

◆生态环境◆

稻鱼共作下不同有机肥对水稻养分吸收利用效率的影响^{*}

邓少虹¹, 温远光¹, 孙冬婧¹, 王 磊², 温 俊³, 陈秋海¹, 高 惠¹, 黄勇杰¹, 许峻模¹, 廖经球¹,
周晓果^{1*}

(1. 广西科学院生态环境研究所, 森林保护修复与生态利用实验室, 广西南宁 530007; 2. 广西大学林学院, 广西森林生态与保育重点实验室, 广西南宁 530004; 3. 广西科学院生态产业研究院, 广西南宁 530007)

摘要: 研究有机肥替代化学氮肥对稻鱼共作下水稻产量、养分吸收利用及土壤养分的影响, 可为稻田化肥减量增效提供依据。田间试验设置常规水稻单作配施化肥(CK)、稻鱼共作配施化肥(CF)、稻鱼共作配施有机肥(OF)、稻鱼共作配施复合微生物肥(MF) 4个处理, 分析了相同施氮量下不同有机肥处理稻鱼共作水稻产量、干物质量、养分吸收与利用效率以及土壤性质的差异。结果表明: (1) 与CK相比, CF和OF处理的水稻籽粒产量分别减少2.53%和0.16%, MF处理增加11.23%, 处理间差异不显著($P \geq 0.05$); 稻鱼共作下水稻氮收获指数显著提高, 同时, 水稻磷素和钾素的偏生产力、籽粒生产效率、干物质生产效率和收获指数均有不同程度提高, 以MF处理的提升效果最好。(2) 稻鱼共作下不同有机肥处理的水稻籽粒养分含量存在显著差异($P < 0.05$), 氮、钾含量均为MF>OF, 磷含量则相反。(3) 不同处理间土壤pH值、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾含量均无显著差异($P \geq 0.05$)。综上, 稻鱼共作模式下以有机肥或复合微生物肥全量替代化学氮肥均能稳定水稻产量、维持土壤肥力、提高肥料利用效率。

关键词: 有机肥; 稻鱼共作; 土壤养分; 籽粒产量; 养分吸收利用

中图分类号: S511 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2023)03-0524-08

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20230710.011

氮素是作物生产中需求量最大的矿质元素, 施用氮肥是水稻稳产高产的必要措施。我国水稻氮肥用量占世界水稻氮肥用量的30%以上, 氮肥利用率却只有30%–35%^[1]。氮肥利用率低和大量的氮损失直接和间接导致地下水污染、水体富营养化等环境问

题^[2]。如何在增加甚至减少化肥用量的同时, 实现作物稳产或增产、减少环境污染已成为现代农业面临的重大难题。有机肥替代化肥是化肥减量增效的重要技术, 有助于提高作物氮肥利用率, 保持作物稳产增产和培肥地力, 还可实现有机资源的高效循环利用。

收稿日期: 2023-05-04

修回日期: 2023-06-13

^{*} 广西科技基地和人才专项(桂科AD23026144), 国家自然科学基金项目(32160358)资助。

【第一作者简介】

邓少虹(1989–), 女, 博士, 农艺师, 主要从事土壤生态与农业环境研究, E-mail: Shaohongdeng@163.com。

【**通信作者】

周晓果(1980–), 女, 博士, 研究员, 主要从事恢复生态学研究, E-mail: xgzhou2014@126.com。

【引用本文】

邓少虹, 温远光, 孙冬婧, 等. 稻鱼共作下不同有机肥对水稻养分吸收利用效率的影响[J]. 广西科学, 2023, 30(3): 524-531.

DENG S H, WEN Y G, SUN D J, et al. Effects of Different Organic Fertilizers on Nutrient Uptake and Utilization Efficiency of Rice under Rice-fish Co-culture [J]. Guangxi Sciences, 2023, 30(3): 524-531.

用^[3]。稻鱼共作模式作为我国优秀的传统农业生产方式,具有生物除虫、除草以及增肥促长等多种功能,可在一定程度上代替和减少化肥及农药的使用量^[4,5]。目前,全国稻田养鱼/稻渔综合种养面积约 $2.53 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[6]。近年来,稻鱼共作模式作为特色农业产业在广西迅速发展,仅三江侗族自治县和全州县两地面积就达到 $2.5 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ^[7]。在此背景下,将有机肥替代化肥技术与稻鱼共作模式复合,进一步提高稻田肥料利用效率,对于保障国家粮食安全、生态安全具有重要作用。研究表明,水稻产量、养分利用与有机肥种类、配施比例有着重要关系^[3]。与单施化肥相比,相同氮、磷、钾用量下猪粪堆肥、菜粕堆肥和中药渣堆肥与化肥配施处理的水稻籽粒产量分别增加7.7%、8.8%和19.3%,氮素的积累量和农学利用效率均显著提高^[8];等氮投入下,稻秆、紫云英联合还田与化肥不同比例(20%、40%、60%、80%与100%)配施水稻产量不同程度提高,植株地上部氮、磷、钾养分吸收量增幅分别为2.4%–15.4%、2.6%–17.4%、2.0%–22.3%^[9]。Meta分析结果表明,在氮肥有机替代比例不超过30%的情况下,水稻籽粒的含氮量能显著提高^[10]。综上,稻田中有机肥替代化肥虽然已有大量研究,但主要是针对水稻单作模式进行^[3]。稻鱼共作模式下有一定的水体面积和较长的淹水期^[11],其土壤养分循环和供应与单作模式存在较大差异^[5,12],稻鱼共作下不同有机肥对水稻产量、养分吸收及土壤养分的影响尚不清晰。因此,本研究通过田间试验,选择有机肥和复合微生物肥这2类农田常用肥料为供试材料,以常规水稻单作配施化肥模式为对照,设置稻鱼共作配施化肥、稻鱼共作分别配施2种不同有机肥为处理,在施用等量氮肥条件下,探讨不同有机肥全量替代化学氮肥对稻鱼共作下水稻产量、养分吸收利用效率及土壤养分的影响,为稻鱼共作模式下肥料的合理利用以及稻田进一步减量增效提供参考依据。

1 材料与方 法

1.1 材料

田间试验于广西壮族自治区南宁市上林县大丰镇三联村(108°34′41″E,23°27′22″N)进行。试验地所在区域属亚热带季风气候,年平均气温20.9℃,平均降水量1714.8mm。土壤类型为红壤。试验地2017年实施早改水项目,早稻收割时秸秆经收割机粉碎直接还田。水稻移栽前0–20cm土壤pH值为

6.04,有机质含量为 $16.17 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮含量为 $1.09 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷含量为 $0.71 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全钾含量为 $6.53 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮含量为 $96.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷含量为 $15.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量为 $34.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。供试水稻品种为当地普遍种植的百香139。供试化肥为含氮46.2%的中颗粒尿素和15-15-15硫酸钾型复合肥,分别由四川美青化工有限公司和金正大生态工程集团股份有限公司生产;有机肥(有机质含量 $\geq 20\%$,折合N为12%、 P_2O_5 为5%、 K_2O 为10%)由元和生物科技(德州)有限公司生产,主料为植物秸秆;复合微生物肥(有效活菌数 $\geq 2 \times 10^7$ 个/g,有机质含量 $\geq 20\%$,折合N为13%、 P_2O_5 为4%、 K_2O 为8%)由南宁市绿之恋生物科技有限公司生产,主料为酒精渣、食用菌渣、滤泥和糖蜜。

1.2 方法

1.2.1 试验设计

田间试验于2022年7–11月开展,设置4个处理(水稻单作配施化肥,CK;稻鱼共作配施化肥,CF;稻鱼共作配施有机肥,OF;稻鱼共作配施复合微生物肥,MF),每个处理3次重复,共12个试验小区,完全随机排列。小区长20m,宽3m,在靠近田间小路一端设置鱼沟(长 \times 宽 \times 深为 $2 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$)。重复之间以覆盖隔水薄膜的田埂相隔,田埂宽0.3m,高0.2m。每个小区均有独立的进水口(靠鱼沟端)和出水口,以保证每个重复小区的水环境一致且相互独立(CK处理挖相同鱼沟,但不投放鱼苗)。

肥料按照当地经验复合肥用量和比例进行施用,N、 P_2O_5 和 K_2O 每667 m^2 用量分别为10.4、8.1和8.1kg,其中尿素提供的N为2.3kg;有机肥用量折合纯量N、 P_2O_5 和 K_2O 分别为10.4、4.3和8.7kg,复合微生物肥用量折合纯量N、 P_2O_5 和 K_2O 分别为10.4、3.2和6.4kg。以氮肥为基准,基肥(插秧前)、分蘖肥(约插秧后7d)和穗肥(约插秧28–30d晒田回水后)的施用比例分别为50%、20%和30%。稻鱼共作处理在施用穗肥回水至少3d后(9月3日)放鱼入田,选用上林县当地广泛养殖的塘角鱼(*Clarias fuscus*)品种;参照当地养殖经验,投放鱼苗大小为120–140尾/kg,密度为 1×10^4 尾/667 m^2 ;不投放鱼饵料。除水稻种子消毒拌种、育秧场地清洁进行病原虫卵消除措施外,试验田不进行病虫害防治。其余水稻管理措施同当地。11月9日水稻收割,同日收获田鱼。

1.2.2 测定指标与计算方法

在水稻成熟期采用人工收割法进行测产。每个小区选取3个1 m×1 m样方,每个样方收割全部植株,然后脱粒,收集籽粒和秸秆分别称重。脱下来的籽粒混匀后取部分于尼龙网袋,称重后,风干至恒重,计算含水量,折算籽粒产量。脱粒后的秸秆混合均匀后取部分置于牛皮纸信封,称重;然后将秸秆样品在105℃杀青30 min后,置于65℃烘箱中烘干至恒重后称重,计算含水量,折算秸秆干物质质量。单位面积的籽粒产量与秸秆干物质质量之和为干物质总量。风干后的籽粒随机筛选1 000粒,称重,每份样品平行测试2次取均值。

干燥后的籽粒和秸秆样品分别用植物粉碎机粉碎后过60目筛,测定氮、磷、钾含量。样品使用硫酸-过氧化氢进行消煮,植物全氮含量采用靛酚蓝比色法测定,植物全磷含量采用钒钼黄比色法测定,植物全钾含量采用火焰光度计法测定,并分别计算植株籽粒和秸秆中氮、磷、钾的吸收量。植株养分吸收利用效率的计算如下^[13]:

植株吸氮(磷、钾)量 = 氮(磷、钾)含量 × 干物质质量;

氮(磷、钾)素籽粒生产效率 = 籽粒产量/植株吸氮(磷、钾)总量;

氮(磷、钾)素干物质生产效率 = 单位面积干物质质量/植株吸氮(磷、钾)总量;

氮(磷、钾)素收获指数 = 籽粒中氮(磷、钾)吸收量/地上部氮(磷、钾)总吸收量;

氮(磷、钾)素偏生产力 = 施氮(磷、钾)区籽粒产量/施氮(磷、钾)量。

水稻收割当日采集0-20 cm深度土壤,每个小区均按照“S”形采取5个点作为1个混合样品。土壤样品自然风干后粉碎过筛,根据常规农化分析方法测

定各养分含量^[14]。土壤pH值测定采用电位法,土水比为1:2.5;有机质采用重铬酸钾氧化-外加热法;全氮经硫酸-加速剂消解后采用凯氏定氮法;速效氮采用碱解扩散法;全磷经高氯酸-氢氟酸消解后采用钼蓝比色法;有效磷经氟化铵-盐酸溶液浸提后采用钼锑抗比色法;全钾经氢氧化钠熔融后采用火焰光度计法;速效钾用乙酸铵浸提-火焰光度计法。

1.2.3 数据分析

采用单因素方差分析(one-way ANOVA)比较不同处理间水稻产量、干物质质量、养分利用效率和土壤理化指标的差异,多重比较采用Duncan法;采用配对t检验比较籽粒和秸秆养分含量、吸收量的差异;显著性水平均为 $\alpha = 0.05$ 。数据分析和绘图使用SPSS 26.0和OriginLab 2021进行。

2 结果与分析

2.1 稻鱼共作下不同有机肥对水稻产量和干物质质量的影响

稻鱼共作配施化肥或以有机肥全量替代化学氮肥对水稻产量无显著影响(表1)。与水稻单作配施化肥处理(CK)相比,稻鱼共作配施化肥或有机肥处理下水稻千粒重有增加的趋势;稻鱼共作配施化肥(CF)、配施有机肥(OF)处理籽粒产量分别减少2.53%和0.16%,稻鱼共作配施复合微生物肥处理(MF)的籽粒产量增加11.23%;CF、OF和MF处理秸秆干物质质量分别降低8.33%、0.18%和0.36%;CF、OF处理干物质总量分别降低5.32%和0.17%,MF处理增加5.74%。与CF相比,OF和MF处理的千粒重、籽粒产量、秸秆干物质质量、干物质总量呈不同程度增加。MF处理籽粒产量和干物质总量比OF处理分别增加11.41%和5.92%。

Table 1 Effects of different fertilizers on rice yield and dry matter weight under rice-fish coculture

处理 Treatment	千粒重/g 1 000 grain weight/g	籽粒产量/ (t·hm ⁻²) Grain yield/ (t·hm ⁻²)	秸秆干物质质量/ (t·hm ⁻²) Straw dry matter weight/(t·hm ⁻²)	干物质总量/ (t·hm ⁻²) Total dry matter weight/(t·hm ⁻²)
CK	11.57 ± 1.81a	6.32 ± 1.94a	5.52 ± 2.41a	11.84 ± 2.81a
CF	11.58 ± 1.00a	6.16 ± 1.00a	5.06 ± 0.85a	11.21 ± 1.69a
OF	11.92 ± 0.96a	6.31 ± 1.03a	5.51 ± 0.70a	11.82 ± 1.35a
MF	11.75 ± 1.32a	7.03 ± 1.03a	5.50 ± 1.07a	12.52 ± 1.76a

Note: CK indicates single-cropping rice combined with chemical fertilizer, CF indicates rice-fish co-culture combined with chemical fertilizer, OF indicates rice-fish co-culture combined with organic fertilizer, MF indicates rice-fish co-culture combined with microbial fertilizer. The grain yield, straw dry matter weight and total dry matter weight are calculated from the data of each plot. Different letters denote significant differences between means ($P < 0.05$).

2.2 稻鱼共作下不同有机肥对水稻养分吸收利用的影响

稻鱼共作配施化肥或不同有机肥处理的水稻籽粒和秸秆的氮、磷、钾含量及其对应的吸收量存在显著差异(表2)。与CK相比,稻鱼共作下籽粒氮含量和氮吸收量有不同程度提高,秸秆氮含量和氮吸收量有不同程度降低,氮吸收总量以MF处理显著高于OF处理($P < 0.05$);配施化肥条件下籽粒和秸秆的氮含量差异不显著,在配施有机肥条件下差异达显著水平($P < 0.05$)。与CK相比,OF处理的籽粒磷含量差异不显著,但磷吸收量有降低趋势;CF和MF处理下籽粒磷含量显著降低($P < 0.05$),但磷吸收量以CF处理差异显著,MF处理差异不显著。稻鱼共作下配施化肥或不同有机肥处理的秸秆磷含量和磷吸收量均较低,磷吸收总量不同处理间差异不显著;同一处理中籽粒磷含量和磷吸收量均显著高于秸秆。与CK相比,MF处理籽粒钾含量和钾吸收量显著提高($P < 0.05$);秸秆钾含量和钾吸收量有不同程度降低,但差异未达到显著水平;钾吸收总量不同处理间差异不显著;同一处理中籽粒钾含量和钾吸收量均显著低于秸秆($P < 0.05$)。MF处理的养分含量及其对应的吸收量均高于OF处理。

对氮素而言,偏生产力、籽粒生产效率、干物质生

产效率在不同处理间的差异不显著(表3)。与CK相比,稻鱼共作下氮素收获指数显著提高($P < 0.05$)。对磷素而言,稻鱼共作配施有机肥(OF、MF)处理的偏生产力、籽粒生产效率、干物质生产效率、收获指数均比CK高;与CK相比,CF处理的偏生产力、收获指数差异不显著,籽粒生产效率和干物质生产效率较高($P < 0.05$)。对钾素而言,总体上稻鱼共作配施化肥或不同有机肥处理的籽粒生产效率、干物质生产效率和收获指数均有不同程度提高,其中MF处理的偏生产力、籽粒生产效率和收获指数与CK处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.3 稻鱼共作下不同有机肥对土壤养分的影响

稻鱼共作配施化肥或以有机肥全量替代化学氮肥对土壤养分无显著影响(图1)。4种处理土壤pH均值为5.33-5.42,有机质含量均值为16.97-19.20 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮含量均值为1.06-1.15 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮含量均值为124.37-139.73 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,无显著差异($P \geq 0.05$)。与CK相比,稻鱼共作配施有机肥处理(OF)下全磷和有效磷含量分别降低19.95%和31.82%;稻鱼共作配施化肥或有机肥处理下土壤全钾含量有增加趋势,速效钾含量有降低趋势,但差异均未达到显著水平。

表2 稻鱼共作下不同肥料处理的水稻养分吸收状况

Table 2 Effects of different fertilizers on the nutrient concentrations and accumulations in rice grain or straw under rice-fish coculture

养分 Nutrient	处理 Treatment	养分含量/% Nutrient content/%		养分吸收量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Nutrient absorption/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)		
		籽粒 Grain	秸秆 Straw	籽粒 Grain	秸秆 Straw	总量 Total
N	CK	1.42 ± 0.14a	1.50 ± 1.94a	89.79 ± 8.74b *	82.60 ± 18.67b	172.38 ± 20.98ab
	CF	1.56 ± 0.16ab	1.44 ± 1.00a	96.20 ± 9.94ab *	72.81 ± 12.14ab	169.01 ± 21.03ab
	OF	1.59 ± 0.06bc *	1.10 ± 1.03a	100.00 ± 3.944a *	60.75 ± 5.97a	160.75 ± 8.78a
	MF	1.72 ± 0.19c *	1.21 ± 1.03a	120.96 ± 13.58a *	60.75 ± 7.42a	187.53 ± 19.89b
P	CK	0.24 ± 0.01b *	0.14 ± 0.02b	15.36 ± 0.78b *	7.60 ± 1.94b	22.96 ± 1.30a
	CF	0.22 ± 0.01a *	0.13 ± 0.01ab	13.37 ± 0.83a *	6.63 ± 1.00a	20.00 ± 0.71a
	OF	0.24 ± 0.02b *	0.12 ± 0.01a	15.31 ± 1.03b *	6.64 ± 1.03a	21.94 ± 1.14a
	MF	0.22 ± 0.02a *	0.12 ± 0.01a	15.57 ± 1.10b *	6.81 ± 1.03a	22.37 ± 1.42a
K	CK	0.44 ± 0.03a	2.11 ± 0.23a *	28.04 ± 1.60a	116.35 ± 12.82b *	144.39 ± 14.06a
	CF	0.44 ± 0.03a	2.01 ± 0.21a *	27.25 ± 1.70a	101.57 ± 10.61a *	128.83 ± 11.49a
	OF	0.45 ± 0.05a	1.97 ± 0.13a *	28.13 ± 2.92a	108.51 ± 7.00ab *	136.64 ± 7.33a
	MF	0.50 ± 0.04b	2.06 ± 0.08a *	35.26 ± 2.76b	113.49 ± 4.21b *	148.73 ± 6.33a

Note: N, P and K respectively indicate nitrogen, phosphorus, and potassium. Different letters denote significant differences between means. * indicates significant differences between grain and straw ($P < 0.05$).

表3 稻鱼共作下不同肥料处理的水稻养分利用效率

Table 3 Nutrient utilization efficiency of rice under different fertilizer treatments under rice-fish coculture

养分 Nutrient	处理 Treatment	偏生产力/ ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) Partial factor productivity/ ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	籽粒生产效率/ ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) Efficiency of grain production/ ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	干物质生产效率/ ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) Efficiency of biomass production/ ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	收获指数/% Harvest index/%
N	CK	40.50 ± 12.45a	37.09 ± 4.09a	69.51 ± 7.67a	52.46 ± 5.24a
	CF	39.48 ± 1.50a	36.90 ± 4.26a	67.20 ± 7.75a	57.07 ± 2.43b
	OF	40.42 ± 2.15a	39.34 ± 2.11a	73.71 ± 3.96a	62.28 ± 1.89c
	MF	45.05 ± 1.13a	37.86 ± 4.10a	67.47 ± 7.31a	64.48 ± 1.80c
P	CK	52.00 ± 15.98a	275.93 ± 15.66a	517.12 ± 29.35a	66.99 ± 3.37a
	CF	50.68 ± 8.27a	308.28 ± 11.32b	561.39 ± 20.61b	66.84 ± 3.10a
	OF	97.0 ± 15.83b	288.16 ± 15.78a	539.95 ± 29.57ab	69.72 ± 1.96b
	MF	146.42 ± 21.38c	315.27 ± 20.65b	561.85 ± 36.81b	69.58 ± 1.43b
K	CK	52.00 ± 15.98a	44.08 ± 3.75a	82.61 ± 7.02a	19.50 ± 1.14a
	CF	50.68 ± 8.27a	48.12 ± 4.02b	87.63 ± 7.32a	21.24 ± 1.50b
	OF	48.50 ± 7.91a	46.28 ± 2.46ab	86.71 ± 4.61a	20.61 ± 2.15ab
	MF	73.21 ± 10.69b	47.33 ± 2.09b	84.35 ± 3.72a	23.68 ± 1.13b

Note: different letters denote significant differences between means $P < 0.05$.

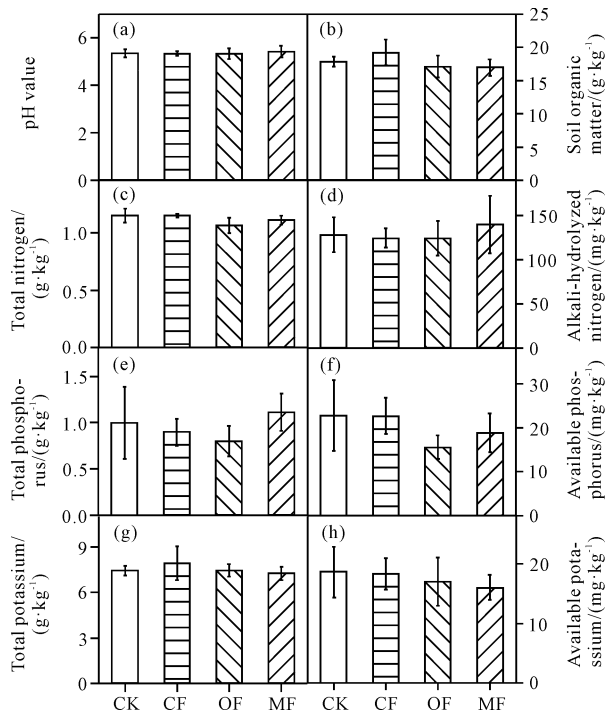


图1 稻鱼共作下不同肥料处理的土壤理化性质

Fig. 1 Soil physical and chemical properties under different fertilizer treatments

3 讨论

稻鱼共作模式是利用稻、鱼互利共生的关系实现农田提质增效,其机理包括鱼排泄物的增肥效应和鱼活动对土壤养分矿化的促进作用^[15]。水稻可提高水

体环境质量,其间生长的浮游植物可成为鱼类的食物^[16];鱼类在稻田中采食、生长、繁殖,然后又以排泄物等方式将氮、磷素返回稻田,供当季水稻利用^[17];鱼的活动能疏松稻田的表面土壤,改善土壤的通透性,增加溶氧,改善土壤氧化还原状况,利于土壤有机物的矿化^[18,19]。众多研究表明,稻鱼共作比水稻单作具有更高的水稻产量^[20,21]。本研究中,稻鱼共作配施化肥或有机肥的水稻千粒重、籽粒产量与单作水稻模式相比无显著差异,且配施化肥条件下水稻籽粒产量略有降低(表1),这可能与土壤肥力状况有关。供试土壤的全氮和碱解氮含量分别为 $1.09 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $96.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,依据全国第二次土壤普查推荐的肥力分级标准,属于中低地力农田。研究表明,水稻生产中有机氮替代比例主要取决于土壤肥力,高肥力农田在有机氮替代比例较高时仍能维持与单施化肥相当或更高的产量^[22],但在低肥力农田和纯有机栽培条件下会有一定程度的减产^[23,24]。尽管鱼类的排泄物可供当季水稻利用,但水稻吸收的养分大部分仍来自土壤和肥料^[5],施氮量相等的条件下,各处理供应氮素相当(图1),最终使得各处理产量差异不明显。一项 Meta 分析结果显示,与单作水稻相比,稻鱼共作下水稻增产率为 $9.4\% - 25.6\%$,单一追肥、单一有机肥、基肥加追肥及有机肥与化肥配施对水稻的产量效应均为正效应^[25]。本研究结果与其相似,与施用化肥相比,施用有机肥和复合微生物肥处理的

籽粒产量分别提升 6.6% 和 1.5%, 说明氮肥用量相同时, 稻鱼共作模式下有机肥全量替代化肥可实现水稻稳产的目标。与单作水稻相比, 稻鱼共作模式下秸秆干物质质量呈现下降趋势, 这可能是因为一方面田鱼投放密度过高, 投放 1.5×10^4 尾 $\cdot \text{hm}^{-2}$ (文献报道 6 000 - 11 713 尾 $\cdot \text{hm}^{-2}$, 每尾 96 - 250 g^[26,27]), 导致田面水浑浊和表层土的通气状况较差, 限制了水稻前期分蘖分化; 另一方面尽管有机肥具有改善土壤结构、提升土壤肥力和持续稳定均衡供给养分等诸多优点, 但有机肥养分含量低、释放缓慢(尤其是氮), 前期养分供应不足, 但能在灌浆中后期维持叶片较好的功能, 将养分优先供应到籽粒(表 2), 与前人报道一致^[28]。

在水稻-水生动物共作模式下, 径流和渗漏水中氮、磷含量低于常规水稻单作, 可以有效提高水稻产量及氮、磷利用率^[18]。李成芳^[29]的研究中, 与常规水稻单作相比, 稻鱼共作能提高水稻的氮、磷吸收量。本研究中, 稻鱼共作下配施化肥或有机肥与单作水稻配施化肥的氮素利用效率差异不显著(表 3), 与前人研究结果存在差异, 这可能与供试土壤的秸秆管理方式有关。前茬水稻种植后秸秆就地粉碎还田, 对于稻田培肥有促进作用^[30], 但对当季水稻生长则有利有弊: 微生物对秸秆分解前期需要氮素, 化学氮肥易被微生物固持而有机肥氮素释放慢^[31], 水稻前期的氮素需求高, 此时不论是施用化肥还是有机肥, 供试土壤均存在有效氮缺乏的状况, 在一定程度上削弱了施用化肥和施用有机肥间的差异。与稻鱼共作配施化肥相比, 对磷素而言, 配施有机肥和复合微生物肥处理下水稻秸秆吸收量分别增加 0.15% 和 2.71%, 籽粒吸收量分别增加 14.51% 和 16.45%; 对钾素而言, 配施有机肥和复合微生物肥处理下水稻秸秆吸收量分别增加 6.83% 和 11.74%, 籽粒吸收量分别增加 3.23% 和 29.39%(表 2), 说明稻鱼共作下施用有机肥比化肥更能促进水稻对磷、钾的吸收并在籽粒中积累, 且复合微生物肥的促进效果较有机肥好。研究表明, 等氮条件下施用有机物增加水稻钾吸收量, 一方面有机肥本身含有较高浓度钾, 可为水稻生长提供充足营养^[32]; 另一方面大量的功能微生物(如溶磷菌、解钾细菌等)随肥料进入土壤^[33], 分解土壤中的难溶性磷酸盐和将难溶矿物质中的钾元素释放出来^[34], 从而提高养分有效性以便作物吸收。

目前, 稻鱼共作下配施化肥或有机肥对土壤养分的影响未有一致结果。李成芳^[29]和吴雪^[12]的研究

中, 试验后土壤全氮和全磷的含量低于试验前的含量。吕广动等^[35]的研究中, 稻鱼共作下水稻土壤全氮、全磷和全钾含量较常规水稻单作处理分别增加 5.00% - 12.10%、4.29% - 17.46% 和 2.53% - 3.19%。本研究中, 与水稻单作相比, 稻鱼共作模式下 3 个不同肥料处理的土壤全氮、全钾含量较为稳定, 有机肥配施处理下全磷含量有一定程度降低但差异未达到显著水平(图 1), 说明土壤养分受肥料种类影响。此外, 相比配施化肥处理, 配施有机肥处理的磷投入量和配施复合微生物肥处理的磷、钾投入量较低, 但水稻地上部磷、钾吸收总量相当(表 2), 土壤全磷、全钾含量无明显降低(图 1), 说明稻鱼共作下以有机肥或复合微生物肥全量替代化肥可在保证作物不减产的同时维持土壤肥力。

4 结论

在相同施氮量条件下, 以有机肥或复合微生物肥全量替代化学氮肥可达到稻鱼共作模式下水稻产量稳定、化肥用量减少、肥料利用效率提高的效果。

参考文献

- [1] 张露, 梁青铎, 吴龙龙, 等. 减氮和增氧灌溉对水稻产量和氮素利用的影响[J]. 中国水稻科学, 2023, 37(1): 78-88.
- [2] 张奇春. 稻田土壤供氮机理及水稻氮肥优化施用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [3] 陈香碧, 胡亚军, 秦红灵, 等. 稻作系统有机肥替代部分化肥的土壤氮循环特征及增产机制[J]. 应用生态学报, 2020, 31(3): 1033-1042.
- [4] 孙业红, 闵庆文, 成升魁, 等. 农业文化遗产旅游资源开发与区域社会经济关系研究: 以浙江青田“稻鱼共生”全球重要农业文化遗产为例[J]. 资源科学, 2006(4): 138-144.
- [5] GUO L, ZHAO L F, YE J L, et al. Using aquatic animals as partners to increase yield and maintain soil nitrogen in the paddy ecosystems [J]. Elife, 2022, 11: e73869.
- [6] 于秀娟, 郝向举, 党子乔, 等. 中国稻渔综合种养产业发展报告(2022)[J]. 中国水产, 2023(1): 39-46.
- [7] 阳华任, 李忠义. 广西“稻-鱼-绿肥”周年循环农业模式探索[J]. 作物研究, 2020, 34(5): 480-484.
- [8] 张小莉, 孟琳, 王秋君, 等. 不同有机无机复混肥对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(3): 624-630.
- [9] 王飞, 李清华, 何春梅, 等. 稻秆与紫云英联合还田提高

- 黄泥田氮素利用率和土壤肥力[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(1): 66-74.
- [10] 肖大康, 丁紫娟, 胡仁, 等. 不同地力水平和施氮量下水稻优质高产的氮肥有机替代比例[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(10): 1804-1815.
- [11] 龙瑞平, 杨兆春, 穆家伟, 等. 稻鱼共作下氮肥减量后移对水稻生长和氮肥利用效率的影响[J]. 土壤, 2022, 54(4): 708-714.
- [12] 吴雪. 稻鱼系统养分循环利用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [13] 石鑫蕊, 任彬彬, 江琳琳, 等. 有机肥替代部分化肥对水稻光合速率、氮素利用率和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(1): 154-162.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] 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.
- [16] 张丹, 闵庆文, 成升魁, 等. 应用碳、氮稳定同位素研究稻田多个物种共存的食物网结构和营养级关系[J]. 生态学报, 2010, 30(24): 6734-6740.
- [17] NISHIMURA Y, OHTSUKA T, YOSHIYAMA K, et al. Cascading effects of larval Crucian carp introduction on phytoplankton and microbial communities in a paddy field: top-down and bottom-up controls [J]. Ecological Research, 2011, 26: 615-626.
- [18] 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]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2007, 79: 181-191.
- [19] VROMANT N, CHAU N T H, OLLEVIER F. The effect of rice-seeding rate and fish stocking on the floodwater ecology of the trench of a concurrent, direct-seeded rice-fish system [J]. Hydrobiologia, 2001, 457: 105-117.
- [20] TSURUTA T, YAMAGUCHI M, ABE S I, et al. Effect of fish in rice-fish culture on the rice yield [J]. Fisheries Science, 2011, 77: 95-106.
- [21] 隆斌庆, 陈灿, 黄璜, 等. 稻田生态种养的发展现状与前景分析[J]. 作物研究, 2017, 31(6): 607-612.
- [22] 崔贺雨, 张金成. 水稻生物有机肥替代化肥技术研究[J]. 现代化农业, 2023(1): 24-26.
- [23] 龙艳梅, 普莉华, 孙平忠. “稻+鱼”种植模式化肥减量增效同田对比试验[J]. 云南农业, 2022(8): 81-82.
- [24] 郑仁兵, 李敏, 韩上, 等. 有机肥替代氮肥的水稻产量效应研究[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(22): 32-33, 64.
- [25] 蔡淑芳, 黄献光, 黄惠珍, 等. 稻鱼共作对水稻产量效应的 Meta 分析[J]. 水生生物学报, 2022, 46(12): 1924-1931.
- [26] 唐贞澜, 周从福, 罗群, 等. 稻鱼不同投放量对比试验效益分析[J]. 农技服务, 2017, 34(12): 160, 129.
- [27] 曾涛, 赵洪, 龙胜碧, 等. 贵州主要稻区养鱼密度对稻鱼生长及效益的影响[J]. 贵州农业科学, 2020, 48(3): 102-106.
- [28] 黄钻华, 赵林蓉. 有机肥替代部分化肥对水稻产量及土壤质量的影响[J]. 农业科技通讯, 2023(3): 104-106, 195.
- [29] 李成芳. 稻田生态种养模式氮素转化规律的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.
- [30] 张宝成, 白艳芬, 李宪碧, 等. 汉中盆地秸秆还田撂荒和林地对土壤碳的影响[J]. 广西植物, 2018, 38(8): 1081-1087.
- [31] 陈珊, 丁咸庆, 祝贞科, 等. 秸秆还田对外源氮在土壤中转化及其微生物响应的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(4): 1613-1621.
- [32] 韩雪梅, 许俊伟, 杨秋平, 等. 施用植物源有机肥对水稻产量形成及养分吸收利用效率的影响[J]. 浙江农业科学, 2023, 64(4): 798-803.
- [33] 丁文成, 何萍, 周卫. 我国新型肥料产业发展战略研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(2): 201-221.
- [34] 张中峰, 周龙武, 徐广平, 等. 广西喀斯特地区植物根际土壤解磷菌筛选及促生效应研究[J]. 广西科学, 2018, 25(5): 590-598.
- [35] 吕广动, 黄璜, 梁玉刚, 等. 紫云英还田+稻鱼共生对水稻土壤养分及产量的影响[J]. 西南农业学报, 2020, 33(8): 1729-1735.

Effects of Different Organic Fertilizers on Nutrient Uptake and Utilization Efficiency of Rice under Rice-fish Co-culture

DENG Shaohong¹, WEN Yuanguang¹, SUN Dongjing¹, WANG Lei², WEN Jun³,
CHEN Qiu hai¹, GAO Hui¹, HUANG Yongjie¹, XU Junmo¹, LIAO Jingqiu¹,
ZHOU Xiaoguo^{1**}

(1. Laboratory of Forest Protection, Restoration and Ecological Utilization, Institute of Eco-Environmental Research, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation, Forestry College, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China; 3. Institute of Ecological Industry, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China)

Abstract: The effects of organic fertilizer instead of chemical nitrogen fertilizer on rice yield, nutrient uptake and utilization and soil nutrients under rice-fish co-culture were studied, which could provide a basis for reducing the consumption of chemical fertilizer and increasing production efficiency in paddy fields. Four treatments were set in the field experiment: single-cropping rice combined with Chemical Fertilizer (CK), rice-fish co-culture combined with Chemical Fertilizer (CF), rice-fish co-culture combined with Organic Fertilizer (OF), and rice-fish co-culture combined with Microbial Fertilizer (MF). The effects of different organic fertilizers on rice yield, dry matter weight, nutrient uptake and utilization efficiency and soil properties under the same nitrogen application rate were studied. The results showed that, (1) Compared with CK treatment, the rice grain yield decreased by 2.53% and 0.16% in CF and OF treatment, and increased by 11.23% in MF treatment. There was no significant difference between treatments ($P \geq 0.05$). The nitrogen harvest index of rice was significantly increased under rice-fish co-culture. At the same time, the partial productivity of phosphorus and potassium, grain production efficiency, dry matter production efficiency and harvest index of rice were improved in different degrees, and the improvement effect of MF treatment was the best. (2) There were significant differences in grain nutrient contents among different organic fertilizer treatments under rice-fish co-culture ($P < 0.05$). The content of nitrogen and potassium were $MF > OF$, while the content of phosphorus was opposite. (3) There were no significant differences in soil pH value, organic matter, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, alkali-hydrolyzed nitrogen, available phosphorus and available potassium contents among different treatments ($P \geq 0.05$). In conclusion, replacing chemical nitrogen fertilizer with organic fertilizer or compound microbial fertilizer can stabilize rice yield, maintain soil fertility and improve fertilizer use efficiency under rice-fish co-culture mode.

Key words: organic fertilizer; rice-fish co-culture; soil nutrients; grain yield; uptake and utilization of nutrient

责任编辑:陆媛峰



微信公众号投稿更便捷

联系电话:0771-2503923

邮箱:gxxk@gxas.cn

投稿系统网址: <http://gxxk.ijournal.cn/gxxk/ch>