

不同施肥模式下稻-虾共作的氮磷平衡及效益分析

张丁月¹, 杨亚珍^{1, 2}, 刘凯文¹, 朱建强¹, 侯俊^{1*}

(1. 长江大学湿地生态与农业利用教育部工程研究中心, 湖北 荆州 434025;

2. 长江大学生命科学学院, 湖北 荆州 434025)

摘要: 稻-虾共作综合种养产业发展迅速, 完善稻田养分管理对于协调养分平衡及提高肥料利用率具有重要意义。通过设置有机肥施用(T1, 养殖沟分次施有机肥+水稻施有机无机复混肥)、缓/控释肥施用(T2, 养殖沟不施肥+水稻施缓/控释肥)和腐植酸肥施用(T3, 养殖沟施菌剂+水稻施腐植酸肥)共3个处理, 研究稻-虾共作系统的氮磷平衡以及系统效益。结果表明, 水稻产量呈现 $T1 \approx T2 > T3$, 而虾的产量呈现 $T3 > T2 > T1$ 。从水质上看, T1能显著提高小龙虾的食物来源, 其小龙虾的平均单重也分别是T2和T3的1.3和2.3倍; 从经济效益看, T3利润最高, 为46 098.5元/hm², 比T1高19.7%。氮和磷平衡最佳的分别是T1和T3, 但由于T3水稻产量太低而不利于粮食安全。综上, 从“藏粮于地”的角度要优选缓/控释肥, 在保证水稻产量的前提下增加农户收益, 分次施用适量有机肥和施用微生物菌剂能够分别利于提高虾的单重和总产, 但有机肥的施用也存在风险, 需限制有机肥的单次用量以控制水体氨氮含量。

关键词: 稻-虾共作; 氮磷平衡; 经济效益; 养分利用; 水质特征

稻-虾共作是以田间工程为纽带, 将水稻种植与小龙虾(克氏原螯虾, *Procambarus clarkii*)养殖结合在一起, 从而获得更高经济效益的一种生态农业模式。该模式在长江中下游地区迅速推广, 例如, 截至2017年, 湖北省稻-虾种养面积已经达到36.27万hm²^[1]。稻-虾共作不仅可以提高土壤肥力, 改善土壤理化性质^[2-3], 还能减少化肥农药的使用, 降低水稻部分病虫害的发生率^[4]。研究表明, 与中稻单作相比, 稻-虾共作可以提高土壤耕作层有机碳33%及全氮30%^[2]。徐祥玉等^[5]指出, 稻-虾共作显著降低温室气体排放, 其中CH₄降低29.02%~41.19%, N₂O降低7.5%。此外, 该模式与当地常规水稻单作模式相比收益能提高100%^[2]。前人的这些研究对于促进土壤培肥、环境保护以及提高国家粮食安全等具有重要意义。为了进一步提高产量和效益, 稻-虾共作需要施用肥料。一方面, 肥料的施用为水稻提供养分的同时, 也能促

进水体浮游生物的生长, 为小龙虾提供充足的饵料; 另一方面, 肥料的施入也会影响养殖水体水质, 如果水质差则会危害小龙虾生长。最终, 肥料施用又会通过影响稻和虾的产量等影响整个系统的养分平衡^[6], 因此迫切需要弄清肥料施用效果及影响机制。目前针对稻-虾共作系统的肥料施用对水质特征及其养分平衡的研究鲜见报道。国际上普遍采用生物链来研究养分的利用^[7], 这就需要把稻-虾共作看作一个系统, 并且定量施肥后水质特征的同时, 以该系统为边界来研究养分平衡并评估环境损失风险^[8]。有关肥料的施用存在以下3种方式: 其一, 农户为了追求食品健康或提高收益而采用有机肥, 这样不仅可以提高养分利用效率, 还能改善水稻与小龙虾的品质进而提高收益^[9]。其二, 选择不施肥或施用缓/控释肥确保水质安全, 进而保证收益。由于近年虾的价格逐年增加, 2018年小龙虾价格已经达到30~60元/kg^[10], 虾的直接效益达到 $4.5 \times 10^4 \sim 9.0 \times 10^4$ 元/hm², 而水稻的效益较低, 因此水稻种植过程中把确保水质安全放在首位^[4], 水稻产量则次之。其三, 以生物调控为主, 这是在绿色农业增产政策指引下出现的一种生态型养殖方式^[11], 例如用腐植酸生物肥等。本研究根据上述背景设置3种典型施肥模式以田块为尺度探究氮磷平衡, 并进行经济效益分析, 旨在为完

收稿日期: 2019-07-23; 录用日期: 2019-09-22

基金项目: 长江大学湿地生态与农业利用教育部工程研究中心开放基金(KF201805); “十三五”国家重点研发计划(2016YFD0300900); 湖北省生态循环农业创新体系项目(2018skjex01)。

作者简介: 张丁月(1991-), 山西朔州人, 硕士研究生, 主要从事土壤肥力与养分循环的研究。E-mail: 1040079368@qq.com。

通讯作者: 侯俊, E-mail: houjungoodluck1@163.com。

善稻田养分管理,提高经济效益,促进稻-虾种养产业发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验地点位于湖北省荆州市太湖农场(30°24′49″N,111°59′55″E),从2006年开始连续稻-虾共作12年。该地区具有亚热带季风湿润气候,年平均气温16.2℃,平均无霜期为252 d,平均年降水量约为1 200 mm。土壤类型为潜育型水稻土,土壤有机质25.4 g/kg、全氮1.91 g/kg、全磷0.34 g/kg、全钾3.34 g/kg、碱解氮69.4 mg/kg、有效磷24.1 mg/kg、速效钾118.7 mg/kg、pH值7.3。目前,荆州市小龙虾种养面积已达到14.07万hm²^[1],稻-虾共作模式已日趋成熟,施肥主要针对两个部分:小龙虾养殖沟施肥和水稻施肥。4月初,气温变暖,但是水质偏瘦,投入一定量肥料可以增加水体养分,为小龙虾提供饵料。5~10月为稻作期,其中有一段稻和虾的共生期,即水稻基肥施用10~15 d以后开始提高田面水引导小龙虾入田,直到水稻收获前排水小龙虾重新回到养殖沟。

1.2 试验设计

本试验于2018年3月,以3种典型施肥模式相应设置3个处理:施用有机肥(T1),养殖沟分

次施用有机肥+水稻施用有机无机复混肥;施用缓/控释肥(T2),养殖沟不施肥+水稻施用缓/控释肥(缓/控释N占全N的15%),注重水质安全;施用腐植酸肥(T3),养殖沟施用菌剂+水稻施用腐植酸肥,注重生物调水。每个处理施肥量如表1所示,每个处理3次重复。各小区总面积约0.667 hm²,中间种植水稻,占地约80%,四周挖有环沟作为养殖沟,占地约20%。灌溉为沟渠灌溉,进排水口用0.85 mm的长型网袋过滤,以防止敌害生物随水流进入或小龙虾逃出。小区周围用聚乙烯加厚防逃网,网高40 cm。

施肥模式(表1)的具体措施为:T1处理,4月1日开始给养殖沟施肥,每10 d施用1次,共施6次,稻田基肥采用有机无机复混肥;T2处理则是养殖沟内不施肥,稻田基肥采用缓/控释肥;T3处理是养殖沟施用菌剂,且1次性施入,稻田基肥采用腐植酸肥。各处理中的养殖沟内施肥和基肥氮磷钾养分总量之和(N+P₂O₅+K₂O)均为180 kg/hm²。虾苗为上一年自留种虾225 kg/hm²,5月下旬,在小龙虾基本捕捞结束后,排干田面水,进行稻田耕整。水稻品种为当地应用较为普遍的“Y两优2号”。6月1日直播并撒施基肥,7月1日各处理均追施尿素75 kg/hm²,于10月4日收获。

表1 不同处理肥料基本性状及施肥量

处理	措施	养殖沟施肥	稻田基肥 ^a			
			肥料品种	有机质 (%)	N-P ₂ O ₅ -K ₂ O (%)	用量 (kg/hm ²)
T1	养殖沟施肥+有机无机复混肥	施有机肥 ^b	有机无机复混肥	15	18-10-12	450
T2	养殖沟不施肥+缓/控释肥	—	缓/控释肥	0	28-15-5	375
T3	养殖沟生物调水+腐植酸肥	菌剂 ^c	腐植酸肥	0	26-10-12	375

注:^a分蘖期追施尿素(N,46%)75 kg/hm²; ^b指虾沟有机肥(有机质-N-P₂O₅-K₂O为40-10-4-6,%)每次用量75 kg/hm²,共6次施用; ^c腐植酸菌剂(总活菌数10亿/g)用量为5 kg/hm²,不含氮磷钾养分,1次性投入。

1.3 数据来源

1.3.1 水质取样与测定

分别在4月2日~5月2日(没有水稻,小龙虾在养殖沟)10:00左右,每5 d在养殖沟随机取3个点,原位测定水体透明度,然后用水样采集器取水带回实验室测定氨氮和叶绿素a含量。水体透明度用塞氏盘测定,水体氨氮用水杨酸分光光度法,叶绿素a用分光光度法^[12]。

1.3.2 水稻和小龙虾产量及效益计算

在水稻成熟期人工收割,并用脱粒机脱粒,晾晒至含水率约14%时称重计产。6月2日于每个处理捕捞小龙虾2 kg,带回实验室记录单体重量;虾的总产量来自日常销售记录,以鲜重计。总收益来自全年的成本和利润核算,成本-利润率是净利润除以总成本的比率。

1.3.3 氮磷循环所用的数据来源

记录稻-虾共作系统全生育期的灌/排水次数以及灌水量,并在灌排水时从进水口或出水口处取水样,带回实验室测定全氮和全磷。全氮和全磷分别采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法和过硫酸钾氧化-钼蓝比色法测定^[12]。氮磷循环分别以N和P来统一计算,其中肥料中 P_2O_5 换算成P。饲料氮磷含量来源于中国饲料数据库^[13],其中氮取值为饲料中粗蛋白质含量除以换算系数6.25;商品饲料氮磷量根据饲料配方计算所得。小龙虾的氮磷含量为取样后测定所得^[14]。氮沉降数据为田月明等^[15]研究所得,其采样地距离本研究试验地点仅6 km,因此数据可靠;生物固氮数据来源于Smil^[16]研究所得;氨挥发数据是在李诗豪等^[17]与李成芳等^[18]研究成果的基础上估算所得。循环的计算参考张帆等^[19]“稻-鸭生态系统”氮磷循环的计算方法。

1.4 数据处理与分析

数据利用DPS 7.05软件进行方差分析,用最小显著性检验(LSD)法比较不同处理间的差异显著性,相关图表制作用Excel 2010完成。

2 结果与分析

2.1 各施肥模式肥水后养殖沟的水质特征

养殖水体正常水质的氨氮含量应小于0.2 mg/L。本试验中养殖沟水氨氮浓度均未超标。4月7日,T1处理中氨氮浓度为0.15 mg/L,比T2、T3显著高50% ($P<0.05$)。其他时间各处理氨氮浓度均没有显著差异 ($P>0.05$) (图1a)。T1的叶绿素a显著高于T2、T3 ($P<0.05$),在4月17日的检测中,施用有机肥的处理(T1)叶绿素a含量为75.33 $\mu\text{g/L}$,是T2、T3的4倍 ($P<0.05$) (图1b)。水体透明度适中,适合小龙虾生长,且各处理间没有显著差异 ($P>0.05$) (图1c)。

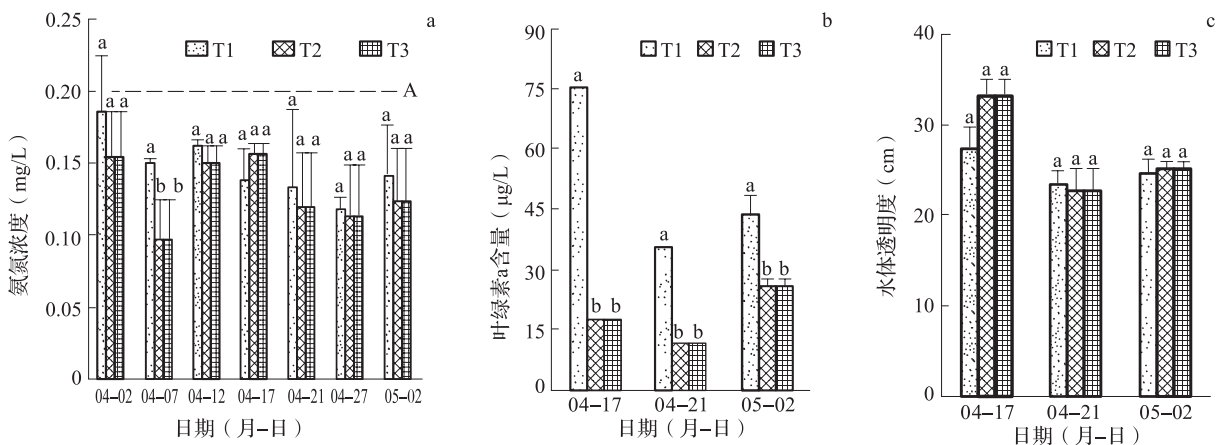


图1 稻-虾共作模式不同肥料管理下插秧前虾沟的水质特征

注:图中虚线A表示小龙虾的氨氮阈值0.2 mg/L^[20];不同小写字母表示差异达5%显著水平,下同。

2.2 稻-虾共作系统不同施肥模式氮和磷的平衡

由表2可知,稻-虾共作系统中,氮素投入主要来源以肥料与饲料为主,3种施肥处理下肥料与饲料投入之和分别占氮素总投入量的78%、81%和75%。氮素输出以谷物和排水为主,其总量分别占氮素总输出量的74%、74%和67%,其中,灌溉水全氮含量为1.31 mg/L,排水全氮含量1.77 mg/L,灌排水量均为17 921 m³,所以灌水输入氮量为23.48 kg/hm²,排水输出氮量为31.72 kg/hm²。N投入量的规律呈现:T2 (180.43) > T3 (172.93) > T1 (156.48) (kg/hm²)。N输出量的规律呈现:T3

(121.69) > T2 (118.58) > T1 (115.82) (kg/hm²)。在稻-虾共作系统中,全年N素残留量较大,且不同处理差异显著 ($P<0.05$),N素残留T2 (96.35) > T3 (85.74) > T1 (75.13) (kg/hm²)。

磷的投入也主要来自肥料 (>80%) 和饲料 (>15%),输出均主要来自谷物 (>80%)。P投入量的规律呈现T2 (27.73) > T1 (22.82) > T3 (19.54) (kg/hm²),P素输出量T2 (18.07) > T1 (17.50) > T3 (16.62) (kg/hm²),P素残留量T2 (9.66) > T1 (5.32) > T3 (2.92) (kg/hm²) (表3)。

表 2 稻-虾共作系统不同肥料管理下的氮平衡

(kg/hm²)

处理	N 输入							N 输出					N 平衡
	种子	饲料	灌溉	肥料	氮沉降	生物固氮	合计	谷物	虾	排水	氨挥发	合计	
T1	0.28	33.75	23.48	81.05	17.17	0.75	156.48	49.14 ± 1.38	20.17	31.72	14.82	115.82 ± 1.38	75.13 ± 1.38c
T2	0.28	33.75	23.48	105.00	17.17	0.75	180.43	50.31 ± 0.66	22.90	31.72	13.65	118.58 ± 0.66	96.35 ± 0.66a
T3	0.28	33.75	23.48	97.50	17.17	0.75	172.93	43.29 ± 1.69	28.90	31.72	17.79	121.69 ± 1.69	85.74 ± 1.69b

注:表中数据为平均值 ± 标准差 (n=3),不同字母表示差异达 5% 显著水平,下同。

表 3 稻-虾共作系统不同肥料管理下的磷平衡

(kg/hm²)

处理	P 输入					P 输出				P 平衡
	种子	饲料	灌溉	肥料	合计	谷物	虾	排水	合计	
T1	0.08	3.04	0.05	19.65	22.82	14.18 ± 0.40	1.89	1.43	17.50 ± 0.40	5.32 ± 0.40b
T2	0.08	3.04	0.05	24.56	27.73	14.51 ± 0.19	2.13	1.43	18.07 ± 0.19	9.66 ± 0.19a
T3	0.08	3.04	0.05	16.37	19.54	12.49 ± 0.49	2.70	1.43	16.62 ± 0.49	2.92 ± 0.49c

2.3 水稻产量、虾产量及综合效益分析

由表 4 可知,不同肥料管理下小龙虾的平均重量呈现:T1 (9.62) > T2 (6.99) > T3 (4.17) (g/只)。小龙虾产量呈现 T3 (1 220.01) > T2 (966.80) > T1 (851.70) (kg/hm²),其中,T1 和 T2 之间差异不显著,其水稻产量比 T3 (6 937 kg/hm²) 分别显著增加了 14% 和 16% ($P < 0.05$)。

表 4 水稻及虾产量 (2018-03-01 ~ 2019-03-01)

处理	单体虾重 (g/只)	水稻产量 (kg/hm ²)	小龙虾产量 (kg/hm ²)
T1	9.62	7 875 ± 221a	851.70b
T2	6.99	8 062 ± 105a	966.80b
T3	4.17	6 937 ± 271b	1 220.01a

由表 5 可知,不同肥料管理下稻虾支出情况呈现 T1 (8 249.3) > T3 (7 151.3) > T2 (7 128.8) (元/hm²),其中,饲料与肥料投入比重较大,占总支出的 38.8% ~ 47.5%;收入情况呈现 T3 (53 247.0) > T2 (48 351.0) > T1 (44 451.0) (元/hm²),主要以出售商品虾为主 (57.5% ~ 68.7%)。收益呈现 T3 (46 095.8) > T2 (41 222.3) > T1 (36 201.8) (元/hm²),成本利润率呈现 T3 (6.72) > T2 (6.03) > T1 (4.56)。

表 5 综合效益分析

(元/hm²)

		处理		
		T1	T2	T3
支出	整地	750.0	750.0	750.0
	种子	576.0	576.0	576.0
	化肥	1 120.5	900.0	900.0
	农药	574.5	574.5	574.5
	收割	750.0	750.0	750.0
	水电费	168.0	168.0	168.0
	人工	130.5	130.5	130.5
	虾苗	0.0	0.0	0.0
	饲料	1 781.3	1 781.3	1 781.3
	肥水	900.0	0.0	0.0
防逃网修补	75.0	75.0	75.0	
调水药	150.0	150.0	172.5	
田埂修缮	937.5	937.5	937.5	
水电费	336.0	336.0	336.0	
合计	8 249.3	7 128.8	7 151.3	
收入	商品虾	25 551.0	29 002.5	36 598.5
	水稻	18 900.0	19 348.5	16 648.5
	合计	44 451.0	48 351.0	53 247.0
利润		36 201.8	41 222.3	46 095.8
成本利润率		4.56	6.03	6.72

3 讨论与结论

3.1 不同施肥模式对养殖沟的水质影响

养殖沟施肥提高了水体氨氮浓度但未超过安全值(图 1a)。氨氮是甲壳类水产养殖中普遍存在的问题,也是影响生长、生存和生理机能的主要限制因素之一,施肥可以显著增加养殖水体氨氮^[21],因此要随时监控氨氮含量。水体中叶绿素 a 含量反映了水体中浮游植物生长的情况,吴阿娜等^[22]研究指出,水中叶绿素 a 浓度与磷素呈显著正相关。本研究中,养殖沟施入有机肥后随着磷的投入叶绿素 a 显著增加(图 1b),这与吴阿娜等^[22]的结果一致,同时也说明有机肥施用后提供的浮游生物能为小龙虾提供饵料。本研究中水体透明度在小龙虾生长的合适范围(图 1c)。养分投入通过影响水体中悬浮物增加或降低透明度,合理的养分投入可改善养殖水质^[23]。本研究表明,分次施用有机肥增加了虾单重的同时也一定程度提高了水体氨氮含量,为平衡两者,下一步还需要设计梯度试验以确定有机肥单次适宜用量。

3.2 不同施肥模式下稻-虾共作的氮磷平衡

稻-虾共作系统氮素残留量比例较大,在该系统中氮素输入除了肥料还有饲料,未被利用的氮磷均残留在土壤中(表 2)。有研究表明,长期稻-虾共作可以增加土壤全氮含量^[2],这与本试验氮残留的结果一致。在本试验中,排水输出氮量为 31.72 kg/hm²,约占稻-虾系统氮输入的 20%(表 2)。稻-虾共作模式下,由于小龙虾对水质要求较高,全年需要若干次换水,而大量营养元素的残留使得许多氮磷随水流入周边环境,增加了该模式农业面源污染的风险。本研究未考虑氮磷淋失量和 N₂O 排放量,前人研究表明稻田氮和磷的淋失分别仅为 2.57%^[24]和 0.86%^[25],淋失量所占比例较小;此外,稻-虾共作模式下在整个水稻生育期间 N₂O 排放量仅为 0.3 kg/hm²^[5]。

施用缓/控释肥最利于降低养殖风险并且氮磷平衡最佳,因此适宜做水稻基肥;养殖沟内,有机肥可以增加小龙虾的单重,但是这种肥水方式会增大水体氨氮浓度,提高小龙虾死亡率,因此存在一定风险,建议普通养殖户不宜采用,有条件的养殖公司可以通过水质监测来限制施用。

3.3 不同施肥模式对水稻产量、虾产量及经济效益的影响

缓/控释肥作为水稻基肥施用的水稻产量最高

(8 062.5 kg/hm²),其次是有机无机复混肥,腐植酸肥最低。前两者的产量与当地产量相当,而腐植酸肥产量低于当地水平^[2]。原因可能是前两者都能够缓慢释放养分与水稻的养分需求匹配;而腐植酸肥的养分释放快,与水稻养分需求的匹配差,最终其水稻产量低。有研究表明^[26-27],适量的有机肥代替无机肥可以改善土壤条件,提高水稻氮素利用率,所以,对于稻虾模式有机无机复混肥也具有一定潜力。小龙虾产量呈现 T3>T2>T1(表 4),T1 施用有机肥但产量最低。王金华^[28]研究发现有机养分投入不能提高小龙虾产量,这与本研究结果一致,其原因在于有机肥的施入提高了水体氨氮浓度,增大了小龙虾死亡的风险。此外,小龙虾产量也受到个体大小的影响,本研究发现,养殖沟施入有机肥(T1)小龙虾的平均个体较大,其次是不施肥(T2),菌剂处理(T3)最小,这可能与有机肥处理中叶绿素 a 显著增加有关。

稻虾作为一种有较高收益的生态种养模式,其投入相对水稻单作也比较高^[2]。本研究表明,稻虾共作投入以饲料与肥料为主,已达到总投入的 45%左右(表 5),大量的养分投入给稻虾系统带来巨大压力的同时,也增加了水质富营养化的风险。在收入方面,主要以商品虾为主(57.5%~68.7%),这是现阶段“重虾轻稻”现象出现的重要原因^[4]。本研究还发现,3 种不同施肥模式下,T3 的利润最高,已经达到 46 095.8 元/hm²,同时其效率也最高,成本利润率达到 6.72,这表明在同等投入下,T3 所代表的施肥模式经济效率最高,盈利能力最强。综上,尽管 T3 的水稻产量略低,但其有最佳的小龙虾产量、纯收益和成本-利润率,因此从经济效益上看,T3 比较具有优势。

参考文献:

- [1] 全国水产技术推广总站,中国水产学会.中国小龙虾产业发展报告(2018)[J].中国水产,2018,(7):20-27.
- [2] 但国涵,彭成林,徐祥玉,等.稻虾共作模式对淤渍稻田土壤理化性状的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(1):61-68.
- [3] 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):219-228.
- [4] 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.
- [5] 徐祥玉,张敏敏,彭成林,等.稻虾共作对秸秆还田后稻田温室气体排放的影响[J].中国生态农业学报,2017,25

- (11): 1591–1603.
- [6] Si G H, Peng C L, Yuan J F, 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): 569–578. DOI: 10. 1038/s41598-017-02984-7.
- [7] Oenema O, Witzke H P, Klimont Z, et al. Integrated assessment of promising measures to decrease nitrogen losses from agriculture in EU-27 [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2009, 133 (3): 280–288.
- [8] Beever D E, Doyle P T. Feed conversion efficiency as a key determinant of dairy herd performance: a review [J]. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 2007, 47 (6): 645.
- [9] 陈帅君, 边嘉宾, 丁得亮, 等. 不同有机肥处理对水稻品质和食味的影响 [J]. *中国稻米*, 2016, 22 (4): 42–45.
- [10] 中国水产养殖网, 2018. [2019-07-23]. http://www. shuichan. cc/news_view-375134. html.
- [11] 程建平, 文玲梅, 杨涛, 等. 增施微生物营养料对稻虾共作养殖水体水质及小龙虾产量的影响 [J]. *湖北农业科学*, 2018, 57 (23): 121–123.
- [12] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 (第4版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [13] 中国饲料数据库. 中国饲料成分及营养价值表 (2018年第29版) [J]. *中国饲料*, 2018, (21): 64–73.
- [14] 中国预防医学科学院营养与食品卫生研究所. 食物营养成分测定法 (第3版) [D]. 北京: 人民卫生出版社, 1954.
- [15] 田月明, 卢碧林, 郑林章. 江汉平原集约农区水体氮通量分析 [J]. *湖北农业科学*, 2013, 52 (19): 4611–4614, 4618.
- [16] Smil V. Nitrogen in crop production: An account of global flows [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, 13 (2): 647–662.
- [17] 李诗豪, 刘天奇, 马玉华, 等. 耕作方式与氮肥类型对稻田氨挥发、氮肥利用率和水稻产量的影响 [J]. *农业资源与环境学报*, 2018, 35 (5): 447–454.
- [18] 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, (4): 1326–1334.
- [19] 张帆, 隋鹏, 陈源泉, 等. “稻鸭共生”生态系统稻季 N、P 循环 [J]. *生态学报*, 2011, 31 (4): 1093–1100.
- [20] GB 11607-1989, 渔业水质标准 [S]. 1989.
- [21] 张勇, 马旭洲, 王昂. 施肥对幼蟹池塘养殖水质影响的初步探究 [J]. *上海海洋大学学报*, 2018, 27 (6): 884–893.
- [22] 吴阿娜, 朱梦杰, 汤琳, 等. 淀山湖蓝藻水华高发期叶绿素 a 动态及相关环境因子分析 [J]. *湖泊科学*, 2011, 23 (1): 67–72.
- [23] 张运林. 太湖水体生物—光学特性及其生态学意义 [D]. 北京: 中国科学院, 2005.
- [24] 纪雄辉, 郑圣先, 鲁艳红, 等. 控释氮肥对洞庭湖区双季稻田表面水氮素动态及其径流损失的影响 [J]. *应用生态学报*, 2007, 18 (7): 1432–1440.
- [25] 纪雄辉, 郑圣先, 石丽红, 等. 洞庭湖区不同稻田土壤及施肥对养分淋溶损失的影响 [J]. *土壤学报*, 2008, (4): 663–671.
- [26] 刘红江, 蒋华伟, 孙国峰, 等. 有机–无机肥不同配施比例对水稻氮素吸收利用率的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2017, (5): 61–66.
- [27] 陈贵, 赵国华, 张红梅, 等. 长期施用有机肥对水稻产量和氮磷养分利用效率的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2017, (1): 92–97.
- [28] 王金华. 稻虾系统中土壤氮素动态特征与转化规律研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.

Nitrogen-phosphorus balance and economic benefit of rice-crayfish culture under different fertilization patterns

ZHANG Ding-yue¹, YANG Ya-zhen^{1, 2}, LIU Kai-wen¹, ZHU Jian-qiang¹, HOU Jun^{1*} (1. Engineering Research Center of Ecology and Agricultural Use of Wetland, Ministry of Education, Yangtze University, Jingzhou Hubei 434025; 2. College of Life Science, Yangtze University, Jingzhou Hubei 434025)

Abstract: The integrated rice- crayfish farming has been developing rapidly, and the improvement of nutrient management is significant for nutrient balance and the improvement of fertilizer use efficiency. In this study, organic fertilization (T1, organic fertilization for breeding ditch + organic and inorganic fertilization for rice), steady fertilization (T2, no fertilizer for breeding ditch + slow/controlled released fertilizer for rice) and ecological farming (T3, no fertilizer but bacterial culture for breeding ditch + humic fertilization for rice) were set to study the system benefits and the nitrogen-phosphorus balance of the whole rice-crayfish system. The results showed that rice yield showed $T1 \approx T2 > T3$, while crayfish yield and total net income showed $T3 > T2 > T1$. From the view of water quality, T1 can significantly improve the food source of crayfish, and the average single weight of crayfish of T1 is 1.3 and 2.3 times of T2 and T3, respectively. From the perspective of economic efficiency, T3 has the highest profit of 46 098.5 yuan/hm², 19.7% higher than T1. The nitrogen balance of T1 is the best, and phosphorus balance of T3 is the best. In summary, T2 model should be advantageous for food security from the perspective of “grabbing grain in the land”, and the income should also be better. Organic fertilizer could improve the single weight of crayfish and microbial agents could increase crayfish yield. Massive organic fertilizer application has the potential risk to pollute waterbody and should be limited not to be excessive for each application.

Key words: rice-crayfish co-cultivation; nitrogen and phosphorus balance; economic benefit; nutrient use; water quality