植物营养与肥料学报 2017, 23(4): 843–855
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer
doi: 10.11674/zwyf.16483
http://www.plantnutrifert.org

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

王海月，殷尧翥，孙永健*，李应洪，杨志远，严奉君，张绍文，郭长春，马 均*
（四川农业大学水稻研究所/农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室，成都 611130）

摘要:【**目的**】温江地区高产水稻的推荐施氮量为 180 kg/hm^2，以此为基础，机插稻缓释氮肥与常规尿素适宜配比为 7∶3 基础上，进一步研究密度和缓释氮肥配施量对机插稻分蘖特性、干物质积累量、光合物质生产特性、群体生长率及产量的影响。【**方法**】采用二因素裂区设计进行了机插杂交稻田间试验。在行距为 30 cm 下，设 3 种株距处理为 16 cm、18 cm、20 cm；在尿素氮施用量 54 kg/hm^2 下，设 4 个缓释氮用量为 36、66、96 和 126 kg/hm^2，总施氮量相应为 90、120、150 和 180 kg/hm^2。在插秧时缓释肥与尿素混合，一次性追施。调查了主要生育期水稻生长和氮素吸收运移量。【**结果**】缓释氮肥配施量和株距对主要生育期的水稻干物质积累量、光合特性及产量均存在显著或极显著的调控效应，且互作效应显著；缓释氮肥配施量的效应明显高于株距。在机插行距 30 cm 下，株距为 18 cm，总施氮量为 150 和 180 kg/hm^2 时，可有效提高叶面积指数 (LAI)、单茎茎鞘与叶片干物重，叶面积衰减慢，拔节至齐穗期光合势大，群体生长率高，光合特性强，促进干物质累积，在足够穗数的基础上，显著增加了穗粒数，提高了群体颖花量，保持了稳定的结实率和千粒重，从而显著提高机插稻产量。株距为 16 cm，施氮量为 150 kg/hm^2 时，水稻群体茎蘖数增长快，拔节后群体茎蘖数缓慢消减，有效穗数足，虽穗粒数显著降低，但有较高的结实率和千粒重，从而协调出较高的产量。而株距为 20 cm，配施总氮量为 180 kg/hm^2 处理，在保证有效穗数的基础上，促壮秆和攻大穗，增加了穗粒数，干物质积累量多，灌浆充实量大，千粒重增加。相关性分析表明，株距与缓释氮肥配施量耦合下，尤其以拔节至齐穗期光合势、齐穗期高效 LAI 与产量相关性较高 (r = 0.87**～0.91**)，对促进增产更为重要。【**结论**】在机插行距 30 cm 下，株距为 18 cm，缓释氮肥 (96 kg/hm^2) 与常规尿素 (54 kg/hm^2) 配施总氮量为 150 kg/hm^2 时，能充分发挥本区域机插杂交籼稻高产的优势、提高光合物质生产，产量最高可达 11463.8 kg/hm^2，为本试验的最佳肥密运筹处理。

关键词: 机插稻；株距；缓释氮肥用量；产量；光合物质生产

Yield and photosynthetic characteristics of mechanical-transplanted rice under different slow-release nitrogen fertilizer rates and plant population

WANG Hai-yue, YIN Yao-zhu, SUN Yong-jian*, LI Ying-hong, YANG Zhi-yuan, YAN Feng-jun, ZHANG Shao-wen, GUO Chang-chun, MA Jun*
(*Rice Research Institute of Sichuan Agricultural University/Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology, and Cultivation in Southwest, Ministry of Agriculture, Chengdu, Sichuan 611130, China*)

Abstract:【**Objectives**】The recommended nitrogen (N) application rate for high rice yield in Wenjiang area of Sichuan Province of China is 180 kg/hm^2, in which 70% of N is from controlled release fertilizer and 30% from commercial urea. The plant population, slow-release N fertilizer addition rate and the total N input were optimized for mechanical transplanted rice production in this paper.【**Methods**】A split plot field experiment was conducted using mechanical transplanted hybrid rice as material in Wenjiang area, Sichuan Province. Keeping the row space of 30 cm, three plant spaces of 16 cm, 18 cm and 20 cm were set up. Under the urea N application rate

收稿日期：2016–12–30　　**接受日期**：2017–03–17
基金项目：国家重点研发计划“粮食丰产增效科技创新”重点专项（2016YFD0300506）；国家科技支撑计划项目（2013BAD07B13）；四川省教育厅重点项目（16ZA0044）资助。
作者简介：王海月（1991—），女，甘肃会宁人，硕士研究生，主要从事水稻栽培与生理研究。E-mail：hywang2015zh@163.com
* 通信作者 E-mail：yongjians1980@163.com；E-mail：majunp2002@163.com

of 54 kg/hm^2, four slow-release fertilizer N rates of 36, 66, 96 and 126 kg/hm^2 were added and the corresponding total N input were 90, 120, 150 and 180 kg/hm^2. All the nitrogen fertilizer was side top-dressed in once at the same time of transplanting. The photosynthetic indices and growing index of rice were measured at the main growing stages.【**Results**】The total N input and the plant spacing showed significant or extreme significant regulating effect on the biomass accumulation, photosynthetic characteristics and grain yield of mechanical transplanted rice in the main growing stages, and their interaction effect was significant as well. The regulating effect of controlled release fertilizer was more significant than that of plant population. In the planting space of 18 cm and the total N input of 150 and 180 kg/hm^2, the LAI, the culm and sheath weight per shoot and the leaf weight were increased significantly, and the decrease rate of leaf area was slowed down, and the high photosynthetic potential and high growth rate were kept longer, and the dry matter accumulation during jointing-full heading stage was enhanced as a result. The above two treatments significantly increased the spikelet number, helped maintaining a stable seed setting rate and 1000-grain weight, brought significant improvement of grain yield. When the plant space was 16 cm and the total N input was 150 kg/hm^2, the number of tiller was increased fast and decreased slowly after jointing, formed adequate effective panicles, although spikelets were decreased significantly. There were higher seed setting rate and 1000-grain weight, which might lead to higher yield. When the plant space was 20 cm and the total N input was 180 kg/hm^2, adequate effective panicles were ensured, the formation of strong stalk and big panicles was promoted, grains per panicle and dry matter accumulation were increased. Furthermore, high grain filling was benefitial to the 1000-grain weight. The correlation analysis revealed that on the basis of the combination in mechanical-transplanted spacing with the slow-release N fertilizer, the photosynthetic potential at the jointing-full heading stage, high valid LAI at the full heading stage would benefitial to the increment of yield.【**Conclusions**】The setting of the row space in 30 cm, plant spacing in 18 cm, the N for 150 kg/hm^2 added by the slow-release N fertilizer (96 kg/hm^2) and conventional urea (54 kg/hm^2) could maximize the hybrid rice yield in the local research area, and improve photosynthetic production and yield.

Key words: mechanical-transplanted rice; plant spacing; slow-release N fertilizer rate; yield; photosynthetic characteristic

适宜的机插密度能改善水稻群体和个体受光面积，提高光能利用率，增强群体光合物质生产能力，优化群体质量，最大程度利用空间温度、光照及土壤资源，同时能节约种质资源、减少用工，降低病虫危害，达到高产、优质、高效的目的，是机插稻高产栽培最关键的调控技术之一[1−2]。而作物单产的持续增长，与肥料尤其是氮肥的施用量密切相关。众多学者[3−5]研究认为，缓释氮肥作为一种新型肥料在提高氮素利用率、节约劳动力、减少环境污染等方面具有重要作用；但缓释氮肥生产成本较高，因此，为了提高氮肥利用率和减少经济投入，缓控释氮肥及其与常规尿素的配施在农业生产上的应用成为当前研究的热点。前人关于水稻机插密度、常规尿素运筹的研究较多，主要从株型[6]、抗倒伏能力[7]，冠层微环境[8]、氮素吸收利用效率[9]、光合物质生产特征[10]等方面研究了其对机插稻产量形成的影响，初步揭示了机插稻高产形成特点及其生理机制。我们前期通过研究已证实，优质的缓控释氮肥能有效提升机插杂交稻氮素的吸收利用率，促进高产形成[11]。但缓释氮肥与常规尿素配施在机插稻上的研究较少，缓控释氮肥能否减量并以适宜比例替代常规肥进一步促进机插稻产量的增加，提高肥料利用效率，适度增加机插密度和减少缓控释氮肥用量优化配施对机插稻的生长发育及产量形成的调控效应，以及两因素间是否存在互作效应均尚未见报道。我们在前期研究的基础上，通过对缓控释肥筛选[11]及 2015 年缓控释氮肥配施试验[12]进一步研究表明，不同施氮水平和缓释氮肥与常规尿素配施互作对机插稻氮素利用特征及产量存在显著或极显著的影响，且氮素的吸收及结实期茎鞘氮素的转运与干物质量、每穗实粒数及产量间存在显著或极显著的正相关性。但确定高产施氮量下合理的缓释氮肥与常规尿素配施比例后，如何结合不同的机插密度进行适量缓释氮肥与常规尿素配施，调控机插稻主要

生育时期干物质累积、光合生产、氮素吸收利用及产量间的关系，尚不明确。为此，本试验旨在通过机插密度的调控减氮效应，结合缓控释氮肥的优势，发挥肥密耦合效应，在提高群体数量同时合理降低氮肥施用量，并进一步阐明机插密度与缓释氮肥配施量对水稻产量、光合物质生产特征的影响，以达到增加水稻产量、提高氮肥利用率、节约劳动力、减少生产成本、改善稻田环境的目的，也为我国西南稻区中迟熟杂交稻机械化育插秧配套技术的应用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栽植且具有代表性的品种，杂交籼稻川谷优 7329 (生育期 156～165 d)；试验田耕层土壤 (0—20 cm) 质地为砂壤土，有机质 24.38 g/kg、全氮 1.76 g/kg、碱解氮 113.75 mg/kg、有效磷 65.34 mg/kg、速效钾 109.58 mg/kg。选用氮肥 (金正大树脂包膜缓释氮肥含氮量 44%，尿素含氮量 46%)、磷肥 (过磷酸钙)、钾肥 (氯化钾) 作为试验用肥；并用钵体毯状秧盘 (中国水稻研究所) 育秧、东洋 PF455S 插秧机进行机插。

1.2　试验设计

在 2015 年不同施氮水平和缓释氮肥与常规尿素配施试验研究的基础[12]上，试验于 2016 年在四川成都市温江区四川农业大学水稻所试验农场进一步进行了株距 (D) 和缓释氮肥配施量 (N) 二因素裂区试验。主区为机插株距，在行距为 30 cm 前提下，设 3 种株距：16、18 和 20 cm，分别以 D_1、D_2 和 D_3 表示。副区为缓释氮肥与常规尿素配施量，在保持尿素施用量 54 kg/hm^2 不变的前提下，设 4 个缓释氮施用量为 36、66、96、126 kg/hm^2，相应的氮肥施用总量为 90、 120、150 和 180 kg/hm^2，分别以 N_1、N_2、N_3 和 N_4 表示，以不施氮为对照 (N_0)。

4 月 15 日播种，旱育秧，每盘播量 75 g，5 月 21 日机插。氮肥运筹均作底肥于机插后 1 d 一次性施入 P_2O_5 75 kg/hm^2，K_2O 150 kg/hm^2。田间小区计产面积 20.0 m^2，3 次重复，各小区间筑埂 (宽 40 cm、高 30 cm)，并用塑料薄膜包埂，以防肥水互串，其他田间管理同当地大面积生产田，9 月 22 日收获。本试验延续 2015 年的研究，两年试验未完全重复，但相同的氮肥配施处理下，产量及不同生育时期物质累积年份间差异均不显著，为此，本文就 2016 年试验结果进行分析。

1.3　测定项目和方法

1.3.1 分蘖动态　各小区定点 20 穴稻株，机插 7 d 后至分蘖盛期前每隔 5 d 调查 1 次分蘖数，之后至齐穗期每隔 7 d 调查 1 次分蘖数。

1.3.2 干物质积累　于分蘖盛期、拔节期、齐穗及成熟期各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℃ 杀青 30 min，80℃ 烘至恒重后，测定干物重。

1.3.3 叶面积　在拔节及齐穗期，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，其中高效叶面积为有效茎蘖上 3 叶总叶面积。

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。

1.3.5 光合特征参数　于齐穗期 0 d、15 d 和 30 d，用美国 Li-COR 生产的 Li-6400 光合仪，测定剑叶净光合速率 (Pn)、气孔导度 (Gs)、胞间 CO_2 浓度 (Ci)、蒸腾速率 (Tr)；并根据前人研究方法[13-14]，计算表观叶肉导度 (AMC) 和水分利用率 (WUE)。测定条件为 CO_2 浓度 400 μmol/mol，温度 30℃，光强 1200 μmol/(m^2·s)。各小区测定 5 片具代表性的主茎剑叶的中部，每叶重复测定 3 次。

1.3.6 考种与计产　收获时各小区调查具代表性稻株 60 穴，计数有效穗数并计算平均值。分别取代表性稻株 5 穴，考查实粒数、结实率和千粒重等性状，各小区按实收穴数计产。

1.4　数据计算和统计分析

结实率 = 实粒数/(实粒数 + 秕粒数) × 100%

氮肥农学利用率 (kg/kg) = (施氮区产量 – 空白区产量)/施氮量

叶面积衰减率 (LAI/d) = $(LAI_2 - LAI_1)/(t_2 - t_1)$

式中：LAI_1、LAI_2 分别为拔节及齐穗期测定的叶面积指数，t_1、t_2 分别为拔节及齐穗期测定的时间。

单茎干物重 (g) = 单茎茎鞘干重 + 单茎叶片干重 + 单茎穗干重

群体干物重 (t/hm^2) = 茎鞘干重 + 叶片干重 + 穗干重

群体生长率 [g/(m^2·d)] = $(W_2 - W_1)/(t_2 - t_1)$

式中：W_1、W_2 分别为前后两个生育时期测定的干物重；t_1、t_2 分别为前后两个生育时期测定的时间。

光合势 [× 10^4 (m^2·d)/hm^2] = $1/2(L_1 + L_2) \times (t_2 - t_1)$

式中：L_1、L_2 分别为拔节及齐穗期测定的叶面积；t_1、t_2 分别为拔节及齐穗期测定的时间。

用 Microsoft Excel、Origin9.0 及 DPS6.5 处理系统分析数据及绘图。

2 结果与分析

2.1 株距和缓释氮肥配施量对机插稻产量及其构成因素的影响

由表 1 可见，机插株距和缓释氮肥与常规尿素配施量除对千粒重影响不显著外，对稻谷产量及其他产量构成因素、氮肥农学利用率的影响均达极显著水平，且对产量、每穗粒数及氮肥农学利用率均存在极显著互作效应。整体来看，不同机插株距下，每穗粒数、结实率、千粒重、产量及氮肥农学利用率均随机插株距的增加先升高后降低，株距为 D_2 的产量较 D_3、D_1 分别高 7.2% 和 6.5%；有效穗则随机插株距的增加而减小，每穗粒数表现为 $D_2 > D_3 > D_1$。株距 D_1 下，产量随缓释氮肥配施量的增加而增加，N_3 与 N_4 处理差异不显著，但 N_3 处理可节省氮肥从而提高氮肥利用效率，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结实率的优势显著，而在每穗粒数及千粒重方面缓释氮肥与常规尿素配施处理间差异不明显。株距 D_2 下，产量及氮肥农学利用效率表现为 $N_3 > N_4 > N_2 > N_1 > N_0$，且各处理对产量和氮肥农学利用效率的影响均达显著水平，N_3 处理为本试验氮肥减量增产增效最

表 1 不同处理机插稻产量、产量构成因素及氮肥农学利用率

Table 1 Yields, yield components of mechanical-transplanted rice and nitrogen fertilizer agronomic efficiency under different treatments

处理 Treatment		有效穗 (× 10^4/hm^2) Effective panicle	穗粒数 (No./panicle) Spikelet	结实率 (%) Seed setting rate	千粒重 (g) 1000-grain weight	实际产量 (kg/hm^2) Grain yield	农学利用率 (kg/kg) NAE
D_1	N_0	165.1 c	150.8 a	94.86 a	35.04 a	8141.2 d	
	N_1	206.7 b	144.5 b	91.86 b	35.36 a	9089.7 c	10.54 b
	N_2	210.8 b	150.5 a	91.69 b	34.65 a	9377.6 b	10.30 b
	N_3	222.2 a	151.2 a	91.72 b	34.42 a	10003.4 a	12.41 a
	N_4	221.8 a	152.6 a	90.88 b	35.02 a	10057.7 a	10.65 b
平均 Mean		205.3	149.9	92.20	34.90	9333.9	10.98
D_2	N_0	147.9 c	172.4 a	93.83 a	36.28 a	8540.5 e	
	N_1	196.5 b	160.1 b	94.52 a	34.63 b	9697.9 d	12.86 d
	N_2	201.4 b	163.7 b	92.85 a	35.64 a	10187.1 c	13.72 c
	N_3	223.1 a	169.8 a	91.25 b	35.87 a	11463.8 a	19.49 a
	N_4	220.7 a	171.9 a	90.53 b	34.21 b	11210.8 b	14.83 b
平均 Mean		197.9	167.6	92.60	35.33	10220.0	15.23
D_3	N_0	154.2 b	161.4 c	91.79 a	35.73 a	8005.8 e	
	N_1	189.6 a	149.7 d	92.29 a	34.59 ab	8427.6 d	4.69 d
	N_2	195.9 a	158.7 c	91.05 a	34.17 b	9002.1 c	8.30 c
	N_3	199.2 a	174.5 b	89.19 b	34.44 b	9989.1 b	13.22 b
	N_4	201.3 a	183.3 a	88.15 b	35.15 ab	10732.0 a	15.15 a
平均 Mean		188.1	165.5	90.50	34.82	9231.3	10.34
F 值 *F* value	D	67.28**	81.37**	9.80*	0.97	486.78**	152.27**
	N	58.70**	18.06**	12.10**	1.95	2165.51**	178.61**
	D × N	1.22	4.78**	1.39	1.95	74.82**	54.70**

注（Note）：D_1、D_2、D_3 分别代表株距 16、18、20 cm Represent space of 16, 18 and 20 cm; N_0—不施氮肥 No nitrogen fertilization; N_1、N_2、N_3、N_4 代表在常规尿素 54 kg/hm^2 的基础上，缓释氮肥配施量分别为 36、66、96、126 kg/hm^2 Represent slow release N addition of 36, 66, 96 and 126 kg/hm^2 at the base of urea N of 54 kg/hm^2. 同列数据后的不同小写字母表示同一机插密度下各氮肥处理数据在 5% 水平上差异显著 Values within a column followed by different lowercase letters are significantly different among different N treatments under the same plant population ($P < 0.05$); *、** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著 Mean significant at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

佳的肥密耦合处理，其高产高效的获得主要由于在有效穗数优势显著的基础上，保证了较高的每穗粒数及千粒重。株距 D_3 下，为缓解群体不足，以 N_4 处理为宜，其产量及氮肥农学利用效率均显著高于同密度下其他的氮肥处理，其高产高效的获得与其他机插株距处理略有不同，主要由于每穗粒数的优势显著和保持较高的千粒重。

2.2　株距和缓释氮肥配施量对机插稻分蘖动态的影响

由图 1 可见，随水稻生育进程的推进，株距对同时期水稻群体茎蘖数的影响趋势基本一致，均表现为 $D_1 > D_2 > D_3$；机插后 14 d，株距和缓释氮肥与常规尿素配施量处理间茎蘖数差异最小，且随缓释氮肥与常规尿素配施量的增加呈增加趋势。3 种机插株距下，分蘖盛期均出现在机插后 30 d，且 D_1N_4 的茎蘖数较 D_2N_4、D_3N_4 分别高 5.79% 和 9.81%。D_1 处理下，各氮肥处理的茎蘖数均在返青后 43 d 达到最大，且 N_4 显著高于其他缓释氮肥与常规尿素配施处理；株距为 D_2 时，各缓释氮肥与常规尿素配施量的茎蘖数在机插后 43 d 达到最大，N_4、N_3、N_2 的茎蘖数显著高于 N_1，较 N_1 分别增加了 32.85%、28.82%、25.36%；株距增加至 D_3 时，N_4、N_3、N_2 的茎蘖数在机插后 36 d 达到最大，且 N_4 与 N_3、N_2 茎蘖数差异不显著。机插 65 d 后茎蘖数减小趋势趋于平缓。

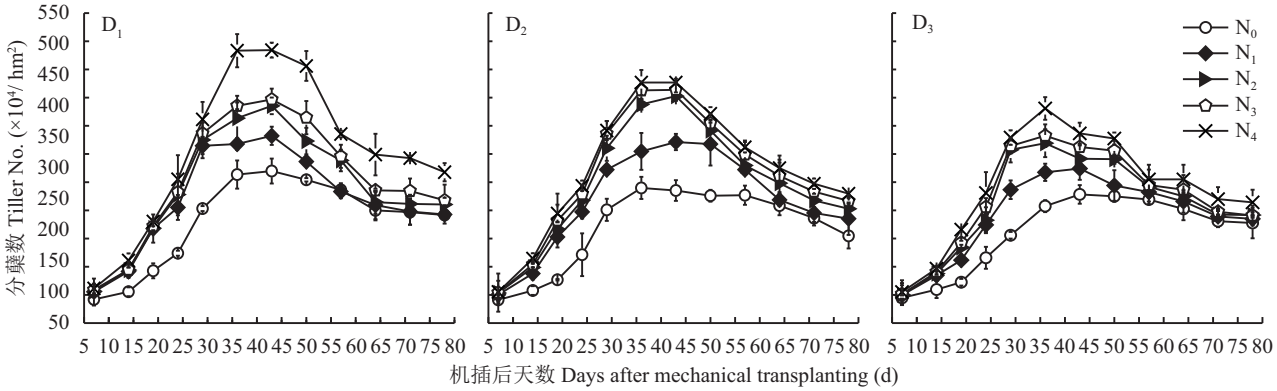

图 1　株距和缓释氮肥配施量对机插稻分蘖动态的影响

Fig. 1　Effects of the slow-release N fertilizer and its combination with conventional urea on the dynamic changes of tiller No. of mechanical-transplanted rice under different plant spaces

[注（Note）：D_1、D_2、D_3 分别代表株距 16、18、20 cm Represent space of 16, 18 and 20 cm; N_0—不施氮肥 No nitrogen fertilization; N_1、N_2、N_3、N_4 代表在常规尿素 54 kg/hm^2 的基础上，缓释氮肥配施量分别为 36、66、96、126 kg/hm^2 Represent slow release N addition of 36, 66, 96 and 126 kg/hm^2 at the base of urea N of 54 kg/hm^2.]

2.3　株距和缓释氮肥配施量对机插稻光合生产特性的影响

2.3.1　株距和缓释氮肥配施量对机插稻光合生产的影响　由表 2 可见，株距对拔节与齐穗期 LAI、齐穗期高效 LAI、拔节至齐穗光合势的影响均达显著水平，缓释氮肥与常规尿素配施量对机插稻光合物质生产的影响均达极显著水平，且两因素对齐穗期高效 LAI 的互作效应显著。从机插株距来看，拔节与齐穗期 LAI、齐穗期高效 LAI 及拔节至齐穗光合势均表现为 $D_2 > D_1 > D_3$；拔节至齐穗期叶面积衰减率表现为 D_1、D_2 显著高于 D_3，而齐穗期高效叶面积率在 D_3 时最佳。从相同株距下缓释氮肥配施量来看，当株距为 D_1 和 D_3 时，拔节与齐穗期 LAI、齐穗期高效 LAI、拔节至齐穗期叶面积衰减率，以及拔节至齐穗期光合势均随缓释氮肥与常规尿素配施量的增加呈不同程度的增加，当株距为 D_2 时，则表现为 $N_3 > N_4 > N_2 > N_1 > N_0$，且 N_3 与 N_4 处理的差异不显著；而齐穗期高效叶面积率在 3 种株距下均以 N_1 处理表现最优。

2.3.2　株距和缓释氮肥配施量对机插稻光合特征参数的影响　除齐穗期水分利用率外，缓释氮肥与常规尿素配施量对机插稻剑叶光合特性的影响均达显著或极显著水平 (表 3)。齐穗后，剑叶净光合速率 (Pn)、气孔导度 (Gs)、表观叶肉导度 (AMC) 和水分利用率 (WUE) 随生育进程的推进呈降低的趋势，胞间 CO_2 浓度 (Ci) 与蒸腾速率 (Tr) 则表现相反。从相同株距下缓释氮肥与常规尿素配施量来看，当株距为 D_1 和 D_3 时，剑叶 Pn、Gs、AMC、Tr 均随缓释氮肥与常规尿素配施量的减少呈减小的趋势，而 Ci 及齐穗期与齐穗 15 d 的 WUE 均表现相反；当株距为 D_2 时，剑叶 Pn、Gs、AMC、Tr 均表现为 $N_3 >$

表 2 株距和缓释氮肥配施量对机插稻光合物质生产的影响

Table 2 Effects of the slow-release N fertilizer and combined with conventional urea on photosynthetic production in mechanical- transplanted rice under different plant spacing

处理 Treatment		叶面积指数 Leaf area index		FHLAI	FHLAR (%)	LADRFH (LAI/d)	PPFH [× 10^4 (m^2·d)/hm^2]
		拔节期 Jointing stage	齐穗期 Full heading stage				
D_1	N_0	2.53 c	3.22 d	2.16 d	67.14 b	0.0214 c	118.27 d
	N_1	2.69 c	3.94 c	2.83 c	71.82 a	0.0368 b	142.29 c
	N_2	3.19 b	4.91 b	3.14 b	64.02 c	0.0506 b	175.31 b
	N_3	3.81 a	6.76 a	4.46 a	66.25 b	0.0818 a	242.87 a
	N_4	3.90 a	7.15 a	4.80 a	67.00 b	0.0904 a	254.26 a
	平均 Mean	3.22	5.20	3.48	67.24	0.0562	186.60
D_2	N_0	2.67 c	3.29 d	2.17 d	66.29 b	0.0194 c	121.81 d
	N_1	2.99 b	4.11 c	2.91 c	70.64 a	0.0328 bc	154.57 c
	N_2	3.88 a	5.23 b	3.47 b	66.48 b	0.0399 b	200.24 b
	N_3	4.01 a	7.41 a	4.97 a	67.13 b	0.0999 a	265.95 a
	N_4	3.94 a	6.95 a	4.64 a	66.78 b	0.0887 a	253.05 a
	平均 Mean	3.50	5.40	3.63	67.46	0.0561	199.12
D_3	N_0	2.30 d	3.13 d	2.07 d	66.27 b	0.0259 c	110.31 e
	N_1	2.65 c	3.79 c	2.68 c	70.54 a	0.0339 bc	136.88 d
	N_2	2.97 bc	4.59 b	3.23 b	70.31 a	0.0475 ab	164.19 c
	N_3	3.37 ab	5.59 a	3.70 ab	66.22 b	0.0616 a	206.14 b
	N_4	3.79 a	6.03 a	3.97 a	65.92 b	0.0620 a	228.18 a
	平均 Mean	3.02	4.62	3.13	67.85	0.0462	169.14
F 值 *F* value	D	12.35*	10.72*	9.47*	0.56	1.28	60.50**
	N	46.98**	100.81**	108.20**	9.76**	28.87**	185.96**
	D × N	1.30	1.88	2.82*	2.33	1.67	2.19

注（Note）：D_1、D_2、D_3 分别代表株距 16、18、20 cm Represent space of 16, 18 and 20 cm; N_0—不施氮肥 No nitrogen fertilization; N_1、N_2、N_3、N_4 代表在常规尿素 54 kg/hm^2 的基础上，缓释氮肥配施量分别为 36、66、96、126 kg/hm^2 Represent slow release N addition of 36, 66, 96 and 126 kg/hm^2 at the base of urea N of 54 kg/hm^2. FHLAI—齐穗期高效叶面积指数 High valid leaf area index at the full heading stage; FHLAR—齐穗期高效叶面积率 High valid leaf area rate at the full heading stage; LADRFH—拔节～齐穗叶面积衰减率 Leaf area decreasing rate at the jointing–full heading stage; PPFH—拔节～齐穗光合势 Photosynthetic potential at the jointing–full heading stage；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数据在 5% 水平上差异显著 Values within a column followed by different lowercase letters are significantly different among different N treatments under the same plant population ($P < 0.05$)；*、** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著 Mean significant at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

$N_4 > N_2 > N_1 > N_0$，且 N_3 与 N_4 整体上差异均未达显著水平；而齐穗期 30 d 剑叶 WUE 均表现为 $N_0 > N_4 > N_3 > N_2 > N_1$。

2.4 株距和缓释氮肥配施量对机插稻干物质积累特征的影响

2.4.1 株距和缓释氮肥配施量对水稻单茎叶片、茎鞘和单茎干物质积累的影响 由表 4 可知，株距对齐穗期与成熟期单茎叶片干重、分蘖盛期与拔节期单茎茎鞘干重，以及各生育时期单茎干物重的影响达显著水平，缓释氮肥配施量对各生育时期单茎叶片、茎鞘和单茎干重的影响均达极显著水平。不同株距下，除拔节期单茎叶片与分蘖盛期单茎茎鞘干重外，各生育时期单茎叶片和茎鞘干重均值均表现为 $D_2 > D_1 > D_3$；而分蘖盛期、拔节及成熟期的单茎干物重均表现为 $D_2 > D_3 > D_1$。在同一株距 (D_1、D_3) 下，随缓释氮肥与常规尿素配施量的增加，各生育

表 3　齐穗期不同处理机插稻光合特征参数

Table 3　Photosynthetic parameters of mechanical- transplanted rice under different treatments in different days since the full heading stage

处理 Treatment		Pn [μmol/(m²·s)]			Gs [mol/(m²·s)]			Ci (μmol/mol)			Tr [mmol/(m²·s)]			AMC [mmol/(m²·s)]			WUE (μmol/mmol)		
		0 d	15 d	30 d	0 d	15 d	30 d	0 d	15 d	30 d	0 d	15 d	30 d	0 d	15 d	30 d	0 d	15 d	30 d
D_1	N_0	18.01 c	16.48 b	10.17 c	0.77 c	0.54 b	0.25 c	308.9 a	319.4 a	340.6 a	7.04 c	8.66 c	9.41 d	58.31 c	51.66 b	29.97 c	2.56 a	1.91 a	1.08 a
	N_1	18.98 bc	17.99 a	12.16 b	0.80 bc	0.62 b	0.31 bc	305.1 a	316.0 a	331.9 ab	7.85 b	9.62 b	13.38 c	62.20 bc	56.99 a	36.64 b	2.42 a	1.87 ab	0.91 c
	N_2	19.60 b	18.37 a	13.23 b	0.84 b	0.73 a	0.34 ab	304.1 a	314.2 a	324.7 ab	8.27 b	9.98 b	13.80 bc	64.43 b	58.47 a	40.89 b	2.38 a	1.84 abc	0.96 abc
	N_3	20.93 a	18.41 a	14.77 a	0.94 a	0.75 a	0.39 a	297.7 b	313.9 a	320.2 bc	8.97 a	10.72 a	14.37 ab	70.35 a	58.71 a	46.25 a	2.34 a	1.72 abc	1.02 ab
	N_4	21.94 a	19.21 a	15.99 a	0.97 a	0.84 a	0.42 a	292.7 b	305.7 b	311.1 c	9.74 a	11.34 a	15.12 a	75.00 a	62.90 a	51.53 a	2.27 a	1.69 ac	1.06 a
平均 Mean		19.89	18.09	13.27	0.87	0.70	0.34	301.7	313.8	325.7	8.38	10.06	13.22	66.06	57.74	41.06	2.39	1.81	1.01
D_2	N_0	18.03 c	16.60 bd	10.28 d	0.79 c	0.57 b	0.26 c	310.6 a	317.4 a	339.5 a	7.08 c	8.72 c	9.67 c	58.08 c	52.33 b	30.37 d	2.56 a	1.91 a	1.07 a
	N_1	19.44 b	18.18 abc	12.34 c	0.89 bc	0.79 a	0.30 bc	306.5 a	314.6 a	328.8 ab	8.41 b	9.88 b	13.19 b	63.44 b	57.84 a	37.63 c	2.31 a	1.84 ab	0.94 bd
	N_2	19.78 b	18.30 abc	14.38 b	0.94 ab	0.79 a	0.33 b	304.9 a	313.2 a	324.0 ab	8.64 b	10.08 b	14.00 b	64.92 b	58.47 a	44.52 b	2.31 a	1.82 abc	1.03 abc
	N_3	22.10 a	19.22 a	16.49 a	1.00 a	0.88 a	0.44 a	294.4 b	306.1 b	315.2 b	9.78 a	11.40 a	15.68 a	75.14 a	62.78 a	52.43 a	2.27 a	1.69 abcd	1.05 abc
	N_4	21.84 a	18.42 ab	16.21 a	0.95 ab	0.82 a	0.43 a	296.3 b	310.0 ab	318.3 b	9.60 a	11.27 a	15.24 a	73.77 a	59.63 a	51.02 ab	2.28 a	1.64 bd	1.07 a
平均 Mean		20.24	18.14	13.94	0.91	0.77	0.35	302.5	312.2	325.1	8.70	10.27	13.56	67.07	58.21	43.19	2.35	1.78	1.03
D_3	N_0	18.01 b	16.21 b	10.16 d	0.77 d	0.54 b	0.25 c	311.6 a	321.8 a	344.6 a	7.01 c	8.56 d	9.35 c	57.84 c	50.43 c	29.56 d	2.59 a	1.90 a	1.09 a
	N_1	18.59 b	17.21 ab	12.07 c	0.82 c	0.58 b	0.30 bc	307.2 ab	318.0 a	336.2 ab	7.85 b	9.34 c	12.40 b	60.54 bc	54.11 bc	35.95 c	2.37 ab	1.84 ab	0.97 a
	N_2	19.48 ab	17.49 ab	13.23 bc	0.84 bc	0.70 a	0.35 ab	301.2 bc	315.0 a	328.1 abc	8.25 b	9.87 bc	13.64 a	64.80 ab	55.56 abc	40.36 bc	2.39 ab	1.78 ab	0.97 a
	N_3	20.35 a	18.25 a	14.71 ab	0.91 ab	0.78 a	0.37 ab	299.0 bc	314.1 a	319.5 bc	8.66 ab	10.33 b	14.62 a	68.26 a	58.09 ab	46.18 ab	2.36 ab	1.77 ab	1.01 a
	N_4	21.22 a	18.91 a	15.50 a	0.96 a	0.83 a	0.41 a	293.5 c	306.7 b	312.6 c	9.69 a	11.32 a	15.08 a	72.32 a	61.67 a	49.75 a	2.19 b	1.67 b	1.04 a
平均 Mean		19.53	17.61	13.13	0.86	0.69	0.33	302.5	315.1	328.2	8.29	9.88	13.02	64.75	55.97	40.36	2.38	1.79	1.01
F 值 *F* value	D	2.58	0.81	2.75	4.96	3.22	1.38	0.11	0.62	0.75	15.72*	5.76	0.91	1.53	1.16	2.01	0.44	0.11	0.57
	N	14.28**	3.86*	40.25**	24.09**	14.63**	11.57**	10.54**	5.36**	5.61**	22.66**	45.51**	58.31**	15.33**	4.87**	28.73**	2.05	3.13*	3.32*
	D × N	0.28	0.19	0.42	1.23	0.82	0.30	0.30	0.51	0.14	0.47	0.69	0.42	0.30	0.27	0.29	0.08	0.08	0.21

注（Note）：D_1、D_2、D_3 分别代表株距 16、18、20 cm Represent space of 16, 18 and 20 cm; N_0—不施氮肥 No nitrogen fertilization; N_1、N_2、N_3、N_4 代表在常规尿素 54 kg/hm² 的基础上，缓释氮肥配施量分别为 36、66、96、126 kg/hm² Represent slow release N addition of 36, 66, 96 and 126 kg/hm² at the base of urea N of 54 kg/hm². FHS—齐穗期 Full heading stage; Pn—净光合速率 Net photosynthetic rate; Gs—气孔导度 Stomatal conductance; Ci—胞间 CO_2 浓度 Intercellular CO_2 concentration; Tr—蒸腾速率 Transpiration rate; AMC—表观叶肉导度 Apparent leaf mesophyll conductance; WUE—水分利用率 Water use efficiency; 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% 水平差异显著 Values within a column followed by different lowercase letters are significantly different among different N treatments under the same plant population ($P < 0.05$); *、** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著 Mean significant at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

表 4 不同处理机插稻单茎叶片、茎鞘和单茎干物重 (g/stem)

Table 4 Dry matter weights of leaf, culm and sheath of single stem in mechanical- transplanted rice under different treatments

处理 Treatment		叶片 Leaf				茎鞘 Culm and sheath				单茎 Single stem			
		FTS	JS	FHS	MS	FTS	JS	FHS	MS	FTS	JS	FHS	MS
D_1	N_0	0.12 d	0.37 c	0.99 b	0.69 c	0.14 d	0.47 c	3.13 c	1.91 c	0.26 d	0.84 c	4.76 d	7.56 d
	N_1	0.13 c	0.39 bc	1.01 b	1.02 b	0.16 c	0.49 c	3.19 b	2.21 b	0.29 c	0.87 c	4.83 cd	7.73 cd
	N_2	0.15 b	0.40 bc	1.02 b	1.02 b	0.18 b	0.52 b	3.20 b	2.27 ab	0.33 b	0.92 b	4.86 c	7.82 bc
	N_3	0.16 ab	0.43 ab	1.19 a	1.05 b	0.19 a	0.54 ab	3.32 a	2.35 a	0.35 a	0.96 b	5.21 b	7.97 b
	N_4	0.17 a	0.47 a	1.23 a	1.14 a	0.20 a	0.57 a	3.35 a	2.40 a	0.37 a	1.04 a	5.34 a	8.23 a
平均 Mean		0.15	0.41	1.09	0.99	0.17	0.52	3.24	2.23	0.32	0.93	5.00	7.86
D_2	N_0	0.13 c	0.39 c	1.03 c	0.79 d	0.15 d	0.48 c	3.22 c	2.15 b	0.28 d	0.87 c	4.92 c	8.72 a
	N_1	0.16 b	0.43 b	1.04 c	1.03 c	0.18 c	0.50 c	3.23 bc	2.28 a	0.34 c	0.93 b	4.96 c	8.36 b
	N_2	0.16 ab	0.50 a	1.21 b	1.09 b	0.19 b	0.59 b	3.28 ab	2.36 a	0.36 b	1.09 a	5.23 b	8.56 a
	N_3	0.18 a	0.52 a	1.36 a	1.17 a	0.21 a	0.62 a	3.35 a	2.41 a	0.39 a	1.14 a	5.48 a	8.80 a
	N_4	0.17 ab	0.51 a	1.35 a	1.11 ab	0.20 ab	0.61 ab	3.34 a	2.37 a	0.37 ab	1.12 a	5.44 a	8.64 a
平均 Mean		0.16	0.47	1.20	1.04	0.19	0.56	3.29	2.32	0.35	1.03	5.21	8.62
D_3	N_0	0.11 c	0.37 c	0.95 c	0.68 c	0.14 d	0.47 c	3.07 c	1.91 c	0.25 d	0.84 c	4.66 d	7.83 b
	N_1	0.15 b	0.40 c	1.00 c	0.99 b	0.18 c	0.48 c	3.12 c	2.17 b	0.32 c	0.88 bc	4.76 c	7.79 b
	N_2	0.16 ab	0.42 bc	1.01 bc	1.02 b	0.19 b	0.52 b	3.15 bc	2.19 b	0.35 b	0.93 b	4.82 c	8.01 b
	N_3	0.16 ab	0.48 ab	1.09 b	1.05 ab	0.20 ab	0.54 ab	3.22 b	2.29 ab	0.36 ab	1.02 a	4.98 b	8.40 a
	N_4	0.17 a	0.51 a	1.24 a	1.12 a	0.21 a	0.57 a	3.33 a	2.37 a	0.38 a	1.07 a	5.29 a	8.71 a
平均 Mean		0.15	0.43	1.06	0.97	0.18	0.52	3.18	2.19	0.33	0.95	4.90	8.15
F 值 *F* value	D	3.50	4.76	58.29**	7.12*	12.90*	63.18**	6.34	2.42	7.56*	13.33*	35.00**	27.08**
	N	25.34**	14.68**	44.73**	88.64**	45.63**	40.17**	19.28**	21.02**	56.15**	36.87**	70.96**	14.69**
	D × N	1.01	0.93	2.43*	1.37	1.14	1.94	0.85	0.86	1.41	1.79	2.59*	3.23*

注（Note）：D_1、D_2、D_3 分别代表株距 16、18、20 cm Represent space of 16, 18 and 20 cm; N_0—不施氮肥 No nitrogen fertilization; N_1、N_2、N_3、N_4 代表在常规尿素 54 kg/hm^2 的基础上，缓释氮肥配施量分别为 36、66、96、126 kg/hm^2 Represent slow release N addition of 36, 66, 96 and 126 kg/hm^2 at the base of urea N of 54 kg/hm^2. FTS—分蘖盛期 Full tillering stage; JS—拔节期 Jointing stage; FHS—齐穗期 Full Heading stage；MS—成熟期 Maturity stage; 同列数据后不同小写字母表示同一密度下各氮肥处理在 5% 水平上差异显著 Values within a column followed by different lowercase letters are significantly different among different N treatments under the same plant population ($P < 0.05$)；*、** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著 Mean significant at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

时期的单茎叶片、茎鞘干重和单茎干重均呈增加的趋势，且分蘖盛期、成熟期单茎叶片干重和分蘖盛期、齐穗期、成熟期单茎茎鞘干重, 各缓释氮肥与常规尿素配施处理整体上显著高于 N_0 处理。

2.4.2 株距和缓释氮肥配施量对水稻群体干物质积累特性的影响 株距对拔节及成熟期群体干物重、分蘖盛期至拔节期干物质积累量和群体生长率的影响达极显著水平，缓释氮肥配施量对机插稻各生育时期群体干物重、阶段干物质累积量和群体生长率均存在极显著影响；两因素对机插稻拔节期群体干物重、分蘖盛期至拔节期物质积累量和群体生长率的影响均存在显著互作效应 (表 5)。群体干物重、阶段干物质积累量和群体生长率均随机插株距的增大呈先增后降的趋势。株距为 D_1 和 D_3 时，各生育时期群体干物重、阶段干物质积累量和群体生长率整体上与缓释氮肥与常规尿素的配施量呈正相关，且拔节至齐穗期、齐穗至成熟期各缓释氮肥配施处理间群体生长率的差异均未达显著水平；株距为 D_2 时，各生育时期群体干物重、阶段干物质积累量及群体生长率均表现为 $N_3 > N_4 > N_2 > N_1 > N_0$。

表 5　不同株距和缓释氮肥配施量下水稻群体干物质积累特性

Table 5　Dry matter accumulation of population in mechanical- transplanted rice under different treatments

处理 Treatment		群体干物重 (t/hm²) Population dry matter				阶段干物质积累量 (t/hm²) Periodical DW accumulation			群体生长率 [g/(m²·d)] Population growth rate		
		FTS	JS	FHS	MS	FTS–JS	JS–FHS	FHS–MS	FTS–JS	JS–FHS	FHS–MS
D_1	N_0	0.53 d	1.96 d	7.42 d	12.50 d	1.43 c	5.46 c	5.07 b	10.23 c	17.07 b	11.52 b
	N_1	0.95 c	3.18 c	9.74 c	15.93 c	2.23 b	6.57 ab	6.19 a	15.92 b	19.31 a	14.07 a
	N_2	1.09 b	3.39 c	10.17 b	16.47 b	2.30 b	6.78 ab	6.29 a	16.47 b	19.93 a	14.31 a
	N_3	1.21 a	4.19 b	11.39 a	17.71 a	2.99 a	7.20 a	6.31 a	21.33 a	20.01 a	14.35 a
	N_4	1.31 a	4.60 a	11.85 a	18.27 a	3.29 a	7.24 a	6.42 a	23.52 a	20.12 a	14.60 a
平均 Mean		1.02	3.46	10.12	16.17	2.45	6.65	6.06	17.49	19.29	13.77
D_2	N_0	0.53 d	2.02 d	7.53 d	12.91 d	1.49 d	5.51 b	5.38 c	10.66 d	17.21 b	12.23 b
	N_1	0.93 c	3.01 c	9.92 c	16.38 c	2.08 c	6.91 a	6.46 b	14.84 c	20.34 a	14.67 a
	N_2	1.12 b	3.80 b	10.72 b	17.23 b	2.68 b	6.92 a	6.51 ab	19.09 b	20.38 a	14.79 a
	N_3	1.34 a	4.87 a	12.41 a	19.64 a	3.53 a	7.54 a	7.23 a	25.21 a	20.96 a	16.42 a
	N_4	1.27 a	4.49 a	11.87 a	19.06 a	3.22 a	7.38 a	7.19 ab	23.03 a	20.50 a	16.35 a
平均 Mean		1.04	3.64	10.49	17.04	2.60	6.85	6.55	18.57	19.88	14.89
D_3	N_0	0.39 d	1.81 d	7.03 d	12.08 d	1.42 d	5.22 b	5.05 c	10.16 d	16.31 b	11.48 b
	N_1	0.79 c	2.54 c	9.30 c	14.77 c	1.74 c	6.76 a	5.47 bc	12.47 c	19.89 a	12.43 ab
	N_2	1.01 b	2.90 b	9.68 c	15.66 b	1.89 bc	6.78 a	5.98 ab	13.52 bc	19.94 a	13.59 a
	N_3	1.08 b	3.33 b	10.54 b	16.74 a	2.25 b	7.20 a	6.21 ab	16.07 b	20.02 a	14.10 a
	N_4	1.25 a	4.06 a	11.28 a	17.52 a	2.81 a	7.23 a	6.24 a	20.06 a	20.07 a	14.18 a
平均 Mean		0.90	2.93	9.57	15.36	2.02	6.64	5.79	14.46	19.25	13.16
F 值 *F* value	D	5.30	154.79**	3.77	108.63**	88.15**	0.24	2.73	88.05**	0.25	2.72
	N	104.05**	126.19**	166.71**	162.43**	57.79**	22.22**	10.02**	58.29**	9.71**	9.95**
	D × N	0.80	3.42**	1.61	1.70	2.64*	0.10	0.45	2.66*	0.11	0.44

注（Note）：D_1、D_2、D_3 分别代表株距 16、18、20 cm Represent space of 16, 18 and 20 cm; N_0—不施氮肥 No nitrogen fertilization; N_1、N_2、N_3、N_4 代表在常规尿素 54 kg/hm² 的基础上，缓释氮肥配施量分别为 36、66、96、126 kg/hm² Represent slow release N addition of 36, 66, 96 and 126 kg/hm² at the base of urea N of 54 kg/hm². FTS—分蘖盛期 Full tillering stage; JS—拔节期 Jointing stage; FHS—齐穗期 Full Heading stage；MS—成熟期 Maturity stage; 同列数据后不同小写字母表示同一密度下各氮肥处理在 5% 水平上差异显著 Values within a column followed by different lowercase letters are significantly different among different N treatments under the same plant population ($P < 0.05$)；*、** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著 Mean significant at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

2.5　光合物质生产特性与干物质积累、产量的关系

由表 6 可见，除拔节期至齐穗期群体生长率与氮肥农学利用率相关性不显著外，齐穗期高效叶面积指数、拔节至齐穗期光合势及群体生长率和结实期净光合速率与总干物质量、氮肥农学利用率、有效穗、产量整体上呈极显著正相关，拔节至齐穗期光合势及齐穗 30 d 的净光合速率与穗粒数呈显著正相关。表明机插株距和缓释氮肥配施量有利于提高结实期的光合生产性能，促进物质向籽粒的转运，增加每穗粒数及干物质积累量，进而提高机插稻的产量及氮肥农学利用率。

3　讨论

3.1　株距和缓释氮肥配施量对机插杂交籼稻产量形成的影响

水稻产量的形成除与其本身的品种遗传特性紧密相关外，还与气候环境和栽培措施等密切相联，氮肥管理和种植密度是水稻栽培措施中影响产量形成的两个重要因素[15–19]。前人关于密度和施氮量对水稻产量形成的影响研究报道较多，但结果不尽一

表 6 叶面积指数、光合物质生产与干物质量、氮肥农学利用率 (NAE) 及产量的相关性

Table 6 Correlation coefficients between LAI and photosynthetic production and N agronomy efficiency, dry matter and yield

指标 Index	生育期 Growth stage	总干物质量 Total dry matter	NAE	有效穗 Effective panicle	穗粒数 Spikelet No./panicle	籽粒产量 Grain yield
FHLAI		0.90**	0.61**	0.83**	0.23	0.87**
PPFH		0.91**	0.68**	0.80**	0.32*	0.91**
	FTS–JS	0.89**	0.66**	0.79**	0.21	0.87**
PGR	JS–FHS	0.64**	0.21	0.62**	0.08	0.55**
	FHS–MS	0.80**	0.52**	0.74**	0.18	0.71**
	FHS	0.80**	0.53**	0.75**	0.26	0.77**
NPRF	FHS 15 d	0.64**	0.32*	0.58**	0.17	0.56**
	FHS 30 d	0.91**	0.63**	0.81**	0.31*	0.86**

注（Note）：FHLAI—齐穗期高效叶面积指数 High valid leaf area index at the full heading stage; PPFH—拔节齐穗光合势 Photosynthetic potential at the jointing–full heading stage; PGR—群体生长率 Population growth rate; FTS—分蘖盛期 Full tillering stage; JS—拔节期 Jointing stage; FHS—齐穗期 Full heading stage; NPRF—结实期净光合速率 Net photosynthetic rate at the filling stage; *、** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著 Mean significant at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

致。众多学者研究[16, 20–21]显示，适宜的施氮量和中密度处理可显著提高机插稻的有效穗和穗粒数，进而提高群体颖花量，促进“库”容量，最终提高产量；而另有研究[22–23]表明，中密度处理在高施氮条件下较易获得高产。本研究从机插株距和氮肥配施量耦合来看，中密度 (18 cm) 时，缓释氮肥 (96 kg/hm^2) 与常规尿素 (54 kg/hm^2) 配施量为 150 kg/hm^2 可显著提高机插稻产量，为本研究区域机插稻适宜的施氮量与中密度处理配合的最佳肥密运筹处理，这与前人[16]研究结果基本一致，但与许梦秋等[22]研究结果有所不同，主要原因是手插稻相比机插稻每穴栽插苗数少，茎蘖数少，冠层透光率强，养分转运多，对氮肥的需求量大。但前人[19–21]在大量的研究中尚未明确缓释氮肥配施作用及其与株距对机插稻产量形成的影响。本研究表明，机插株距和缓释氮肥配施量及其互作效应对杂交籼稻穗粒数和产量的影响均达极显著水平，且缓释氮肥与常规尿素配施量对产量形成的调控作用显著高于机插株距，在行距为 30 cm 下，株距为 16 cm 时随着缓释氮肥与常规尿素配施量的增加产量呈增加的趋势，主要是因为缓释氮肥前期养分释放较为缓慢而常规尿素能够迅速释放，在较高的密度下随着缓释氮肥与常规尿素配施量的增加，植株吸收的养分增多群体茎蘖数增大，形成的有效穗多，后期缓释氮肥养分释放增强，而光合特性及养分的竞争性强，未能形成足够的大穗导致穗粒数较少，群体颖花量较小，从节本增效的角度考虑，缓释氮肥 (96 kg/hm^2) 与常规尿素 (54 kg/hm^2) 的配施量为 150 kg/hm^2 有利于机插稻的生产；当株距增加到 20 cm 时，群体茎蘖数普遍降低，但由于通风透光条件好，随着缓释氮肥与常规尿素配施量的增加，水稻对养分的吸收增强，LAI 增大、光合速率显著增强，单茎干物质积累多，促进养分向籽粒转运，后期灌浆充实，形成了穗大、粒多及饱满型的稻谷，因此当机插株距增加较大时为了获得高产应适当增加缓释氮肥配施量；在机插株距为 18 cm 时，在足够群体茎蘖数的基础上常规尿素养分的释放保证了较高的有效穗，形成了高效高质量的群体，随着缓释氮肥与常规尿素配施量及养分释放的增加有效穗呈先增加后减少的趋势，主要原因是较高的缓释氮肥配施量促使无效分蘖增多，成穗率降低，但后期缓释氮肥养分的释放保证了较高的穗粒数，因此群体颖花量大，且保持了较高的结实率和千粒重，从而显著提高机插稻产量。综上表明，中密度 (株距 18 cm) 下，适量 (150 kg/hm^2) 的缓释氮肥 (96 kg/hm^2) 与常规尿素 (54 kg/hm^2) 配施，其养分供应能提高杂交稻中、后期植株生长，尤其能增加拔节至齐穗期光合势、齐穗期高效 LAI，对促进增产更为重要，这也进一步补充和完善了前人的研究结果[20, 24–25]。此外，本研究氮肥运筹均为基肥一次性施入，而对于缓释氮肥与常规尿素配施在水稻关键生

育时期运筹方式和机插密度耦合，能否进一步促进机插杂交稻产量形成及提高氮肥利用效率尚有待于进一步研究。

3.2　机插杂交籼稻光合物质生产特征与产量形成的关系

群体光合速率能准确描述每单位土地面积上作物的光合能力，提高群体光合速率制造更多的光合产物，降低呼吸消耗使更多的光合产物用于干物质积累。因此，提高光能利用率是作物高产的基本要求。水稻的光合作用与 LAI、剑叶的净光合速率及群体光合速率等因素密切相关，是表征群体光合生产能力的重要指标及能量和物质积累的基础。有研究[26]认为，水稻抽穗期干物质积累量与产量形成没有明显关系，而抽穗后光合物质的积累、转运是影响产量形成的重要因素，水稻产量的高低取决于抽穗至成熟期光合物质的生产及转运能力。而另有研究[27–28]认为，大幅度的增加产量库容是实现水稻超高产的前提，水稻产量库容的扩大主要在于有效穗数的增加，扩大库容的前提是必须要有较高的群体生长率及光合物质的积累。李敏等[29]研究发现与施用普通尿素相比，施用控释尿素的水稻生育中后期剑叶净光合速率得到了显著提高，延长了水稻后期功能叶的光合性能，延缓了叶片的衰老，增加了水稻产量。本试验研究表明，机插株距和缓释氮肥与常规尿素配施下杂交籼稻的 LAI、剑叶净光合速率及生育后期群体生长率与干物质积累量、有效穗及产量呈极显著正相关 (表 6)，说明机插密度和缓释氮肥与常规尿素配施，有效改善了水稻生育后期田间的通风透光条件，个体生长潜力得到充分发挥，剑叶光合特性、单茎茎叶干重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，光合产物和干物质积累增多，促使籽粒灌浆充实，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，稳定了结实率和千粒重，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

株距和缓释氮肥与常规尿素配施对机插杂交籼稻成熟期群体干物重、叶面积指数、拔节至齐穗期光合势及产量的影响均达显著或极显著水平，且缓释氮肥配施量对机插杂交籼稻产量及光合物质生产特性的调控作用更为显著。本试验在机插行距为 30 cm 下，株距 18 cm 和缓释氮肥 (96 kg/hm^2) 与常规尿素 (54 kg/hm^2) 配施量为 150 kg/hm^2 耦合为氮肥减量增效最佳的肥密运筹处理，可有效提高机插稻有效分蘖数，增强拔节及齐穗期群体光合势和生长率，促进结实期叶片、茎鞘将物质转运至籽粒，显著提高了稻谷产量。机插杂交稻主要生育时期的叶面积指数、光合特性及群体生长率与干物质积累量、氮肥农学利用率、有效穗、穗粒数及最终产量均呈显著或极显著的正相关，拔节至齐穗期光合势及齐穗期叶面积指数可显著提高氮肥农学利用率及穗粒数，适宜的株距和缓释氮肥与常规尿素配施量耦合是进一步提高机插杂交稻产量的重要途径。

参 考 文 献：

[1] 胡雅杰, 邢志鹏, 龚金龙, 等. 适宜机插株行距提高不同穗型粳稻产量[J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 33–44.
Hu Y J, Xing Z P, Gong J L, *et al*. Suitable spacing in and between rows of plants by machinery improves yield of different panicle type japonica rices[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(14): 33–44.

[2] 曾宪军, 蔡桂青, 田昌, 王娟, 等. 施氮量和栽插密度对晚稻产量与氮肥利用率的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(18): 20–24.
Zeng X J, Cai G Q, Tian C, Wang J, *et al*. Nitrogen amount and transplanting density on yield and nitrogen utilization of late rice[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(18): 20–24.

[3] Zheng S X, Nie J, Dai P A, Zheng Y J. Nitrogen recovery and nitrate leaching of controlled release nitrogen fertilizer in irrigated paddy soil[J]. Agricultural Science & Technology, 2004, 5(3): 2–10.

[4] Zhou W L, Lou Y S, Ren L X, Han Y, *et al*. Application of controlled-release nitrogen fertilizer decreased methane emission in transgenic rice from a paddy soil[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2014, 225(3): 1897.

[5] 郑圣先, 刘德林, 聂军, 等. 控释氮肥在淹水稻田土壤上的去向及利用率[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(2): 137–142.
Zheng S X, Liu D L, Nie J, *et al*. Fate and recovery efficiency of controlled release nitrogen fertilizer in flooding paddy soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(2): 137–142.

[6] 胡雅杰, 曹伟伟, 钱海军, 等. 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[J]. 作物学报, 2015, 41(5): 743–757.
Hu Y J, Cao W W, Qian H J, *et al*. Effect of planting density of mechanically transplanted pot seedlings on yield, plant type and lodging resistance in rice with different panicle types[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(5): 743–757.

[7] 许俊伟, 孟天瑶, 荆培培, 等. 机插密度对不同类型水稻抗倒伏能力及产量的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(11): 1767–1776.
Xu J W, Meng T Y, Jing P P, *et al*. Effect of mechanical-

transplanting density on lodging resistance and yield in different types of rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(11): 1767–1776.

[8] 郭保卫, 朱聪聪, 朱大伟, 等. 钵苗机插密度对不同类型水稻齐穗期株型及冠层微环境的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 31(1): 9–17.
Guo B W, Zhu C C, Zhu D W, *et al*. Effects of planting density on plant form and micrometeorology in different types of rice with potted seedlings by mechanical-transplanting method[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 31(1): 9–17.

[9] 陈佳娜, 谢小兵, 伍丹丹, 等. 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[J]. 中国水稻科学, 2015, 29(6): 628–636.
Chen J N, Xie X B, Wu D D, *et al*. Effects of nitrogen application and mechanical transplanting density on yield formation and nitrogen use efficiency of conventional rice Zhongjiazao 17[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2015, 29(6): 628–636.

[10] 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.
Zhu C C, Zhang H C, Guo B W, *et al*. Effect of planting density on yield and photosynthate production characteristics in different types of rice with bowl mechanical-transplanting method[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(1): 122–133.

[11] 李玥, 李应洪, 赵建红, 等. 缓控释氮肥对机插稻氮素利用特征及产量的影响[J]. 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, *et al*. Effects of slow-and controlled-release fertilizer on nitrogen utilization characteristics and yield of machine-transplanted rice[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Science Edition), 2015, 41(6): 673–684.

[12] 王海月, 李玥, 孙永健, 等. 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[J]. 中国水稻科学, 2016, 31(1): 50–64.
Wang H Y, Li Y, Sun Y J, *et al*. 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[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2016, 31(1): 50–64.

[13] Fisher R A, Rees D, Sayre K D, *et al*. Wheat yield progress associated with higher stomatal conductance and photosynthetic rate, and cooler canopies[J]. Crop Science, 1998, 38(6): 1467–1475.

[14] 徐晨, 凌风楼, 徐克章, 等. 盐胁迫对不同水稻品种光合特性和生理生化特性的影响[J]. 中国水稻科学, 2013, 27(3): 280–286.
Xu C, Ling F L, Xu K Z, *et al*. Effect of salt stress on photosynthetic characteristics and physiological and biochemical traits of different rice varieties[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2013, 27(3): 280–286.

[15] 王世伟, 张美良, 潘晓华, 等. 施氮量和密度对机插杂交晚稻产量构成及干物质积累的影响[J]. 耕作与栽培, 2010, (1): 1–3.
Wang S W, Zhang M L, Pan X H, *et al*. Effects of nitrogen application rates and density of mechanical transplanted later rice on yield formation and dry matter[J]. Tillage and Cultivation, 2010(1): 1–3.

[16] 孙永健, 马均, 孙园园, 等. 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[J]. 核农学报, 2014, 28(8): 1510–1520.
Sun Y J, Ma J, Sun Y Y, *et al*. Effects of nitrogen application rates and plant spacing on nutrient translocation during filling stage and yield of mechanical-transplanted hybrid rice [[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2014, 28(8): 1510–1520.

[17] 韩正光, 张安存, 陈永华, 韩素华. 机插密度与氮肥对淮稻5号产量特性的影响[J]. 现代农业科技, 2015, (19): 26–27.
Han Z G, Zhang A C, Chen Y H, Han S H. Effects of planting density and nitrogen on yield characteristics of conventional rice Huaidao 5[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2015(19): 26–27.

[18] 林洪鑫, 潘晓华, 石庆华, 等. 施氮量与栽插密度对超级早稻中早22产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 22–28.
Lin H X, Pan X H, Shi Q H, *et al*. Effects of nitrogen fertilization and planting density on yield of super early rice Zhongzao 22[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(1): 22–28.

[19] 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.
Hu Y J, Qian H J, Cao W W, *et al*. Effects of different mechanical transplantation methods and density on yield and its components of different panicle-typed rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2016, 30(5): 493–506.

[20] 马国辉, 龙继锐, 戴清明, 周静. 超级杂交中稻Y两优1号最佳缓释氮肥用量与密度配置研究[J]. 杂交水稻, 2008, 23(6): 73–77.
Ma G H, Long J R, Dai Q M, Zhou J. Studies on the optimized allocation of controlled-release nitrogen fertilizer application and planting density for medium super hybrid rice combination Y Liangyou 1[J]. Hybrid Rice, 2008, 23(6): 73–77.

[21] 程建平, 张再君, 赵锋, 等. 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[J]. 杂交水稻, 2011, 26(6): 69–73.
Cheng J P, Zhang Z J, Zhao F, *et al*. Effects of planting density and nitrogen fertilizer management on population formation and yield of Liangyou 1528 under mechanized transplanting conditions[J]. Hybrid Rice, 2011, 26(6): 69–73.

[22] 许梦秋, 邝伟生, 姚冬美, 等. 施氮量与移栽密度对博Ⅲ优869产量的影响[J]. 杂交水稻, 2016, 31(3): 33–36.
Xu M Q, Kuang W S, Yao D M, *et al*. Effects of nitrogen rate and transplanting density on yield of Bo Ⅲ You 869[J]. Hybrid Rice, 2016, 31(3): 33–36.

[23] 兰艳, 黄鹏, 江谷驰弘, 等. 成都平原稻作区施氮量和栽插密度对粳稻D46产量及品质的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2016, 42(1): 63–73.
Lan Y, Huang P, Jiang G C H, *et al*. Effect of nitrogen application and planting density on grain yield and quality of japonica rice cultivar D46 in the planting area of Chengdu plain[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Science Edition), 2016, 42(1): 63–73.

[24] 林洪鑫, 潘晓华, 石庆华, 等. 行株距配置对超高产早晚稻产量的影响[J]. 中国水稻科学, 2011, 25(1): 79–85.
Lin H X, Pan X H, Shi Q H, *et al*. Effects of row-spacing on yield of super-high-yielding early and late rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2011, 25(1): 79–85.

[25] 徐春梅, 王丹英, 邵国胜, 章秀福. 施氮量和栽插密度对超高产水稻中早22产量和品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2008, 22(5): 507–512.
Xu C M, Wang D Y, Shao G S, Zhang X F. Effects of transplanting density and nitrogen fertilizer rate on yield formation and grain quality of super high yielding rice Zhongzao 22[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2008, 22(5): 507–512.

[26] Lü G H, Wu Y F, Bai W B, *et al*. Influence of high temperature stress on net photosynthesis, dry matter partitioning and rice grain yield at flowering and grain filling stages[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(4): 603–609.

[27] Chen W F, Xu Z J, Zhang W Z, *et al*. Creation of new plant type and breeding rice for super high yield[J]. Acta Agronomica Sinica, 2001, 27(5): 665–672.

[28] 程旺大, 姚海根, 张红梅. 南方晚粳杂交稻与常规稻籽粒灌浆及后期叶片光合特性的差异[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(2): 174–178.
Cheng W D, Yao H G, Zhang H M. Difference in grain-filling properties and leaf photosynthetic characteristics at late growth stage between japonica hybrid and conventional rice for late season in southern China[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2007, 21(2): 174–178.

[29] 李敏, 郭熙盛, 叶舒娅, 等. 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[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(4): 808–815.
Li M, Guo X S, Ye S Y, *et al*. Effects of sulfur-and polymer-coated controlled release urea on yield, photosynthetic characteristics and nitrogen fertilizer efficiency of rice[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(4): 808–815.