



李炜星,狄一春,蔡怡聪,等.稻虾轮作模式下氮肥运筹对水稻产量与品质的影响[J].江西农业大学学报,2024,46(4):819–829.

LI W X,DI Y C,CAI Y C,et al.Effects of nitrogen fertilizer management on rice yield and quality under rice shrimp rotation system [J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2024,46(4):819–829.

稻虾轮作模式下氮肥运筹对水稻产量与品质的影响

李炜星,狄一春,蔡怡聪,陈小荣,孙晓棠,贺浩华,朱昌兰*

(江西农业大学 农学院/教育部作物生理生态与遗传育种重点实验室,江西 南昌 330045)

摘要:【目的】旨在研究氮肥运筹对稻虾轮作模式下水稻产量与品质的影响。【方法】以野香优明月丝苗和农香42为试验材料,设计不同施氮量和不同时期施肥比例进行试验。【结果】与常规施氮量(195 kg/hm²)相比,野香优明月丝苗在减量15%和减量30%施氮量情况下,产量下降不显著;而农香42在减量15%和减量30%施氮量情况下,产量显著增加。野香优明月丝苗在基肥:分蘖肥:穗肥=4:4:2时,每穗粒数、结实率和千粒质量最大,产量最高;而农香42在基肥:分蘖肥:穗肥=5:3:2时,单位面积有效穗数、每穗粒数、结实率和千粒质量最大,产量最高。随着施氮量的减少,野香优明月丝苗的整精米率和农香42的整精米率显著提高,加工品质得到改善。2个品种的垩白粒率和垩白度影响均不显著,直链淀粉含量显著提高,蛋白质含量显著降低,峰值粘度和崩解值呈先增加后降低趋势,以施氮量165.8 kg/hm²为最大。野香优明月丝苗在基肥:分蘖肥:穗肥=4:4:2时,农香42在基肥:分蘖肥:穗肥=5:3:2时精米率、整精米率、胶稠度、峰值粘度和崩解值最大,垩白粒率、垩白度和直链淀粉含量最小。【结论】在稻虾轮作模式下,减氮15%~30%,施氮比例为4:4:2或5:3:2时,有利于水稻节氮增效,优质高产。

关键词:稻虾轮作;施氮量;施肥比例;水稻;产量;品质

中图分类号:S511 文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2286(2024)04-0819-11



Effects of nitrogen fertilizer management on rice yield and quality under rice shrimp rotation system

LI Weixing, DI Yichun, CAI Yicong, CHEN Xiaorong,
SUN Xiaotang, HE Haohua, ZHU Changlan*

(College of Agronomy, Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Ministry of Education, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

收稿日期:2024-02-29 修回日期:2024-03-30

基金项目:江西省重点研发计划项目(20192ACB60009)和江西省稻田综合种养产业技术体系(JXARS-12)

Project supported by the Key Research and Development Project of Jiangxi Province (20192ACB60009) and the Technical System of Rice Field Comprehensive Planting and Breeding Industry of Jiangxi Province (JXARS-12)

作者简介:李炜星,实验师,orcid.org/0009-0003-6981-5689,lwx6072@163.com;*通信作者:朱昌兰,教授,博士生导师,主要从事水稻遗传育种及稻田综合种养技术研究,orcid.org/0000-0003-1289-3697,zhuchanglan@163.com。

©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

Abstract: [Objective] The aim of this study was to explore the effects of nitrogen fertilizer management on rice yield and quality under rice shrimp rotation mode. [Method] Using Yexiangyou Mingyuesimiao and Nongxiang 42 as experimental materials, different nitrogen application mounts and ratios at different stages were designed. [Result] With a 15% or 30% reduction based on the conventional nitrogen application amount (195 kg/hm^2), the yield of Yexiangyou Mingyuesimiao did not significantly decrease, while the yield of Nongxiang 42 significantly increased. When the ratio of basal fertilizer: tillering fertilizer: panicle fertilizer was 4:4:2, the number of grains per panicle, seed setting rate and 1 000-grain weight of Yexiangyoumingyuesimiao were the highest, and the yield was the highest. When the ratio of basal fertilizer: tillering fertilizer: panicle fertilizer was 5:3:2, the effective panicle number per unit area, grain number per panicle, seed setting rate and 1 000-grain weight of Nongxiang 42 were the largest, and the yield was the highest. With the decrease of nitrogen application rate, the milled rice rate of Yexiangyou Mingyuesimiao and amylose content was significantly increased, while the protein content was significantly reduced. The peak viscosity and breakdown viscosity showed a trend of first increasing and then decreasing, reaching their maximums with the nitrogen application amount of 165.8 kg/hm^2 . When the ratio of basal fertilizer: tillering fertilizer: panicle fertilizer was 4:4:2 for Yexiangyou Mingyuesimiao and 5:3:2 for Nongxiang 42, the milled rice rate, head milled rice rate, gel consistency, peak viscosity and breakdown viscosity were the highest, while chalky grain rate, chalkiness degree, and amylose content were the lowest. [Conclusion] Under the rice-shrimp rotation system, reducing nitrogen application rate by 15%–30% and applying nitrogen at a ratio of 4:4:2 or 5:3:2 is beneficial to rice nitrogen efficiency, high quality and high yield.

Keywords: rice-shrimp rotation; nitrogen application amount; nitrogen application ratio; rice; yield; quality

【研究意义】稻虾综合种养是一种稻养虾、虾养稻的互利共生生态模式,它充分利用稻田立体空间,在种植水稻的基础上养殖小龙虾,生产稻谷的同时又能生产优质安全的动物产品满足多元化消费需求,实现“一田双收、双水双绿”,具有显著的社会、经济和生态效益,已成为乡村振兴的新兴主导产业之一而得到迅速发展。据统计,全国稻虾综合种养的面积已经达到 156.7 万 hm^2 ,江西省稻虾综合种养的面积 18 万 hm^2 。因此,加强稻虾综合种养技术的研究具有重要意义。【前人研究进展】氮是影响水稻生产的重要营养元素,位于水稻生长发育所需的三大营养元素之首。合理施用氮肥不仅可以提高水稻氮素吸收利用效率,提高产量和品质,达到节本增效的目的,而且可以减少因过量施用氮肥造成的环境污染和资源浪费^[1],因此,研究氮肥运筹对水稻产量和品质的影响,建立氮肥施用精准管理技术具有重要意义。在水稻单作模式下,国内外学者关于氮肥运筹的原理和技术进行了长期和多方面的研究,取得了许多重要进展,形成了成熟的高产高效氮肥运筹技术体系^[2-7],但在稻虾综合种养模式下的氮肥运筹原理和技术研究却鲜有报道。与水稻单作相比,在稻虾综合种养模式下由于饲料投喂、小龙虾代谢、水草还田等原因,土壤结构得到改善,土壤养分特别是氮素营养也得到显著增加^[8-10]。有研究表明,相比于水稻单作模式,稻虾共作的有机质、全氮、铵态氮、硝态氮、碱解氮分别增加了 14.35%、6.38%、9.33%、12.42%、14.19%^[11]。因此,稻虾综合种养模式下的稻田土壤环境与水稻单作相比有明显差异,沿用传统的水稻单作模式的氮肥运筹技术,不仅稻虾综合种养的优势难以得到充分发挥,甚至导致水稻产量减产和品质下降。

【本研究切入点及拟解决的关键问题】稻虾综合种养分为稻虾共作和稻虾轮作两种模式,稻虾共作模式是在同一块稻田中在种植水稻的同时又养殖小龙虾,而稻虾轮作是在同一块稻田中先养殖一季小龙虾接着种植一季水稻的连续生产模式,即虾后种稻,养虾与种植水稻时间错开。目前,江西生产上绝大部分采用的是稻虾轮作模式,为此,本试验设置不同氮肥用量和不同时期的施氮比例,研究氮肥运筹对稻虾轮作模式下的水稻产量和品质的影响,旨在探究适宜的氮肥用量和施肥比例,为稻虾轮作模式下的水稻高产优质栽培技术提供数据支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验地点与材料

试验在江西省南昌市恒湖垦殖场(28°98'N,116°09'E)进行。恒湖垦殖场地处鄱阳湖冲积平原,年平均气温17.4℃,年活动积温5 760.4℃,年平均降水量1 608.8 mm,无霜期289 d。选择管理良好、持续稻虾轮作7年的代表性稻田,土壤全氮2.2 g/kg,碱解氮113.40 mg/kg,速效钾114.92 mg/kg,有效磷6.4 mg/kg,有机质30.33 g/kg,pH值5.03。

供试水稻品种为野香优明月丝苗和农香42,轮作的水产品是克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*)。

1.2 试验设计

采用施氮量和不同时期施氮比例两因素裂区设计。每个品种以不同的施氮量为主区:常规施氮(N_1),每公顷施纯氮195 kg;氮肥减量15%(N_2),每公顷施纯氮165.8 kg;氮肥减量30%(N_3),每公顷施纯氮136.5 kg。在每个主区上设置4个施氮比例处理: M_1 ,基肥:分蘖肥:穗肥=6:2:2; M_2 ,基肥:分蘖肥:穗肥=5:3:2; M_3 ,基肥:分蘖肥:穗肥=4:4:2; M_4 ,基肥:分蘖肥:穗肥=4:3:3。各小区均施磷(P_2O_5)90 kg/hm²,做基肥一次性施用。钾(K_2O)150 kg/hm²,按基肥:穗肥=5:5的比例2次施入。每个处理3个重复。小区面积为24 m²。小区之间用40 cm高的塑料隔水板进行隔离,防止串肥。重复之间留0.5 m过道,四周留排水沟,确保单灌单排。

1.3 田间管理

6月7日播种,采用湿润育秧。在小龙虾收获后,稻田及时排水、晒田和翻耕,在秧龄25 d时进行人工移栽,行株距20 cm×20 cm,野香优明月丝苗每蔸种2苗,农香42每蔸种3~4苗。在移栽前2 d施用基肥,插秧后5~7 d施用分蘖肥,在倒二叶抽出后施用穗肥,其他栽培管理措施同常规高产大田。

1.4 测定项目和方法

1.4.1 水稻产量及构成因素的测定

在水稻成熟时,每个品种每小区调查50蔸水稻的有效穗数,计算平均穗数,按平均穗数取样5蔸,分别考查产量构成因素,包括每穗总粒数、空瘪粒数、结实率和千粒质量。每个小区除去边行后,收割全部水稻植株稻谷,用PM-8188-A谷物水分测定仪测定稻谷实际含水量,再折算成稻谷实际产量。

1.4.2 稻米品质测定

在水稻成熟期收割稻谷,自然晒干至标准含水量,放置储存2个月后,进行糙米率、精米率、整精米率、垩白率、垩白度、直链淀粉含量、胶稠度等稻米品质性状测定,方法参照中华人民共和国国家标准GB/T 17891—2017《优质稻谷》和农业部颁行业标准《NY/T593—2021食用稻品种品质》。

1.4.3 稻米RVA谱特征值测定

采用澳大利亚Newport Scientific仪器公司生产的3-D型RVA快速测定仪对稻米RVA特征值进行测定,数据分析采用TCW配套软件。测定项目包括最高黏度(peak viscosity,PKV)、热浆黏度(hot paste viscosity,HPV)、冷胶黏度(cool paste viscosity,CPV)、崩解值(breakdown viscosity,BDV)、消减值(setback viscosity,SBV)和回复值(consistence viscosity,CSV)、糊化温度(pasting temperature,PaT)

1.4.4 数据处理及方法

采用DPS7.05进行数据分析,用最小显著性差异法(LSD)进行显著性检验,显著性水平设置为 $P=0.05$ 和 0.01 。

2 结果与分析

2.1 稻虾轮作模式下氮肥运筹对水稻产量及其构成因素的影响

从表1可知,在稻虾轮作模式下,施氮比例对水稻产量的影响显著大于施氮量。不同施氮量处理下2个水稻品种的产量表现不同,野香优明月丝苗在3个施氮量处理间的产量没有显著差异,而农香42的产量随着施氮量的减少而增加, N_1 处理的产量显著低于 N_2 和 N_3 处理。不同施氮比例对2个水稻品种产量的影响存在差异,野香优明月丝苗的产量由高到低依次为 M_3 、 M_2 、 M_4 和 M_1 ,即施氮比例为4:4:2时的产量显著大于6:2:2和4:3:3,但与5:3:2处理的差异未达显著水平。农香42的产量由高到低依次为 M_2 、

M_3 、 M_4 和 M_1 ,即施氮比例为5:3:2时的产量显著大于4:3:3,极显著大于6:2:2,与4:4:2处理的产量差异未达显著水平。

表1 稻虾轮作模式下氮肥运筹对产量及其构成因素的影响

Tab.1 The effect of nitrogen fertilizer management on yield and its constituent factors under rice shrimp rotation mode

品种 Varieties	处理 Treatment		有效穗/($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$) Effective panicles	每穗粒数 Spikelets panicle	结实率/% Seed setting rate	千粒质量/g 1 000-grain weight	实际产量/($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$) Measured Yield
野香优明月 丝苗 YM	施氮量	N_1	345.48 ^{aA}	176.60 ^c	74.91 ^a	18.07 ^a	7.43 ^{aA}
		N_2	335.83 ^{abA}	180.50 ^b	70.46 ^a	17.81 ^a	7.15 ^{aA}
		N_3	315.21 ^{bA}	192.98 ^a	73.71 ^a	18.24 ^a	7.25 ^{aA}
	施氮比例	M_1	349.49 ^{aA}	172.15 ^{bB}	70.74 ^{bA}	17.70 ^{cB}	6.89 ^{bcA}
		M_2	341.11 ^{abA}	182.08 ^{abAB}	72.74 ^{abA}	18.16 ^{abAB}	7.50 ^{abA}
		M_3	327.14 ^{bcAB}	194.21 ^{aA}	76.53 ^{aA}	18.41 ^{aA}	7.74 ^{aA}
		M_4	310.95 ^{cB}	185.00 ^{aAB}	72.08 ^{abA}	17.91 ^{bcAB}	6.99 ^{bA}
	方差分析	N	*	**	NS	NS	NS
		M	**	*	*	*	**
		N×M	NS	NS	NS	NS	NS
农香42 NX42	施氮量	N_1	315.46 ^{bB}	120.26 ^b	79.53 ^{ab}	25.98 ^a	7.36 ^{bcAB}
		N_2	341.03 ^{aA}	121.15 ^b	78.70 ^b	26.03 ^a	8.05 ^{abA}
		N_3	353.41 ^{aA}	132.99 ^a	81.46 ^a	26.15 ^a	8.39 ^{aA}
	施氮比例	M_1	327.90 ^{cB}	119.94 ^{bA}	78.51 ^{bB}	25.70 ^{cB}	7.23 ^{cC}
		M_2	344.93 ^{aA}	128.14 ^{aA}	82.19 ^{aA}	26.46 ^{aA}	8.68 ^{aA}
		M_3	340.72 ^{abAB}	126.90 ^{aA}	79.86 ^{bAB}	26.16 ^{abAB}	8.18 ^{abAB}
		M_4	332.97 ^{bcAB}	124.22 ^{abA}	79.03 ^{bB}	25.90 ^{bcAB}	7.65 ^{bcBC}
	方差分析	N	**	**	NS	NS	*
		M	*	NS	**	**	**
		N×M	NS	NS	NS	NS	NS

不同大、小写字母分别表示差异极显著($P < 0.01$)和显著($P < 0.05$),NS表示差异不显著($P > 0.05$),*、**分别表示差异显著($P < 0.05$)和极显著($P < 0.01$);YM:野香优明月丝苗,NX42:农香42。

The different uppercase and lowercase letters represent $P < 0.01$ and $P < 0.05$, NS: not significant ($P > 0.05$). * and ** represent $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively; YM: Yexiangyou Mingyuesimiao; NX42: Nongxiang 42.

从产量构成因素来看,施氮量主要影响了单位面积有效穗数和每穗粒数。各产量构成因素在2个水稻品种中的表现趋势不完全一致,其中野香优明月丝苗的单位面积有效穗数随着施氮量的减少而减少, N_1 处理的单位面积有效穗数显著大于 N_3 处理,而 N_1 与 N_2 间的单位面积有效穗数未达显著差异。农香42的单位面积有效穗数则随着施氮量的减少而增加, N_2 和 N_3 处理的单位面积有效穗数极显著大于 N_1 处理;2个品种的每穗粒数则均随着施氮量的减少而增加,野香优明月丝苗3个施氮量处理间的每穗粒数差异均显著,而农香42的每穗粒数 N_3 处理显著高于 N_1 和 N_2 处理, N_1 与 N_2 间的每穗粒数差异不显著。在同一施氮量下,施氮比例对有效穗数、每穗粒数、结实率和千粒质量有显著影响,其中单位面积有效穗数与千粒质量的表现趋势一致,野香优明月丝苗的单位面积有效穗数由多到少依次为 M_1 、 M_2 、 M_3 和 M_4 ,即施氮比例6:2:2、5:3:2、4:4:2和4:3:3,其中 M_1 和 M_2 的单位面积有效穗数极显著大于 M_4 。而农香42的单位面积有效穗数由多到少依次为 M_2 、 M_3 、 M_4 和 M_1 ,即施氮比例5:3:2、4:4:2、4:3:3和6:2:2, M_2 与 M_1 的单位面积有效穗数达极显著差异。每穗粒数,野香优明月丝苗由多到少依次为 M_3 、 M_4 、 M_2 和 M_1 ,其中 M_3 和 M_2 的每穗粒数极显著大于 M_1 ;而农香42的每穗粒数由多到少依次为 M_2 、 M_3 、 M_4 和 M_1 , M_2 和 M_3 处理的每穗粒数显著大于 M_1 。结实率,野香优明月丝苗由大到小依次为 M_3 、 M_2 、 M_4 和 M_1 ,即施氮比例4:4:2、5:3:2、4:3:3和6:2:2,其中 M_3 与 M_1 处理间的差异达到显著水平;农香42的结实率由大到小依次为 M_2 、 M_3 、 M_4 和

M_1 、 M_2 的结实率显著高于 M_3 ,极显著高于 M_4 和 M_1 。千粒质量的表现趋势与结实率一致,野香优明月丝苗由多到少依次为 M_3 、 M_2 、 M_4 和 M_1 , M_3 的千粒质量极显著大于 M_1 ;农香42的千粒质量由大到小依次为 M_2 、 M_3 、 M_4 和 M_1 , M_2 的千粒质量极显著大于 M_1 。

2.2 稻虾轮作模式下氮肥运筹对稻米加工和外观品质的影响

由表2可知,在稻虾轮作模式下,无论是野香优明月丝苗还是农香42,施氮量和施肥比例对稻谷出糙米率的影响均不显著。精米率和整精米率的表现2个品种间存在差异,野香优明月丝苗的精米率随着施氮量的增加而减少,3种施氮量之间的精米率差异均达显著, N_3 与 N_2 、 N_1 之间的精米率差异达极显著水平;农香42的精米率在各施氮量处理之间差异不显著。野香优明月丝苗各施氮量处理间的整精米率差异不显著,而农香42各施氮量处理间的整精米率差异达显著水平,随着施氮量的减少整精米率呈增加趋势,其中 N_3 处理的整精米率极显著大于 N_1 。施氮量对2个品种的垩白粒率和垩白度都没有显著影响。

施氮比例对野香优明月丝苗和农香42的糙米率影响不显著,对精米率、整精米率、垩白粒率、垩白度、直链淀粉、胶稠度和蛋白质有显著或极显著影响。同一施氮量下,野香优明月丝苗的精米率、整精米率、垩白粒率和垩白度由高到低依次为 M_3 、 M_2 、 M_4 和 M_1 ,即施氮比例4:4:2、5:3:2、4:3:3和6:2:2,而农香42的精米率、整精米率、垩白粒率和垩白度由高到低依次为 M_2 、 M_3 、 M_4 和 M_1 ,即施氮比例5:3:2、4:4:2、4:3:3和6:2:2。

表2 稻虾轮作模式下氮肥运筹对稻米加工和外观品质的影响

Tab.2 The effect of nitrogen fertilizer management on rice processing and appearance quality under rice shrimp rotation mode

品种	施氮处理		糙米率/%	精米率/%	整精米率/%	垩白粒率/%	垩白度/%
Varieties	Treatment		Brown rice rate	Milled rice rate	Head milled rice rate	Chalky percentage	Chalkiness CD
野香优明 月丝苗 YM	施氮量	N_1	80.46 ^{aA}	71.76 ^{cB}	68.23 ^{aA}	7.83 ^{aA}	2.19 ^{aA}
		N_2	80.57 ^{aA}	71.83 ^{bB}	68.67 ^{aA}	8.00 ^{aA}	2.17 ^{aA}
		N_3	80.53 ^{aA}	71.94 ^{aA}	68.86 ^{aA}	7.75 ^{aA}	2.15 ^{aA}
	施氮比例	M_1	80.41 ^{aA}	71.63 ^{dC}	67.96 ^{cB}	8.67 ^{aA}	2.38 ^{aA}
		M_2	80.42 ^{aA}	71.89 ^{bB}	68.67 ^{bAB}	7.44 ^{bB}	2.05 ^{bB}
		M_3	80.60 ^{aA}	72.08 ^{aA}	69.44 ^{aA}	7.00 ^{bB}	1.96 ^{bB}
		M_4	80.63 ^{aA}	71.77 ^{cBC}	68.28 ^{bCB}	8.33 ^{aA}	2.29 ^{aA}
	方差分析	N	NS	**	NS	NS	NS
		M	NS	**	**	**	**
		N×M	NS	NS	NS	NS	NS
农香42 NX42	施氮量	N_1	80.62 ^{aA}	70.00 ^{aA}	57.68 ^{cB}	9.46 ^{aA}	2.83 ^{aA}
		N_2	80.71 ^{aA}	70.18 ^{aA}	57.89 ^{bAB}	9.29 ^{aA}	2.68 ^{aA}
		N_3	80.75 ^{aA}	70.24 ^{aA}	58.04 ^{aA}	9.08 ^{aA}	2.64 ^{aA}
	施氮比例	M_1	80.61 ^{aA}	69.74 ^{dC}	57.66 ^{dC}	9.62 ^{aA}	3.06 ^{aA}
		M_2	80.60 ^{aA}	70.47 ^{aA}	58.09 ^{aA}	8.83 ^{bC}	2.33 ^{cA}
		M_3	80.70 ^{aA}	70.32 ^{bA}	57.96 ^{bAB}	9.11 ^{bBC}	2.62 ^{bB}
		M_4	80.86 ^{aA}	70.03 ^{cB}	57.79 ^{bBC}	9.55 ^{aAB}	2.87 ^{aAB}
	方差分析	N	NS	**	NS	NS	NS
		M	NS	**	**	**	**
		N×M	NS	NS	NS	NS	NS

不同大、小写字母分别表示差异极显著($P<0.01$)和显著($P<0.05$),NS表示差异不显著($P>0.05$),*、**分别表示差异显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$);YM:野香优明月丝苗,NX42:农香42。

The different uppercase and lowercase letters represent $P<0.01$ and $P<0.05$, NS: not significant ($P>0.05$). * and ** represent $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively; YM: Yexiangyou Mingyuesimiao; NX42: Nongxiang 42.

2.3 稻虾轮作模式下氮肥运筹对稻米蒸煮食味品质和蛋白质含量的影响

从表 3 可知,在稻虾轮作模式下,施氮量对稻米直链淀粉含量和胶稠度的影响在 2 个品种间存在差异,野香优明月丝苗的直链淀粉含量随着施氮量的减少呈增加趋势,处理间差异极显著;而农香 42 各施氮量处理间的直链淀粉含量差异不显著。施氮量对野香优明月丝苗的胶稠度没有显著影响,而农香 42 各施氮量处理之间的胶稠度差异极显著,随着施氮量的减少胶稠度增加。施氮量对 2 个品种的蛋白质含量影响表现趋势相同,蛋白质含量由高到低均依次为 N_1 、 N_2 和 N_3 ,野香优明月丝苗的蛋白质含量各施氮量处理间差异显著或极显著,农香 42 的蛋白质含量在 N_1 与 N_3 处理间的差异显著。

从施氮比例来看,对稻米直链淀粉含量、胶稠度和蛋白质含量均有显著或极显著影响。直链淀粉含量随着后期施肥比例的增加呈现先减少后增加趋势,野香优明月丝苗的直链淀粉含量 M_3 处理最低,而农香 42 的直链淀粉含量 M_2 处理最低。胶稠度随着后期施肥比例的增加呈现先增加后减少趋势,野香优明月丝苗的胶稠度 M_3 处理最大,而农香 42 的胶稠度 M_2 处理最大。稻米蛋白质含量随着后期施肥比例的增加而增加,各处理间蛋白质含量达显著或极显著差异。

表 3 稻虾轮作模式下氮肥运筹对稻米蒸煮食味品质和蛋白质含量的影响

Tab.3 The effect of nitrogen fertilizer management on the cooking and taste quality and protein content of rice under rice shrimp rotation mode

品种 Varieties	处理 Treatment		直链淀粉含量/% Amylose content	胶稠度/mm Gel consistency	碱消值(级) Alkali digestion value	蛋白质含量/% Protein content
野香优明月 丝苗 YM	施氮量	N_1	18.04 ^{cC}	57.75 ^{aA}	6.8	11.81 ^{aA}
		N_2	18.35 ^{bB}	57.63 ^{aA}	6.8	11.43 ^{bA}
		N_3	18.55 ^{aA}	57.38 ^{aA}	6.8	10.86 ^{cB}
	施氮比例	M_1	18.66 ^{aA}	53.33 ^{bB}	6.8	10.95 ^{bB}
		M_2	18.29 ^{bB}	59.33 ^{aA}	6.8	11.16 ^{bB}
		M_3	17.87 ^{cC}	60.33 ^{aA}	6.8	11.58 ^{aA}
		M_4	18.44 ^{bB}	57.33 ^{aAB}	6.8	11.78 ^{aA}
	方差分析	N	**	NS	NS	**
		M	**	**	NS	**
		N×M	**	NS	NS	NS
农香 42 NX42	施氮量	N_1	19.41 ^{aA}	48.21 ^{cC}	6.8	9.96 ^{aA}
		N_2	19.60 ^{aA}	54.88 ^{bB}	6.8	9.88 ^{abA}
		N_3	19.64 ^{aA}	64.79 ^{aA}	6.8	9.74 ^{bA}
	施氮比例	M_1	19.77 ^{aA}	50.17 ^{dC}	6.8	9.67 ^{cB}
		M_2	19.19 ^{cB}	61.78 ^{aA}	6.8	9.79 ^{bCB}
		M_3	19.56 ^{bA}	57.89 ^{bAB}	6.8	9.86 ^{bB}
		M_4	19.72 ^{abA}	54.00 ^{cBC}	6.8	10.14 ^{aA}
	方差分析	N	NS	**	NS	*
		M	**	**	NS	**
		N×M	NS	NS	NS	NS

不同大、小写字母分别表示差异极显著($P<0.01$)和显著($P<0.05$),NS表示差异不显著($P>0.05$),*、**分别表示差异显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$);YM:野香优明月丝苗,NX42:农香 42。

The different uppercase and lowercase letters represent $P<0.01$ and $P<0.05$, NS: not significant ($P>0.05$). * and ** represent $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively; YM: Yexiangyou Mingyuesimiao; NX42: Nongxiang 42.

2.4 稻虾轮作模式下氮肥运筹对稻米 RVA 谱特征值的影响

由表 4 可知,施氮量对稻米的峰值粘度、热浆粘度、崩解值和成糊温度有显著或极显著影响。峰值粘度、崩解值和成糊温度在 2 个水稻品种中的表现趋势基本一致,随着施氮量的减少,峰值粘度、崩解值和

成糊温度呈现先增大后减小的趋势,以 N_2 处理为最大。热浆粘度在2个品种间的表现存在差异,野香优明月丝苗的热浆粘度由高到低依次为 N_1 、 N_2 和 N_3 ,其中 N_1 和 N_2 与 N_3 的差异达显著水平;而农香42的热浆粘度由高到低依次为 N_2 、 N_3 和 N_1 ,其中 N_2 与 N_1 的差异达显著水平。

从不同施氮比例来看,对稻米的峰值粘度、热浆粘度、崩解值和糊化温度产生了显著或极显著影响,随施氮比例的不同而呈现先增大后减小的趋势。野香优明月丝苗的峰值粘度、热浆粘度、崩解值、最终粘度由大到小均依次为 M_3 、 M_2 、 M_4 和 M_1 ,即施氮比例4:4:2、5:3:2、4:3:3和6:2:2,其中峰值粘度 M_3 显著大于 M_2 ,极显著大于 M_4 和 M_1 ;热浆粘度和崩解值 M_3 显著大于 M_4 ,极显著大于 M_1 ;最终粘度 M_3 显著大于 M_2 ,极显著大于 M_4 和 M_1 。农香42的峰值粘度、热浆粘度、崩解值、最终粘度由大到小均依次为 M_2 、 M_3 、 M_4 和 M_1 ,即施氮比例5:3:2、4:4:2、4:3:3和6:2:2,其中峰值粘度 M_2 显著大于 M_3 ,极显著大于 M_1 和 M_4 ;热浆粘度和崩解值 M_2 显著大于 M_4 ,极显著大于 M_1 ;最终粘度 M_2 显著大于 M_1 。糊化温度在2个水稻品种间的表现趋势一致, M_2 与 M_1 差异不显著,显著或极显著大于 M_3 和 M_4 。

表4 稻虾轮作模式下氮肥运筹对稻米RVA谱特征值的影响

Tab.4 The effect of nitrogen fertilizer management on the characteristic values of rice RVA spectrum under rice shrimp rotation mode

品种 Varieties	施氮处理 Treatment		峰值粘度 PKV(cp)	热浆粘度 HPV(cp)	崩解值 BDV(cp)	最终粘度 CPV(cp)	消减值 SBV(cp)	回复值 CSV(cp)	糊化温度/°C PaT
野香优 明月丝苗 YM	施氮量	N_1	3 108.42 ^{bB}	1 548.58 ^{aA}	1 559.83 ^{bA}	2 709.33 ^{aA}	-399.08 ^{bAB}	1 160.75 ^{bB}	76.17 ^{aAB}
		N_2	3 168.83 ^{aA}	1 539.79 ^{aA}	1 629.04 ^{aA}	2 730.75 ^{aA}	-438.08 ^{bB}	1 190.96 ^{bAB}	76.22 ^{aA}
		N_3	3 085.83 ^{bB}	1 475.33 ^{bA}	1 610.50 ^{abA}	2 763.92 ^{aA}	-321.92 ^{aA}	1 288.58 ^{aA}	75.82 ^{bB}
	施氮比例	M_1	3 017.33 ^{cC}	1 470.17 ^{bB}	1 547.17 ^{bB}	2 680.11 ^{cC}	-337.22 ^{aA}	1 209.94 ^{aA}	76.28 ^{aAB}
		M_2	3 144.11 ^{bAB}	1 519.44 ^{abAB}	1 624.67 ^{abAB}	2 742.33 ^{bAB}	-401.78 ^{abAB}	1 222.89 ^{aA}	76.32 ^{aA}
		M_3	3 240.00 ^{aA}	1 584.22 ^{aA}	1 655.78 ^{aA}	2 794.00 ^{aA}	-446.00 ^{bB}	1 209.78 ^{aA}	75.72 ^{bC}
		M_4	3 082.67 ^{bcC}	1 511.11 ^{bAB}	1 571.56 ^{bAB}	2 722.22 ^{bcBC}	-360.44 ^{aAB}	1 211.11 ^{aA}	75.95 ^{bBC}
	方差分析	N	**	*	*	NS	*	*	*
		M	**	*	*	**	*	NS	**
		N×M	NS	NS	NS	NS	NSns	NS	**
农香42 NX42	施氮量	N_1	3 231.08 ^{bB}	1 585.58 ^{bA}	1 645.50 ^{abA}	2 632.50 ^{aA}	-598.58 ^{aA}	1 046.92 ^{aA}	74.54 ^{bAB}
		N_2	3 353.83 ^{aA}	1 646.58 ^{aA}	1 707.25 ^{aA}	2 710.92 ^{aA}	-642.92 ^{aA}	1 064.33 ^{aA}	74.83 ^{aA}
		N_3	3 229.75 ^{bB}	1 611.79 ^{abA}	1 617.96 ^{bA}	2 608.50 ^{aA}	-621.25 ^{aA}	996.71 ^{aA}	74.26 ^{cB}
	施氮比例	M_1	3 151.78 ^{dC}	1 578.11 ^{bB}	1 573.67 ^{cB}	2 596.56 ^{bA}	-555.22 ^{aA}	1 018.44 ^{aA}	74.63 ^{aA}
		M_2	3 388.11 ^{aA}	1 658.72 ^{aA}	1 729.39 ^{aA}	2 710.56 ^{aA}	-677.56 ^{bA}	1 051.83 ^{aA}	74.62 ^{abA}
		M_3	3 306.89 ^{bAB}	1 623.56 ^{abAB}	1 683.33 ^{abAB}	2 668.78 ^{abA}	-638.11 ^{abA}	1 045.22 ^{aA}	74.46 ^{bA}
		M_4	3 239.44 ^{cB}	1 598.22 ^{bA}	1 641.22 ^{bcAB}	2 626.67 ^{abA}	-612.78 ^{abA}	1 028.44 ^{aA}	74.46 ^{bA}
	方差分析	N	**	*	NS	NS	NS	NS	**
		M	**	*	**	NS	NS	NS	
		N×M	NS	NS	NS	NS	NS	NS	**

不同大、小写字母分别表示差异极显著($P<0.01$)和显著($P<0.05$),NS表示差异不显著($P>0.05$),*、**分别表示差异显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$);YM:野香优明月丝苗,NX42:农香42。

The different uppercase and lowercase letters represent $P<0.01$ and $P<0.05$, NS: not significant ($P>0.05$). * and ** represent $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively; YM: Yexiangyou Mingyuesimiao; NX42: Nongxiang 42.

3 讨论与结论

3.1 稻虾轮作模式下施氮量和施氮比例对水稻产量及其构成因素的影响

在水稻单作模式下,国内外学者关于氮肥运筹对水稻产量及其构成因素的影响进行了大量的研究,

对于施氮量对水稻产量的影响,大部分观点较为一致,即随着施氮量的增加产量呈先升后降趋势,也就是说在一定范围内水稻产量随施氮量的增加而增加,超过一定范围后水稻产量则表现出相反趋势^[2-7,12-14]。氮肥在不同时期的施用比例对水稻产量的影响因种植季别、亚种类型、品种基因型的不同而表现差异,一般认为早籼稻或全生育期较短的双季晚稻,适宜的基肥、分蘖肥、穗肥施氮比例为6:2:2,中籼稻和中迟熟双季晚稻适宜的基肥、分蘖肥、穗肥施氮比例为5:3:2或5:2:3为宜^[15-18]。

与水稻单作相比,在稻虾综合种养模式下由于饲料投喂、小龙虾代谢等原因,改善了土壤结构,显著增加了土壤养分特别是氮素营养^[8-10],稻虾综合种养模式下与水稻单作模式下的这种土壤地力环境差异势必影响到种植过程中水稻对氮素的反应,但在稻虾综合种养模式下水稻减氮多少合适以及不同时期的施氮比例怎么分配仍不清楚。按水产行业标准SC/T 1135.1—2017,单位面积化肥使用量与传统水稻单作模式相比应减少30%以上。余振渊^[19]研究表明,稻虾共作模式下,随施氮量增加水稻产量变化趋势表现不同,常规稻品种鄂中6号产量随着施氮量的增加呈现先增后降的趋势,在施氮量162 kg/hm²处理达到最大值。杂交稻品种隆两优534表现为随着施氮量的增加而上升,施氮量180 kg/hm²处理达到最大值。温鑫^[20]研究也发现,施氮量对虾稻产量的影响,表现为产量随施氮量增加呈先升后降趋势,其中玉针香在施氮量120 kg/hm²水平下产量最高,黄华占、鄂丰丝苗、虾稻一号在施氮量150 kg/hm²水平下产量最高。黄飞等^[21]研究认为,120~130 kg/hm²可以作为稻虾共作系统推荐施氮量,而长期稻虾共作模式下直播水稻氮肥的合理用量为102.4 kg/hm²,较水稻单作模式降低了26.6%^[22]。徐强等^[23]以“常规施氮(240 kg/hm²)、基肥和分蘖肥各50%”和“减氮处理(较常规施氮减施12.5%,即210 kg/hm²),基肥:分蘖肥:穗肥=60:25:15”进行研究,发现减氮处理较常规施氮产量下降不显著。彭成林等^[24]研究了在施氮量为105 kg/hm²时,基肥不同比例对稻虾共作水稻产量的影响,发现基肥比例为20%和0时,产量显著高于其他处理。综上,关于氮肥对稻虾综合种养模式下水稻产量的影响的研究主要集中在稻虾共作模式,关于稻虾轮作模式的研究极少,而且主要是关于施氮量方面的研究,不同时期的施氮比例的研究报道极少。本研究对稻虾轮作模式下不同施氮量和施氮比例对水稻产量的影响进行分析,发现较常规施氮量减量15%(施纯氮165.8 kg/hm²)和30%(施纯氮136.5 kg/hm²)时,野香优明月丝苗的产量下降不显著,而农香42的产量不降反增,说明在稻虾轮作模式下具有较明显的减氮效应。从施氮比例来看,野香优明月丝苗在基肥、分蘖肥、穗肥的施用比例为4:4:2时,每穗粒数、结实率和千粒质量最大,产量最高;而农香42在基肥、分蘖肥、穗肥的施用比例为5:3:2时单位面积有效穗数、每穗粒数、结实率和千粒质量最大,产量最高。表明,在稻虾轮作模式下,由于土壤地力的提高,减少施氮量15%~30%,并适当降低基肥施肥比例,有利于水稻高产,但具体因品种间基因型的不同而有差异。

3.2 稻虾轮作模式下施氮量和施氮比例对稻米品质的影响

在水稻单作模式下,关于氮肥用量对稻米品质的影响,前人研究结果不尽一致。在外观品质方面,多数研究^[2-3,13-14,25]认为,适当增施氮肥可改善稻米的加工品质。也有研究表明,稻米加工品质有随着施氮量提高而呈降低的趋势^[5,26],施氮处理的精米率、整精米率虽高于不施氮处理,但施氮处理间的差异不显著^[27];张兰兰^[28]对17个华南水稻品种进行研究,发现氮肥钝感型品种的加工品质不受施氮量的影响,而氮肥敏感型品种的加工品质随着施氮量的提高。施氮比例按基肥:分蘖肥:保花肥=4:2:4的比例施用最有利于提高稻米的加工品质^[29]。在外观品质方面,一些研究^[3,8,14,30]认为增加氮肥用量能降低稻米的垩白率和垩白度,外观品质得到优化,另一些研究^[4,7]则认为随施氮量的提高,垩白粒率、垩白度增多,这可能与不同的水稻品种对氮素的响应不同有关^[31]。增施氮肥不利于稻米食味品质的提升,但品种间影响程度有差异,氮钝感型品种稻米食味值变幅较小,而氮敏感型品种则相反;氮肥施用时间越迟、穗肥比例越高影响程度越大^[2,25,32]。对于施氮量与稻米蛋白质含量的关系,研究者一致认为两者呈显著正相关关系,施氮时期后移,蛋白质含量也会增加^[2-3,5,7,14]。

关于稻虾综合种养模式下氮肥运筹对稻米品质的影响研究报道极少,余振渊^[19]研究了稻虾共作模式下施氮量对稻米品质的影响,发现随着施氮量的增加,稻米的外观品质和食味品质变差,加工品质得到改善。峰值黏度、热浆黏度、最终黏度和崩解值下降,消减值呈上升。车阳^[33]研究了控混氮肥对稻虾轮作模式下稻米品质的影响,发现随控混氮肥用量提高,稻米糙米率、精米率及整精米呈上升趋势,垩白粒率及垩白度呈下降趋势,稻米蛋白质含量增加,直链淀粉含量降低,食味品质变差。稻米淀粉峰值黏

度、热浆黏度、最终黏度及崩解值均呈下降趋势,消减值呈上升趋势,糊化温度方面在不同氮肥处理之间均无显著差异。本研究表明,在稻虾轮作模式下,随着施氮量的减少,2个水稻品种的垩白粒率和垩白度均没有显著差异,直链淀粉含量显著提高,蛋白质含量显著降低;野香优明月丝苗的整精米率和农香42的整精米率显著提高,加工品质得到改善;野香优明月丝苗的峰值粘度、崩解值以及农香42的峰值粘度、崩解值和糊化温度呈先增加后降低趋势,以施氮量 165.8 kg/hm²为最大;农香42的胶稠度显著增加。野香优明月丝苗在基肥、分蘖肥、穗肥的施用比例为4:4:2时整精米率、整精米率最大,垩白粒率、垩白度和直链淀粉含量最小,峰值粘度和崩解值最大;农香42在基肥、分蘖肥、穗肥的施用比例为5:3:2时整精米率、整精米率和胶稠度最大,垩白粒率、垩白度和直链淀粉含量最小,峰值粘度、崩解值最大。

综合来看,在稻虾轮作模式下,减氮15%~30%,基肥、分蘖肥、穗肥施氮比例为4:4:2或5:3:2时,有利于水稻节氮增效,优质高产。

参考文献 References:

- [1] 赵然,韩志伟,申春华,等.典型岩溶地下河流域水体中硝酸盐源解析[J].环境科学,2020,41(6):2664-2670.
ZHAO R, HAN Z W, SHEN C H, et al. Identifying nitrate sources in a typical karst underground river basin [J]. Environmental science, 2020, 41(6): 2664-2670.
- [2] 陈云,李思宇,朱安,等.播种量和穗肥施氮量对优质食味直播水稻产量和品质的影响[J].作物学报,2022,48(3): 656-666.
CHEN Y, LI S Y, ZHU A, et al. Effects of seeding rates and panicle nitrogen fertilizer rates on grain yield and quality in good taste rice cultivars under direct sowing [J]. Acta agronomica Sinica, 2022, 48(3): 656-666.
- [3] 唐健,唐闯,郭保卫,等.氮肥施用量对机插优质晚稻产量和稻米品质的影响[J].作物学报,2020,46(1):117-130.
TANG J, TANG C, GUO B W, et al. Effect of nitrogen application on yield and rice quality of mechanical transplanting high quality late rice [J]. Acta agronomica Sinica, 2020, 46(1): 117-130.
- [4] 李润卿.施氮量对水稻产量和品质的影响及其原因分析[D].扬州:扬州大学,2022.
LI R Q. Effect of nitrogen application rates on rice yield and quality and its cause analysis [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022.
- [5] 袁伟,陈婉华,王子阳,等.双季稻秸秆还田与减施氮肥对水稻产量和品质的影响[J].江西农业大学学报,2021,43(4):711-720.
YUAN W, CHEN W H, WANG Z Y, et al. Effects of returning double-season rice straw to the field and reducing n-fertilizer on yield and quality of rice [J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2021, 43(4): 711-720.
- [6] 陈梦云,李晓峰,程金秋,等.秸秆全量还田与氮肥运筹对机插优质食味水稻产量及品质的影响[J].作物学报,2017, 43(12):1802-1816.
CHEM M Y, LI X F, CHENG J Q, et al. Effects of total straw returning and nitrogen application regime on grain yield and quality in mechanical transplanting japonica rice with good taste quality [J]. Acta agronomica Sinica, 2017, 43(12): 1802-1816.
- [7] 杨泽敏,王维金,蔡明历,等.氮肥施用期及施用量对稻米品质的影响[J].华中农业大学学报,2002,21(5):429-434.
YANG Z M, WANG W J, CAI M L, et al. Effects of applying time and quantity of nitrogen fertilizer on rice quality [J]. Journal of Huazhong agricultural university, 2002, 21(5): 429-434.
- [8] 倡国涵,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.
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.
- [9] 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.
SI G H, PENG C L, XU X Y, et al. Effects of rice-crayfish integrated mode on soil microbial functional diversity and fertility in waterlogged paddy field [J]. Soils, 2016, 48(3): 503-509.
- [10] 吴本丽,陈贵生,赵慧敏,等.巢湖地区稻虾共作模式对稻田土壤肥力的影响[J].安徽农业大学学报,2018,45(1): 96-100.

- WU B L, CHEN G S, ZHAO H M, et al. Effects of the integrated rice-crayfish mode on soil fertility in Chaohu Lake region [J]. Journal of Anhui agricultural university, 2018, 45(1): 96-100.
- [11] 尚永青. 秸秆还田投食对稻虾共作系统稻田土壤理化性质的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
- SHANG Y Q. Effects of straw feeding on soil physicochemical properties of paddy in rice-crayfish coculture system [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023.
- [12] 白志刚. 氮肥运筹对水稻氮代谢及稻田氮肥利用率的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- BAI Z G. Effects of N management strategy on N metabolism in rice plant and N use efficiency in paddy soil [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [13] 陈鸽, 李中希, 刘奇颀, 等. 施氮量对机插优质杂交晚稻盛泰优 626 产量和米质的影响[J]. 杂交水稻, 2023, 38(5): 115-120.
- CHEN G, LI Z X, LIU Q Q, et al. Effects of nitrogen rate on yield and grain quality of machine-transplanted high-quality late hybrid rice Shengtaiyou 626 [J]. Hybrid rice, 2023, 38(5): 115-120.
- [14] 张桂莲, 赵瑞, 刘逸童, 等. 施氮量对优质稻产量和稻米品质及氮素利用效率的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2019, 45(3): 231-236.
- ZHANG G L, ZHAO R, LIU Y T, et al. Effect of different amount of nitrogen on the yield and the quality of high quality rice and its nitrogen utilization efficiency [J]. Journal of Hunan agricultural university (natural sciences), 2019, 45(3): 231-236.
- [15] 石庆华, 潘晓华, 曾勇军, 等. 双季超级稻早籼壮秆强源高产栽培技术研究[J]. 江西农业大学学报, 2012, 34(4): 619-626.
- SHI Q H, PAN X H, ZENG Y J, et al. A study on high-yield cultivation technique 'Zaonie, Zhuanggan and Qiangyuan' of double cropping super rice [J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2012, 34(4): 619-626.
- [16] 吕伟生, 曾勇军, 石庆华, 等. 合理氮肥运筹提高双季机插稻产量及氮肥利用率[J]. 水土保持学报. 2018, 32(6): 259-268.
- LYU W S, ZENG Y J, SHI Q H, et al. Proper nitrogen fertilizer application improving yield and nitrogen use efficiency of machine-transplanted double rice [J]. Journal of soil and water conservation, 2018, 32(6): 259-268.
- [17] 王秀斌, 徐新朋, 孙静文, 等. 氮肥运筹对机插双季稻产量、氮肥利用率及经济效益的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1167-1176.
- WANG X B, XU X P, SUN J W, et al. Effects of nitrogen fertilization on grain yield and nitrogen use efficiency of double cropping rice [J]. Journal of plant nutrition and fertilizer, 2016, 22(5): 1167-1176.
- [18] 雷涛. 氮肥运筹对高收获指数型超级稻桂两优 2 号产量形成及抗倒伏特性的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2021.
- LEI T. Effects of nitrogen management on yield formation and lodging resistance of super rice Guiliangyou 2 with high harvest index [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2021.
- [19] 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]. 荆州: 长江大学, 2023.
- YU Z Y. Study on the physiological mechanism of the effect of nitrogen application rate on grain yield and quality in rice-crayfish co-culture system [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2023.
- [20] 温鑫. 施氮量对直播虾稻抗倒性及产量的影响研究[D]. 荆州: 长江大学, 2022.
- WEN X. Effects of nitrogen application rate on lodging resistance and yield of direct seeding shrimp-rice [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2022.
- [21] 黄飞, 聂玺斌, 杨朔, 等. 不同施氮量下稻虾共作水稻产量与田面水水质特征[J]. 中国稻米, 2022, 28(2): 51-55.
- HUANG F, NIE X B, YANG S, et al. Effects of different nitrogen amounts on rice yield and field water quality in rice-crayfish co-culture system [J]. China rice, 2022, 28(2): 51-55.
- [22] 彭成林, 袁家富, 贾平安, 等. 长期稻虾共作模式对不同施氮量下直播水稻产量和氮肥利用效率的影响[J]. 河南农业科学, 2020, 49(4): 15-21.
- PENG C L, YUAN J F, JIA P A, et al. Effects of long-term integrated rice-crayfish model on yield and nitrogen use efficiency of direct-seeding rice under different nitrogen application rates [J]. Journal of Henan agricultural sciences, 2020, 49(4): 15-21.
- [23] 徐强, 李京咏, 戴林秀, 等. 氮肥管理对稻虾共作模式水稻产量和抗倒伏特性的影响[J]. 中国稻米, 2022, 28(6): 30-36.
- XU Q, LI J Y, DAI L X, et al. Effects of nitrogen management on yield and lodging resistance of rice under rice-crayfish co-

- culture[J].China rice, 2022, 28(6):30-36.
- [24] 彭成林, 佘国涵, 赵书军, 等. 长期稻虾共作模式下氮肥运筹对直播水稻养分吸收和产量的影响[J]. 河南农业科学, 2023, 52(5):9-16.
- PENG C L, SI G H, ZHAO S J, et al. Effects of nitrogen fertilizer management on nutrient uptake and yield of direct-seeding rice under long-term integrated rice-crayfish model[J]. Journal of Henan agricultural sciences, 2023, 52(5):9-16.
- [25] 蒋鹏, 熊洪, 张林, 等. 施氮量和氮肥运筹模式对糯稻产量及品质的影响[J]. 作物研究, 2015, 29(6):595-598.
- JIANG P, XIONG H, ZHANG L, et al. Effect of nitrogen rates and nitrogen application regimes on grain yield and rice quality of glutinous rice[J]. Crop research, 2015, 29(6):595-598.
- [26] 宁慧峰. 氮素对稻米品质的影响及其理化基础研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- NING H F. The effect of nitrogen on rice quality and its physicochemical foundation[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011.
- [27] 谢黎虹, 叶定池, 胡培松, 等. 氮肥用量和施用方式对水稻“甬优6号”产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4):789-794.
- XIE L H, YE D C, HU P S, et al. Effects of nitrogen fertilizer application rate and management strategy on grain yield and quality of rice variety “Yongyou 6”[J]. Plant nutrition and fertilizer science, 2011, 17(4):789-794.
- [28] 张兰兰. 华南水稻品种产量和品质对施氮量的响应研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
- ZHANG L L. Response of yield and grain quality to nitrogen application rates for rice cultivars in south china[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022.
- [29] 胡雅杰, 钱海军, 吴培, 等. 秸秆还田条件下氮磷钾用量对软米粳稻产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(3):817-824.
- HU Y J, QIAN H J, WU P, et al. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer rates on yield and grain quality of soft japonica rice under straw returning condition[J]. Journal of plant nutrition and fertilizers, 2018, 24(3):817-824.
- [30] 姜红芳, 郭晓红, 胡月, 等. 氮肥运筹对苏打盐碱地水稻品质的影响[J]. 西南农业学报, 2019, 32(6):1223-1229.
- JIANG H F, GUO X H, HU Y, et al. Effects of nitrogen fertilization managements on rice quality under soda-saline-alkali soil[J]. Southwest China journal of agricultural sciences, 2019, 32(6):1223-1229.
- [31] 金军, 徐大勇, 蔡一霞, 等. 施氮量对水稻主要米质性状及RVA谱特征参数的影响[J]. 作物学报, 2004, 30(2):154-158.
- JIN J, XU D Y, CAI Y X, et al. Effect of N-fertilizer on main quality characters of rice and RVA profile parameters[J]. Acta agronomic Sinica, 2004, 30(2):154-158.
- [32] ZHU D, ZHANG H, GUO B, et al. Effect of nitrogen management on the structure and physicochemical properties of rice starch[J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2016, 64(42):8019-8025.
- [33] 车阳. 控混氮肥用量与钵苗栽插密度对虾田水稻综合生产力的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2021.
- CHE Y. Effects of nitrogen application rate of mixed controlled fertilization and quick-acting fertilizer on the comprehensive productivity of rice in shrimp field[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021.