

冯海怡, 陈晓炜, 谭康铭, 王小龙. 基于能值分析的华南双季稻种植模式可持续性评价 [J]. 广东农业科学, 2019, 46(6): 9-14.

基于能值分析的华南双季稻种植模式可持续性评价

冯海怡, 陈晓炜, 谭康铭, 王小龙
(华南农业大学农学院, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】华南双季稻区是我国重要的水稻主产区之一, 从生态经济角度判断华南地区当前双季稻种植模式的可持续性, 对于我国农业健康稳定发展具有重要意义。【方法】以广东省典型双季稻种植系统为研究对象, 采用能值分析方法对其可持续发展能力进行量化评价。【结果】华南双季稻区农业系统中环境资源的投入占总能值投入 44.16%, 其中不可辅助能占总能值的 52.40%, 净能值产出率(EYR)为 1.78, 环境负荷率(ELR)为 1.06, 可持续发展指标(ESI)为 4.07。【结论】能值评价指标体系综合表明, 当前华南双季种植模式环境压力较小, 可持续性发展潜力较大, 但其净能值产出率较低, 原因在于过分依赖自然环境资源和人力劳动资源。若能对华南双季稻系统进行标准化管理, 适当增加农用机械的投入, 并投入有机肥的使用, 将能在一定程度上提高该地区水稻种植模式的可持续发展能力。

关键词: 华南; 双季稻; 可持续性评价; 能值分析; 环境资源

中图分类号: S565.4

文献标志码: A

文章编号: 1004-874X(2019)06-0009-06

Emergy-based Sustainability Analysis of Double-cropping rice Farming System in South China

FENG Haiyi, CHEN Xiaowei, TAN Kangming, WANG Xiaolong
(College of Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】 Double-cropping rice area in South China is one of the main rice producing areas in China. It is of great significance to judge the sustainability of current double-cropping rice cultivation mode in South China from the perspective of eco-economy for the healthy and stable development of agriculture. 【Method】 The typical double-cropping rice system in Guangdong province was taken as the research object, and its sustainable development ability was quantitatively evaluated by using emergy analysis method. 【Result】 The input of environmental resources accounted for 44.16% of the total emergy input of the double-cropping rice system in South China. Among them, the non-auxiliary emergy accounted for 52.40% of the total emergy input, the net emergy yield rate (EYR) was 1.78, the environmental loading rate (ELR) was 1.06, and the emergy sustainability index (ESI) was 4.07. 【Conclusion】 The comprehensive evaluation index system of emergy value shows that the current double-season planting mode in South China has less environmental pressure and greater potential for sustainable development, but its net emergy yield rate is low because it relies too heavily on natural environmental resources and human labor resources. If we can standardize the management of double cropping rice system in South China, properly increase the input of agricultural machinery, and put organic fertilizer into use, the sustainable development ability of rice planting mode in this region will be improved to a certain extent.

Key words: South China; double-cropping rice; sustainability; emergy analysis; environmental resources

收稿日期: 2019-03-17

基金项目: 广东省自然科学基金博士启动项目(2017A030310055); 国家自然科学基金青年基金(31800465)

作者简介: 冯海怡(1995—), 女, 在读本科生, 研究方向为农业生态经济分析, E-mail: fenghaiyi2018@sina.com

通信作者: 王小龙(1988—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为可持续农作制度, E-mail: wangxiaolong@scau.edu.cn

【研究意义】传统农业系统依赖自然资源以及人工劳动力的投入，得到较高的可持续性发展能力，但同时其产出率也相对较低；现代农业过分依赖工业辅助能的投入，忽略了自然环境因素的作用，导致农业系统可持续能力不断降低。因此，正确认识以及评价环境资源的贡献，是研究农业持续发展战略的重要课题。长期以来，人们以“地大物博”为由，对资源进行掠夺式开发，导致经济效益低下，这也从侧面反映了人们并没有正确对待自然和合理利用自然资源的观念。【前人研究进展】20世纪80年代，美国生态学家ODUM以系统生态学和能量生态学为理论基础，提出了能值分析方法^[1]。该方法以太阳能值为统一尺度的方法和理论，克服了不同能质之间无法简单比较和计算的问题，并将自然环境资源、社会经济资源、生态系统服务纳入评价范围，实现了对系统科学而全面的分析。近年来，国内外农业生态经济系统能值分析研究十分活跃，涉及主要农产品的能值价值评估^[2]、无公害蔬菜生产系统的可持续性研究^[3]、海涂不同水生利用模式评价^[4]、湖南不同季别稻作系统的生态系统能值分析^[5-6]、湖南水稻生态系统的能值分析^[7]、海南农业能值分析^[8]等领域。【本研究切入点】华南双季稻区是我国重要的水稻主产区之一，其产量占全国水稻总产量的12.8%以上，仅次于长江中下游平原^[9]。近年来，随着该地区城市化速度加快，农村劳动力大量转移，双季稻种植模式开始向高投入高排放型的石油依赖性农业转变。例如，广东省近15年间农药、化肥、农用柴油和塑料薄膜使用量分别提高33.1%、41.6%、15.5%和82.6%^[10]。因此，从生态经济角度判断华南地区当前双季稻种植模式的可持续性，对于我国农业健康稳定发展具有重要意义。但是，目前对我国华南地区双季稻种植模式的能值分析却尚未有报道。因此，本研究以广东省典型双季稻种植系统为研究对象，采用能值分析方法对其可持续发展能力进行定量化评价，并提出系统优化建议，以此为华南双季稻生产的可持续性提供研究参考。【拟解决的关键问题】水稻作为我国的基础作物之一，如何正确认识并合理规划其在工业辅助能与自然资源的投入比例，得到较高产出率的同时保持其一定的可持续发展能力，对于我国农业整体发展情况具有不可替代的意义。

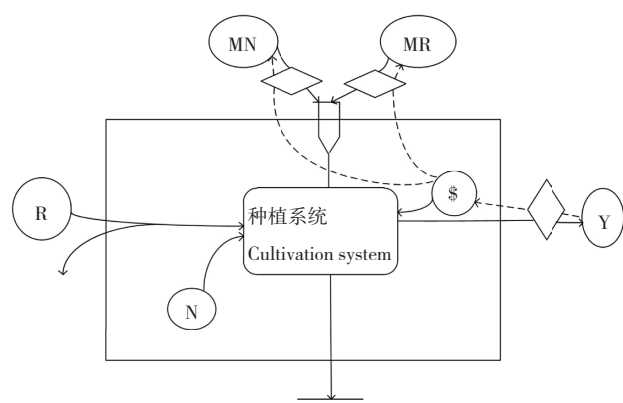
1 材料与方法

1.1 系统描述

本研究选取广东省广州市增城宁西镇的双季稻常规种植模式进行研究。该区域年平均太阳辐射 $5.06 \times 10^9 \text{ J/m}^2$ ，年平均降雨量1957.7 mm（数据来源于广东省气象局），属于典型的华南亚热带季风性气候，具有代表性。研究区域所种植的早稻品种为华航38号、晚稻品种为华航52号，其中早稻3月中下旬移栽、7月底收割，晚稻8月中下旬移栽、11月底收割。每季水稻移栽前施药两次，农药品种包括爱苗（用于治疗）、福戈（用于杀虫）、密达（用于祛除福寿螺）。每667 m²施芭田复合肥（15-15-15）30 kg作底肥，秧苗移栽后施用尿素20 kg，孕穗期再追施尿素10 kg；插秧1周后喷洒除草剂（丁草胺，含量60%），每667 m²用量为70~80 mL；水稻收获后，秸秆直接还田，稻田整地、收割都采用机械化操作，其他田间农事操作皆由人工完成。在本研究中，由于所用机械重量难以获得，故不在系统分析中考虑，机械操作的投入仅计算其作业过程中的柴油消耗。

1.2 能值分析方法

1.2.1 能流图 能值是指产品或劳务形成过程中直接或间接投入应用的一种有效能总量^[11]。根据ODUM所设计的能量语言符号，本研究绘制了华南双季稻田种植系统的物能流动图，从总体上反映该系统的能量投入产出过程（图1）。按照能量来源和性质的不同，本研究将投入双季稻系统的能量划分为4类，即包括太阳能、风能、雨水化学能、灌溉水的“环境可更新资源”，包括表土层损耗能的“环境不可更新资源”，包括化肥、柴油、农药、电力等农资投入的“不可更新辅助能”，包括人力、种子等的“可更新辅助能”。前两类都属于环境资源，后两类则属于经济系统辅助能。由于电力和人力通常由不可更新资源和可更新资源共同作用而产生，因此，根据国际上广泛采用的资源分类方法，将二者分别分为可更新辅助能部分和不可更新辅助能部分。其中，人力的可更新部分按照其投入的12.0%计算，电力的可更新部分按照其投入的68.8%计算^[12]。此外，由于系统中投入的秸秆来源于稻田本身，在收获后又被归还于农田，因此，根据能值第四计算规



R: 环境可更新资源; N: 环境不可更新资源; MN: 不可更新购入资源; MR: 可更新辅助能; Y: 产出; \$: 货币。实线代表能值流动途径, 虚线代表货币流经途径^[6]

R: Environment renewable resources; N: Environment non-renewable resources; MN: Non-renewable purchasing resources; MR: Renewable auxiliary energy; Y: Yield; \$: Currency. Solid line represents energy flow path, and dotted line represents money flow path^[6]

图 1 华南双季稻田能值流动图

Fig. 1 Energy flow diagram of double-cropping paddy field in South China

则, 为避免重复计算, 秸秆投入被归为系统反馈能, 且在系统总能值投入中不计入。

1.2.2 评价指标 本研究在能值分析过程中主要采用的评价指标如表 1 所示。其中, 环境资源与总能值的比值可反映环境资源在整个农业系统中的利用率, 该指标越高, 表示该农业系统对于环境资源的利用越充分, 更符合农业系统可持续发展的要求; 不可更新辅助能与总能值比值反映了系统对外部的依赖程度, 其指标越高, 表示该

表 1 能值分析指标
Table 1 Energy analysis index

能值指标 Energy index	表达式 Expression	实际含义 Actual meaning
环境资源 / 总能值 Environmental resources / Total energy	$(R+N)/Y$	评价环境资源的利用率
不可更新辅助能 / 总能值 Non-renewable auxiliary energy / Total energy	MN/Y	评价系统对外部的依赖程度
净能值产出率 (EYR) Net energy yield rate (EYR)	$Y/(MN+MR)$	衡量系统产出对经济贡献大小
环境负荷率 (ELR) Environmental loading ratio (ELR)	$(MN+N)/(R+MR)$	评价环境压力
可持续性指标 (ESI) Energy sustainability index (ESI)	EYR/ELR	评价系统可持续发展程度

系统对于不可更新资源的依赖程度越强; 净能值产出率 (EYR) 的高低反映了系统产出对经济贡献的大小, 该指标越高, 表示系统产出对经济贡献越大; 环境负荷率 (ELR) 反映了所研究系统的环境压力的大小, 该指标越低, 表示系统对外部环境的压力越小; 可持续性指标 (ESI) 是净能值产出率与环境负荷率的比值, 该值越高, 说明环境可持续性发展程度越高。综合利用上述指标, 可以整体反映华南双季稻种植模式的可持续性发展能力。

1.3 数据来源

本研究所用的数据包括华南双季稻种植系统的原始投入数据, 以及将原始数据转换为系统的能值流所需要的能量转换参数和能值转换率参数。自然资源数据来自来源于广东省气象局, 农事操作过程中的所有原始数据都来自 2017 年对广州市增城宁西镇华南农业大学教学科研基地的实地调研, 并辅以《全国农产品成本收益汇编》进行数据校准。数据收集以一个完整的生产年度为界限, 对系统投入、产出数据进行详细记录, 以保证数据完整性。该基地常年种植双季稻, 有科研工人专门管理, 其双季稻种植水平和农事操作特点皆处于该地区双季稻种植的平均水平, 具有一定程度的代表性。

能量折算系数参考陈卓编著的《农业生态学 (第 2 版)》^[13], 原始数据的计算方法参照文献^[14]。本研究中的太阳能值转换率皆来自之前的相关研究^[3], 采用 2016 年最新修订的能值基准 (12.00×10^{24} sej/年)^[15]作为计算基础。

2 结果与分析

2.1 能值投入结构分析

如表 2 所示, 本研究的农业系统总能值投入为 1.61×10^{16} sej。其中, 环境资源投入为 7.11×10^{15} sej, 经济辅助能投入为 9.03×10^{15} sej, 二者分别占总能值投入的 44.16% 和 56.09%。从资源类别上看, 可更新资源能值投入为 7.74×10^{15} sej、占总能值投入的 48.07%, 不可更新资源能值投入为 8.22×10^{15} sej、占总能值投入的 51.06%。可见, 本研究的华南双季稻种植系统运转主要靠不可更新资源和经济系统辅助能值驱动。

表 2 华南双季稻区耕作模式能值分析

Table 2 Energy analysis of cultivation patterns in double-cropping rice areas in South China

资源 Resource	项目 Item	原始数据 Raw data	太阳能值转换率 Transformity (sej / J)	太阳能值 Solar energy (sej)
可更新环境资源 Renewable environmental resources	太阳能 Solar energy (J)	4.05×10^{13}	1	4.05×10^{13}
	雨水势能 Rainwater potential (J)	1.53×10^9	2.18×10^4	3.34×10^{13}
	雨水化学能 Rainwater chemical energy (J)	7.74×10^{10}	3.93×10^4	7.11×10^{15}
	风能 Wind energy (J)	4.25×10^{10}	3.28×10^3	1.40×10^{14}
不可更新环境资源 Non-renewable environmental resources	表土层损失 Loss of topsoil (J)	8.79×10^4	1.37×10^5	1.20×10^{10}
不可更新辅助能 Non-renewable auxiliary energy	电力 (不可更新部分) Electricity (non-renewable, J)	1.48×10^8	2.70×10^5	4.00×10^{13}
	人力 (不可更新部分) Labor (non-renewable, J)	3.02×10^8	9.83×10^6	2.97×10^{15}
	柴油 Diesel oil (J)	1.51×10^9	1.44×10^5	2.18×10^{14}
	氮肥 Nitrogenous fertilizer (g)	2.40×10^5	8.29×10^9	1.99×10^{15}
	农药 Pesticides (g)	8.27×10^3	3.50×10^{10}	2.89×10^{14}
	复合肥 Compound fertilizer (g)	4.80×10^5	6.11×10^9	2.93×10^{15}
可更新辅助能 Renewable auxiliary energy	电力 (可更新部分) Electricity (renewable, J)	3.27×10^8	2.70×10^5	8.83×10^{13}
	人力 (可更新部分) Labor (renewable, J)	4.12×10^7	9.83×10^6	4.05×10^{14}
	种子 Seed (J)	9.78×10^8	1.44×10^5	1.41×10^{14}
系统反馈能 System Feedback Energy	秸秆 Straw (J)	9.53×10^{10}	7.84×10^4	7.47×10^{15}
产出 Produce	早稻 Early rice (J)	3.42×10^{10}	4.72×10^5	1.61×10^{16}
	晚稻 Late rice (J)	3.91×10^{10}	1.78×10^5	1.61×10^{16}
总能值投入 Total energy input				1.61×10^{16}
环境资源投入总计 Total environmental resources				7.11×10^{15}
经济辅助能投入总计 Total economic auxiliary energy				9.03×10^{15}
可更新能值流 Renewable energy flow				7.74×10^{15}
不可更新能值流 Nonrenewable energy flow				8.22×10^{15}

2.2 能值指标分析

2.2.1 环境资源 在生产过程中通过环境所获得的能量称为环境资源, 它反映了系统对于环境的依赖程度。由表 3 可知, 华南双季稻的耕作中环境资源的投入占总投入能值的 44.16%, 接近总能值的 50%, 说明环境资源对于华南双季稻的种植贡献很大。出现这个现象的主要原因是广东省所处的自然环境条件为高温多雨、四季常绿的热带 -

表 3 华南双季稻耕作模式的主要能值指标

Table 3 Major energy indexes of double-cropping rice cultivation model in South China

能值指标 Energy index	数值 Value
环境资源 / 总能值 (%)	44.16
Environmental resources/total energy (%)	
不可更新辅助能 / 总能值 (%)	52.40
Non-renewable auxiliary energy/total energy (%)	
净能值产出率 (EYR)	1.78
Net energy yield rate (EYR)	
环境负荷率 (ELR)	1.06
Environmental loading ratio (ELR)	
能值可持续指标 (ESI)	4.07
Energy sustainability index (ESI)	

亚热带区域, 适宜水稻生长。同时, 不可更新环境资源, 即表土层净损失占环境资源总投入的比例极少, 可忽略不计。可见, 华南双季稻的耕作制度于环境资源的依赖十分显著。

2.2.2 不可更新辅助能 在生产过程中通过从系统外部购买获得并且无法再生的能量称不可更新辅助能, 它反映了一个系统对于外部物质资源的依赖程度。由表 3 可知, 华南双季稻的耕作中不可更新辅助能的投入占总投入能值的 52.40%, 所占比例较大, 而不可更新辅助能占总辅助能投入的 93.43%, 说明人力和种子等可更新辅助能的投入力度相对较少, 可通过适当增加可更新辅助能的投入以减少系统对不可更新辅助能的依赖。

2.2.3 净能值产出率 (EYR) 在生产过程中系统产出能值与经济反馈能值之比称净能值产出率, 反馈能值包括人力劳务以及各种生产资料, 其最小值为 1, 表示系统运转完全依赖经济系统反馈能来驱动, 既没有利用任何本地资源, 也不能对系统外部经济增长做出有效贡献。在本研究中, 华南双季稻耕作模式的净能值产出率为 1.78, 说明该系统具

有较高的能值利用效率，生产成本较低。这是因为该系统在较高程度上利用了太阳能、雨水化学能、表土层损失等自然资源，对本地环境资源的利用程度较高，而购买能值的投入比例较低。

2.2.4 环境负荷率 (ELR) 在生产过程中系统内消耗的不可更新资源能值与投入系统内的可更新资源的之比称为环境负荷率，是用于衡量系统中能量流动对外部环境所造成的压力。一般而言，较高的能值负荷率说明科技发展水平较高，反之说明科技发展水平较低。由表 3 可知，在本研究中，华南双季稻的耕作模式的环境负荷率为 1.06，远低于发达国家，说明华南地区的传统耕作模式的科技发展水平还有待提高，但从另一角度而言，该耕作的环境压力较小有利于该地区更有效地发展可持续性农业经济。

2.2.5 能值可持续指标 (ESI) 在一个系统内其能值产出率 (EYR) 与其环境负荷率 (ELR) 的比值为系统可持续能力指数，用于衡量该系统的可持续性发展能力。当一个地区的净能值产出率 (EYR) 高同时其环境负荷率低，则其能值可持续发展指数较高，说明其经济发展是可持续的。该值若在 1~10 之间，则说明系统具有活力与发展力；若该值 > 10，则说明系统不发达。由表 3 可知，华南双季稻种植模式的能值可持续指标 (ESI) 为 6.89，表明该地区的可持续发展指数较高，具有一定的活力和发展力，但需要进行一定程度改造，增加现代化技术投入。

3 讨论

华南双季稻区是我国重要的水稻主产区，一个具有较高的能值产出率和相对较低的环境负荷率的水稻种植系统是一个理想的可持续发展系统。因此，基于能值分析对华南双季稻种植模式进行可持续性研究具有重要意义。

在本研究中，环境资源的投入几乎占到系统总能值投入的 50%，体现了环境资源对于华南双季稻种植制度的重要作用。但是，传统经济学家则认为，在经济生产中环境的贡献仅占 1.0%~2.5% [16]。这充分反映出采用能值分析方法对农业生态经济系统可持续评价的重要意义，因为在传统经济学分析中，环境资源对系统运转的价值往往不被考虑，这可能导致农业系统产出的价值也被低估。此外，蓝盛芳 [17] 对中国农业能值分析的结论中环境资源占总能值投入的 13%。

本研究中，环境资源占总能值的比例相对以上两个数据都较大，这主要与该地区高温多雨、四季常绿的热带-亚热带气候有关。

华南双季稻区环境负荷率为 1.06，与我国其他稻区相比属于相对较低的状态，如我国湖南双季稻区环境负荷率为 9.63 [6]，华南双季稻区的环境负荷率远远低于我国湖南双季稻区。另外，相比于我国其他作物生态经济系统，如我国公主岭玉米生产系统环境负荷率为 10.62 [18]，华南双季稻区的环境负荷率远远低于我国公主岭玉米生产系统。表明我国华南双季稻区的环境压力很小，换言之，该地区双季稻种植系统有较大发展潜力，应该进一步加强能值的投入。

与此同时，华南双季稻区相应的净能值产出率却相对较低。相比于湖南双季稻区 2016 年早、中、晚稻种植系统的净能值产出率 [5]，本研究结果分别降低 14.0%~37.8%，说明华南双季稻区在农业技术以及生产技术水平上应用较低。生产方式的发展路径主要有两种：一是从主要依靠生产要素投入、外延式增长方式向主要依靠科技创新、劳动生产率提高和人力资本提升的内涵式增长方式转变；二是从主要依靠生产要素数量的扩张、单纯追求数量而不顾质量的粗放型增长方式向提高生产要素的有机构成和使用效率的集约型增长方式转变 [19]。华南双季稻区的种植模式在人力资源的投入中仍占据较高水平，化肥农药的使用量所占比例居中，说明更适合第一种生产方式的发展路径，即应适当增加机械和现代农业科技的使用，以提高华南双季稻区的净能值产出率。

4 结论

本研究基于能值分析方法对于华南双季稻种植模式进行可持续性分析，结果表明，华南双季稻区具有较高的可持续性发展能力，但其净能值产出率相对较低。原因在于华南双季稻过分依赖于自然资源与人力劳动资源。另外，农村劳动力整体文化水平偏低，小学、初中文化程度者占大多数，使得他们对外界科技敏感度偏低、适应市场能力较差。如果通过标准化管理，适当增加农用机械的使用以减少人力劳动资源的投入，并且酌情增加有机肥的使用以减少化肥等不可更新辅助能的投入，同时加强农村劳动力的文化素质培养，定期组织下乡开展相应培训活动，可在一定

程度上增加华南双季稻区的净能值产出率的同时维持其较高的可持续性发展能力。

参考文献 (References) :

- [1] CAMPBELL D E. Emergy analysis of human carrying capacity and regional sustainability: an example using the state of Maine [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1998, 51:531-569.
- [2] 严茂超, 李海涛, 程鸿, 沈文清. 中国农林牧渔业主要产品的能值分析与评估[J]. 北京林业大学学报, 2001, 23(6): 66-69. doi:10.13332/j.1000-1522.2001.06.016.
YAN M C, LI H T, CHENG H, SHEN W Q. Emergy analysis and evaluation of major agricultural, forestry, animal husbandry and fishery products in China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2001,23(6):66-69. doi:10.13332/j.1000-1522.2001.06.016.
- [3] 王小龙, 韩玉, 陈源泉, 隋鹏, 高旺盛, 吴霞, 杜传民. 基于能值分析的无公害设施蔬菜生产系统效率和可持续性评价[J]. 生态学报, 2015, 35(7): 2-10. doi:10.5846/stxb201306041318.
WANG X L, HAN Y, CHEN Y Q, SUI P, GAO W S, WU X, DU C M. Evaluation of vegetable production system efficiency and sustainability in non-pollution facilities based on Emergy Analysis [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015,35(7):3-10. doi:10.5846/stxb201306041318.
- [4] 朱洪光, 钦佩, 万树文. 江苏海涂两种水生利用模式的能值分析[J]. 生态学杂志, 2001, 20(1): 30-45.
ZHU H G, QIN P, WAN S W. Emergy analysis of two aquatic utilization models in Jiangsu seashore [J]. *Journal of Ecology*, 2001, 20(1):30-45.
- [5] 周江, 向平安. 湖南不同季别稻作系统的生态系统能值分析[J]. 中国农业科学, 2018, 51(23): 4496-4513. doi:10.3864/j.issn0578-1752.2018.23.009.
ZHOU J, XIANG P A. Ecosystem emergy analysis of rice cropping system in different seasons in Hunan Province [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(23):4496-4513. doi:10.3864/j.issn0578-1752.2018.23.009.
- [6] 王小龙, 隋鹏, 陈源泉, 黄坚雄, 高旺盛, 杨光平, 肖小平, 汤文光, 唐海明. 湖南双季稻区保护性耕作模式能值分析 // 中国农作制度研究进展[C]. 成都: 中国农学会耕作制度分会学术年会, 2012:505-508.
WANG X L, SUI P, CHEN Y Q, HUANG J X, GAO W S, YANG G P, XIAO X P, TANG W G, TANG H M. Emergy analysis of conservation tillage model in double-cropping rice region of Hunan Province // Research Progress on Farming System in China [C]. Chengdu: Biennial Conference of Chinese Society of Agronomy Farming System Branch, 2012:505-508.
- [7] 易婷. 湖南水稻生态系统的能值分析[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2016.
YI T. Emergy Analysis of Rice Ecosystem in Hunan Province [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2016.
- [8] 张耀辉, 蓝盛芳, 陈飞鹏. 海南省农业能值分析[J]. 农村生态环境, 1999, 15(1): 4-9.
ZHANG Y H, LAN S F, CHEN F P. Analysis of agricultural emergy value in Hainan Province [J]. *Rural Ecological Environment*, 1999, 15(1): 4-9.
- [9] 李立军, 褚庆全, 胡志全, 吴永常. 我国主要粮食作物区域布局变化研究[J]. 农业现代化研究, 2004(5): 334-339.
LI L J, XU Q Q, HU Z Q, WU Y C. Study on regional distribution change of major food crops in China [J]. *Study on Agricultural Modernization*, 2004(5):334-339.
- [10] 国家统计局. 国家统计局数据库[EB/OL]. http://www.stats.gov.cn/, 2016.
National Bureau of Statistics. National bureau of statistics database [EB/OL]. http://www.stats.gov.cn/, 2016.
- [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.
LAN S F, QIN P, LU H F. Emergy analysis of eco-economic system [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [12] 王小龙. 基于生命周期评价与能值分析的循环农业评价理论、方法与实证研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
WANG X L. Theory, method and empirical study of cyclic agriculture evaluation based on Life Cycle Assessment and Emergy Analysis [D]. Beijing: China Agricultural University, 2016.
- [13] BROWN M T, ULGIATI S. Emergy evaluations and environmental loading of electricity production systems [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2002, 10:321-334.
- [14] 陈阜. 农业生态学[M]. 第2版. 北京: 中国农业大学出版社, 2011.
CHEN F. Agroecology [M]. Second edition. Beijing: China Agricultural University Press, 2011.
- [15] BROWN M T, CAMPBELL D E, De VILBISS C, ULGIATI S. The geobiosphere emergy baseline: a synthesis [J]. *Ecological Modelling*, 2016,339:92-95.
- [16] ODUM H T. Environmental accounting: emergy and environmental decision making [M]. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [17] 蓝盛芳, 钦佩. 生态系统的能值分析[J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 128-131.
LAN S F, QIN P. Emergy analysis of ecosystem [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(1): 128-131.
- [18] 张大瑜, 凌凤楼, 张立馥, 杨世琦, 刘兴土, 高旺盛. 东北平原粮食主产区公主岭市种植业系统的能值分析[J]. 农业工程学报, 2005, 21(6):12-17.
ZHANG D Y, LING F L, ZHANG L F, YANG S Q, LIU X T, GAO W S. Emergy analysis of planting system at Gongzhuling county in the main grain production region in northeast China Plain [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(6): 12-17.
- [19] 余航, 马旭, 李泽华, 李秀昊. 基于生产率视角的中国水稻生产方式发展绩效评价[J]. 广东农业科学, 2018, 45(1): 159-166. doi: 10.16768/j.issn.1004-874X.2018.11.023.
YU H, MA X, LI Z H, LI X H. Performance evaluation of rice production mode development in China from the perspective of productivity [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2018,45(11): 159-166. doi: 10.16768/j.issn.1004-874X.2018.11.023.

(责任编辑 邹移光)