

氮肥类型对不同稻作模式水稻生长和产量的影响

姜硕琛, 张海维, 孔 盼, 杜 斌, 吴启侠*, 朱建强*

(长江大学农学院, 湿地生态与农业利用教育部工程研究中心, 湖北 荆州 434025)

摘 要: 探究复合肥、缓/控施肥、有机无机互混肥和不施氮肥对传统中稻模式和稻虾共生模式下水稻生长动态及产量的影响, 为不同稻作模式下优化氮肥管理和提高水稻产量提供理论依据。采用裂区设计, 2种稻作模式为主区, 4种氮肥施用类型为裂区, 于水稻主要生育期内调查水稻叶面积指数(LAI)和光合势(LAD)、干物质积累量(DW)和生长速率、光合特征, 成熟后测定产量及产量构成因子, 计算收获指数和氮肥偏生产力。结果表明: 稻虾共生模式下水稻生育期延长, 抽穗期 LAI、抽穗期和成熟期 DW、生长速率、抽穗期 SPAD 值和净光合速率、产量显著降低, 抽穗期至成熟期 LAD 显著增加。常规中稻模式下未施氮处理的生殖生长期和全生育期短于 3 个施氮处理, 稻虾共生模式下未施氮处理的营养生长期和全生育期长于 3 个施氮处理。有机无机互混肥的各时期 LAI、LAD、抽穗期光合能力和千粒重最高, 复合肥的分蘖期光合能力和抽穗期至成熟期生长速率最高, 缓/控释肥的各时期 DW、分蘖期至抽穗期生长速率、有效穗数、产量和氮肥偏生产力最高。缓/控释肥是两种稻作模式下水稻产量和氮肥偏生产力最高的最佳氮肥类型。

关键词: 氮肥类型; 稻虾共生模式; 传统中稻模式; 水稻生长; 产量

水稻是全球重要的粮食作物之一, 是我国 2/3 人口的主食^[1]。预计到 2025 年, 水稻产量需增加目前水平的 60%, 相当于每年至少增加 1.2% 的单产, 才能满足全球人口增长的需求^[2]。在过去的半个世纪, 虽然我国水稻产量急剧增加, 但伴随的是肥料的大量施用, 尤其是氮肥^[3]。不合理的氮肥施用往往会降低氮肥利用率^[4], 未被水稻利用的氮会通过地表径流、渗漏以及氨挥发的形式而损失, 引起环境污染^[5]。同时低的氮肥利用率不利于水稻生长和产量增长^[6]。因此, 探究高效的氮肥施用方式, 有助于提高水稻产量和保护生态环境。稻虾共生模式是一种以传统水稻种植为基础, 将水稻种植与小龙虾养殖在稻田中相结合的新技术, 是一种高效的稻田生态种养模式^[7]。与传统稻田模式相比, 稻虾共生模式增加了农民收益。对于水稻产量较低的低产田, 由于收益过低, 农户不愿种植水稻, 导致农田被搁置、荒废, 而将低产田改为稻虾种养田

后, 由于小龙虾产品增加了经济效益, 因此提高了农户种粮积极性, 保证了粮食的种植面积, 该模式同时满足了农民的“钱袋子”和我国的“粮袋子”^[8]。为进一步增加稻虾共生模式中水稻的产量, 提高经济效益和生态效益, 探究高效的氮肥施用方式十分重要。

复合肥作基肥、尿素作追肥的氮肥管理方式是我国应用最早, 且应用时间最长的施氮方法, 虽然该方法养分高、增产快, 但长期施用会导致土壤质量退化、农业面源污染等问题^[9]。为保持土壤肥力和减少环境污染, 有机肥和无机肥配合施用或使用缓/控释肥, 是满足农业可持续发展和环境友好型的施氮方式。陆海飞等^[10]研究发现, 长期采用有机肥和无机肥配施可提高土壤细菌多样性和酶活性, 进而提高农田生态系统的生产力。刘红江等^[11]研究发现, 有机肥和无机肥配施时, 增加有机肥的施用比例, 可以降低地表径流中总氮和钾的流失量, 有机肥和无机肥施用比例为 5:5 时, 可以达到保证产量并降低农田养分流失的效果。Zhang 等^[12]研究表明, 有机肥与无机肥配施可以增加土壤有机质含量、提高籽粒氮含量和水稻产量, 虽然地表水 NH_4^+ 含量和氨挥发有所增长, 但由于其提高了土壤中氮的残留量, 从而减少了氮素的损失。魏海燕等^[13]研究发现, 对于小穗型水稻, 一次性基施

收稿日期: 2021-01-24; 录用日期: 2021-02-18

基金项目: 湖北省农业科技创新行动专项 (2018SKJCX01); 2020 年高等事业发展专项 - 高效创新改革专项 (208/5020802803)。

作者简介: 姜硕琛 (1996-), 博士研究生, 研究方向为作物营养与环境生态。E-mail: 18229920540@qq.com。

通讯作者: 朱建强, E-mail: zyjb@sina.com; 吴启侠, E-mail: qixia.wu@yangtzeu.edu.cn。

缓/控施肥可提高水稻产量,但对于大穗型水稻,需要基施缓/控释肥后,再追施尿素才能满足水稻的氮肥需求。Wei等^[14]研究表明用脲甲醛树脂或聚合物包膜尿素作基肥,尿素作分蘖肥,可以提高水稻产量与稻米品质。Ding等^[15]通过Meta分析比较了中国境内缓/控释肥和有机肥等肥料对水稻产量的影响,结果显示有机肥增产7.8%,缓/控释肥增产7.4%。

虽然前人围绕复合肥、有机无机互混肥和缓控释肥对水稻产量的影响,已有较多研究,但针对稻虾共生模式下,不同氮肥类型对水稻生长和产量影响的报道仍较少。在稻虾共生和传统中稻模式中,不同氮肥施用类型对水稻生长和产量影响的差异比较更是未曾报道。本研究选择复合肥、缓/控释肥、有机无机互混肥3种氮肥类型,以不施用氮肥作为空白对照,研究在常规中稻和稻虾共生模式中,不同氮肥类型对水稻生长动态、光合特性、产量和氮肥偏生产力的影响,并为不同稻作模式下优化氮肥管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验于2020年在湖北省荆州市长江大学农业科技示范基地(30°21'N, 112°09'E)进行,该地属北亚热带农业气候带,年平均气温16.5℃,≥10℃积温5094.9~5204.3℃,年平均降水量1095 mm,年平均日照时数1718 h。中稻模式种植制度为水稻、冬小麦轮作,土壤类型为粘壤土,土壤(0~20 cm)有机质21.4 g/kg、全氮2.24 g/kg、全磷0.54 g/kg、全钾3.67 g/kg、碱解氮89.6 mg/kg、有效磷51.3 mg/kg、速效钾114.6 mg/kg、pH值6.8。稻虾模式所用试验田已进行了3年的稻虾综合种养管理,种植制度为稻虾共生、冬闲田,土壤类型为潜育型水稻土,土壤(0~20 cm)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。缓/控释肥(N:P₂O₅:K₂O=28:15:5),有机无机互混肥(有机肥:N:P₂O₅:K₂O=15:18:10:12),复合肥(N:P₂O₅:K₂O=15:15:15)由中国中化集团有限公司提供。供试品种为黄华占,由长江大学农学院提供。

1.2 试验设计

试验采取裂区设计,主区为2个稻作模式,分

别为常规中稻模式和稻虾共生模式。两种稻作模式的差异如下。(1)水管理差异,常规中稻模式水管理方式:移栽至分蘖末期保持田间3~5 cm水层,分蘖末期排水晒田控制无效分蘖,晒田结束至成熟前7 d保持2~4 cm水层,成熟前7 d排水晒田便于收获。稻虾共生模式水管理方式为:移栽至分蘖末期保持田间3~5 cm水层,分蘖末期排水晒田控制无效分蘖,晒田结束至成熟期前7 d保持25~35 cm水层以便小龙虾活动,成熟前7 d排水晒田便于收获。(2)小龙虾养殖的差异,稻虾共生模式下,移栽至晒田结束期间,小龙虾一直生活在虾沟中,田面四周设有高20 cm、宽20 cm的垄,防止小龙虾进田破坏分蘖期的水稻。晒田结束复水后,沿田边四周撒小龙虾饲料40 g/m²,每天17:00撒1次,持续7 d,引导小龙虾进田,提高稻虾共生度,此时部分小龙虾生活在田间,7 d后通过地笼捕捞法(地笼规格为:网眼8 mm,框架12 cm×14 cm,长1.4 m,田间地笼密度为1个/50 m²)测得共生度为(0.23±0.04)只/m²。裂区为氮肥类型差异,设有不施氮肥(CK)、缓/控释肥、复合肥、有机无机互混肥,3个施氮处理的氮肥用量均为N 120 kg/hm²,4个处理的P₂O₅和K₂O用量分别为62.5和135 kg/hm²。具体施用方法为:缓/控释肥中氮肥按照基肥:蘖肥:穗肥为8:0:2分施,复合肥和有机无机互混肥中氮肥按照基肥:蘖肥:穗肥为5:3:2分施。3个施氮处理中基肥按照不同类型氮肥施用,蘖肥和穗肥通过尿素的形式施用。磷肥全部做基肥,钾肥按照基肥:穗肥为5:5分施,4个处理中需补充的P₂O₅由磷酸氢二钠代替,K₂O由氯化钾代替。具体试验设计见表1、表2。两个稻作模式和4个氮肥类型共组成8个处理,每个处理重复3次,共24个小区,小区面积为300 m²。田间试验采取育秧移栽的方式,5月1日播种,6月1日移栽,株行距为40 cm×20 cm,每穴种植2株。其他田间管理按照当地农民高产管理,并且及时防治病虫害,避免产量损失。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 生育期调查

记录水稻移栽期、分蘖盛期、抽穗期(田间50%的植株抽穗)和成熟期。

1.3.2 干物质积累量和叶面积的测定

于水稻分蘖盛期、抽穗期和成熟期,每小区调查100穴植株的茎蘖数,计算单穴平均茎蘖数,据

表 1 试验施肥设计

氮肥 类型	基肥		蘖肥		穗肥	
	施用方式	含 N (kg/hm ²)	施用方式	含 N (kg/hm ²)	施用方式	含 N (kg/hm ²)
CK	磷酸氢二钠 125 kg/hm ² 氯化钾 112.5 kg/hm ²	0	无	0	氯化钾 112.5 kg/hm ²	0
缓 / 控释肥	缓 / 控释肥 300 kg/hm ² 磷酸氢二钠 35 kg/hm ² 氯化钾 87.5 kg/hm ²	84	无	0	尿素 78 kg/hm ² + 氯化钾 112.5 kg/hm ²	36
复合肥	复合肥 400 kg/hm ² 磷酸氢二钠 5 kg/hm ² 氯化钾 12.5 kg/hm ²	60	尿素 65 kg/hm ²	30	尿素 65 kg/hm ² + 氯化钾 112.5 kg/hm ²	30
有机无机 互混肥	有机无机互混肥 333.3 kg/hm ² 磷酸氢二钠 58.4 kg/hm ² 氯化钾 45.8 kg/hm ²	60	尿素 65 kg/hm ²	30	尿素 65 kg/hm ² + 氯化钾 112.5 kg/hm ²	30

表 2 试验稻作模式设计

稻作模式	移栽至晒田结束		晒田结束至成熟前 7 d		成熟前 7 d	
	水管理	虾管理	水管理	虾管理	水管理	虾管理
常规中稻	分蘖期保持 3 ~ 5 cm 水层, 分蘖末期晒田	无	晒田结束后至成熟 前 7 d 保持 2 ~ 4 cm 水层	无	排水晒田, 便于收获	无
稻虾共生	分蘖期保持 3 ~ 5 cm 水层, 分蘖末期晒田	小龙虾生活在 虾沟中	晒田结束至成熟前 7 d 保持 25 ~ 35 cm 水层	部分小龙虾生活在 田面, 共生度为 (0.23 ± 0.04) 只 /m ²	排水晒田, 便于收获	部分小龙虾生活在 田面, 共生度为 (0.23 ± 0.04) 只 /m ²

此每小区取代表性植株 5 穴，测量叶片的长与宽，按公式计算叶面积 = 长 × 宽 × 0.75，并计算叶面积指数（LAI）。将 5 穴水稻地上部分分成茎叶和穗（水稻分蘖盛期仅分为茎叶），在 105℃ 下杀青 30 min，80℃ 烘干至恒重，测定各部分干物质重。

1.3.3 光合势

光合势（LAD）= 1/2 × （L₁+L₂）× （t₂-t₁）。式中，L₁ 和 L₂ 为前后 2 次测定的叶面积，t₁ 和 t₂ 为前后 2 次测定的间隔时间（d），LAD 单位为 m²/（d · hm²）。

1.3.4 群体生长率

群体生长率（CGR）= （W₂-W₁）/ [A （t₂-t₁）]。式中，W₁ 和 W₂ 为前后 2 次测定的干物质积累量，t₁ 和 t₂ 为前后 2 次测定的间隔时间（d），A 为土地面积，CGR 单位为 g/（d · m²）。

1.3.5 SPAD 值

于晴天 9：00 ~ 11：30，用 SPAD-502 叶绿素计测定叶片 SPAD 值。在分蘖盛期和抽穗期，每个小区根据单穴平均茎蘖数选择 5 穴水稻，测定时

选择水稻剑叶（分蘖盛期选择顶部全展叶）测定 1/2 处及其上下 3 cm、叶宽 1/4 或 3/4 的位置，每穴水稻重复测定 3 次，3 次平均值作为该穴水稻 SPAD 值。

1.3.6 净光合速率

于晴天 9：00 ~ 11：30，用 LI-6400 便携式光合作用测定系统测定叶片净光合速率。在分蘖盛期和抽穗期，每个小区根据单穴平均茎蘖数选择 5 穴水稻，测定时选择水稻剑叶（分蘖盛期选择顶部全展叶）的中部，每叶片重复测定 3 次，3 次平均值作为该穴水稻的净光合速率。

1.3.7 产量及其构成和氮素偏生产力

在水稻成熟期，每个小区根据单穴平均茎蘖数选择 5 穴水稻，测定每穗颖花数，用水漂法区分饱粒（沉入水底者）和空瘪粒，计算饱粒结实率和饱粒千粒重和收获指数。每个小区选择 40 m² 水稻测定实际产量，稻虾共生模式根据种植水稻的有效面积进行实量，将稻谷烘干后折算到含水率为 14% 的千粒重和产量。氮肥偏生产力（kg/kg）= 施氮区产量 / 氮肥施用量。

1.4 数据分析

数据通过 Excel 2010 进行预整理, 通过 SPSS 21.0 进行数据分析, 使用方差分析检验不同处理间的差异 ($P<0.05$), 用邓肯的多区间法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 稻作模式和氮肥类型对水稻生育进程的影响

由表 3 可见, 常规中稻模式水稻全生育期 (113 ~ 122 d) 短于稻虾共生模式 (129 ~ 140 d)。常规中稻模式下, 未施氮处理的全生育期比施氮处理少 7 ~ 9 d, 其中移栽期至抽穗期比施氮处理多 2 ~ 3 d, 抽穗期至成熟期比施氮处理少 10 ~ 12 d。稻虾共生模式下, 未施氮处理的水稻全生育期比施氮处理多 8 ~ 11 d, 其中, 移栽期至抽穗期天数比施氮处理多 6 ~ 8 d, 抽穗期至成熟期天数比施氮

处理多 1 ~ 3 d。3 个施氮处理在各生育期的天数差异小于 2 d。由此可得: 稻虾共生模式的生育期长于常规中稻模式, 常规中稻模式下未施氮处理的生殖生长期和全生育期短于 3 个施氮处理, 稻虾共生模式下未施氮处理的营养生长期和全生育期长于 3 个施氮处理。

2.2 稻作模式和氮肥类型对水稻各时期叶面积指数和光合势的影响

由表 4 可知, 稻作模式对抽穗期 LAI 有显著影响, 对抽穗期至成熟期 LAD 有极显著影响, 氮肥类型和稻作模式交互作用对抽穗期和成熟期 LAI、分蘖期至成熟期 LAD 有极显著影响。传统中稻模式抽穗期 LAI 比稻虾共生模式高 5.67%, 抽穗期至成熟期 LAD 比稻虾模式低 5.46%。有机无机互混肥的抽穗期和成熟期的 LAI、分蘖期至抽穗期和抽穗期至成熟期的 LAD 最高, 分别比 CK 高 88.00% 和 73.75%、54.88% 和 91.63%, 分别比复合肥高 9.30% 和 3.58%、8.34% 和 6.04%, 分别比缓/控释肥高 5.62% 和 3.27%、7.01% 和 10.88%。传统中稻模式下, 以上 4 个指标在 3 种氮肥类型间无显著差异, 但施氮处理显著高于未施氮处理; 稻虾共生模式下, 以上 4 个指标施氮处理显著高于未施氮处理, 此外, 抽穗期 LAI 和分蘖期至抽穗期 LAD 以有机无机互混肥最高, 抽穗期至成熟期 LAD 以复合肥和有机无机互混肥较高。以上结果表明: 传统中稻模式 LAI 高于稻虾共生模式, 但 LAD 反之。有机无机互混肥的 LAI 和 LAD 最高, 且在稻虾共生模式中更加明显。

表 3 不同处理间水稻的生育进程 (d)

稻作模式	氮肥类型	移栽期 - 抽穗期	抽穗期 - 成熟期	全生育期
常规中稻	CK	45	38	113
	复合肥	43	49	122
	缓/控释肥	42	50	122
	有机无机互混肥	42	48	120
稻虾共生	CK	53	57	140
	复合肥	45	54	129
	缓/控释肥	46	56	132
	有机无机互混肥	47	54	131

表 4 不同处理间水稻各时期的叶面积指数和光合势

稻作模式	氮肥类型	叶面积指数 (LAI)			光合势 (LAD) [$\text{m}^2/(\text{d} \cdot \text{m}^2)$]	
		分蘖期	抽穗期	成熟期	分蘖期至抽穗期	抽穗期至成熟期
传统中稻	CK	0.69 ± 0.09a	2.26 ± 0.06d	1.86 ± 0.09d	66.44 ± 2.06d	78.32 ± 1.98d
	复合肥	0.78 ± 0.07a	4.56 ± 0.07a	3.49 ± 0.12a	114.80 ± 1.99b	197.10 ± 3.35a
	缓/控释肥	0.74 ± 0.04a	4.83 ± 0.51a	3.50 ± 0.08a	116.85 ± 11.49ab	208.14 ± 13.48a
	有机无机互混肥	0.73 ± 0.16a	4.74 ± 0.14a	3.52 ± 0.18a	114.90 ± 6.23b	198.31 ± 1.74a
稻虾共生	CK	0.64 ± 0.14a	2.74 ± 0.14c	2.14 ± 0.08c	89.53 ± 2.43c	139.16 ± 5.84c
	复合肥	0.77 ± 0.10a	4.04 ± 0.26b	3.22 ± 0.20b	108.16 ± 7.96b	195.90 ± 10.40a
	缓/控释肥	0.67 ± 0.03a	4.07 ± 0.22b	3.23 ± 0.04b	108.88 ± 4.37b	167.73 ± 4.81b
	有机无机互混肥	0.73 ± 0.02a	4.66 ± 0.14a	3.43 ± 0.12ab	126.66 ± 3.45a	218.44 ± 2.49a
稻作模式		ns	*	ns	ns	**
氮肥类型		ns	**	**	**	**
稻作模式 × 氮肥类型		ns	**	**	**	**

注: 小写字母不同表示处理间差异显著 ($P<0.05$), ns 表示无显著影响, * 和 ** 分别表示 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平下差异显著。下同。

2.3 稻作模式和氮肥类型对水稻各时期干物质积累量和生长速率的影响

由表 5 可知, 稻作模式对抽穗期和成熟期干物质积累量 (DW)、分蘖期至抽穗期生长速率有极显著影响, 对抽穗期至成熟期生长速率有显著影响, 氮肥类型对抽穗期和成熟期 DW、分蘖期至抽穗期和抽穗期至成熟期生长速率有极显著影响, 稻作模式和氮肥类型的交互作用对抽穗期 DW 有极显著影响, 对分蘖期至抽穗期生长速率有显著影响。传统中稻模式的抽穗期和成熟期 DW、分蘖期至抽穗期和抽穗期至成熟期生长速率分别比稻虾共生模式高 7.89% 和 8.54%、21.58% 和 21.30%。缓 / 控释肥的抽穗期和成熟期 DW、分蘖期至抽穗期的生长速率最高, 分别比 CK 高 91.73% 和 102.93%、

163.23%, 分别比复合肥高 15.13% 和 6.00%、21.79%, 分别比缓 / 控释肥高 8.55% 和 3.56%、11.48%。复合肥的抽穗期至成熟期生长速率最高, 两种稻作模式数值平均后, 比 CK、缓 / 控释肥和有机无机互混肥分别高 127.79%、6.95% 和 3.41%。传统中稻模式和稻虾共生模式下, 抽穗期 DW 和分蘖期至抽穗期生长速率大小顺序均为缓 / 控释肥 > 有机无机互混肥 > 复合肥 > CK, 传统中稻模式成熟期 DW 大小顺序为缓 / 控释肥 > 有机无机互混肥 > 复合肥 > CK, 稻虾共生模式下成熟期 DW 大小顺序为缓 / 控释肥 > 复合肥 > 有机无机互混肥 > CK。综上所述, 传统中稻模式 DW 和生长速率高于稻虾共生模式, 缓 / 控释肥 DW 和分蘖期至抽穗期生长速率最高, 复合肥抽穗期至成熟期生长速率最高。

表 5 不同处理间水稻各时期的干物质积累量和生长速率

稻作模式	氮肥类型	干物质积累量 (DW) (t/hm ²)			生长速率 [g/(d·m ²)]	
		分蘖期	抽穗期	成熟期	分蘖期至抽穗期	抽穗期至成熟期
传统中稻	CK	1.62 ± 0.33a	4.72 ± 0.08d	6.68 ± 0.48d	68.90 ± 7.59e	51.49 ± 12.93b
	复合肥	1.89 ± 0.50a	8.72 ± 0.17b	12.24 ± 0.91bc	158.61 ± 9.50bc	71.86 ± 20.37ab
	缓 / 控释肥	1.79 ± 0.03a	9.96 ± 0.66a	13.48 ± 0.92a	194.54 ± 15.29a	70.43 ± 12.15ab
	有机无机互混肥	1.78 ± 0.36a	8.89 ± 0.14b	12.98 ± 0.86ab	169.28 ± 7.92b	85.09 ± 19.36a
稻虾共生	CK	1.73 ± 0.45a	5.08 ± 0.14d	5.95 ± 0.19d	63.26 ± 6.19e	15.36 ± 3.78c
	复合肥	1.88 ± 0.10a	7.60 ± 0.38c	11.94 ± 0.07bc	127.02 ± 10.10d	80.42 ± 7.73a
	缓 / 控释肥	1.78 ± 0.05a	8.83 ± 0.13b	12.15 ± 0.12bc	153.34 ± 3.66bc	71.96 ± 2.83ab
	有机无机互混肥	1.71 ± 0.13a	8.42 ± 0.11b	11.77 ± 0.69c	142.77 ± 4.41c	62.17 ± 10.94ab
稻作模式		ns	**	**	**	*
氮肥类型		ns	**	**	**	**
稻作模式 × 氮肥类型		ns	**	ns	*	ns

2.4 稻作模式和氮肥类型对水稻各时期 SPAD 值和光合速率的影响

由表 6 可知, 稻作模式对抽穗期 SPAD 值和光合速率有极显著影响, 氮肥类型对抽穗期 SPAD 值以及分蘖期和抽穗期光合速率有极显著影响。传统中稻模式抽穗期 SPAD 值和光合速率分别比稻虾共生模式高 5.19% 和 7.93%。有机无机互混肥的抽穗期 SPAD 值和光合速率最高, 分别比 CK 高 22.27% 和 21.21%, 分别比复合肥高 0.43% 和 1.73%, 分别比缓 / 控释肥高 10.43% 和 6.83%。复合肥的分蘖期光合速率最高, 比 CK、缓 / 控释肥和有机无机互

混肥分别高 17.74%、8.53% 和 1.68%。以上结果显示, 传统中稻模式的 SPAD 值和光合速率高于稻虾共生模式, 有机无机互混肥抽穗期光合能力更强, 而复合肥分蘖期光合能力更强。

2.5 稻作模式和氮肥类型对水稻产量、产量构成因子和氮肥偏生产力的影响

由表 7 可知, 稻作模式对产量有极显著影响, 氮肥类型对产量、单位面积有效穗数、千粒重和氮肥偏生产力有极显著影响。传统中稻模式的产量比稻虾共生模式产量高 14.06%。缓 / 控释肥的产量和单位面积有效穗数最高, 分别比 CK 高 99.96% 和

表 6 不同处理间水稻各时期的 SPAD 值和光合速率

稻作模式	氮肥类型	SPAD 值		光合速率 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	
		分蘖期	抽穗期	分蘖期	抽穗期
传统中稻	CK	35.62 ± 3.11a	33.25 ± 1.48de	20.75 ± 0.94c	22.72 ± 0.22d
	复合肥	41.49 ± 1.94a	41.42 ± 0.89a	25.02 ± 0.41a	26.95 ± 0.30a
	缓 / 控释肥	41.58 ± 6.50a	36.16 ± 1.79c	22.45 ± 0.62bc	25.76 ± 0.49b
	有机无机互混肥	38.93 ± 3.50a	40.02 ± 0.84a	22.51 ± 1.68bc	27.32 ± 0.59a
稻虾共生	CK	35.99 ± 3.53a	31.46 ± 0.97e	20.41 ± 2.15c	20.9 ± 0.64e
	复合肥	39.89 ± 1.80a	37.36 ± 1.5bc	23.44 ± 1.28ab	25.02 ± 0.48b
	缓 / 控释肥	38.76 ± 2.78a	35.49 ± 1.6cd	22.20 ± 1.25bc	23.73 ± 0.75c
	有机无机互混肥	37.87 ± 2.60a	39.1 ± 1.92ab	22.43 ± 0.57bc	25.55 ± 0.31b
稻作模式		ns	**	ns	**
氮肥类型		ns	**	**	**
稻作模式 × 氮肥类型		ns	ns	ns	ns

表 7 不同处理间水稻的产量、产量构成因子和氮肥偏生产力

稻作模式	氮肥类型	产量 (kg/hm^2)	有效穗数 ($\text{穗}/\text{m}^2$)	每穗粒数 (粒)	结实率 (%)	千粒重 (g)	收获指数 (%)	氮肥偏生产力 (kg/kg)
传统中稻	CK	4005.08 ± 23.27e	105.55 ± 17.05c	237.93 ± 61.72a	80.02 ± 3.10a	21.26 ± 0.47b	56.43 ± 4.66a	—
	复合肥	7140.13 ± 165.72b	169.92 ± 13.49ab	230.01 ± 49.57a	82.29 ± 0.82a	20.80 ± 0.45b	59.02 ± 2.52a	26.13 ± 1.38c
	缓 / 控释肥	7745.15 ± 68.20a	215.52 ± 38.90a	194.52 ± 16.00a	88.05 ± 4.05a	21.16 ± 0.34b	58.58 ± 2.57a	31.17 ± 0.571a
	有机无机互混肥	7093.57 ± 293.17b	166.63 ± 25.24b	246.72 ± 15.92a	87.38 ± 6.44a	22.34 ± 0.63a	59.25 ± 5.23a	25.74 ± 2.45c
稻虾共生	CK	3239.92 ± 78.28f	96.79 ± 17.74c	251.54 ± 31.09a	83.27 ± 3.56a	20.54 ± 0.32b	52.37 ± 3.09a	—
	复合肥	6279.04 ± 269.05d	214.65 ± 10.16a	205.68 ± 20.12a	81.17 ± 3.72a	21.32 ± 0.50b	57.35 ± 5.64a	25.33 ± 2.24c
	缓 / 控释肥	6741.94 ± 105.96c	188.07 ± 31.99ab	189.14 ± 59.05a	82.79 ± 6.14a	21.24 ± 0.28b	55.04 ± 0.40a	29.18 ± 0.88ab
	有机无机互混肥	6520.53 ± 119.83cd	169.61 ± 31.96ab	215.21 ± 50.63a	80.82 ± 3.14a	22.31 ± 0.51a	57.09 ± 3.30a	27.34 ± 1.00bc
稻作模式		**	ns	ns	ns	ns	ns	ns
氮肥类型		**	**	ns	ns	**	ns	**
稻作模式 × 氮肥类型		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

99.46%，分别比复合肥高 7.96% 和 4.95%，分别比有机无机互混肥高 6.41% 和 20.03%，缓 / 控释肥的氮肥偏生产力最高，比复合肥和有机无机互混肥分别高 17.29% 和 13.70%。有机无机互混肥的千粒重最高，分别比 CK、复合肥和缓 / 控释肥高 6.82%、6.01% 和 5.31%。综上所述，传统中稻模式产量高于稻虾共生模式，缓 / 控释肥产量、单位面积有效穗数和氮肥偏生产力最高，有机无机互混肥千粒重最高。

3 讨论

氮肥类型显著影响水稻产量和氮肥利用率^[16]，

稻虾共生模式是在传统中稻模式的基础上引入小龙虾养殖的一种新技术，具有提高经济效益和生态效益的广泛前景^[8]，研究不同氮肥类型对稻虾共生模式和传统中稻模式下水稻生长和产量的影响，具有较高的研究意义。本研究中，稻虾共生模式的水稻生育期长于常规中稻模式（表 3），在水稻分蘖结束至成熟期，稻虾共生模式的田间水位（25 ~ 35 cm）高于传统中稻模式（2 ~ 4 cm），长期处于深水环境引起的涝渍会限制水稻根系发育和根系呼吸作用，影响养分的吸收和碳水化合物的合成，从而延长水稻生育期^[17]，同时稻虾共生模式田间有小龙虾的活动，小龙虾的排泄物不断为水稻追肥，导

致水稻贪青迟熟^[18]。稻虾共生模式下未施氮处理生育期更长,这与较高的非结构碳水化合物储备可缩短涝渍引起的延缓生长有关^[19],通过水稻生长的各项指标(表4~6)可以看出,未施氮处理下水稻营养结构相对较差,因此在涝渍逆境下生长更慢,生育期长于施氮处理。常规中稻模式下,未施氮处理的生殖生长期和全生育期短于3个施氮处理,这与Wei等^[20]结论一致,由于未施氮处理导致土壤缺乏氮元素,使水稻叶绿素含量和光合速率降低,引起水稻早衰^[21]。值得注意的是,同样未施氮肥,稻虾共生模式下生育期延长了27 d,其中营养生长期延长了8 d,灌浆期延长了19 d。缺氮使生殖生长提前到来^[22],而稻虾共生模式下水体和土壤中氮含量始终高于传统中稻模式,同时涝渍延缓了水稻生长^[17],二者是未施氮处理在稻虾共生模式中营养生长期延长的主要原因。传统中稻模式下氮素缺乏引起水稻早衰,缩短了灌浆时间;另一方面稻虾共生模式水体和土壤氮含量较高,虽然氮含量与灌浆速率呈正相关^[20],但未施氮处理始终维持低氮供应,使水稻不会缺氮早衰^[21],也不会高氮而快速灌浆^[23],导致灌浆时间被延长,但目前没有相关报道证明持续供应低氮会延长灌浆时间,需要试验进一步证明。此外,大量研究证明干湿交替会提高灌浆效率^[24-26],与稻虾共生模式相比,传统中稻模式相对存在干湿交替的效果。未施氮处理的水稻在传统中稻模式下灌浆期缩短,而稻虾共生模式下灌浆期延长,导致二者灌浆时间相差19 d。

本研究发现,传统中稻模式LAI、DW、生长速率、SPAD和光合速率高于稻虾共生模式(表4~6),可能原因是稻虾共生模式的长期深水灌溉,限制了水稻根系发育和根系呼吸作用,降低了水稻的光合作用,减少了碳水化合物的合成,限制了营养结构的搭建^[17, 27-29],而LAD反之,这是因为稻虾共生模式生育期长于传统中稻模式(表3)。有机无机互混肥LAI最高(表4),说明有机无机互混肥可促进叶生长,提高冠层覆盖面积,这与Bi等^[30]和Wang等^[31]的结论一致,在稻虾模式中更明显,原因可能是有机肥作为水生生物的食物之一,有机肥的使用丰富了水生生物食物来源,同时水生生物是小龙虾的食物,可促进小龙虾生长,水生生物和小龙虾的粪便是水稻营养的另一个来源^[32],促进水稻的生长。缓/控释肥DW在分蘖期至抽穗期合成速率最高(表5),这与Hou等^[33]

的研究结论一致,说明缓/控释肥的养分释放速度与水稻生长所需营养物质速度更同步。复合肥抽穗期至成熟期生长速率最高(表5),可能是复合肥的养分释放过快,使水稻抽穗期地上部分干物质积累较低,抽穗期再次施肥后,抽穗期至成熟期水稻养分吸收和干物质积累更高。有机无机互混肥抽穗期光合能力更强(表6),原因可能是有机肥提高了水稻叶绿素含量和光合能力^[34],这与侯红乾等^[34]研究结论一致。复合肥分蘖期光合能力更强,这与复合肥的养分释放速度最快有关。

我国对稻虾共生模式的研究结果普遍表明,稻虾共生模式改善了土壤结构,增加了土壤养分、微生物的活性以及群落功能多样性,提高了水稻产量^[5, 35-36]。本研究中,传统中稻模式产量高于稻虾共生模式(表7),这与前人结论相反,蔡晨等^[35]和倡国涵等^[36]的研究没有提及稻虾共生模式提高土壤肥力后对水稻产量的影响,倡国涵等^[36]研究采用稻虾共作的方式提高了水稻产量,但稻虾共作模式是中稻收获后灌水养虾,水稻并未受到深水灌溉的涝渍胁迫。本研究通过调查湖北省多地农户在稻虾综合种养模式中的日常管理后,选择农户最常用的水、虾管理方式进行试验,长期的深水灌溉应该是稻虾共生模式水稻生长受限、产量降低的主要原因。因此,本文建议稻虾共生模式在稻虾共生期,田间水位不宜超过25 cm。缓/控释肥产量、单位面积有效穗数和氮肥偏生产力最高,说明缓/控释肥是提高水稻产量和氮肥偏生产力最优的氮肥类型。有机无机互混肥千粒重最高,这与有机无机互混肥增加了灌浆期光合作用有关(表6)。

4 结论

与常规中稻相比,稻虾共生模式延长了生育期,降低了LAI、DW、生长速率、SPAD值、光合速率和产量,综合试验结果,为了提高水稻产量,改善水稻品质,应降低稻虾共生期田间水位,缓解长期深水灌溉引起的涝渍胁迫,促进水稻生长。有机无机互混肥的LAI、营养生长期光和能力和千粒重最高,复合肥的分蘖期光合能力和生殖生长期生长速率最高,缓/控释肥的干物质积累量、分蘖期至抽穗期生长速率、产量和氮肥偏生产力最高。说明缓/控释肥是适用于传统中稻模式和稻虾共生模式的最优氮肥类型。

参考文献:

- [1] Peng S B, Tang Q Y, Zou Y B. Current status and challenges of rice production in China [J]. *Plant Production Science*, 2015, 12 (1): 3–8.
- [2] Zhang Z J, Chu G, Liu L J, et al. Mid-season nitrogen application strategies for rice varieties differing in panicle size [J]. *Field Crops Research*, 2013, 150: 9–18.
- [3] Xu G W, Lu D K, Wang H Z, et al. Morphological and physiological traits of rice roots and their relationships to yield and nitrogen utilization as influenced by irrigation regime and nitrogen rate [J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 203: 385–394.
- [4] Chen G, Zhao G H, Cheng W D, et al. Rice nitrogen use efficiency does not link to ammonia volatilization in paddy fields [J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, 741: 140–153.
- [5] Li P F, Lu J W, Wang Y, et al. Nitrogen losses, use efficiency, and productivity of early rice under controlled-release urea [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 251: 78–87.
- [6] 张刚, 王德建, 俞元春, 等. 秸秆全量还田与氮肥用量对水稻产量、氮肥利用率及氮素损失的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22 (4): 877–885.
- [7] 佘国涵, 彭成林, 徐祥玉, 等. 稻虾共作模式对涝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.
- [8] 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.
- [9] 刘杰, 孙耿, 罗尊长, 等. 施肥结构对冷浸田土壤肥力及水稻生长的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23 (1): 27–33.
- [10] 陆海飞, 郑金伟, 余喜初, 等. 长期无机有机肥配施对红壤性水稻土壤微生物群落多样性及酶活性的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21 (3): 632–643.
- [11] 刘红江, 陈虞雯, 孙国峰, 等. 有机肥–无机肥不同配施比例对水稻产量和农田养分流失的影响 [J]. *生态学杂志*, 2017, 36 (2): 405–412.
- [12] Zhang M, Yao Y L, Tian Y H, et al. Increasing yield and N use efficiency with organic fertilizer in Chinese intensive rice cropping systems [J]. *Field Crops Research*, 2018, 227: 102–109.
- [13] 魏海燕, 李宏亮, 程金秋, 等. 缓释肥类型与运筹对不同穗型水稻产量的影响 [J]. *作物学报*, 2017, 43 (5): 730–740.
- [14] Wei H Y, Chen Z F, Xing Z P, et al. Effects of slow or controlled release fertilizer types and fertilization modes on yield and quality of rice [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17 (10): 2222–2234.
- [15] Ding W C, Xu X P, He P, et al. Improving yield and nitrogen use efficiency through alternative fertilization options for rice in China: A meta-analysis [J]. *Field Crops Research*, 2018, 227: 11–18.
- [16] Jalloh M A, Chen J H, Zhen F R, et al. Effect of different N fertilizer forms on antioxidant capacity and grain yield of rice growing under Cd stress [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 162 (2–3): 1081–1085.
- [17] Yang H S, Zhai S L, Li Y F, et al. Waterlogging reduction and wheat yield increase through long-term ditch-buried straw return in a rice–wheat rotation system [J]. *Field Crops Research*, 2017, 209: 189–197.
- [18] 黄丽芬, 全晓艳, 张蓉, 等. 光氮及其互作对水稻干物质积累与分配的影响 [J]. *中国水稻科学*, 2014, 28 (2): 167–176.
- [19] Ismail A M, Singh U S, Singh S, et al. The contribution of submergence-tolerant (Sub1) rice varieties to food security in flood-prone rainfed lowland areas in Asia [J]. *Field Crops Research*, 2013, 152: 83–93.
- [20] Wei H H, Meng T Y, Li X Y, et al. Sink-source relationship during rice grain filling is associated with grain nitrogen concentration [J]. *Field Crops Research*, 2018, 215: 23–38.
- [21] 孙玉莹, 毕京翠, 赵志超, 等. 作物叶片衰老研究进展 [J]. *作物杂志*, 2013 (4): 11–19.
- [22] Gu J F, Chen Y, Zhang H, et al. Canopy light and nitrogen distributions are related to grain yield and nitrogen use efficiency in rice [J]. *Field Crops Research*, 2017, 206: 74–85.
- [23] Deng F, Li W, Ren W J, et al. Optimized nitrogen managements and polyaspartic acid urea improved dry matter production and yield of indica hybrid rice [J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 145: 1–9.
- [24] Sun Y J, Ma J, Sun Y Y, et al. The effects of different water and nitrogen managements on yield and nitrogen use efficiency in hybrid rice of China [J]. *Field Crops Research*, 2012, 127: 85–98.
- [25] Pan J F, Liu Y Z, Zhong X H, et al. Grain yield, water productivity and nitrogen use efficiency of rice under different water management and fertilizer–N inputs in South China [J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 184: 191–200.
- [26] Wang Z Q, Zhang W Y, Beebout Sarah-S, et al. Grain yield, water and nitrogen use efficiencies of rice as influenced by irrigation regimes and their interaction with nitrogen rates [J]. *Field Crops Research*, 2016, 193: 54–69.
- [27] Nishiuchi S, Yamauchi T, Takahashi H, et al. Mechanisms for coping with submergence and waterlogging in rice [J]. *Rice*, 2012, 5 (1): 2.
- [28] 陆红飞, 郭相平, 甄博, 等. 旱涝交替胁迫条件下粳稻叶片光合特性 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32 (8): 105–112.
- [29] 甄博, 郭相平, 陆红飞. 旱涝交替胁迫对水稻分蘖期根解剖结构的影响 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31 (9): 107–113.
- [30] Bi L D, Zhang B, Liu G G, et al. Long-term effects of

- organic amendments on the rice yields for double rice cropping systems in subtropical China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 129 (4): 534–541.
- [31] Wang W, Lai D Y F, Wang C, et al. Effects of rice straw incorporation on active soil organic carbon pools in a subtropical paddy field [J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 152: 8–16.
- [32] 李伦, 罗强, 吴士龙, 等. 渔稻养作及其在涝渍地综合利用中的研究综述 [J]. *节水灌溉*, 2016 (5): 75–80.
- [33] Hou P F, Xue L X, Zhou Y L, et al. Yield and N utilization of transplanted and direct-seeded rice with controlled or slow-release fertilizer [J]. *Agronomy Journal*, 2019, 111 (3): 1208–1217.
- [34] 侯红乾, 林洪鑫, 刘秀梅, 等. 长期施肥处理对双季晚稻叶绿素荧光特征及籽粒产量的影响 [J]. *作物学报*, 2020, 46 (2): 280–289.
- [35] 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.
- [36] 倡国涵, 彭成林, 徐祥玉, 等. 稻-虾共作模式对涝渍稻田土壤微生物群落多样性及土壤肥力的影响 [J]. *土壤*, 2016, 48 (3): 503–509.

Effects of nitrogen fertilizer types on rice growth and yield in different rice farming models

JIANG Shuo-chen, ZHANG Hai-wei, KONG Pan, DU Bin, WU Qi-xia*, ZHU Jian-qiang* (College of Agriculture, Yangtze University, Engineering Research Center for Wetland Ecology and Agricultural Utilization, Ministry of Education, Jingzhou Hubei 434025)

Abstract: The effects of compound fertilizer, slow/controlled release fertilizer, organic-inorganic mixed fertilizer and no nitrogen fertilizer on the growth dynamics and yield of rice under the conventional mid-season rice and the rice-shrimp symbiosis were explored to provide a theoretical basis for optimizing nitrogen management and improve yield under different rice farming models. The split zone design was adopted, with 2 rice cultivation patterns as the main zone and 4 nitrogen fertilizer types as the split zone. The rice leaf area index (LAI), photosynthetic potential (LAD), dry matter accumulation (DW), growth rate, photosynthetic characteristics were investigated during the main growth period of rice, and the yield and yield component factors were determined at maturity, and the harvest index and nitrogen partial productivity were calculated. The results showed that the total growth period was prolonged under the rice-shrimp symbiosis. LAI at heading stage, DW at heading and maturity stages, growth rate, SPAD at heading, net photosynthetic rate and yield were significantly reduced, LAD from heading to maturity stage increased significantly. The reproductive growth period and total growth period of no nitrogen treatment under the conventional mid-season rice were shorter than those of other treatments, and the vegetative growth period and total growth period of no nitrogen treatment under the rice-shrimp symbiosis were longer than those of other treatments. The organic-inorganic mixed fertilizer had the highest LAI, LAD, photosynthetic capacity at heading stage and 1000-grain weight. The photosynthetic capacity at the tillering stage and growth rate from the heading stage to the maturity stage of the treatment of compound fertilizer were the highest. Slow/controlled release fertilizer had the DW, growth rate from tillering stage to heading stage, effective panicles number, yield and partial productivity of nitrogen fertilizer were the highest for the treatment of slow/controlled release fertilizer. Slow/controlled release fertilizer was the best nitrogen fertilizer with the highest rice yield and nitrogen partial productivity under the two rice farming modes.

Key words: nitrogen fertilizer type; rice-shrimp symbiosis; conventional mid-season rice; rice growth; yield