

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.24273

江汉平原稻虾种养体系水稻施肥状况调查与分析

张欣蕊¹, 徐鸣爽^{2,3}, 张万洋¹, 马天桥¹, 齐振宏², 李小坤^{1,2*}

(1. 华中农业大学资源与环境学院 / 农业农村部长江中下游耕地保育重点实验室 / 华中农业大学微量元素研究中心, 湖北 武汉 430070; 2. 华中农业大学双水双绿研究院, 湖北 武汉 430070; 3. 华中农业大学生命科学技术学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 为明确湖北省江汉平原稻虾种养体系下水稻施肥的特征及其与常规水稻种植模式的差异, 为稻虾种养体系的施肥进行科学指导并为其推广和可持续发展提供理论依据。在湖北省江汉平原地区选取 9 个稻虾种养体系规模较大的县(市、区), 以两种水稻种植模式为研究对象, 实地调查两种模式下水稻施用肥料的类型、养分用量、施肥时期、施肥方式等信息。研究表明, 江汉平原稻虾种养体系水稻施用的主要肥料品种是复合肥和尿素; N、P₂O₅ 和 K₂O 平均用量分别为 164.8、74.3 和 89.6 kg/hm², 与常规水稻相比有降低的趋势, 但变异性较大; 施肥次数以两次为主(一次基肥、一次追肥), 占比为 81.7%; 施肥方式以人工施肥为主, 占比为 96.3%, 与常规水稻差异不大; 平均水稻产量为 7742.9 kg/hm², 较水稻单作模式降低了 932.7 kg/hm², 降幅为 10.8%; 稻虾种养体系氮、磷、钾肥料偏生产力分别为 52.42、127.73、102.53 kg/kg, 分别提高 17.24%、39.29%、9.54%, 两种模式均随着施肥量的增加, 肥料偏生产力呈现下降的趋势。建议进一步加强稻虾种养体系养分收支平衡方面研究, 为其可持续发展提供依据。

关键词: 江汉平原; 稻虾种养; 施肥现状; 调查研究

稻虾种养体系是一种将水稻种植与小龙虾养殖相结合的新型水稻生产模式, 于 2001 年起源于湖北省潜江市^[1], 被称为“现代农业发展的成功典范、现代农业的一次革命”^[2]。2023 年, 湖北省稻虾种养的面积和小龙虾产量均居全国首位, 分别为 48.70 万 hm² 和 98.2 万 t。江汉平原是主要采纳区域, 占湖北省稻虾种养体系种养面积的 77%, 也是稻虾种养体系的典型代表^[3]。在该模式下由于克氏原螯虾的引进使稻田系统养分循环变得复杂, 各类养分的输入、输出途径也发生了相应的变化^[4]。施肥作为水稻单作模式和稻虾种养体系共有的养分输入途径之一, 在两种模式中具有不一样的表现^[5-6]。在稻虾种养体系中, 施肥可以通过影响水稻和小龙虾的产量影响整个体系的养分平衡^[7]。张祥明等^[8]利用抽样调查的方法对皖南

山区水稻施肥现状调研发现, 该地区水稻施肥量变异性大, 施肥不足和施肥过量并存, 以及偏施氮肥且施用时期不合理等, 并针对这些问题研制专用肥且施肥效果较好; 彭显龙等^[9]对黑龙江地区水稻施肥状况进行了调研, 并结合土壤样品的测定对该区域内施肥状况进行了分析, 结果显示该地区的农户间施肥差异较大、盲目施肥状况明显, 水稻减肥潜力较大, 过量施肥现象突出。彭成林等^[10]采用抽样调查的方法对潜江市稻虾体系的施肥现状进行了研究, 结果表明稻虾共作模式水稻氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)的平均施用量分别为 135.5、59.5、68.5 kg/hm², 相对于基础年份分别减少 27.4%、34.2%、32.0%, 且随着稻虾种养年限的增加, 施肥量呈现逐年递减的趋势。前人对于施肥现状的调研大都着眼于水稻单作模式, 关于稻虾种养体系也有不同侧重的报道, 但是有关稻虾种养体系施肥现状的报道较少, 也未对稻虾种养体系和水稻单作模式进行对比分析。本研究通过调查明确稻虾种养体系施肥现状及其与常规水稻种植模式的差异, 对稻虾种养体系推广采纳、可持续发展和水稻科学施肥具有重要指导意义, 有助于促进我国农业绿色健康发展。

收稿日期: 2024-05-22; 录用日期: 2024-08-25

基金项目: 湖北洪山实验室重大项目(2121hsz002); 中央高校基本科研业务费专项(2662021ZH001)。

作者简介: 张欣蕊(1998-), 硕士研究生, 研究方向为施肥调查。
E-mail: zhangxinrui@webmail.hzau.edu.cn。

通讯作者: 李小坤, E-mail: lixiaokun@mail.hzau.edu.cn。

1 材料与方法

1.1 调查方法

调研于2021年7月在江汉平原地区进行,采用了分层抽样和固定样本量抽样相结合的方法。抽样过程如下:第一步在江汉平原选取9个稻虾种养体系规模较大的县(市、区),分别为洪湖市、监利县、石首市、江陵县、潜江市、仙桃市、公安县、沙市区和天门市;第二步在各县(市、区)抽取4个乡镇,选取原则是每个县(市、区)选取1个稻虾种养体系经典乡镇及其东南西北周围选取3个乡镇,则共有36个乡镇;第三步在各乡镇中随机抽取2个村庄,则共有72个村庄;每个村庄随机选取8个稻虾种养户和7个水稻单作户作为最终的调查对象,则共有1080个农户样本。

农户的选取原则:具备长期务农意愿且水稻种植面积 0.33 hm^2 以上。

1.2 调查内容

调查内容为水稻生长过程中的施肥情况,主要包括肥料的类型、养分含量、用量、施肥时期以及各个时期施肥量等。

1.3 数据分析及计算方法

样本有效率(%) = 有效样本数 / 总样本数 $\times 100$

化肥施用量按照折纯量进行计算,即氮、磷、钾肥以及复合肥分别按照N、 P_2O_5 、 K_2O 的百分含量进行计算后的用量。

肥料偏生产力是指单位投入的肥料所能生产的作物籽粒产量,单位为 kg/kg ^[11]。它是一个可以充分反映实际生产水平的重要指标,是当地土壤基础养分水平和肥料施用量的综合效应。国际农学界常用,原因是它不需要通过试验测定空白区产量和养分吸收量,简单明了、易于运用,尤其适合于用农户调研数据分析化肥效率。计算公式为:

$$PFF(\text{kg/kg}) = Y(\text{kg/hm}^2) / F(\text{kg/hm}^2)$$

式中, PFF 为肥料偏生产力; Y 为施肥后所获得产量; F 为化肥纯养分的投入量。

1.4 数据处理

本研究采用Excel 2007对数据进行整理分析,用Origin 2021绘制图表。

2 结果与分析

2.1 调查地点样本数及有效率

调研后获得问卷共计1079份。其中,前后信

息不一致以及重要信息缺失的样本有74份,实际有效样本数为1005份,样本的有效率为93.1%。

水稻单作模式样本有464份,其中洪湖63份,监利24份,石首60份,江陵63份,潜江13份,仙桃58份,公安32份,沙市区64份,天门87份;稻虾种养体系样本有671份,其中洪湖45份,监利84份,石首59份,江陵65份,潜江116份,仙桃81份,公安96份,沙市区73份,天门52份。由于部分调查对象同时采纳了两种水稻种植模式,故水稻单作模式样本数加上稻虾种养体系样本数大于总的样本数。

2.2 肥料类型

两种水稻种植模式施用的肥料品种如表1所示,农户在种植水稻的过程中使用的肥料品种主要有复合肥、尿素、碳酸氢铵、磷酸二铵、过磷酸钙和氯化钾等。与水稻单作模式相比,稻虾种养体系提高了复合肥的施用比例,降低了其余各种化肥的施用比例,其中降幅最高的为过磷酸钙,降幅达到了29.2%。

在两种模式中,水稻秸秆均直接还田,故水稻秸秆是两种模式中主要的有机肥;稻虾种养体系中,除专用虾饲料外在养虾的过程中还会投入黄豆、菜饼、麦麸等绿色饲料,这也是稻虾种养体系中使用的有机肥种类之一。

表1 两种水稻种植模式肥料类型

肥料品种	水稻单作(MR)		稻虾种养(CR)	
	样本数	占比(%)	样本数	占比(%)
复合肥	443	95.5	656	97.8
尿素	429	92.5	581	86.6
碳酸氢铵	32	6.9	22	3.3
磷酸二铵	7	1.5	1	0.1
过磷酸钙	140	30.2	7	1.0
氯化钾	52	11.2	65	9.7

2.3 施肥量

图1为江汉平原地区两种水稻种植模式的施肥量比较,由图中可知水稻单作模式平均施N量为 201.5 kg/hm^2 ,最高为 276 kg/hm^2 ,最低为 44.8 kg/hm^2 ;平均施 P_2O_5 量为 99.9 kg/hm^2 ,最高为 187.5 kg/hm^2 ,最低为 26.4 kg/hm^2 ;平均施 K_2O 量为 102.9 kg/hm^2 ,最高为 217.5 kg/hm^2 ,最低为 33.5 kg/hm^2 ;稻虾种养体系平均施N量为 164.8 kg/hm^2 ,

最高为 269.1 kg/hm², 最低为 0; 平均施 P₂O₅ 量为 74.3 kg/hm², 最高为 170.1 kg/hm², 最低为 0; 平均施 K₂O 量为 89.6 kg/hm², 最高为 204.0 kg/hm², 最低为 0。

两种模式的 N、P₂O₅、K₂O 施肥量均存在显著性差异, 无论是从平均施肥量、最高施肥量或是最低施肥量来看, 稻虾种养体系均低于水稻单作模式, 稻虾种养体系具有减施化肥的效果。与水稻单作模式相比, 稻虾种养体系的 N、P₂O₅ 和 K₂O 分别减施了 18.2%、25.6% 和 12.9%。

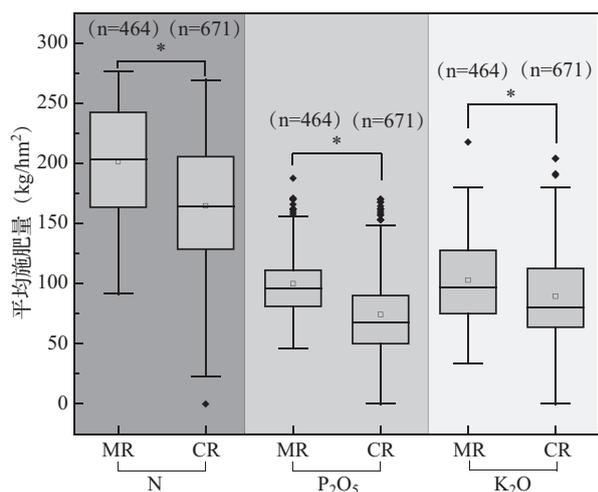


图 1 两种水稻种植模式养分施用量

注: MR、CR 分别表示水稻单作、稻虾种养; * 代表显著性差异 ($P < 0.05$)。

2.4 施肥时期和施肥次数

在水稻生长的过程中, 根据施肥时期和目的的不同, 可以将肥料分为基肥、分蘖肥、穗肥和粒肥。由表 2 可知, 两种模式的基肥中均以复合肥为主, 分蘖肥中均以尿素为主, 其次为复合肥, 穗肥以复合肥和钾肥为主, 稻虾种养体系不施用粒肥, 水稻单作模式中仅 7 户施用粒肥。与水稻单作模式相比, 稻虾种养体系增加了基肥中复合肥和穗肥中氯化钾的使用比例, 降低了其他各个时期各种肥料的使用比例。

由表 3 可知, 两种水稻模式在水稻生长的过程中均以施肥两次为主, 相较于水稻单作模式, 稻虾种养体系增加了施肥 2 次的占比, 增幅为 21.7%, 降低了施肥 1 次和 3 次的比例, 降幅分别为 19.2% 和 1.8%。两种模式中施肥频次有显著差异的是不施肥和施 4 次肥, 不施肥是稻虾种养体系中特有的现象, 占比为 1.5%, 施 4 次肥是水稻单作模式中特有的现象, 占比为 3.2%。

表 2 两种水稻种植模式施肥时期

施肥时间	肥料品种	水稻单作 (MR)		稻虾种养 (CR)	
		样本数	占比 (%)	样本数	占比 (%)
基肥	复合肥	440	94.8	637	94.9
	尿素	23	5.0	13	1.9
	过磷酸钙	4	0.9	5	0.7
	氯化钾	17	3.7	16	2.4
	其他	37	8.0	24	3.6
分蘖肥	复合肥	86	18.5	118	17.6
	尿素	403	86.9	574	85.5
	过磷酸钙	3	0.6	1	0.1
	氯化钾	18	3.9	16	2.4
	其他	3	0.6	0	0.0
穗肥	复合肥	24	5.2	32	4.8
	尿素	9	1.9	2	0.3
	过磷酸钙	1	0.2	1	0.1
	氯化钾	19	4.1	35	5.2
粒肥	复合肥	4	0.9	0	0.0
	氯化钾	3	0.6	0	0.0

表 3 两种水稻种植模式施肥次数

次数	水稻单作 (MR)		稻虾种养 (CR)	
	样本数	占比 (%)	样本数	占比 (%)
0	0	0.0	10	1.5
1	130	28.0	66	9.8
2	278	60.0	548	81.7
3	41	8.8	47	7.0
4	15	3.2	0	0.0
共计	464	100.0	671	100.0

2.5 施肥方式

水稻的施肥有人工施肥和机械施肥两种, 表 4 是江汉平原地区两种水稻种植模式的施肥方式对比, 两种模式均以人工施肥为主, 占比达到了 95% 以上, 除了人工施肥和机械施肥以外, 还有 2 个水稻单作农户, 4 个稻虾种养农户采用了两者结合的方式; 稻虾种养体系中有 10 个农户不施肥, 占比为 1.5%, 稻虾种养体系中特有的不施肥情况也会导致稻虾种养体系的平均施肥量较水稻单作模式降低。

表 4 两种水稻种植模式施肥方式

施肥方式	水稻单作 (MR)		稻虾种养 (CR)	
	样本数	占比 (%)	样本数	占比 (%)
人工施肥	458	98.7	646	96.3
机械施肥	4	0.9	11	1.6
人工施肥 + 机械施肥	2	0.4	4	0.6
不施肥	0	0.0	10	1.5
共计	464	100.0	671	100.0

2.6 基施比例

对两种水稻种植模式中肥料带来的养分按照基

肥和追肥进行区分并计算各自的基施比例。水稻单作模式 N、P₂O₅ 和 K₂O 的基施比例分别为 56.0%、90.4% 和 85.7%，稻虾种养体系 N、P₂O₅ 和 K₂O 的基施比例分别为 55.1%、86.8% 和 83.2%，均较水稻单作模式有所降低。在两种模式中，肥料均较多地作为基肥使用，P₂O₅ 和 K₂O 的基施比例均高于 80%，相较于 N，两种模式的 P₂O₅ 和 K₂O 更多地作为基肥使用，追肥较少。与水稻单作模式相比，稻虾种养体系中各种养分的基施比例均有所降低，追肥带来的养分比例较高，可以更好地平衡基肥和追肥中的养分，使得整个水稻的生长发育过程都能够得到充足、适合的养分。

表 5 水稻单作模式和稻虾种养体系化肥基施比例

肥料	水稻单作 (MR)			稻虾种养 (CR)		
	基施量 (kg/hm ²)	总施肥量 (kg/hm ²)	基施比例 (%)	基施量 (kg/hm ²)	总施肥量 (kg/hm ²)	基施比例 (%)
N	114.2	201.5	56.0	91.9	164.8	55.1
P ₂ O ₅	90.1	99.9	90.4	62.6	74.3	86.8
K ₂ O	87.9	102.9	85.7	72.3	89.6	83.2

2.7 水稻产量

江汉平原地区水稻单作模式的平均水稻产量为 8675.6 kg/hm²，稻虾种养体系的平均水稻产量为 7742.9 kg/hm²，较水稻单作模式降低了 932.7 kg/hm²，降幅为 10.8% (图 2)。两种模式的水稻产量存在显著性差异，水稻单作模式的水稻产量均在上下限内，而稻虾种养体系中有 3 个样本的水稻产量为异常值，说明相较于水稻单作模式，稻虾种养体系的水稻产量存在较大变异性。

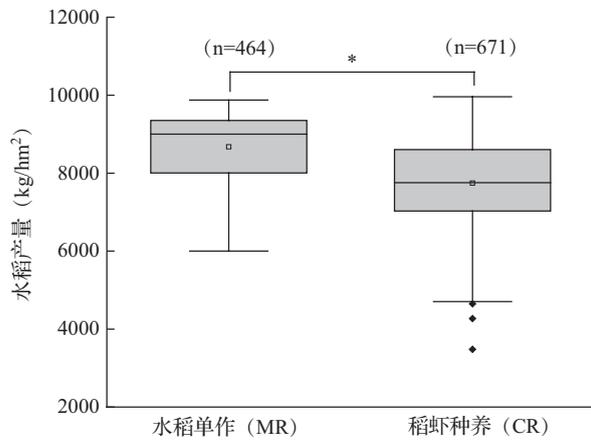


图 2 水稻单作模式和稻虾种养体系产量对比

注：* 代表显著性差异 (P<0.05)。

由图 3 知，稻虾种养体系的水稻产量较多分布在 7000 ~ 8500 kg/hm² 范围内，产量高于 8000 kg/hm² 水平的仅占 42.9%，其中高于 9000 kg/hm² 水平的仅为 16.6%，在水稻单作模式中有 82.1% 的产量高于 8000 kg/hm² 水平，其中有 58.1% 高于 9000 kg/hm² 水平。

2.8 肥料偏生产力

两种模式下肥料偏生产力如表 6 所示，水稻单作模式氮、磷、钾肥料偏生产力分别为 44.71、91.70、93.60 kg/kg，稻虾种养体系氮、磷、钾肥料偏生产力分别为 52.42、127.73、102.53 kg/kg。稻虾种养体系的氮、磷、钾肥料偏生产力及整体肥料偏生产力均大于水稻单作模式，分别提高 17.24%、39.29%、9.54% 及 16.87%。

图 4 为两种模式下肥料偏生产力的分布情况，可以看出，水稻单作模式的肥料偏生产力主要分布在 15 ~ 30 kg/kg 范围内，稻虾种养体系的肥料偏生产力主要分布在 15 ~ 40 kg/kg 范围内。图 5 为肥料施用量与肥料偏生产力的关系，两种模式均随着施肥量的增加，肥料偏生产力呈现下降的趋势。

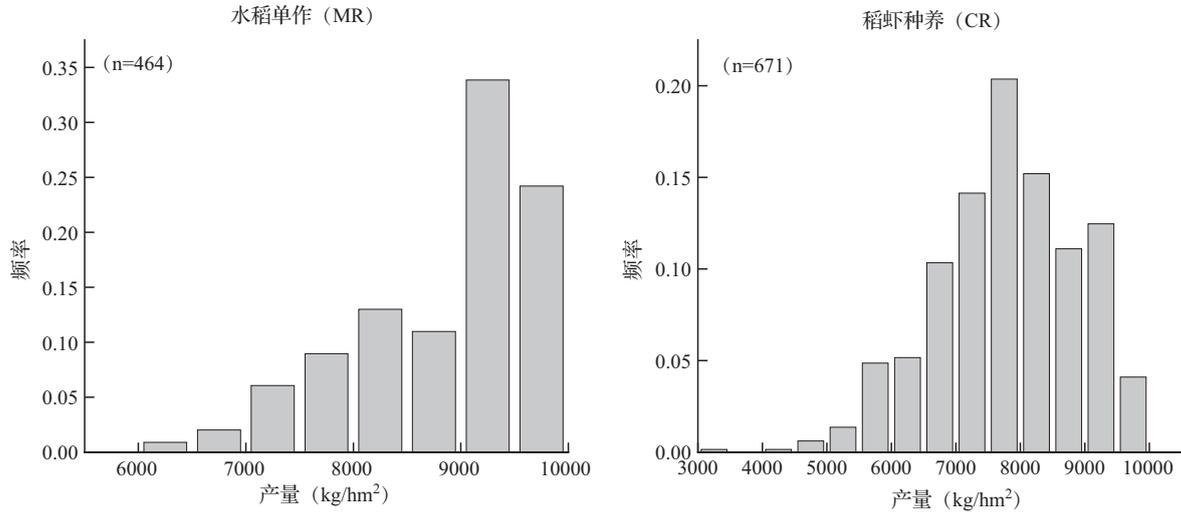


图3 水稻单作模式和稻虾种养体系产量分布

表6 水稻单作模式和稻虾种养体系氮、磷、钾平均偏生产力 (kg/kg)

肥料	水稻单作 (MR)	稻虾种养 (CR)
N	44.71	52.42
P ₂ O ₅	91.70	127.73
K ₂ O	93.60	102.53
整体	22.11	25.84

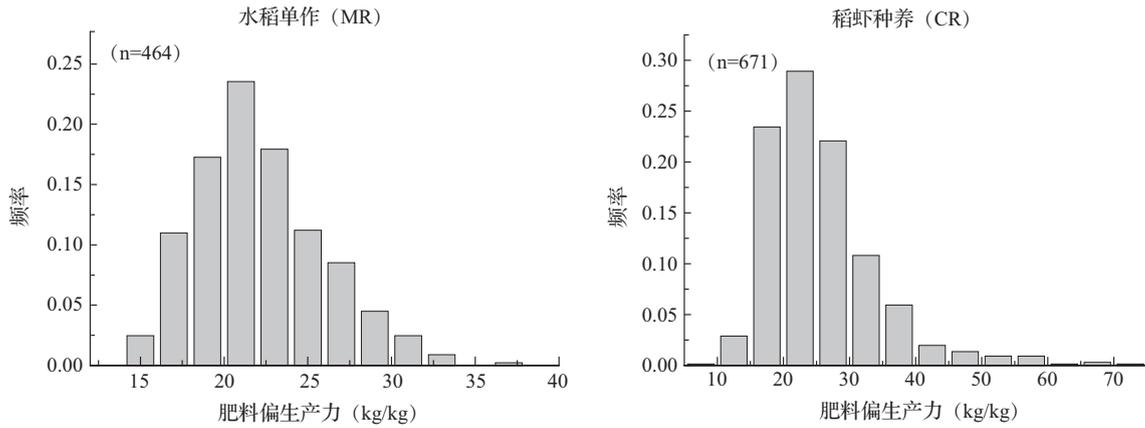


图4 水稻单作模式和稻虾种养体系肥料偏生产力分布

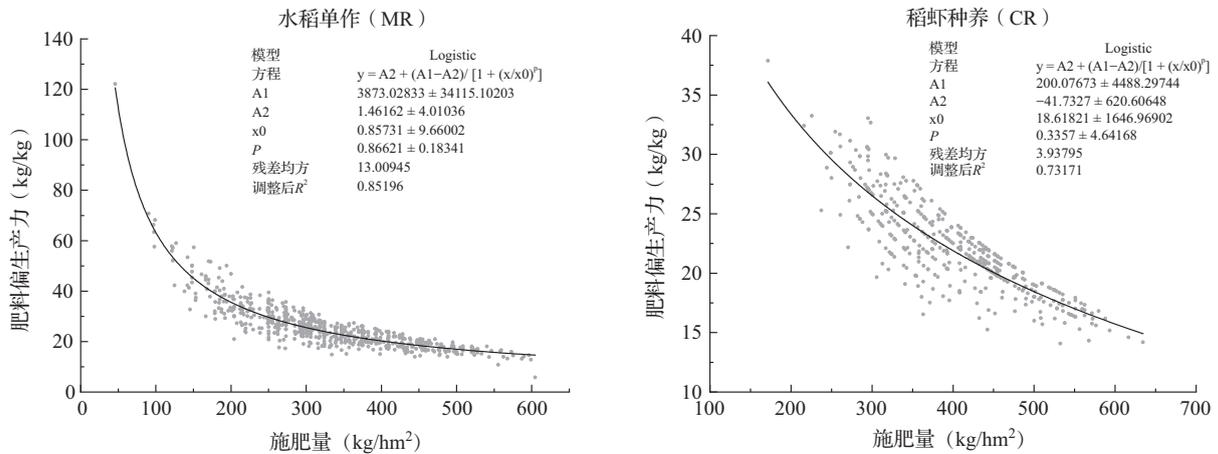
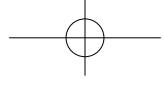


图5 水稻单作模式和稻虾种养体系施肥量与肥料偏生产力关系



3 讨论

3.1 肥料现状

在稻虾种养体系中施用肥料的品种和复合肥配方对于水稻的产量有一定的影响^[12]，本研究中江汉平原地区水稻单作和稻虾种养体系两种模式中施用的主要化肥类型均为复合肥、尿素、碳酸氢铵、磷酸二铵、过磷酸钙和氯化钾等；有机肥均为水稻秸秆。故两种模式中肥料品种无显著差异，究其原因是在稻虾种养体系中虽然因为增加克氏原螯虾，系统的养分循环较水稻单作模式发生变化^[13]，但小龙虾的养殖等措施能为系统提供的养分远远不足^[14]，两种模式中所需肥料品种差异不大。

有研究显示，在稻虾种养体系中，通过管理肥料中相对的养分含量，可以在不增加环境污染的情况下，提高小龙虾的产量^[15]。稻虾种养体系减少化肥施用的原因为肥料的化学物质容易造成小龙虾死亡，农户为了避免这种伤害造成经济上的损失，会有意识地减少化肥的使用^[6]。本研究显示稻虾种养体系减肥效果显著，其原因是在水稻单作体系中，氮、磷、钾收支平衡 = 输入（肥料 + 秧苗 + 灌水 + 雨水）- 输出（稻谷）- 循环（秸秆）- 损失（排水）；稻虾种养体系中，氮、磷、钾收支平衡 = 输入（饲料 + 虾苗 + 肥料 + 秧苗 + 灌水 + 水草 + 雨水）- 输出（成虾 + 稻谷）- 循环（秸秆 + 水草）- 损失（排水）^[16]。相较于水稻单作模式，稻虾种养模式中增加了饲料和虾苗的养分输入，水稻生长过程中产生的微生物及害虫为小龙虾提供了充足的饵料，小龙虾产生的排泄物又为水稻生长提供了良好的生物肥，形成了一种优势互补的生物链，使生态环境得到改善，实现生态增值。但在本研究中，对于小龙虾养殖过程中带入的养分及投放饲料的时期未能调查，在今后的研究中，建议增加此部分的调查，对分析稻虾种养模式的养分收支平衡和对农户进行指导施肥更具有实践意义。除此之外，江汉平原地区的有机肥施用较少甚至不施用，有研究阐明秸秆还田及畜禽有机肥施用条件下化肥可实现高效利用与减施，另外有机肥中所含有的各种微量元素也与化肥之间具有协同作用^[17-18]。因此，在稻虾种养体系推广过程中应当注意增加有机肥的施用，从而提高肥料利用率，增强稻虾种养体系的化肥减施效果。

本研究结果显示，相较于水稻单作模式，稻虾

种养体系的施肥次数较少，有显著差异的是稻虾种养体系中存在不施肥的情况和水稻单作模式中存在的施4次肥情况。造成这个现象的原因是稻虾种养体系中，养分的来源有多种途径，即使不施肥或者少施肥也可以为水稻的生长提供足够的养分，在这种情况下，农户会基于节约成本的考虑选择不施肥；而在水稻单作模式中，施肥是最主要的养分来源，若不能提供足够的养分，则会大幅降低水稻的产量，因此不存在不施肥的情况，甚至存在多次施肥的情况。

本研究中两种模式氮、磷、钾肥基肥施用比例均高于50%，而稻虾种养体系的基肥施用比例均较水稻单作模式有所降低，能够在水稻生长过程中提供更合理的营养，有利于水稻产量的提高。稻虾种养体系的氮的基追比例为5:5，磷、钾基追比例约为8:2，而水稻化肥的基追比例为5:5时，水稻的各项经济效益最高^[19]，因此应该增加施肥次数，降低磷、钾的基施比例，用科学施肥的方式保证稻虾种养体系的长久发展。

在江汉平原地区，人工施肥仍然为主要的施肥方式，机械施肥应用比例低，这会引发该地区的肥料利用率低等问题，因此在稻虾种养体系推广的过程中应当重视机械施肥的方式，提高机械施肥的应用比例^[20]。另外，在调研中发现农户在水稻生产投入的环节中经常以自己的经验为主导，易受到文化水平的局限，人工施肥虽然可以减少施肥过程的资金投入，但却极易导致肥料仅存在于稻田表面，不利于化肥作用的发挥，引发肥料利用率低和环境污染等一系列后果，这是农户由于自身限制普遍没有意识到的问题。

3.2 水稻产量

稻虾种养体系的水稻产量极值大于水稻单作模式的水稻产量极值，水稻产量的稳定性较水稻单作模式有所下降，可能的原因是部分农户的稻虾种养体系还未采取规范措施，抵抗自然灾害的能力较差，调研过程中许多农户表示2020年遭受对水稻影响较大的自然灾害，如洪涝等。有研究显示，合理的稻虾种养体系搭配科学的管理措施会使得水稻产量增加5%~7%^[20]，然而本研究结果中，稻虾种养体系的水稻产量较水稻单作模式有所降低，一部分原因是稻田周围虾沟比例过高，另一部分原因是在实际生产中，小龙虾经济效益较好，导致农户稻虾种养的重点为小龙虾，一味追求小龙虾产

量, 忽视了水稻的合理管控, 导致水稻产量较水稻单作模式低, 也就是常说的“重虾轻稻”现象出现^[21]。

相较于水稻单作模式, 稻虾种养体系下水稻氮、磷、钾肥偏生产力均有所提高, 这与前人研究结果一致。有研究表明, 稻虾共作模式获得氮素营养的途径不仅来自于氮肥的投入, 还有饲料和龙虾排泄物中的氮素^[22], 由于氮肥施用量的减少^[23], 相较于水稻单作模式, 稻虾种养体系下的氮素利用率更高。在同等施钾量条件下, 长期稻虾共作模式的水稻产量、钾肥偏生产力和钾肥利用率较水稻单作模式分别平均提高 14.1%、14.2% 和 5.6%^[24]。

整体上来看, 稻虾种养体系的施肥量、施肥次数、基施比例均低于水稻单作模式, 这与产量的结果是一致的。有研究表明, 减产机制主要包括以下几个方面: 一是水稻生育期肥料投入量减少, 二是长期淹水抑制水稻根系生长和水稻分蘖^[25], 三是水稻播种期的推迟增加抽穗期受高温影响的概率及缩短水稻全生育期^[26]。建议加强对农户稻虾田科学施肥方法和合理施肥量的指导; 从源头上遏制“重虾轻稻”, 提高水稻种植收益, 打造虾稻米品牌, 实现稻谷优质优价, 增加农户种植收益; 将水稻播期延迟对水稻总产量下降的影响控制在一定范围内, 需鼓励农户有计划地安排一定比例的稻虾田正常播种。

4 结论

江汉平原稻虾种养体系水稻施用的主要肥料品种是复合肥和尿素, N、P₂O₅ 和 K₂O 养分的平均施用量与水稻单作模式相比有降低的趋势, 降幅分别为 18.2%、25.6% 和 12.9%; 施肥次数和施肥方法与常规水稻相比差异不大; 肥料偏生产力高于水稻单作模式。建议进一步加强稻虾种养体系养分收支平衡方面研究, 为其可持续发展提供依据。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 陈松文, 江洋, 汪金平, 等. 湖北省稻虾模式发展现状与对策分析 [J]. 华中农业大学学报, 2020, 39 (2): 1-7.
- [3] Wei Y, Müller D, Sun Z, et al. Exploring the emergence and changing dynamics of a new integrated rice-crawfish farming

system in China [J]. Environmental Research Letters, 2023, 18 (6): 064040.

- [4] Zhang C, Mi W, Xu Y, et al. Long-term integrated rice-crayfish culture disrupts the microbial communities in paddy soil [J]. Aquaculture Reports, 2023, 29: 101515.
- [5] 赵考诚, 马军, 叶迎, 等. 稻虾生态种养综合效应研究进展 [J]. 作物杂志, 2021 (2): 22-27.
- [6] 杨彩艳, 齐振宏, 黄炜虹, 等. “稻虾共养”生态农业模式的化肥减量效应研究——基于倾向得分匹配 (PSM) 的估计 [J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29 (3): 758-766.
- [7] Si G H, Peng C L, Xu X Y, et al. Effect of integrated rice-crayfish farming system on soil physico-chemical properties in waterlogged paddy soils [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25 (1): 61-68.
- [8] 张祥明, 王文军. 皖南山区冷浸田水稻养分管理现状、问题与对策 [J]. 农学学报, 2016, 6 (4): 1-6.
- [9] 彭显龙, 王伟, 周娜, 等. 基于农户施肥和土壤肥力的黑龙江水稻减肥潜力分析 [J]. 中国农业科学, 2019, 52 (12): 2092-2100.
- [10] 彭成林, 袁家富, 马朝红, 等. 湖北省稻虾共作典型区域水稻施肥现状评价 [J]. 湖北农业科学, 2021, 60 (7): 30-33.
- [11] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径 [J]. 土壤学报, 2008, 45 (5): 915-924.
- [12] 黄锦. 不同施肥模式下稻-克氏原螯虾养殖田块水体、土壤和肠道微生物的研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2019.
- [13] Wang A, Hao X, Chen W, et al. Rice-crayfish co-culture increases microbial necromass' contribution to the soil nitrogen pool [J]. Environmental Research, 2023, 216: 114708.
- [14] 张丁月, 杨亚珍, 刘凯文, 等. 不同施肥模式下稻-虾共作的氮磷平衡及效益分析 [J]. 中国土壤与肥料, 2020 (4): 124-129.
- [15] Kabir M J, Cramb R, Alauddin M, et al. Farming adaptation to environmental change in coastal Bangladesh: shrimp culture versus crop diversification [J]. Environment, Development and Sustainability, 2016, 18: 1195-1216.
- [16] 梁宇辉. “双水双绿”稻虾种养模式水质变化和养分收支研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
- [17] 王岩, 韩苗, 熊子怡, 等. 丛枝菌根真菌对玉米锌、磷拮抗作用的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24 (1): 279-284.
- [18] 谭亦杭, 沈健林, 蒋炳伸, 等. 秸秆还田与水分管理对双季水稻氮素吸收及氮肥利用率的影响 [J]. 农业现代化研究, 2018, 39 (3): 511-519.
- [19] 何杰. 不同基、追肥比例对水稻重金属吸收及产量的影响 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2016.
- [20] Hou J, Wang X L, Xu Q, et al. Rice-crayfish systems are not a panacea for sustaining cleaner food production [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28:



- 22913-22926.
- [21] 赵考诚, 马军, 叶迎, 等. 稻虾生态种养综合效应研究进展 [J]. 作物杂志, 2021 (2): 22-27.
- [22] 余振渊. 施氮量对稻虾共作水稻产量与品质影响的生理机制研究 [D]. 武汉: 长江大学, 2023.
- [23] 吴窈艳. 稻虾共作对酸性土壤肥力效应及稻米品质的影响 [D]. 海口: 海南大学, 2023.
- [24] 彭成林, 袁家富, 倡国涵, 等. 长期稻虾共作模式下稻田钾素平衡状况及合理施钾量研究 [J]. 中国土壤与肥料, 2021 (4): 135-141.
- [25] 姚义, 唐建鹏, 陈京都, 等. 稻虾共作与栽插密度对优良食味粳稻物质生产及其产量的影响 [J]. 扬州大学学报 (农业与生命科学版), 2021, 42 (1): 98-104.
- [26] 张明伟, 陈京都, 唐建鹏, 等. 稻虾共作对不同优质食味水稻品种产量及品质的影响 [J]. 江苏农业科学, 2022, 50 (12): 59-63.

Investigation and analysis of the fertilization status of rice-shrimp culture system in Jiangnan Plain

ZHANG Xin-rui¹, XU Ming-shuang^{2, 3}, ZHANG Wan-yang¹, MA Tian-qiao¹, QI Zhen-hong², LI Xiao-kun^{1, 2*}

[1. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University/Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of the Yangtze River), Ministry of Agriculture and Rural Affairs/ Microelement Research Center, Huazhong Agricultural University, Wuhan Hubei 430070; 2. Shuangshui Shuanglv Institute, Huazhong Agricultural University, Wuhan Hubei 430070; 3. College of Life Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan Hubei 430070]

Abstract: This research was aimed to clarify the characteristics of rice fertilization under the rice-shrimp culture system in the Jiangnan Plain of Hubei province and the differences between it and the conventional rice planting mode, to provide scientific guidance for the fertilization of the rice-shrimp culture system and to provide a theoretical basis for its promotion and sustainable development. Nine counties (cities and districts) with large-scale rice-shrimp culture systems were selected in the Jiangnan Plain region of Hubei province, and two rice planting modes were used as research objects to investigate the types of fertilizers applied to rice under the two modes, the amount of nutrients, the period of fertilizer application, the fertilization method, and other information in the field. The results of the study showed that the main fertilizer varieties applied to rice in the rice-shrimp culture system in the Jiangnan Plain were compound fertilizer and urea; the average amounts of N, P₂O₅ and K₂O were 164.8, 74.3 and 89.6 kg/hm², respectively, which tended to be lower compared with that of conventional rice, but the variability was greater; the number of fertilizer applications was dominated by two times (one basal fertilizer and one supplementary fertilizer), accounting for 81.7%, and the fertilization method was mainly artificial fertilization, accounting for 96.3%, which was not significantly different from conventional rice. The average rice yield was 7742.9 kg/hm², which was 932.7 kg/hm² lower than that of the rice monoculture mode, with a decrease of 10.8%. The productivity of nitrogen, phosphorus, potassium fertilizers in the rice-shrimp culture system was 52.42, 127.73, 102.53 kg/kg, respectively, increased by 17.24%, 39.29%, 9.54% compared with conventional rice. With the increase of fertilizer application, fertilizer bias productivity showed a decreasing trend in both models. It was recommended to further strengthen the research on nutrient balance in rice-shrimp aquaculture system to provide a basis for its sustainable development.

Key words: Jiangnan Plain; rice and shrimp cultivation; fertilization status; investigation and study