

陆喜瞻, 朱海滨, 张凯激, 等. 控释氮肥一次性减量基施和密植对机插粳稻产量、品质及经济效益的影响[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(8): 1400-1411.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2024.08.005

控释氮肥一次性减量基施和密植对机插粳稻产量、品质及经济效益的影响

陆喜瞻, 朱海滨, 张凯激, 许方甫, 朱 盈, 李光彦, 刘国栋, 魏海燕, 胡 群, 张洪程

(扬州大学水稻产业工程技术研究院/江苏省作物栽培生理重点实验室/江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心/江苏省优质粳稻产业工程研究中心, 江苏 扬州 225009)

摘要: 为探究控释氮肥一次性减量基施及密植对机插粳稻产量、品质 and 经济效益的影响, 明确最优氮肥和栽插密度组合处理, 以南粳 5718 为供试材料, 在施用 225 kg/hm² 纯氮条件下, 将 3 种控释期 (60 d、80 d、100 d) 的控释肥和 3 个栽插密度 (每穴栽插苗数分别为 6、8、10) 进行组合, 共设置 9 种组合方式, 并设置对照 (CK) 为 300 kg/hm² 纯氮施用量+每穴栽插苗数为 4+常规分次施肥, 调查产量及其形成特征、稻米品质 and 经济效益的差异。结果表明, 2021、2022 年各减氮处理中产量最高的均为 80-6 处理, 较其他减氮处理产量显著提高, 较 CK 产量显著降低 4.77%~5.17%。拔节期至抽穗期, 80-6 处理的干物质积累量与其他减氮处理相比总体增加。在稻米品质指标方面, 各减氮处理的垩白粒率、垩白度较 CK 降低, 营养品质 (蛋白质含量) 显著降低, 但在外观品质、食味品质方面均得到显著改善。在经济效益方面, 80-6 处理实现了 2021、2022 年控释肥一次性基施下的最高经济效益, 经济效益较 CK 增加 3.60%~5.28%。因此认为, 80-6 处理在减氮和保证稳产的前提下, 可以提升稻米品质, 同时能够获得较高经济效益, 可作为机插粳稻丰产优质高效协同的一次性减氮施肥处理的氮肥和栽插密度组合。

关键词: 粳稻; 控释肥; 减氮密植; 产量; 品质; 经济效益

中图分类号: S511.044

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2024)08-1400-12

Effects of one-time base application with reduced amount of controlled-release nitrogen fertilizer and density increase on yield, quality and economic benefits of mechanized-transplanting japonica rice

LU Xizhan, ZHU Haibin, ZHANG Kaiwei, XU Fangfu, ZHU Ying, LI Guangyan, LIU Guodong, WEI Haiyan, HU Qun, ZHANG Hongcheng

(Research Institute of Rice Industrial Engineering Technology, Yangzhou University/Jiangsu Key Laboratory of Crop Cultivation and Physiology/Jiangsu Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops/Jiangsu Industrial Engineering Research Center of High Quality Japonica Rice, Yangzhou 225009, China)

收稿日期: 2023-10-17

基金项目: 江苏省重点研发计划项目 (BE2022338); 江苏省农业科技自主创新资金项目 [CX(23)3017]; 全国农业重大技术协同推广计划项目 (2022-ZYXT-04-1); 国家水稻产业技术体系项目 (CARS-01); 江苏省高等学校自然科学研究面上项目 (22KJB210004); 江苏省高校优势学科建设工程资助项目 (RAPD)

作者简介: 陆喜瞻 (1998-), 男, 江苏苏州人, 硕士研究生, 研究方向为水稻产质协同与水稻轻简化栽培。(E-mail) 228571866@qq.com

通讯作者: 张洪程 (E-mail) hc Zhang@yzu.edu.cn; 胡 群 (E-mail) huqun@yzu.edu.cn

Abstract: This study aimed to investigate the effects of one-time base application with reduced amount of controlled-release nitrogen fertilizer and increased density on the yield, quality and economic benefits of mechanized-transplanting japonica rice, thereby clarifying the optimal combination of nitrogen fertilizer and planting density. In

the study, a *japonica* rice cultivar-Nanjing 5718 was selected as the test material. And nine combinations with three controlled-release periods (60 days, 80 days and 100 days) of controlled-release fertilizer and three planting densities (six seedlings per hole, eight seedlings per hole and ten seedlings per hole) were set up under 225 kg/hm² pure nitrogen, while the conventional split fertilization treatment with 300 kg/hm² pure nitrogen and a planting density of four seedlings per hole was installed as the control (CK). The differences in yields and their formation characteristics, rice quality, and economic benefits were investigated. The results showed that the yield of 80-6 treatment was the highest in all nitrogen reduction treatments in 2021 and 2022, which was significantly higher than that of other nitrogen reduction treatments, and the yield was significantly reduced by 4.77%–5.17% compared with CK. From jointing stage to heading stage, the dry matter accumulation of 80-6 treatment was generally increased compared with other nitrogen reduction treatments. In terms of rice quality, the chalky grain rate and chalkiness degree of each nitrogen reduction treatment were lower than those of CK, and the nutritional quality (protein content) was significantly reduced, but the appearance quality and taste quality were significantly improved. In terms of economic benefits, the 80-6 treatment achieved the highest economic benefits under the one-time basal application of controlled-release fertilizer in 2021 and 2022, and the economic benefits increased by 3.60%–5.28% compared with CK. Therefore, 80-6 treatment can improve rice quality and obtain higher economic benefits under the premise of reducing nitrogen and ensuring stable yield. It can be used as a combination of nitrogen fertilizer and planting density for one-time nitrogen reduction fertilization treatment with high yield, high quality and high efficiency of mechanically transplanted *japonica* rice.

Key words: *japonica* rice; controlled-release fertilizer; nitrogen reduction and density increase; yield; quality; economic benefits

水稻是中国重要的粮食作物,其高产稳产对于维护中国粮食安全具有举足轻重的意义^[1]。当前,随着中国粮食供给侧结构性改革的进行,水稻生产已经由单一的高产导向转变为“高产、优质、高效、生态、安全”多方向协调发展。氮素是影响植物生长发育的关键元素,对水稻产量、品质的形成具有重要影响。然而,在实际生产过程中,农户往往为追求高产而施用过氮量^[2-3],这虽然有利于激发水稻生长潜力,但也带来了稻米品质下降、氮素利用效率低和环境污染等问题。同时,随着农村劳动力短缺和劳动力价格迅速上涨,农户普遍使用的常规分次施肥技术带来了高昂的劳动力开支,压缩了水稻生产的经济效益。因此,迫切需要将施肥技术朝着精量施肥、简化施肥的方向转变^[4-5]。

控释氮肥一次性基施技术是一种具有高机械化程度、低作业成本的肥料施用技术,即在水稻播种或移栽前将其全生育期所需的氮肥以控释肥形式全量施入大田,后期不再进行追肥。相较于常规分次施肥技术,这种技术可大幅减少施肥次数,从而降低劳动成本^[6-8]。另外,得益于生产企业日益成熟的制造工艺和技术,目前已经能够实现部分控释肥产品养分释放和水稻吸收相匹配,从而实现氮肥的高效利用。有研究发现,在等量施用氮肥的条件下,与常规尿素分次施肥相比,控释肥一次性基施处理可以增产 17.75%,使氮肥利用效率提高 27.64%,并使氮肥

农学效率显著提高^[9-11]。然而,减少氮肥用量可能会导致水稻单位面积穗数、每穗粒数减少,从而影响产量。前人研究发现,通过适度密植能够充分发挥群体优势,提升水稻群体颖花量以实现增产^[12-15]。通过改变机插秧行株距可以实现水稻减氮密植栽培,较单一减氮处理明显增产,并且部分品种相较于常规对照能达到稳产效果^[16-18]。

然而,已有的关于减氮密植的研究成果主要基于常规分次施肥,有关施用控释肥配合减氮密植措施对稻米产量和品质影响的研究较少。因此,本研究的目的是探讨密植及控释氮肥一次性减量基施对机插粳稻产量和品质的影响,明确与其养分吸收相匹配的最优氮肥和栽插密度组合处理。旨在为水稻氮肥的高效利用和水稻高产、优质及高效生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点与供试材料

试验于 2021–2022 年在扬州大学校外试验基地江苏省宿迁市泗洪县现代农业园区进行,土壤类型为黏壤土,有机质含量为 27.31 g/kg,有效氮含量为 118.42 mg/kg,速效磷含量为 32.34 mg/kg,速效钾含量为 85.64 mg/kg。供试水稻品种为南粳 5718,是优质食味迟熟中粳品种,生育期为 145~150 d。供试肥料为山东茂施生态肥料有限公司提供的

3 种不同控释期的控释氮肥,控释周期分别为 60 d、80 d、100 d。

1.2 试验设计

采用毯苗机插塑盘育秧,2 年均于 5 月 28 日播种,播量设置为 1 盘 150 g,并均于 6 月 17 日在秸秆还田条件下移栽。将行距×株距调整为 30 cm×11 cm,分别设置 1 穴 6 苗、1 穴 8 苗、1 穴 10 苗 3 个栽插密度进行栽插,并在纯氮施用量为 225 kg/hm² 的条件下分别一次性基施 60 d、80 d、100 d 控释氮肥,基肥于移栽当天以侧深施肥方式同步施入。同时,设置对照(CK),1 穴栽插秧苗 4 株,在 300 kg/hm² 总氮施用条件下分施基肥、分蘖肥、穗肥,施用比例

为 3.5 : 3.5 : 3.0。基肥于移栽前 1 d 施入,分蘖肥于移栽后 7 d 施用,穗肥于倒 3.5 叶期施用。磷肥(P₂O₅)、钾肥(K₂O)施用量均为 94.5 kg/hm²,前者为过磷酸钙(含 12.5% P₂O₅),后者为氯化钾(含 57.0% K₂O),均作为基肥于移栽前 1 d 一次性施入。表 1 为各处理的设置。

在本试验中,每个处理设置 2 个重复,总共 20 个小区。每个小区的面积为 20 m²。在不同肥料处理间采用覆膜田埂进行分隔,以防肥水交换。田块在水稻移栽后进行化学除草和病虫害防治,田间水分管理遵循生育中期搁田,收获前 7 d 断水,其余时间保持浅水层。

表 1 各个处理的施氮量和密度

Table 1 Nitrogen application rate and density of each treatment

处理	总施氮量 (kg/hm ²)	控释肥控释天数 (d)	基肥用量 (kg/hm ²)	分蘖肥用量 (kg/hm ²)	穗肥用量 (kg/hm ²)	每穴栽插苗数
60-6	225	60	225			6
60-8	225	60	225			8
60-10	225	60	225			10
80-6	225	80	225			6
80-8	225	80	225			8
80-10	225	80	225			10
100-6	225	100	225			6
100-8	225	100	225			8
100-10	225	100	225			10
CK	300		105	105	90	4

1.3 测定项目

1.3.1 茎蘖动态 各小区设置 2 个观测点,并在每个观测点选取 10 穴,移栽后每 7 d 记录 1 次茎蘖动态,直至抽穗期。

1.3.2 干物质与叶面积 (1)干物质质量的测定。分别于拔节期、抽穗期和成熟期依据平均茎蘖数在各小区进行取样,取有代表性的植株 3 穴,将每穴植株分成茎、叶、穗(抽穗后)后放入烘箱,105 ℃杀青 30 min,于 80 ℃烘至恒重后称重量。(2)叶面积指数的计算。分别于拔节期、抽穗期和成熟期依据平均茎蘖数在各小区进行取样,取具有代表性的植株 3 穴,采用比重法测定叶面积。从每穴随机取 20 张叶片,统一剪取 0.1 m 长度的叶片作为比重叶,用直尺测量出每张叶片宽度并求取总和(W),在烘干后对比重叶干物质、每穴叶片总干物质进行称重量,每穴

叶面积=每穴叶片总干物质质量×0.1×W/比重叶干物质质量。

1.3.3 产量及其结构 在各小区普查 3 个连续 50 穴的穗数,测量单位面积有效穗数,按照各小区每穴平均穗数取 3 穴,考察每穗粒数、结实率、千粒重,称取 1 000 实粒干种子的重量,重复称量 3 次(误差不超过 0.05 g)。测定实际产量,在各小区收获 3 个连续的 50 穴,晒干后按 14.00% 含水率折算成实际产量。

1.3.4 稻米品质 参照《优质稻谷》(GB/T17891-2017)测定稻米的加工品质(糙米率、精米率和整精米率);通过万深 CE-E 大米外观检测仪测定稻米外观品质(垩白粒率和垩白度)^[19-20]。

使用全自动凯氏定氮仪(Kjeltec™ 8400, FOSS)测定精米总氮含量,以 5.95 的转换系数计算总蛋白

质含量^[20];通过碘蓝法测定稻米中的直链淀粉含量^[21]。通过食味仪(STA/A,日本佐竹公司)测定稻米食味值、平衡度、黏度、硬度和外观值,具体步骤如下:取30 g精米,加入39 g纯水,浸泡30 min后上锅蒸煮,30 min后关闭电源焖煮10 min,然后在降温盒中降温20 min,取出后在室温(25℃)条件下冷却1.5 h,随后使用米饭食味仪测定相关指标^[22]。

1.3.5 经济效益 经济效益的计算公式: $EB=YR-LW-MW-OW$ 。式中, EB 为1 hm²经济效益(元), YR 为水稻产量收入(元), LW 为1 hm²人工和其他成本(元), MW 为1 hm²种子成本(元), OW 为1 hm²肥料成本(元)。其他成本包括地租、机械费用、农药费用、管理费用、灌溉费用等。上述参数的计算参照生产季度当时的市场价格,包括水稻价格、用工价格、油价、水价等。

1.4 数据统计与计算

用Excel 2010处理数据,运用DPS V7.05数据处理软件进行统计分析,以最小显著性差异法(LSD)进行多重比较($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 产量及其构成因素

由表2、表3可知,不同肥料与密度组合处理的机插稻产量有显著差异。在减氮处理中,随着控释肥释放期的增加,水稻产量呈现先增后减的趋势,其中控释期为80 d的处理的产量显著高于其他处理($P<0.05$)。随着每穴苗数的增加,产量呈现降低的趋势,每穴苗数为6株的处理的产量显著高于其他处理($P<0.05$)。80-6处理的产量是各减氮组合中最高的,2021年、2022年分别达10.28 t/hm²、10.38

t/hm²,2021年分别较60-6、100-6处理增加了4.15%、3.21%,2022年分别较60-6、100-6处理增加了4.74%、3.39%,但2021年、2022年分别较CK减产5.17%、4.77%。

在产量构成因素方面,控释期的延长会导致穗数逐渐降低、穗粒数逐渐增加,群体颖花量呈先增后降的趋势。在相同控释期、不同每穴苗数处理间,穗粒数、群体颖花量呈现与产量相似的规律,即以每穴苗数为6株的处理最高;穗数呈现与产量相反趋势,以每穴苗数为10株的处理最高。与60-6处理相比,80-6处理的穗数减少了3.09%~3.20%,穗粒数增加了8.79%~8.97%,群体颖花量增加了5.31%~5.53%;与100-6处理相比,80-6处理的穗数增加了1.72%~8.53%,穗粒数减少了0.19%~2.94%,群体颖花量增加了1.35%~5.16%。除80-6处理外,各减氮处理的群体颖花量较CK显著降低了6.28%~14.42%。不同减氮处理在结实率上无显著差异,与CK相比显著增加了0.88%~1.95%。大部分处理的千粒重之间无显著差异。

表2 控释氮肥一次性减量基施和密植水稻的产量及其构成因素在年度和处理间的方差分析(2021–2022年)

Table 2 Variance analysis of rice yield and its components under one-time base application with reduced amount of controlled-release nitrogen fertilizer and density increase between years and treatments (2021–2022)

变异来源	穗数	穗粒数	结实率	千粒重	群体颖花量	产量
年度	**	**	**	**	**	**
处理	**	**	**	NS	**	**
年度×处理	NS	**	NS	NS	NS	NS

**表示有极显著影响($P<0.01$),NS表示影响不显著。

表3 控释氮肥一次性减量基施和密植对产量及其构成因素的影响(2021–2022年)

Table 3 Effects of one-time base application with reduced amount of controlled-release nitrogen fertilizer and density increase on yield and its components (2021 to 2022)

年份	处理	穗数 ($\times 10^4$, 1 hm ²)	穗粒数 (粒)	结实率 (%)	千粒重 (g)	群体颖花量 ($\times 10^6$, 1 hm ²)	产量 (t/hm ²)
2021	60-6	345.52abcd	105.91d	94.94a	29.67a	365.40b	9.87c
	60-8	358.69ab	97.55f	95.12a	29.86a	349.66bc	9.57d
	60-10	361.73a	94.04g	95.41a	29.88a	340.15c	9.15f
	80-6	334.85cde	115.41b	94.88a	29.68a	385.61a	10.28b
	80-8	345.02bcd	105.42d	94.87a	29.86a	363.09b	9.97c
	80-10	351.52abc	100.64e	95.08a	29.98a	353.19bc	9.63d

续表3 Continued3

年份	处理	穗数 ($\times 10^4$, 1 hm ²)	穗粒数 (粒)	结实率 (%)	千粒重 (g)	群体颖花量 ($\times 10^6$, 1 hm ²)	产量 (t/hm ²)
2022	100-6	308.52f	118.91a	94.88a	29.78a	366.70b	9.96c
	100-8	319.35ef	111.08c	94.91a	29.88a	354.69bc	9.67d
	100-10	332.02de	102.16e	94.99a	30.01a	338.88c	9.36e
	CK	332.35de	119.16a	94.04b	29.67a	395.97a	10.84a
	60-6	315.40bcd	116.94c	95.63a	29.17ab	368.04cde	9.91d
	60-8	330.00ab	107.44d	95.67a	29.03b	354.35e	9.61f
	60-10	333.75a	104.80e	95.80a	29.09b	349.75e	9.30h
	80-6	305.30cd	127.22a	95.39a	29.22ab	387.57b	10.38b
	80-8	321.50abc	116.83c	95.51a	29.36ab	375.03bcd	10.06c
	80-10	332.90a	107.69d	95.52a	29.46a	358.00de	9.67ef
	100-6	300.15d	127.46a	95.42a	29.14ab	382.39bc	10.04c
	100-8	308.40cd	119.11b	95.51a	29.18ab	367.30cde	9.74e
	100-10	331.45ab	107.92d	95.50a	29.44a	357.28de	9.43g
	CK	321.20abc	127.07a	93.97b	29.17ab	408.03a	10.90a

同一年份、同列数据后标有不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。60-6、60-8、60-10、80-6、80-8、80-10、100-6、100-8、100-10、CK 见表 1。

2.2 群体茎蘖动态和成穗率

由表 4、表 5 可知,与 CK 相比,不同肥料与密度组合对机插稻生育期的茎蘖数有显著影响。随着控释肥释放期的延长,茎蘖数呈现下降的趋势;随着每穴苗数的增加,高峰苗期、拔节期、抽穗期和成熟期的茎蘖数均呈现增长趋势。在高峰苗期和拔节期,一次性施肥处理的茎蘖数均高于 CK,增幅为 2.91%~34.33%。在抽穗期,除 2021 年的 80-6、100-6、100-8 处理与 2022 年的 80-6、100-6 处理外,其他一次性施肥处理的茎蘖数均较 CK 增加,增幅为 6.73%~24.63%。在成熟期,各减氮处理的茎蘖数与 CK 相比规律不明显。成穗率的变化趋势与茎蘖数相反,随着控释肥释放期的延长,茎蘖成穗率呈现升高的趋势;随着每穴苗数的增加,茎蘖成穗率呈现下降的趋势。相较于 CK,各减氮处理的茎蘖成穗率均降低,降幅为 11.76%~21.00%。

2.3 群体干物质积累量

由表 6、表 7 可知,与 CK 相比,不同肥料与密度组合处理对水稻干物质积累量有显著影响。在播种期至拔节期,随着控释肥释放期的延长,干物质积累量呈现降低的趋势;随着每穴苗数的增加,干物质积累量呈现增长的趋势。60-10 处理的干物质积累量最高,较其他减氮处理增加 0.19%~

22.48%。拔节期至抽穗期、抽穗期至成熟期的干物质积累量呈现如下规律:随着控释肥释放期的延长,干物质积累量呈现增长或先增后降的趋势;随着每穴苗数的增加,干物质积累量呈现降低的趋势。在各减氮处理中,80-6、100-6 处理的干物质积累量整体较高,在抽穗期至成熟期分别较其他减氮处理增加了 2.83%~18.32%、0.40%~17.70%,但分别较 CK 降低了 3.58%~5.34%、5.84%~6.66%。收获指数总体呈现出与拔节后干物质积累量相似的趋势,各减氮处理的收获指数较 CK 降低了 0.42%~3.58%。

表 4 控释氮肥一次性减量基施和密植水稻的茎蘖动态和成穗率在年度和处理间的方差分析 (2021–2022 年)

Table 4 Variance analysis of tiller dynamics and panicle rate of rice under one-time base application with reduced amount of controlled-release nitrogen fertilizer and density increase between years and treatments (2021–2022)

变异来源	高峰苗期 茎蘖数	拔节期 茎蘖数	抽穗期 茎蘖数	成熟期 茎蘖数	成穗率
年度	**	**	**	**	**
处理	**	**	**	**	**
年度×处理	NS	**	NS	NS	*

** 表示有极显著影响 ($P < 0.01$), * 表示有显著影响 ($P < 0.05$), NS 表示影响不显著。

表 5 控释氮肥一次性减量基施和密植对茎蘖动态和成穗率的影响 (2021–2022 年)

Table 5 Effects of one-time base application with reduced amount of controlled-release nitrogen fertilizer and density increase on tiller dynamics and panicle rate (2021 to 2022)

年份	处理	高峰苗期茎蘖数 ($\times 10^4$, 1 hm ²)	拔节期茎蘖数 ($\times 10^4$, 1 hm ²)	抽穗期茎蘖数 ($\times 10^4$, 1 hm ²)	成熟期茎蘖数 ($\times 10^4$, 1 hm ²)	成穗率 (%)
2021	60-6	604.20bc	560.03b	376.44c	345.52abc	61.69de
	60-8	624.22ab	593.36a	398.60ab	358.69a	60.45ef
	60-10	649.20a	606.74a	418.52a	361.73a	59.62f
	80-6	550.80d	530.02c	347.49e	334.85bcd	63.15cd
	80-8	602.59bc	558.28b	381.68bc	345.02abc	61.78de
	80-10	632.55ab	585.29a	399.28ab	351.52ab	60.06f
	100-6	516.67e	475.13e	339.19e	308.52e	64.93b
	100-8	565.05d	501.36d	353.36de	319.35de	63.72bc
	100-10	576.90cd	528.25c	370.00cd	332.02cd	62.82cd
	CK	502.05e	451.69f	346.68e	332.35cd	73.58a
2022	60-6	542.55cde	504.13cd	386.85bc	315.40bcd	62.58bcd
	60-8	567.53bcd	534.19ab	398.10ab	330.00ab	61.77de
	60-10	603.38a	548.03a	417.52a	333.75a	60.90e
	80-6	530.85ef	484.61de	345.02ef	305.30cd	63.01bcd
	80-8	565.88bcd	515.47bc	369.64cd	321.50abc	62.37cde
	80-10	592.50ab	538.69a	378.02cd	332.90a	61.79de
	100-6	507.52f	469.19e	341.69ef	300.15d	63.99b
	100-8	538.35de	485.02de	358.77de	308.40cd	63.59bc
	100-10	572.70bc	528.36ab	373.85cd	331.45ab	62.72bcd
	CK	450.00g	416.69f	335.02f	321.20abc	77.09a

同一年份、同列数据后标有不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。60-6、60-8、60-10、80-6、80-8、80-10、100-6、100-8、100-10、CK 见表 1。

表 6 控释氮肥一次性减量基施和密植水稻的干物质积累量在年度和处理间的方差分析 (2021–2022 年)

Table 6 Variance analysis of dry matter accumulation under one-time base application with reduced amount of controlled-release nitrogen fertilizer and density increase between years and treatments (2021–2022)

变异来源	播种期至拔节期		拔节期至抽穗期		抽穗期至成熟期		收获指数
	干物质积累量	比例	干物质积累量	比例	干物质积累量	比例	
年度	**	**	**	NS	**	NS	NS
处理	**	**	**	NS	**	NS	**
年度×处理	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS

** 表示有极显著影响 ($P < 0.01$), * 表示有显著影响 ($P < 0.05$), NS 表示影响不显著。

2.4 稻米加工和外观品质

由表 8、表 9 可知,与 CK 相比,各减氮处理的精米率下降了 0.07%~2.15%。在外观品质方面,垩白粒率、垩白度呈现如下规律:随着控释肥释放期的延长,先降低后升高;随着每穴苗数的增加,

垩白粒率、垩白度总体呈现升高的趋势。各减氮处理的垩白粒率、垩白度较 CK 均显著降低 ($P < 0.05$)。相较于其他减氮处理和 CK,80-6 处理的垩白粒率、垩白度分别下降了 0.45%~12.17%、1.16%~40.86%。

表 7 控释氮肥一次性减量基施和密植对干物质积累量的影响 (2021–2022 年)

Table 7 Effects of one-time base application with reduced amount of controlled-release nitrogen fertilizer and density increase on dry matter accumulation (2021 to 2022)

年份	处理	播种期至拔节期		拔节期至抽穗期		抽穗期至成熟期		收获指数 (%)
		干物质积累量 (t/hm ²)	比例 (%)	干物质积累量 (t/hm ²)	比例 (%)	干物质积累量 (t/hm ²)	比例 (%)	
2021	60-6	5.13bc	25.64cd	7.69cd	38.53ab	7.17bc	35.84ab	49.37ab
	60-8	5.23ab	26.54bc	7.41de	37.66b	7.05bcd	35.81ab	48.61bc
	60-10	5.34a	28.18a	7.18e	37.85b	6.44d	33.98b	48.27c
	80-6	4.99c	24.03efg	8.15ab	39.24ab	7.62ab	36.73a	49.49ab
	80-8	5.10bc	25.09de	7.81bc	38.42ab	7.41bc	36.49a	49.10abc
	80-10	5.33a	26.93b	7.40de	37.40b	7.05bcd	35.67ab	48.69bc
	100-6	4.36e	21.80h	8.07b	40.32a	7.58abc	37.88a	49.75a
	100-8	4.66d	23.79g	7.59cd	38.68ab	7.36bc	37.53a	49.34ab
	100-10	4.76d	24.93def	7.35de	38.50ab	6.98cd	36.57a	49.07abc
	CK	5.18ab	23.91fg	8.43a	38.92ab	8.05a	37.17a	50.06a
2022	60-6	5.17bc	25.72bc	7.55cd	37.59bcd	7.38bcd	36.68a	49.31abc
	60-8	5.29ab	26.81b	7.29de	36.93cd	7.15cd	36.25a	48.70bc
	60-10	5.37a	27.96a	7.01e	36.49d	6.83d	35.55a	48.43c
	80-6	5.08c	24.22def	8.07b	38.50abcd	7.82ab	37.28a	49.49ab
	80-8	5.14bc	25.14cd	7.78bc	38.13abcd	7.54abc	36.74a	49.22abc
	80-10	5.32ab	26.80b	7.48cd	37.69bcd	7.05cd	35.51a	48.71bc
	100-6	4.52e	22.47g	8.04b	39.97a	7.57abc	37.56a	49.90a
	100-8	4.67de	23.69ef	7.68c	38.92abc	7.38bcd	37.39a	49.41abc
	100-10	4.74d	24.70cde	7.32de	38.11abcd	7.14cd	37.18a	49.11abc
	CK	5.03c	23.14fg	8.61a	39.57ab	8.11a	37.30a	50.11a

同一年份、同列数据后标有不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。60-6、60-8、60-10、80-6、80-8、80-10、100-6、100-8、100-10、CK 见表 1。

表 8 控释氮肥一次性减量基施和密植水稻稻米加工和外观品质在年度和处理间的方差分析 (2021–2022 年)

Table 8 Variance analysis of rice processing and appearance quality under one-time base application with reduced amount of controlled-release nitrogen fertilizer and density increase between years and treatments (2021 – 2022)

变异来源	糙米率	精米率	整精米率	垩白粒率	垩白度
年度	**	**	**	NS	NS
处理	NS	**	NS	**	**
年度×处理	NS	NS	NS	NS	**

** 表示有极显著影响 ($P<0.01$), NS 表示影响不显著。

2.5 稻米营养、蒸煮食味品质

由表 10、表 11 可知,不同肥料与密度组合处理对稻米蛋白质含量、直链淀粉含量和食味值均有显著影响。随着控释肥释放期的延长,蛋白质含量呈现增长的趋势;随着每穴苗数的增加,蛋白质含量呈现降低的趋势。相较于 CK,各减氮处理的蛋白质含量呈下降趋势,降幅为1.89%~7.19%。直链淀粉含量、食味值的变化表现出如下规律:随着控释肥释放期的延长,直链淀粉含量、食味值呈现下降趋势;随着每穴苗数的增加,直链淀粉含量、食味值呈现升高的趋势。各减氮处理的直链淀粉含量较 CK 增加了2.88%~7.93%,食味值较 CK 升高了0.45%~8.67%。

表 9 控释氮肥一次性减量基施和密植对稻米加工和外观品质的影响(2021–2022 年)

Table 9 Effects of one-time base application with reduced amount of controlled-release nitrogen fertilizer and density increase on rice processing and appearance quality (2021 to 2022)

年份	处理	糙米率 (%)	精米率 (%)	整精米率 (%)	垩白粒率 (%)	垩白度 (%)
2021	60-6	84.29a	71.86bc	67.16ab	25.44cd	5.05e
	60-8	84.34a	72.06bc	66.96ab	25.57bcd	5.13e
	60-10	84.40a	72.27abc	67.27ab	25.86bc	5.68c
	80-6	84.36a	71.52c	66.67ab	24.39e	4.86e
	80-8	84.47a	71.99bc	66.43b	24.73de	5.05e
	80-10	84.56a	72.02bc	67.17ab	24.83de	5.25de
	100-6	84.28a	72.38abc	67.17ab	25.96bc	5.64cd
	100-8	84.31a	72.42abc	67.23ab	26.41b	5.87bc
	100-10	84.35a	72.67ab	67.53ab	26.48b	6.28b
	CK	84.69a	73.09a	67.77a	27.77a	7.15a
2022	60-6	84.57a	72.63abc	68.02ab	25.36de	5.57c
	60-8	84.69a	72.81abc	67.77ab	25.54cd	5.60c
	60-10	84.75a	72.94abc	68.42ab	26.09bcd	5.70c
	80-6	84.63a	72.32c	67.80ab	24.39f	4.27d
	80-8	84.75a	72.54bc	67.63b	24.50ef	4.32d
	80-10	84.81a	72.60abc	68.21ab	24.59ef	4.51d
	100-6	84.48a	72.77abc	68.13ab	26.04bcd	5.93c
	100-8	84.51a	73.33ab	68.15ab	26.38bc	6.37b
	100-10	84.66a	73.43ab	68.87ab	26.51b	6.71b
	CK	84.88a	73.48a	69.00a	27.48a	7.22a

同一年份、同列数据后标有不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。60-6、60-8、60-10、80-6、80-8、80-10、100-6、100-8、100-10、CK 见表 1。

表 10 控释氮肥一次性减量基施和密植水稻稻米营养和食味品质在年度和处理间的方差分析(2021–2022 年)

Table 10 Variance analysis of nutrition and taste quality under one-time base application with reduced amount of controlled-release nitrogen fertilizer and density increase between years and treatments (2021–2022)

变异系数	蛋白质含量	直链淀粉含量	食味值	外观值	硬度	黏度	平衡度
年度	**	*	**	**	**	**	**
处理	**	**	**	**	**	**	**
年度×处理	**	NS	**	**	**	NS	**

** 表示有极显著影响($P<0.01$), * 表示有显著影响($P<0.05$), NS 表示影响不显著。

表 11 控释氮肥一次性减量基施和密植对稻米营养和食味品质的影响(2021–2022 年)

Table 11 Effects of one-time base application with reduced amount of controlled-release nitrogen fertilizer and density increase on nutrition and taste quality of rice (2021 to 2022)

年份	处理	蛋白质含量 (%)	直链淀粉含量 (%)	食味值	外观值	硬度	黏度	平衡度
2021	60-6	9.59cd	11.75bc	76.67b	7.53bcd	6.13d	8.07abc	8.03ab
	60-8	9.50de	11.89ab	78.67a	7.93ab	6.07de	8.40a	8.07ab
	60-10	9.38e	12.05a	79.33a	8.00a	5.90e	8.40a	8.40a
	80-6	9.69bc	11.65c	74.00cd	6.50f	6.47ab	7.73bc	7.20cd
	80-8	9.55cde	11.76bc	75.67b	7.00e	6.37bc	8.03abc	7.23cd
	80-10	9.42e	11.88ab	79.00a	7.60abc	6.07de	8.20ab	7.90ab

续表11 Continued11

年份	处理	蛋白质含量 (%)	直链淀粉含量 (%)	食味值	外观值	硬度	黏度	平衡度
2022	100-6	9.85b	11.59c	73.33d	7.07e	6.63a	6.83e	7.67bc
	100-8	9.81b	11.67bc	75.33bc	7.17cde	6.40b	7.23de	7.00de
	100-10	9.79b	11.72bc	76.67b	7.97ab	6.17cd	7.90bc	6.60e
	CK	10.04a	11.22d	73.00d	7.13de	6.40b	7.70cd	7.13cde
	60-6	9.47cde	11.58bc	76.33b	7.07c	6.23cd	7.93bcde	7.10bc
	60-8	9.38de	11.75b	78.00a	7.33bc	6.13de	8.27abc	7.37abc
	60-10	9.30e	11.98a	78.67a	7.57ab	6.00e	8.70a	7.60ab
	80-6	9.53cd	11.48c	73.67de	5.83e	6.43bc	7.63def	6.97cd
	80-8	9.40de	11.62bc	75.33bc	5.97e	6.23cd	8.10bcd	7.07bc
	80-10	9.34e	11.70b	78.00a	6.47d	6.10de	8.37ab	7.10bc
	100-6	9.77b	11.42c	73.33de	6.93c	6.83a	7.40f	5.80f
	100-8	9.63bc	11.54bc	74.67cd	7.00c	6.63ab	7.53ef	6.00ef
	100-10	9.54cd	11.59bc	76.00bc	7.07c	6.43bc	7.70def	6.50de
	CK	10.02a	11.10d	72.67e	7.90a	5.77f	7.83cdef	7.67a

同一年份、同列数据后标有不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。60-6、60-8、60-10、80-6、80-8、80-10、100-6、100-8、100-10、CK 见表 1。

2.6 经济效益

由表 12、表 13 可知,不同肥料与密度组合处理对机插稻经济效益的影响显著。随着控释肥释放期的延长,经济效益呈现先上升后下降的趋势,且控释期为 80 d 的处理的经济效益显著高于其他处理 ($P<0.05$)。相较于 80-8、80-10 处理,80-6 处理的经济效益分别提高了 14.59%~14.92%、37.10%~

38.95%。随着每穴苗数的增加,经济效益降低,每穴苗数为 6 株的处理的经济效益显著高于其他处理 ($P<0.05$),与 60-6、100-6 处理相比,80-6 处理的经济效益分别提高了 17.08%~19.38%、12.90%~13.22%。而相较于 CK,80-6 处理的经济效益提高了 3.60%~5.28%。

表 12 控释氮肥一次性减量基施和密植水稻的经济效益在年度和处理间的方差分析 (2021–2022 年)

Table 12 Variance analysis of economic benefits of rice under one-time base application with reduced amount of controlled-release nitrogen fertilizer and density increase between years and treatments (2021–2022)

变异来源	1 hm ² 产值	1 hm ² 土地种子成本	1 hm ² 土地肥料成本	1 hm ² 土地地租、 农机和人工投入	1 hm ² 土地经济效益
年度	**				**
处理	**				**
年度×处理	NS				NS

** 表示有极显著影响 ($P<0.01$), NS 表示影响不显著。

表 13 控释氮肥一次性减量基施和密植对经济效益的影响 (2021–2022 年)

Table 13 Effects of one-time base application with reduced amount of controlled-release nitrogen fertilizer and density increase on economic benefits (2021 to 2022)

年份	处理	1 hm ² 产值 (元)	1 hm ² 土地种子成本 (元)	1 hm ² 土地肥料成本 (元)	1 hm ² 土地地租、 农机和人工投入 (元)	1 hm ² 土地经济效益 (元)
2021	60-6	25 856.45c	421.88	1 800.00	19 621.88	6 234.57b
	60-8	25 073.40d	562.50	1 800.00	19 762.50	5 310.90c
	60-10	23 978.67f	703.13	1 800.00	19 903.13	4 075.55e

续表13 Continued13

年份	处理	1 hm ² 产值 (元)	1 hm ² 土地种子 成本(元)	1 hm ² 土地肥料 成本(元)	1 hm ² 土地地租、 农机和人工投入(元)	1 hm ² 土地经济 效益(元)
2022	80-6	26 921.20b	421.88	1 800.00	19 621.88	7 299.33a
	80-8	26 132.66c	562.50	1 800.00	19 762.50	6 370.16b
	80-10	25 227.18d	703.13	1 800.00	19 903.13	5 324.05c
	100-6	26 087.00c	421.88	1 800.00	19 621.88	6 465.13b
	100-8	25 344.68d	562.50	1 800.00	19 762.50	5 582.18c
	100-10	24 521.17e	703.13	1 800.00	19 903.13	4 618.05d
	CK	28 408.09a	281.25	1 681.00	21 362.25	7 045.84a
	60-6	25 957.91d	421.88	1 800.00	19 621.88	6 336.04d
	60-8	25 183.05f	562.50	1 800.00	19 762.50	5 420.55f
	60-10	24 373.20h	703.13	1 800.00	19 903.13	4 470.08h
	80-6	27 185.65b	421.88	1 800.00	19 621.88	7 563.77a
	80-8	26 344.10c	562.50	1 800.00	19 762.50	6 581.60cd
	80-10	25 346.48ef	703.13	1 800.00	19 903.13	5 443.35f
	100-6	26 302.57c	421.88	1 800.00	19 621.88	6 680.70c
	100-8	25 518.41e	562.50	1 800.00	19 762.50	5 755.91e
	100-10	24 708.44g	703.13	1 800.00	19 903.13	4 805.31g
	CK	28 546.73a	281.25	1 681.00	21 362.25	7 184.48b

同一年份、同列数据后标有不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。60-6、60-8、60-10、80-6、80-8、80-10、100-6、100-8、100-10、CK 见表 1。

3 讨论

3.1 控释氮肥一次性减量基施和密植条件下机插粳稻的产量和群体质量特征

肥料,特别是氮肥的调控技术是影响水稻高产稳产栽培的关键因素之一^[23-25]。其中,减氮密植已成为近年来水稻高产栽培的热点研究之一。朱相成^[26]认为,在 180 kg/hm²氮肥用量、减少 30%施氮量的前提下,可以通过增加 40%的基本苗数获得稳产和高产。蔡桂青^[27]认为,在 240 kg/hm²氮肥水平、减少 25%施氮量的条件下,可以通过增加 20%的基本苗数获得高产。本试验结果表明,在一次性施肥且减氮 25%的条件下,不同控释氮肥与密度组合对产量有显著影响,各减氮处理中以 80-6 处理的机插稻产量较高。产生上述结果可能与控释氮肥的养分释放特征有关:释放期为 60 d 的控释氮肥在水稻生长前期养分释放速率过快,导致无效分蘖增多,而后期养分供应不足,导致光合生产力下降,干物质积累量也随之降低;100 d 控释肥处理减产是由于其养分释放过慢,前期的养分释放量少,养分供应不足造成分蘖发生不足,使得单位面积穗数减少,群体

颖花量不足,虽然在中后期能够持续提供养分,但仍无法实现高产。在 80 d 控释肥处理下,其释放周期能匹配水稻前期分蘖发生所需的养分,促进有效分蘖的发生和群体颖花量的增长,且在中后期仍能为抽穗、籽粒灌浆提供养分,从而形成较高产量^[28-29]。此外,本试验还发现,相较于 80-6 处理,尽管 80-8、80-10 处理均增加了栽插密度,但产量仍低于 80-6 处理;与 CK 相比,虽然 80-6 处理增加了栽插密度,但产量仍低于 CK。上述结果说明,本试验中限制产量进一步增加的主要原因是氮肥施用量,而不是密度。因此,在减氮 25%的条件下,在控释氮肥一次性基施条件下提高栽插密度并不能平衡氮肥施用量降低导致的产量降低,这与前人研究结果^[12]一致。蒋伟勤^[30]认为,施用控混肥能更好地匹配水稻养分吸收规律、提高氮素利用率,从而促进群体颖花量的增加,实现水稻增产。因此,接下来我们将研究施用控释氮肥组合,而不是单一的控释氮肥。

3.2 控释氮肥一次性减量基施和密植条件下优质食味粳稻稻米品质特征与经济效益

加工和外观品质对稻米的商业价值至关重要。其中,前者在稻米流通中扮演着重要角色,而后者直

接影响了稻米在市场上的认可度和单位价格^[31]。前人关于增加种植密度会如何影响稻米加工品质尚无定论,这可能与增加密度的方式有关^[13]。本研究发现,通过增加每穴栽插苗数而非减少行株距来实现密植,可以获得主茎成穗占比更大的产量群体,而水稻主茎穗籽粒往往较分蘖穗具有更好的加工品质^[32],这可能是密植处理加工品质改善的原因。在本研究中,粳稻的外观品质取得了显著提升,可能是因为控释肥的养分释放相对平稳,有助于维持籽粒灌浆物质的合成与转运速度的平稳,减少胚乳中的孔隙结构,从而改善籽粒的外观品质^[33]。

近年来,消费者越来越关注稻米的营养和食味品质。营养品质主要以蛋白质含量为评定指标,而蛋白质含量、直链淀粉含量共同影响着稻米的食味品质^[34]。在本研究中,减氮水平下不同控释氮肥处理的蛋白质含量均较 CK 显著降低,且表现为随着控释期的延长蛋白质含量增加的趋势。这一结果可能是因为氮素释放期延长导致水稻植株生长后期氮素养分过多,促进了籽粒蛋白质合成^[35-36]。在本试验中,具有较低蛋白质含量的减氮密植处理表现出较高的食味品质,是由于稻米食味主要受到蛋白质含量的影响。此外,增加种植密度还将导致单茎可吸收的氮素含量较少,使得蛋白质合成受到抑制,因此呈现出蛋白质含量随着栽插密度的提高不断降低的趋势,而食味品质则得到改善^[37-39]。

对于农民而言,经济效益是推动农业生产的强有力动力之一。在本试验中,我们发现 80-6 处理在一次性基施控释肥下实现了最高的经济效益。尽管 CK 的产值显著高于所有控释肥减氮密植处理,且肥料成本最低,但由于 CK 需要人工分次施肥,受限于高昂的人工成本,其经济效益反而低于 80-6 处理。考虑到当前中国面临的人口老龄化、劳动力短缺问题不断加剧,未来人工成本差距预计进一步扩大。因此,通过一次性基施控释肥减氮密植,从而提高水稻产质效协同的可行性将持续提高。然而,从目前情况看,80-6 处理的产量并不能更好地实现高产稳产。因此,进一步优化一次性施肥条件下的减氮密植设置,进一步提高水稻产量,将有助于在实现经济效益的同时更好地保证水稻粮食安全。

4 结论

与常规分次施肥相比,在控释氮肥一次性减量

基施和密植的种植方式下,稻米产量虽有一定下降,但 80-6 处理仍取得较高水平。因此,建议在优质食味粳稻种植中一次性基施控释氮肥 225 kg/hm² 80 d,并 1 穴栽插 6 株苗,能在保证产量的前提下提升稻米品质,同时获得较高经济效益,可作为机插粳稻丰产优质高效协同的一次性减氮施肥的氮密组合。

参考文献:

- [1] 张洪程,胡雅杰,戴其根,等. 中国大田作物栽培学前沿与创新方向探讨[J]. 中国农业科学,2022,55(22):4373-4382.
- [2] 张洪程,胡雅杰,杨建昌,等. 中国特色水稻栽培学发展与展望[J]. 中国农业科学,2021,54(7):1301-1321.
- [3] 李顺伟. 施肥过量的危害及对应措施探讨[J]. 中小企业管理与科技(上旬刊),2013(11):180-181.
- [4] 李忠正,朱忠清. 我国水稻轻简化栽培的研究进展[J]. 农业科技通讯,2015(3):15-18.
- [5] 凌启鸿. 关于水稻轻简栽培问题的探讨[J]. 中国稻米,1997(5):3-9.
- [6] 蒋伟勤,马中涛,胡群,等. 缓控释氮肥对水稻生长发育及氮素利用的影响[J]. 江苏农业学报,2020,36(3):777-784.
- [7] 蒋伟勤,胡群,俞航,等. 优质食味粳稻控混肥一次性基施效应[J]. 中国农业科学,2021,54(7):1382-1396.
- [8] 徐栋. 长江下游南部地区优质丰产氮高效单季晚熟粳稻品种筛选及一次性施肥研究[D]. 扬州:扬州大学,2022.
- [9] 宋文杰,罗嘉润,刘伟,等. 控释肥一次性侧深施对水稻生长、氮素利用和产量的影响[J]. 华中农业大学学报,2023,42(2):99-107.
- [10] 黄恒,姜恒鑫,刘光明,等. 侧深施氮对水稻产量及氮素吸收利用的影响[J]. 作物学报,2021,47(11):2232-2249.
- [11] 胡雅杰. 机插方式和密度对不同穗型水稻品种生产力及其形成的影响[D]. 扬州:扬州大学,2016.
- [12] 葛金鑫. 增密减氮对水稻产量及稻米食味品质的影响[D]. 武汉:华中农业大学,2022.
- [13] 吴培. 施氮量和直播密度互作对优质食味水稻产量和品质的影响[D]. 扬州:扬州大学,2019.
- [14] 林洪鑫,肖运萍,袁展汽,等. 水稻合理增密及其优质高产机理研究进展[J]. 中国农学通报,2011,27(9):1-4.
- [15] 陈于敏,世荣,韩蕊,等. 施氮量和栽插密度对‘云粳 30 号’产量和品质的影响[J]. 西南农业学报,2014,27(4):1419-1423.
- [16] 曹兵,丁紫娟,侯俊,等. 控释掺混肥结合增密对水稻氮肥利用效率和氨挥发的影响[J]. 农业工程学报,2022,38(13):56-63.
- [17] 胡群,夏敏,张洪程,等. 氮肥运筹对钵苗机插优质食味水稻产量及氮素吸收利用的影响[J]. 作物学报,2016,42(11):1666-1676.
- [18] 种浩天. 增密减氮对不同类型水稻品种产量、资源利用效率和稻米品质的影响[D]. 武汉:长江大学,2022.

- [19] 全国粮油标准化技术委员会. 优质稻谷: GB/T 17891-2017 [S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 中国国家标准化管理委员会, 2018: 1.
- [20] 周丽慧, 刘巧泉, 张昌泉, 等. 2种方法测定稻米蛋白质含量及其相关性分析[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2009, 30(1): 68-72.
- [21] 申涛. 南方稻区稻米直链淀粉含量和胶稠度的近红外分析[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2022.
- [22] 徐栋, 朱盈, 周磊, 等. 不同类型粳粳杂交稻产量和品质性状差异及其与灌浆结实期气候因素间的相关性[J]. 作物学报, 2018, 44(10): 1548-1559.
- [23] 田晋钰. 麦茬约束型直播水稻综合生产力特征及密氮耦合调控[D]. 扬州: 扬州大学, 2023.
- [24] 胡雅杰, 朱大伟, 邢志鹏, 等. 改进施氮运筹对水稻产量和氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 12-22.
- [25] 薛金元, 许芳芳, 王娟娟, 等. 减氮增密对水稻产量、氮素吸收及土壤剖面养分分布的影响[J]. 河南农业科学, 2021, 50(6): 82-90.
- [26] 朱相成. 增密减氮对东北水稻产量和氮肥效率及温室气体排放的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- [27] 蔡桂青. 施氮量和种植密度对水稻产量及氮肥利用率的影响及差异[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2015.
- [28] 李梦月. 不同释放期控释肥及水氮用量对作物产量及水氮利用的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- [29] 吴琼. 缓控释肥与水分互作对水稻产量及氮素吸收利用的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2022.
- [30] 蒋伟勤. 钵苗机插优质食味迟熟中粳稻控混肥一次性施用效应研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2021.
- [31] 周文涛, 龙文飞, 毛燕, 等. 节水轻简栽培模式下增密减氮对双季稻田温室气体排放的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2604-2612.
- [32] WANG W T, GE J L, XU K, et al. Differences in starch structure, thermal properties, and texture characteristics of rice from main stem and tiller panicles[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 99: 105341.
- [33] 周磊. 不同配比控释肥对优质食味水稻产量及品质的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2021.
- [34] KAZUO H. Studies on protein content in rice grain[J]. Japanese Journal of Crop Science, 1971(40): 190-196.
- [35] 冯延聪, 文春燕, 朱振华, 等. 氮肥后移对优质稻井冈软粘产量及品质的影响[J]. 江西农业大学学报, 2023, 45(4): 830-840.
- [36] 李银银, 陈静, 周群, 等. 水稻籽粒灌浆的研究进展与展望[J]. 中国稻米, 2015, 21(4): 20-24.
- [37] 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.
- [38] JING L Q, CHEN C, HU S W, et al. Effects of elevated atmosphere CO₂ and temperature on the morphology, structure and thermal properties of starch granules and their relationship to cooked rice quality[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 112: 106360-106371.
- [39] 杨海生, 张洪程, 杨连群, 等. 黄淮优质水稻应用公式计算合理基本苗数量[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2003(1): 37-43.

(责任编辑: 徐艳)