

不同株距下氮肥减量配施运筹对机插杂交稻的产量及光合特性的影响

王海月^{1,2} 张桥¹ 武云霞¹ 严奉君¹ 郭长春¹ 孙永健^{1,*} 徐徽¹ 杨志远¹ 马均^{1,*}

(¹ 四川农业大学 水稻研究所/农业农村部西南作物生理生态与耕作重点实验室, 四川 温江 611130; ² 四川省泸州市泸县农业农村局, 四川 泸县 646100; E-mail: yongjians1980@163.com; majunp2002@163.com)

Effects of Reduced Urea Application on Yield and Photosynthetic Characteristics of Mechanically-transplanted Rice Under Different Planting Spaces

WANG Haiyue^{1,2}, ZHANG Qiao¹, WU Yunxia¹, YAN Fengjun¹, GUO Changchun¹, SUN Yongjian^{1,*}, XU Hui¹, YANG Zhiyuan¹, MA Jun^{1,*}

(¹ Rice Research Institute, Sichuan Agricultural University/Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology, and Cultivation in Southwest, Ministry of Agriculture, Wenjiang 611130, China; ² Luxian County Agricultural and Rural Bureau of Luzhou City, Sichuan Province, Luxian 646100, China; *Corresponding author, E-mail: yongjians1980@163.com; majunp2002@163.com)

Abstract: 【Objective】Our aim is to elucidate the effects of reduced urea application combined with slow-release urea on yield and photosynthetic characteristics of rice and to lay a theoretical basis for the application of mechanical transplanting. 【Method】A split-plot design was set with 16, 18 and 20 cm plant spacing at 30 cm row spacing and four reduced urea application levels combined with slow-release urea (96 kg/hm² of slow-release urea combined with 24 kg/hm² of conventional urea as basal fertilizer with no top-dressing; 96 kg/hm² of slow-release urea as basal fertilizer and 24 kg/hm² of conventional fertilizer as top-dressing; 96 kg/hm² of slow-release urea combined with 54 kg/hm² of conventional urea as basal fertilizer with no top-dressing; and 96 kg/hm² of slow-release urea combined with 30 kg/hm² of conventional urea as basal fertilizer and 24 kg/hm² of conventional urea as top-dressing) and Chuangyou 7329 was used as material. 【Result】The plant spacing and reduced urea application level combined with slow-release urea showed significant or extreme significant regulating effect on leaf area index(LAI), photosynthetic characteristics and grain yield of mechanically transplanted rice in the main growing stages. The reduced urea application level combined with slow-release urea patterns played a more significant effect than the plant spacing. LAI, photosynthetic characteristics, dry matter accumulation, net photosynthetic rate and grain yield showed an increasing trend with the increase of conventional urea level combined with slow-release urea and the increase of postponed conventional urea application level under three plant spacing. At the plant space of 16 cm, the number of stem and tiller of the population increased significantly, resulting in more effective panicles, stronger competition for nutrients, weaker photosynthetic characteristics, and failure to form large panicles, although the seed setting rate was high, the grain number per panicle was low and the yield was low; Under 20 cm plant spacing, the plant density and the total number of tillers was significantly decreased, however, the lower panicle number resulted in the enhanced nutrition absorption, improved photosynthetic capability, large spike formation and increased grain number per panicle. Given the relatively low 1000-grain weight and seed setting rate, the grain yield was decreased; Under the plant spacing of 18 cm, more effective panicles were formed on the basis of sufficient tiller number of the population, which could effectively absorb nutrients in the later stage, with enhanced photosynthetic characteristics, significantly increased seed setting rate and 1000-grain weight, the correlation analysis showed that the population growth rate, photosynthetic potential and effective leaf area index at full heading stage had higher correlation with yield under reduced urea level combined with slow-release urea application and plant spacing. 【Conclusion】The treatment of 18 cm of plant spacing with 30 cm of row spacing at 96 kg/hm² of slow-release urea combined with 30 kg/hm² of conventional urea as basal fertilizer and 24 kg/hm² of conventional urea as top-dressing at 4-leaf

收稿日期: 2019-02-14; 修改稿收到日期: 2019-05-13。

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2018YFD0301202); 四川省教育厅重点项目(16ZA0044); 四川省学术和技术带头人培养支持经费资助。

stage, it could give full play to the high yield advantage of the machine-planted *indica* hybrid rice in this region and improve the photosynthetic material production, with the yield up to 11 681.56 kg/hm² was the best nitrogen application method for high yield in mechanically-transplanted rice.

Key words: mechanically-transplanted rice; plant spacing; yield; N fertilizer allocation and application; photosynthetic characteristic

摘 要: 【目的】研究不同机插株距下缓释氮肥与常规氮肥减量配施在水稻关键生育时期的运筹方式, 为水稻机插秧配套技术的应用提供理论和实践依据。【方法】以中迟熟杂交籼稻川谷优 7329 为试验材料, 采用两因素裂区设计, 在机插行距均为 30 cm 下, 设株距 16 cm、18 cm、20 cm; 并设 4 种缓释氮肥与常规氮肥运筹模式: 1) 基肥为 96 kg/hm² 缓释氮肥和 24 kg/hm² 常规氮肥, 不施追肥; 2) 基肥施 96 kg/hm² 缓释氮肥, 追肥施 24 kg/hm² 常规氮肥; 3) 基肥施 96 kg/hm² 缓释氮肥和 54 kg/hm² 常规氮肥, 不施追肥; 4) 基肥为 96 kg/hm² 缓释氮肥和 24 kg/hm² 常规氮肥, 追肥为 30 kg/hm² 常规氮肥; 以不施氮肥为对照。【结果】缓释氮肥与常规氮肥减量配施运筹和株距对机插杂交籼稻叶面积指数(LAI)、拔节-齐穗期光合势及产量的影响均达显著或极显著水平, 且缓释氮肥与常规氮肥减量配施运筹的效应明显高于机插株距。3 种株距下, 随缓释氮肥与常规氮肥配施量及常规氮肥后移量的增加, 机插杂交籼稻的 LAI、拔节-齐穗期光合势、干物质积累量、净光合速率及产量均呈增加的趋势。株距为 16 cm 时, 群体茎蘖数显著增大, 形成的有效穗多, 对养分的竞争性增强, 光合特性减弱, 未能形成大穗, 虽然结实率高但每穗粒数较少, 产量较低; 株距为 20 cm, 由于密度降低, 群体茎蘖数显著减少, 形成的有效穗少, 后期对养分的吸收充足, 光合特性增强, 形成了足够的大穗, 每穗实粒数显著增加, 但结实率和千粒重较小, 因此未能高产; 而株距为 18 cm 时, 在足够群体茎蘖数的基础上形成的有效穗较多, 后期能有效吸收养分, 光合特性增强, 结实率和千粒重显著增大。相关分析表明, 缓释氮肥与常规氮肥减量配施运筹和株距下, 尤以齐穗-成熟期群体生长率、拔节-齐穗期光合势和齐穗期有效叶面积指数与产量相关性较高。【结论】株距为 18 cm, 96 kg/hm² 缓释氮肥和 24 kg/hm² 常规氮肥作为基肥施用, 30 kg/hm² 常规氮肥作为追肥在倒 4 叶期施用, 能充分发挥本区域机插杂交籼稻的高产优势, 提高光合物质生产, 产量最高可达 11 681.56 kg/hm²。

关键词: 机插稻; 株距; 产量; 氮肥配施运筹; 光合物质生产

中图分类号: S143.1; S511.048

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2019)05-0447-10

氮肥和栽插密度是影响水稻增产的重要因素^[1-4]。采用高密度栽培措施是当前进一步提高水稻产量的主要途径。然而, 在水稻生产过程中, 种植密度过大容易造成群体内部资源分配不合理, 增加病虫害和倒伏风险^[5], 导致增密不增产甚至减产等严重后果。氮肥是水稻生产中的重要生产资料, 为了获得高产, 过量滥施氮肥不仅导致氮肥利用率降低, 还会加重环境污染和资源浪费^[6]。因此, 制定合理的栽培措施, 对实现水稻高产、优质、高效至关重要。前人研究认为^[7-10], 缓释氮肥作为一种新型肥料在水稻增产效应、减少环境污染及提高氮肥利用率等方面具有重要作用, 而缓释氮肥生产成本低、经济投入大, 因此, 缓释氮肥与常规氮肥配施在水稻生产上的应用成为当前的研究热点。大量研究表明^[11-14], 增加种植密度, 可以提高光、温资源的利用率, 依靠群体发挥增产潜力, 但当密度过大时, 反而增加了群体内部个体对光、水、肥的竞争力, 导致单株地上部分干物质积累量减小, 抗病虫害及抗倒伏能力减弱, 个体产量下降, 从而降低群体产量。关于密度和氮肥运筹^[1,15-17]及缓释氮肥^[10,18-20]对杂交籼稻群体结构、光合物质生产、株型及抗倒

伏能力的研究较多, 而缓释氮肥与常规氮肥配施和密度对机插杂交籼稻上的研究较少, 适度增加机插密度和减少缓释氮肥用量优化配施运筹模式对机插稻的生长发育及产量形成的调控效应, 以及两因素之间是否存在互作效应仍未见报道。我们在前期研究的基础上, 通过对缓释氮肥的筛选^[7]、不同施氮量下缓释氮肥配施比例试验^[20]及结合不同的机插株距进行适量缓释氮肥与常规氮肥配施试验^[21]进一步研究表明, 株距和缓释氮肥与常规氮肥配施对机插杂交籼稻成熟期群体干物质量、叶面积指数、拔节-齐穗期光合势及产量影响均达显著或极显著水平, 但在确定缓释氮肥与常规氮肥配施量及适宜的机插株距后, 如何结合机插株距进行缓释氮肥与常规氮肥减量配施运筹, 调控机插稻主要生育时期干物质积累、光合生产及产量间的关系尚不明确。为此, 本研究通过机插密度的调控减氮效应, 结合缓释氮肥与常规氮肥减量配施运筹模式, 在提高群体数量的同时合理降低常规氮肥施用量, 并进一步阐明缓释氮肥与常规氮肥减量配施运筹和机插株距对水稻产量及光合物质生产特征的影响, 以达到增加机插稻产量、提高氮肥利用率、减少成本

表 1 氮肥运筹处理

Table 1. Nitrogen managements.		kg/hm ²		
处理 Treatment	施氮量 N application rate	基肥 Basal manure		追肥-倒 4 叶期(常规氮肥) Topdressing(conventional urea)
		缓释氮肥 Slow-release urea	常规氮肥 Conventional urea	
N ₀	0	0	0	0
N ₁	120	96	24	0
N ₂	120	96	0	24
N ₃	150	96	54	0
N ₄	150	96	30	24

的目的，也为我国西南稻区机械化育插秧配套技术提供理论和实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试品种为适宜西南稻区种植且具有代表性的中迟熟杂交籼稻川谷优 7329(生育期 156~165 d)。肥料选用金正大树脂包膜缓释氮肥(含氮量 44%)、尿素(含氮量 46%)、过磷酸钙和氯化钾。试验田耕层(0~20 cm)土壤质地为砂壤土，有机质 23.8 g/kg，全氮 1.71 g/kg，碱解氮 113.0 mg/kg，速效磷 65.1 mg/kg，速效钾 108.9 mg/kg。采用钵体毯状秧盘(中国水稻研究所)早育秧，久保田 NSPU-68CM 插秧机插秧。

1.2 试验设计与实施

在 2016 年研究报道的不同株距和缓释氮肥减量配施试验基础上^[21]，于 2017 年在四川省成都市四川农业大学水稻研究所试验农场进一步完善和深入，设株距(D)和氮肥减量配施运筹(N)二因素裂区试验。其中，主区在机插行距均为 30 cm 的基础上，设 3 种机插株距，分别为 16 cm(D₁)、18 cm(D₂)和 20 cm(D₃)；副区在缓释氮肥保持 96 kg/hm²不变的前提下，设置 4 种常规氮肥减量与缓释氮肥配施运筹模式和不施氮肥处理(表 1)。

4 月 7 日播种，湿润早育秧，每盘播量 75 g(干种子)，5 月 3 日机插。磷肥用量(折合 P₂O₅) 75 kg/hm²，钾肥施用量(折合 K₂O) 150 kg/hm²，且磷钾肥均作基肥于机插后 1 d 一次性施入。田间小区计产面积为 19.60 m²，3 次重复，各小区间筑埂，并用塑料薄膜覆埂，以防肥水互渗，其他田间管理同当地大面积生产田。此外，本研究是在 2016 年试验基础上设置的，两年试验并未完全重复，但同一缓释氮肥与常规氮肥配施运筹处理下，产量及各生

育时期养分吸收利用年份间差异均未达显著水平，因此，本研究就 2017 年试验结果进行分析。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 分蘖动态

各小区定点 20 穴稻株，返青后(机插后 7 d)每隔 7 d 调查 1 次茎蘖数直至齐穗期。

1.3.2 干物质积累

分别于分蘖盛期、拔节期、齐穗期及成熟期每小区按平均茎蘖数取代表性植株 5 穴，分茎鞘、叶片和穗 3 部分，置于烘箱 105℃ 下杀青 30 min，80℃ 下烘至恒重后，测定干物质质量。

1.3.3 叶面积

分别在分蘖盛期、拔节期及齐穗期，用美国生产的 CID-203 叶面积仪测定绿叶面积，计算叶面积指数及高效叶面积率，其中高效叶面积为有效茎蘖上 3 叶总叶面积。高效叶面积率(%)=有效茎蘖上 3 叶总叶面积/有效茎蘖总叶面积。

1.3.4 群体生长率及光合势

计算拔节至齐穗期群体生长率及光合势。光合势($\times 10^4$ m² d/hm²)= $1/2(L_1+L_2) \times (t_2-t_1)$ ，式中 L₁、L₂ 分别为拔节及齐穗期测定的叶面积，t₁、t₂ 分别为拔节及齐穗期测定的时间。

1.3.5 光合特征参数

于齐穗期、齐穗期后 15 d、齐穗期后 30 d 分别用美国生产的 Li-6400 便携式光合仪测定剑叶净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和胞间二氧化碳浓度(C_i)，并计算表观叶肉导度(AMC)。

1.3.6 考种与计产

收获时各小区调查具有代表性稻株 60 穴，计数有效穗数并计算平均值，分别取代表性稻株 5 穴，考查每穗粒数、结实率及千粒重等性状，各小区按实收穴数计产。

1.4 数据计算与统计分析

用 Microsoft Excel、Origin 9.0 及 DPS 6.5 处理

表 2 常规氮肥减量配施和株距对机插稻产量及其构成因素的影响

Table 2. Effects of reduced urea application combined with slow-release urea on yield and its components in mechanically-transplanted rice under different plant spacing.

处理 Treatment		有效穗数 Effective panicle number/($\times 10^4$ hm ⁻²)	每穗粒数 Grain number per panicle	结实率 Seed-setting rate/%	千粒重 1000-grain weight/g	实际产量 Grain yield /(kg hm ⁻²)
F 值 F value	D ₁ N ₀	186.99 c	144.23 b	93.77 a	33.16 a	8 192.67 e
	D ₁ N ₁	214.03 b	147.66 b	93.31 a	34.03 a	9 811.97 d
	D ₁ N ₂	216.67 b	159.37 a	93.19 ab	32.21 b	10 117.09 c
	D ₁ N ₃	220.30 b	160.36 a	92.16 bc	33.21 a	10 558.64 b
	D ₁ N ₄	237.96 a	165.05 a	91.82 c	32.13 b	11 326.29 a
	平均 Average	215.19	155.33	92.85	32.95	10 001.34
	D ₂ N ₀	187.18 c	147.18 c	94.10 a	33.46 ab	8 596.79 e
	D ₂ N ₁	207.10 b	160.12 b	92.95 ab	33.12 ab	10 081.51 d
	D ₂ N ₂	209.05 b	165.01 ab	92.35 b	34.18 a	10 699.25 c
	D ₂ N ₃	228.93 a	167.41 ab	92.08 b	32.36 b	11 249.35 b
	D ₂ N ₄	232.76 a	168.18 a	90.94 c	33.10 ab	11 681.56 a
	平均 Average	213.00	161.58	92.48	33.25	10 461.69
	D ₃ N ₀	185.00 b	150.79 c	92.03 a	32.21 b	8 086.98 e
	D ₃ N ₁	208.48 a	163.73 b	92.27 a	31.61 b	9 760.95 d
	D ₃ N ₂	214.15 a	165.39 ab	92.14 a	31.85 b	10 098.75 c
	D ₃ N ₃	218.83 a	168.96 ab	89.05 b	32.71 b	10 663.29 b
	D ₃ N ₄	219.31 a	171.49 a	88.57 b	34.26 a	11 079.20 a
	平均 Average	209.16	164.07	90.81	32.53	9 937.83
F 值 F value	株距 Plant spacing(D)	0.55	5.14	33.19**	1.67	35.83**
	氮肥用量 Nitrogen level(N)	23.39**	21.28**	10.78**	0.33	710.11**
	D×N	0.75	0.60	1.15	3.99**	1.75

D₁、D₂、D₃代表株距 16、18、20 cm；同列数据后不同小写字母表示同一机插密度下各氮肥处理在 5% 水平上差异显著($n=3$ ，最小显著差法)；*、**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。下同。

D₁, D₂ and D₃ represent plant spacing of 16, 18 and 20 cm; for a given plant spacing, values within a column followed by different lowercase letters are significantly different($P<0.05$)($n=3$, LSD); * and ** mean significant difference at the 0.05 and 0.01 levels, respectively. The same as below.

系统分析数据及绘图。

2 结果与分析

2.1 不同株距下氮肥减量配施运筹对机插稻产量及其构成因素的影响

由表 2 可见，机插株距仅对结实率和产量的影响达极显著水平；除千粒重外，常规氮肥减量配施运筹对有效穗数、每穗粒数、结实率及产量的影响均达极显著水平；而常规氮肥减量配施和株距的交互效应仅对千粒重的影响达极显著水平。从整体来看，不同的机插株距下，有效穗数和结实率均随机插株距的增加而降低，而每穗粒数则相反，千粒重和产量表现为 D₂>D₁>D₃，且株距为 D₂ 的千粒重和产量较 D₁、D₃ 分别高出 0.91%、2.21%和 4.60%、5.27%。3 种机插株距下，产量随常规氮肥配施量的增加及同一施氮量下施肥次数的增加而增加，且各处理差异显著，株距为 D₁ 下，N₄ 处理可节省氮肥

从而提高氮肥利用率，达到高产节本增效的效果，其高产高效的获得主要是由于有效穗数和每穗粒数优势显著；株距为 D₂ 和 D₃ 下，产量均表现为 N₄>N₃>N₂>N₁>N₀，其高产高效的获得主要是由于在有效穗数及每穗粒数优势显著的基础上，保证了较高的结实率及千粒重。

2.2 不同株距下氮肥减量配施运筹对机插稻分蘖动态的影响

由图 1 可见，同时期水稻群体茎蘖数均表现为 D₁>D₂>D₃；3 种机插株距下分蘖盛期均出现在机插后 28 d，且在机插后 35 d 各常规氮肥减量配施运筹处理的茎蘖数均达到最大，D₁N₄ 的茎蘖数较 D₂N₄、D₃N₄ 分别高 7.67%、12.71%。D₁ 处理下，N₃、N₄ 的茎蘖数显著高于 N₁、N₂，且各常规氮肥减量配施运筹的茎蘖数显著高于 N₀ 处理；株距为 D₂ 时，N₃ 与 N₄ 及 N₁ 与 N₂ 在机插后 35 d 之前茎蘖数差异不显著，随后茎蘖数差异显著增大，且机插 72 d 后茎蘖数减小速度明显变小；株距为 D₃ 时，各常规氮肥减量配施运筹处理间茎蘖数整体上差

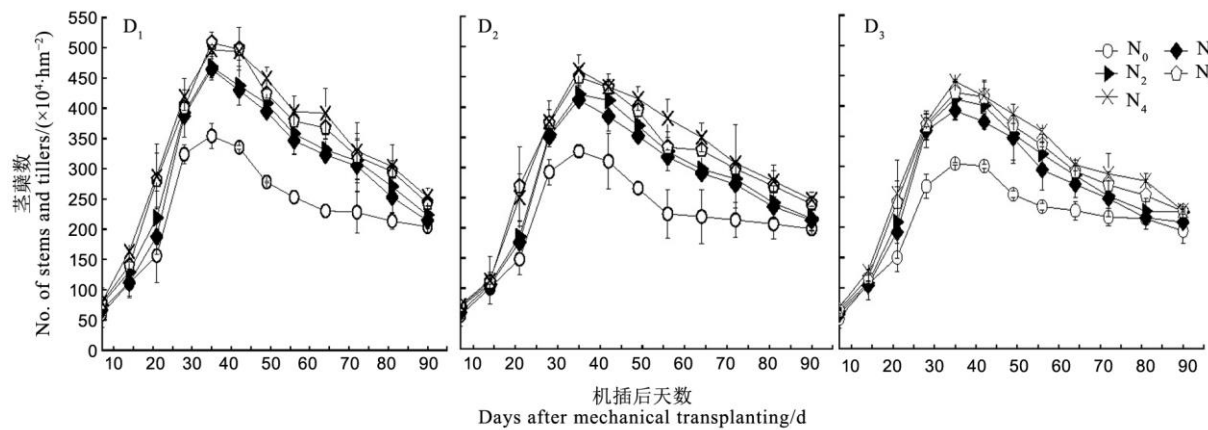


图1 常规氮肥减量配施与株距对机插稻分蘖动态的影响
Fig. 1. Effects of reduced urea application combined with slow-release nitrogen on the dynamic changes of number of stems and tillers in mechanically-transplanted rice under different plant spacing.

表3 常规氮肥减量配施与株距对机插稻光合物质生产的影响
Table 3. Effects of reduced urea application combined with slow-release urea on photosynthetic production in mechanically-transplanted rice under different plant spacing.

处理 Treatment	叶面积指数 LAI		齐穗期高效	齐穗期高效	拔节-齐穗期光合势
	拔节期 Jointing stage	齐穗期 Full heading stage	叶面积指数 High effective LAI at full heading stage	叶面积率 High effective LAI rate at full heading stage/%	Photosynthetic potential of jointing-full heading /($\times 10^4 \text{ m}^2 \text{ d hm}^{-2}$)
D ₁ N ₀	2.28 c	3.09 d	1.96 d	63.25 b	125.30 d
D ₁ N ₁	3.59 a	4.74 c	3.17 c	67.06 a	194.47 c
D ₁ N ₂	3.27 b	5.70 b	3.65 b	64.07 b	209.35 b
D ₁ N ₃	3.78 a	6.44 a	4.11 a	63.83 b	238.34 a
D ₁ N ₄	3.62 a	6.64 a	4.25 a	64.11 b	239.32 a
平均 Average	3.31	5.32	3.43	64.46	201.35
D ₂ N ₀	2.46 d	3.30 d	2.16 d	65.12 a	136.25 d
D ₂ N ₁	3.84 b	5.26 c	3.52 c	66.93 a	214.82 c
D ₂ N ₂	3.55 c	5.98 b	3.73 b	62.39 b	225.02 b
D ₂ N ₃	4.21 a	7.12 a	4.36 a	61.31 b	267.86 a
D ₂ N ₄	4.02 ab	7.42 a	4.58 a	61.68 b	270.18 a
平均 Average	3.62	5.82	3.67	63.49	222.83
D ₃ N ₀	2.29 d	2.94 e	1.86 d	63.16 b	121.33 c
D ₃ N ₁	3.38 bc	4.57 d	3.02 c	66.04 a	184.40 b
D ₃ N ₂	3.26 c	5.01 c	3.23 c	64.44 ab	191.79 b
D ₃ N ₃	3.75 a	5.55 b	3.52 b	63.59 ab	215.59 a
D ₃ N ₄	3.53 ab	6.31 a	3.93 a	62.32 b	228.42 a
平均 Average	3.24	4.88	3.11	63.91	188.31
F 值 D	20.28**	61.55**	40.37**	1.35	181.46**
F value N	98.22**	262.05**	237.89**	7.80**	326.74**
D×N	0.53	2.63*	1.55	1.29**	2.58*

LAI, Leaf area index.

异不显著，且于机插后 63 d 茎蘖数变化趋于平缓。
2.3 不同株距下氮肥减量配施运筹对机插稻光合生产的影响

由表 3 可见，从机插株距来看，拔节及齐穗期 LAI、齐穗期高效 LAI 及拔节-齐穗期光合势均表现为 D₂>D₁>D₃，而齐穗期高效叶面积率则在株距为 16 cm 处理时最大，且株距 16 cm 处理较 18 cm、20 cm 处理分别高 1.90%、1.13%。从常规氮肥减量配

施运筹来看，3 种株距下拔节期 LAI 均表现为 N₃>N₄>N₁>N₂>N₀；而齐穗期 LAI、齐穗期高效 LAI 及拔节-齐穗期光合势均表现为 N₄>N₃>N₂>N₁>N₀。

2.4 不同株距下氮肥减量配施运筹对机插稻光合特性的影响

由表 4 可看出，常规氮肥减量配施运筹对机插稻剑叶净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、齐穗后 15 d

表 4 常规氮肥减量配施和株距对机插稻光合特性的影响

Table 4. Effects of reduced urea application combined with slow-release urea on photosynthetic parameters in mechanical-transplanted rice under different plant spacing.

处理 Treatment	净光合速率 $P_n/(\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1})$		气孔导度 $G_s/(\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1})$		胞间 CO_2 浓度 $C_i/(\mu\text{mol mol}^{-1})$		表观叶肉导度 $\text{AMC}/(\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1})$	
	齐穗期	齐穗后 15 d	齐穗期	齐穗后 15 d	齐穗期	齐穗后 15 d	齐穗期	齐穗后 15 d
	FHS	15 d after FHS	FHS	15 d after FHS	FHS	15 d after FHS	FHS	15 d after FHS
D_1N_0	17.41 c	16.85 b	0.70 b	0.40 c	280.86 ab	329.06 a	62.62 b	51.20 c
D_1N_1	17.51 c	17.02 b	0.78 a	0.41 bc	286.77 a	327.87 a	61.04 b	51.92 c
D_1N_2	17.86 c	17.32 b	0.79 a	0.44 ab	286.30 a	323.08 ab	62.44 b	53.63 bc
D_1N_3	20.25 b	17.67 ab	0.82 a	0.44 ab	273.30 bc	321.47 bc	74.41 a	55.78 ab
D_1N_4	22.65 a	18.71 a	0.85 a	0.46 a	265.68 c	316.86 c	85.30 a	58.20 a
平均 Average	19.14	17.51	0.79	0.43	278.58	323.67	69.16	54.15
D_2N_0	18.85 b	17.59 c	0.72 b	0.38 b	282.65 a	319.72 a	66.74 b	55.06 d
D_2N_1	19.25 b	18.49 b	0.79 a	0.38 b	280.94 a	313.46 ab	68.55 b	59.02 c
D_2N_2	19.27 b	20.07 a	0.82 a	0.40 b	277.37 a	310.82 b	69.56 b	69.42 a
D_2N_3	20.62 ab	20.81 a	0.84 a	0.45 a	275.04 a	307.15 bc	75.03 ab	64.60 b
D_2N_4	22.96 a	21.15 a	0.86 a	0.48 a	274.76 a	304.73 c	83.53 a	67.90 ab
平均 Average	20.19	19.62	0.80	0.42	278.15	311.17	72.68	63.20
D_3N_0	17.14 c	17.06 b	0.66 c	0.39 b	283.34 a	331.57 a	60.54 c	51.45 b
D_3N_1	17.73 bc	17.36 b	0.79 ab	0.41 ab	279.71 a	323.31 ab	63.85 bc	54.65 ab
D_3N_2	18.24 abc	17.80 ab	0.75 b	0.42 ab	276.28 a	319.09 bc	66.25 abc	56.67 a
D_3N_3	19.95 ab	18.17 ab	0.81 ab	0.43 ab	274.79 a	317.91 bc	72.63 ab	56.97 a
D_3N_4	20.96 a	19.07 a	0.87 a	0.45 a	272.93 a	314.16 c	76.80 a	59.00 a
平均 Average	18.80	17.89	0.78	0.42	277.41	321.21	68.02	55.75
F 值 D	4.96	6.60	1.25	0.35	0.11	18.32**	2.47	8.65*
F value N	10.16**	10.38**	8.08**	7.47**	2.55	11.95**	8.74**	11.38**
D×N	0.24	1.04	0.26	0.70	0.56	0.29	0.34	1.57

FHS—齐穗期; P_n —净光合速率; G_s —气孔导度; C_i —胞间 CO_2 浓度; AMC—表观叶肉导度。
FHS, Full heading stage; P_n , Net photosynthetic rate; G_s , Stomatal conductance; C_i , Intercellular CO_2 concentration; AMC, Apparent leaf mesophyll conductance.

胞间 $\text{CO}_2(C_i)$ 及表观叶肉导度(AMC)的影响均达极显著水平。从不同株距下常规氮肥减量配施运筹来看,齐穗期剑叶 P_n 、 G_s 及 AMC 表现为 $\text{D}_2>\text{D}_1>\text{D}_3$,齐穗后 15 d 剑叶 P_n 、AMC 表现为 $\text{D}_3>\text{D}_2>\text{D}_1$,而齐穗后 15 d 剑叶 G_s 及 C_i 表现为 $\text{D}_1>\text{D}_3>\text{D}_2$ 。相同株距下,齐穗期及齐穗后 15 d 机插稻剑叶 P_n 、 G_s 及 AMC 整体上均随常规氮肥配施量的增加及追肥次数呈增加的趋势,而胞间 CO_2 浓度则呈相反的趋势。

2.5 不同株距下氮肥减量配施运筹对机插稻干物质积累的影响

常规氮肥减量配施运筹对各生育时期群体干物质质量及各生育阶段群体生长率的影响均达极显著水平(表 5)。就株距而言,各生育时期群体干物质质量、分蘖-拔节及拔节-齐穗群体生长率均表现为 $\text{D}_2>\text{D}_1>\text{D}_3$,而齐穗-成熟期群体生长率则表现为 $\text{D}_2>\text{D}_3>\text{D}_1$,且 D_2 较 D_3 和 D_1 分别提高了 2.75%和 3.63%。就常规氮肥减量配施运筹来看,各生育时期群体干物质质量及分蘖-拔节期群体生长率均随常规氮肥配施量及施肥次数的增加呈增加的趋势;且株距为 D_1 和 D_3 时,各生育时期群体干物质质量及分

蘖-拔节群体生长率各常规氮肥减量配施处理间影响达显著水平,而齐穗-成熟期群体生长率各常规氮肥减量配施处理间无显著差异;株距为 D_2 时,齐穗期群体干物质质量及拔节-齐穗群体生长率在同一施氮水平的不同常规氮肥运筹间无显著差异。

2.6 氮肥减量配施运筹和不同株距下叶面积指数、光合物质生产与产量的关系

由表 6 可得,常规氮肥减量配施运筹和不同株距下机插杂交籼稻拔节和齐穗期有效 LAI、结实期净光合速率、各阶段群体生长率及拔节-齐穗期光合势整体上与成熟期干物质质量、有效穗数、每穗粒数及产量呈极显著正相关,而与结实率整体呈显著或极显著负相关,与千粒重无显著相关性。

3 讨论

3.1 不同株距下氮肥减量配施运筹对机插杂交籼稻产量形成的影响

水稻产量是由有效穗数、每穗粒数、结实率及千粒重决定的。在不同栽培措施下水稻产量形成过程中各因素发生的作用不同。大量研究^[22-23]表明基

表 5 常规氮肥减量配施和株距下机插稻群体干物质积累特性
Table 5. Dry matter accumulation of population in mechanically-transplanted rice under different plant spacing at reduced urea application combined with slow-release urea.

处理 Treatment	群体干物质质量 Population dry matter/(t hm ⁻²)				群体生长率 Population growth rate/(g m ⁻² d ⁻¹)		
	分蘖盛期 TS	拔节期 JS	齐穗期 FHS	成熟期 MS	分蘖-拔节 TS-JS	拔节-齐穗 JS-FHS	齐穗-成熟 FHS-MS
D ₁ N ₀	0.51 e	2.25 e	8.78 d	13.23 e	12.45 e	18.66 b	10.87 b
D ₁ N ₁	1.03 d	3.52 d	10.45 c	16.86 d	17.85 d	19.78 ab	15.63 a
D ₁ N ₂	1.17 c	3.88 c	10.88 bc	17.33 c	19.37 c	19.99 ab	15.75 a
D ₁ N ₃	1.32 b	4.34 b	11.30 b	17.92 b	21.54 b	19.90 ab	16.14 a
D ₁ N ₄	1.45 a	4.75 a	12.29 a	19.41 a	23.61 a	21.54 a	17.36 a
平均 Average	1.09	3.75	10.74	16.95	18.9	19.98	15.15
D ₂ N ₀	0.52 e	2.30 e	9.10 c	13.59 d	12.76 d	19.41 b	10.97 c
D ₂ N ₁	1.05 d	3.62 d	10.61 b	17.18 c	18.34 c	19.98 b	16.02 b
D ₂ N ₂	1.18 c	4.04 c	10.94 b	17.92 b	20.38 b	19.73 b	17.02 ab
D ₂ N ₃	1.35 b	4.45 b	12.36 a	19.17 a	22.13 ab	22.59 a	16.63 ab
D ₂ N ₄	1.50 a	4.83 a	12.59 a	19.93 a	23.82 a	22.17 a	17.89 a
平均 Average	1.12	3.85	11.12	17.56	19.49	20.78	15.71
D ₃ N ₀	0.49 e	2.17 e	8.60 d	13.08 d	12.00 d	18.38 b	10.92 b
D ₃ N ₁	1.01 d	3.27 d	10.33 c	16.67 c	16.13 c	20.19 ab	15.44 a
D ₃ N ₂	1.11 c	3.74 c	10.62 bc	17.31 bc	18.83 b	19.64 ab	16.31 a
D ₃ N ₃	1.29 b	4.12 b	11.19 ab	18.01 b	20.25 ab	20.18 ab	16.64 a
D ₃ N ₄	1.42 a	4.43 a	11.95 a	18.98 a	21.52 a	21.48 a	17.15 a
平均 Average	1.06	3.55	10.54	16.81	17.75	19.97	15.29
F 值 D	2.88	2.59	3.38	6.05	2.08	2.09	1.53
F value N	429.11**	280.50**	55.22**	220.98**	89.77**	5.01**	36.75**
D×N	0.19	0.36	0.52	0.60	0.30	0.55	0.14

TS, Tillering stage; JS, Jointing stage; MS, Maturing stage. The same as below.

表 6 氮肥减量配施运筹和株距下叶面积指数、光合物质生产与产量的相关系数
Table 6. Correlation coefficients of leaf area index(LAI) and photosynthetic production with yield in different plant spacing at reduced urea application combined with slow-release urea.

指标 Index	生育期 Growth stage	成熟期干物质质量 Dry biomass at MS	有效穗数 No. of effective panicles	穗粒数 Spikelet number per panicle	结实率 Seed-setting rate	千粒重 1000-grain weight	产量 Grain yield
叶面积指数 LAI	拔节期 JS	0.88**	0.69**	0.64**	-0.32*	0.05	0.88**
	齐穗期 FHS	0.94**	0.80**	0.67**	-0.42**	0.03	0.96**
净光合速率 Net photosynthetic rate	齐穗期 FHS	0.59**	0.50**	0.45**	-0.27	0.11	0.64**
	齐穗 15 d 15 d FHS	0.62**	0.51**	0.44**	-0.31*	0.07	0.64**
群体生长率 Population growth rate	分蘖盛期-拔节期 TS-JS	0.94**	0.82**	0.63**	-0.39**	-0.01	0.94**
	拔节-齐穗期 JS-FHS	0.62**	0.79**	0.13	-0.32*	-0.18	0.60**
	齐穗-成熟期 FHS-MS	0.89**	0.63**	0.72**	-0.42**	0.07	0.86**
光合势 Photosynthetic potential	拔节-齐穗期 JS-FHS	0.94**	0.79**	0.67**	-0.39**	0.05	0.96**

氮肥主要通过影响水稻的有效穗数及每穗粒数来影响总颖花数，进而影响产量。赵锋等^[24]认为采取与移栽相同的施肥模式容易造成前期肥料流失和后期肥料的缺乏，不利于氮肥的有效利用和水稻优质群体的形成。另有研究^[25-26]表明，适当减少基肥氮用量、增加氮肥和穗肥氮用量等氮后移措施，可提高分蘖数、增加成穗率和每穗实粒数。程建平^[27]研究显示，机插稻在中密度时通过适当氮肥后移可明显提高机插稻的稻谷产量。而前人^[7,28]关于缓释氮肥的研究均表明缓释氮肥供应时间长，在水稻生

育后期仍可提供较多氮素，有利于提高结实期干物质的积累，从而实现高产。本研究从常规氮肥减量与缓释氮肥配施在水稻主要生育时期运筹方式和机插密度耦合来看，中密度时，分次施肥较一次性基施能显著提高机插稻产量，即在株距为 18 cm，施氮量为 150 kg/hm² 下，缓释氮肥(96 kg/hm²)与常规氮肥(30 kg/hm²)配合作为基肥施用，24 kg/hm² 常规氮肥作为追肥在倒 4 叶施用增产效果最为显著，且产量最高，这与前人^[27]研究结果基本一致。但前人研究尚未明确缓释氮肥与常规氮肥减量配

施运筹的作用及其与机插株距对产量及构成因子的影响程度的比较。研究表明,缓释氮肥与常规氮肥减量配施运筹和机插株距对结实率和产量的影响均达极显著水平,且缓释氮肥与常规氮肥减量配施运筹对产量形成的调控作用显著高于机插株距,在行距为30 cm,株距为16 cm时,随着缓释氮肥与常规氮肥配施量的增加及同一施氮量下常规氮肥的后移产量呈增加的趋势,主要是因为高密度下,水稻生育前期随着氮肥配施量的增加,植株吸收的养分增多有利于分蘖的形成,群体茎蘖数增大,形成的有效穗多,后期缓释氮肥的养分释放增强加之倒4叶常规氮肥的施入,进一步促进了植株对光合特性及养分吸收的竞争性,未能形成足够的大穗,每穗粒数较少,群体颖花量较小,但却具有较好的结实率和千粒重。当株距增加到20 cm时,由于密度过低群体茎蘖数明显降低,但田间通风透光条件增强,随着氮肥配施量的增加及常规氮肥的后移,机插稻对养分的吸收增强,光合特性增强, LAI 增大,单茎干物质积累量多,形成了大穗、粒多型稻谷,每穗粒数显著增大。在机插株距为18 cm时,在足够群体茎蘖数的基础上,倒4叶常规氮肥的追施保证了较高的有效穗数及每穗粒数,群体颖花量较大,且保持了较高的结实率和千粒重,从而显著提高了机插稻产量。综上所述,中密度(株距为18 cm)下,施氮量为 150 kg/hm^2 ,即基肥:追肥(倒4叶期)分别为缓释氮肥与常规氮肥($96\text{ kg/hm}^2+30\text{ kg/hm}^2$):常规氮肥(24 kg/hm^2)时,其养分供应能显著提高机插杂交水稻中后期植株生长,尤其能增加齐穗期高效 LAI、拔节-齐穗期光合势、拔节-齐穗期群体生长率及成熟期干物质质量,对促进增产更为重要。究其增产因子,均表现在有效穗数和每穗粒数优势显著的基础上,保证了较高的结实率和千粒重。这进一步补充说明了前人研究结果,虽然缓释氮肥一次性基施或与其与常规氮肥作为基肥配施能满足水稻整个生育期对养分的需求,但将适量的常规氮肥后移作为追肥施用其增产效果更为显著。

3.2 机插杂交水稻光合物质生产特征与产量形成的关系

光合生产是水稻有机物质的唯一来源,更是产量形成的基础,水稻籽粒产量的90%来自花后功能叶光合物质的积累^[29],尤以剑叶对产量的贡献最大。因此,降低呼吸速率,提高群体光合速率制造更多的光合产物用于干物质积累是获得高产的基本途径。水稻较大的叶面积及高效叶面积有利于提高群体光合速率、生育后期叶片的叶绿素含量及剑

叶净光合速率,叶片衰老缓慢,具有一定的光合生产优势,为花后光合产物的积累及籽粒的灌浆充实奠定了坚实的基础^[30]。李敏等^[31]研究表明缓控释肥肥效释放缓慢,不能满足水稻前期需求,生育后期通过增施尿素其剑叶净光合速率和叶绿素含量显著增强,产量明显高于缓释肥处理。邢晓鸣等^[32]研究认为一基一蘖施肥处理在前期不仅仅提高水稻分蘖发生,还促进干物质转化,提高群体生长速率等,而一次性施肥处理中,缓控释肥肥力释放相对缓慢,不利于水稻分蘖发生,分蘖势低,而水稻籽粒的灌浆物质一部分从抽穗后的光合产物中获得,另外一部分从叶茎鞘贮藏物质的再分配当中获得的,所以成熟期一次性施肥处理产量显著低于一基一蘖施肥处理。本研究表明,缓释氮肥与常规氮肥减量配施运筹和机插株距下机插杂交水稻的有效 LAI、结实期净光合速率、群体生长率及拔节-齐穗期光合势与成熟期干物质质量、有效穗数、每穗粒数及产量极显著正相关,说明缓释氮肥与常规氮肥减量配施运筹和机插密度,有效改善了水稻生育后期田间通风透光条件,个体生长潜力得到充分发挥,有效 LAI、单茎茎叶干质量等个体性状指标表现出较大的优越性,机插稻的群体生长显著增强,群体茎蘖数显著增大,分蘖成穗率高,光合产物和干物质积累增多,促使有效穗数及每穗粒数增多,形成高光效高质量的群体;促进了齐穗后 LAI 和光合物质生产,显著提高了结实期光合势和剑叶净光合速率,有利于后期干物质的累积和茎鞘、叶片中养分向穗部的转运,有效平衡了结实率和千粒重,最终形成了水稻高产所具备的“穗数足、穗型大、穗粒多”等基本条件,从而获得高产。

4 结论

缓释氮肥与常规氮肥减量配施和株距对机插杂交水稻叶面积指数、齐穗期高效叶面积指数、拔节-齐穗期光合势及产量的影响均达极显著水平,且缓释氮肥与常规氮肥减量配施运筹对机插杂交水稻群体干物质质量及光合特性的调控作用显著高于机插株距。本研究在机插行距30 cm,株距18 cm,缓释氮肥(96 kg/hm^2)与常规氮肥(30 kg/hm^2)作为基肥施用,常规氮肥(24 kg/hm^2)作为追肥在倒4叶施用能显著提高机插杂交水稻有效茎蘖数,拔节-齐穗期光合势及群体干物质质量,促进结实期茎鞘、叶片中的营养物质向籽粒转运,显著提高了产量。机插杂交水稻主要生育时期有效叶面积指数、结实期

净光合速率、各阶段群体生长率及拔节-齐穗期光合势整体上与成熟期干物质量、有效穗数、每穗粒数及产量呈极显著正相关。

参考文献:

- [1] 蒋鹏, 熊洪, 张林, 朱永川, 周兴兵, 刘茂, 郭晓艺, 徐富贤. 不同生态条件下施氮量和移栽密度对杂交稻氮、磷、钾吸收积累的影响. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(2): 342-350.
Jiang P, Xiong H, Zhang L, Zhu Y C, Zhou X B, Liu M, Guo X Y, Xu F X. Effects of N rate and planting density on nutrient uptake and utilization of hybrid rice under different ecological conditions. *Plant Nutr & Fert Sci*, 2017, 23(2): 342-350. (in Chinese with English abstract)
- [2] 徐新朋, 周卫, 梁国庆, 孙静文, 王秀斌, 何萍, 徐芳森, 余喜初. 氮肥用量和密度对双季稻产量及氮肥利用率的影响. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(3): 763-772.
Xu X P, Zhou W, Liang G Q, Sun J W, Wang X B, He P, Xu F S, Yu X C. Effects of nitrogen and density interactions on grain yield and nitrogen use efficiency of double-rice systems. *Plant Nutr & Fert Sci*, 2015, 21(3): 763-772. (in Chinese with English abstract)
- [3] 陈海飞, 冯洋, 蔡红梅, 徐芳森, 周卫, 刘芳, 庞再明, 李登荣. 氮肥与移栽密度互作对低产田水稻群体结构及产量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(6): 1319-1328.
Chen H F, Feng Y, Cai H M, Xu F S, Zhou W, Liu F, Pang Z M, Li D R. Effects of the interaction of nitrogen and transplanting density on the rice population structure and grain yield in low-yield paddy fields. *Plant Nutr & Fert Sci*, 2014, 20(6): 1319-1328. (in Chinese with English abstract)
- [4] 陈佳娜, 谢小兵, 伍丹丹, 曹放波, 单双吕, 高伟, 李志斌, 邹应斌. 机插密度与氮肥运筹对中嘉早 17 产量形成及氮肥利用率的影响. *中国水稻科学*, 2015, 29(6): 628-636.
Chen J N, Xie X B, Wu D D, Cao F B, Shan S L, Gao W, Li Z B, Zou Y B. Effects of nitrogen application and mechanical transplanting density on yield formation and nitrogen use efficiency of conventional rice Zhongjiazao 17. *Chin J Rice Sci*, 2015, 29(6): 628-636. (in Chinese with English abstract)
- [5] 郭保卫, 周兴涛, 曹利强, 张洪程, 许珂, 霍中洋, 魏海燕, 戴其根. 钵苗类型和摆栽密度对梗型超级稻植株抗倒伏能力的影响. *扬州大学学报: 农业与生命科学版*, 2016, 37(3): 87-94.
Guo B W, Zhou X T, Cao L Q, Zhang H C, Xu K, Huo Z Y, Wei H Y, Dai Q G. Effects of different bowl types and densities on the culm lodging resistance of bowl seedling transplanting japonica super rice. *J Yangzhou Univ: Agric & Life Sci Ed*, 2016, 37(3): 87-94. (in Chinese with English abstract)
- [6] 左文刚, 黄顾林, 陈亚斯, 朱晓雯, 沈袁玲, 柏彦超, 单玉华, 封克. 氮肥运筹对秸秆全量还田双季稻氮产量及氮素吸收利用的影响. *扬州大学学报: 农业与生命科学版*, 2017, 38(2): 75-81.
Zuo W G, Huang G L, Chen Y S, Zhu X W, Sheng Y L, Bai Y C, Shan Y H, Feng K. Effects of nitrogen management on grain yield and nitrogen use of double cropping rice system with all rice straw returned to the field. *J Yangzhou Univ: Agric & Life Sci Ed*, 2017, 38(2): 75-81. (in Chinese with English abstract)
- [7] 李玥, 李应洪, 赵建红, 孙永健, 徐徽, 严奉君, 谢华英, 马均. 缓控释氮肥对机插稻氮素利用特征及产量的影响. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2015, 41(6): 673-684.
Li Y, Li Y H, Zhao J H, Sun Y J, Xu H, Yan F J, Xie H Y, Ma J. Effects of slow and controlled-release nitrogen fertilizer on nitrogen utilization characteristics and yield of machine-transplanted rice. *J Zhejiang Univ: Agric & Life Sci*, 2015, 41(6): 673-684. (in Chinese with English abstract)
- [8] 张敬昇, 李冰, 王昌全, 向毫, 周杨洪, 尹斌, 梁靖越, 付月君. 控释氮肥与尿素掺混比例对作物中后期土壤供氮能力和
稻麦产量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(1): 110-118.
Zhang J S, Li B, Wang C Q, Xiang H, Zhou Y H, Yin B, Liang J Y, Fu Y J. Effects of the blending ratio of controlled release nitrogen fertilizer and urea on soil nitrogen supply in the mid-late growing stage and yield of wheat and rice. *Plant Nutr & Fert Sci*, 2017, 23(1): 110-118. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张敬昇, 李冰, 王昌全, 罗晶, 古珺, 龙思帆, 何杰, 向毫, 尹斌. 控释掺混尿素对稻麦产量及氮素利用率的影响. *中国水稻科学*, 2017, 31(3): 288-298.
Zhang J S, Li B, Wang C Q, Luo J, Gu J, Long S F, He J, Xiang H, Yin B. Effects of controlled release blend bulk urea on the yield and nitrogen use efficiency of wheat and rice. *Chin J Rice Sci*, 2017, 31(3): 288-298. (in Chinese with English abstract)
- [10] 彭玉, 孙永健, 蒋明金, 徐徽, 秦俭, 杨致远, 马均. 不同水分条件下缓/控释氮肥对水稻干物质量和氮素吸收、运转及分配的影响. *作物学报*, 2014, 40(5): 859-870.
Peng Y, Sun Y J, Jiang M J, Xu H, Qin J, Yang Z Y, Ma J. Effects of water management and slow/controlled release nitrogen fertilizer on biomass and nitrogen accumulation, translocation, and distribution in rice. *Acta Agron Sin*, 2014, 40(5): 859-870. (in Chinese with English abstract)
- [11] 胡剑锋, 杨波, 周伟, 张培培, 张强, 李培程, 任万军, 杨文钰. 播种方式和播种密度对杂交水稻机插秧节本增效的研究. *中国水稻科学*, 2017, 31(1): 81-90.
Hu J F, Yang B, Zhou W, Zhang P P, Zhang Q, Li P C, Ren W J, Yang W Y. Effect of seeding method and density on the benefit of mechanical transplanting in indica hybrid rice. *Chin J Rice Sci*, 2017, 31(1): 81-90. (in Chinese with English abstract)
- [12] 胡雅杰, 曹伟伟, 钱海军, 邢志鹏, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许珂, 魏海燕, 郭保卫, 高辉, 沙安勤, 周有炎, 刘国林. 钵苗机插密度对不同穗型水稻品种产量、株型和抗倒伏能力的影响. *作物学报*, 2015, 41(5): 743-757.
Hu Y J, Cao W W, Qian H J, Xing Z P, Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Guo B W, Gao H, Sha A Q, Zhou Y Y, Liu G L. Effect of density of mechanically transplanted plot seedlings on yield, plant type and lodging resistance in rice with different panicle types. *Acta Agron Sin*, 2015, 41(5): 743-757. (in Chinese with English abstract)
- [13] 谢小兵, 王玉梅, 黄敏, 赵春容, 陈佳娜, 曹放波, 单双吕, 周雪峰, 李志斌, 范龙, 高伟, 邹应斌. 单本密植机插对杂交稻生长和产量的影响. *作物学报*, 2016, 42(6): 924-931.
Xie X B, Wang Y M, Huang M, Zhao C R, Chen J N, Cao F B, Shan S L, Zhou X F, Li Z B, Fan L, Gao W, Zou Y B. Effect of mechanized transplanting with high hill density and single seeding per hill on growth and grain yield in hybrid rice. *Acta Agron Sin*, 2016, 42(6): 924-931. (in Chinese with English abstract)
- [14] 许俊伟, 孟天瑶, 荆培培, 张洪程, 李超, 戴其根, 魏海燕, 郭保卫. 机插密度对不同类型水稻抗倒伏能力及产量的影响. *作物学报*, 2015, 41(11): 1767-1776.
Xu J W, Meng T Y, Jing P P, Zhang H C, Li C, Dai Q G, Wei H Y, Guo B W. Effect of mechanical-transplanting density on lodging resistance and yield in different types of rice. *Acta Agron Sin*, 2015, 41(11): 1767-1776. (in Chinese with English abstract)
- [15] 孙永健, 马均, 孙园园, 杨志远, 徐徽, 熊洪, 徐富贤. 施氮量和株距对机插杂交稻结实期养分转运和产量的影响. *核农学报*, 2014, 28(8): 1510-1520.
Sun Y J, Ma J, Sun Y Y, Yang Z Y, Xu H, Xiong H, Xu F X. Effects of nitrogen application rates and plant spacing on nutrient translocation during filling stage and yield of mechanical-transplanted hybrid rice. *J Nuc Agric Sci*, 2014, 28(8): 1510-1520. (in Chinese with English abstract)
- [16] 邓中华, 明日, 李小坤, 郑磊, 徐维明, 杨运清, 任涛, 丛日环, 鲁剑巍. 不同密度和氮肥用量对水稻产量、构成因子及氮肥利用率的影响. *土壤*, 2015, 47(1): 20-25.
Deng Z H, Ming R, Li X K, Zheng L, Xu W M, Yang Y Q, Ren T, Cong R H, Lu W J. Effects of nitrogen application rate and planting density on grain yields, yield components and nitrogen

- use efficiencies of rice. *Soils*, 2015, 47(1): 20-25. (in Chinese with English abstract)
- [17] 孙永健, 陈宇, 孙园园, 徐徽, 许远明, 刘树金, 马均. 不同施氮量和栽插密度下三角形强化栽培杂交稻抗倒伏性与群体质量的关系. *中国水稻科学*, 2012, 26(2): 189-196.
- Sun Y J, Chen Y, Sun Y Y, Xu H, Xu M Y, Liu S J, Ma J. Relationship between culm lodging resistance and population quality of hybrids under triangle-planted system of rice intensification at different nitrogen application rates and planting densities. *Chin J Rice Sci*, 2012, 26(2): 189-196. (in Chinese with English abstract)
- [18] 王斌, 万运帆, 郭晨, 李玉娥, 秦晓波, 任涛, 赵婧. 控释尿素、稳定性尿素和配施菌剂尿素提高双季稻产量和氮素利用率的效应比较. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(5): 1104-1112.
- Wang B, Wan Y F, Guo C, Li Y E, Qin X B, Ren T, Zhao J. A comparison of the effects of controlled release urea, stable urea and microorganisms increasing double rice yield and nitrogen use efficiency. *Plant Nutr & Fert Sci*, 2015, 21(5): 1104-1112. (in Chinese with English abstract)
- [19] 鲁艳红, 廖育林, 聂军, 周兴, 谢坚, 杨曾平. 紫云英与尿素或控释尿素配施对双季稻产量及氮钾利用率的影响. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(2): 360-368.
- Lu Y H, Liao Y L, Nie J, Zhou X, Xie J, Yang Z P. Effect of different incorporation of Chinese milk vetch coupled with urea or controlled release urea on yield and nitrogen and potassium nutrient use efficiency in double-cropping rice system. *Plant Nutr & Fert Sci*, 2017, 23(2): 360-368. (in Chinese with English abstract)
- [20] 王海月, 李玥, 孙永健, 李应洪, 蒋明金, 王春雨, 赵建红, 孙园园, 徐徽, 严奉君, 马均. 不同施氮水平下缓释氮肥配施对机插稻氮素利用特征及产量的影响. *中国水稻科学*, 2017, 31(1): 50-64.
- Wang H Y, Li Y, Sun Y J, Li Y H, Jiang M J, Wang C Y, Zhao J H, Sun Y Y, Xu H, Yan F J, Ma J. Effects of slow-release urea combined with conventional urea on characteristics of nitrogen utilization and yield in mechanical-transplanted rice under different nitrogen application rates. *Chin J Rice Sci*, 2017, 31(1): 50-64. (in Chinese with English abstract)
- [21] 王海月, 殷尧鑫, 孙永健, 李应洪, 杨志远, 严奉君, 张绍文, 郭长春, 马均. 不同株距和缓释氮肥配施量下机插杂交稻的产量及光合特性. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(4): 843-855.
- Wang H Y, Yin Y Z, Sun Y J, Li Y H, Yang Z Y, Yan F J, Zhang G S W, Guo C C, Ma J. Yield and photosynthetic characteristics of mechanical-transplanted rice under different slow-release nitrogen fertilizer rates and plant population. *Plant Nutr & Fert Sci*, 2017, 23(4): 843-855. (in Chinese with English abstract)
- [22] 薛亚光, 王康君, 颜晓元, 尹斌, 刘立军, 杨建昌. 不同栽培模式对杂交粳稻常优 3 号产量及养分吸收利用效率的影响. *中国农业科学*, 2011, 44(23): 4781-4792.
- Xue Y G, Wang K J, Yan X Y, Yin B, Liu L J, Yang J C. Effects of different cultivation patterns on grain yield and nutrient absorption and utilization efficiency of japonica hybrid rice Changyou 3. *Sci Agric Sin*, 2011, 44(23): 4781-4792. (in Chinese with English abstract)
- [23] 范立慧, 徐珊珊, 侯福福, 薛利红, 李刚华, 丁艳锋, 杨林章. 不同地力下基肥氮运筹比例对水稻产量及氮肥吸收利用的影响. *中国农业科学*, 2016, 49(10): 1872-1884.
- Fan L H, Xu S S, Hou P F, Xue L H, Li G H, Ding Y F, Yang L Z. Effect of different ratios of basal to tiller nitrogen on rice yield and nitrogen utilization under different soil fertility. *Sci Agric Sin*, 2016, 49(10): 1872-1884. (in Chinese with English abstract)
- [24] 赵锋, 程建平, 张国忠, 徐得泽, 吴建平, 吴继洪, 杨兆林. 氮肥运筹和秸秆还田对直播稻氮素利用和产量的影响. *湖北农业科学*, 2011, 50(18): 3701-3704.
- Zhao F, Cheng J P, Zhang G Z, Xu D Z, Wu J P, Wu J H, Yang Z L. Effect of nitrogen fertilizer regimes and returning straw on N availability and forming yield of direct-sowing rice. *Hubei Agric Sci*, 2011, 50(18): 3701-3704. (in Chinese with English abstract)
- [25] 石丽红, 纪雄辉, 朱校奇, 李洪顺, 彭华, 刘昭兵. 提高超级杂交稻库容量的施氮数量和时期运筹. *中国农业科学*, 2010, 43(6): 1274-1281.
- Shi L H, Ji X H, Zhu X Q, Li H S, Peng H, Liu Z B. A preliminary study on optimizing nitrogen fertilization amount at different phases to enhance the storage capacity of super hybrid rice. *Sci Agric Sin*, 2010, 43(6): 1274-1281. (in Chinese with English abstract)
- [26] 程建平, 张旅峰, 吴建平, 柯传勇, 金卫兵, 范绍斌, 罗又红, 程磊. 播种量与氮肥运筹方式对直播早稻生物学特性和产量的影响. *湖北农业科学*, 2010, 49(10): 2362-2365.
- Cheng J P, Zhang L F, Wu J P, Ke C Y, Jin W B, Fan S B, Luo Y H, Cheng L. The influence of different seeding rate and nitrogen application on yield and biological characteristics of direct seeding early rice. *Hubei Agric Sci*, 2010, 43(10): 2362-2365. (in Chinese with English abstract)
- [27] 程建平, 张再君, 赵锋, 汪光友, 杨如辉, 李家普, 王启均. 机械插秧密度和氮肥运筹对两优 1528 群体动态和产量的影响. *杂交水稻*, 2011, 26(6): 69-73.
- Cheng J P, Zhang Z J, Zhao F, Wang G Y, Yang R H, Li J P, Wang Q J. Effects of planting density and nitrogen fertilizer management on population formation and yield of Liangyou 1528 under mechanized transplanting conditions. *Hybrid Rice*, 2011, 26(6): 69-73. (in Chinese with English abstract)
- [28] 张小翠, 戴其根, 胡星星, 朱德建, 丁秀文, 马富强, 张洪程, 朱聪聪. 不同质地土壤下缓释尿素与常规尿素配施对水稻产量及其生长发育的影响. *作物学报*, 2012, 38(8): 1494-1503.
- Zhang X C, Dai Q G, Hu X X, Zhu D J, Ding X W, Ma K Q, Zhang H C, Zhu C C. Effects of slow-release urea combined with conventional urea on rice output and growth in soils of different textures. *Acta Agron Sin*, 2012, 38(8): 1494-1503. (in Chinese with English abstract)
- [29] 赵黎明, 李明, 郑殿峰, 顾春梅, 那永光, 解保胜. 灌溉方式与种植密度对寒地水稻产量及光合物质生产特性的影响. *农业工程学报*, 2015, 31(6): 159-169.
- Zhao L M, Li M, Zheng D F, Gu C M, Na Y G, Xie B S. Effects of irrigation methods and rice planting densities on yield and photosynthetic characteristics of matter production in cold area. *Trans CSAE*, 2015, 31(6): 159-169. (in Chinese with English abstract)
- [30] 朱懿, 江青山, 孙永健, 赵德明, 马均. 宜香 1A 系列组合的光合生产及产量形成特点. *杂交水稻*, 2014, 29(4): 68-72.
- Zhu Y, Jiang Q S, Sun Y J, Zhao D M, Ma J. Photosynthetic production and yield formation of Yixiang 1A series of combinations. *Hybrid Rice*, 2014, 29(4): 68-72. (in Chinese with English abstract)
- [31] 李敏, 郭熙盛, 叶舒娅, 刘枫, 袁慢慢, 黄义德. 硫膜和树脂膜控释尿素对水稻产量、光合特性及氮肥利用率的影响. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(4): 808-815.
- Li M, GUO X S, Ye S Y, Liu F, Yuan M M, Huang Y D. Effects of sulfur- and polymer-coated controlled release urea on yield, photosynthetic characteristics and nitrogen fertilizer efficiency of rice. *Plant Nutr & Fert Sci*, 2013, 19(4): 808-815. (in Chinese with English abstract)
- [32] 邢晓鸣, 李小春, 丁艳锋, 王绍华, 刘正辉, 唐设, 丁承强, 李刚华, 魏广彬. 缓控释肥组配对机插常规粳稻群体物质生产和产量的影响. *中国农业科学*, 2015, 48(24): 4892-4902.
- Xing X M, Li X C, Ding Y F, Wang S H, Liu Z H, Tang S, Ding C Q, Li G H, Wei G B. Effects of types of controlled released nitrogen and fertilization modes on Yield and Dry Mass Production. *Sci Agric Sin*, 2015, 48(24): 4892-4902. (in Chinese with English abstract)