

江西省双季稻田多作复合种植系统的能值分析

孙卫民¹, 黄国勤¹, 程建峰², 刘彬彬¹

(¹江西农业大学生态科学研究中心, 南昌 330045; ²江西农业大学环境生物学实验室, 南昌 330045)

摘要:【目的】粮食问题一直都是国际社会关注的热点问题, 探寻高效的种植模式, 提高土地利用率和粮食产量是目前最为迫切的研究内容。从国内外相关领域的研究成果来看, 实行多熟种植模式是充分利用自然资源和重要途径, 世界各国的农业都在朝着多熟种植的方向发展。1987年, 美国著名生态学家 H. T. Odum 提出能值分析理论来探讨陆地复杂生态系统的功能原理和模拟技术, 并将其扩展到人类所参与的生态、环境乃至社会经济系统。20世纪80年代以来, 应用能量投入产出衡量不同熟制或不同复种方式优劣已为国内外农业工作者重视并广泛应用, 有助于调整生态环境与经济发展的关系, 对自然资源的科学评估与合理利用具有重要的实践价值。论文将阐明双季稻田冬季复种模式系统中的资源利用和投入与产出效益, 为南方双季稻田冬季复种模式的耕作制度改革、农田系统的可持续发展提供理论基础, 为全面推进区域现代农业发展和农业现代化建设提供科技支撑, 为国家和地区粮食增产、农民增收与农村繁荣提供参考依据。【方法】以大田定位试验的原始数据和相关统计年鉴资料为基础, 采用能值分析理论和方法, 对江西省余江县双季稻田7种复种模式系统中的经济产量折能、光合生产力、光能利用率、投入产出、运行效率和环境负荷等进行综合分析。【结果】冬季复种模式下的作物经济产量折能为 217.5×10^6 — 229.7×10^6 kJ hm⁻², 均大于冬季休闲模式 (T1) 的 213.5×10^6 kJ hm⁻², 其中 T4、T6 和 T7 显著高于其他处理, 以 T6 的增幅最大 (8.5%)。T6 处理在 2008—2010 年间均表现出最高的能量增幅, 具有很好的优势和稳定性。冬季复种模式的光合生产力 (11.99 — 14.03 g m⁻² d⁻¹) 和光能利用率 (1.46%—1.70%) 极显著高于 T1 (10.55 g m⁻² d⁻¹ 和 1.28%), 平均增幅为 14.4%—34.8%, 以 T3 为最高 (34.8%)。光合生产力和光能利用率的变化趋势高度一致。冬季复种轮作模式下的经济产量折能为 220.9×10^6 — 229.7×10^6 kJ hm⁻², 均高于冬季复种连作 (T2) 的 217.5×10^6 kJ hm⁻², 以 T6 的增幅最大 (6.1%)。除 T3 有所增加外, 冬季复种轮作模式的光合生产力 (11.99 — 13.10 g m⁻² d⁻¹) 都低于 T2 (13.67 g m⁻² d⁻¹), 平均降幅为 4.2%—12.4%, 以 T4 下降最多。T3 (1.70%) 和 T6 (1.67%) 的光能利用率显著高于其他处理 (1.46%—1.58%), 且其他处理均低于 T1, 以 T4 和 T5 降幅最大。能值分析显示, 不同处理的能值投入产出存在明显差异; 表土净损失能最少为 T1 (2.98×10^{16} sej), 最多是 T5 (3.83×10^{16} sej); 工业辅助能最少投入为 T1 (1.62×10^{17} sej), 最多是 T4 (2.98×10^{17} sej, 近 T1 的 2 倍); 有机能投入最少为 T1 (6.55×10^{15} sej), 最多是 T7 (1.19×10^{16} sej, 近 T1 的 2 倍); T1 的产出能最低 (1.39×10^{16} sej), T6 的产出能最高 (5.42×10^{16} sej, 近 T1 的 4 倍)。除 T3 (2.81) 略低外, 冬季复种模式的能值投入率 (3.12—4.57) 均大于 T1 (2.84), T4 和 T5 增幅分别达 61.1% 和 50.4%; 但冬季复种模式下的能值产出率只有 T4 (0.13) 高于 T1 (0.08), 其他处理 (0.06—0.07) 均低于 T1。冬季复种模式的环境资源能值占总投入能值的比例为 0.17—0.26, 一定程度上说明稻田冬季复种模式更有利于保护农田环境资源。冬季复种模式的不可更新环境资源能值/总投入的能值的比值在本研究中为 0.10—0.15, 意味着稻田农产品的产出很大程度上依赖于不可更新环境资源的消耗, 将增大稻田水土流失的风险。所有处理的工业辅助能值/总投入能值的比值均超过了 0.8, 但处理间差异不明显, 即工业投入所占比重较大, 不利于稻田系统的可持续发展。【结论】双季稻田冬季作物的种植有利于提高稻田的光合生产力和光能利用率。除双季稻田冬季种植混播绿肥轮作模式外的稻田冬季种植经济作物的轮作模式的光合生产力和光能利用率均低于双季稻田冬季复种连作模式。双季稻田冬季种植蚕豆和豌豆的种植模式比稻田冬季休闲模式具有优势, 但双季稻田冬季种植油菜是一个高投入高产出的种植模式, 利于可持续发展。因此, 在试验区双季

收稿日期: 2013-05-15; 接受日期: 2013-07-22

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2007BAD89B18)

联系方式: 孙卫民, E-mail: swm6412@163.com. 通信作者黄国勤, E-mail: hgqjnc@sina.com

稻田冬季种植油菜为最佳复种模式。

关键词：双季稻田；复种；轮作；能值；江西省

Analyses on the Emergies of Multiple Compound Cropping Systems from Double-Cropping Paddy Fields in Jiangxi Province

SUN Wei-min¹, HUANG Guo-qin¹, CHENG Jian-feng², LIU Bin-bin¹

(¹Research Centre of Ecological Sciences, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045; ²Laboratory of Environmental Biology, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045)

Abstract: 【Objective】 Grain problem is always a hot issue concerned by the world. Seeking efficient cropping patterns, improving land utilization efficiency and enhancing grain production are the most urgent researches at present. From the results of related researches fields at home and abroad, multiple cropping patterns are the important approaches of utilizing natural resources and increasing crop production, so agriculture all over the world is developing toward the direction of multiple cropping patterns. In 1987, H T Odum, the famous ecologist in American, proposed the theory of emery analysis to explore the function principles and simulation technology of the complicated terrestrial ecosystems, and extended it to the ecological, environmental, social and economic systems involved in human. Since 1980's, applying energy inputs and outputs to measure the good or bad of different ripe cycles and cropping patterns were focused and applied widely, which were beneficial for regulating the relationship between ecological environments and economic developments and had important practical values of scientific estimation and reasonable utilizations of natural resources. In the experiment, the resource utilizations, input and output benefits of multiple compound cropping systems from double-cropping paddy fields were clarified, which provided a theoretical foundation for the farming system reforms of winter compound cropping patterns in double-cropping paddy fields of south China and sustainable development of farmland ecosystems, the scientific and technological supports of moving forward roundly regional modern agriculture development and agricultural modernization constructions, reference frames of increasing grain production, farmers income and rural prosperity in the nation and regions. 【Method】 Emergies of crop economic yields, photosynthetic productivities, solar energy utilization efficiencies, inputs, outputs, operating efficiencies and environmental loads of seven multiple cropping systems in Yujiang country of Jiangxi province were analyzed comprehensively with the theories and methods of emery analyses on the basis of data from field location experiments and related statistic yearbooks. 【Result】 The results showed that the energies of crops economic yields in winter multiple cropping were 217.57×10^6 - 229.7×10^6 kJ hm⁻² and higher than 213.5×10^6 kJ hm⁻² in winter fallow (T1); and energies of crops economic yields in the T4, T6 and T7 were significantly higher than those in the other treatments, the increasing percent of energy in T6 was 8.5% and the highest. Energy increasing percent of T6 was the highest in 2008-2010, which indicated that T6 had a better superiority and stability. Photosynthetic productivities (11.99 - 14.03 g m⁻² d⁻¹) and solar energy utilization efficiencies (1.46%-1.70%) in winter multiple cropping were markedly significantly higher than those (10.55 g m⁻² d⁻¹ and 1.28%, respectively) in T1, the average increasing ranges were 14.4%-34.8% with the highest increasing percent (34.8%) of T3, and the changes of photosynthetic productivities and solar energy utilization efficiencies were exactly alike. Emergies of crops economic yields in winter multiple cropping rotations were 220.9×10^6 - 229.7×10^6 kJ hm⁻² and higher than 217.5×10^6 kJ hm⁻² in winter multiple continuous cropping (T2), and the increasing percent of energy in T6 was 6.1% and was the highest, but no significant difference was found among all treatments. Winter multiple cropping rotations reduced crop photosynthetic productivity to a certain extent, photosynthetic productivities (11.99 - 13.10 g m⁻² d⁻¹) in winter multiple crop rotations were lower than 13.67 g m⁻² d⁻¹ in T2 except the higher in T3, the average decreasing ranges were 4.2%-12.4% with the highest reduction of T4. The solar energy utilization efficiencies in T3 (1.70%) and T6 (1.67%) were significantly higher than those in the other treatments (1.46%-1.58%) which decreased with the highest reduction of T4 and T5 in comparison with T1. Emery analyses indicated that the emery inputs and outputs of all treatments existed obvious differences; the least of net loss of topsoil was 2.98×10^{16} sej in T1, the most was 3.83×10^{16} sej in T5; the least of industrial supplement emery was 1.62×10^{17} sej in T1, the most was 2.98×10^{17} sej in T4 and nearly two times in T1; the least of organic emery was 6.55×10^{15} sej in T1, the most was 1.19×10^{16} sej in T7 and nearly two times in T1; the least of output emery was 1.39×10^{16} sej in T1, the most was 5.42×10^{16} sej in T6 and nearly four times in T1. Emery input ratios (3.12-4.57) in winter multiple

cropping were higher than 2.84 in T1 except the lower of 2.81 in T3, the increasing percents in T4 and T5 were 61.1% and 50.4%, respectively; but only emergy input ratio (0.13) in T4 was higher than 0.08 in T1, those (0.06-0.07) in the other treatments were lower. Emergy ratios of environmental resources to total inputs in the most treatments were 0.17-0.26 with the maximum reduction of T4 and lower than that in winter fallow, which showed that winter compound cropping patterns were favorable to protecting farmland environmental resources. Emergy ratio of unrenewalbe to total environmental resources in all winter compound cropping patterns were 0.10-0.15 and higher than that in T1, which suggested that planting winter crops mostly depended on the unrenewalbe environmental resources and could increase soil loss. Emergy ratio of industrial supplement to total inputs in all treatments exceeded 0.8, but had no obvious differences, which indicated that the productions of all cropping patterns depended on the industrial inputs and counted against agricultural sustainable development. 【Conclusion】 In conclusion, planting winter crops in double-cropping paddy fields were better for increasing photosynthetic productivities and solar energy utilization efficiencies of paddy fields. Photosynthetic productivities and solar energy utilization efficiencies of planting economic crops except mixed green manure in winter multiple cropping rotations were lower than those in winter multiple continuous cropping. Planting broad bean and pea in double-cropping paddy fields in winter were more superior to fallow-double cropping rice system; but planting rape in double cropping rice system in winter was one of the high input and output patterns for sustainable developments; thus, planting rape in double cropping rice system in winter was the optimum multiple cropping.

Key words: double-cropping paddy field; multiple cropping; crop rotation; emergy; Jiangxi province

0 引言

【研究意义】农业生态系统是人类生存的最基本系统,对其结构和功能进行分析、对资源环境价值进行评价和量化有利于加强人们对农业资源环境的认识和保护,对中国乃至世界农业生态系统研究具有深远的意义。作物生产力反映一个国家或地区农业生产总体水平,它的提高显著影响作物产量^[1]。粮食问题一直受到国际社会的普遍关注,探寻高效的种植模式,提高土地利用率和粮食产量是目前最为迫切的研究内容^[2]。实行多熟种植模式是充分利用自然资源和增产的重要途径,也是世界各国农业的发展方向。【前人研究进展】20 世纪 70 年代后,中国、印度、非洲与拉丁美洲盛行农作物间、混和套作。中国南方气候资源条件优越,多熟制种植模式多为一年二熟和一年三熟,显著地提高土地利用率和作物产量。在江南丘陵区,湖南、江西、福建、浙江和安徽等省就各省情况进行了多熟种植模式的筛选及其生理生态基础的大量研究,获得了许多有益的结果,为当地的种植制度优化和农田可持续发展作出了积极贡献。1987 年,美国著名生态学家 Odum 提出了能值分析(emergy analysis)来探讨陆地复杂生态系统的功能原理和模拟技术,并将其扩展到人类所参与的生态、环境和社会经济系统^[3]。它是生态系统和经济系统相互联系的桥梁,将生态经济系统内流动和储存的各种不同类别的能量和物质转换为同一标准的能值,可以衡量和比较不同类别、不同等级能量的真实价值,比较一个系统

中流动或储存的不同类别的能量及其对该系统的贡献。这一理论与方法提出后,在国际学术界引起高度重视并被广泛应用于农业^[4]、工业^[5]和自然保护区^[6]等各种生态系统的评价及国家^[7]、区域^[8]和县、市^[9]各空间尺度的系统可持续性分析。科学评价农业生态—经济系统中各种生态流已成为农业生态研究中不可缺少的部分。20 世纪 80 年代来,应用能量投入产出衡量不同熟制或复种方式优劣已被农业工作者所重视并广泛应用;如苏芮等^[10]运用能值理论,从农业投入产出、生态环境-社会经济系统和农业发展性能 3 方面对塔里木河下游铁干里克绿洲农业复合系统进行了分析和系统敏感性评估;李飞等^[11]将能值分析方法应用到甘肃省农村传统种植模式和种养耦合模式对资源利用、环境压力及生态经济效益的比较研究中;税伟等^[12]将能流理论与分析方法应用到了具体的农户,以四川北部丘陵区一个肉狗养殖户为研究对象,对该农户的生态系统能流进行诊断分析,进而评价与比较了两种基于肉狗养殖的新生态农户模式设计方案进行系统结构分析、组分模拟与综合效益;这些研究把生态、环境与社会经济系统有机地联系和统一起来,定量分析自然与人类经济活动的真实价值,有助于调整生态环境与经济发展的关系,对自然资源的科学评估与合理利用具有重要的实践价值。【本研究切入点】稻田生态系统是中国南方最重要的农田生态系统,具有粮食生产、蓄水防洪、涵养水源、调节气温、净化水质、水土保持和保护生物多样性等生态服务功能^[13]。近年来,人们对其的碳循环及收益评估^[14-15]、水分和养分

转换^[16-18]、生态服务价值^[13,19-20]等物质或价值流向进行了较深入研究,但对其的能值分析却较少,只有杨海龙等^[21]对贵州省从江县小黄村的糯禾-鱼与糯禾单作、杂交稻-鱼与杂交稻单作两个系统的能值流进行过比较,而双季稻田冬季复种模式系统的能值分析目前尚未见报道。【拟解决的关键问题】江西是一个农业大省,目前农业 GDP 占全省 GDP 的 20%左右,其中以种植业为主,是中国商品粮生产和调运的重要基地。近年来,江西省水稻播种面积稳定在 333 万 hm²左右,总产稳定在 200 亿 kg,双季稻种植面积占 89%,双季稻种植比例居中国首位。鉴于此,为明确双季稻田冬季复种模式系统中的资源利用和投入与产出效益,本研究利用大田定位试验获得的原始数据和统计年鉴的相关资料,采用能值分析理论与方法,从能量流的角度对江西省余江县双季稻田冬季复种模式农田系统中的经济产量折能、光合生产力、光能利用率、投入产出、运行效率和环境负荷等进行综合分析,以进一步探讨双季稻田冬季复种模式的高产高效机理,明确冬季农业的优势,从而筛选和优化新型种植模式,为中国南方双季稻田冬季复种模式的调整和农田生态系统的可持续发展提供理论基础,为全面推进区域现代农业发展和农业现代化建设提供科技支撑,为国家和地区粮食增产、农民增收和农村繁荣提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验在江西省余江县农业科学研究所试验田进行,大田定位时间从 2007 年 11 月至 2011 年 11 月。该地属亚热带湿润季风气候,近 50 年来年平均气温为 17.6℃,1 月份平均气温 5.2℃,7 月平均气温 29.3℃。年极端最高气温为 41.12℃,年极端最低气温-15.12℃。年平均降水量 1 788.8 mm,最多年份降水量 2 543.0 mm,最少年份降水量 980.7 mm,4—6 月份平均降水量 844.8 mm,7—9 月份平均降水量 350.9 mm。太阳年辐射总量为 454.0 kJ cm⁻²,生理辐射年总量为 264.0 kJ cm⁻²,4—10 月光合有效辐射总量为 158.6 kJ cm⁻²。土壤为砖红壤,pH 值为 5.61,耕层有机质含量 28.6 g kg⁻¹,全氮 1.55 g kg⁻¹,碱解氮 74.15 mg kg⁻¹,有效磷 27.94 mg kg⁻¹,速效钾 45.67 mg kg⁻¹。

1.2 试验材料与设计

1.2.1 试验材料 冬季绿肥紫云英 (*Astragalus sinicus* Linn) 品种为余江大叶籽,早稻 (*Oryza sativa* Linn) 为“中选 181”,晚稻 (*Oryza sativa* Linn) 为

“鹰优晚 3 号”,蚕豆 (*Vicia faba* Linn) 为余江县本地品种,豌豆 (*Pisum sativum* Linn) 为中豌 4 号,大麦 (*Hordeum vulgare* Linn) 为“赣大麦 1 号”,油菜 (*Brassica campestris* L.) 为“湘优 15 号”,肥田萝卜 (*Raphanus sativus* L.) 为农家自留种。

1.2.2 试验设计 试验设 7 个处理(表 1),4 个重复,采用随机区组设计,小区面积为 66.7 m²。其中 T1 和 T2 为 2 年连作处理,其他处理为年际间的轮作处理。

表 1 稻田复种田间试验设计

Table 1 Field experiment design of multiple cropping in rice field

处理	种植模式
Treatment	Cropping patterns
T1	冬闲—早稻—晚稻 Fallow-early rice-late rice
T2	绿肥—早稻—晚稻 Green manure-early rice-late rice
T3	混播绿肥—早稻—晚稻 Mixed green manure-early rice-late rice
T4	油菜—早稻—晚稻 Rape-early rice-late rice
T5	大麦—早稻—晚稻 Barley-early rice-late rice
T6	蚕豆—早稻—晚稻 Broad bean-early rice-late rice
T7	豌豆—早稻—晚稻 Pea-early rice-late rice

绿肥为紫云英,混播绿肥为紫云英+油菜+肥田萝卜
Green manure is Chinese milk vetch; mixed sowing green manure is the combination of Chinese milk vetch, rape and radish

双季稻田冬季作物于每年的 10 月 26 日播种。紫云英、混播绿肥散播入稻田,立即灌水,保持浅水层 2 d;油菜、大麦、蚕豆和豌豆采用育苗移栽,时间为晚稻收获后 1 周,生长期间进行除草施肥等常规田间管理。油菜:每公顷有机肥 7 500 kg,纯氮 225 kg,磷肥 135 kg,钾肥 180 kg,氮磷钾比例为 1 : 0.6 : 0.8。以底肥为主,有机肥和磷肥一次性底施,氮肥按照底肥:苗肥:薹肥比例 5 : 3 : 2,钾肥以底肥:腊肥比例 3 : 2。每公顷用 25%咪酰胺乳油 600 mL、40%菌核净可湿性粉剂 1.5 kg 防治油菜菌核病,加入 10%吡虫啉可湿性粉剂 0.3 kg 防治蚜虫 1 次。大麦:每公顷大麦纯氮 187.5 kg,钾肥 75 kg,磷肥 75 kg,钾肥磷肥全部用作基肥,氮肥基肥与后期补施比例为 4 : 1。蚕豆:每公顷有机肥 7 500 kg,磷肥 90 kg 作基肥;三叶期施用 30 kg 纯氮。豌豆:每公顷有机肥 7 500 kg,磷肥 90 kg 用作基肥,后期(始花期)补施纯氮肥 112.5 kg·hm⁻²。

早晚稻采用塑盘湿润育秧。早稻于每年的 3 月下旬播种,晚稻于每年的 7 月初播种。水稻秧田各处理施肥量与施肥时间一致,常规管理。早晚稻均为抛秧

处理，每公顷用 434 孔径塑盘 975 个，每公顷实际抛秧 40.04 万丛，出苗至 1 叶 1 心期，用 20% 甲基立枯灵防治枯病；2 叶 1 心期施促苗肥，3 叶 1 心以后，每长 1 叶追施 1 次肥，以清粪水为主，配搭少量化肥。

早稻于每年的 4 月 24 日抛秧，秧苗长到 3 叶及时覆水，保持 3—4 cm 水层，以促分蘖；5—6 叶期轻晒田，7—8 叶期重晒田，控制无效分蘖；孕穗至抽穗期田间保持浅水层，灌浆结实期间歇灌溉，干湿交替，养根保叶，收割前 5—7 d 断水，成熟时收获测产。晚稻于每年的 7 月 28 日抛秧，田间管理与早稻一致，当年 11 月 5 日收获。早稻和晚稻每公顷均施纯氮 150 kg，施用肥料为尿素（含氮量为 46%）；磷肥均作为基肥（紫云英除外），每公顷施钙镁磷 225 kg，每公顷水稻田施用氯化钾 15 kg，按分蘖肥：孕穗肥：抽穗肥比例为 6：2：2 施用。各处理的施肥量与施肥时间相同，紫云英不施肥。其他管理按当地常规生产进行。

1.3 能量计算与分析

1.3.1 作物经济产量折能、光合生产力和光能利用率 水稻成熟期，在各小区随机选取有代表性的 5 蔸水稻作考种材料；采用最普遍的五点取样法取 100 蔸水稻脱粒晒干去秕后称重，得实测经济产量。紫云英成熟期采用五点取样法测鲜草重，每点测 1 m²，换算成鲜重产量，部分取回烘干测生物干重产量。油菜、大麦、蚕豆和豌豆于成熟期在每个小区收集有代表性的 5 株作物，晒干后进行经济产量和生物产量的测定。五点取样法操作步骤参见文献[22]。

作物经济产量折能=作物产量×折能标准，折能标准参考黄国勤的研究^[23]。作物经济产量的光合生产力是指

单位面积内作物收获的经济产量能量与作物生育期的比值^[23]。所涉及的光能利用率是指单位面积内，作物收获部分所吸收的能量与相同面积内太阳辐射能的比值^[23]。

1.3.2 能值分析理论与方法 能值是在形成一种产品或服务的过程中直接和间接消耗的能量之和，即各种能量的太阳能当量^[24]。能值分析是在系统生态、能量生态和生态经济理论上创立的一种新型研究方法^[25]，它把各种资源、产品或劳务转化为其形成所需的太阳能，任何流动或贮存状态的能量所包含的太阳能，即为该能量的太阳能值，单位为太阳能值焦耳（sej）。采用统一的太阳能值标准，使系统各种形式的能量具有可比性和可加和性，从而定量分析自然和人类社会经济系统的真实价值及它们之间的关系。不同类别的能量需要通过太阳能值转换率折算成太阳能值，太阳能值转换率指单位能量或物质所含太阳能值之量。其基本公式为：太阳能值（sej）=能量（j）或物质（g）或价值（\$）×能值转换率（sej j⁻¹）。通过相应的能值转换率，可将所有不同能值的能量转换为其所包含的太阳能值，来达到统一度量评价的目的，表 2 为本研究中涉及的太阳能值转换率。

1.3.3 能量计算公式 能量计算参考蓝盛芳等著的《生态经济系统能值分析》^[30]，包括太阳能、雨水化学能、雨水势能、风能、表土层净损失、电力、农用机械、农药、氮肥、磷肥、钾肥、人力、有机肥和种子。公式如下：（1）太阳能=作物种植面积（hm²）×单位面积年太阳辐射量（J hm⁻² a⁻¹）；（2）雨水化学能=作物种植面积（hm²）×年平均降水量（mm a⁻¹）×雨水密度（kg m⁻³）×雨水的自由能（J kg⁻¹）；（3）

表 2 农业生态系统中主要能量类型的太阳能值转换率
Table 2 Solar transformity of major typical energy in agro-ecosystem

项目 Item	太阳能值转换率 Solar transformity (sej j ⁻¹)	项目 Item	太阳能值转换率 Solar transformity (sej j ⁻¹)
太阳辐射 Solar radiation	1.00E+00	磷肥 Phosphate fertilizer	4.14E+06 ^[28]
雨水化学能 Rain chemical energy	3.10E+04 ^[26]	钾肥 Potash fertilizer	2.63E+06 ^[28]
雨水势能 Rain potential energy	4.70E+04 ^[27]	有机肥 Organic fertilizer	2.70E+04 ^[28]
风能 Wind energy	2.45E+03 ^[26]	水稻 Rice	3.59E+04 ^[28]
表土净损失 Net loss of topsoil	7.16E+04 ^[27]	绿肥 Green manure	2.70E+04 ^[28]
农业用电 Farming electricity	1.70E+05 ^[27]	油菜 Rape	6.90E+05 ^[28]
机械动力 Mechanical power	7.50E+07 ^[28]	大麦 Barely	6.80E+04 ^[28]
劳动力 Labor force	3.80E+05 ^[28]	蚕豆 Broad bean	6.90E+05 ^[29]
农药 Pesticide	1.97E+07 ^[28]	豌豆 Pea	6.90E+05 ^[29]
氮肥 Nitrogen fertilizer	1.69E+06 ^[28]	作物秸秆 Crop straw	2.70E+04 ^[28]

雨水势能=作物种植面积 (hm^2) \times 年平均降水量 (mm a^{-1}) \times 海拔 (m) \times 雨水密度 (kg m^{-3}) \times 重力加速度 (m s^{-2}) ; (4) 风能=作物种植面积 (hm^2) \times 高度 (10 m) \times 空气密度 (kg m^{-3}) \times 涡流扩散系数 (m s^{-2}) \times 风速梯度 (s^{-1}) $\times 3.1536 \times 10^7 (\text{s a}^{-1})$; (5) 表土层净损失=作物种植面积 (m^2) \times 表土层侵蚀量 ($\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$) \times 土壤有机质含量 (%) \times 每克有机质所含能量 (J g^{-1}) ; (6) 电力=单位时间用电量 (kWh a^{-1}) \times 单位时间用电量的能量 (J kWh^{-1}) ; (7) 农用机械=农用机械总动力 (kWh a^{-1}) \times 工作时间 (h) $\times 3.60 \times 10^6 (\text{J kWh}^{-1})$; (8) 农药=农药用量 (g) \times 物质单位能量 (J g^{-1}) ; (9) 氮肥=氮肥用量 (g) \times 物质单位能量 (J g^{-1}) ; (10) 磷肥=磷肥用量 (g) \times 物质单位能量 (J g^{-1}) ; (11) 钾肥=钾肥用量 (g) \times 物质单位能量 (J g^{-1}) ; (12) 人力=工作时间 (d) \times 单位时间能量 (J d^{-1}) ; (13) 有机肥=有机肥用量 (g) \times 物质单位能量 (J g^{-1}) ; (14) 种子=作物种子用量 (g) \times 物质单位能量 (J g^{-1}) 。

1.3.4 能值分析指标 能值分析指标综合反映生态经济系统的结构、功能和效率,是衡量自然环境资源的价值和人类社会经济发展及环境与经济、人与自然关系的指标,也是系统综合分析及社会经济发展决策

参考的重要指标。据以往相关研究^[10,31-32],结合本试验实际,采用的能值投入产出项目见表3。

能值指标体系的构建是进行系统分析、比较研究和得出结论的主要依据。通过借鉴相关的文献报道^[10,29,31-32],结合江南丘陵稻田复种生态系统的实际,设计了的主要能值指标见表4。能值投入率是总辅助能值与自然资源能值之比,即不能更新工业辅助能值和可更新有机能值所占自然资源总投入的比例,是衡量经济发展和环境负载的指标。能值产出率指产出总能值与总辅助能值之比,该比值越高表明系统的生产效率越高,还可反映系统能值投资回报率高低及产品的价格竞争优势。环境负荷率是不可更新的环境资源的能值之和与可更新资源能值的比率,用来衡量系统中的环境影响。环境资源能值/总投入能值、不可更新环境资源能值/环境资源总能值与不可更新环境资源能值/总投入能值的比值均是评价环境资源重要性的指标。工业辅助能值/总投入能值比值衡量种植模式现代化的水平。能值密度是指单位面积土地的能值投入量,表明相关农业生态系统的集约化管理水平。可持续发展指数为系统能值产出率与环境负载率之比,实质上是可更新资源与不可更新资源之比。

表3 农业生态系统中能值投入产出项目
Table 3 Input and output of emergy project in agro-ecosystem

指标 Index	表达式 Formula	指标 Index	表达式 Formula
可更新资源 Renewable natural resources	Em R	总辅助能投入 Total input of supplement energy	Em U= Em F + Em R1
不可更新资源 Unrenewable natural resources	Em N	总能值投入 Total input of emergy	Em T=Em I+Em U
环境资源总投入 Total input of environmental resources	Em I=Em R + Em N	水稻产能 Output energy of rice	Em Y1
工业辅助能 Industrial supplement energy	Em F	冬季作物产能 Output energy of winter crops	Em Y2
可更新有机能 Renewable organic energy	Em R1	作物总能 Output energy of crops	Em Y=Em Y1+Em Y2

表4 农田生态系统中能值指标体系
Table 4 Index systems of emergy in agro-ecosystem

能值指标 Emergy index	表达式 Formula
能值投入率 Emergy input ratio	Em F/Em I
能值产出率 Emergy output ratio	Em Y/Em U
环境负荷率 Environmental load ratio	(Em F+Em N)/(Em R+Em R1)
环境资源能值/总投入能值 Emergy ratio of environmental resources to total input	Em I/Em T
不可更新环境资源能值/环境资源总能值 Emergy ratio of unrenewalbe to total environmental resources	Em N/Em I
不可更新环境资源能值/总投入能值 Emergy ratio of unrenewalbe environmental resources to total inputs	Em N/Em T
工业辅助能值/总投入能值 Emergy ratio of industrial supplement to total inputs	Em F/Em T
能值密度 Emergy density ($10^{13} \text{ sej m}^{-2} \text{a}^{-1}$)	Em T/ Unit area (hm^2)
可持续发展指数 Sustainable development index	(Em Y \times Em T)/(Em U \times Em I)

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS 18.0 软件进行数据处理和统计分析。用 Duncan 新复极差法进行多重比较处理间的差异显著性。

2 结果

2.1 稻田冬季复种模式下作物经济产量折能、光合生产力和光能利用率

由表 5 可知，与冬季休闲种植模式（T1）相比，冬季复种模式的作物经济产量折能在不同年份的不同处理间有增有减，冬季复种模式下的作物经济产量折能在 2008 和 2010 年高于 T1，具体为 T6>T4>T3>T5>T7>T2 和 T6>T3>T7>T5>T4>T2。2009 年 T5 处理的作物经济产量折能低于 T1，其他冬季复种处理高于 T1，具体为 T7>T4>T3>T6>T2。冬季复种模式下的作物经济产量折能在 2011 年低于 T1，特别是 T3，降低 5.6%。从 4 年的平均值来看，作物经

济产量折能在冬季复种模式下均优于 T1，其中 T4、T6 和 T7 显著高于其他处理，且 T6 的增幅最大（8.5%），但三者间无显著差异。综合来看，T6 在 2008—2010 年 3 年间均表现出最高的能量增幅，具有很好的优势和稳定性。

冬季复种模式的光合生产力极显著高于 T1，增幅为 14.4%—34.8%（表 6）。不同年份的作物光合生产力为 2011>2009>2008>2010 年。就作物光合生产力而言，T2 和 T3 极显著高于 T4 和 T5，T6 和 T7 显著高于 T4 和 T5，但两者间均无显著差异，以 T3 增幅最高，达 34.8%（表 6）。

不同年份的光能利用率为 2011>2009>2008>2010 年。2008—2011 年冬季复种模式下的光合利用率极显著高于 T1，增幅为 14.4%—34.8%；T2、T6 和 T3 极显著高于 T4、T5 和 T7，但三者间无显著差异，且以 T3 表现最好，达 34.8%（表 7）。这一变化趋势与光合生产力是高度一致的，很好地体现了两者的密切关系。

表 5 稻田冬季复种对作物经济产量折能的影响
Table 5 Effect of winter multiple cropping on energy of crop economic yield in paddy field

处理 Treatment	作物经济产量折能 Energy of crop economic yield (10 ⁶ kJ hm ⁻²)					冬季复种模式的能量增加率 Increasing percent of energy in winter cropping (%)				
	2008	2009	2010	2011	平均值 Mean	2008	2009	2010	2011	平均值 Mean
T1	201.4	228.1	175.1	249.6	213.5±18.7 a A	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0±0.0 a A
T2	208.6	232.3	182.9	246.3	217.5±16.1 ab A	3.6	1.8	4.5	-1.3	2.2±1.5 a A
T3	229.3	234.3	193.9	235.6	223.3±11.4 ab A	13.8	2.8	10.8	-5.6	5.5±5.0 ab A
T4	237.0	236.5	184.5	243.5	225.4±15.8 b A	17.7	3.7	5.4	-2.4	6.1±4.9 b A
T5	227.2	226.9	187.6	241.9	220.9±13.5 ab A	12.8	-0.5	7.2	-3.1	4.1±4.2 ab A
T6	246.3	234.0	195.4	243.0	229.7±13.5 b A	22.3	2.6	11.6	-2.6	8.5±6.3 b A
T7	223.4	244.2	192.7	242.1	225.6±13.8 b A	10.9	7.1	10.1	-3.0	6.3±3.7 b A

平均值后的不同大、小写字母分别表示处理间具有极显著（ $P<0.01$ ）和显著性差异（ $P<0.05$ ）。下同
Means followed by different capital and lowercase letters in the same column are significantly different at $P<0.01$ and $P<0.05$ as determined by LSD method, respectively. The same as below

表 6 稻田冬季复种模式对作物经济产量光合生产力的影响
Table 6 Effect of winter multiple cropping on photosynthetic productivity of crop yield in paddy field

处理 Treatment	光合生产力 Photosynthetic productivity (g m ⁻² d ⁻¹)					光合生产力增加率 Increasing percent of photosynthetic productivity (%)				
	2008	2009	2010	2011	平均值 Mean	2008	2009	2010	2011	平均值 Mean
T1	9.98	11.30	8.60	12.33	10.55±0.93 a A	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0±0.0 a A
T2	13.38	14.57	12.09	14.65	13.67±0.70 d C	34.2	29.0	40.5	18.9	30.6±5.3 d C
T3	14.38	14.76	13.03	13.94	14.03±0.43 d C	44.2	30.6	51.5	13.1	34.8±9.8 d C
T4	12.59	12.68	9.98	12.71	11.99±0.77 b B	26.2	12.2	16.0	3.1	14.4±5.5 b B
T5	12.28	12.28	10.44	13.18	12.05±0.66 b B	23.1	8.7	21.4	6.9	15.0±4.8 b B
T6	13.49	12.77	11.34	14.80	13.10±0.83 c BC	35.2	13.0	31.8	20.1	25.0±5.9 c BC
T7	12.77	13.82	11.55	13.96	13.03±0.65 c BC	28.1	22.4	34.3	13.2	24.5±5.2 c BC

表 7 稻田冬季复种模式对作物经济产量光能利用率的影响

Table 7 Effect of winter multiple cropping on solar energy utilization efficiency of crop yield in paddy field

处理 Treatment	光能利用率 Solar energy utilization efficiency (%)					光能利用率增加率 Increasing percent of solar energy utilization efficiency (%)				
	2008	2009	2010	2011	平均值 Mean	2008	2009	2010	2011	平均值 Mean
T1	1.21	1.37	1.04	1.49	1.28±0.11 a A	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0±0.0 a A
T2	1.62	1.77	1.46	1.78	1.66±0.09 c C	34.2	29.0	40.5	18.9	30.6±5.3 d C
T3	1.74	1.79	1.58	1.69	1.70±0.05 c C	44.2	30.6	51.5	13.1	34.8±9.8 d C
T4	1.53	1.55	1.22	1.55	1.46±0.09 b B	26.2	12.2	16.0	3.1	14.4±5.5 b B
T5	1.50	1.50	1.28	1.61	1.47±0.08 b B	23.1	8.7	21.4	6.9	15.0±4.8 b B
T6	1.69	1.60	1.46	1.92	1.67±0.11 c C	35.2	13.0	31.8	20.1	25.0±5.9 c BC
T7	1.55	1.67	1.40	1.69	1.58±0.08 c BC	28.1	22.4	34.3	13.2	24.5±5.2 c BC

2.2 稻田冬季复种轮作模式下作物经济产量折能、光合生产力和光能利用率

表 8 表明，与冬季复种连作模式（T2）相比，冬季复种轮作模式下的作物经济产量折能的增减存在一定的差异，但未达显著。2008 年，冬季复种轮作模式的经济产量折能均明显增加，幅度为 7.1%—18.1%；2009 年，除 T5 降低外，其他处理均不明显的增加；2010 年，所有冬季复种轮作模式的经济产量折能均增加，幅度为 0.9%—6.8%，增幅均小于 2008 年；2011 年，所有处理均不明显降低，幅度为-1.1%—4.3%。从 4 年的平均值来看，冬季复种轮作模式下的经济产量折能均高于 T2，其中 T6 的优势最大，增加 6.1%，但与其他处理间无显著差异。

不同年份不同处理下，稻田复种轮作模式的光合生产力大部分都低于 T2，降幅在 5% 以上，最大为 2010 年 T4 的 17.4%（表 9）。2008 年，只有 T3

和 T6 下的光合生产力大于 T2；2009 和 2010 年，只有 T3 的作物光合生产力大于 T2，T4 和 T5 下的光合生产力均下降 10% 以上；2011 年，只有 T6 下光合生产力大于 T2。从 4 年的平均值来看，T4 和 T5 的作物光合生产力极显著低于 T2，T6 和 T7 也低于 T2 而差异不显著，只有 T3 较 T2 有增加的趋势。综合来看，冬季复种轮作模式一定程度上降低了作物光合生产力。

与 T2 比较，不同作物复种轮作模式的光能利用率有一定的差异（表 10）。T6 的光能利用率在 2008 和 2011 年均高于 T2，T3 在 2008—2010 年均高于 T2，T4、T5 和 T7 在 2008—2011 年均低于 T2（表 10）。4 年的平均值来看，T3 和 T6 下的光能利用率均显著高于 T2 和其他复种轮作模式；其他处理均有一定程度的下降，T4 和 T5 降幅最大（>11%），且显著低于 T7（表 10）。

表 8 稻田冬季轮作对作物经济产量折能的影响

Table 8 Effect of winter crop rotation on energy of crop yield in paddy field

处理 Treatment	作物经济产量折能 Energy of crop economic yield (10 ⁶ kJ hm ⁻²)					冬季复种模式的能量增加率 Increasing percent of energy in winter cropping (%)				
	2008	2009	2010	2011	平均值 Mean	2008	2009	2010	2011	平均值 Mean
T1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T2	208.6	232.3	182.9	246.3	217.5±6.1 a	-	-	-	-	-
T3	229.3	234.3	193.9	235.6	223.3±1.4 a	9.9	0.9	6.0	-4.3	3.1±3.6 a
T4	237.0	236.5	184.5	243.5	225.4±15.8 a	13.6	1.8	0.9	-1.1	3.8±3.9 a
T5	227.2	226.9	187.6	241.9	220.9±13.5 a	8.9	-2.3	2.5	-1.8	1.9±3.0 a
T6	246.3	234.0	195.4	243.0	229.7±13.5 a	18.1	0.8	6.8	-1.3	6.1±5.0 a
T7	223.4	244.2	192.7	242.1	225.6±13.8 a	7.1	5.2	5.4	-1.7	4.0±2.2 a

-表示没有可测定的数据。下同 - expresses undeterminable data. The same as below

表 9 稻田冬季复种轮作模式对作物经济产量光合生产力的影响

Table 9 Effect of winter crop rotation on photosynthetic productivity of crop yield in paddy field

处理 Treatment	光合生产力 Photosynthetic productivity (g m ⁻² d ⁻¹)					光合生产力增加率 Increasing percent of photosynthetic productivity (%)				
	2008	2009	2010	2011	平均值 Mean	2008	2009	2010	2011	平均值 Mean
T1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T2	13.38	14.57	12.09	14.65	13.67±0.70 c B	-	-	-	-	-
T3	14.38	14.76	13.03	13.94	14.03±0.43 c B	7.5	1.3	7.8	-4.9	2.9±3.5 c B
T4	12.59	12.68	9.98	12.71	11.99±0.77 a A	-6.0	-13.0	-17.4	-13.3	-12.4±2.8 a A
T5	12.28	12.28	10.44	13.18	12.05±0.66 a A	-8.3	-15.7	-13.6	-10.1	-11.9±1.9 a A
T6	13.49	12.77	11.34	14.80	13.10±0.83 b AB	0.8	-12.4	-6.2	1.0	-4.2±3.7 b B
T7	12.77	13.82	11.55	13.96	13.03±0.65 b AB	-4.6	-5.1	-4.5	-4.7	-4.7±0.2 b B

表 10 稻田冬季复种轮作对作物经济产量光能利用率的影响

Table 10 Effect of winter crop rotation on solar energy utilization efficiency of crop yield in paddy field

处理 Treatment	光能利用率 Solar energy utilization efficiency (%)					光能利用率增加率 Increasing percent of SEUE (%)				
	2008	2009	2010	2011	平均值 Mean	2008	2009	2010	2011	平均值 Mean
T1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
T2	1.62	1.77	1.46	1.78	1.66±0.09 b AB	—	—	—	—	—
T3	1.74	1.79	1.58	1.69	1.70±0.05 c B	7.5	1.3	7.8	-4.9	2.9±3.5 c A
T4	1.53	1.55	1.22	1.55	1.46±0.09 a A	-5.4	-12.4	-16.8	-12.9	-11.9±2.7 a A
T5	1.50	1.50	1.28	1.61	1.47±0.08 a A	-7.7	-15.1	-12.8	-9.4	-11.2±1.9 a A
T6	1.69	1.60	1.46	1.92	1.67±0.11 b AB	4.5	-9.2	-0.6	8.4	0.8±4.4 c A
T7	1.55	1.67	1.40	1.69	1.58±0.08 b AB	-4.6	-5.1	-4.5	-4.7	-4.7±0.2 b A

2.3 农田生态系统中不同种植模式下的能值投入产出

从表 11 可看出, 由于所有处理都在同一个试验站, 可更新的自然资源应是一样的, 但种植的作物和生长时期并不完全一致, 表土净损失能量存在一定的差异, 能值损失最少的为 T1 (2.98×10^{16} sej), 损失最多的为 T5 (3.83×10^{16} sej), 其他处理损失依次为 T4>T3>T6>T7>T2。工业辅助能中的化肥和农药的施用也根据不同的作物有一定的差异, T1 的工业辅助能最少 (1.62×10^{17} sej), 工业辅助能最多的是 T4 (2.98×10^{17} sej), 后者近 2 倍于前者。可更新的有机能包括劳动力、有机肥和种子的能量, 不同的种植模式投入的有机能也有一定的不同, 有机能的投入最少的也是 T1 (6.55×10^{15} sej), T7 的有机能投入将近 T1 的 2 倍 (1.19×10^{16} sej)。作物的产出能是通过作物经济产量换算来的, 不同种植模式下水稻和冬季作物的产量均存在一定的差异, 投入能值最低的 T1 的产出能也最低 (1.39×10^{16} sej), 产出最高的 T6 为 T1 的近 4 倍 (5.42×10^{16} sej)。

2.4 农田生态系统中不同种植模式下的能值指标体系

冬季复种模式的能值投入率大部分都大于 T1, T4 和 T7 增幅很明显, 分别达到 61.1%和 50.4%; 但 T3 低于 T1 (表 12)。冬季复种模式下的能值产出率只有 T4 高于 (53.7%) T1, 其他处理均低于 T1 (表 12)。冬季复种模式下的环境负荷率比 T1 大幅提高, 增幅为 T4>T5>T7>T6>T3>T2 (表 12)。除 T3 的环境资源能值/总投入能值比值 (1.2%) 略高于 T1, 其他处理均小于 T1, 最大降幅为 T4 的 30.9% (表 12)。冬季复种模式下的不可更新环境资源能值/环境资源总能值比值均大于 T1, 这说明冬季作物的种植有可能增加土壤流失的风险 (表 12)。T3 的不可更新环境资源能值/总投入能值的比值 (12.4%) 高于 T1, 其他的冬季复种模式均低于 T1, 降幅为 T7>T4>T6>T5>T2 (表 12)。冬季复种模式下的工业辅助能值/总投入能值的比值均超过 0.8, 即工业投入所占比重大, 但处理间差异不明显 (表 12)。冬季复种模式下的能值密度均大于 T1, 增幅最大的 T4 达 65.3%,

其他为 T5>T7>T6>T3>T2（表 12）。冬季复种模式下的 T2 和 T3 的可持续发展指数降低，T4、T6 和 T7 则增加，特别是 T4 的可持续发展指数增加 122.4%（表 12）。

表 11 农田生态系统中不同种植模式中能值分析

Table 11 Analysis of emergy under different cropping patterns in agro-ecosystems (sej)

项目 Item		种植模式 Cropping patterns						
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
可更新自然资源 Renewable natural resources	太阳辐射 Solar radiation	4.54E+13	4.54E+13	4.54E+13	4.54E+13	4.54E+13	4.54E+13	4.54E+13
	雨水化学能 Rain chemical energy	1.60E+15	1.60E+15	1.60E+15	1.60E+15	1.60E+15	1.60E+15	1.60E+15
	雨水势能 Rain potential energy	8.13E+13	8.13E+13	8.13E+13	8.13E+13	8.13E+13	8.13E+13	8.13E+13
	风能 Wind energy	2.55E+16	2.55E+16	2.55E+16	2.55E+16	2.55E+16	2.55E+16	2.55E+16
	小计 Subtotal	2.72E+16	2.72E+16	2.72E+16	2.72E+16	2.72E+16	2.72E+16	2.72E+16
不可更新自然资源 Unrenewable natural resources	表土净损失 Net loss of topsoil	2.98E+16	3.11E+16	3.77E+16	3.79E+16	3.83E+16	3.22E+16	3.12E+16
工业辅助能 Industrial auxiliary energy	电力 Electricity	4.14E+14	4.14E+14	4.14E+14	4.82E+14	4.28E+14	4.28E+14	4.28E+14
	机械动力 Mechanical power	4.05E+16	6.08E+16	6.08E+16	6.08E+16	6.08E+16	6.08E+16	6.08E+16
	农药 Pesticide	7.88E+15	7.88E+15	7.88E+15	9.46E+15	7.88E+15	7.88E+15	7.88E+15
	氮肥 Nitrogen fertilizer	4.43E+16	4.43E+16	4.43E+16	7.93E+16	7.35E+16	4.90E+16	6.19E+16
	磷肥 Phosphate fertilizer	6.33E+16	6.33E+16	6.33E+16	1.38E+17	1.05E+17	1.13E+17	1.13E+17
	钾肥 Potash fertilizer	5.52E+15	5.52E+15	5.52E+15	9.89E+15	7.34E+15	5.52E+15	5.52E+15
	小计 Subtotal	1.62E+17	1.82E+17	1.82E+17	2.98E+17	2.55E+17	2.37E+17	2.50E+17
可更新的有机能 Renewable organic energy	劳动力 Labor force	1.04E+15	1.11E+15	1.11E+15	1.33E+15	1.19E+15	1.19E+15	1.19E+15
	有机肥 Organic fertilizer	5.43E+15	5.43E+15	5.43E+15	8.13E+15	8.13E+15	8.13E+15	8.13E+15
	种子 Seed	7.50E+13	7.76E+13	7.76E+13	1.30E+14	3.21E+14	1.12E+15	1.78E+15
	小计 Subtotal	6.55E+15	6.62E+15	6.62E+15	9.59E+15	9.64E+15	1.09E+16	1.19E+16
农田产出能 Output energy of cropland	水稻 Rice	1.39E+16	1.40E+16	1.39E+16	1.39E+16	1.39E+16	1.42E+16	1.41E+16
	冬季作物 Winter crops	-	1.44E+14	1.79E+14	2.51E+16	3.51E+15	4.00E+16	2.24E+16
	小计 Subtotal	1.39E+16	1.41E+16	1.41E+16	3.90E+16	1.74E+16	5.42E+16	3.65E+16

表 12 农田生态系统中不同种植模式下的能值指标

Table 12 Emergy indexes under different cropping patterns in agro-ecosystems

项目 Item	种植模式 Cropping patterns						
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
能值投入率 Emergy input ratio	2.84	3.12	2.81	4.57	3.89	3.98	4.27
能值产出率 Emergy output ratio	0.08	0.07	0.07	0.13	0.07	0.07	0.06
环境负荷率 Environmental loading ratio	5.68	6.30	6.50	9.12	7.95	7.33	7.65
环境资源能值/总投入能值 Emergy ratio of environmental resources to total inputs	0.25	0.24	0.26	0.17	0.20	0.19	0.18
不可更新环境资源能值/环境资源总能值 Emergy ratio of unrenewalbe environmental resources to total environmental resources	0.52	0.53	0.58	0.58	0.58	0.54	0.53
不可更新环境资源能值/总投入能值 Emergy ratio of unrenewable environmental resources to total inputs	0.13	0.13	0.15	0.10	0.12	0.11	0.10
工业辅助能值/总投入能值 Emergy ratio of industrial supplement to total inputs	0.82	0.83	0.80	0.86	0.84	0.85	0.86
能值密度 Emergy density (10 ¹³ sej m ⁻² a ⁻¹)	2.25	2.47	2.54	3.73	3.30	3.05	3.17
可持续发展指数 Sustainable development index	0.33	0.32	0.29	0.73	0.33	0.37	0.35

3 讨论

3.1 稻田生态系统中不同种植模式下的作物光合生产力和光能利用率

光合生产力和光能利用率是衡量不同耕作制度和复种模式生产力高低的重要指标^[33]。本试验表明, 双季稻田冬季复种模式下的光合生产力和光能利用率均大于稻田冬季休闲。冬季复种模式下的光合生产力和光能利用率的提高主要是由于冬季作物的种植有效地延长了作物光合作用的时间; 另一原因可能是冬季作物的种植, 有利于下茬水稻的生长, 在一定程度上提高了水稻的光合效率。双季稻田冬季种植经济作物的光合生产力和光能利用率低于冬季种植绿肥, 这可能是由于绿肥的生物量较大且生育周期较长, 有利于截获更多的太阳能。有研究报道长江中下游地区稻田的光能利用率为 1.0% 左右, 高产田为 1%—2%, 低产田只有 0.5% 左右^[34]; 广东水稻高产田可达 2.6%, 北京市郊小麦生长盛期可达 4%—5%, 国外报道甚至高达 9.5%^[35]。本研究中双季稻田不同种植模式下的光能利用率范围为 1.3%—1.7%, 这是因为双季稻田冬季复种模式属于多熟种植, 有利于延长光合时间提高光合生产力和光能利用率。

3.2 稻田生态系统中不同种植模式下的系统能值

能值投入率越高则经济发展程度越高, 越低则说明发展水平越低和对环境的依赖越强, 但能值投入率并非越高越好, 过高的能值投入率增高意味着工业辅助能的增加或自然资源利用的降低, 造成严重的资源浪费, 生产成本升高, 农产品缺乏竞争力。本研究中, 双季稻田种植系统中的能值投入率在 2.81—4.57, 高于 2000 年的中国平均水平 (1.11)^[36], 但低于稻田养鱼系统 (6.28—10.73)^[21]。冬季复种模式 T4 和 T7 的能值投入率明显高于双季稻田冬季休闲, 即稻田冬季种植油菜或豌豆有利于提高能值投入率, 降低对环境的依赖程度。综合本试验结果发现, 双季稻田冬季复种模式下的能值投入率处于较低水平, 对自然资源的依赖性较强, 今后应选择合适的冬季作物和合理的工业辅助能投入, 来保护农田环境和维持水稻的良性发展。

能值产出率表明系统的生产效率、投资回报率和产品价格竞争优势。本研究中, 除 T4 的能值产出率高于稻田冬季休闲 53.7% 外, 其他处理均低于稻田冬季休闲, 这说明稻田冬季种植油菜投资回报率较高。中国农业生态系统平均的能值产出率为 1.42^[30], 稻鱼

系统为 1.38^[21]。相比其他报道, 本试验中能值投资回报率均偏低, 农产品的市场竞争力差, 农产品加工处于初级水平。因此, 应优化调整种养结构, 降低工业辅助能的投入, 充分利用本地自然资源。

环境负荷率越高说明系统采用的技术水平越高或者系统对环境的压力越大, 尽管系统投入购买能值并非不是本地资源, 但最终还是得追溯到能量或原料的来源上^[3]。蓝盛芳等研究报道中国农业生态系统中的环境负载率平均水平为 2.8^[30], 安塞县粮食生产生态经济系统中环境负载率仅为 0.89^[29]。本研究中, 双季稻田冬季休闲种植模式中的环境负载率为 5.68, 所有的双季稻田冬季复种模式的环境负载率均高于冬季休闲, 其中 T4 最高; 这意味着本研究的稻田种植系统中的环境压力较大, 工业辅助能投入较大, 特别是稻田冬季复种模式, 要求将来在生产上必须减少化肥投入, 降低环境负载率, 才能促进稻田生态系统的可持续发展。环境资源能值占总投入能值的比例为 0.17—0.26, 和安塞县粮食生产生态经济系统中比值 (0.23) 相类似^[29]。相比于大部分冬季复种模式下的该比值小于冬季休闲, 以 T4 降幅最大, 一定程度上说明稻田冬季复种模式更有利于保护农田环境资源。不可更新环境资源能值/环境资源总能值的比值达到 0.52—0.58, 不可更新环境资源所占比重较大, 农作物产品的获取消耗了大量不可更新的环境资源, 增大了稻田水土流失的风险, 不利于稻田系统的可持续发展; 不可更新环境资源能值/总投入能值的比值为 0.10—0.15, 山东高产粮区农田生态系统的该比值仅为 0.02^[8], 过高的比值说明稻田农产品的产出很大程度上依赖于不可更新环境资源的消耗, 但稻田冬季种植模式的比值略低于稻田冬季休闲, 说明冬季作物的种植一定程度上有利于稻田水土保持和养分流失。

工业辅助能为无机能, 主要包括肥料和农药, 间接投入到粮食生产生态系统中, 为强化太阳能转化为贮存食物能的过程。本试验中, 工业辅助能值占总投入能值超过 80%, 是整个稻田生态系统最重要的能值投入, 具有较高的工业化水平。除 T4 外, 其他双季稻田冬季复种模式的比值均大于冬季休闲, 即冬季复种模式中的化肥和农药投入的能值较大。安塞县粮食生产生态经济系统中工业辅助能值/总投入能值的比值为 0.35^[29], 明显低于本试验。这一结果提醒人们, 必须减少工业辅助能的投入和提高有机能值的投入, 如推广良种和减少用种量等, 尤为重要是广辟有机

肥源, 推广秸秆还田, 提高人畜粪尿利用率, 才利于稻田生态系统的可持续发展。

江西省农业生态系统在 1990 年的能值密度为 $8.33 \times 10^{11} \text{ sej m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 到 2009 年提高到 $1.01 \times 10^{12} \text{ sej m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 提升 21.2%^[31]。本研究中的能值密度达到 2.25×10^{13} — $3.73 \times 10^{13} \text{ sej m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 比平均值高 20 多倍, 属于集约化程度较高的农业生态系统。双季稻田冬季复种模式下的能值密度均高于冬季休闲种植模式, 说明冬季作物的种植, 加大了种植系统中能量的投入, 有利于获得更多的农作物产出能。

如果某个生态系统的能值产出率高而环境负荷率低, 则它是可持续的; 反之, 则不可持续; 其值为 1—10, 表明该系统富有活力和发展潜力; >10 则是经济不发达的象征, 表明对资源开发利用不够充分; <1 预示着该系统是高投入驱动型系统。本研究中, 所有的种植模式处于 0.32—0.73, 均 <1.0, 与前人报道的稻鱼农业生态系统中的可持续发展指数较一致^[21]; 这说明这些农业生态系统属于高投入驱动型农业系统, 主要是以消耗工业辅助能来获得稻田生产的发展, 不利于水稻种植的可持续。双季稻田冬季复种模式下的可持续发展指数虽也 <1, 但明显高于稻田冬季休闲, 意味着稻田冬季复种模式有利于水稻种植生态系统的可持续发展。未来发展水稻种植应充分利用有机肥和作物秸秆能源, 减少化肥的投入, 提高可持续发展指数, 促进水稻种植业的健康发展。

4 结论

双季稻田冬季种植作物有利于提高稻田的光合生产力和光能利用率。稻田冬季种植经济作物轮作模式的光合生产力和光能利用率均低于双季稻田冬季复种连作模式, 但冬季种植混播绿肥轮作模式则增加了作物光合生产力和光能利用率, 即双季稻田冬季种植混播绿肥轮作模式最有利于作物光合生产力和光能利用率的提高。

从环境资源能值/总投入能值的比值和可持续发展指数来看, 双季稻田冬季种植蚕豆和豌豆的种植模式比稻田冬季休闲具有一定的优势。双季稻田冬季种植油菜的种植模式在能值投入和能值产出率均最大, 是一个高投入高产出的种植模式, 虽高产出以环境资源的消耗为代价, 但其环境资源所占比例在稻田种植模式中较小, 有利于该模式的可持续发展。因此, 双季稻田冬季种植油菜为最佳选择。

References

- [1] 朱万斌, 邱化蛟, 常欣, 程序. 农业生态系统生产力的概念及其度量方法. 中国农业科学, 2005, 38(5): 983-989.
Zhu W B, Qiu H J, Chang X, Cheng X. The concept of agricultural productivity on ecosystem scale and its measurement. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(5): 983-989. (in Chinese)
- [2] 王家堂. 国外耕作制度及其发展趋势. 耕作与栽培, 1990 (4): 60.
Wang J T. Foreign farming systems and their development tendency. *Tillage and Cultivation*, 1990(4): 60. (in Chinese)
- [3] Odum H T. *Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making*. John Wiley & Sons, 1996.
- [4] 王千, 金晓斌, 周寅康. 粮食主产区种植业生态经济系统投入产出能值空间差异与态势研究——以河北为例. 自然资源学报, 2012, 27(1): 62-73.
Wang Q, Jin X B, Zhou Y K. Spatial differences and trend of emergy input and output indices of planting eco-economic system in major grain producing area: a case of Hebei province. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(1): 62-73. (in Chinese)
- [5] 邓仕槐, 肖鸿, 张小洪, 张延宗. 废物处理方式对工业系统可持续性影响的能值分析. 资源科学, 2010, 32(9): 1806-1813.
Deng S H, Xiao H, Zhang X H, Zhang Y Z. Emergy evaluation of impacts of waste treatment methods on the sustainability of the industrial system. *Resources Science*, 2010, 32(9): 1806-1813. (in Chinese)
- [6] 李洪波, 李燕燕. 武夷山自然保护区生态旅游系统能值分析. 生态学报, 2009, 29(11): 5869-5876.
Li H B, Li Y Y. An emergy analysis on the ecotourism system of Wuyishan natural reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(11): 5869-5876. (in Chinese)
- [7] Odum H T. Self-organization, transformity, and information. *Science*, 1988, 242(4882): 1132-1139.
- [8] 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. 农业工程学报, 2011, 27(8): 318-323.
Zhao G S, Jiang H R, Wu W L. Sustainability of farmland ecosystem with high yield based on emergy analysis method. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(8): 318-323. (in Chinese)
- [9] 李俊莉, 曹明明. 生态脆弱区资源型城市农业生态系统的能值分析——以榆林市为例. 中国农业科学, 2012, 45(12): 2552-2560.
Li J L, Cao M M. Emergy analysis of agro-ecosystem of resource-based city in vulnerable Eco-egions—a case of Yulin city. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(12): 2552-2560. (in Chinese)
- [10] 苏芮, 陈亚宁, 李卫红, 周洪华, 马雁飞, 王国刚. 基于能值理论

- 的农业复合系统评价与案例研究. 中国沙漠, 2012, 32(1): 226-234.
- Su R, Chen Y N, Li W H, Zhou H H, Ma Y F, Wang G G. Assessment of agricultural complex system based on emergy and a case study. *Journal of Desert Research*, 2012, 32(1): 226-234. (in Chinese)
- [11] 李飞, 林慧龙, 常生华. 农牧交错带种植模式与种养模式的能值评价. 草地学报, 2007, 15(4): 322-326.
- Li F, Lin H L, Chang S H. Emergy evaluation on the cropping mode and the cropping-breeding coupled mode in the ecotone between farming and pasturing areas. *Acta Agrestia Sinica*, 2007, 15(4): 322-326. (in Chinese)
- [12] 税伟, 李碧军, 白剑平. 基于能流的生态农户分析与设计方法研究——以川北丘陵区一肉狗养殖户为例. 中国生态农业学报, 2012, 20(7): 945-955.
- Shui W, Li B J, Bai J P. Analysis and design methods of ecological farmer household based on emergy flow: A case study of dog-breeding farmer household in northern Sichuan. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(7): 945-955. (in Chinese)
- [13] 王淑彬, 王开磊, 黄国勤. 江南丘陵区不同种植模式稻田生态系统服务价值研究——以余江县为例. 江西农业大学学报, 2011, 33(4): 636-642.
- Wang S B, Wang K L, Huang G Q. A study on ecosystem service value of paddy fields in multiple cropping systems in southern hilly areas of China——taking Yujiang county as an example. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2011, 33(4): 636-642. (in Chinese)
- [14] 白小琳, 徐尚起, 汤文光, 陈阜, 胡清, 张海林. 不同耕作措施下双季稻田生态系统碳循环及其生态服务价值. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2489-2494.
- Bai X L, Xu S Q, Tang W G, Chen F, Hu Q, Zhang H L. Ecosystem service value and carbon cycle of double cropping paddy under different tillage. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2489-2494. (in Chinese)
- [15] 余喜初, 李大明, 黄庆海, 喻耀民, 熊军, 胡惠文, 徐小林, 陈明. 鄱阳湖地区长期施肥双季稻田生态系统净碳汇效应及收益评估. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1777-1782.
- Yu X C, Li D M, Huang Q H, Yu Y M, Xiong J, Hu H W, Xu X L, Chen M. Net carbon sink effects and economic benefits in double rice ecosystem under long-term fertilization in Poyang lake region. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(9): 1777-1782. (in Chinese)
- [16] 周卫军, 王克林, 王凯荣, 谢小立, 刘鑫, 王勤学, 渡边正孝. 长江流域稻田生态系统的水分和养分转换过程. 地理学报, 2004, 59(1): 25-32.
- Zhou W J, Wang K L, Wang K R, Xie X L, Liu X, Wang Q X, Watanabe M. Experimental study on water and nutrient transformation in the paddy ecosystem of the Yangtze valley. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(1): 25-32. (in Chinese)
- [17] 肖玉, 谢高地, 鲁春霞. 稻田生态系统氮素吸收功能及其经济价值. 生态学杂志, 2005, 24(9): 1068-1073.
- Xiao Y, Xie G D, Lu C X. Process of nitrogen uptake by rice paddy ecosystem and its economic value. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(9): 1068-1073. (in Chinese)
- [18] 梁斐斐, 蒋先军, 袁俊吉, 何炳辉. 垄作稻田生态系统对三峡库区坡面径流中氮、磷的消纳以及降雨强度的影响. 水土保持学报, 2012, 26(3): 7-11.
- Liang F F, Jiang X J, Yuan J J, He B H. Sequestration of nitrogen and phosphorus and rainfall intensity influence in rice-based ecosystems of the three gorges reservoir area. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(3): 7-11. (in Chinese)
- [19] 肖玉, 谢高地, 鲁春霞. 稻田生态系统氮素转化经济价值研究. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1745-1750.
- Xiao Y, Xie G D, Lu C X. Economic values of nitrogen transformation in rice field ecosystems. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(9): 1745-1750. (in Chinese)
- [20] 李向东, 陈尚洪, 陈源泉, 高旺盛, 马月存, 马丽. 四川盆地稻田多熟高效保护性耕作模式的生态系统服务价值评估. 生态学报, 2006, 26(11): 3782-3788.
- Li X D, Chen S H, Chen Y Q, Gao W S, Ma Y C, Ma L. Evaluation of the multi-cropping ecosystem services under conservation tillage paddy field in Sichuan basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(11): 3782-3788. (in Chinese)
- [21] 杨海龙, 吕耀, 闵庆文, 张丹, 焦文珺, 何露, 刘珊, 孙业红. 稻鱼共生系统与水稻单作系统的能值对比——以贵州省从江县小黄村为例. 资源科学, 2009, 31(1): 48-55.
- Yang H L, Lü Y, Min Q W, Zhang D, Jiao W J, He L, Liu S, Sun Y H. Emergy comparison of rice-fish agriculture and rice monocropping: a case study of Xiaohuang village, congjiang county, Guizhou province. *Resources Science*, 2009, 31(1): 48-55. (in Chinese)
- [22] 湖南农学院编著. 作物栽培学实验指导. 北京: 农业出版社, 1988.
- Agricultural college of Hunan. *The Exprimental Guide for Crop Cultivation*. Beijing: Agriculture Press, 1988. (in Chinese)
- [23] 黄国勤. 鄱阳湖区农业生态系统可持续发展研究. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- Huang G Q. *Studies on Sustainable Development of Agroecological System*. Beijing: China Environmental Science Press, 2011. (in Chinese)

- [24] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, Belt M V D. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [25] Brandt-Williams S. *Handbook of Emergy Evaluation: A Compendium of Data for Emergy Computation Issued in A Series of Folios*. Gainesville: University of Florida, 2001.
- [26] La Rosa A, Siracusa G, Cavallaro R. Emergy evaluation of Sicilian red orange production. A comparison between organic and conventional farming. *Journal of Cleaner Production*, 2008, 16(17): 1907-1914.
- [27] Campbell D E, Brandt-Williams S L, Meisch M E A. *Environmental Accounting Using Emergy: Evaluation of the State of West Virginia*. US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Health and Environmental Effects Research Laboratory, Atlantic Ecology Division, 2005.
- [28] Lan S F, Odum H T, Liu X. Emergy flow and emergy analysis of the agroecosystems of China. *Ecology Science*, 1998, 17(1): 32-39.
- [29] 刘新卫, 陈百明, 杨红. 粮食生产系统的能值分析——以安塞县为例. 干旱地区农业研究, 2004, 22(2): 174-180.
- Liu X W, Chen B M, Yang H. Emergy analysis of food producing system——A case study of Ansai county. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2004, 22(2): 174-180. (in Chinese)
- [30] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳. 生态经济系统能值分析. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- Lan S F, Qin P, Lu H F. *Emergy Analysis of Ecological Economic System*. Beijing: Chemical Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [31] 王卫文, 曹福祥, 康文星, 沙甲先, 何介南. 江西省农业生态经济系统的能值指标分析. 中国农学通报, 2011, 27(29): 208-213.
- Wang W W, Cao F X, Kang W X, Sha J X, He J N. Emergy index analysis of agro-ecological economic system of Jiangxi province. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(29): 208-213. (in Chinese)
- [32] 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. 农业现代化研究, 2010, 31(6): 738-741.
- Xiong K, Yang G Q, Cai Y Y. Emergy analysis of farmland ecosystems in Wuhan based on emergy theory. *Research of Agricultural Modernization*, 2010, 31(6): 738-741. (in Chinese)
- [33] 沈学年, 刘巽浩. 多熟种植. 北京: 农业出版社, 1983.
- Shen X N, Liu X H. *Multiple Cropping*. Beijing: Agriculture Press, 1983. (in Chinese)
- [34] 周淑新, 董梅英, 孙苏卿. 作物生产与光合效率的相关分析. 张家口农专学报, 2003, 19(2): 4-5.
- Zhou S X, Dong M Y, Sun S Q. Correlation analysis of crop production and photosynthetic efficiency. *Journal of Zhangjiakou Agricultural College*, 2003, 19(2): 4-5. (in Chinese)
- [35] 杨贵萍, 涂悦贤. 广东省水稻光能利用现状、潜力及提高途径. 广东农业科学, 1996(6): 9-10.
- Yang G P, Tu Y X. The current situation, potential and improving approaches of solar utilization in Guangdong province. *Guangdong Agricultural Sciences*, 1996(6): 9-10. (in Chinese)
- [36] Chen G Q, Jiang M M, Chen B, Yang Z F, Lin C. Emergy analysis of Chinese agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 115(1): 161-173.

(责任编辑 郭银巧)