

传统稻鱼系统生产力提升对稻田水体环境的影响*

丁伟华 李娜娜 任伟征 胡亮亮 陈欣 唐建军**

(浙江大学生命科学院 杭州 310058)

摘要 如何在提升传统农业系统生产力的同时又不破坏其内涵、还对环境不产生负面影响,是一个受到研究者持续性关注的挑战性课题。本研究以具有1200年历史的全球重要农业文化遗产稻鱼系统为例,研究稻鱼系统鱼的放养密度对生产力和环境的影响,探讨能够显著提升稻鱼系统生产力且又不破坏其传统性(产品优质、环境友好)的途径。研究表明,传统稻鱼系统(RF)(田鱼目标产量 $375\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)与水稻单作系统(RM)水体的化学需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)及铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)含量均没有显著性差异。随着田鱼养殖密度提高(鱼产量由 $750\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 提高到 $3\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)和饲料投入的相应增加,稻鱼系统的生产力和经济产出大幅度提高(稻鱼系统的净经济收入增加 $25.2\%\sim 101.4\%$),但稻鱼系统(RF)水体的COD值及TN、TP和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量均呈现增加的趋势,尤其是当鱼目标产量增至 $3\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,水体TP含量和COD值显著提高,面源污染风险增加。分析还表明,鱼放养目标产量为 $2\ 250\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,稻鱼系统经济效益最佳,此时净经济收入比传统稻鱼系统增加 55.9% ,并且不会对水体环境质量产生负面影响。

关键词 稻鱼系统 产量 养殖密度 稻田水体COD 稻田水体氮磷 经济效益

中图分类号: Q143 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2013)03-0308-07

Effects of improved traditional rice-fish system productivity on field water environment

DING Wei-Hua, LI Na-Na, REN Wei-Zheng, HU Liang-Liang, CHEN Xin, TANG Jian-Jun

(College of Life Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract World agriculture currently faces great challenges in producing sufficient food while minimizing negative environmental effects of crop cultivation, requiring us to rethink current agricultural production processes. Traditional agricultural systems based on local species diversity and interactions have contributed to food and livelihood security throughout the world for centuries. As human population increased, however, traditional agricultural systems faced daunting challenges in food demand and supply due to the lower economic benefits of the systems. Thus improving the productivity of traditional agricultural systems in a sustainable way has been of great concerned to producers and decision-makers. To determine the feasibility of increasing traditional agricultural productivity without corresponding increase in negative environment impacts, two experiments were conducted at a traditional rice-fish co-culture site that had been operated for over 1200 years in southern Zhejiang Province. In the first experiment, three treatments without pesticide, including rice monoculture (RM), rice-fish co-culture (RF) and fish monoculture (FM), were compared. In addition to measured rice yield (in RM and RF), fish yield (in RF and FM), and surveyed input-output economics, focus was put on total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) and chemical oxygen demand (COD) in field water. Four fish density treatments, including with target fish yields in rice-fish co-culture fields of $750\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (RF750), $1\ 500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (RF1500), $2\ 250\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (RF2250) and $3\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (RF3000), were designed in the second experiment. Rice and fish yields, input and output of economics, and TN, TP, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and COD were measured in the field water. The first experiment showed no significant difference in rice yield between RM and RF. There was also no significant difference in fish yield between RF and FM in the experiment. However, total and net income of the system were higher in RF than in RM and FM. Field water contents of TN, TP, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and COD were not significantly different between RF and RM. The second experiment showed that rice yield, fish yield, and

* 国家环保部项目(20100920-04)资助

** 通讯作者: 唐建军(1962—), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事生物多样性及生态系统功能方面研究。E-mail: chandt@zju.edu.cn

丁伟华(1972—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为农业生态系统。E-mail: lscky@zju.edu.cn

收稿日期: 2012-08-04 接受日期: 2012-10-10

total and net economic output increased with increasing fish stock density and fish feed input. Increase in fish stock density increased target yield of fish by 1 500 kg·hm⁻² (50%), significantly increased net income of rice-fish co-culture systems by 25.2%~101.4%, and also increased COD, TN, TP and NH₄⁺-N content in field water. When target yield was 3 000 kg·hm⁻², TP and COD contents became significantly higher than in other treatments; which enhanced risk of environmental pollution. Economic analysis indicated that target fish yield of 2 250 kg·hm⁻² gave higher economic income and with little impact on field water environment.

Key words Rice-fish system, Productivity, Stock density, Field water COD, Field water nitrogen and phosphorus, Economic income

(Received Aug. 4, 2012; accepted Oct. 10, 2012)

随着人口增长、资源短缺以及全球气候变化的影响,粮食安全已成为全球关注的问题^[1-3],世界农业正面临如何持续生产出充足粮食的同时又不破坏资源环境的重大挑战。在过去的50年,粮食产量的快速提高得益于现代农业的发展,现代农业(其实就是能源依赖型的“石油农业”)主要依赖化学肥料和农药等各种化学品、灌溉、高产品种和其他“绿色革命”技术的投入^[4-5]。现代农业在大幅度提高生产力的同时,导致农业物种和品种多样性简单化。而长期单一物种或单一品种的大面积种植常常导致农作物对不利环境(病虫害和逆温等)的抵抗能力降低、对农药和化肥的高度依赖和农作物生产的不稳定等问题^[6-7]。人们不得不重新回顾农业的发展历程,也认识到需要从传统农业中汲取精华^[8-10]。因而挖掘和借鉴传统农业的精华、建立可持续发展的现代化农业成为国际农业发展的重要趋势^[11-12]。

传统农业曾为全世界人类粮食需求的满足做出了贡献。传统农业是在不同物种间相互作用的基础上产生的,经过农民的合理耕作而传承下来,具有丰富的生物多样性^[2,8,13],因而更能够适应不同的环境条件。这些典型的传统农业中蕴藏着丰富的科学内涵和价值,对当前改善农业生态环境、协调农业生物之间的相互作用关系、促进农业可持续发展有着重要的参考意义和借鉴价值。但是,随着农业现代化进程的推进,许多传统农业模式由于技术粗放、品种单一、种性退化、生产规模小、经济效益低等问题,受到挑战和冲击,有的甚至逐渐消失。因此,研究提升这些优秀传统农业模式的技术和方法,着力提高传统农业的生产力和经济效益,对于有效保护和合理利用这些模式及保护农业环境和农业的可持续发展都具有重要意义。

稻鱼共生系统是全球重要传统农业系统之一,研究稻鱼共生系统对水稻种植区域稻作模式的创新设计有重要参考意义^[14-15]。传统稻鱼共生系统主要分布在中国、埃及、印度、印度尼西亚、泰国、越南、菲律宾、孟加拉国、马来西亚等国家^[14,16],确保了当地粮食安全,高效利用了水土资源,降低农药和化肥的投入,减少了农业环境污染^[17-18],对这些

地区的农业可持续发展起着积极作用。中国浙江青田稻田养鱼系统具有1 200年历史^[19],2005年被联合国粮农组织列为“全球重要农业文化遗产”(GIAHS)。随着农业生产的发展,青田县水稻种植品种不断更新,由传统的农家种逐渐向现代杂交种演变,但稻田养鱼的方式基本不变。青田稻鱼系统中,通常在水稻移栽4 d左右放入鱼苗,传统养鱼密度0.2尾·m⁻²左右,整个水稻生长期鱼与水稻共同生活,在水稻收割后收鱼。稻田养殖鱼种为“瓯江彩鲤”(Cypinus carpio var. color),当地俗称“田鱼”,体红色、软鳞。全球重要农业文化遗产(GIAHS)稻鱼系统在适应快速的环境及经济变化中也面临着挑战,青田传统稻田养鱼存在种养技术粗放(如放养密度过低、不喂或少喂食)、稻田养鱼产量低、效益难以提升的问题,因此当地农民开始尝试通过新的饲养技术(增大养鱼密度、投喂配合饲料等)来提高稻田中的鱼产量。一些研究发现,稻田养鱼后,田面水N、P元素的浓度显著增加,土壤有机质及各营养成分含量也有不同程度的提升^[15,20]。Oehme等^[21]研究认为,稻鱼系统中投饵越多,田面水养分含量越高。目前关于稻鱼共生系统养分平衡等方面有了较多研究^[15,20,22-23],但稻鱼系统生产力提升对环境影响的研究仍需深入进行。

本试验以浙江省青田县稻鱼共生系统为研究对象,研究稻鱼系统鱼放养密度对生产力和环境的影响,探讨提升稻鱼系统的生产力又不破坏农业环境的有效途径。

1 研究地概况与研究方法

1.1 研究地概况

本研究在浙江省青田县(东经118°41'~120°26',北纬27°25'~28°57')进行,位于浙江省东南部,瓯江中下游。全县有稻田面积达6 670 hm²,其中90%为稻田养鱼系统。地属亚热带季风气候,年平均气温18.3℃,年均日照1 712~1 825 h,降雨量1 400~2 100 mm。稻田属于洪积性泥沙田,耕层厚度约20 cm,土壤类型为砂壤土,容重约1.12 g·cm⁻³;土壤呈弱酸性,速效磷含量23.22~40.32 mg·kg⁻¹,速效钾2.71~3.71 mg·kg⁻¹,

全磷 0.60~1.30 g·kg⁻¹, 全氮 2.09~2.79 g·kg⁻¹, 全钾 3.24~3.56 g·kg⁻¹, 有机质 30.72~32.92 g·kg⁻¹。

试验在全球重要农业文化遗产地青田县龙现村(传统低密度稻田养殖模式)和青田县仁庄镇(提升的高密度稻田养殖模式)进行。龙现村(东经 118°41', 北纬 28°57')总面积 460 hm², 农田 26.4 hm², 水塘 9.3 hm²。仁庄镇(东经 120°14', 北纬 28°02')总面积 97 km², 稻田养鱼面积 400 hm²。两试验区一山相隔, 具有相似的地理地貌和环境特征。研究过程中水稻品种均为杂交水稻“中浙优 1 号”, 放养鱼种均为瓯江彩鲤。

1.2 试验设计

1.2.1 传统稻鱼系统的生产力和稻田水体环境试验

试验设置 3 个处理: (1)水稻单作处理(rice monoculture, RM); (2)鱼单作处理(fish monoculture, FM); (3)低密度(鱼目标产量 375 kg·hm⁻²)稻鱼共作处理(rice fish co-culture, RF)。试验采用完全随机区组设计, 每个处理设置 4 个重复。试验田采用农民常用耕作田块, 1 个重复归一家农户所有。重复 1 各处理的小区面积均为 191 m², 重复 2 各小区面积均为 88 m², 重复 3 各小区面积均为 112 m², 重复 4 各小区面积分别为 128 m²、128 m²、200 m²、82.6 m², 重复之间以不同的梯田相隔, 各处理间田埂宽度为 0.5 m。每小区均有独立的进水口和出水口, 以保证每重复试验的水环境一致且又相互独立。

试验于 2010 年 5 月 25 日播种, 7 月 1 日移栽, 9 月 25 日收割, 水稻种植密度为 30 cm×35 cm。稻鱼处理与鱼单作处理均在秧苗移栽后 5 d 放鱼苗, 选取瓯江彩鲤的鱼种为“冬片”, 放鱼密度为 0.18 尾·m⁻²(40 g·尾⁻¹), 9 月 26 日收鱼测产。对于水稻单作处理和稻鱼共作处理, 施用基肥包括: 尿素(含 N 46.4%)250 kg·hm⁻², 复合肥(N:P:K=12:5:8)400 kg·hm⁻², 整个试验过程不施用农药。试验过程中田间一直处于淹水状态, 水深 12~18 cm, 整个过程不投放鱼饵料。

1.2.2 稻鱼系统鱼养殖密度提高对稻田生产力和水体环境影响试验

试验共设 4 个处理: (1)稻鱼共作, 田鱼目标产量 750 kg·hm⁻²(rice fish co-culture, RF750); (2)稻鱼共作, 田鱼目标产量 1 500 kg·hm⁻²(RF1500); (3)稻鱼共作, 田鱼目标产量 2 250 kg·hm⁻²(RF2250); (4)稻鱼共作, 田鱼目标产量 3 000 kg·hm⁻²(RF3000)。每个处理重复 3 次, 小区面积均为 6.5 m×10 m。试验按随机区组设计, 各处理在区组内随机排列, 区组内除处理外其他条件保持一致。

水稻栽培过程(包括育秧、播种、移栽、灌溉等)

同 1.2.1。各处理施用的基肥包括: 尿素(含 N 46.4%) 93.75 kg·hm⁻²; 复合肥(N:P:K=14:2:7)600 kg·hm⁻²。选取瓯江彩鲤的鱼种为“夏花”, 平均每尾体重约 12.41 g。RF750 处理每小区放养 30 尾, RF1500 处理每小区放养 60 尾, RF2250 处理每小区放养 90 尾, RF3000 处理每小区放养 120 尾。使用金华产市售饲料, 饲料中 N、P 含量分别为 5.37% 和 1.46%。根据饲料的转化效率, 每日饲料按照鱼鲜重的 3% 进行投喂, 在稻鱼共作的整个时间段内, RF750、RF1500、RF2250、RF3000 每小区总的投饵量分别为 3 075 g、6 150 g、9 225 g 和 12 300 g。

1.3 试验测定

上述两个试验分别于每小区进水口、田间及出水口取稻田水样, 保证取样的均匀性及代表性, 在 7 月 20 日(分蘖期)、8 月 15 日(孕穗期)和 9 月 5 日(乳熟期)各取样 1 次, 采集的水样加 0.08% 浓硫酸后于 -20 °C 冰冻保存, 测样时解冻。水样中的氨态氮(NH₄⁺-N)含量采用纳氏比色法测定, 总氮(TN)和总磷(TP)含量采用过硫酸钾氧化法测定, 化学需氧量(COD)采用酸性高锰酸钾法测定。水稻和鱼产量直接收获称重。

1.4 数据分析

水稻产量、田鱼产量使用单因素方差分析方法进行分析, 稻田水体指标测量数据(TN、TP、NH₄⁺-N 含量及 COD)采用重复测量方差分析方法进行分析(SPSS12.0)。

2 结果与分析

2.1 传统稻鱼系统和养殖密度提高的稻鱼系统生产力比较

传统稻鱼系统中(表 1), 水稻单作处理(RM)与稻鱼共作处理(RF)间水稻产量没有显著性差异($P>0.05$), 鱼单作处理(FM)和稻鱼共作处理(RF)间田鱼产量也没有显著性差异($P>0.05$)。养鱼密度增加后, 各个处理(RF750、RF1500、RF2250 和 RF3000)的水稻产量与 RM 相比略降低, 但差异不显著($P>0.05$); 处理 RF1500 和 RF2250 的鱼产量之间不存在显著性差异($P>0.05$), 但均显著高于处理 RF750($P<0.05$), 同时显著低于处理 RF3000($P<0.05$)。

经济效益分析表明, 与传统稻鱼共作系统相比, 除处理 RF750 的净收入略低外, RF1500、RF2250 和 RF3000 处理的净经济收入分别比传统稻鱼共作系统高 25.2%、55.9% 和 101.4%。养殖密度提高后的稻鱼系统各处理净经济收入的增加主要是由于田鱼产量增加所致(表 1), RF1500、RF2250 和 RF3000 处理田鱼收入分别比传统稻鱼系统增加 145.9%、226.0% 和 346.1%。

表1 传统稻鱼系统和养殖密度提高的稻鱼系统的生产力及经济效益

Table 1 Production and economic income of traditional and fish-density increased rice-fish co-culture systems

处理 Treatment	水稻产量 Rice yield (kg·hm ⁻²)	鱼产量 Fish yield (kg·hm ⁻²)	成本投入 ¹⁾ Cost (Yuan·hm ⁻²)	经济总收入 ²⁾ Total income (Yuan·hm ⁻²)	净收入 Net income (Yuan·hm ⁻²)
RM	6 171±299.68a	—	2 462±184.80ab	20 981±1 018.9a	18 519±834.1a
RF	5 898±415.74a	484±70.9a	2 062±262.82a	49 093±5 667.5b	47 031±5 404.7b
FM	—	414±37.53a	441±101.74c	24 840±2 251.8c	24 399±2 150.1c
RF750	5 044±308.52a	686±54.38a	2 955±403.01b	42 572±3 100.8bd	39 617±2 697.8d
RF1500	5 126±508.86a	1 190±104.43b	4 091±643.59d	62 978±5 703.8e	58 887±5 060.2e
RF2250	5 150±465.66a	1 578±243.85b	5 227±884.17de	78 570±11 151f	73 343±10 267f
RF3000	4 911±297.21a	2 159±199.54c	6 363±1 124.75e	101 093±8 873g	94 730±7 748.5g

RM: 水稻单种; RF: 稻鱼共作, 鱼目标产量 375 kg·hm⁻²; FM: 鱼单作; RF750: 稻鱼共作, 鱼目标产量 750 kg·hm⁻²; RF1500: 稻鱼共作, 鱼目标产量 1 500 kg·hm⁻²; RF2250: 稻鱼共作, 鱼目标产量 2 250 kg·hm⁻²; RF3000: 稻鱼共作, 鱼目标产量 3 000 kg·hm⁻²。下同。同列不同字母表示 5% 水平差异显著。1) 成本包括苗、种子、化肥、饲料、农药; 2) 经济总收入包括水稻和鱼。RM: rice monoculture; RF: traditional rice fish co-culture with a target fish yield of 375 kg·hm⁻²; FM: fish monoculture; RF750: rice-fish co-culture with a target fish yield of 750 kg·hm⁻²; RF1500: rice-fish co-culture with a target fish yield of 1 500 kg·hm⁻²; RF2250: rice-fish co-culture with a target fish yield of 2 250 kg·hm⁻²; RF3000: rice-fish co-culture with a target fish yield of 3 000 kg·hm⁻². The same below. Different letters in a column mean significantly difference at 5% probability level. 1) Cost includes fish seeds, rice seeds, fertilizers, feeds and pesticides. 2) Total income includes rice and fish products.

2.2 传统稻鱼系统和养殖密度提高的稻鱼系统对水体环境的影响

2.2.1 水体总氮(TN)含量

传统稻鱼系统不投喂鱼饲料, 图 1a 显示: 同一水稻生长期鱼单作(FM)、稻鱼共作(RF)、水稻单作(RM)3 个处理水体中的 TN 含量无显著性差异($F_{2,9}=0.304$, $P=0.745$); 各处理水体 TN 含量随水稻生长期也没有显著变化。提升的稻鱼系统(图 1b)中, 同一水稻生长期内, 随着养鱼密度的增加, 水体 TN 含量有增加趋势, 但差异不显著($P>0.05$); 从水稻生长期看, 水体 TN 含量逐渐增加, 这可能是由于鱼饲料不断投入的缘故, 未利用完的鱼饲料增加了水体的 TN 含量。

2.2.2 水体总磷(TP)含量

由图 2 可知, 传统稻鱼系统中, 同一水稻生长期, 各处理间水体 TP 含量无显著性差异($F_{2,9}=0.376$, $P=0.697$); 随着水稻生育进程不断推进, 水体 TP 含量逐渐降低($P<0.05$), 可能是由于水稻生长初期投入的化肥造成了较高的 TP 含量, 随着时间延长, 水体化学分解作用, 水体 TP 含量逐渐降低。养殖密度提高的稻鱼系统中, 水体 TP 含量在水稻各生长期之间也存在显著性差异($P<0.05$), 处理 RF2250 和 RF3000 随水稻生长水体 TP 含量显著增加, 推测这是由于大量投喂鱼饲料的缘故。各个处理的多重比较结果显示: 分蘖期和孕穗期各处理水体 TP 含量不存在显著性差异($P>0.05$); 但灌浆成熟期的测定结果表现为: 随着鱼目标产量的增加, 水体 TP 含量增加, RF750 处理 TP 含量显著低于 RF1500、RF2250 和 RF3000($P<0.05$), RF1500 处理 TP 含量显著低于 RF3000, 但 RF1500 和 RF3000 与 RF2250 之间不存

在显著性差异($P>0.05$)。说明目标产量 3 000 kg·hm⁻² 的养殖密度下, 水体面源污染风险显著增加。

2.2.3 水体铵态氮(NH₄⁺-N)含量

传统稻鱼系统中, 鱼单作、稻鱼共作、水稻单种 3 个处理水体 NH₄⁺-N 含量的变化趋势与水体 TP、TN 含量的情况基本一致, 同一水稻生长阶段, 各处理间均无显著性差异($F_{2,9}=0.341$, $P=0.720$)(图 3a)。养殖密度提高的稻鱼系统中(图 3b), 不同处理水体中 NH₄⁺-N 含量的变化趋势与水体 TP 含量的变化趋势相类似, 水体 NH₄⁺-N 随时间变化也存在显著性差异($P<0.05$), RF1500、RF2250、RF3000 处理抽穗期的水体 NH₄⁺-N 含量显著高于分蘖期和拔节期; 多重比较结果表明, 分蘖期和孕穗期各处理两两之间均不存在显著性差异($P>0.05$); 灌浆成熟期 RF750 处理 NH₄⁺-N 含量显著低于 RF1500、RF2250 和 RF3000($P<0.05$), RF1500 和 RF2250 之间不存在显著性差异($P>0.05$), 但显著低于 RF3000 处理($P<0.05$)。一方面, 未被利用的饲料经过化学作用可能会增加水体 NH₄⁺-N 含量; 另一方面, 养鱼密度较高时, 鱼排泄的粪便也可能是水体 NH₄⁺-N 增加的重要原因。

2.2.4 水体化学需氧量(COD)含量

COD 是衡量水体有机物质多少的指标。不同水稻生长期多重比较结果表明(图 4), 分蘖末期和孕穗期 FM、RF、RM 处理 COD 含量无显著差异, 灌浆成熟期 FM 处理水体 COD 值显著高于其他两个处理($P<0.05$), RF 和 RM 间差异不显著($P>0.05$)。养殖密度提高的稻鱼系统中, 同一水稻生长阶段各处理水体 COD 值不存在显著性差异($P>0.05$); 随着水稻生长, 各处理 COD 值逐渐增加($P<0.05$)。

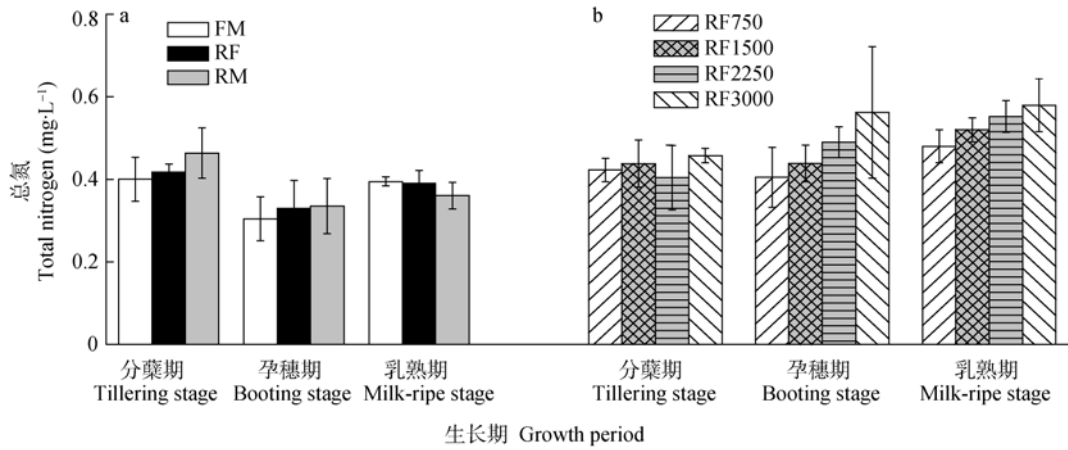


图 1 传统(a)和养殖密度提高(b)的稻鱼系统中各处理水稻不同生长期水体总氮(TN)含量

Fig. 1 Total nitrogen contents in field water in traditional (a) and fish-density increased (b) rice-fish co-culture systems at different growth periods of rice

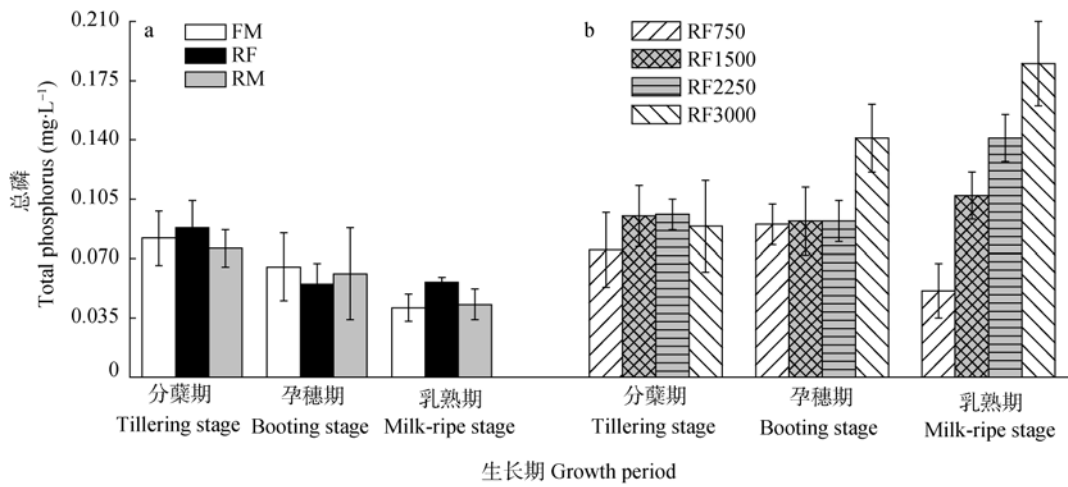


图 2 传统(a)和养殖密度提高(b)的稻鱼系统中各处理水稻不同生长期水体总磷(TP)含量

Fig. 2 Total phosphorus contents in field water in traditional (a) and fish-density increased (b) rice-fish co-culture systems at different growth periods of rice

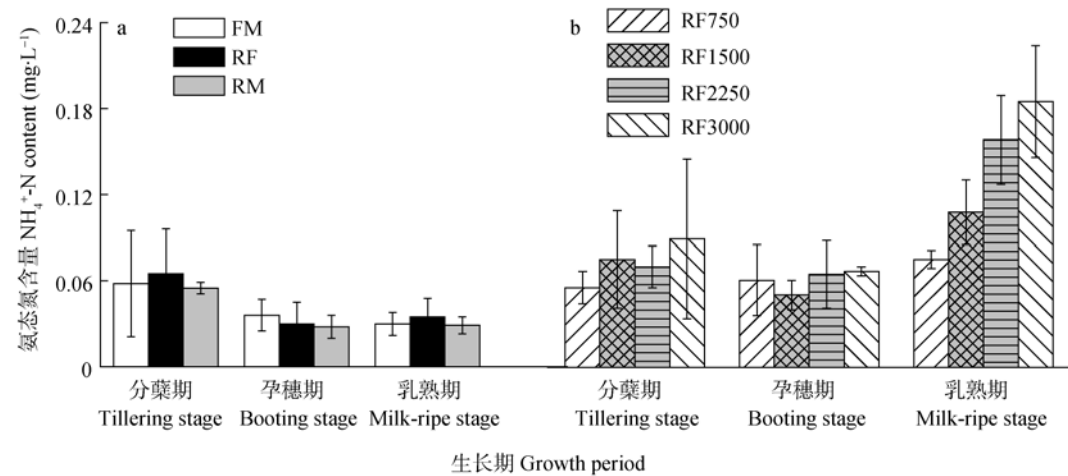


图 3 传统(a)和养殖密度提高(b)的稻鱼系统中各处理水稻不同生长期水体铵态氮(NH₄⁺-N)含量

Fig. 3 NH₄⁺-N contents in field water in traditional (a) and fish-density increased (b) rice-fish co-culture systems at different growth periods of rice

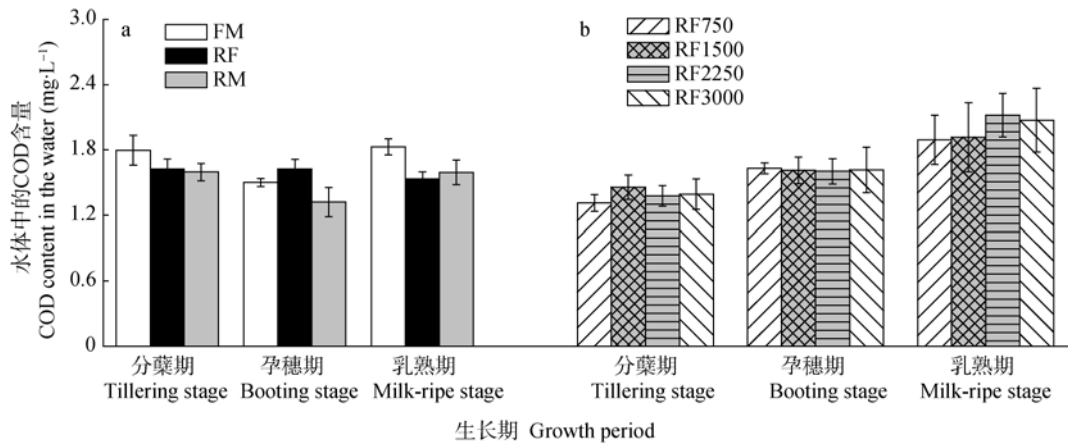


图4 传统(a)和养殖密度提高(b)的稻鱼系统中各处理水稻不同生长期水体化学需氧量(COD)含量
Fig. 4 COD contents in field water in traditional (a) and fish-density increased (b) rice-fish co-culture systems at different growth periods of rice

3 讨论

本研究表明,传统稻鱼系统与水稻单作系统之间水稻生长期间水体 TN、TP、NH₄⁺-N 和 COD 含量没有显著性差异,这是因为传统稻鱼系统的田鱼养殖是基于传统的粗放养殖模式,稻田系统内自有的天然饵料可以满足低目标产量下田鱼正常生长所需养分,避免了外源饵料投入可能造成的养分流失和面源污染问题。Koohafkan 等^[24]曾称传统的稻田粗放养殖体系更有利于水质的维护和水生生物的保护,可作为生态恢复措施应用于易吸纳污染的集水区域。但是,由于传统稻鱼系统的生产力低,不能满足人们日益增长的粮食和经济需求,具有较高生产力的提升稻鱼共作模式越来越受到农户的欢迎。

研究还表明,养殖密度提高的稻鱼系统的生产力高于传统稻鱼系统的生产力,如 RF1500、RF2250 和 RF3000 的净收入分别比传统稻鱼系统高 25.2%、55.9% 和 101.4%。这主要是由于额外增加了鱼的经济收入所致。养殖密度提高的稻鱼系统中,在鱼产量为 1 500~2 250 kg·hm⁻² 范围内,虽然水体 TN、TP、NH₄⁺-N 和 COD 含量呈现出增加的趋势,但增加并不显著。而当目标产量达到 3 000 kg·hm⁻² 时,水体 TP 和 NH₄⁺-N 含量显著高于 RF750、RF1500 和 RF2250,表明 RF2250 是几个处理中最合理的养殖密度,可以实现经济 and 环境的友好双赢发展。

RF3000 中 TP 和 NH₄⁺-N 含量的显著增加很可能是 N 和 P 从未被取食的鱼饲料中释放出来导致。Xie 等^[25]研究揭示,稻鱼系统中,投入的饲料被系统吸收利用的仅有 42.9%,约 57.1% 直接或间接流入环境中。Oehme 等^[21]发现,稻鱼系统中,田面水养分含量受投饵量影响,投饵越多,田面水养分含量越高。养殖密度提高的稻鱼系统中,田鱼目标产量越高,投入的饲料就越多,从而增加了因饲料所带

来的面源污染风险。对照国家地表水标准(GB3838—88, GHZB1—1999)稻鱼系统鱼养殖目标产量低于 2 250 kg·hm⁻² 时,水稻生长各时期稻田水体的指标值 TN、TP、NH₄⁺-N 和 COD 都在 V 类水的范围里。

目前,全球农业生产正面临着水土资源短缺、人口激增等严峻挑战^[26],如何在保障粮食的同时不影响或少影响环境已成为新的生态农业议题。过去几十年间,作物产量的迅速增加主要得益于化肥农药的使用、新品种的研发及耕作方法的改进。但是,长期以来化肥农药的大量使用破坏了环境,增强了病虫害的抗药性,同时也增加了农业成本^[4,27]。研究优秀传统农业的技术和方法,着力提高传统农业的生产力和经济效益,对于有效保护农业环境和农业的可持续发展都具有重要意义。

本研究认为,结合现代农业技术,适当控制稻田养殖密度,合理投入化肥和饲料,将能够提升农业生产,并且不会对环境造成负面影响。合理利用现代农业手段改良传统农业系统,将能降低投入,提高水土资源和养分的利用效率^[28-30]。如果我们能够在传统系统的生态效益和现代农业手段之间找到最佳契合点,未来的农业或许能更好地提高土地生产力,并实现农业和环境的可持续发展。

4 结论

与传统稻鱼系统相比,养殖密度提高的稻鱼系统的净经济收入增加 25.2%~101.4%。适当增加鱼的目标产量(由 750 kg·hm⁻² 提高到 2 250 kg·hm⁻²),水体污染物指标并没有显著变化,但当鱼目标产量增至 3 000 kg·hm⁻² 时,水体 TP 和 NH₄⁺-N 含量显著提高,面源污染风险增加。分析表明,养鱼目标产量为 2 250 kg·hm⁻² 时经济效益和环境效益最佳,此时净经济收入比传统稻鱼系统提高 55.9%,并且不会造

成明显的水体污染物增加。笔者认为,合理地提升传统农业的生产力并不一定会造成环境污染,适当地将现代农业手段应用到传统农业中,可以在提升生产力的同时,实现农业和环境的可持续发展。

参考文献

- [1] Brown M E, Funk C C. Climate: Food security under climate change[J]. *Science*, 2008, 319(5863): 580–581
- [2] Godfray H C J, Beddington J R, Crute I R, et al. Food security: The challenge of feeding 9 billion people[J]. *Science*, 2010, 327(5967): 812–818
- [3] MacDonald G M. Water, climate change, and sustainability in the southwest[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2010, 107(50): 21256–21262
- [4] Tilman D, Cassman K G, Matson P A, et al. Agricultural sustainability and intensive production practices[J]. *Nature*, 2002, 418(6898): 671–677
- [5] Bromley D W. Food security: Beyond technology[J]. *Science*, 2010, 328(5975): 169
- [6] Kleijn D, Berendse F, Smit R, et al. Agri-environment schemes do not effectively protect biodiversity in Dutch agricultural landscapes[J]. *Nature*, 2001, 413(6857): 723–725
- [7] Kleijn D, Baquero R A, Clough Y, et al. Mixed biodiversity benefits of agri-environment schemes in five European countries[J]. *Ecol Lett*, 2006, 9(3): 243–254
- [8] Altieri M A. Linking ecologists and traditional farmers in the search for sustainable agriculture[J]. *Front Ecol Environ*, 2004, 2(1): 35–42
- [9] Vien T D, Leisz S J, Lam N T, et al. Using traditional swidden agriculture to enhance rural livelihoods in Vietnam's uplands[J]. *Mt Res Dev*, 2006, 26(3): 192–196
- [10] Herrero M, Thornton P K, Notenbaert A M, et al. Smart investments in sustainable food production: Revisiting mixed crop-livestock systems[J]. *Science*, 2010, 327(5967): 822–825
- [11] Bulter S J, Vickery J A, Norris K. Farmland biodiversity and the footprint of agriculture[J]. *Science*, 2007, 315(5810): 381–384
- [12] Love B, Spaner D. Agrobiodiversity: Its value, measurement, and conservation in the context of sustainable agriculture[J]. *J Sustain Agr*, 2007, 31(2): 53–82
- [13] Altieri M A, Nicholls C I. The simplification of traditional vineyard based agroforests in northwestern Portugal: Some ecological implications[J]. *Agrofor Syst*, 2002, 56(3): 185–191
- [14] Halwart M, Gupa M V. Culture of fish in rice fields[M]. Italy: FAO, 2004
- [15] Datta A, Nayak D R, Sinhababu D P, et al. Methane and nitrous oxide emissions from an integrated rainfed rice-fish farming system of Eastern India[J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2009, 129(1/3): 228–237
- [16] Fernando C H. Rice field ecology and fish culture—An overview[J]. *Hydrobiologia*, 1993, 259(2): 91–113
- [17] Frei M, Becker K. A greenhouse experiment on growth and yield effects in integrated rice-fish culture[J]. *Aquaculture*, 2005, 244(1/4): 119–128
- [18] Halwart M. Biodiversity and nutrition in rice-based aquatic ecosystems[J]. *J Food Compos Anal*, 2006, 19(6/7): 747–751
- [19] 游修龄. 稻田养鱼——传统农业可持续发展的典型之一[J]. *农业考古*, 2006(4): 222–224
You X L. Rice-fish coculture—A typical model of sustainable traditional agriculture[J]. *Agr Archaeol*, 2006(4): 222–224
- [20] 李成芳, 曹凑贵, 王金萍, 等. 稻鸭、稻鱼共作生态系统中稻田田面水的 N 素动态变化及淋溶损失[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(10): 2125–2132
Li C F, Cao C G, Wang J P, et al. Dynamic variations and losses of N in floodwater of paddy fields in integrated rice-duck and rice-fish ecosystems[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(10): 2125–2132
- [21] Oehme M, Frei M, Razzak M A, et al. Studies on nitrogen cycling under different nitrogen inputs in integrated rice-fish culture in Bangladesh[J]. *Nutr Cycl Agroecosys*, 2007, 79(2): 181–191
- [22] 李成芳, 曹凑贵, 汪金平, 等. 稻鸭、稻鱼共作生态系统土壤可溶性有机 N 的动态和损失[J]. *生态学报*, 2009, 29(5): 2541–2550
Li C F, Cao C G, Wang J P, et al. Dynamics of soil soluble organic N in rice-duck and rice-fish ecosystems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(5): 2541–2550
- [23] 曹志强, 梁知杰, 招艺欣, 等. 北方稻田养鱼的共生效应研究[J]. *应用生态学报*, 2001, 12(3): 405–408
Cao Z Q, Liang Z J, Zhao Y X, et al. Symbiotic effect of cultivating fish in rice field in north China[J]. *Chin J Appl Eco*, 2001, 12(3): 405–408
- [24] Koohafkan P, Furtado J. Traditional rice fish systems as globally important ingenious agriculture heritage system (GIAHS)[C]. Rome, Italy: FAO Rice Conference, 2005
- [25] Xie J, Hu L L, Tang J J, et al. Ecological mechanisms underlying the sustainability of the agricultural heritage rice-fish coculture system[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2011, 108(50): E1381–E1387
- [26] Li C Y, He X H, Zhu S S, et al. Crop diversity for yield increase[J]. *PloS One*, 2009, 4(11): e8049
- [27] Mäder P, Fließbach A, Dubois D, et al. Soil fertility and biodiversity in organic farming[J]. *Science*, 2002, 296(5573): 1694–1697
- [28] Gebbers R, Adamchuk V I. Precision agriculture and food security[J]. *Science*, 2010, 327(5967): 828–831
- [29] Tester M, Langridge P. Breeding technologies to increase crop production in a changing world[J]. *Science*, 2010, 327(5967): 818–822
- [30] 骆世明. 论生态农业模式的基本类型[J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(3): 405–409
Luo S M. Fundamental classification of eco-agricultural models[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(3): 405–409