

王守红, 张诚信, 马林杰, 等. 稻虾共作模式下利于水稻产量稻米品质协同的适宜栽插密度[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(8): 1668-1679.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2023.08.006

稻虾共作模式下利于水稻产量稻米品质协同的适宜栽插密度

王守红¹, 张诚信^{1,2}, 马林杰^{1,2}, 杨婷^{1,2}, 袁秦², 徐荣^{1,2}, 寇祥明^{1,2}, 张家宏¹, 韩光明^{1,2}, 陈选青³

(1. 江苏里下河地区农业科学研究所, 江苏 扬州 225007; 2. 江苏省生态农业工程技术研究中心, 江苏 扬州 225009; 3. 扬州银谷农业生态发展有限公司, 江苏 扬州 225119)

摘要: 为了探究稻虾共作模式下水稻产量、稻米品质协同发展的适宜栽插密度, 以虾优 100、南粳 3908 为试验材料, 设置如下 4 个移栽密度处理: (33.0+27.0) cm×14.7 cm、(33.0+27.0) cm×20.7 cm、(33.0+27.0) cm×24.9 cm、(33.0+27.0) cm×28.2 cm, 分别记作 D1、D2、D3、D4 处理。结果表明, 随着移栽密度的降低, 2 个水稻品种的产量、单位面积穗数降低, 每穗粒数、结实率、千粒质量上升。生长特性分析结果表明, 随着移栽密度的降低, 2 个水稻品种的植株在不同生育期的群体茎蘖数、叶面积指数、干物质质量呈下降趋势, 但单茎干物质质量、茎蘖成穗率表现为上升趋势。稻米品质性状分析结果表明, 随着移栽密度的降低, 2 个水稻品种稻米的加工指标、外观指标均变优, 2 个水稻品种的直链淀粉含量、蛋白质含量总体呈下降趋势, 胶稠度、食味值及食味指标(外观、口感、黏度、平衡度)呈上升趋势, 2 个水稻品种的峰值黏度、热浆黏度、最终黏度、崩解值呈上升趋势, 消减值整体呈下降趋势。小龙虾产量结果表明, 随着水稻移栽密度的降低, 小龙虾均质量、产量上升, 均质量变异系数的变化趋势则相反。综合分析认为, 为了促进稻虾共作模式下水稻稳产与优质协同及小龙虾的良好生长, 虾优 100 宜采用 D4 处理的栽插密度, 南粳 3908 宜采用 D2 处理的栽插密度。

关键词: 稻虾共作; 水稻; 小龙虾; 密度; 产量; 品质

中图分类号: S511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2023)08-1668-12

Suitable planting density for coordinated development of rice yield and quality under rice-crayfish co-cultivation mode

WANG Shou-hong¹, ZHANG Cheng-xin^{1,2}, MA Lin-jie^{1,2}, YANG Ting^{1,2}, YUAN Qin², XU Rong^{1,2}, KOU Xiang-ming^{1,2}, ZHANG Jia-hong¹, HAN Guang-ming^{1,2}, CHENG Xuan-qing³

(1. Institute of Agricultural Sciences of the Lixiahe District in Jiangsu Province, Yangzhou 225007, China; 2. Research Center for Eco-agricultural Engineering and Technology of Jiangsu Province, Yangzhou 225009, China; 3. Yinggu Agricultural Ecological Development Co., Ltd. of Yangzhou, Yangzhou 225119, China)

收稿日期: 2023-04-28

基金项目: 江苏省重点研发计划项目(BE2021336); 江苏现代农业(水稻)产业技术体系项目[JATS(2022)278]; 江苏现代农业(克氏原螯虾)产业技术体系项目[JATS(2022)265]; 稻渔综合种养农业绿色循环技术示范推广项目[(2022)78]

作者简介: 王守红(1970-), 男, 江苏兴化人, 硕士, 研究员, 主要从事生态农业研究。(E-mail) yzwish@126.com

Abstract: In order to explore the suitable planting density for coordinated development of rice yield and quality under the rice-crayfish co-cultivation mode, Xiayou 100 and Nanjing 3908 were used as test materials, and four planting density treatments were set up: (33.0+27.0) cm×14.7 cm, (33.0+27.0) cm×20.7 cm, (33.0+27.0) cm×24.9 cm, (33.0+27.0) cm×28.2 cm, which were recorded as

D1 treatment, D2 treatment, D3 treatment and D4 treatment, respectively. The results showed that with the decrease of transplanting density, the yield and panicle number per unit area of two rice varieties decreased, spikelet per panicle, seed setting rate and 1 000-grain weight increased. In terms of growth characteristics, the tiller number, leaf area index and dry matter weight decreased with the decrease of planting density, but the single stem dry matter weight and percentage of productive tiller showed an upward trend. In terms of rice quality, with the decrease of planting density, the processing indices and appearance indices became better, the amylose content and protein content showed an overall decreasing trend, and the gel consistency, taste value and taste indices (appearance, taste, viscosity, balance) showed an overall upward trend. With the decrease of planting density, the peak viscosity, hot paste viscosity, final viscosity and breakdown value increased, and the setback value decreased. In terms of crawfish yield, with the decrease of planting density, the average weight and yield of crawfish increased, but the variation coefficient of average weight showed the opposite trend. In general, in order to improve the rice yield and quality and the growth of crawfish under the rice-crayfish co-cultivation system, the planting density of D4 was suitable for Xiayou 100, and D2 was suitable for Nanjing 3908.

Key words: rice-crayfish co-cultivation; rice; crayfish; density; yield; quality

水稻是中国重要的粮食作物之一,为中国一半以上的人口提供营养和热量^[1-2]。近年来,随着人民生活水平普遍提高,消费者更偏重于关注稻米品质的优劣,对优质稻米的需求日益激增,因此,水稻“质产效”协同发展已成为当下稻米产业发展的核心内容^[3-4]。随着中国对农业供给侧结构性改革的加强,稻虾综合种养(水稻-克氏原螯虾)成为热点。截至2021年,小龙虾稻田养殖种养面积为 1.40×10^6 hm²,同比增长10.99%,占小龙虾养殖面积的80.77%^[5],其中湖北、安徽、湖南、江苏、江西等长江中下游地区的养殖大省的小龙虾稻田养殖面积占据绝对主导地位^[6]。稻虾综合种养模式能够有效减少农药、化肥的使用量,改善农田生态环境,同时与水稻常规单作相比,稻虾综合种养模式能够增加农民收入,深度契合水稻产业高质量发展的要求^[7]。稻虾共作模式就是其中一种典型的种养模式,在水稻生长季养殖小龙虾,两者能在稻田中共生共长^[8]。然而从目前的实际生产情况看,“轻稻重虾”现象仍然存在,该模式尚缺乏科学性、系统性的水稻栽培技术支撑,影响了种养效益和优质稻米生产,制约了其有序健康发展,因此亟需开展稻虾共作模式下栽培技术的研究与应用,为其高质量发展奠定基础。

栽插密度是调控优质稻米形成的关键栽培技术之一^[9-10],前人在该方面做了大量研究,认为在合理种植密度下,水稻群体结构可达到最优化,实现优质高产^[11-13]。然而,目前的研究结果多是在水稻单作条件下得出的,并不适用于稻虾共作复合生产方式。在实际生产中,一般多采用水稻稀植的方式,而不是水稻单作时的合理密植,改善田间小气候,有利于小

虾的正常活动与栖息^[14]。然而,目前从业者过度弱化水稻的种植地位,选择过低的栽培密度以满足小龙虾的养殖强度。虽然此方式可以实现小龙虾的产量和品质提升,但却以牺牲水稻产量为代价,违背了稻田稻虾综合种养需在稳定粮食产量的基础上增加收益的初衷,威胁了中国的粮食安全,因此,如何科学地选择稻虾共作系统的最佳水稻栽插密度成为关键。此外,由于当前农村劳动力大量涌入城镇,从而严重影响了农村农业生产劳动力,人工移栽成本高、耗时长,因此提高农业机械化水平势在必行,稻虾共作模式也应向机械化生产方向发展。李阳阳^[15]研究发现,与钵苗机插相比,稻虾共作模式下钵苗机插秧龄弹性大、秧苗素质高、移栽活棵快,在稻虾共作田块的适应性上更优。然而,目前关于稻虾共作模式下栽插密度对水稻产量和品质协同发展的研究尚未见报道。为此,本研究选择2种不同类型水稻品种,通过培育长秧龄钵苗,在模拟宽窄行(33.0 cm+27.0 cm)机插方式下,设置不同栽培密度,探究其对稻虾共作模式下水稻产量、品质的影响,以期阐明适合稻虾共作模式下水稻稳产优质的最佳栽插密度,从而为长江中下游地区稻虾共作稳产优质协同模式下水稻栽插密度的合理配置提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

试验于2022年在江苏里下河地区的扬州市公道镇银谷稻虾种养基地进行,该地区属亚热带湿润季风气候,年平均气温15℃,年平均降水量1 030 mm,无霜期217 d。土壤类型为黏泥土,质地黏,有

机质含量 34.53 g/kg,全氮含量 2.50 g/kg,有效磷含量 29.15 mg/kg,速效钾含量 222.49 mg/kg。试验地前茬为养殖小龙虾(稻前虾),水稻生长期间又养殖小龙虾(稻虾共作模式)。

供试水稻品种为大面积种植的优质食味水稻品种南粳 3908(粳稻,由江苏省农业科学院粮食作物研究所培育)、稻虾专用水稻品种虾优 100(籼稻,由江苏里下河地区农业科学研究所培育)。供试小龙虾为克氏原螯虾。

1.2 试验设计

小区采用随机区组试验,设置 3 次重复,试验小区结构见图 1,水沟面积占比为 10%。试验小区进排水、防鸟和防逃设施按照稻虾共作模式要求设置。在试验模拟插秧机可调范围内,设置 4 个栽培密度,宽窄行行距为 33.0 cm+27.0 cm,株距分别为 14.7 cm、20.7 cm、24.9 cm、28.2 cm,分别记为 D1、D2、D3、D4 处理。用 448 钵孔状硬盘育秧,粳稻于 5 月 25 日播种,6 月 27 日移栽,每穴 3 株苗;籼稻于 5 月 25 日播种,6 月 27 日移栽,每穴 2 株苗。南粳 3908 的总施氮量为 210 kg/hm²,虾优 100 的总施氮量为 150 kg/hm²。氮肥(N)、磷肥(P₂O₅)、钾肥(K₂O)均作基肥一次性施用,氮、磷、钾的施用比例=1.0:0.5:0.8,其中氮肥为尿素(含 46.4%氮),磷肥为过磷酸钙(含 12.5% P₂O₅),钾肥为氯化钾(含 57% K₂O)。

水分管理:分蘖期开始后 7 d 逐步灌水并保持水深 15~20 cm,并根据实际上限进行调节;拔节期至成熟前 10 d,田间维持 30~40 cm 的水深;收获前 7 d 进行搁田。挑选活力强、规格整齐、质量相近的虾苗(均质量为 5 g 左右),按照 300 kg/hm² 的密度投放虾苗。病虫害的防治采用稻虾共作模式农业防治、物理防治、生态防治、生物防治、化学防治五位一体的绿色防控措施。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 茎蘖动态 每个小区连续定点长势一致的水稻 20 穴,调查基本苗,前期每隔 7 d 调查 1 次茎蘖数,直至高峰苗出现,后期调查主要生育期茎蘖数,并计算成穗率。

1.3.2 叶面积与干物质积累 采用付正豪等^[16]的测定方法,利用长宽系数法测定叶面积。根据平均茎蘖数,于拔节期、抽穗期、成熟期选取各小区代表性植株 5 穴。将样品分为茎、叶、穗后于 105 ℃ 杀青 30 min,于 80 ℃ 烘至恒质量,测定干物质质量。

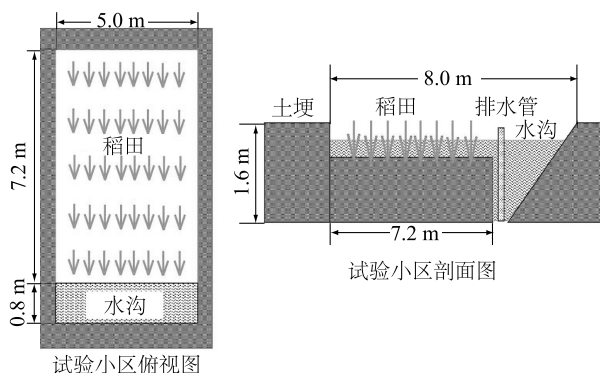


图 1 试验小区俯视图和剖面结构

Fig.1 Top view and profile map of test plot

1.3.3 产量及其构成因素 成熟期每个小区普查 50 穴,取 5 穴测量产量构成要素,各小区连续收割 50 穴测产(除边行外),粳稻、籼稻分别按 14.5%、13.5% 的含水量换算为实际产量。

1.3.4 稻米品质 稻谷收获后待理化性质稳定,进行稻米品质指标的测定。加工品质、外观品质等指标参照《优质稻谷》(GB/T 17891-2017)进行测定。蛋白质含量采用型号为 FOSS1241 的近红外谷物分析仪进行测定。直链淀粉含量、胶稠度参照张诚信等^[17]的方法进行测定。食味品质用 STA1A 米饭食味计进行测定。稻米淀粉黏滞特性(RVA)用 Super3 型 Rapid Viscosity Analyzer 仪器进行测定。

1.4 数据计算与统计分析

参照车阳^[18]的方法,计算水稻的各农艺性状指标,相关计算公式如下:

成穗率=有效穗数/高峰苗数×100%;

叶面积指数(LAI)衰减速率=(抽穗期 LAI-成熟期 LAI)/抽穗期至成熟期的间隔天数;

收获指数=单位面积上稻谷的质量/水稻干物质质量×100%。

用 Excel 2016 和 SPSS 16.0 处理和分析数据,用最小显著性差异法(LSD)进行多重比较,用 Origin 2021 作图。

2 结果与分析

2.1 产量及其构成因素

由表 1、表 2 可知,随着栽插密度的降低,2 个品种水稻的理论产量、实际产量均降低,除 D3、D4 处理之间无显著差异外,其他各密度处理之间的差异显著或极显著,其中虾优 100 的 D2、D3、D4 处理的实际产量分别较 D1 处理减少 2.75%、5.87%、

6.83%,南粳3908的D2、D3、D4处理的实际产量分别较D1处理减少2.69%、8.07%、10.88%。在产量构成方面,随着栽插密度降低,水稻的穗数呈下降趋势,各密度处理之间差异显著或极显著,每穗粒数、结实率、千粒质量均随栽插密度降低呈上升趋势,其中虾优100的各指标除D2和D3处理之间无显著

差异外,其他密度处理之间的差异显著或极显著,南粳3908各指标在D2、D3、D4处理之间整体上无明显差异,三者与D1处理间的差异极显著(除理论产量)。方差分析结果表明,品种、密度及品种×密度对水稻产量及其构成因素的影响达显著或极显著水平(品种×密度对千粒质量的影响除外)。

表1 稻虾共作下不同栽插密度对水稻产量及构成因素的影响

Table 1 Effects of different planting densities on rice yield and its components under rice-crayfish co-cultivation

品种	穗数	每穗粒数	结实率	千粒质量	理论产量	实际产量
品种(C)	**	**	**	**	**	**
密度(D)	**	**	**	**	**	**
品种×密度(C×D)	ns	**	*	ns	*	*

*、**分别表示在0.05、0.01水平上影响显著、极显著,ns表示影响不显著。

表2 稻虾共作下不同栽插密度处理的水稻产量及构成因素

Table 2 Rice yield and composition factors in different planting density treatments under rice-crayfish co-cultivation

品种	处理	穗数 (1 hm ² , ×10 ⁴ 穗)	每穗粒数	结实率 (%)	千粒质量 (g)	理论产量 (t/hm ²)	实际产量 (t/hm ²)
虾优100	D1	299.32aA	175.40cC	85.82cC	19.33cC	8.71aA	8.35aA
	D2	260.87bB	189.30bB	87.91bB	19.57bBC	8.51bAB	8.12bB
	D3	251.22cBC	189.60bB	88.59bB	19.68bB	8.30cB	7.86cC
	D4	241.53dC	190.27aA	90.12aA	19.94aA	8.26cB	7.78cC
南粳3908	D1	261.53aA	121.44bB	92.90cC	27.39bB	8.08aA	7.81aA
	D2	236.18bB	125.57aA	94.34bB	27.69aA	7.75bAB	7.60bB
	D3	221.33cC	125.91aA	94.74bAB	27.73aA	7.32cBC	7.18cC
	D4	212.77dC	126.04aA	95.60aA	27.84aA	7.13cC	6.96cC

D1、D2、D3、D4分别代表栽插密度为(33.0+27.0) cm×14.7 cm、(33.0+27.0) cm×20.7 cm、(33.0+27.0) cm×24.9 cm、(33.0+27.0) cm×28.2 cm。同一品种同列数据后标有不同大写、小写字母分别表示在0.01、0.05水平差异极显著、显著。

2.2 茎蘖数和成穗率

由表3、表4可知,随着栽插密度的降低,2个品种水稻在不同生育时期内的群体茎蘖数均呈下降趋势,各密度处理之间多表现为显著或极显著差异。从影响程度来看,在分蘖盛期栽插密度的影响最大,成熟期的影响最小。茎蘖成穗率则表现出相反的趋势,随着栽插密度的降低呈上升趋势,D2、D3、D4处

理的茎蘖成穗率与D1处理相比差异均极显著,D2处理与D4处理之间的差异也达显著水平,D3处理与D4处理之间无显著差异。方差分析结果表明,品种、密度对不同生育期水稻茎蘖数、成穗率的影响均达极显著水平,品种×密度只对分蘖盛期、拔节期水稻茎蘖数、成穗率的影响达极显著水平。

表3 稻虾共作下不同栽插密度对水稻茎蘖数、成穗率的影响

Table 3 Effects of different planting densities on number of stem and tiller and percentage of productive tiller under rice-crayfish co-cultivation

品种	茎蘖数				成穗率
	分蘖盛期	拔节期	抽穗期	成熟期	
品种(C)	**	**	**	**	**
密度(D)	**	**	**	**	**
品种×密度(C×D)	**	**	ns	ns	ns

**表示在0.01水平上影响极显著,ns表示影响不显著。

表 4 稻虾共作下不同栽插密度处理的水稻茎蘖数、成穗率

Table 4 The number of stem and tiller and percentage of productive tiller in different planting density treatments under rice-crayfish co-cultivation

品种	处理	茎蘖数 (×10 ⁴ , 1 hm ²)				成穗率 (%)
		分蘖盛期	拔节期	抽穗期	成熟期	
虾优 100	D1	458.05aA	414.21aA	305.37aA	299.32aA	65.35cB
	D2	370.91bB	358.02bB	273.75bB	260.87bB	70.33bA
	D3	352.52cC	322.18cC	264.61cBC	251.23cBC	71.27aA
	D4	336.09dD	316.00cC	256.11dC	241.53cC	71.86aA
南粳 3908	D1	347.69aA	315.95aA	272.11aA	261.53aA	75.22cB
	D2	293.61bB	274.29bB	246.91bB	236.18bB	80.44bA
	D3	273.54cC	253.90cC	229.81cC	221.33cC	80.91abA
	D4	256.50dC	239.95dC	218.68dD	212.77cC	82.95aA

D1、D2、D3、D4 分别代表栽插密度为(33.0+27.0) cm×14.7 cm、(33.0+27.0) cm×20.7 cm、(33.0+27.0) cm×24.9 cm、(33.0+27.0) cm×28.2 cm。同一品种同列数据后标有不同大写、小写字母分别表示在 0.01、0.05 水平差异极显著、显著。

2.3 叶面积指数和叶面积衰减率

由表 5、表 6 可知,随着栽插密度的降低,2 个品种水稻植株的拔节期、抽穗期、成熟期群体叶面积指数均呈下降趋势,其中虾优 100 的叶面积指数在抽穗期、成熟期 D1、D2 处理之间无显著差异,D1、D2 处理与 D3、D4 处理相比差异极显著或显著,D3、D4 处理之间无显著差异;南粳 3908 的叶面积指数在各密度处理之间均表现为极显著差异。叶面积衰减率在各密度处理之间均表现出显著或极显著差异。除品种和密度互作对成熟期叶面积指数的影响不显著外,品种、密度及品种和密度互作对各生育时期叶面积指数、叶面积衰减率的影响均达极显著水平。

表 5 稻虾共作下不同栽插密度对水稻叶面积指数、叶面积衰减率的影响

Table 53 Effects of different planting densities on leaf area index and decreasing rate of leaf area under rice-crayfish co-cultivation

品种	拔节期叶面积指数	抽穗期叶面积指数	成熟期叶面积指数	叶面积衰减率
品种(C)	**	**	**	**
密度(D)	**	**	**	**
品种×密度(C×D)	**	**	ns	**

** 表示在 0.01 水平上影响极显著,ns 表示影响不显著。

2.4 水稻群体干物质质量和收获指数

由表 7、表 8 可知,随着栽插密度的降低,2 个品种水稻植株在拔节期、抽穗期、成熟期的群体干物质质量均呈下降趋势,各密度处理之间的差异大多数

表 6 稻虾共作下不同栽插密度处理的水稻叶面积指数、叶面积衰减率

Table 6 The leaf area index and decreasing rate of leaf area in different planting density treatments under rice-crayfish co-cultivation

品种	处理	拔节期叶面积指数	抽穗期叶面积指数	成熟期叶面积指数	叶面积衰减率
虾优 100	D1	4.31aA	7.70aA	3.93aA	0.075 3aA
	D2	3.73bB	7.57aA	3.91aAB	0.073 0bB
	D3	3.52cB	7.30bB	3.78bBC	0.070 9cC
	D4	3.51cB	7.25bB	3.71bC	0.070 4dC
南粳 3908	D1	2.52aA	6.72aA	2.19aA	0.071 8aA
	D2	2.23bB	6.38bB	2.08bB	0.068 3bB
	D3	2.03cC	6.21cC	1.97cC	0.067 4cB
	D4	1.92dD	6.05dD	1.88dD	0.066 1dC

D1、D2、D3、D4 分别代表栽插密度为(33.0+27.0) cm×14.7 cm、(33.0+27.0) cm×20.7 cm、(33.0+27.0) cm×24.9 cm、(33.0+27.0) cm×28.2 cm。同一品种同列数据后标有不同大写、小写字母分别表示在 0.01、0.05 水平差异极显著、显著。

达显著或极显著水平,收获指数则表现出相反的趋势,随着栽插密度的降低呈上升趋势,2 个品种水稻的收获指数在 D2、D3、D4 处理之间大多数无显著差异,均与 D1 处理差异显著或极显著。品种、密度及品种和密度互作对各生育期的群体干物质质量、收获指数的影响大多数达极显著水平。

2.5 水稻单茎干物质积累

由表 9、表 10 可知,随着栽插密度的降低,2 个品种水稻植株在拔节期、抽穗期、成熟期的单茎干物质质量呈上升趋势,D2、D3、D4 处理的单茎干物质

表 7 稻虾共作下不同栽插密度对水稻群体干物质质量和收获指数的影响

Table 7 Effects of different planting densities on dry matter weight and harvest index under rice-crayfish co-cultivation

品种	拔节期干 物质质量	抽穗期干 物质质量	成熟期干 物质质量	收获指数
品种(C)	**	**	**	**
密度(D)	**	**	**	**
品种×密度(C×D)	**	**	ns	**

** 表示在 0.01 水平上影响极显著,ns 表示影响不显著。

表 8 稻虾共作不同栽插密度处理的水稻群体干物质质量和收获指数

Table 8 The dry matter weight and harvest index in different planting density treatments under rice-crayfish co-cultivation

品种	处理	拔节期干 物质质量 (t/hm ²)	抽穗期干 物质质量 (t/hm ²)	成熟期干 物质质量 (t/hm ²)	收获指数 (%)
虾优 100	D1	3.21aA	11.09aA	18.06aA	46.23cB
	D2	2.94bB	10.40bB	17.28bB	47.01bA
	D3	2.67cC	10.36bB	16.66cC	47.18abA
	D4	2.60cC	10.15cB	16.40cC	47.43aA
南粳 3908	D1	3.12aA	9.82aA	16.28aA	48.18bB
	D2	2.79bB	9.31bB	15.53bB	48.95aAB
	D3	2.60cC	8.89cBC	14.61cC	49.15aA
	D4	2.51dC	8.65cC	14.12dC	49.31aA

D1、D2、D3、D4 分别代表栽插密度为 (33.0+27.0) cm×14.7 cm、(33.0+27.0) cm×20.7 cm、(33.0+27.0) cm×24.9 cm、(33.0+27.0) cm×28.2 cm。同一品种同列数据后标有不同大写、小写字母分别表示在 0.01、0.05 水平差异极显著、显著。

质量与 D1 处理之间的差异达显著或极显著水平, D2、D3、D4 处理之间的单茎干物质质量的差异部分达显著水平。在成熟期,与 D1 处理相比,虾优 100、南粳 3908 D4 处理的单茎干物质质量分别增加了 0.76 g、0.52 g。方差分析结果表明,密度对在不同生育时期水稻单茎干物质质量的影响均达极显著水平。

表 9 稻虾共作下不同栽插密度对水稻单茎干物质质量的影响

Table 9 Effects of different planting densities on dry matter weight of single stem under rice-crayfish co-cultivation

品种	处理	拔节期单茎 干物质质量	抽穗期单茎 干物质质量	成熟期单茎 干物质质量
品种(C)	**	ns	ns	**
密度(D)	**	**	**	**
品种×密度(C×D)	ns	ns	**	ns

** 表示 0.01 水平上影响极显著,ns 表示影响不显著。

表 10 稻虾共作不同栽插密度处理的水稻单茎干物质质量

Table 10 Dry matter weight of single stem in different planting density treatments under rice-crayfish co-cultivation

品种	处理	拔节期单茎 干物质质量 (g)	抽穗期单茎 干物质质量 (g)	成熟期单茎 干物质质量 (g)
虾优 100	D1	1.04bB	3.63cC	6.03cC
	D2	1.05bAB	3.84bB	6.64bB
	D3	1.09aAB	3.91aAB	6.69bB
	D4	1.11aA	3.97aA	6.79aA
南粳 3908	D1	0.99bA	3.61bB	6.23bB
	D2	1.02abA	3.81aAB	6.55aA
	D3	1.03aA	3.87aA	6.63aA
	D4	1.05aA	3.96aA	6.75aA

D1、D2、D3、D4 分别代表栽插密度为 (33.0+27.0) cm×14.7 cm、(33.0+27.0) cm×20.7 cm、(33.0+27.0) cm×24.9 cm、(33.0+27.0) cm×28.2 cm。同一品种同列数据后标有不同大写、小写字母分别表示在 0.01、0.05 水平差异极显著、显著。

2.6 稻米品质

2.6.1 加工品质 由表 11、表 12 可知,随着栽插密度的降低,2 个品种稻米的各加工品质指标呈上升趋势,整体表现为 D4 处理>D3 处理>D2 处理>D1 处理。在糙米率方面,2 个品种水稻的 D2、D3、D4 处理之间无显著差异,D3、D4 处理与 D1 处理间的差异达显著水平;在精米率方面,2 个品种水稻在 D4 处理与 D3 处理间无显著差异,与 D1、D2 处理间的差异达显著或极显著水平;在整精米率方面,2 个品种水稻在各密度处理之间的差异达显著或极显著水平。对加工品质各指标的影响程度排序为整精米率>精米率>糙米率。品种、密度对各加工品质指标的影响均达极显著水平,品种和密度互作对各加工品质指标的影响不显著。

表 11 稻虾共作下不同栽插密度对稻米加工品质的影响

Table 11 Effects of different planting densities on rice processing quality under rice-crayfish co-cultivation

品种	糙米率	精米率	整精米率
品种(C)	**	**	**
密度(D)	**	**	**
品种×密度(C×D)	ns	ns	ns

** 表示在 0.01 水平上影响极显著,ns 表示影响不显著。

2.6.2 外观品质 由表 13、表 14 可知,随着栽插密度降低,2 个品种稻米的外观品质指标(垩白度、垩白粒率、长宽比)呈下降趋势,整体表现为 D4 处理<D3 处理<D2 处理<D1 处理,其中对于虾优 100 而

表 12 稻虾共作不同栽插密度处理的稻米加工品质

Table 12 Processing quality of rice in different planting density treatments under rice-crayfish co-cultivation

品种	处理	糙米率 (%)	精米率 (%)	整精米率 (%)
虾优 100	D1	73.25bA	65.22bA	57.89dB
	D2	73.56abA	65.37bA	58.41cB
	D3	74.18aA	66.34abA	59.21bA
	D4	74.38aA	66.73aA	59.71aA
南粳 3908	D1	78.38bA	70.01cB	62.23dC
	D2	78.99abA	70.20bcAB	62.59cC
	D3	79.15aA	70.59abAB	63.27bB
	D4	79.50aA	70.94aA	64.07aA

D1、D2、D3、D4 分别代表栽插密度为 (33.0+27.0) cm×14.7 cm、(33.0+27.0) cm×20.7 cm、(33.0+27.0) cm×24.9 cm、(33.0+27.0) cm×28.2 cm。同一品种同列数据后标有不同大写、小写字母分别表示在 0.01、0.05 水平差异极显著、显著。

言, D2、D3、D4 处理的垩白度、垩白粒率与 D1 处理间的差异达显著或极显著水平, 部分 D2、D3、D4 处理之间差异显著。对于南粳 3908 而言, 垩白度、垩白粒率在各密度处理之间表现为显著或极显著差异, 2 个品种水稻的长宽比在各密度处理之间无显著差异。不同栽插密度对透明度无影响, 透明度等级一致。此外, 品种、密度及品种和密度互作对垩白度、垩白粒率的影响均达极显著水平, 品种对长宽比、透明度的影响极显著。

表 13 稻虾共作下不同栽插密度对稻米外观品质的影响

Table 13 Effects of different planting densities on appearance quality of rice under rice-crayfish co-cultivation

品种	垩白度	垩白粒率	长宽比	透明度
品种 (C)	**	**	**	**
密度 (D)	**	**	ns	ns
品种×密度 (C×D)	**	**	ns	ns

** 表示在 0.01 水平上影响极显著, ns 表示影响不显著。

2.6.3 蒸煮食味品质 由表 15、表 16 可知, 随着栽插密度的降低, 2 个品种水稻的稻米直链淀粉含量、蛋白质含量总体呈下降趋势, 南粳 3908 的硬度也表现为下降趋势。此外, 随着栽插密度的降低, 2 个品种水稻的稻米直链淀粉含量、南粳 3908 的硬度在各密度处理之间的差异大多数达显著或极显著水平, 2 个品种水稻的稻米蛋白质含量在各密度处理之间无显著差异。随着栽插密度的增加, 2 个品种水稻的稻米胶稠度、食味值及各品种对应食味指标 (外观、

表 14 稻虾共作不同栽插密度处理的稻米外观品质

Table 14 The appearance quality in different planting density treatments under rice-crayfish co-cultivation

品种	处理	垩白度 (%)	垩白粒率 (%)	长宽比	透明度
虾优 100	D1	2.21aA	12.32aA	1.92aA	4a
	D2	1.75bB	11.27bAB	1.90aA	4a
	D3	1.53bcB	10.38bcBC	1.89aA	4a
	D4	1.46cB	9.46cC	1.88aA	4a
南粳 3908	D1	18.09aA	54.84aA	3.30aA	3a
	D2	16.63bB	50.70bB	3.28aA	3a
	D3	15.53cC	47.56cC	3.28aA	3a
	D4	14.84dC	45.26dC	3.24aA	3a

D1、D2、D3、D4 分别代表栽插密度为 (33.0+27.0) cm×14.7 cm、(33.0+27.0) cm×20.7 cm、(33.0+27.0) cm×24.9 cm、(33.0+27.0) cm×28.2 cm。同一品种同列数据后标有不同大写、小写字母分别表示在 0.01、0.05 水平差异极显著、显著。

口感、黏度、平衡度) 总体呈上升趋势, 其中胶稠度、食味值在各密度处理之间的差异大多数达显著或极显著水平, 食味指标在部分密度处理之间差异显著。品种对稻米直链淀粉含量、胶稠度、蛋白质含量、食味值影响极显著, 密度对直链淀粉含量、胶稠度、食味值影响极显著, 品种和密度互作对直链淀粉含量和食味值影响极显著。

表 15 稻虾共作下不同栽插密度对蒸煮食味品质的影响

Table 15 Effects of different planting densities on cooking and eating quality under rice-crayfish co-cultivation

品种	直链淀粉含量	胶稠度	蛋白质含量	食味值
品种 (C)	**	**	**	**
密度 (D)	**	**	ns	**
品种×密度 (C×D)	ns	ns	ns	**

** 表示在 0.01 水平影响极显著, ns 表示影响不显著。

2.6.4 RVA 特性 由表 17、表 18 可知, 随着水稻栽插密度的降低, 2 个品种水稻的峰值黏度、热浆黏度、最终黏度、崩解值、峰值时间呈上升趋势。D1、D2、D3 处理的峰值黏度、热浆黏度、最终黏度与 D4 处理间的差异达显著水平。2 个品种水稻的各密度处理之间的峰值时间无显著差异。随着栽插密度的降低, 2 个品种水稻的消减值、糊化温度呈下降趋势。D1、D2 处理的消减值与 D4 处理间的差异达极显著水平, 南粳 3908 D1、D2、D3 处理之间的消减值表现为显著差异, 不同处理间的糊化温度无显著差异。品种、密度对大多数 RVA 特性指标的影响极显

著,品种和密度交互仅对峰值黏度、热浆黏度、崩解值的影响极显著。

表 16 稻虾共作不同栽插密度处理的蒸煮食味品质

Table 16 Cooking and eating quality in different planting density treatments under rice-crayfish co-cultivation

品种	处理	直链淀粉含量 (%)	胶稠度 (mm)	蛋白质含量 (%)	食味值	外观	口感/硬度	黏度	平衡值
虾优 100	D1	17.87aA	76.67dC	8.43aA	72.67cC	7.87cB	7.87cB		
	D2	17.67bAB	78.67cB	8.40aA	73.77bBC	8.03bcAB	8.00bcAB		
	D3	17.50bBC	80.67bA	8.40aA	74.60bB	8.17abA	8.13abA		
	D4	17.23cC	81.67aA	8.37aA	76.37aA	8.27aA	8.23aA		
南粳 3908	D1	12.83aA	77.67dC	8.37aA	75.83dB	7.33cB	5.47aA	7.30dC	6.63bC
	D2	12.53bB	80.33cB	8.27aA	77.13cB	7.77bAB	5.27bB	7.47cC	6.80bBC
	D3	12.27cB	82.00bB	8.17aA	80.90bA	8.10abA	5.17bB	7.83bB	7.30aAB
	D4	11.93dC	84.33aA	8.13aA	82.20aA	8.30aA	4.90cC	8.13aA	7.47aA

D1、D2、D3、D4 分别代表栽插密度为 (33.0+27.0) cm×14.7 cm、(33.0+27.0) cm×20.7 cm、(33.0+27.0) cm×24.9 cm、(33.0+27.0) cm×28.2 cm。同一品种同列数据后标有不同大写、小写字母分别表示在 0.01、0.05 水平差异显著、极显著。虾优 100 测定的为口感,南粳 3908 测定的为硬度。

表 17 稻虾共作下不同栽插密度对稻米淀粉黏滞特性(RVA)的影响

Table 17 Effects of different planting densities on rice starch viscosity characteristics (RVA) under rice-crayfish co-cultivation

品种	峰值黏度	热浆黏度	崩解值	最终黏度	消减值	峰值时间	糊化温度
品种(C)	**	**	**	**	**	**	**
密度(D)	**	**	**	**	**	ns	ns
品种×密度(C×D)	**	**	**	ns	ns	ns	ns

** 表示在 0.01 水平上影响极显著,ns 表示影响不显著。

表 18 稻虾共作不同栽插密度处理的稻米淀粉黏滞特性(RVA)

Table 18 Starch viscosity characteristics (RVA) of rice in different planting density treatments under rice-crayfish co-cultivation

品种	处理	峰值黏度 (cP)	热浆黏度 (cP)	崩解值 (cP)	最终黏度 (cP)	消减值 (cP)	峰值时间 (min)	糊化温度 (℃)
虾优 100	D1	2 317cC	1 562cB	755bA	2 817bB	500aA	6.33aA	89.88aA
	D2	2 410bB	1 650bB	759bA	2 854bAB	444aA	6.35aA	89.78aA
	D3	2 417bB	1 655bB	761bA	2 864bAB	447aA	6.37aA	89.78aA
	D4	2 658aA	1 854aA	803aA	2 995aA	337bB	6.38aA	89.45aA
南粳 3908	D1	3 201dD	1 696dD	1 505cC	2 867dD	-334aA	6.17aA	82.93aA
	D2	3 319cC	1 778cC	1 540bB	2 910cC	-409bB	6.17aA	82.64aA
	D3	3 457bB	1 883bB	1 574aA	3 007bB	-450cC	6.22aA	82.53aA
	D4	3 575aA	1 988aA	1 586aA	3 091aA	-484dC	6.25aA	82.50aA

D1、D2、D3、D4 分别代表栽插密度为 (33.0+27.0) cm×14.7 cm、(33.0+27.0) cm×20.7 cm、(33.0+27.0) cm×24.9 cm、(33.0+27.0) cm×28.2 cm。同一品种同列数据后标有不同大写、小写字母分别表示在 0.01、0.05 水平差异极显著、显著。

2.6.5 稻米品质指标间的 Pearson 相关性分析 由表 19 可以看出,食味值除了与垩白度无显著相关外,与稻米其他品质指标之间的相关性均达显著或极显著水平,其中与直链淀粉含量、蛋白质含量、消减值呈显著或极显著负相关,与整精米率、胶稠度、峰值黏度、热浆黏度、最终黏度、崩解值呈显著或极

显著正相关。

2.7 小龙虾产量性状

如表 20 所示,随着水稻栽插密度的降低,小龙虾数量、均质量均呈上升趋势,其中小龙虾数量在各处理之间无显著差异,D1、D2、D3 处理之间的小龙虾均质量无显著差异,但与 D4 处理间差异极显著;

均质量变异系数的变化趋势与数量、均质量相反,在 D3、D4 处理之间无显著差异,与 D1、D2 处理相比差异极显著,但 D1、D2 处理之间也无显著差异。随水稻栽插密度的增大,龙虾产量呈现不断上升的趋势,D4 处理最高,与其他 3 个处理相比差异达极显著水平,但其他 3 个处理之间无显著差异。

表 19 稻米品质各项指标间的相关性
Table 19 Correlation between rice quality indicators

指标	食味值	整精米率	垩白度	直链淀粉含量	蛋白质含量	胶稠度	峰值黏度	热浆黏度	崩解值	最终黏度
食味值										
整精米率	0.904 **									
垩白度	0.665	0.910 **								
直链淀粉含量	-0.812 *	-0.977 **	-0.974 **							
蛋白质含量	-0.978 **	-0.903 **	-0.700	0.839 **						
胶稠度	0.850 **	0.627	0.250	-0.454	-0.794 *					
峰值黏度	0.890 **	0.994 **	0.927 **	-0.985 **	-0.900 **	0.580				
热浆黏度	0.883 **	0.697	0.376	-0.551	-0.810 *	0.910 **	0.686			
崩解值	0.787 *	0.965 **	0.983 **	-0.999 **	-0.818 *	0.410	0.977 **	0.517		
最终黏度	0.923 **	0.724 *	0.396	-0.580	-0.858 **	0.927 **	0.708 *	0.984 **	0.544	
消减值	-0.820 *	-0.979 **	-0.970 **	0.999 **	0.844 **	-0.467	-0.989 **	-0.575	-0.997 **	-0.597

*、** 分别代表在 0.05、0.01 水平相关。

表 20 不同栽插密度对小龙虾产量性状的影响
Table 20 Effects of different planting densities on yield traits of crawfish

处理	数量 (10 ⁴ 尾,1 hm ²)	均质量 (g,1 尾)	均质量 变异系数	产量 (t/hm ²)
D1	1.47aA	42.0bB	40.7aA	0.604bB
D2	1.48aA	42.4bB	40.3aA	0.622bB
D3	1.50aA	44.5bB	38.7bB	0.667bB
D4	1.52aA	46.0aA	38.0bB	0.703aA

D1、D2、D3、D4 见表 1。同列数据后标有不同大写、小写字母分别表示在 0.01、0.05 水平差异极显著、显著。

3 讨论

3.1 稻虾共作模式下不同栽插密度对水稻产量及其构成因素的影响

水稻栽插密度是用于调控产量形成及其构成因素的一种重要手段^[19]。多数研究者认为,在水稻单作条件下,在一定范围内的栽插密度可以促进产量构成因素之间的协调发展,从而实现增产^[20-21]。然而在稻虾共作模式下,为了利于养殖小龙虾在田间正常活动,多采用适当加大水稻栽插的行株距或采用宽窄行栽培来降低水稻密度^[14]。一般来说,适当稀植在稳定水稻产量的同时,也给小龙虾创造了良

好的栖息与活动场所,利于稻、虾协同发展。然而,过度稀植虽然可以进一步利于小龙虾的养殖,但极易造成有效穗数总量不足而影响水稻产量,违背稳粮种养原则^[22]。此外,与水稻单作相比,稻虾共作模式下应培育秧龄长、素质高、活棵快的秧苗,以匹配稻虾共作模式实际生产过程中对水稻迟栽的需求,目前,发展机械化栽培以钵苗机插较为适合。在本研究中,设置 4 个由高到低栽插密度,结果与前人的研究结果一致,单位面积穗数随栽插密度降低呈显著下降趋势,各密度处理之间的差异显著或极显著,虽然每穗粒数、结实率、千粒质量随栽插密度的降低呈上升趋势,但无法弥补有效穗数不足的缺陷,最终造成 2 个供试品种水稻的栽插密度越低,产量下降幅度越大。虾优 100 的 D2、D3、D4 处理的产量分别较 D1 处理减少 2.75%、5.87%、6.83%,南粳 3908 的 D2、D3、D4 处理的产量分别较 D1 处理减少 2.69%、8.07%、10.88%。

水稻光合物质生产能力是其产量形成的关键指标之一,通过提高光合物质生产能力可以提高产量^[23]。朱聪聪等^[24]认为,在钵苗机插条件下,随着密度降低,水稻单穴个体生长潜力得到充分发挥,但群体茎蘖数、叶面积指数、干物质质量都随栽插密度

降低而呈下降趋势。姚义等^[25]也认为,在稻虾共作模式下,随着机插密度的降低,水稻叶面积指数、干物质积累量、群体生长率等均下降。本研究也发现,随着栽插密度下降,2个品种水稻在各生育时期的群体总茎蘖数、干物质质量和叶面积指数均表现出下降的趋势。虽然栽插密度下降会造成单穴干物质积累量提高,从而延缓叶面积衰减率、提高收获指数,但是却难以补足过度稀植造成基本苗减少以及不同生育时期群体茎蘖数和叶面积指数及干物质积累量下降,进而带来整体光合物质生产能力下降,是造成产量显著降低的重要原因。

由于《稻渔综合种养技术规范通则》行业标准中明确规定,平原地区水稻产量不得低于7.5 t/hm²^[26]。因而本研究的不同密度处理中,虾优100的D1、D2、D3、D4处理符合该行业标准中的要求,南粳3908仅D1、D2处理符合要求。

3.2 不同栽插密度对稻虾共作模式下稻米品质的影响

在稻田综合种养模式中,前人对稻米品质做了一定研究,普遍认为该模式有利于改善稻米的品质^[27-28],但是用稻虾共作模式下的栽培技术改善稻米品质却缺少相关研究。在机械化条件下,钵苗机插的适应性更大,符合稻虾共作的生产要求,且较毯苗机插可提高稻米品质。栽插密度也是影响稻米品质的栽培方式之一^[29]。在加工品质上,前人通过研究发现,随着栽插密度的降低或基本苗数量的减少,稻米的加工品质在一定程度上得到改善^[30]。也有人认为,移栽密度过高或过稀都不利于提高稻米加工品质^[31]。本研究发现,随着栽插密度的不断降低,2个品种稻米的加工品质指标呈上升趋势,表现为D4处理>D3处理>D2处理>D1处理,说明栽插密度的降低有利于提高稻米加工品质。其中整精米率是体现稻米商品价值的重要指标。栽插密度的降低可以提升稻米商品价值的研究结果与刘丽华等^[32]的研究结果一致。主要原因是低密度下群体数量小,个体充分发育,后期会积累更多光合物质,从而利于穗部籽粒灌浆。

对于外观品质而言,垩白度、垩白粒率是重要指标,其优劣成为吸引消费者是否购买的影响因素。前人研究发现,在一定范围内,随着栽插密度降低或增加,水稻垩白粒率、垩白度亦呈减少或增加趋势^[33-34]。本研究结果表明,2个品种稻米的垩白度、

垩白粒率随着栽插密度的降低呈下降趋势,表现为D4处理<D3处理<D2处理<D1处理,说明在稻虾共作模式下,降低栽插密度有利于改善水稻的外观品质,提高其市场价值。主要原因是在低密度下穗部籽粒灌浆期的灌浆物质多,籽粒充实且紧密性好,淀粉体间的空隙少,从而降低了垩白率、垩白度^[35]。本研究还发现,不同栽插密度对长宽比、透明度无影响。这与牟静怡^[36]的研究结果一致,这可能是稻米的长宽比、透明度由品种基因型决定的,栽培方式对其影响不大。

对于蒸煮食味品质而言,直链淀粉含量、蛋白质含量是反映其好坏的重要指标^[37-39]。一般来说,在一定范围内,直链淀粉含量、蛋白质含量越低,米饭的蒸煮食味品质越高,表现出良好的协同性^[40]。本研究结果表明,随着栽插密度的降低,2个品种水稻的直链淀粉含量、蛋白质含量总体呈下降趋势,这与胡雅杰等^[41]的研究结果相同。胶稠度可以反映米饭软硬程度,胶稠度较高的米饭较软且偏黏,食味较好。本研究发现,2个品种水稻栽插密度的降低均会增加稻米胶稠度。综合来看,栽插密度的降低有利于稻米蒸煮食味品质的提升。本试验采用米饭食味计(STA1A,日本佐竹公司)自动测定米饭食味指标,结果表明,随着栽插密度的降低,2个品种水稻稻米食味值及对应的食味指标(外观、口感、黏度、平衡度)总体呈上升趋势。

RVA值也是作为稻米品质重要的特性指标,直接影响稻米的蒸煮食味品质。栽培措施会在一定程度上影响其特性^[42]。前人研究发现,在一定范围内,栽插密度的降低会使稻米淀粉的峰值黏度、热浆黏度、最终黏度及崩解值上升,消减值下降^[36,41]。本试验结果也表明,降低栽插密度会提高稻米的黏度和崩解值,降低消减值。此外研究发现,黏度、崩解值与食味呈正相关,消减值与食味呈负相关^[43],本研究的相关性分析结果与前人一致。因此,本研究降低水稻栽插密度在一定程度上利于稻米食味品质的改善。

4 结论

在稻虾共作模式下,随着水稻栽插密度的下降,2个品种水稻的叶面积指数、干物质积累量、群体茎蘖数等均呈下降趋势,不利于产量形成。然而,随着水稻栽插密度下降,2个品种水稻的稻米加工、外观

品质均得到改善,蒸煮食味品质中,随栽插密度的降低,直链淀粉、蛋白质含量降低,胶稠度、食味值增加。随栽插密度的降低,RVA 谱特征值中,3 个黏度值和崩解值均呈上升趋势,消减值下降。由此可见,栽插密度下降有利于提升稻米多方面的品质。随着栽插密度的降低,小龙虾规格越稳定,产量越高。综上所述,在保障粮食安全的前提下,稻虾共作模式下兼顾水稻稳产与优质发展且促进小龙虾良好生长发育的水稻栽插密度为虾优 100 (33.0 cm+27.0 cm)×28.2 cm,南粳 3908 (33.0 cm+27.0 cm)×20.7 cm。

参考文献:

- [1] 李思平,曾路生,吴立鹏,等. 氮肥水平与栽植密度对植稻土壤养分含量变化与氮肥利用效率的影响[J]. 中国水稻科学, 2020,34(1):69-79.
- [2] GODFRAY H C J, BEDDINGTON J R, CRUTE I R, et al. Food security: the challenge of feeding 9 billion people[J]. Science, 2010,327:812-818.
- [3] 郭保卫,唐 闯,王 岩,等. 两种机械化种植方式对优质晚粳稻产量和品质的影响[J]. 中国农业科学,2022,55(20):3910-3925.
- [4] KONG X L, ZHU P, SUI Z Q, et al. Physicochemical properties of starches from diverse rice cultivars varying in apparent amylose content and gelatinisation temperature combinations[J]. Food Chemistry, 2015,172:433-440.
- [5] 于秀娟,郝向举,党子乔,等. 中国小龙虾产业发展报告(2022)[J]. 中国水产,2022(6):47-54.
- [6] 韩光明,吴雷明,张家宏,等. 稻虾共作模式下不同投饲率对稻、虾生长及氮磷利用的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版),2022,43(5):10-17.
- [7] 李阳阳,江军梁,陈 泽,等. 江苏省稻田综合种养产业发展现状与问题探讨[J]. 中国稻米,2021,27(2):11-14.
- [8] 李文博,刘少君,叶新新,等. 稻虾共作对水稻氮素累积及稻米品质的影响[J]. 生态与农村环境学报,2021,37(5):661-667.
- [9] 董士琦,葛佳琳,韦还和,等. 施氮量和密度对盐碱滩涂水稻产量和品质的影响[J]. 核农学报,2022,36(4):820-828.
- [10] 李应洪,孙永健,李 玥,等. 不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻根系生长及氮素利用特征的影响[J]. 中国水稻科学, 2017,31(6):599-610.
- [11] 胡雅杰,钱海军,曹伟伟,等. 机插方式和密度对不同穗型水稻品种产量及其构成的影响[J]. 中国水稻科学,2016,30(5):493-506.
- [12] 牟静怡,郭诗梦,翟文举,等. 移栽密度对北方稻鸭种养模式不同类型粳稻产量及生理特性的影响[J]. 中国稻米,2021,27(5):129-133.
- [13] 陈 云,刘 昆,张宏路,等. 机插密度和穗肥减量对优质食味水稻品种籽粒淀粉合成的影响[J]. 作物学报,2021,47(8):1540-1550.
- [14] 陈 灿,黄 璜,丁蛟龙,等. 稻田综合种养稻米质量特性形成及调优机理探究[J]. 作物研究,2019,33(5):392-397.
- [15] 李阳阳. 机插方式和栽插规格对稻虾连作下水稻产量和品质的影响研究[D]. 扬州:扬州大学,2021.
- [16] 付正豪,马中涛,魏海燕,等. 不同机械化栽培方式下控释肥配比对迟熟中粳水稻产量形成及氮素吸收利用的影响[J]. 作物学报,2022,48(1):165-179.
- [17] 张诚信,郭保卫,唐 健,等. 灌浆结实期低温弱光复合胁迫对稻米品质的影响[J]. 作物学报,2019,45(8):1208-1220.
- [18] 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.
- [19] 王成媛,王伯伦,张文香,等. 栽培密度对水稻产量及品质的影响[J]. 沈阳农业大学学报,2004(4):318-322.
- [20] HU Q, JIANG W Q, QIU S, et al. Effect of wide-narrow row arrangement in mechanical pot-seedling transplanting and plant density on yield formation and grain quality of japonica rice[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020,19(5):1197-1214.
- [21] LIU Q H, ZHOU X B, LI J L, et al. Effects of seedling age and cultivation density on agronomic characteristics and grain yield of mechanically transplanted rice[J]. Scientific Reports, 2017,7:1-10.
- [22] 陈惠哲,朱德峰,林贤青,等. 稀植条件下杂交稻分蘖成穗规律和穗粒结构研究[J]. 杂交水稻,2004(6):54-57.
- [23] DENG F, WANG L, 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] 朱聪聪,张洪程,郭保卫,等. 钵苗机插密度对不同类型水稻产量及光合物质生产特性的影响[J]. 作物学报,2014,40(1):122-133.
- [25] 姚 义,唐建鹏,陈京都,等. 稻虾共作与栽插密度对优良食味梗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] 佚名. 稻渔综合种养技术规范(通则)[J]. 中国水产,2018(5):81-83.
- [27] 寇祥明,谢成林,韩光明,等. 3 种稻田生态种养模式对稻米品质、产量及经济效益的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版),2018,39(3):70-74.
- [28] 石世杰,李纯杰,曹涛贵,等. 稻虾共作模式下不同播期对水稻产量和品质的影响[J]. 华中农业大学学报,2020,39(2):25-32.
- [29] 蒋 鹏,熊 洪,张 林,等. 不同生态条件下施氮量和移栽密度对杂交稻旌优 127 产量及稻米品质的影响[J]. 核农学报, 2017,31(10):2007-2015.
- [30] 钱银飞,张洪程,李 杰,等. 不同基本苗配置对机插稻产量和品质的影响[J]. 华北农学报,2009,24(增刊 1):316-322.
- [31] 刘 洋. 插秧密度对两种不同穗型水稻品种糖代谢及稻米品质的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2014.
- [32] 刘丽华. 移栽叶龄、秧盘及穴距对水稻产量和品质的影响[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2017.

- [33] 黄乾龙,王楚桃,欧阳杰,等. 施氮量及栽插密度对广适型杂交籼稻 Q6 优 28 产量和品质的影响[J]. 杂交水稻,2019,34(3): 39-43.
- [34] 董明辉,顾俊荣,李锦斌,等. 稻虾生态种养和机插密度对优良食味梗稻产量与品质的影响[J]. 中国农学通报,2021,37(17):1-12.
- [35] CHENG F M, ZHONG L J, WANG F, et al. Differences in cooking and eating properties between chalky and translucent parts in rice grains[J]. Food Chemistry,2005,90(1/2):39-46.
- [36] 牟静怡. 稻鸭种养条件下移栽密度对梗稻产量与品质的影响[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2022.
- [37] 梁友,王津,王思进,等. 稻田环境因子对水稻生长发育和产量、品质形成的影响研究进展[J]. 江苏农业科学,2022,50(24):1-9.
- [38] 姚宇,邢志鹏,陶钰,等. 粒叶比对优质梗稻稻米品质的影响[J]. 江苏农业学报,2022,38(4):865-874.
- [39] 徐茂森,张涛,孙亚丽,等. 功能水稻研究领域热点之一——高抗性淀粉水稻[J]. 江苏农业科学,2022,50(11):23-30.
- [40] 石吕,张新月,孙惠艳,等. 不同类型水稻品种稻米蛋白质含量与蒸煮食味品质的关系及后期氮肥的效应[J]. 中国水稻科学,2019,33(6):541-552.
- [41] 胡雅杰,吴培,邢志鹏,等. 机插方式和密度对水稻主要品质性状及淀粉 RVA 谱特征的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版),2017,38(3):73-82.
- [42] 张国忠,李娟,李毓才,等. 氮肥减施与移栽密度对杂交梗稻溧禾优 615 产量和食味品质的影响[J]. 作物杂志,2023(3): 109-115.
- [43] 隋炯明,李欣,严松,等. 稻米淀粉 RVA 谱特征与品质性状相关性研究[J]. 中国农业科学,2005(4):657-663.

(责任编辑:徐艳)