 $4.94 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 密度为 $1\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$);雨水势能=系统面积×平均海拔×平均降雨量×密度×重力加速度(式中:密度为 $1\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 重力加速度为 $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$);净表土损失能=耕地面积×侵蚀率×流失土壤中有有机质含量×有机质能(式中:侵蚀率为 $250 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 流失土壤中有有机质含量为 3%, 有机质能量为 $2.09 \times 10^4 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$);灌溉水能=灌溉用水量×河水吉布斯自由能(式中:河水吉布斯自由能为 $4.77 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 密度为 $1\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$);秸秆源生物质炭折能系数按照生物质生产中秸秆转化率约 40%,

保留能量 60%, 10 年循环施用 1 次计算而得;温室气体的折能系数参考煤气和天然气的热值替代。根据公式可得表 2。

1.2.3 编制能值系统表

利用各种自然资源要素的相应能值转换率,将不同度量单位转换为统一的能值单位(sej),太阳能值=原始数据×太阳能值转换率(表 3)。

1.2.4 建立能值分析指标

在能值分析表的基础上,建立能值分析指标体系(表 4)。能值自给率、工业辅助能比率、有机辅助能比率和环境负荷率反应了农业基础水平;购买能值比率、能值投入率、净能值产出率和能值密度反应了农业经济发展水平;系统生产优势度、系统能值可持续指数、系统稳定性指数、环境污染指数、能值反馈率和能值产投比反应了农业可持续发展水平,其中环境污染指数主要考虑到温室气体的排放,能值反馈率考虑到秸秆及秸秆源生物质还田。

1.2.5 综合评价

为保证各指标之间具有可比性,首先需要将其转换成标准数据。公式为: $B_{ij} = X_{ij} / X_{j\max}$ 。式中 B_{ij} 为标准化数据, X_{ij} 为原始数据, $X_{j\max}$ 为某个评价指标的最大值。再根据如下公式计算各处理的综合评分^[32]:

综合评分 = $\sum$ 各评价指标所占的权重 × 标准化数据

本研究根据模糊数学原理,赋予各指标相同的权重。最后,以综合得分的大小来进行综合评价,得分越

表 2 不同处理能量投入产出

Table 2 Energy input and output of different treatments

项目	单位	折能系数/ 10 ⁶ J·unit ⁻¹	原始数据/J·hm ⁻² ·a ⁻¹					
			CK	LS	HS	LC	HC	
早稻	可更新自然资源							
	太阳能	—	—	1.45×10 ¹⁴	1.45×10 ¹⁴	1.45×10 ¹⁴	1.45×10 ¹⁴	1.45×10 ¹⁴
	风能	—	—	3.81×10 ¹¹	3.81×10 ¹¹	3.81×10 ¹¹	3.81×10 ¹¹	3.81×10 ¹¹
	雨水势能	—	—	1.24×10 ¹⁰	1.24×10 ¹⁰	1.24×10 ¹⁰	1.24×10 ¹⁰	1.24×10 ¹⁰
	雨水化学能	—	—	3.14×10 ¹¹	3.14×10 ¹¹	3.14×10 ¹¹	3.14×10 ¹¹	3.14×10 ¹¹
	小计			1.46×10 ¹⁴	1.46×10 ¹⁴	1.46×10 ¹⁴	1.46×10 ¹⁴	1.46×10 ¹⁴
	不可更新自然资源							
	表层土净损失	—	—	1.57×10 ⁹	1.57×10 ⁹	1.57×10 ⁹	1.57×10 ⁹	1.57×10 ⁹
	不可更新工业辅助能							
	灌溉	—	—	1.43×10 ¹⁰	1.43×10 ¹⁰	1.43×10 ¹⁰	1.43×10 ¹⁰	1.43×10 ¹⁰
	氮肥	kg	9	1.09×10 ¹⁰	1.09×10 ¹⁰	1.09×10 ¹⁰	1.09×10 ¹⁰	1.09×10 ¹⁰
	磷肥	kg	102	5.32×10 ⁸	5.32×10 ⁸	5.32×10 ⁸	5.32×10 ⁸	5.32×10 ⁸
	钾肥	kg	91	9.00×10 ⁸	9.00×10 ⁸	9.00×10 ⁸	9.00×10 ⁸	9.00×10 ⁸
	农药	mL	13.3	3.83×10 ⁹	3.83×10 ⁹	3.83×10 ⁹	3.83×10 ⁹	3.83×10 ⁹
	小计			3.05×10 ¹⁰	3.05×10 ¹⁰	3.05×10 ¹⁰	3.05×10 ¹⁰	3.05×10 ¹⁰

表 2 不同处理能量投入产出(续)

Table 2 Energy input and output of different treatments(continued)

项目	单位	折能系数/ 10 ⁶ J·unit ⁻¹	原始数据/J·hm ⁻² ·a ⁻¹				
			CK	LS	HS	LC	HC
早稻	可更新有机能						
人力	人·a ⁻¹	3 500	3.97×10 ⁸	4.43×10 ⁸	4.90×10 ⁸	4.20×10 ⁸	4.43×10 ⁸
种子	kg	16	1.20×10 ⁹	1.20×10 ⁹	1.20×10 ⁹	1.20×10 ⁹	1.20×10 ⁹
稻草	kg	13.8	0.00	4.14×10 ¹⁰	8.28×10 ¹⁰	0.00	0.00
生物质炭(10 年循环)	kg	2.07	0.00	0.00	0.00	4.97×10 ¹⁰	9.94×10 ¹⁰
小计			0.16×10 ¹⁰	4.30×10 ¹⁰	8.45×10 ¹⁰	5.13×10 ¹⁰	10.1×10 ¹⁰
农田生物量产出							
籽粒	kg	16	7.19×10 ¹⁰	5.77×10 ¹⁰	5.75×10 ¹⁰	8.27×10 ¹⁰	7.34×10 ¹⁰
秸秆	kg	13.8	4.58×10 ¹⁰	3.79×10 ¹⁰	3.94×10 ¹⁰	5.69×10 ¹⁰	4.59×10 ¹⁰
小计			1.18×10 ¹⁰	5.42×10 ¹⁰	1.41×10 ¹⁰	9.00×10 ¹⁰	1.99×10 ¹⁰
农田温室气体产出							
CH ₄	kg	38.5	(1.41±0.63)×10 ⁹	(12.9±3.53)×10 ⁹	(22.0±4.83)×10 ⁹	(1.37±0.56)×10 ⁹	(0.91±0.40)×10 ⁹
N ₂ O	kg	17.2	(3.43±0.28)×10 ⁶	(2.31±0.12)×10 ⁶	(1.51±0.12)×10 ⁶	(4.20±0.42)×10 ⁶	(7.70±0.52)×10 ⁶
CO ₂	kg	6.28	(6.44±1.43)×10 ⁹	(7.66±4.54)×10 ⁹	(11.8±4.28)×10 ⁹	(10.2±2.07)×10 ⁹	(9.58±2.02)×10 ⁹
小计			(0.78±0.21)×10 ¹⁰	(2.06±0.81)×10 ¹⁰	(3.38±0.91)×10 ¹⁰	(1.15±0.26)×10 ¹⁰	(1.05±0.24)×10 ¹⁰
晚稻	可更新自然资源						
太阳能	—	—	1.97×10 ¹⁴	1.97×10 ¹⁴	1.97×10 ¹⁴	1.97×10 ¹⁴	1.97×10 ¹⁴
风能	—	—	4.31×10 ¹¹	4.31×10 ¹¹	4.31×10 ¹¹	4.31×10 ¹¹	4.31×10 ¹¹
雨水势能	—	—	3.73×10 ⁹	3.73×10 ⁹	3.73×10 ⁹	3.73×10 ⁹	3.73×10 ⁹
雨水化学能	—	—	9.40×10 ¹⁰	9.40×10 ¹⁰	9.40×10 ¹⁰	9.40×10 ¹⁰	9.40×10 ¹⁰
小计			1.97×10 ¹⁴	1.97×10 ¹⁴	1.97×10 ¹⁴	1.97×10 ¹⁴	1.97×10 ¹⁴
不可更新自然资源							
表层土净损失	—	—	1.57×10 ⁹	1.57×10 ⁹	1.57×10 ⁹	1.57×10 ⁹	1.57×10 ⁹
不可更新工业辅助能							
灌溉	—	—	1.43×10 ¹⁰	1.43×10 ¹⁰	1.43×10 ¹⁰	1.43×10 ¹⁰	1.43×10 ¹⁰
氮肥	kg	9	1.37×10 ¹⁰	1.37×10 ¹⁰	1.37×10 ¹⁰	1.37×10 ¹⁰	1.37×10 ¹⁰
磷肥	kg	102	5.32×10 ⁸	5.32×10 ⁸	5.32×10 ⁸	5.32×10 ⁸	5.32×10 ⁸
钾肥	kg		9.00×10 ⁸	9.00×10 ⁸	9.00×10 ⁸	9.00×10 ⁸	9.00×10 ⁸
农药	mL	13.3	3.83×10 ⁹	3.83×10 ⁹	3.83×10 ⁹	3.83×10 ⁹	3.83×10 ⁹
小计			3.32×10 ¹⁰	3.32×10 ¹⁰	3.32×10 ¹⁰	3.32×10 ¹⁰	3.32×10 ¹⁰
可更新有机能							
人力	人·a ⁻¹	3 500	4.20×10 ⁸	4.67×10 ⁸	5.13×10 ⁸	4.43×10 ⁸	4.67×10 ⁸
种子	kg	16	7.20×10 ⁸	7.20×10 ⁸	7.20×10 ⁸	7.20×10 ⁸	7.20×10 ⁸
稻草	kg	13.8	0.00	4.14×10 ¹⁰	8.28×10 ¹⁰	0.00	0.00
生物质炭(10 年循环)	kg	2.07	0.00	0.00	0.00	4.97×10 ¹⁰	9.94×10 ¹⁰
小计			0.114×10 ¹⁰	4.26×10 ¹⁰	8.40×10 ¹⁰	5.08×10 ¹⁰	10.1×10 ¹⁰
农田生物量产出							
籽粒	kg	16	1.01×10 ¹¹	1.00×10 ¹¹	0.95×10 ¹¹	1.07×10 ¹¹	0.99×10 ¹¹
秸秆	kg	13.8	8.41×10 ¹⁰	8.27×10 ¹⁰	7.91×10 ¹⁰	8.88×10 ¹⁰	10.1×10 ¹⁰
小计			1.85×10 ¹¹	1.42×10 ¹¹	0.91×10 ¹¹	1.46×10 ¹¹	1.00×10 ¹¹
农田温室气体产出							
CH ₄	kg	38.5	(3.85±0.43)×10 ⁹	(21.1±3.33)×10 ⁹	(40.6±10.6)×10 ⁹	(2.27±0.60)×10 ⁹	(2.50±0.81)×10 ⁹
N ₂ O	kg	17.2	(1.27±0.19)×10 ⁶	(9.03±0.23)×10 ⁶	(10.5±0.05)×10 ⁶	(1.58±0.15)×10 ⁶	(1.67±0.16)×10 ⁶
CO ₂	kg	6.28	(2.19±0.60)×10 ¹⁰	(2.36±0.58)×10 ¹⁰	(2.38±0.81)×10 ¹⁰	(1.94±0.62)×10 ¹⁰	(2.69±0.81)×10 ¹⁰
小计			(2.58±0.64)×10 ¹⁰	(4.47±0.91)×10 ¹⁰	(6.44±1.87)×10 ¹⁰	(2.17±0.68)×10 ¹⁰	(2.94±0.89)×10 ¹⁰

高,则模式越优。对农业可持续发展水平进行评价时,环境污染指数作为负值带入计算。

2 结果与分析

2.1 能值投入结构分析

由表 3 数据分析,投入到稻田生态系统的可更新资源主要有太阳能和雨水,其能值投入主要与试验区面积及气候条件有关,不同处理投入的可更新自然资源的能值相同(图 1)。尽管晚稻比早稻生育期多了 21 d,但雨水主要分布在早稻生育期,因此,早稻生育期可更新自然资源能值比晚稻生育期多 $3.96 \times 10^{15} \text{ sej} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。可更新有机能包括劳力、种子和秸秆及秸秆

源生物质炭。秸秆及秸秆源生物质炭还田模式增加了有机物料的投入,可更新有机能值投入显著高于常规施肥处理,其中高量生物质炭处理最高,早稻和晚稻生育期均为 $2.89 \times 10^{15} \text{ sej} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

不可更新自然资源主要为表土层净损失,不可更新工业辅助能主要为化肥、农药和灌溉用水的投入,不同处理田间管理措施一致,不可更新能值投入相同,早稻和晚稻生育期不可更新工业辅助能分别为 1.19×10^{17} 、 $1.24 \times 10^{17} \text{ sej} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (表 3),占系统总能值投入的 96.68%和 98.41%。

尽管秸秆及秸秆源生物质炭还田增加了可更新有机能值投入,不同处理能值总投入没有显著差异,

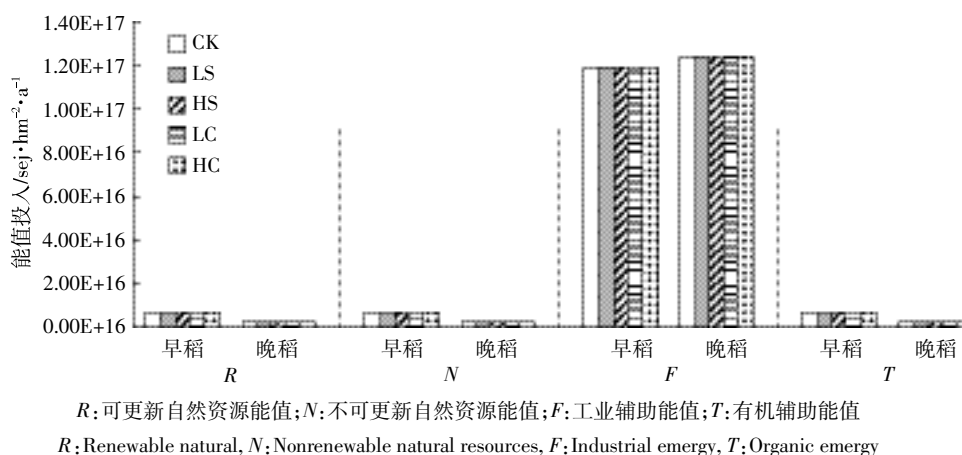


图 1 不同处理双季稻田系统能值的投入量

Figure 1 Emergy inputs of double paddy system with different types of straw-return

表 3 不同处理能值投入产出

Table 3 Emergy input and output of different treatments

项目	太阳能值转换率/ $\text{sej} \cdot \text{j}^{-1}$	太阳能值/ $\text{sej} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$				
		CK	LS	HS	LC	HC
早稻						
可更新自然资源						
太阳能	1	1.45×10^{14}	1.45×10^{14}	1.45×10^{14}	1.45×10^{14}	1.45×10^{14}
风能	1 500	5.72×10^{14}	5.72×10^{14}	5.72×10^{14}	5.72×10^{14}	5.72×10^{14}
雨水势能	10 500	1.31×10^{14}	1.31×10^{14}	1.31×10^{14}	1.31×10^{14}	1.31×10^{14}
雨水化学能	18 200	5.71×10^{15}	5.71×10^{15}	5.71×10^{15}	5.71×10^{15}	5.71×10^{15}
小计		6.56×10^{15}	6.56×10^{15}	6.56×10^{15}	6.56×10^{15}	6.56×10^{15}
不可更新自然资源						
表土层净损失	62 500	9.80×10^{13}	9.80×10^{13}	9.80×10^{13}	9.80×10^{13}	9.80×10^{13}
不可更新工业辅助能						
灌溉	51 000	7.30×10^{14}	7.30×10^{14}	7.30×10^{14}	7.30×10^{14}	7.30×10^{14}
氮肥	1 690 000	1.85×10^{16}	1.85×10^{16}	1.85×10^{16}	1.85×10^{16}	1.85×10^{16}
磷肥	41 400 000	2.20×10^{16}	2.20×10^{16}	2.20×10^{16}	2.20×10^{16}	2.20×10^{16}
钾肥	2 630 000	2.37×10^{15}	2.37×10^{15}	2.37×10^{15}	2.37×10^{15}	2.37×10^{15}
农药	19 700 000	7.54×10^{16}	7.54×10^{16}	7.54×10^{16}	7.54×10^{16}	7.54×10^{16}
小计		1.19×10^{17}	1.19×10^{17}	1.19×10^{17}	1.19×10^{17}	1.19×10^{17}

表 3 不同处理能值投入产出表(续)
Table 3 Emery input and output of different treatments(continued)

项目		太阳能值转换率/ sej·j ⁻¹	太阳能值/sej·hm ⁻² ·a ⁻¹				
			CK	LS	HS	LC	HC
早稻	可更新有机能						
	人力	380 000	1.51×10 ¹⁴	1.68×10 ¹⁴	1.86×10 ¹⁴	1.60×10 ¹⁴	1.68×10 ¹⁴
	种子	35 900	4.31×10 ¹³	4.31×10 ¹³	4.31×10 ¹³	4.31×10 ¹³	4.31×10 ¹³
	稻草	27 000	0.00	1.12×10 ¹⁵	2.24×10 ¹⁵	0.00	0.00
	生物质炭(10 年循环)	27 000	0.00	0.00	0.00	1.34×10 ¹⁵	2.68×10 ¹⁵
	小计		0.19×10 ¹⁵	1.33×10 ¹⁵	2.46×10 ¹⁵	1.54×10 ¹⁵	2.89×10 ¹⁵
	农田生物量产出						
	籽粒	35 900	2.58×10 ¹⁵	2.07×10 ¹⁵	2.07×10 ¹⁵	2.97×10 ¹⁵	2.63×10 ¹⁵
	秸秆	27 000	1.24×10 ¹⁵	1.02×10 ¹⁵	1.06×10 ¹⁵	1.54×10 ¹⁵	1.24×10 ¹⁵
	小计		3.82×10 ¹⁵	1.98×10 ¹⁵	0.89×10 ¹⁵	3.17×10 ¹⁵	1.19×10 ¹⁵
	农田温室气体产出						
	CH ₄	111 000	(1.57±0.70)×10 ¹⁴	(14.4±3.91)×10 ¹⁴	(24.4±5.36)×10 ¹⁴	(1.52±0.62)×10 ¹⁴	(1.01±0.44)×10 ¹⁴
	N ₂ O	111 000	(3.81±0.31)×10 ¹¹	(2.56±0.13)×10 ¹¹	(1.68±0.13)×10 ¹¹	(4.66±0.47)×10 ¹¹	(8.55±0.58)×10 ¹¹
	CO ₂	111 000	(0.71±0.12)×10 ¹⁵	(0.85±0.50)×10 ¹⁵	(1.31±0.48)×10 ¹⁵	(1.13±0.23)×10 ¹⁵	(1.06±0.22)×10 ¹⁵
	小计		(0.87±0.23)×10 ¹⁵	(2.29±0.90)×10 ¹⁵	(3.75±1.01)×10 ¹⁵	(1.28±0.29)×10 ¹⁵	(1.17±0.27)×10 ¹⁵
晚稻	可更新自然资源						
	太阳能	1	1.97×10 ¹⁴	1.97×10 ¹⁴	1.97×10 ¹⁴	1.97×10 ¹⁴	1.97×10 ¹⁴
	风能	1 500	6.47×10 ¹⁴	6.47×10 ¹⁴	6.47×10 ¹⁴	6.47×10 ¹⁴	6.47×10 ¹⁴
	雨水势能	10 500	3.92×10 ¹³	3.92×10 ¹³	3.92×10 ¹³	3.92×10 ¹³	3.92×10 ¹³
	雨水化学能	18 200	1.71×10 ¹⁵	1.71×10 ¹⁵	1.71×10 ¹⁵	1.71×10 ¹⁵	1.71×10 ¹⁵
	小计		2.59×10 ¹⁵	2.59×10 ¹⁵	2.59×10 ¹⁵	2.59×10 ¹⁵	2.59×10 ¹⁵
	不可更新自然资源						
	表层土净损失	62 500	9.80×10 ¹³	9.80×10 ¹³	9.80×10 ¹³	9.80×10 ¹³	9.80×10 ¹³
	不可更新工业辅助能						
	灌溉	51 000	7.30×10 ¹⁴	7.30×10 ¹⁴	7.30×10 ¹⁴	7.30×10 ¹⁴	7.30×10 ¹⁴
	氮肥	1 690 000	2.31×10 ¹⁶	2.31×10 ¹⁶	2.31×10 ¹⁶	2.31×10 ¹⁶	2.31×10 ¹⁶
	磷肥	41 400 000	2.20×10 ¹⁶	2.20×10 ¹⁶	2.20×10 ¹⁶	2.20×10 ¹⁶	2.20×10 ¹⁶
	钾肥	2 630 000	2.37×10 ¹⁵	2.37×10 ¹⁵	2.37×10 ¹⁵	2.37×10 ¹⁵	2.37×10 ¹⁵
	农药	19 700 000	7.54×10 ¹⁶	7.54×10 ¹⁶	7.54×10 ¹⁶	7.54×10 ¹⁶	7.54×10 ¹⁶
	小计		1.24×10 ¹⁷	1.24×10 ¹⁷	1.24×10 ¹⁷	1.24×10 ¹⁷	1.24×10 ¹⁷
	可更新有机能						
	人力	380 000	1.60×10 ¹⁴	1.77×10 ¹⁴	1.95×10 ¹⁴	1.68×10 ¹⁴	1.77×10 ¹⁴
	种子	35 900	2.58×10 ¹³	2.58×10 ¹³	2.58×10 ¹³	2.58×10 ¹³	2.58×10 ¹³
	稻草	27 000	0.00	1.12×10 ¹⁵	2.24×10 ¹⁵	0.00	0.00
	生物质炭(10 年循环)	27 000	0.00	0.00	0.00	1.34×10 ¹⁵	2.68×10 ¹⁵
	小计		0.18×10 ¹⁵	1.32×10 ¹⁵	2.46×10 ¹⁵	1.54×10 ¹⁵	2.89×10 ¹⁵
	农田生物量产出						
	籽粒	35 900	3.63×10 ¹⁵	3.60×10 ¹⁵	3.40×10 ¹⁵	3.83×10 ¹⁵	3.55×10 ¹⁵
	秸秆	27 000	2.27×10 ¹⁵	2.23×10 ¹⁵	2.14×10 ¹⁵	2.40×10 ¹⁵	2.72×10 ¹⁵
	小计		5.90×10 ¹⁵	4.72×10 ¹⁵	3.30×10 ¹⁵	4.89×10 ¹⁵	3.58×10 ¹⁵
	农田温室气体产出						
	CH ₄	111 000	(4.27±0.48)×10 ¹⁴	(23.4±3.70)×10 ¹⁴	(45.1±11.8)×10 ¹⁴	(2.52±0.67)×10 ¹⁴	(2.77±0.90)×10 ¹⁴
	N ₂ O	111 000	(1.41±0.21)×10 ¹¹	(1.00±0.26)×10 ¹¹	(1.16±0.05)×10 ¹¹	(1.76±0.16)×10 ¹¹	(1.86±0.18)×10 ¹¹
	CO ₂	111 000	(2.43±0.66)×10 ¹⁵	(2.61±0.65)×10 ¹⁵	(2.64±0.90)×10 ¹⁵	(2.16±0.69)×10 ¹⁵	(2.99±0.90)×10 ¹⁵
	小计		(2.86±0.71)×10 ¹⁵	(4.96±1.02)×10 ¹⁵	(7.15±2.07)×10 ¹⁵	(2.41±0.76)×10 ¹⁵	(3.26±0.99)×10 ¹⁵

早稻和晚稻生育期均为 $1.26 \times 10^{17} \text{ sej} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (表 4)。

2.2 能值产出分析

农田生物量能值产出主要包括水稻秸秆和籽粒的产出,同时扣除了秸秆和种子的投入能值。由于不同处理的产量和秸秆量不同,又同时考虑到了秸秆及秸秆源生物质炭还田,所以农田生物量能值产出也有较大差异。早稻和晚稻生育期农田生物量能值产出在秸秆源生物质炭还田处理均最高,稻草直接还田处理最低,早稻季生物量能值产出依次为:LC>HC>CK>HS>LS,晚稻季依次为:HC>LC>CK>LS>HS(图 2)。通过表 3 数据,从全年两季稻计算,LS 和 HS 处理水稻生物量能值产出比常规施肥处理减少 8.13% 和 10.08%,LC 和 HC 分别比常规施肥处理增加了 11.42% 和 11.36%,比秸秆直接还田增加了 25.08% 和 16.48%。

农田温室气体能值产出主要包括 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 3 种温室气体。图 2 显示温室气体排放能值主要受稻田 CH_4 和 CO_2 排放的影响,其中 CH_4 排放能值

大小与生物量产出能值相反,高量秸秆还田处理最高,分别为 2.44×10^{15} 、 $4.51 \times 10^{15} \text{ sej} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;早稻季高量秸秆源生物质炭还田处理最低为 $1.01 \times 10^{14} \text{ sej} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,晚稻季低量秸秆源生物质炭还田最低为 $2.52 \times 10^{14} \text{ sej} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (表 3)。早稻季秸秆还田和生物质炭还田产生的 CO_2 量均高于对照处理,且高量秸秆还田处理最高,为 $1.31 \times 10^{15} \text{ sej} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;晚稻季 CO_2 排放能值总体高于早稻季,除低量生物质炭还田处理低于对照处理外,其他处理均高于对照,且高量生物质炭还田处理最高,为 $2.99 \times 10^{15} \text{ sej} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。从全年双季稻期间农田温室气体能值产出计算,LS 和 HS 处理农田温室气体能值产出分别是常规施肥处理的 1.94 倍和 2.92 倍,LC 和 HC 处理与常规施肥处理差不多(分别是 0.99、1.19 倍),而分别比 LS 和 HS 处理减少了 49.10% 和 59.36%。

2.3 能值指标分析

根据能值投入产出表,计算出主要的能值指标,见表 4。净能值产出率表明了生产同样的产品需要投

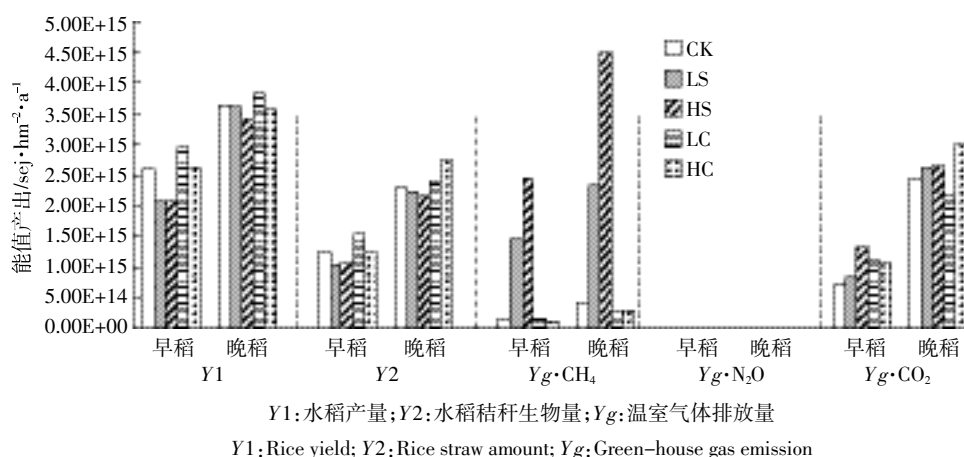


图 2 不同处理双季稻田系统能值的产出量

Figure 2 Emery outputs of double paddy system with different types of straw-return

表 4 不同处理能值分析指标体系

Table 4 Indexes of emery analysis of different treatments

指标名称	表达式	CK	LS	HS	LC	HC
早稻 可更新自然资源($\text{sej} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	R	6.56×10^{15}	6.56×10^{15}	6.56×10^{15}	6.56×10^{15}	6.56×10^{15}
不可更新自然资源($\text{sej} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	N	9.80×10^{13}	9.80×10^{13}	9.80×10^{13}	9.80×10^{13}	9.80×10^{13}
环境资源总投入($\text{sej} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	$I=R+N$	6.66×10^{15}	6.66×10^{15}	6.66×10^{15}	6.66×10^{15}	6.66×10^{15}
不可更新工业辅助能($\text{sej} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	F	1.19×10^{17}	1.19×10^{17}	1.19×10^{17}	1.19×10^{17}	1.19×10^{17}
可更新有机辅助能($\text{sej} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	T	1.94×10^{14}	2.13×10^{14}	2.32×10^{14}	2.04×10^{14}	2.14×10^{14}
总辅助能投入($\text{sej} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	$M=F+T$	1.19×10^{17}	1.19×10^{17}	1.19×10^{17}	1.19×10^{17}	1.19×10^{17}
反馈能($\text{sej} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	$K=\text{稻草}+\text{生物质炭}$	0.00	1.12×10^{15}	2.24×10^{15}	1.34×10^{15}	2.68×10^{15}
总能值投入($\text{sej} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	$U=I+M$	1.26×10^{17}	1.26×10^{17}	1.26×10^{17}	1.26×10^{17}	1.26×10^{17}
经济产量产出($\text{sej} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	$Y1$	2.58×10^{15}	2.07×10^{15}	2.07×10^{15}	2.97×10^{15}	2.63×10^{15}

表 4 不同处理能值分析指标体系(续)
Table 4 Indexes of emergy analysis of different treatments(continued)

	指标名称	表达式	CK	LS	HS	LC	HC
早稻	秸秆产量产出(sej·hm ⁻² ·a ⁻¹)	Y_2	1.24×10 ¹⁵	1.02×10 ¹⁵	1.06×10 ¹⁵	1.54×10 ¹⁵	1.24×10 ¹⁵
	农田温室气体产出(sej·hm ⁻² ·a ⁻¹)	Y_g	0.87×10 ¹⁵	2.29×10 ¹⁵	3.75×10 ¹⁵	1.28×10 ¹⁵	1.17×10 ¹⁵
	农田生物量产出(sej·hm ⁻² ·a ⁻¹)	$Y_b=Y_1+Y_2$	3.82×10 ¹⁵	3.09×10 ¹⁵	3.13×10 ¹⁵	4.51×10 ¹⁵	3.87×10 ¹⁵
	总能值产出(sej·hm ⁻² ·a ⁻¹)	$Y=Y_b+Y_g$	4.69×10 ¹⁵	5.38×10 ¹⁵	6.88×10 ¹⁵	5.79×10 ¹⁵	5.04×10 ¹⁵
	能值自给率	$(R+N)/U=I/U$	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	工业辅助能比率	F/U	0.946	0.945	0.945	0.945	0.945
	有机辅助能比率	T/U	1.54×10 ⁻³	1.69×10 ⁻³	1.84×10 ⁻³	1.62×10 ⁻³	1.70×10 ⁻³
	环境负荷率 ELR	$(N+F)/(R+T)$	17.6	17.6	17.5	17.6	17.6
	购买能值比率	$(F+T)/U=M/U$	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
	能值投入率	$(F+T)/(R+N)=M/I$	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9
	净能值产出率 EYR	$(Y_1+Y_2)/(F+T)=Y_b/M$	3.20×10 ⁻²	2.60×10 ⁻²	2.63×10 ⁻²	3.78×10 ⁻²	3.25×10 ⁻²
	能值密度(sej·hm ⁻² ·a ⁻¹)	U	1.26×10 ¹⁷	1.26×10 ¹⁷	1.26×10 ¹⁷	1.26×10 ¹⁷	1.26×10 ¹⁷
	系统生产优势度	$\sum(Y_i/Y_b)^2$	0.56	0.56	0.55	0.55	0.57
	系统能值可持续指数	EYR/ELR	1.82×10 ⁻³	1.48×10 ⁻³	1.50×10 ⁻³	2.15×10 ⁻³	1.85×10 ⁻³
	系统稳定性指数	$-\sum(Y_i/Y_b)\ln(Y_i/Y_b)$	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
	环境污染指数	Y_g/Y	0.19	0.43	0.55	0.22	0.23
	能值反馈率	K/M	0.00	9.38×10 ⁻³	18.8×10 ⁻³	11.3×10 ⁻³	22.5×10 ⁻³
	能值产投比	Y_b/U	3.20×10 ⁻²	2.60×10 ⁻²	2.63×10 ⁻²	3.78×10 ⁻²	3.25×10 ⁻²
晚稻	可更新自然资源(sej·hm ⁻² ·a ⁻¹)	R	2.59×10 ¹⁵	2.59×10 ¹⁵	2.59×10 ¹⁵	2.59×10 ¹⁵	2.59×10 ¹⁵
	不可更新自然资源(sej·hm ⁻² ·a ⁻¹)	N	9.80×10 ¹³	9.80×10 ¹³	9.80×10 ¹³	9.80×10 ¹³	9.80×10 ¹³
	环境资源总投入(sej·hm ⁻² ·a ⁻¹)	$I=R+N$	2.69×10 ¹⁵	2.69×10 ¹⁵	2.69×10 ¹⁵	2.69×10 ¹⁵	2.69×10 ¹⁵
	不可更新工业辅助能(sej·hm ⁻² ·a ⁻¹)	F	1.24×10 ¹⁷	1.24×10 ¹⁷	1.24×10 ¹⁷	1.24×10 ¹⁷	1.24×10 ¹⁷
	可更新有机辅助能(sej·hm ⁻² ·a ⁻¹)	T	1.85×10 ¹⁴	2.04×10 ¹⁴	2.23×10 ¹⁴	1.96×10 ¹⁴	2.06×10 ¹⁴
	总辅助能投入(sej·hm ⁻² ·a ⁻¹)	$M=F+T$	1.24×10 ¹⁷	1.24×10 ¹⁷	1.24×10 ¹⁷	1.24×10 ¹⁷	1.24×10 ¹⁷
	反馈能(sej·hm ⁻² ·a ⁻¹)	稻草+生物质炭	0.00	1.12×10 ¹⁵	2.24×10 ¹⁵	1.34×10 ¹⁵	2.68×10 ¹⁵
	总能值投入(sej·hm ⁻² ·a ⁻¹)	$U=I+M$	1.26×10 ¹⁷	1.26×10 ¹⁷	1.26×10 ¹⁷	1.26×10 ¹⁷	1.26×10 ¹⁷
	经济产量产出(sej·hm ⁻² ·a ⁻¹)	Y_1	3.63×10 ¹⁵	3.60×10 ¹⁵	3.40×10 ¹⁵	3.83×10 ¹⁵	3.55×10 ¹⁵
	秸秆产量产出(sej·hm ⁻² ·a ⁻¹)	Y_2	2.27×10 ¹⁵	2.23×10 ¹⁵	2.14×10 ¹⁵	2.40×10 ¹⁵	2.72×10 ¹⁵
	农田温室气体产出(sej·hm ⁻² ·a ⁻¹)	Y_g	2.86×10 ¹⁵	4.96×10 ¹⁵	7.15×10 ¹⁵	2.41×10 ¹⁵	3.26×10 ¹⁵
	农田生物量产出(sej·hm ⁻² ·a ⁻¹)	$Y_b=Y_1+Y_2$	5.90×10 ¹⁵	5.84×10 ¹⁵	5.54×10 ¹⁵	6.23×10 ¹⁵	6.27×10 ¹⁵
	总能值产出(sej·hm ⁻² ·a ⁻¹)	$Y=Y_b+Y_g$	8.76×10 ¹⁵	10.8×10 ¹⁵	12.7×10 ¹⁵	8.64×10 ¹⁵	9.53×10 ¹⁵
	能值自给率	$(R+N)/U=I/U$	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	工业辅助能比率	F/U	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
	有机辅助能比率	T/U	1.47×10 ⁻³	1.62×10 ⁻³	1.76×10 ⁻³	1.55×10 ⁻³	1.63×10 ⁻³
	环境负荷率 ELR	$(N+F)/(R+T)$	44.5	44.2	43.9	44.3	44.2
	购买能值比率	$(F+T)/U=M/U$	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
	能值投入率	$(F+T)/(R+N)=M/I$	46.0	46.0	46.0	46.0	46.0
	净能值产出率 EYR	$(Y_1+Y_2)/(F+T)=Y_b/M$	4.77×10 ⁻²	4.72×10 ⁻²	4.47×10 ⁻²	5.03×10 ⁻²	5.06×10 ⁻²
	能值密度(sej·hm ⁻² ·a ⁻¹)	U	1.26×10 ¹⁷	1.26×10 ¹⁷	1.26×10 ¹⁷	1.26×10 ¹⁷	1.26×10 ¹⁷
	系统生产优势度	$\sum(Y_i/Y_b)^2$	0.53	0.53	0.53	0.53	0.51
	系统能值可持续指数	EYR/ELR	1.07×10 ⁻³	1.07×10 ⁻³	1.02×10 ⁻³	1.14×10 ⁻³	1.15×10 ⁻³
	系统稳定性指数	$-\sum(Y_i/Y_b)\ln(Y_i/Y_b)$	0.15	0.15	0.15	0.15	0.13
	环境污染指数	Y_g/Y	0.33	0.46	0.56	0.28	0.34
	能值反馈率	K/M	0.00	0.91×10 ⁻²	1.81×10 ⁻²	1.08×10 ⁻²	2.17×10 ⁻²
	能值产投比	Y_b/U	4.77×10 ⁻²	4.72×10 ⁻²	4.47×10 ⁻²	5.03×10 ⁻²	5.06×10 ⁻²

入的经济能值,净能值产出率越高,购买能值的应用效率越高,产品的市场竞争力越强。不同处理晚稻生育期净能值产出率均高于早稻生育期,并且秸秆源生物质炭处理最高,稻草直接还田处理最低。早稻生育期 LC 最高为 3.78×10^{-2} , LS 最低为 2.60×10^{-2} ; 晚稻生育期 HC 最高为 5.06×10^{-2} , HS 最低为 4.47×10^{-2} 。

温室气体排放能值占总产出能值的比率表征环境污染指数。不同处理晚稻生育期环境污染指数均高于早稻生育期。早稻和晚稻生育期 HS 均最高,分别为 0.55 和 0.56,早稻生育期 CK 最低为 0.19;晚稻生育期 LC 最低为 0.28。从全年两季稻来看,秸秆源生物质炭处理(LC、HC)环境污染指数与常规施肥处理差别不大,分别为 0.98、1.12 倍,而远低于秸秆直接还田处理,分别是 LS、HS 处理的 0.57、0.52 倍。

能值产投比是指农田生物量能值产出与总能值投入的比率,反应了综合资源的利用效率。不同处理晚稻生育期能值产投比均高于早稻生育期。早稻生育期 LC 最高为 3.78×10^{-2} , LS 最低为 2.60×10^{-2} ; 晚稻生育期 HC 最高为 5.06×10^{-2} , HS 最低为 4.47×10^{-2} 。5 种秸秆还田模式,能值产投比早稻季依次为:LC>HC>CK>HS>LS,晚稻季依次为:HC>LC>CK>LS>HS。

系统能值可持续指数是净能值产出率与环境负荷率的比值,反应了系统的可持续性。不同处理早稻生育期系统能值可持续指数高于晚稻生育期。早稻生育期 LC 最高为 2.15×10^{-3} , LS 最低为 1.48×10^{-3} ; 晚稻生育期 HC 最高为 1.15×10^{-3} , HS 最低为 1.02×10^{-3} 。

2.4 生态效益综合评价

根据综合评价方法计算各处理农业基础水平、农业经济发展水平和农业可持续发展水平,见表 5。农业基础水平和农业经济发展水平各处理差别不大。农业可持续发展水平早稻和晚稻生育期 HC 均最高,分别为 0.72 和 0.70,早稻生育期 LS 最低为 0.50,晚稻生育期 CK 最低为 0.54,HS 次之为 0.57。

表 5 不同处理能值综合评价指标

Table 5 Comprehensive evaluation indexes of different treatments

综合评价指标		CK	LS	HS	LC	HC
早稻	农业基础水平	0.96	0.98	1.00	0.97	0.98
	农业经济发展水平	0.96	0.92	0.92	1.00	0.96
	农业可持续发展水平	0.56	0.50	0.53	0.68	0.72
晚稻	农业基础水平	0.95	0.97	0.99	0.97	0.98
	农业经济发展水平	0.98	0.98	0.97	1.00	1.00
	农业可持续发展水平	0.54	0.57	0.60	0.66	0.70

3 讨论

在南方双季稻生产系统中,表征自然环境资源对经济活动承受力的指标——能值投入率早稻和晚稻季分别为 17.9 和 46.0,显著高于 1998 年中国农业系统的能值投入率 4.93^[31],而环境资源能值与总投入能值比率(能值自给率)早稻和晚稻季分别为 0.05 和 0.02,说明该系统的运转主要依赖于社会经济辅助能值投入^[32],这与该地区经济相对比较发达,粮农在稻米生产过程中投入较多资金购买相关生产资料有关(不可更新能值投入占系统总能值投入的 96.68%)。农田生物量产出能值与总辅助投入能值之比的净能值产出率,是判断系统中社会经济资源利用效率高低与否的指标,在南方双季稻生产系统中,0.03~0.05 的比值说明水稻生产效率极低^[33]。能值高投入,低产出,极大地降低了南方水稻在市场上的竞争力,大量辅助能值投入没有达到最佳利用效率,影响了经济效益发挥,需要另辟它途,提高系统净能值产出水平。

不可更新工业辅助能值加上不可更新环境资源能值与可更新自然资源能值加可更新有机辅助能值之比的环境负荷率是评价环境承压程度的指标,南方双季稻系统环境负荷率早稻和晚稻季分别达到 17.6 和 44.3,不仅高于 1998 年中国农业系统的 2.80,也高于发达国家如日本 1994 年农业系统环境负荷率(14.47)^[31],这说明该地区水稻生产已经对自然资源造成了巨大的环境压力,并且在农业生产系统中稻草还田的种稻系统对环境带来的压力占据相当比例,当前及今后较长一段时间内要充分利用光、热、气等可更新自然资源,提高利用效率。本研究新增加了环境污染指数来表征稻田温室气体能值占总能值产出的比率,南方双季稻生产系统环境污染指数有 0.19~0.56,说明稻田温室气体排放可能造成的环境问题应引起足够的重视。

南方双季稻生产系统能值投入结构分析发现,尽管可更新有机辅助能值仅占总能值投入的 3%左右,秸秆不同还田方式引起的有机辅助能值的微小差异却对能值产出产生了显著的影响(图 1~图 2)。由于秸秆或秸秆源生物质还田增加了双季稻系统可更新有机辅助能值投入,而其他能值投入相同,可以认为能值产出的差异主要是由秸秆还田方式的不同引起的。稻田秸秆还田造成的温室气体,特别是 CH₄ 排放的增加,主要是由于增加了稻田的有机物质的投入并减少土壤 Eh 造成的^[34]。施入生物质炭后,由于生物质炭具

有巨大的比表面积和孔隙度,增加土壤的通气性,有利于 CH_4 的氧化,从而降低 CH_4 的排放^[35-37]。秦晓波等^[38]研究也证实了秸秆直接还田增加了 CH_4 的排放,而生物质炭的添加显著抑制了 CH_4 的排放。另外,有机物质的投入增加了土壤微生物的呼吸底物,可以显著提升土壤呼吸强度^[39],从而增加 CO_2 的排放强度,并且随着秸秆还田量的增多,土壤呼吸一般也随之加强^[40-41],与本研究结果一致。生物质炭的添加,对土壤中原有机碳的分解起到正激发效应^[42],促进 CO_2 的排放,可能是本研究中生物质炭处理 CO_2 排放量高于对照处理的原因。秸秆还田降低了稻田 N_2O 的排放(表2),这可能是因为秸秆还田增加土壤的通气性,抑制了反硝化微生物活性,从而影响 N_2O 的产生;张翰林等^[41]研究也得到类似结果,秸秆还田有利于减少稻季农田 N_2O 排放量。而生物质炭施入水稻土后,由于其自身含有 NH_4^+-N 或 NO_3^--N ^[35],可能导致了本试验中 N_2O 排放量的增加,并且,高量生物质炭处理 N_2O 排放量高于低量生物质炭处理。

应用能值理论对生态经济系统进行可持续发展状况分析,为系统的优化提供参考一直是能值理论研究的重点和难点。1997年美国生态学家 Brown 和意大利生态学家 Ulgiati^[43]首次提出了能值可持续发展指标 *ESI*(即 *EYR/ELR*,系统的能值产出率与环境负载率之比)。考虑到可持续发展要求系统能值产出收益的最大化,陆宏芳等^[44]提出了评价系统可持续发展能力的新指标 *EISD*(能值产出率与能值交换率的乘积与环境负载率之比)初步实现了能值效益与经济效益的整合。然而,任何一个评价指标都只能反映系统某一方面的特性,因此不能用 *ESI* 或 *EISD* 这样的单一指标来反映系统的可持续性状况^[45]。本研究综合考虑系统生产优势度、系统能值可持续指数、系统稳定性指数、环境污染指数、能值反馈率和能值产投比,对系统可持续发展水平进行综合评价,其中首次引入环境污染指数(作为负效应带入计算)和能值反馈率(秸秆还田正效应)2个指标,对评价系统的发展有一定的推进作用。本研究结果表明,高量秸秆源生物质炭还田具有最高的可持续发展水平,可作为南方双季稻区秸秆直接还田的替代技术进行推广。

4 结论

本研究首次引入环境污染指数和能值反馈率2个新的指标来考虑系统可持续发展水平。秸秆还田增加了可更新有机辅助能值的投入,减少了南方双季稻

生产系统生物量能值产出,增加了温室气体排放能值。高量秸秆源生物质炭还田在不减少生物量能值产出的同时,减少了温室气体排放能值,具有更好的可持续发展水平。在南方双季稻区,秸秆源生物质炭可作为一个经济和生态效益兼顾的措施来利用秸秆资源。

参考文献:

- [1] Tosti G, Benincasa P, Farneselli M, et al. Green manuring effect of pure and mixed barley-hairy vetch winter cover crops on maize and processing tomato N nutrition[J]. *European Journal of Agronomy*, 2012, 43:136-146.
- [2] 潘剑玲,代万安,尚占环,等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(5):526-535. PAN Jian-ling, DAI Wan-an, SHANG Zhan-huan, et al. Review of research progress on the influence and mechanism of field straw residue incorporation on soil organic matter and nitrogen availability[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(5):526-535. (in Chinese)
- [3] 张鹏,李涵,贾志宽,等. 秸秆还田对宁南旱区土壤有机碳含量及土壤碳矿化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(12):2518-2525. ZHANG Peng, LI Han, JIA Zhi-kuan, et al. The effect of straw return on the content of soil organic carbon and mineralization of soil carbon in arid regions of Nanning[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(12):2518-2525. (in Chinese)
- [4] Conrad R. Control of microbial methane production in wetland rice fields[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 64:59-69.
- [5] 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. GAO Li-wei, MA Lin, ZHANG Wei-feng, et al. Estimation of nutrient resource quantity of crop straw and its utilization situation in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(7):173-179. (in Chinese)
- [6] 农业部调查委员会. 全国农作物秸秆资源调查与评价报告[R]. 农业部新闻办公室, 2010.
- [7] 陈春兰,陈安磊,魏文学,等. 稻田系统生产力及其稳定性对施肥制度的响应[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(10):1263-1267. CHEN Chun-lan, CHEN An-lei, WEI Wei-xue, et al. Response of rice-rice ecosystem productivity and yield stability to long-term fertilization[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(10):1263-1267. (in Chinese)
- [8] 彭华,纪雄辉,吴家梅,等. 不同稻草还田模式下双季稻田周年 CH_4 排放特征及温室效应[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(3):585-591. PENG Hua, JI Xiong-hui, WU Jia-mei, et al. Annual CH_4 emission and greenhouse effects in double cropping rice fields with different rice straw returning methods[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(3):585-591. (in Chinese)
- [9] 张斌,刘晓雨,潘根兴,等. 施用生物质炭后稻田土壤性质、水稻产量和痕量温室气体排放的变化[J]. 中国农业科学, 2012, 45(23):4844-

- 4853.
- ZHANG Bin, LIU Xiao-yu, PAN Gen-xing, et al. Changes in soil properties, yield and trace gas emission from a paddy after biochar amendment in two consecutive rice growing cycles[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(23):4844-4853.(in Chinese)
- [10] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(5):1719-1730.
- [11] 盖霞普, 刘宏斌, 翟丽梅, 等. 玉米秸秆生物炭对土壤无机氮素淋失风险的影响研究[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(2):310-318.
GAI Xia-pu, LIU Hong-bin, ZHAI Li-mei, et al. Effects of corn-stalk biochar on inorganic nitrogen leaching from soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(2):310-318.(in Chinese)
- [12] Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management: An introduction[M]//Biochar for environmental management, Earthscan, London, UK, 2009: 1-12.
- [13] 李 晓, 张吉旺, 李恋卿, 等. 施用生物质炭对黄淮海地区玉米生长和土壤性质的影响[J]. *土壤*, 2014, 46(2):269-274.
LI Xiao, ZHANG Ji-wang, LI Lian-qing, et al. Effects of biochar amendment on maize growth and soil properties in Huang-Huai-Hai plain[J]. *Soils*, 2014, 46(2):269-274.(in Chinese)
- [14] Asai H, Samson B K, Stephan H M, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos 1: Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield[J]. *Field Crops Research*, 2009, 111:81-84.
- [15] 黄海洲, 肖 茜, 沈玉芳, 等. 生物质炭对旱作春玉米农田 N_2O 排放的效应[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(10):2063-2070.
HUANG Hai-zhou, XIAO Qian, SHEN Yu-fang, et al. Effect of biochar on nitrous oxide emissions from dryland spring corn field on the loess plateau[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(10):2063-2070.(in Chinese)
- [16] 刘杰云, 沈健林, 邱虎森, 等. 生物质炭添加对农田温室气体净排放的影响综述[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(2):205-212.
LIU Jie-yun, SHEN Jian-lin, QIU Hu-sen, et al. Effects of biochar amendments on net emissions of greenhouse gases from croplands: A review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(2):205-212.(in Chinese)
- [17] 蒋 晨, 麻培侠, 胡保国, 等. 生物质炭还田对稻田甲烷的减排效果[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(15):184-191.
JIANG Chen, MA Pei-xia, HU Bao-guo, et al. Effect of biochar returning to paddy field on CH_4 emission reduction[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(15):184-191.(in Chinese)
- [18] Odum H T. Environmental accounting: Emergy and environmental decision making[M]. New York: Wiley, 1996:320-370.
- [19] Wang Xiao-long, Chen Yuan-quan, Sui Peng, et al. Emergy analysis of grain production systems on large-scale farms in the North China Plain based on LCA[J]. *Agricultural Systems*, 2014, 128:66-78.
- [20] Hau J L, Bakshi B R. Promise and problems of emergy analysis[J]. *E-cological Modelling*, 2004, 178(1/2):215-225.
- [21] 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):178-185.
JIANG Bi, LI Ming, WU Xi-hui, et al. Emergy analysis of agricultural models of straw returning in the central Shanxi plain[J]. *Agricultural Research in the Arid Area*, 2012, 30(6):178-185.(in Chinese)
- [22] Zhu Yu-lin, Li Ming-jie, Hou Mao-zhang, et al. Analysis of emergy structure, function and efficiency of agro-ecosystem in Hunan Province[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2013, 14(1):186-192.
- [23] 高祥照, 马文奇, 马常宝, 等. 中国作物秸秆资源利用现状分析[J]. *华中农业大学学报*, 2002, 21(3):242-247.
GAO Xiang-zhao, MA Wen-qi, MA Chang-bao, et al. Analysis on the current status of utilization of crop straw in China[J]. *J Huazhong Agric Univ*, 2002, 21(3):242-247.(in Chinese)
- [24] 李飞跃, 汪建飞. 中国粮食作物秸秆焚烧碳排放量及转化生物质炭固碳量的估算[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(14):1-7.
LI Fei-yue, WANG Jian-fei. Estimation of carbon emission from burning and carbon sequestration from biochar producing using crop straw in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(14):1-7.(in Chinese)
- [25] Shen Jian-lin, Li Yong, Liu Xue-jun, et al. Atmospheric dry and wet nitrogen deposition on three contrasting land use types of an agricultural catchment in subtropical central China[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 67:415-424.
- [26] 闻大中. 农业生态系统能流的研究方法(一)[J]. *农村生态环境*, 1985, 1(4):47-52.
- [27] 闻大中. 农业生态系统能流的研究方法(二)[J]. *农村生态环境*, 1986, 2(1):52-56.
- [28] 闻大中. 农业生态系统能流的研究方法(三)[J]. *农村生态环境*, 1986, 2(2):48-51.
- [29] 骆世明. 农业生态学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.
- [30] 吴 刚, 冯宗炜. 黄淮海平原豫北地区农林业系统的能量研究[J]. *应用生态学报*, 1994, 5(4):355-359.
WU Gang, FENG Zong-wei. Energy study on agroforestry systems in northern Henan Huanghuaihai plain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1994, 5(4):355-359.(in Chinese)
- [31] 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.
- [32] 陈 豫, 杨改河, 冯永忠, 等. 沼气生态农业模式综合评价[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(2):274-279.
CHEN Yu, YANG Gai-he, FENG Yong-zhong, et al. Comprehensive evaluation of biogas ecosystem modes[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(2):274-279.(in Chinese)
- [33] 朱玉林, 李明杰. 湖南省农业生态系统能值演变与趋势[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(2):499-505.
ZHU Yu-lin, LI Ming-jie. Emergy of agro-ecosystem in Hunan Province: Evolution and trend[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(2):499-505.(in Chinese)
- [34] 周科平, 王明球, 李 斌, 等. 2012 年湖南省农业生态系统的能值分析[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(1):297-302.
ZHOU Ke-ping, WANG Ming-qiu, LI Bin, et al. Emergy analysis for agro-ecosystem of Hunan Province in 2012[J]. *Bulletin of Soil and Wa-*

- ter Conservation, 2015, 35(1):297-302.(in Chinese)
- [35] Shen Jian-lin, Tang Hong, Liu Jie-yun, et al. Contrasting effects of straw and straw-derived biochar amendment on greenhouse gas emissions within double rice cropping systems[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 188, 264-274.
- [36] Karhu K, Mattila T, Bergström I, et al. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity: Results from a short-term pilot field study[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2011, 140(1):309-313.
- [37] 章明奎, Bayou W D, 唐红娟. 生物质炭对土壤有机质活性的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2):127-137.
- ZHANG Ming-kui, Bayou W D, TANG Hong-juan. Effects of biochars application on active organic carbon fractions in soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(2):127-137.(in Chinese)
- [38] 秦晓波, 李玉娥, Wang Hong, 等. 生物质炭添加对华南双季稻田碳排放强度的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5):226-234.
- QIN Xiao-bo, LI Yu-e, WANG Hong, et al. Impact of biochar amendment on carbon emissions intensity in double rice field in South China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(5):226-234.(in Chinese)
- [39] 叶文培, 王凯荣, Johnson S E, 等. 添加玉米和水稻秸秆对淹水土壤pH、二氧化碳及交换态铵的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(2):345-350.
- YE Wen-pei, WANG Kai-rong, Johnson S E, et al. Effects of maize and rice straw amendment on the pH, CO₂ and exchangeable NH₄⁺ of submerged soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(2):345-350.(in Chinese)
- [40] 强学彩, 袁红莉, 高旺盛. 秸秆还田量对土壤 CO₂ 释放和土壤微生物量的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3):469-472.
- QIANG Xue-cai, YUAN Hong-li, GAO Wang-sheng. Effect of crop-residue incorporation on soil CO₂ emission and soil microbial biomass[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(3):469-472.(in Chinese)
- [41] 张翰林, 吕卫光, 郑宪清, 等. 不同秸秆还田年限对稻麦轮作系统温室气体排放的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, (23)3:302-308.
- ZHANG Han-lin, LYU Wei-guang, ZHENG Xian-qing, et al. Effects of years of straw return to soil on greenhouse gas emission in rice/wheat rotation systems[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(3):302-308.(in Chinese)
- [42] Singh B P, Cowie A L. Long-term influence of biochar on native organic carbon mineralisation in a low-carbon clayey soil[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4(3):1-9.
- [43] Brown M T, Ulgiati S. Emergy based indices and rations to evaluate sustainability: Monitoring economics and technology toward environmentally sound innovation[J]. *Ecological Engineering*, 1997(9):51-69.
- [44] 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.
- LU Hong-fang, LAN Sheng-fang, LI Lei, et al. Studies on emergy indices for evaluating system sustainable development property[J]. *China Environmental Science*, 2002, 22(4):380-384.(in Chinese)
- [45] 陆宏芳, 陈烈, 林永标, 等. 基于能值的顺德市农业系统生态经济动态[J]. 农业工程学报, 2005, 21(12):20-24.
- LU Hong-fang, CHEN Lie, LIN Yong-biao, et al. Emergy based ecological economic dynamics of Shunde agriculture system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(12):20-24.(in Chinese)