

朱冰莹, 陈留根, 盛 婧, 等. 稻麦两熟农田径流养分循环利用模式的能值分析与生态补偿标准测算[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(5): 592-599.

ZHU Bing-ying, CHEN Liu-gen, SHENG Jing, et al. Emergy analysis and ecological compensation standard of the runoff nutrient recycling system in rice-wheat rotation systems[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(5): 592-599.

稻麦两熟农田径流养分循环利用模式的能值分析与生态补偿标准测算

朱冰莹¹, 陈留根², 盛 婧², 郑建初^{2*}

(1.南京农业大学人文与社会发展学院, 南京 210095; 2.江苏省农业科学院循环农业研究中心, 南京 210095)

摘 要:为探讨稻麦两熟农田径流养分循环利用模式的运作可持续性和生态补偿标准,应用生产-生态系统能值测算方法,综合分析其环境安全性和运作持续性;结合生产运营实践,深入分析了基于生命周期过程的物能投入与输出,提出生态补偿依据;并基于能值收益差异估算出其持续运行的生态补偿标准。结果表明,与传统模式相比,径流养分循环利用模式的环境负载率降低39.62%,而能值可持续发展指数和环境安全性指数分别提高64.89%和36.73%。径流养分循环利用模式的生物辅助能投入增加42.16%,而污染产能降低了70.09%。养分循环利用模式的氮磷养分环境排放量分别降低34.85%和30.43%。同时,循环利用模式的净能值收益比传统模式低 $2.15 \times 10^{16} \text{ Sej} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。研究表明,径流养分循环利用模式提高了环境安全性但降低了经济效益,其生态补偿标准应不低于 $4\ 153.78 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

关键词:稻麦轮作;径流;养分流失;循环农业;能值分析;生态补偿

中图分类号:S19

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2019)05-0592-08

doi: 10.13254/j.jare.2019.0142

Emergy analysis and ecological compensation standard of the runoff nutrient recycling system in rice-wheat rotation systems

ZHU Bing-ying¹, CHEN Liu-gen², SHENG Jing², ZHENG Jian-chu^{2*}

(1.College of Humanity and Social Development, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2.Center of Circular Agriculture, Jiangsu Academy of Agricultural Science, Nanjing 210095, China)

Abstract: To investigate the sustainability and ecological compensation standard for the runoff nutrient recycling system in rice-wheat rotation systems, the environmental safety and sustainability of operations was analyzed based on emergy analysis and evidence of ecological compensation was proposed based on energy and material flow analysis over the entire life cycle of production practice; The payment standard based on the net emergy benefit difference was also calculated. Emergy analysis suggested that the environmental loading ratio was reduced by 39.62%, while the emergy sustainability index and environmental safety index were increased by 64.89% and 36.73% under the nutrient recycling system, respectively. Energy flow analysis showed that the biological auxiliary energy input was increased by 42.16%, while energy output through pollutants was reduced by 70.09%. Material flow analysis showed that the recycling system decreased nitrogen and phosphorus output to the surrounding water environment by 34.85% and 30.43%. Likewise, the net emergy benefit was lower by $2.15 \times 10^{16} \text{ Sej} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ for the recycling system than for the conventional system. These results suggested that the recycling system improved environmental safety but reduced economic profit, which thus required ecological compensation for its ecosystemic services, and the payment standard was estimated to be $4\ 153.78 \text{ yuan} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$.

Keywords: rice-wheat rotation; runoff; nutrient loss; recycling agriculture; emergy analysis; ecological compensation

收稿日期:2019-03-21 录用日期:2019-06-12

作者简介:朱冰莹(1984—),安徽黄山人,博士,讲师,主要研究方向为农村与区域可持续发展。E-mail:zby@njau.edu.cn

*通信作者:郑建初 E-mail:zjc@jaas.ac.cn

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金重点项目(CX(16)1003-13)

Project supported: Key Program of Self-Innovation in Agricultural Science and Technology of Jiangsu Province(CX(16)1003-13)

稻麦两熟制是长江三角洲水网农区的主体耕作制度,其产量约占我国谷物总产量的22%,对我国粮食安全保障起着重要作用^[1-2]。目前,该区域稻麦周年生产的氮肥投入总量超过 $500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,磷肥投入高达 $210\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,远高于全国平均水平(氮肥为 $134\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,磷肥为 $48\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)^[3]。由于化肥投入量大而作物养分利用效率较低($<40\%$),在确保高产的同时,大量肥料源养分随地表径流直排周边水域,从而加剧富营养化程度,进一步恶化水体环境^[4]。

基于循环农业的“减量化、资源化、再循环和可控制”设计原则^[5],本课题组以径流养分资源化循环利用降低化肥投入为目标,设计了“农田-净化-堆肥-农田”的地表径流养分循环利用模式^[6]。通过设计净化塘,将富营养的农田地表径流全部汇集,并种植氮磷吸收能力较强的水生植物(如水葫芦、美人蕉等)进行生物拦截,进而打捞水生植物,并堆沤成有机肥进行还田利用。前期研究结果显示,这一模式不仅能减少化肥投入量,改良土壤养分含量,还可以提高作物产量^[6-8]。然而,前期研究均基于短期试验而得出初步结论,该系统能否进行长期可持续运作目前并不清楚,还需要从生态经济学角度对其产出效率和持续发展能力进行定量分析。

目前,一些应用于循环农业系统评价的生态经济学方法均存在经济流与生态流不能统一折算的缺陷^[9]。例如,生命周期评价法主要是针对环境排放和资源利用程度进行定量评价,而缺乏对社会经济效益的评估^[10]。价值量评价法即采用货币价值量进行评价,仅能对某系统的生态服务功能进行评价,而不能对生态资产进行评估^[11]。生态足迹法将生态消费和废弃物产出折合为需求面积进行核算,仅考虑了生态效益而缺乏对社会经济效益的考量^[12]。因此,针对由多重子系统组合而形成的循环农业复合系统的效益评价,需要引进能够统一生态流与经济流的环境经济学方法。

能值理论由Odum^[13]于20世纪80年代提出,将系统过程中直接或间接摄入的能量、物质、资金和信息等转化为统一度量单位——太阳能值(Solar Emergy),解决了不同能质之间难以比较和计算的难题,从而可以将自然环境资源、社会经济资源和生态服务功能整合为一体进行评价。近年来,能值分析已逐渐被引入循环农业生态经济效益评估研究中。例如,王小龙^[14]采用能值分析对河北省津龙公司“种-养-沼”循环农业系统进行评价,表明循环型农业生产方式优于

非循环型农业生产方式,能值自给率提高281.2%,可持续发展指数提高83.6%。钟珍梅等^[15]应用能值分析方法对规模化牛场“肉牛-沼气-牧草”循环农业模式进行能值投入产出分析,表明循环农业比单一养殖业能值产出率提高10.5%,可持续发展指数提高71.05%,有利于降低环境压力。周连第等^[10]以京郊典型的农业生物循环示范为例,采用能值分析方法,定量分析了系统各个环节能量输入与输出,论证了该循环农业系统具有较强的获利性,值得推广。

目前,关于生态补偿标准估算的主流环境经济学方法,如意愿调查法、条件估值法、机会成本法和碳汇法等^[16-18],均具有一定的主观性和片面性,难以将环境生态价值与社会经济价值同时考虑。尤其是,这类方法主要适用于具有单一主体的生态系统,如森林、草地、农田和流域等^[16-18],对于多个子系统组合而成的循环农业系统并不适用。学术界目前也同样缺乏适用于循环农业系统生态补偿标准的估算方法。然而,能值与生态服务价值之间存在可转化性,毛德华等^[9]已经开始尝试应用能值分析进行农业生态补偿标准的估算。

因此,本文以稻麦两熟农田径流养分循环利用系统为研究对象,基于能值分析,重点比较了该模式与常规稻麦轮作农田的环境安全性与可持续性,借鉴毛德华等^[9]的研究方法,根据能值收益差异确定是否存在生态补偿点,并根据能值与生态服务价值之间的可转化性估算生态补偿标准,旨在为保障该循环系统持续运作的政策制定提供参考,为稻麦周年安全生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究地点

本研究选取的农田径流养分循环利用工程位于江苏省无锡市安镇太湖水稻示范园($31^{\circ}37'N$, $120^{\circ}28'E$)。年均降雨量为1200 mm,年均气温为 16°C ,年无霜期 $>230\text{ d}$,年日照时数 $>2000\text{ h}$ 。耕作制度为稻麦周年两熟,农田土壤类型为典型的潴育水稻土,土壤质地为砂壤土,有机碳含量为 $15\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷含量为 $49.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾含量为 $246.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 研究对象

本研究选择以中小型灌排区为单元,农田面积为 18.6 hm^2 ,农田与净化塘面积之比为96:1。农田径流口的高度设计为田间最大持水量的高度。在田间排水沟处安装流量计,测定每次发生径流的排水量,同

时,每次排水时取样,测定N、P养分含量以计算N、P的系统输出量。农田径流经过流量计后,从排水沟汇集于净化塘。水稻季净化塘种植水葫芦,分别于7月中下旬和8月下旬人工采收2次,每次采收面积为塘中水葫芦覆盖面积的50%;水稻季结束全部打捞;水稻秸秆50%直接还田,50%与水葫芦混合堆肥。小麦季净化塘种植黑麦草,生长期人工采收3次,每次采收面积为塘中总面积的50%;小麦季结束,黑麦草全部人工打捞;小麦秸秆全部还田,黑麦草采收之后进行堆肥,堆沤腐熟之后的有机肥回田利用。从而构建“农田-净化塘-堆肥”径流养分循环利用工程体系(图1)。

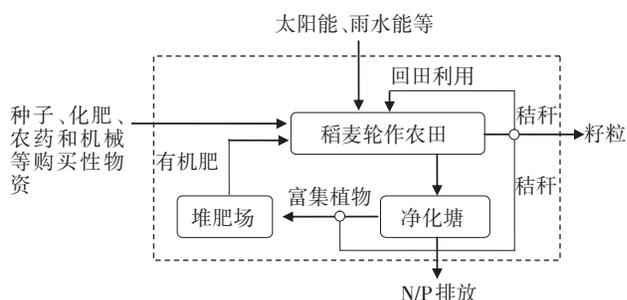


图1 稻麦两熟农田径流养分循环利用系统示意图
(虚线为系统边界)

Figure 1 Diagram of nutrient recycling in runoff for rice-wheat rotation system (Dotted line represent system boundary)

1.3 能值分析

首先,使用Odum^[13]和蓝盛芳等^[19]提供的太阳能值转化率(UEV, $Sej \cdot J^{-1}$ 或 $Sej \cdot kg^{-1}$),将调研的各项物质、能量和资金数据转化为能值;其次,在能值核算中引入可更新比例系数(Renewable fraction)^[20-24],从而将投入资源分为可更新和不可更新两部分;最后,选用以下7个能值指标进行分析。本研究采用全球最新基准能值 $1.583 \times 10^{25} Sej \cdot a^{-1}$ ^[18]。

(1)能值投资率(Emergy investment ratio, EIR):为经济反馈能值与环境资源能值的比率,是反映经济发展与环境负载程度的指标^[4]。计算公式如下:

$$EIR = (P_R + P_N) / (R + N)$$

式中: P_R 为购买性可更新资源; P_N 为购买性不可更新资源; R 为本地可更新环境资源; N 为本地不可更新环境资源。

(2)可更新比率(Renewable ratio, ΦR):反映生产过程中所利用可更新资源的比率^[20]。 ΦR 值越大,表明系统运作更多地依赖于可更新资源的投入。计算公式如下:

$$\Phi R = (R + P_R) / U$$

式中: U 为系统能值投入总量。

(3)能值自给率(Emergy self-sufficiency ratio, ESR):指环境资源能值投入与系统总能值投入的比率,用以衡量本地环境资源对系统的贡献程度^[13]。计算公式如下:

$$ESR = (R + N) / U$$

(4)环境负载率(Environmental loading ratio, ELR):指不可更新能值与可更新能值投入的比率^[17]。ELR值越大,表明系统生产过程对环境的压力越大。计算公式如下:

$$ELR = (N + P_N) / (R + P_R)$$

(5)净能值产出率(Emergy yield ratio, EYR):指系统产出能值与购买性能值的比率^[20]。EYR值越大,表明系统的生产效率越高,经济效益越好。由于对环境有负面效应,参考钟珍梅等^[25]的建议,将径流N、P和K等养分带走的能值设为负产出,其他设定为正产出。计算公式如下:

$$EYR = Y / (P_R + P_N)$$

式中: Y 为系统总能值产出。

(6)可持续发展指数(Emergy sustainability index, ESI):指能值产出率与环境负载率的比值,反映系统发展的可持续性^[20]。计算公式如下:

$$ESI = EYR / ELR$$

(7)环境安全性指数(Environmental safety index, EnSI):指化肥、农药能值总量与购买性能值投入总量的比率与1的差值。基于王小龙等^[20]提出的计算公式进行优化:

$$EnSI = 1 - C / (P_R + P_N)$$

式中: C 为化肥与农药投入能值总量; $P_R + P_N$ 为购买性能值投入总量。

1.4 生态补偿依据分析

依据陈阜^[26]和王小龙^[14]提供的折能系数,将各系统的物质投入与产出转化为能流量,分别计算生物辅助能与工业辅助能投入比例、经济产能和废弃产能的输出比例以及能量产投比。参考钟珍梅等^[25]的建议,将废弃产能设为负能量,而经济产能设为正能量,在计算能量产投比时用正能量减去负能量以计算净能量产出。物流分析主要关注氮、磷的迁移与转化。化肥中的氮磷含量依据厂家提供的参数进行换算,其他物质的氮磷含量比例参考陈阜^[26]提供的折算系数进行计算。径流及净化尾水的氮磷量由前期试验^[6]获得。氮磷经济利用率指经济产品的氮磷含量与系

统氮磷投入总量的比值;氮磷环境排放率指流失于环境的氮磷含量(径流或净化尾水的氮磷量)与系统氮磷投入总量的比值。

1.5 生态补偿标准估算

本文借鉴毛德华等^[9]的方法,针对循环农业系统,提出基于能值收益差异进行生态补偿的方法。首先,分别计算传统种植系统与径流循环系统的能值投入与输出总量;其次,分别计算净能值收益(δEm),如果循环系统的净能值收益小于传统系统,则表明存在生态补偿点,需要实施生态补偿以保证循环系统的可持续运作;最后,计算循环系统与传统系统的净能值收益差异,作为补偿额度。由于能值与社会经济价值的可转换性,通过计算研究区域的能值/货币比率(γ , $Sej \cdot 元^{-1}$),进而估算出以货币形式表现的生态补偿标准。依据李加林等^[27]提供的公式:

$$\gamma = U/GDP$$

式中: U 为某一特定区域全年的总能值投入; GDP 为某一地区全年的国民生产总值。

依据《2017年江苏省统计年鉴》提供的2016年江苏省各项社会、经济投入与产出数据和Odum^[13]、蓝盛芳等^[9]提供的UEV数值,经转化并计算获得 γ 。最后,估算生态补偿标准(S ,元),计算公式: $S = \delta Em/\gamma$ 。

1.6 数据采集与分析

本研究中净化塘相关数据均来自于课题组前期的试验研究^[6-7]。稻麦农田相关数据来自于本研究的实际调研。所有数据均以对应于 1 hm^2 农田进行折算,以一个完整的稻麦生产周期为界限,详细记录其中各种社会经济投入与产出数据,包括化肥、农药、机械、人力、柴油、电力、种子、秸秆和籽粒等;环境资源数据包括太阳能、雨水势能和风能。环境资源数据分别依照如下方法进行估算:

(1)太阳能根据郭媛等^[28]对1960—2007年间长江流域太阳辐射变化的研究结果,本研究取50年来长江流域太阳辐射的最大值 $4.42 \times 10^9 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,反射率为20%。种植面积为 1 hm^2 ($10\,000 \text{ m}^2$),种植时间为11个月(稻麦两季换茬时间按15 d计算)。因此,进入农田子系统的太阳能估算为 $4.42 \times 10^9 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1} \times (1-20\%) \times (11/12) \times 10\,000 \text{ m}^2 = 3.24 \times 10^{13} \text{ J}$;进入净化塘子系统的太阳能为 $4.42 \times 10^9 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1} \times (1-20\%) \times (11/12) \times 104.2 \text{ m}^2 = 3.37 \times 10^{11} \text{ J}$ 。

(2)雨水化学能根据关颖慧^[29]的研究结果,长江流域年平均降雨量为1067 mm。水密度= $1\,000.00 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,吉布斯自由能= $4940 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。种植时间为11

个月(稻麦两季换茬时间按15 d计算)。进入农田的雨水化学能估算为 $1067 \text{ mm} \times 10\,000 \text{ m}^2 \times 1000.00 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 4940 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} = 5.27 \times 10^{10} \text{ J}$ 。进入净化塘的雨水化学能估算为 $1067 \text{ mm} \times 104.2 \text{ m}^2 \times 1\,000.00 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 4940 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \times (11/12) = 5.03 \times 10^8 \text{ J}$ 。

(3)风能风阻系数= $0.002^{[13]}$,空气密度= $1.23 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,风速= $1.70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,面积= $10\,000 \text{ m}^2$,时间= $1.43 \times 10^7 \text{ s}$ 。刮风时间估算如下:以稻麦生长期共11个月计算,每日平均风速为 $1.70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的时间为5 h,总计 $5.94 \times 10^6 \text{ s}$ 。风能的计算公式如下:

风能(J)= $1/2 \times$ 风阻系数 \times 空气密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) \times 面积(m^2) \times [风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)]³ \times 时间(s)

因此,进入农田子系统的风能为 $0.002 \times 1.23 \times 10\,000 \times (1.7)^3 \times 5.94 \times 10^6 / 2 = 3.59 \times 10^8 \text{ J}$;进入净化塘子系统的风能为 $0.002 \times 1.23 \times 104.2 \times (1.7)^3 \times 5.94 \times 10^6 / 2 = 3.74 \times 10^6 \text{ J}$ 。

2 结果与分析

2.1 能值投入与输出分析

能值投入分析(表1)显示,径流养分循环模式的本地环境资源($R+N$)投入能值为 $2.41 \times 10^{15} \text{ Sej}$,而传统种植模式为 $2.40 \times 10^{15} \text{ Sej}$,增加了 $1.00 \times 10^{13} \text{ Sej}$,主要为净化塘水生植物生长所利用。循环模式的购买性可更新资源能值为 $5.23 \times 10^{15} \text{ Sej}$,而传统种植模式为 $3.78 \times 10^{15} \text{ Sej}$,增加了 $1.45 \times 10^{15} \text{ Sej}$,主要为可更新人力投入。购买性不可更新资源在循环模式的能值投入为 $3.68 \times 10^{15} \text{ Sej}$,在传统种植模式的能值投入为 $5.03 \times 10^{15} \text{ Sej}$,循环模式减少 $1.35 \times 10^{15} \text{ Sej}$,主要是循环系统反馈的有机肥投入降低了化肥用量。能值输出分析显示,径流养分循环模式的总能值产出为 $2.64 \times 10^{16} \text{ Sej}$,而传统种植模式的总能值产出为 $2.63 \times 10^{16} \text{ Sej}$,降低了 $1.00 \times 10^{14} \text{ Sej}$ 。主要是由于水生植物拦截吸收了径流 N 、 P 和 K 等养分,从而降低了净化尾水带入周围环境的 N 、 P 和 K 养分所蕴含的负能值。

2.2 能值评价指标分析

能值评价结果(表2)显示,径流养分循环模式的能值投资率与传统模式相近,表明二者总体上在购买性资源的投入差别不大。可更新比率比传统模式高24.49%,表明循环模式对可更新资源的利用效率较高。能值自给率与传统模式差异不大,表明二者总体上从本地环境资源获取的能值投入相近。环境负载率比传统模式低39.62%,主要是由于循环系统的水生植物对农田径流养分进行吸附拦截,从而降低了最

表1 径流养分循环模式与传统种植模式的能值比较(Sej)

Table 1 Comparison between runoff nutrient recycling system and conventional cropping system based on emery analysis (Sej)

资源 Resources	循环模式 Recycling system			传统模式 Conventional system		
	不可更新能值 Nonrenewable energy (P_R)	可更新能值 Renewable energy (P_N)	总能值 Total emery	不可更新能值 Nonrenewable energy (P_R)	可更新能值 Renewable energy (P_N)	总能值 Total emery
输入	本地可更新资源					
Input	太阳能	0	3.27×10^{13}	3.27×10^{13}	0	3.24×10^{13}
	雨水化学能	0	1.65×10^{15}	1.65×10^{15}	0	1.63×10^{15}
	风能	0	8.87×10^{11}	8.87×10^{11}	0	8.80×10^{11}
	合计	0	1.68×10^{15}	1.68×10^{15}	0	1.67×10^{15}
	本地不可更新资源					
	地下水	6.30×10^{14}	0	6.30×10^8	6.30×10^{14}	0
	表土损失能	1.04×10^{14}	0	1.04×10^{14}	1.04×10^{14}	0
	合计	7.34×10^{14}	0	7.34×10^{14}	7.34×10^{14}	0
	购买性资源					
	柴油	3.02×10^{14}	1.59×10^{13}	3.18×10^{14}	3.02×10^{14}	1.59×10^{13}
	化学N肥	1.96×10^{15}	1.03×10^{14}	2.06×10^{15}	3.00×10^{15}	1.58×10^{14}
	化学P肥	6.75×10^{14}	3.55×10^{13}	7.10×10^{14}	8.56×10^{14}	4.50×10^{13}
	化学K肥	1.18×10^{14}	6.21×10^{12}	1.24×10^{14}	3.95×10^{14}	2.08×10^{13}
	农药	3.37×10^{13}	0	3.37×10^{13}	3.37×10^{13}	0
	机械	9.13×10^{12}	0	9.13×10^{12}	9.13×10^{12}	0
	人力	4.03×10^{14}	3.63×10^{15}	4.04×10^{15}	2.55×10^{14}	2.30×10^{14}
	种子(苗)	0	6.67×10^{14}	6.67×10^{14}	0	4.80×10^{14}
	电力	1.80×10^{14}	7.68×10^{14}	9.48×10^{14}	1.80×10^{14}	7.65×10^{14}
	合计	3.68×10^{15}	5.23×10^{15}	8.91×10^{15}	5.03×10^{15}	3.78×10^{15}
输出	籽粒					
Output	径流N素			2.65×10^{16}		2.65×10^{16}
	径流P素			3.91×10^{13}		1.25×10^{14}
	径流K素			1.18×10^{12}		6.09×10^{12}
	合计			4.22×10^{12}		2.88×10^{13}
				2.64×10^{16}		2.63×10^{16}

表2 能值评价指标

Table 2 Emery evaluation indicators

指标 Indicator	循环模式 Recycling system	传统模式 Conventional system
能值投资率 EIR	3.68	3.67
可更新比率 ΦR	0.61	0.49
能值自给率 ESR	0.21	0.21
环境负载率 ELR	0.64	1.06
净能值产出率 EYR	2.97	2.99
可持续发展指数 ESI	4.65	2.82
环境安全性指数 EnSI	0.67	0.49

终排向环境的氮磷等养分含量,从而减轻环境压力。净能值产出率略低于传统种植模式,降幅为0.67%,这主要是由于循环生产链条的延长,导致人力成本投入有所增加。可持续发展指数比传统模式高64.89%,表明径流养分循环模式具有较强的可持续发展能力。

环境安全性指数比传统种植模式高36.73%,这主要是由于该循环模式不但降低了径流养分的环境排放,而且系统反馈有机肥的施用降低了化肥用量,从而使源头和末尾两端均得到了有效控制。

2.3 生态补偿依据

能流分析(表3)显示,与传统种植模式相比,径流养分循环模式的生物辅助能投入增加42.16%,而工业辅助能降低31.33%;生物产能不变,而污染产能降低70.09%。净化塘和堆肥作业过程中劳动力投入增加是径流养分循环模式生物辅助能增加的主要贡献因子,循环系统反馈的有机肥降低外源化肥的投入而减少工业辅助能。此外,径流养分循环模式的产投比(10.20)比传统模式(7.54)高35.28%,表明循环模式具有较高的能量利用效率。

物流分析(表3)表明,与传统种植模式相比,径流

表3 能流与物流分析

Table 3 The energy and material flow analysis

项目 Items	循环模式 Recycling system	传统模式 Conventional system
生物辅助能/J	6.29×10 ⁹	4.42×10 ⁹
工业辅助能/J	3.82×10 ¹⁰	5.57×10 ¹⁰
生物产能/J	4.55×10 ¹¹	4.55×10 ¹¹
污染产能/J	5.81×10 ⁸	1.94×10 ⁹
N素生物利用率/%	63.83	67.40
P素生物利用率/%	85.63	89.17
N素环境排放率/%	13.58	20.84
P素环境排放率/%	10.39	14.93

养分循环模式的N素和P素生物利用率没有显著变化。但是,径流养分循环模式的N素和P素环境排放率分别降低34.85%和30.43%,表明净化塘水生植物拦截不但降低了农田径流带入环境的N、P含量,而且水生植物有机肥的回田利用又进一步减少了化肥投入,因而从源头上降低了化肥源N、P引起的面源污染风险。

2.4 生态补偿标准

经核算(表4),2016年江苏省的环境资源能值(R_1)投入为 1.42×10^{23} Sej;可更新资源产品能值(R_2)主要为农、林、牧和渔等产品资源的能值,总计投入为 3.85×10^{23} Sej;不可更新资源消耗能值(N)为 2.88×10^{24} Sej;总计全年度能值投入总额为 3.41×10^{24} Sej。2016年江苏省GDP为 6.51×10^{11} 元。因此,能值/货币比率(γ)= $\frac{U}{GDP} = \frac{R_1 + R_2 + N}{GDP} = 3.41 \times 10^{24}$ Sej/ (6.51×10^{11}) 元= 5.24×10^{12} Sej·元⁻¹。

依据对净能值收益差异进行补偿的方法,首先,核算出径流养分循环模式与传统种植模式的净能值收益差异额为 2.15×10^{16} Sej·hm⁻²·a⁻¹;其次,依据江苏省的能值/货币比率(γ)为 5.24×10^{12} Sej·元⁻¹,将能值补偿额度转化为市场价格,即 $4\ 153.78$ 元·hm⁻²·a⁻¹。

3 讨论

稻麦两熟制是长江流域种植面积最大的农作制度,长期以来,化肥大量投入是保证该农作系统提高单产的重要措施之一^[30]。然而,作物养分低效利用导致大量养分随地表径流进入周围水域,从而引起水体污染和富营养化等农业环境问题^[4]。基于循环农业思想而设计的“径流养分循环利用工程”是控制农业面源污染的大胆尝试。使用生态经济学方法,本研究发现,该循环模式能够明显降低农田养分径流损失并具有较高的可更新率和环境安全性。

表4 江苏省2016年经济环境系统能值核算

Table 4 Emergy input for the economic and environmental system in Jiangsu Province in 2016

类别 Category	项目 Items	能值/Sej	
环境资源	太阳能	5.84×10^{21}	
	降雨能	1.36×10^{23}	
	风能	4.88×10^{20}	
	合计	1.42×10^{23}	
	可更新资源产品	水产品	1.10×10^{23}
		粮食作物	2.20×10^{23}
		经济作物	5.06×10^{21}
		油料作物	9.34×10^{21}
		麻类作物	6.00×10^{18}
		糖类作物	6.82×10^{19}
不可更新资源消耗	园艺作物	3.66×10^{22}	
	林产品	3.26×10^{21}	
	畜禽产品	6.86×10^{20}	
	合计	3.85×10^{23}	
	发电量	5.29×10^{22}	
	原煤	2.82×10^{22}	
	水泥	1.14×10^{24}	
	钢材	1.55×10^{24}	
	化肥	6.90×10^{22}	
	化学纤维	4.36×10^{22}	
合计	2.88×10^{24}		
总计	3.41×10^{24}		

循环利用模式能够将很大比例的径流养分拦截吸附并堆肥回田利用,从而降低了氮磷环境富营养化,提高了对可更新资源和能量的利用效率。循环利用模式能够提供更多的生态服务功能,关键在于净化塘中水生植物的选择。经过多年摸索,在水稻季净化塘种植水葫芦而小麦季种植黑麦草^[7],这两种植物生长迅速,对氮磷等养分的吸收能力强,并大量转化储存于植株体内^[7]。通过收获水葫芦和黑麦草植株,堆沤制成有机肥,不但降低了系统末端氮磷的输出量,而且减少了系统始端化肥的投入量。这也有利于径流养分循环系统的环境负载率降低,从而提高可更新率、可持续发展指数和环境安全性指数。然而,Ulgiati等^[31]指出,可持续发展指数介于1~10之间,表明系统具有很好的发展潜力。本研究中,尽管循环系统的可持续发展指数高于传统种植系统,但是,后者的可持续发展指数也在1~10之间。这也表明,当前稻麦生产系统虽然向周围水域排出大量径流养分,但还未达到不可持续生产的程度。

然而,本研究也发现,与传统种植模式相比,由于

循环生产链条延长,工程措施及劳务输入增加,导致其能值综合效益显著降低(净能值收益降低 $2.15 \times 10^{16} \text{ SeJ} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$);径流养分循环模式在提高环境效益的同时降低了经济效益。因此,为了激励径流养分循环模式生产实践者的积极性,以保障系统的可持续运行,应该对其提供的环境服务功能(降低农业面源污染)的正外部性实施生态补偿^[32]。

基于能值与资源环境价值和社会经济价值的可相互转化特性^[9],本文提出对能值收益差异进行补偿的方法,成功将能流、物流与价值流纳入同一生态补偿标准估算模型,从而更加科学、合理地估算出径流养分循环利用工程的生态补偿标准。然而,基于能值收益差异的生态补偿标准估算,需要引入能值/货币比率,才能转化为经济补偿标准。关于能值/货币比率的计算,目前主要是基于统计年鉴数据,在不同年份可能会有较大变异。此外,不同区域的生态经济条件不同,能值/货币比率也可能有较大差异。因此,在制定生态补偿相关政策时,首先要明确研究系统所在区域的边界;为了获得较为稳定并且能够切实反映当地实际情况的能值/货币比率,建议核算研究区域连续多年的能值/货币比率,取平均值,而不选用全国的能值/货币比率,以免数据被平均化而难以反映区域差异。

4 结论

(1)与传统种植模式相比,径流养分循环模式具有较高的环境效益,表现为较高的能量利用效率、可持续发展指数和环境安全性指数,较低的工业辅助能投入、污染产能和环境负载率。

(2)径流养分循环模式的净能值收益低于传统种植模式,表明该系统提供了良好的生态服务的同时,需要进行生态补偿,补偿标准为 $4\ 153.78 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

参考文献:

- [1] 杨建昌,杜永,刘辉. 长江下游稻麦周年超高产栽培途径与技术[J]. 中国农业科学, 2008, 41(6): 1611-1621.
YANG Jian-chang, DU Yong, LIU Hui. Cultivation approaches and techniques for annual super-high yielding of rice and wheat in the lower reaches of Yangtze River[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(6): 1611-1621.
- [2] 中国农业年鉴编委会. 中国农业年鉴 2012[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013.
Editorial Committee of China Agricultural Yearbook. China agricultural yearbook 2012[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2013.
- [3] Yang H S, Yang B, Dai Y J, et al. Soil nitrogen retention is increased by ditch-buried straw return in a rice-wheat rotation system[J]. *European Journal of Agronomy*, 2015, 69: 52-58.
- [4] 郑建初,常志州,陈留根,等. 水葫芦治理太湖流域水体氮磷污染的可行性研究[J]. 江苏农业科学, 2008(3): 247-250.
ZHENG Jian-chu, CHANG Zhi-zhou, CHEN Liu-gen, et al. Feasibility study of hyacinth (*Eichhornia crassipes*) used in reducing nitrogen and phosphorus content in polluted water in the Lake Taihu[J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2008(3): 247-250.
- [5] 高旺盛,陈源泉,梁龙. 论发展循环农业的基本原理与技术体系[J]. 农业现代化研究, 2007, 28(6): 731-734.
GAO Wang-sheng, CHEN Yuan-quan, LIANG Long. Discussion about the basic principles and technological systems of circular agriculture[J]. *Research in Agricultural Modernization*, 2007, 28(6): 731-734.
- [6] 刘红江,陈留根,朱普平,等. 稻田流失养分循环利用系统构建研究初探[J]. 生态环境学报, 2010, 19(10): 2275-2279.
LIU Hong-jiang, CHEN Liu-gen, ZHU Pu-ping, et al. Primary research for nutrient recycling from runoff in rice paddy fields[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2010, 19(10): 2275-2279.
- [7] 刘红江,陈留根,朱普平,等. 农田施用水葫芦对水稻产量形成的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(3): 184-188.
LIU Hong-jiang, CHEN Liu-gen, ZHU Pu-ping, et al. Effect of *Eichhornia crassipes* residue application on rice yield formation[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(3): 184-188.
- [8] 盛婧,郑建初,陈留根,等. 水葫芦富集水体养分及其农田施用研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(10): 2119-2123.
SHENG Jing, ZHENG Jian-chu, CHEN Liu-gen, et al. Nutrient enrichment from runoff by *Eichhornia crassipes* and its residue application in the rice fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(10): 2119-2123.
- [9] 毛德华,胡光伟,刘慧杰,等. 基于能值分析的洞庭湖区退田还湖生态补偿标准[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 525-532.
MAO De-hua, HU Guang-wei, LIU Hui-jie, et al. Ecological compensation standard in Dongting Lake region of returning cropland to lake based on emergy analysis[J]. *Journal of Chinese Applied Ecology*, 2014, 25(2): 525-532.
- [10] 周连第,胡艳霞,王亚芝,等. 京郊农业生物循环系统生态经济能值评估——以密云尖岩村为例[J]. 生态学报, 2012, 32(23): 7346-7354.
ZHOU Lian-di, HU Yan-xia, WANG Ya-zhi, et al. Emergy evaluation of an agro-circulation system in Beijing suburb: Take Jianyan village as a case study[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(23): 7346-7354.
- [11] 赵景柱,肖寒,吴刚. 生态系统服务的物质量与价值量评价方法的比较分析[J]. 应用生态学报, 2000, 11(2): 290-292.
ZHAO Jing-zhu, XIAO Han, WU Gang. Comparison analysis on physical and value assessment methods for ecosystems services[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(2): 290-292.
- [12] 唐丽静,王冬艳,杨园园. 基于“多规合一”和生态足迹法的土地利用结构优化[J]. 农业工程学报, 2019, 35(1): 243-251.
TANG Li-jing, WANG Dong-yan, YANG Yuan-yuan. Optimization of land use structure based on "multiple planning integration" and ecological footprint[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(1): 243-251.

- tural Engineering*, 2019, 35(1):243-251.
- [13] Odum H T. Handbook of emergy evaluation: A compendium of data for emergy computation. Folio No.1: Introduction and global budget[R/OL]. [2019-03-21]. <http://www.ees.ufl.edu/cep/>.
- [14] 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: 143.
WANG Xiao-long. An integrated framework based on life cycle assessment and emergy evaluation for circular agriculture: Methods and cases[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016: 143.
- [15] 钟珍梅, 黄秀声, 黄勤楼, 等. 规模化牛场“肉牛-沼气-牧草”循环农业模式能值分析[J]. 家畜生态学报, 2009, 30(6): 112-116.
ZHONG Zhen-mei, HUANG Xiu-sheng, HUANG Qin-lou, et al. Emergy analysis of "Beef-Methane-Forage" circular agriculture in scale cattle farm[J]. *Acta Ecologiae Animalis Domastici*, 2009, 30(6): 112-116.
- [16] 杨欣, 蔡银莺. 农田生态补偿方式的选择及市场运作——基于武汉市383户农户问卷的实证研究[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(5): 591-596.
YANG Xin, CAI Yin-ying. Farmer's selection of farmland ecological compensation mode and its relevant factors: A case of 383 households in Wuhan City[J]. *Resource and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(5): 591-596.
- [17] 崔新蕾, 蔡银莺, 张安录. 基于农业面源污染防治的农田生态补偿标准测算[J]. 广东土地科学, 2011, 10(6): 34-39.
CUI Xin-lei, CAI Yin-ying, ZHANG An-lu. Agricultural land's ecological compensation criteria based on the non-point source pollution[J]. *Guangdong Land Science*, 2011, 10(6): 34-39.
- [18] 李颖, 葛颜祥, 刘爱华, 等. 基于粮食作物碳汇功能的农业生态补偿机制研究[J]. 农业经济问题, 2014(10): 33-40.
LI Ying, GE Yan-xiang, LIU Ai-hua, et al. A study of agricultural ecological compensation based on carbon sequestration of food crops[J]. *Agricultural Economic Problems*, 2014(10): 33-40.
- [19] 蓝盛芳, 钦佩. 生态经济系统能值分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 245-250.
LAN Sheng-fang, QIN Pei. Emergy analysis of eco-economic system[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002: 245-250.
- [20] 王小龙, 韩玉, 陈源泉, 等. 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): 2136-2145.
WANG Xiao-long, HAN Yu, CHEN Yuan-quan, et al. Efficiency and sustainability evaluation of a pollution-free vegetable production system based on emergy analysis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(7): 2136-2145.
- [21] Cavalett O, Queiroz J F, Ortega E. Emergy assessment of integrated production systems of grains, pig and fish in small farms in the south Brazil[J]. *Ecological Modelling*, 2006, 193(3/4): 205-224.
- [22] Brandt-Williams S L. Handbook of emergy evaluation: A compendium of data for emergy computation. Folio No. 4: Emergy of florida agriculture[R/OL]. [2019-03-21]. <http://www.ees.ufl.edu/cep/>.
- [23] Brown M T, Bardl E. Handbook of emergy evaluation: A compendium of data for emergy computation. Folio No.3: Emergy of ecosystems[R/OL]. [2019-03-21]. <http://www.emergysystems.org>.
- [24] Hu Q H, Zhang L X, Wang C B. Emergy-based analysis of two chicken farming systems: A perspective of organic production model in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(23): 7227-7234.
- [25] 钟珍梅, 翁伯琦, 黄勤楼, 等. 基于能值理论的循环复合农业生态系统发展评价——以福建省福清星源循环农业产业示范基地为例[J]. 生态学报, 2012, 32(18): 5755-5762.
ZHONG Zhen-mei, WENG Bo-qi, HUANG Qin-lou, et al. Evaluating the ecosystem sustainability of circular agriculture based on the emergy theory: A case study of the Xingyuan circular agriculture demonstration site in Fuqing City, Fujian[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(18): 5755-5762.
- [26] 陈阜. 农业生态学[M]. 2版. 北京: 中国农业出版社, 2011: 315.
CHEN Fu. Agroecology[M]. 2nd Edition. Beijing: China Agricultural Press, 2011: 315.
- [27] 李加林, 张正龙, 曾昭鹏. 江苏环境经济系统的能值分析与可持续发展对策研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2003, 13(2): 76-81.
LI Jia-lin, ZHANG Zheng-long, ZENG Zhao-peng. Study on emergy analysis and sustainable development of Jiangsu environment-economic system[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2003, 13(2): 76-81.
- [28] 郭媛, 王艳君, 刘长坤. 近50年来(1960—2007年)长江流域20cm口径蒸发皿蒸发量与太阳辐射变化的对比[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2012, 4(6): 496-505.
GUO Yuan, WANG Yan-jun, LIU Chang-kun. Comparative analysis of variations of 20 cm pan evaporation and global solar radiation over the Yangtze River basin during 1960—2007[J]. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology: Natural Science Edition*, 2012, 4(6): 496-505.
- [29] 关颖慧. 长江流域极端气候变化及其未来趋势预测[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
GUAN Ying-hui. Extreme climate change and its trend prediction in the Yangtze River basin[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015.
- [30] Yang H S, Xu M M, Koide R, et al. Effects of ditch-buried straw return on water percolation, nitrogen leaching and crop yields in a rice-wheat rotation system[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2016, 96: 1141-1149.
- [31] Ulgiati S, Brown M. Monitoring patterns of sustainability in natural and man-made ecosystems[J]. *Ecological Modelling*, 1998, 108(1/2/3): 23-36.
- [32] 邓远建, 肖锐, 严立冬. 绿色农业产地环境的生态补偿政策绩效评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(1): 120-126.
DENG Yuan-jian, XIAO Rui, YAN Li-dong. Research on the evaluation of ecological compensation policies of green agricultural producing areas[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2015, 25(1): 120-126.