

稻虾共作磷素平衡特征及生态经济效益研究

刘少君, 李文博, 熊启中, 李虹颖, 李军利, 刘荣, 郇红建, 叶新新

引用本文:

刘少君, 李文博, 熊启中, 等. 稻虾共作磷素平衡特征及生态经济效益研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(10): 2179–2188.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0263>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

秸秆还田影响长江下游稻田周年氮磷径流风险

张刚, 张世洁, 王德建, 俞元春, 张磊

农业环境科学学报. 2021, 40(3): 640–649 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0499>

太湖流域典型稻麦轮作农田稻季不施磷的农学及环境效应探究

朱文彬, 汪玉, 王慎强, 赵旭, 卢亚男, 程谊, 司友斌

农业环境科学学报. 2016, 35(6): 1129–1135 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.06.015>

玉米秸秆生物炭对稻油轮作农田磷流失风险的影响

华玲玲, 王洪媛, 翟丽梅, 付斌, 盖霞普, 胡万里

农业环境科学学报. 2016, 35(7): 1376–1383 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.07.021>

典型双季稻田施磷流失风险及阈值研究

朱坚, 纪雄辉, 田发祥, 吴家梅, 刘昭兵, 彭华, 柳赛花, 官迪, 谢运河

农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1425–1433 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0314>

太湖稻麦轮作农田减施磷肥盆栽试验研究

卢亚男, 汪玉, 王慎强, 朱文彬, 赵旭, 程谊, 李国华

农业环境科学学报. 2016, 35(3): 507–513 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.03.014>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘少君, 李文博, 熊启中, 等. 稻虾共作磷素平衡特征及生态经济效益研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(10): 2179–2188.

LIU S J, LI W B, XIONG Q Z, et al. Phosphorus balance and eco-economic benefits in the integrated rice–crayfish system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(10): 2179–2188.



开放科学 OSID

稻虾共作磷素平衡特征及生态经济效益研究

刘少君¹, 李文博¹, 熊启中¹, 李虹颖², 李军利¹, 刘荣³, 郜建红¹, 叶新新^{1*}

(1. 农田生态保育与污染防治安徽省重点实验室, 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036; 2. 安徽省农业科学院土壤肥料研究所, 合肥 230001; 3. 安徽六国化工股份有限公司, 安徽 铜陵 244021)

摘要:为研究稻虾共作生态系统磷素平衡状况和利用效率,通过田间试验,采用投入产出法,设置3个处理:水稻单作(RM)、稻虾共作投食(RC feed 1)、稻虾共作不投食(RC feed 0),分析了稻虾共作种植模式下水稻产量、磷素平衡状况、利用效率、环境风险以及经济效益。研究表明:3种处理水稻产量无显著差异;农田磷平衡均表现为盈余,RC feed 0处理农田磷盈余低于RM和RC feed 1处理;与RM和RC feed 1处理相比较,RC feed 0处理水稻茎叶磷素吸收量显著增加($P<0.05$),磷素利用率较高。在种植前期(6—8月),RC feed 0处理较RC feed 1处理显著降低了稻田田面水总磷和溶解磷的浓度;在水稻收获时,3个处理间稻田田面水总磷和溶解磷的浓度无显著差异。与RM处理相比较,RC feed 0和RC feed 1处理净收入分别增加了54.22%和51.11%。在综合考虑水稻产量效应、磷素平衡、磷素环境风险和经济效益的条件下,稻虾共作不投食模式是一种资源利用率较高、环境风险较小、经济效益好的种养模式。

关键词:稻虾共作;磷平衡;磷循环;经济效益

中图分类号:S511;S966.12 **文献标志码:**A **文章编号:**1672–2043(2021)10–2179–10 **doi:**10.11654/jaes.2021–0263

Phosphorus balance and eco-economic benefits in the integrated rice–crayfish system

LIU Shaojun¹, LI Wenbo¹, XIONG Qizhong¹, LI Hongying², LI Junli¹, LIU Rong³, GAO Hongjian¹, YE Xinxin^{1*}

(1. Anhui Province Key Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention, School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. Institute of Soil and Fertilizer, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230001, China; 3. Anhui Liuguo Chemical Industry, Tongling 244021, China)

Abstract: Recently, the rice–crayfish system has developed rapidly in the middle and lower reaches of the Yangtze River in China. The integrated rice–crayfish system is an emerging complex ecological system for planting and breeding in this region. The study of P balance and P use efficiency in the integrated rice–crayfish system is of great significance to systematically guide P management, optimize the rice–crayfish symbiosis system, and to assess the environmental and economic benefits. In this study, a field experiment was conducted and included three treatments: rice monoculture system (RM), rice–crayfish with feed (RC feed 1), and rice–crayfish without feed (RC feed 0). The rice yield, P balance, P use efficiency, and economic and ecological benefits of the integrated rice–crayfish system were then analyzed. The results showed that there were no significant differences in rice yield across treatments, and the P balance of all three treatments in the

收稿日期: 2021–03–05 录用日期: 2021–06–01

作者简介: 刘少君(1995—),男,安徽安庆人,硕士研究生,主要从事稻田生态种养研究。E-mail: lsjunior@163.com

*通信作者: 叶新新 E-mail: xxye@ahau.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0301302); 国家自然科学基金项目(41701581); 安徽省杰出青年科学基金项目(2008085J13); 长江经济带磷资源高效利用创新平台项目(KJ20190197)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China (2017YFD0301302); The National Natural Science Foundation of China (41701581); The Science Foundation for Distinguished Youth of Anhui Province (2008085J13); The Innovative Platform Project for Efficient Utilization of Phosphorus Resources in Yangtze River Economic Belt (KJ20190197)

farmland system were in surplus. The P surplus in the RC feed 0 treatment was lower than that in the RM and RC feed 1 treatments. The P uptake efficiency and P accumulation in the stems and leaves of rice in the RC feed 0 treatment were significantly ($P<0.05$) higher than those in the RM and RC feed 1 treatments. In the early stage (from June to August), the RC feed 0 treatment significantly reduced the total P (TP) and dissolved P (DP) concentrations in the surface water, compared with the RM and RC feed 1 treatments. There were no significant differences in TP and DP concentrations at the harvest stage. Compared with the RM treatment, RC feed 0 and RC feed 1 treatments increased net revenue by 54.22% and 51.11%, respectively. Considering rice yield, P surplus, and environmental effects, the integrated rice-crayfish system without feed is a suitable alternative for rice crop systems in this area and could be a recommended model for this region due to the high utilization efficiency of resources, low environmental risk, and good economic benefits.

Keywords: integrated rice-crayfish system; phosphorus balance; phosphorus cycle; economic benefits

稻-渔系统是有效利用水土资源生产稻谷和水产品的重要农业生产方式,在区域食物供给保障、资源和环境保护等方面发挥着重要作用^[1]。近年来,稻虾综合种养发展迅速,已经成为我国长江中下游稻作区重要的生态农业模式^[2]。然而,稻虾综合种养仍然存在重虾轻稻、养分管理粗放、饲料投入过量、监管措施不完善等问题,如何优化稻虾综合种养体系中养分的管理是目前研究的热点问题^[3]。

磷是生态系统中的限制性养分^[4],也是水体富营养化不可忽视的非点源污染物。农业生态系统中磷素平衡的分析研究是科学评估稻虾共作系统养分管理及其环境风险的重要方法。前人对稻田综合种养体系中磷的平衡和动态变化开展了大量研究,陈飞星等^[5]对稻蟹生态系统中农田养分平衡的研究表明,稻蟹模式的农田中表现为磷盈余,其盈余量均高于水稻单作;但国涵等^[6]对稻虾共生系统磷循环的研究表明,稻虾生态系统磷的输出/输入均小于常规稻作模式;李成芳等^[7]对稻鸭、稻鱼共作体系中稻田磷素动态变化的研究表明,与水稻单作相比较,稻鸭和稻鱼共作处理田面水总磷浓度、溶解磷浓度、土壤速效磷含量和水稻磷吸收量显著增加。近年来,稻虾共作模式中的饲料投入已经成为磷素管理不可忽视的因素,然而关于稻虾共作生态系统饲料投入对农田生态系统磷素平衡状况、磷素利用率以及环境经济效益等方面的研究还鲜有报道,为此本文通过设置田间试验,研究水稻单作和稻虾共作(投食和不投食)条件下水稻产量、磷素平衡、田面水磷素浓度变化特征以及经济生态效益,为合理调控稻虾共作养分循环与平衡、资源高效利用和农业绿色可持续发展提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地点位于安徽省铜陵市普济圩农场(31°55'

N, 117°43'E)。该地区属亚热带季风性湿润气候,年平均气温为16.1℃,年平均降水量为1 297.5 mm,2019年水稻种植期间铜陵每月最高和最低日平均气温与降水量见表1。种植制度为“晚稻-冬闲”,土壤类型为潴育型水稻土。耕层土壤有机质含量39.54 g·kg⁻¹,全氮含量2.07 g·kg⁻¹,有效磷含量8.04 mg·kg⁻¹,速效钾含量139.72 mg·kg⁻¹,pH为6.4。

表1 2019年水稻种植期间铜陵每月最高和最低日平均气温与降水量

Table 1 Maximum and minimum daily temperature of each month and precipitation in Tongling during rice cultivation in 2019

月份 Month	最高温度 Maximum temperature/℃	最低温度 Minimum temperature/℃	降水量 Precipitation/ mm
6月	29	22	258.16
7月	32	25	176.62
8月	33	25	137.99
9月	29	20	60.14
10月	24	15	12.10

1.2 试验设计与田间管理

试验于2019年4—11月进行,田间试验布局见图1,设置3个处理:水稻单作(RM)、稻虾共作投食(RC

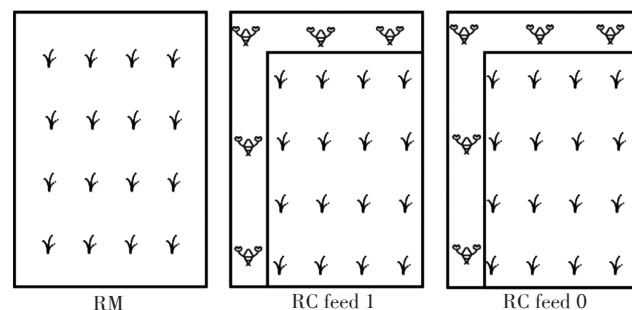


图1 稻虾共作模式和水稻单作模式的田间试验布局

Figure 1 Layout diagrams of field experiments in integrated rice-crayfish system and rice monoculture system

feed 1)、稻虾共作不投食(RC feed 0);每个处理设置3次重复,小区面积440 m²(22 m×20 m),RC feed 1和RC feed 0处理小区周围开挖宽1.0 m、深1.0 m的“L”形虾沟,面积约为41 m²,虾沟面积约为水稻种植区域面积的10%。为了防止串水、串虾,每个处理都有单独的进水和排水口,且处理间设宽0.4 m、深1.0 m的水沟隔开。在虾沟岸边设置隔离塑料板,塑料板埋入地下0.5 m,露出地面0.3 m,并用铁丝连结固定,防止小龙虾逃逸。供试水稻品种为“新优188”,供试虾为克氏原螯虾。

水稻苗期在育秧基地中生长,于2019年7月6日移栽至本试验田中。栽植原则为宽行窄株,穴距20 cm,行距30 cm,每穴3株。各处理之间均施用等量等比例的化肥,化肥翻耕混入土壤,N、P₂O₅、K₂O施用量分别为225、90、113 kg·hm⁻²,磷肥和钾肥全部作为基肥施用,氮肥70%作为基肥,30%作为追肥在7月23日施用。

稻虾共作模式流程如图2所示,水稻生长期田面多数时间处于淹水状态,田沟互通,稻虾共生,部分时间(晒田、收获等)水稻田内搁干,克氏原螯虾随水迁移到虾沟内。2019年4月15日,捕捞稻虾共作投食和不投食处理中的成虾,并投放质量为(15±2)g的幼虾,投放密度为1.35×10⁴只·hm⁻²。试验期间(2019年4—10月),按照克氏原螯虾质量的2%~7%投喂配合饲料,饲料主要原料为鱼粉、豆粕、花生粕、菜粕、豆油、磷酸二氢钙等。投喂时间选择早上或者傍晚,投喂地点选择浅水区虾穴附近。根据天气状况和克氏原螯虾摄食情况调整投喂频率和投喂量并做记录,投入饲料量累计为525 kg·hm⁻²,所有克氏原螯虾于水

稻收割后捕捞。

1.3 样品的采集与测定方法

1.3.1 水稻植株样品的采集与测定

在水稻生长的苗期和成熟期,每小区随机选取5穴代表性水稻植株,采样点避开田边,使用铲子在其四周挖出15 cm×15 cm×10 cm的土块,将水稻拔离土壤,连同根系装入网袋,带回实验室处理。经自来水和蒸馏水冲洗干净后,茎、叶、穗、根分别装入样品袋,于105℃杀青30 min,75℃下烘干至恒质量,测定其干物质量。植株样品粉碎后,经浓硫酸-过氧化氢高温消化,钼锑抗比色法测定其全磷含量^[8]。

1.3.2 克氏原螯虾样品及其饲料的采集与测定

试验结束时,捕捞所有克氏原螯虾,记录成虾的质量。分别取幼虾、成虾和饲料测定含水量和全磷含量,全磷的测定方法同水稻植株样品。

1.3.3 灌溉水和田面水样品采集与测定

每次进水和排水时记录稻田和虾沟的水位变化,计算进水量和排水量,在稻田进出水口采集灌溉水样,测定全磷含量;在水稻生育期每隔一个月采集一次田面水,用50 mL医用注射器在稻田进出水口、小区内以及沟渠等位置采集5个点的混合水样,注入250 mL洗净消毒的集水瓶,所有水样采集后立即带回实验室分析。水样全磷含量利用过硫酸钾氧化-钼蓝比色法测定^[9],溶解磷含量利用0.45 μm滤膜过滤-钼锑抗比色法测定^[10]。

1.3.4 降雨样品的采集与测定

在试验期间利用SDM6型雨量器收集雨水样品,取每次降雨的全过程样(降雨开始至结束)。采集的样品混合均匀后移入洁净干燥的聚乙烯塑料瓶中,冷

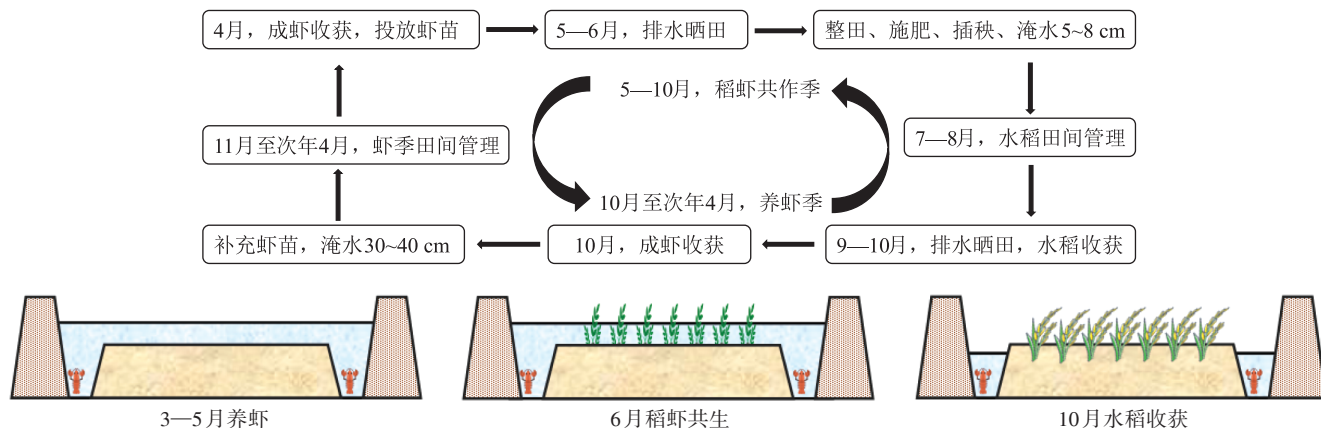


图2 稻虾共作模式示意图

Figure 2 Diagram of the integrated rice-crayfish system

冻保存备用。降雨中的全磷含量测定方法同灌溉水样分析。磷的沉降量为实际收集的降水磷浓度与相应降雨量的乘积累加。

1.3.5 水稻和克氏原螯虾产量的测定

水稻成熟期,在每个小区调查30穴水稻的有效穗数,计算平均有效穗数,按照平均有效穗数选取5穴水稻调查每穗总粒数,计算结实率和千粒质量,测定理论产量。成熟期从各小区收割3块1 m²样方的水稻,脱粒去杂、测定水分、称量质量、折算实际产量。水稻产量的计算包括虾沟占用面积。克氏原螯虾于水稻收割后全部捕捞、称量质量、记录产量。

1.3.6 数据计算与分析

磷素平衡的计算。OENEMA等^[11]和巨晓棠等^[12]根据养分平衡的系统边界将养分平衡分为3类,即农场界面(Farm gate)、土壤界面(Soil surface)和土壤系统(Soil system)。本研究选取农场界面建立磷素平衡(图3),以稻虾共作系统作为一个黑箱,详细记录农场界面氮素输入和输出数量。磷平衡等于磷输入(化肥+秧苗+降雨+饲料+灌溉水+幼虾)减去磷输出(稻谷+成虾)。磷平衡为正值,表明水稻和克氏原螯虾带出的磷素部分来自环境,磷平衡为负值,表明输入

的磷素中有剩余部分留在环境中。

磷素利用率(Phosphorus use efficiencies, PUE)定义为磷素产品输入与输出的比率^[13-15],即磷素利用率等于磷输出(稻谷+成虾)除以磷输入(化肥+秧苗+降雨+饲料+灌溉水+幼虾)。

稻虾共作系统中克氏原螯虾壳循环量的计算:幼虾至性成熟一般需要经过5~6次的蜕壳,虾壳占虾体质量的平均比值为12.4%^[16],即虾壳中磷的含量为8.6 g·kg⁻¹,以此计算虾壳磷循环量。

采用Microsoft Excel 2019 进行数据处理和图形绘制,采用SPSS 18.0 软件进行不同处理间各指标的差异性及相关性的统计分析。

2 结果与分析

2.1 水稻产量及构成因素

水稻产量的构成因素分析表明(表2),RC feed 1、RC feed 0 和 RM 3 个处理间水稻有效穗数、每穗总粒数、结实率、千粒质量均无显著差异($P>0.05$);水稻产量在3 个处理间差异也不显著($P>0.05$)。

2.2 水稻磷吸收

由表3 可知,除茎部外,水稻其他部位全磷含量

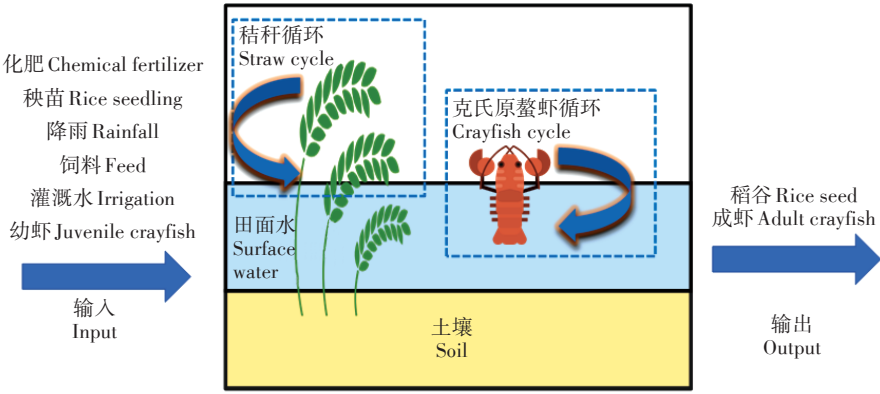


图3 稻虾共作模式农场界面平衡示意图

Figure 3 Schematic diagram of integrated rice-crayfish system farm-gate budget

表2 不同处理对水稻产量及构成因素的影响

Table 2 Effects of different treatments on rice yield and component factors

处理 Treatment	有效穗数 Effective panicle number/(10 ³ ·hm ⁻²)	每穗总粒数 Grains per panicle	结实率 Seed-setting rate/%	千粒质量 1 000-kernel weight/g	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)
RM	4 222.56±147.94a	115.12±11.64a	83.96±3.61a	24.42±0.54a	9 432.27±982.82a
RC feed 1	4 852.24±271.98a	112.35±2.96a	82.20±0.19a	23.88±1.35a	10 285.65±370.80a
RC feed 0	4 726.30±734.16a	109.32±18.21a	82.24±3.43a	23.71±0.58a	9 610.06±560.37a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments at $P<0.05$. The same below.

不同处理之间均无显著差异($P>0.05$);RC feed 0处理茎部全磷含量较RM和RC feed 1处理分别提高了35.80%和20.71%,且RC feed 0和RM处理之间差异达显著水平($P<0.05$)。RC feed 0处理的水稻叶部磷吸收量较RM和RC feed 1处理分别增加了22.18%和16.68%,且差异达显著水平($P<0.05$);水稻茎部磷吸收量以RC feed 0处理最高,且变化规律与叶部相同。可见,稻虾共作不投食模式能提高水稻茎和叶的磷吸收量,对籽粒和根系的磷吸收量无显著影响。

2.3 磷循环特征及平衡状况

稻虾共作和水稻单作模式磷循环特征及平衡状况见表4。RM处理中磷输入主要是化肥、水稻秧苗、降雨及灌溉水,总输入量为 $41.54\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中化肥磷占总输入的94.61%。RM处理磷输出主要是水稻籽粒,其磷输出量为 $33.89\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;系统循环的磷主要是水稻秸秆磷和水稻根系磷,其磷循环量合计为 $30.48\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,占总输入量的73.38%。RC feed 1处理磷输入较RM处理增加了克氏原螯虾幼虾和饲料,幼虾投放质量为 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,鲜活状态下克氏原螯虾的磷含量为 $2.21\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,计算得幼虾输入的磷为 $0.44\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;饲料的投入量为 $525\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,正常保存状态下磷含量为 $10.86\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,计算得饲料输入的磷为 $5.70\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;化肥磷占总输入的81.74%,饲料磷占11.86%。RC feed 1处理磷输出为 $37.24\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中水稻籽粒磷占97.96%;成虾产量为 $344\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,磷含量为 $2.21\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,计算得成虾输出的磷为 $0.76\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,占总输出的2.04%;系统循环的磷为水稻秸秆磷、水稻根系磷和虾壳磷,其磷循环量合计为33.91

表4 稻虾共作模式和水稻单作模式系统磷循环与平衡状况($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)
Table 4 P cycle and balance of integrated rice-crayfish system and rice monoculture system($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

	项目 Item	RM	RC feed 1	RC feed 0
P输入 Input	化肥 Chemical fertilizer	39.30	39.30	39.30
	水稻秧苗 Rice seedling	0.02	0.02	0.02
	饲料 Feed	—	5.70	—
	降雨 Rainfall	0.22	0.22	0.22
	幼虾 Juvenile crayfish	—	0.44	0.44
P输出 Output	灌溉水 Irrigation water	2.00	2.40	2.40
	合计 Total	41.54	48.08	42.38
	水稻籽粒 Rice seed	33.89	36.48	35.78
	成虾 Adult crayfish	—	0.76	0.61
	合计 Total	33.89	37.24	36.39
P循环量 Return	水稻根系 Root	1.69	1.82	1.74
	水稻秸秆 Rice straws	28.79	31.71	38.80
	虾壳 Crayfish shell	—	0.38	0.30
	合计 Total	30.48	33.91	40.84
P平衡 Balance		7.65	10.84	5.99

$\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 占总输入量的70.53%。RC feed 0处理较RC feed 1处理减少了饲料磷输入,化肥磷占总输入的92.73%;磷输出为 $36.39\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中水稻籽粒磷占98.32%,成虾产量为 $274\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,磷含量为 $2.21\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,计算得成虾输出的磷为 $0.61\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,占总输出的1.68%;系统循环的磷为水稻秸秆磷、水稻根系磷和虾壳磷,其磷循环量合计为 $40.84\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,占总输入量的96.37%。根据农田磷平衡的计算, RM、RC feed 1和RC feed 0处理农田磷平衡分别为7.65、

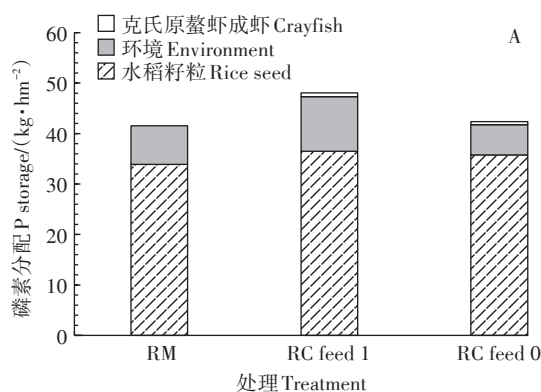
表3 稻虾共作模式和水稻单作模式中水稻植株磷的吸收
Table 3 P uptake of rice plant of integrated rice-crayfish system and rice monoculture system

器官 Organ	处理 Treatment	生物量 Biomass/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	全磷含量 Total P content/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	磷吸收量 P uptake/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)
籽粒 Grain	RM	11 867.25±1 235.28a	2.84±0.13a	33.89±1.64a
	RC feed 1	12 998.44±639.20a	2.76±0.09a	36.78±2.41a
	RC feed 0	12 052.44±653.96a	2.89±0.03a	34.78±1.98a
茎 Stem	RM	8 326.22±288.59a	1.76±0.22b	14.58±1.51b
	RC feed 1	8 516.05±403.98a	1.98±0.24ab	16.83±1.62b
	RC feed 0	8 962.38±313.14a	2.39±0.18a	21.45±2.10a
叶 Leaf	RM	6 735.54±89.76a	2.11±0.14a	14.20±0.80b
	RC feed 1	6 940.93±317.77a	2.14±0.06a	14.87±0.89b
	RC feed 0	7 259.10±524.67a	2.28±0.08a	17.35±1.46a
根系 Root	RM	2 391.04±217.98a	0.71±0.03a	1.69±0.08a
	RC feed 1	2 640.41±93.34a	0.69±0.02a	1.82±0.12a
	RC feed 0	2 405.57±115.23a	0.72±0.01a	1.74±0.10a

10.84 kg·hm⁻²和5.99 kg·hm⁻²。这表明3种处理农田磷素均盈余,RC feed 1处理磷盈余量最大,RC feed 0处理磷盈余量最小,可见稻虾共作不投食减少了农田磷素盈余,增加了系统磷循环量。

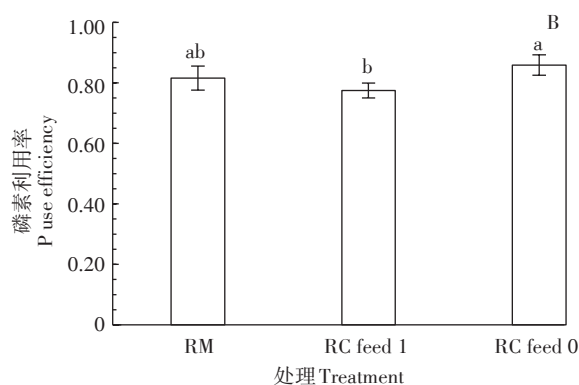
2.4 磷素分配和磷素利用率

图4A为各处理磷素的分配情况,磷素的输入量(化肥+秧苗+降雨+饲料+灌溉水+幼虾)减去磷素输出量(稻谷+成虾)得到磷素滞留在环境中的量。RM、RC feed 1和RC feed 0处理滞留在环境中的磷素的量分别为7.65、10.84 kg·hm⁻²和5.99 kg·hm⁻²,RC feed 0处理较RM和RC feed 1处理滞留在环境中的磷素分别减少21.70%和44.74%。图4B为不同处理的磷素利用率,RC feed 0处理磷素利用率显著高于RC feed 1处理($P<0.05$)。相较于RM和RC feed 1处理,RC feed 0处理增加了水稻磷素吸收,减少了磷在环境中的滞留。



2.5 稻田田面水中的磷

稻田田面水总磷浓度的变化趋势如图5A所示。6月,RC feed 1处理稻田田面水总磷浓度最高,其次是RC feed 0处理,RM处理最低($P<0.05$)。7、8月,RC feed 1处理稻田田面水总磷浓度显著高于RM和RC feed 0处理($P<0.05$),RM和RC feed 0处理之间无显著差异($P>0.05$)。9、10月,各处理稻田田面水总磷浓度无显著差异($P>0.05$)。稻田田面水溶解磷浓度的变化趋势如图5B所示。6月,RC feed 1处理稻田田面水溶解磷浓度最高,其次是RC feed 0处理,RM处理最低($P<0.05$)。7、8、9月,RC feed 1处理稻田田面水溶解磷浓度最高,RC feed 0和RM处理稻田田面水溶解磷浓度无显著差异($P>0.05$)。因此,在6—9月期间,RC feed 1处理较RM和RC feed 0处理提高了稻田田面水总磷和溶解磷浓度,增加了



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at $P<0.05$. The same below

图4 不同处理中的磷素分配和磷素利用率

Figure 4 Distribution of P and P use efficiency in rice field system

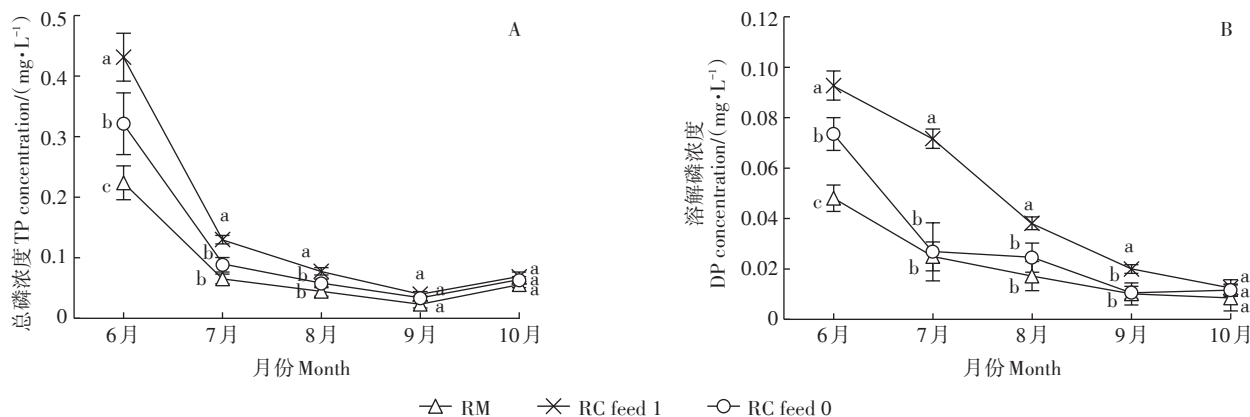


图5 稻田田面水总磷和溶解磷浓度的动态变化

Figure 5 Dynamic change of TP and DP concentration in surface water of paddy fields

磷的径流损失风险,延长了风险期;而相较于RC feed 1处理,RC feed 0处理能够减小这一风险。

2.6 经济效益

由表5可知,RC feed 1和RC feed 0处理投入成本分别为24 844元·hm⁻²和19 717元·hm⁻²,较RM处理分别增加了80.95%和43.61%;增加的部分主要来自改造工程、虾苗和水稻育秧插秧费用,RC feed 1处理较RC feed 0处理还增加了饲料的投入。RC feed 0和RC feed 1处理净收入分别为24 579元·hm⁻²和24 084元·hm⁻²,较RM处理(15 938元·hm⁻²)分别增加了54.22%和51.11%。3个处理间RC feed 0处理的净收入最高。

3 讨论

3.1 稻虾共作模式水稻产量和磷素吸收

稻虾共作处理的养殖沟占了一部分面积,所以实际水稻种植面积要小于水稻单作处理,但稻虾共作模式下水稻产量并没有减少。GUO等^[17]对全国14个省市的86个农场进行了实地调查,结果表明,稻虾共作模式水稻产量为8.07 t·hm⁻²,较水稻单作模式(8.00 t·hm⁻²)略有增加,但并无显著差异。曹凑贵等^[2]的研究表明,尽管稻虾共作模式中种植水稻的面积减少(养殖沟面积占8%),但水稻单产并未减少,稻虾共作模式水稻产量比传统水稻种植模式增加4.63%~14.01%。本试验中水稻产量没有减少,处理间产量差异不显著,这与前人的研究结果一致。水

稻产量没有减少可能是因为以下原因:一是投喂饲料中养分未被虾完全利用,而被水稻吸收。XIE等^[1]的研究表明,在稻鱼系统中,鱼饲料中有32%的氮被水稻吸收。MIRHAJ等^[18]的研究证明,稻田种养系统中水稻和动物之间的养分可互利互补,稻田中残留的饲料能够促进水稻生长;二是克氏原螯虾在田间的活动影响水稻养分吸收。动物在田间的活动会影响土壤通气、氧化还原状态等理化性状,从而加快土壤有效养分的释放^[19]。有研究表明,稻虾共作模式中克氏原螯虾在田间的蜕壳和排泄物等也能够增加土壤全氮、全磷、全钾含量^[20],改善土壤养分状况,促进水稻对养分的吸收;三是养殖沟边际效应导致的水稻增产效应能弥补因种植面积减少而引起的产量减少。吴雪等^[21]的研究表明,养殖沟的设计对维持水稻产量十分重要,如果养殖沟相对较小(通常是小于10%),则不会降低水稻产量,甚至还能增加水稻产量。

3.2 稻虾共作模式稻田磷素平衡

大量研究表明,养分平衡是衡量养分投入、生产力、环境影响和土壤肥力变化的最有效指标^[12]。稻虾共作模式农田磷素平衡反映了磷素在农业生态系统水平的盈余或缺。本研究表明,稻虾共作模式较常规水稻单作模式减少了农田磷素盈余,且不投食处理效果更显著。稻虾共作不投食模式主要是在减少磷素输入(饲料)的同时促进磷素的循环利用,进而减少了农场界面的磷素盈余,保证了农业生态系统磷素的高效可持续利用。稻虾共作系统引入了克氏原螯虾次级生产,从而改变了生态系统的养分循环。在RC feed 0处理中,克氏原螯虾可以摄食系统中的浮游动物、有机碎屑以及幼嫩植物等,且水稻可以利用克氏原螯虾的排泄物^[22],利用环境中滞留的磷素,增加了生态系统磷素的循环量(表4)。LIU等^[3]通过养分平衡分析表明,饲料已成为稻虾共作模式中磷素的重要来源之一。因此,为了节约资源和保护环境,采取稻虾共作的模式并减少饲料的投入可降低磷素在农田生态系统中的不断累积^[3],进而减少环境中磷素污染风险。

3.3 磷素分配和磷素利用率

从磷素分配(图4A)可以看出,RC feed 0处理较RC feed 1处理减少了磷在环境中的滞留量,这可能是因为水稻磷素利用率的提高减少了磷素流向环境,也降低了环境中磷素污染的风险。RC feed 0处理的磷素利用率显著高于RC feed 1处理(图4B)。有研究

表5 稻虾共作模式和水稻单作模式的经济效益(元·hm⁻²)

Table 5 Economical costs and benefits of integrated rice-crayfish system and rice monoculture system(yuan·hm⁻²)

项目 Item		RM	RC feed 1	RC feed 0
成本投入 Cost input	地租 Field rent	5 400	5 400	5 400
	改造工程 Construction	—	917	917
	水稻秧苗 Rice seeding	600	1 550	1 550
	虾苗 Juvenile crayfish	—	3 000	3 000
	整地 Tillage	1 300	1 300	1 300
	插秧 Transplanting	1 000	2 120	2 120
	化肥 Fertilizer	2 856	2 856	2 856
	农药 Pesticide	974	974	974
	管理 Management	1 600	1 600	1 600
	饲料 Feed	—	5 127	—
合计 Total		13 730	24 844	19 717
收入 Income	水稻籽粒 Rice seed	29 668	33 446	31 939
	成虾 Adult crayfish	—	15 482	12 357
	合计 Total	29 668	48 928	44 296
纯收入 Net income		15 938	24 084	24 579

表明,克氏原螯虾在稻田靠近环沟边缘的活动量显著高于稻田中间^[23],而不投食处理使得环沟中的食物减少,由于饥饿胁迫,克氏原螯虾摄食量、摄食时间、摄食频次和运动比率会显著增加^[24],会更加频繁地进入稻田深处寻找食物,因此对土壤磷素有效性和水稻磷吸收的影响显著。克氏原螯虾的挖洞筑穴活动能够降低土壤容重,增加土壤孔隙度,提高水分渗透率^[20,25];其食物残渣及排泄物进入土壤,有效补充了土壤养分,提高了土壤全磷和速效磷含量^[20];而且克氏原螯虾可以减少稻田杂草的发生和多样性^[26-27],这些都有利于水稻植株生长和磷素积累。因此,应当建立良好的养殖生态结构,优化池塘养殖系统内的食物链,使磷素养分尽可能多地在这一微环境内转化为生物产量,降低外排量,从而减少对水体环境的污染。

3.4 稻虾共作模式水体中磷浓度

稻田田面水磷流失是农业面源污染的主要来源之一,进入水体的总磷是水体富营养化的“源”,可溶性无机磷可被藻类直接吸收利用,对水体富营养化有直接贡献^[28]。本试验结果表明,各处理小区田面水总磷浓度在磷肥施用后均迅速达到最大值,随后降低,经过2个月后,所有处理田面水总磷浓度趋于稳定,田面水溶解磷浓度在各处理之间的规律与总磷基本相同,这与前人的研究结果相类似^[7,29]。在6—9月期间,稻田田面水的总磷和溶解磷浓度都呈现出RC feed 1处理高于RC feed 0和RM处理。化肥是传统水稻种植过程中农业面源污染的主要来源,但稻虾共作系统中除了化肥的施用,还会有克氏原螯虾饲料以及排泄物投入。LIU等^[3]采用物质平衡法研究了湖北省潜江市稻虾共作模式的养分投入与产出情况,稻虾共作模式中化肥带入的氮、磷分别为 $63.05 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $0.90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,克氏原螯虾饲料带入的氮、磷分别为 $296.45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $67.90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,这表明饲料投入已经成为氮、磷的最大来源,是农业污染不可忽视的新源头。而且研究证明,在水产养殖过程中,只有约1/3的饲料营养物质被鱼类或其他水产养殖动物吸收,2/3的营养物质留在水中^[30-31]。此外,克氏原螯虾的排泄物进入水体会增加氮磷含量,其觅食、挖穴等活动也会对土壤产生扰动,促进氮磷等释放。佘国涵等^[6]的研究表明,克氏原螯虾的排泄物一年为稻虾共作系统输入的氮、磷量分别为 $14.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $1.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。由此可见,不投食可在一定程度上降低面源污染的风险,是削减稻虾共作系统对水体环境负荷的有效措施。因此,有必要规范稻虾综合种养体系,特别是限制克氏

原螯虾饲料投入,减少水体富营养化的风险^[2-3]。

3.5 稻虾共作模式经济生态效益

稻虾共作模式将水稻种植和水产养殖有机结合,从而大幅度增加了农民收入。研究表明,在稻虾共生阶段的4个月内,RC feed 1和RC feed 0处理纯收入较RM处理分别增加 $8\,146 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $8\,641 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。RC feed 0处理较RC feed 1处理净收入增加了 $495 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$,相差较小。不投食处理较投食处理同样获得了可观的收入,这是因为不投食处理没有饲料成本,减少了成本投入。虽然饲料可以大幅度提高克氏原螯虾产量,然而克氏原螯虾饲料价格昂贵,利用效率低,投喂饲料可能不具有成本效益。BOOCK等^[32]研究了饲养密度和饲料投喂与否对稻虾共作模式经济效益的影响,结果表明高养殖密度下投食处理净收入低于不投食处理,稻虾共作不投食系统在技术和经济上是可行的。稻虾共作模式的主要收入来自于克氏原螯虾,这也导致虾的产量是经营者关注的重点,生产过程中常会投入大量的饲料。通常情况下,不投食虾的产量会显著减少,这和本研究结果一致。而有研究表明投食对虾的产量影响并不显著^[32],这可能是因为虾的产量受到稻田生产力、饲养密度和管理措施等多种因素影响。虽然克氏原螯虾价格居高,但如果盲目追求克氏原螯虾产量,过度依赖系统外饲料投入,必然导致生态效益的丧失,从可持续绿色发展的角度看,稻虾综合种养体系养分的投入必须限定在一定的生产水平范围内才能实现经济效益和生态效益相统一^[2]。

4 结论

(1)水稻单作、稻虾共作投食和稻虾共作不投食3种模式的水稻产量及构成因素无显著差异;稻虾共作不投食模式能提高水稻茎、叶的磷吸收量,对籽粒和根系磷吸收量无显著影响。

(2)3种模式下农田磷素平衡均表现出盈余,稻虾共作投食模式磷素盈余量高于水稻单作和稻虾共作不投食模式,而磷素循环量则低于稻虾共作不投食模式;稻虾共作不投食模式减少了滞留在环境中的磷素,提高了磷素利用率。

(3)稻田田面水中总磷和溶解磷浓度均表现为稻虾共作投食处理最高,稻虾共作不投食处理次之,水稻单作处理最低。

(4)综合考虑水稻产量效应、磷素平衡、磷素环境风险和经济效益,本研究认为稻虾共作不投食模式是

资源节约、环境友好、生产高效的绿色生产模式。

参考文献:

- [1] XIE J, HU L L, TANG J J, et al. Ecological mechanisms underlying the sustainability of the agricultural heritage rice-fish coculture system[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(50):19851-19852.
- [2] 曹凑贵, 江洋, 汪金平, 等. 稻虾共作模式的“双刃性”及可持续发展策略[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(9):1245-1253. CAO C G, JIANG Y, WANG J P, et al. “Dual character” of rice-crayfish culture and strategy for its sustainable development[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(9):1245-1253.
- [3] LIU C H, HU N J, SONG W X, et al. Aquaculture feeds can be outlaws for eutrophication when hidden in rice fields? A case study in Qianjiang, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(22):4471.
- [4] WERNER F, HAYE T, SPIELVOGEL S, et al. Small-scale spatial distribution of phosphorus fractions in soils from silicate parent material with different degree of podzolization[J]. *Geoderma*, 2017, 302:52-65.
- [5] 陈飞星, 张增杰. 稻田养蟹模式的生态经济分析[J]. 应用生态学报, 2002, 13(3):323-326. CHEN F X, ZHANG Z J. Ecological economic analysis of a rice-crab model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(3):323-326.
- [6] 倡国涵, 袁家富, 彭成林, 等. 稻虾共作模式氮和磷循环特征及平衡状况[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(9):1309-1318. SI G H, YUAN J F, PENG C L, et al. Nitrogen and phosphorus cycling characteristics and balance of the integrated rice-crayfish system[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(9):1309-1318.
- [7] 李成芳, 曹凑贵, 汪金平, 等. 稻鸭稻鱼共作生态系统N素平衡的研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4):1326-1334. LI C F, CAO C G, WANG J P, et al. Studies on nitrogen cycling in integrated rice-duck, rice-fish ecosystems[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4):1326-1334.
- [8] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2000:42-56. BAO S D. Soil agricultural chemistry analysis[M]. Beijing:China Agriculture Press, 2000:42-56.
- [9] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000:146-315. LU R K. Analysis methods of soil and agricultural chemistry[M]. Beijing:China Agricultural Science and Technology Press, 2000:146-315.
- [10] 国家环境保护总局. 水和废水分析方法[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002. State Environmental Protection Administration. Methods for examination of water and wastewater[M]. Beijing:China Environmental Science Press, 2002.
- [11] OENEMA O, KROS H, DE VRIES W. Approaches and uncertainties in nutrient budgets: Implications for nutrient management and environmental policies[J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, 20(1/2):3-16.
- [12] 巨晓棠, 谷保静. 氮素管理的指标[J]. 土壤学报, 2017, 54(2):281-296. JU X T, GU B J. Indexes of nitrogen management[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(2):281-296.
- [13] 冀宏杰, 张怀志, 张维理, 等. 我国农田磷养分平衡研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(1):1-8. JI H J, ZHANG H Z, ZHANG W L, et al. Research progress on cropland phosphorus balance in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(1):1-8.
- [14] MIHAILESCU E, MURPHY P, RYAN W, et al. Phosphorus balance and use efficiency on 21 intensive grass-based dairy farms in the South of Ireland[J]. *Journal of Agricultural Science*, 2015, 153(3):520-537.
- [15] HUHTANEN P, NOUSIAINEN J, TURTOLO E. Dairy farm nutrient management model: 2. Evaluation of different strategies to mitigate phosphorus surplus[J]. *Agricultural Systems*, 2011, 104(5):383-391.
- [16] CASTAÑON-CERVANTES O L C, AGUILAR M, GONZALEZ-MORAN G, et al. Photoperiodic induction on the growth rate and gonads maturation in the crayfish *Procambarus clarkii* during ontogeny[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology, Part A: Physiology*, 1995, 110(2):139-146.
- [17] GUO L, HU L, ZHAO L, et al. Coupling rice with fish for sustainable yields and soil fertility in China[J]. *Rice Science*, 2020, 27(3):175-179.
- [18] MIRHAJ M, RAZZAK M A, WAHAB M A. Comparison of nitrogen balances and efficiencies in rice cum prawn vs. rice cum fish cultures in Mymensingh, north-eastern Bangladesh[J]. *Agricultural Systems*, 2014, 125:54-62.
- [19] 蔡晨, 李谷, 朱建强, 等. 稻虾轮作模式下江汉平原土壤理化性状特征研究[J]. 土壤学报, 2019, 56(1):217-226. CAI C, LI G, ZHU J Q, et al. Effects of rice-crawfish rotation on soil physicochemical properties in Jianghan plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(1):217-226.
- [20] SI G, PENG C, YUAN J, et al. Changes in soil microbial community composition and organic carbon fractions in an integrated rice-crayfish farming system in subtropical China[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1):2856.
- [21] 吴雪, 谢坚, 陈欣, 等. 稻鱼系统中不同沟型边际弥补效果及经济效益分析[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(5):995-999. WU X, XIE J, CHEN X, et al. Edge effect of trench-pond pattern on rice grain and economic benefit in rice-fish co-culture[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(5):995-999.
- [22] 李聪, 成永旭, 管勤壮, 等. 用稳定性同位素技术分析稻-虾系统中不同“碳/氮”投喂方式对克氏原螯虾食性的影响[J]. 水产学报, 2018, 42(11):1778-1786. LI C, CHENG Y X, GUAN Q Z, et al. Using stable isotopes to estimate the effects of different carbon/nitrogen feeds on feeding habit of *Procambarus clarkii* in the rice-crayfish co-culture system[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2018, 42(11):1778-1786.
- [23] 管勤壮. 稻虾共作模式下小龙虾活动对稻田环境影响的研究[D]. 上海:上海海洋大学, 2018:14-15. GUAN Q Z. Effects of crayfish activity on paddy field environment in rice-crayfish coculture[D]. Shanghai:Shanghai Ocean University, 2018:14-15.
- [24] 刘国兴. 饥饿、盐度和密度胁迫对克氏原螯虾行为和生理功能的影响[D]. 扬州:扬州大学, 2011:37-40. LIU G X. Effects of starvation, salinity and density stress on behavior and physiological function

- of red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*) [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2011: 37–40.
- [25] LI Q M, XU L, XU L J, et al. Influence of consecutive integrated rice–crayfish culture on phosphorus fertility of paddy soils[J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(10): 3413–3422.
- [26] 徐大兵, 贾平安, 彭成林, 等. 稻虾共作模式下稻田杂草生长和群落多样性的调查[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(22): 5599–5602. XU D B, JIA P A, PENG C L, et al. Investigation of weed growth and community diversity in the rice–crayfish symbiosis farming[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2015, 54(22): 5599–5602.
- [27] 刘全科, 周普国, 朱文达, 等. 稻虾共作模式对稻田杂草的控制效果及其经济效益[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(10): 1859–1862. LIU Q K, ZHOU P G, ZHU W D, et al. Weed control efficacy and economic benefits of rice–lobster farming in paddy rice fields[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2017, 56(10): 1859–1862.
- [28] 姜海斌, 沈仕洲, 谷艳茹, 等. 洱海流域不同施肥模式对稻田氮磷径流流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1305–1313. JIANG H B, SHEN S Z, GU Y R, et al. Effects of different fertilization treatments on runoff losses of nitrogen and phosphorus in paddy fields in Erhai Lake basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(6): 1305–1313.
- [29] 张刚, 张世洁, 王德建, 等. 秸秆还田影响长江下游稻田周年氮磷径流风险[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(3): 640–649. ZHANG G, ZHANG S J, WANG D J, et al. Straw incorporation affects the annual nitrogen and phosphorus runoff risk from paddy fields in the lower Yangtze River[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(3): 640–649.
- [30] EDWARDS P. Environmental issues in integrated agriculture–aquaculture and wastewater–fed fish culture systems[J]. *Environment and Aquaculture in Developing Countries*, 1993, 31: 139–170.
- [31] EDWARDS P. Changes in traditional aquaculture in West Java, Indonesia[J]. *Aquaculture Asia Magazine*, 2009, 14(4): 3–8.
- [32] BOOCK M V, MARQUES H L D A, MALLASEN M, et al. Effects of prawn stocking density and feeding management on rice–prawn culture[J]. *Aquaculture*, 2016, 451: 480–487.