

适宜机插株行距提高不同穗型粳稻产量

胡雅杰¹, 邢志鹏¹, 龚金龙¹, 张洪程^{1*}, 戴其根¹, 霍中洋¹, 许轲¹, 魏海燕¹,
李德剑², 沙安勤², 周有炎², 刘国林², 陆秀军², 刘国涛¹, 朱嘉炜¹

(1. 扬州大学农业部长江流域稻作技术创新中心/扬州大学江苏省作物遗传生理重点实验室, 扬州 225009;

2. 江苏省兴化市农业局, 兴化 225700)

摘要:为探明不同穗型粳稻品种合理机插株行距配置、产量形成规律及其物质生产特征, 以大穗型品种甬优2640、甬优8号, 中穗型品种武运粳24号、宁粳3号和小穗型品种淮稻5号、淮稻10号为材料, 研究了机插株行距对不同穗型粳稻品种产量、叶面积指数、光合势、物质生产与积累、群体生长率和净同化率的影响。结果表明: 大穗型行距30 cm机插, 扩大株距, 利于形成大穗而高产; 中穗型2种行距机插平均产量相当, 但行距30 cm机插生育后期透光透光条件好, 利于提高千粒重和结实率, 产量潜力高; 小穗型行距25 cm机插显著增加穗数而高产。大穗型行距30 cm机插抽穗、成熟期叶面积指数大, 粒叶比高, 叶面积衰减率低, 抽穗期群体质量优, 生育中后期光合势大、群体生长率和净同化率高, 从而物质积累量高; 中穗型行距30 cm机插生物学产量略低, 但收获指数高; 小穗型行距25 cm机插群体基本苗多, 叶面积指数和光合势大, 生育中后期群体生长率和净同化率高, 物质积累量高。因此, 大、中穗型宜采用行距30 cm机插, 小穗型宜采用行距25 cm机插, 并配套相应株距, 能充分发挥不同穗型粳稻品种产量潜力。

关键词:农业机械, 耕作, 光合, 株行距, 穗型, 机插粳稻, 产量

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.14.005

中图分类号: S223.1; S233.71

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-14-0033-12

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 Yajie, Xing Zhipeng, Gong Jinlong, et al. Suitable spacing in and between rows of plants by machinery improves yield of different panicle type japonica rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(14): 33-44. (in Chinese with English abstract)

0 引言

机插稻具稳产、节本、高效、省工、劳动强度小等诸多优势, 日本、韩国和中国台湾地区已普及推广^[1-3]。近年来, 随着农村经济快速发展和剩余劳动力大量向二、三产业转移, 中国机插稻迅猛发展^[4-6]。当前生产上推广应用的机插稻, 是引进日本小苗宽行(行距30 cm)带土机插秧技术的基础上再创新发展起来的^[7-8], 但在江苏、江西、湖南等省普遍反映机插行距偏大, 穴数较少, 基本苗

偏少, 导致有效穗数不足, 限制机插稻产量潜力发挥^[9-11]。而有研究认为机插稻超高产应适当扩大株行距, 降低移栽密度, 减少基本苗, 增加田间通风透光条件, 提高水稻中后期群体质量, 主攻大穗^[12]。因此, 开展不同机插株行距或移栽密度对不同穗型粳稻品种产量及其光合物质生产的影响研究, 提出不同穗型粳稻品种适宜的机插株行距配置及其光合物质生产特征, 对进一步细化不同穗型品种机插稻栽插规程和稳步提高机插稻产量意义重大。

国内外学者就株行距或移栽密度对机插稻产量的影响研究报道较多^[13-19], 李世峰^[16]和彭长青^[17]认为机插稻移栽密度过小或过大均不利于高产, 小棵密植利于机插稻个体与群体生长发育。而针对不同穗型品种机插稻研究也较多^[20-23], 谢成林^[22]研究认为机插稻应用大穗型和穗粒兼顾型品种, 利于协调穗数和每穗粒数。钱银飞^[23]研究认为大穗型品种机插稻依靠提高每穗粒数和结实率, 中穗型品种主要通过协调穗数和每穗粒数来提高颖花量而高产, 小穗型品种则依靠增加穗数提高颖花量而增产。尽管前人针对机插稻不同移栽密度和不同穗型品种进

收稿日期: 2013-02-03 修订日期: 2013-06-05

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划重大项目(2011BAD16B03), 超级稻配套栽培技术开发与集成(农业部专项), 江苏省农业科技自主创新基金项目(CX[2]1003.9), 江苏省科技支撑计划(BE2012301)和江苏省高校优势学科建设工程资助。

作者简介: 胡雅杰(1988—), 男, 江苏泗阳人, 主要从事水稻轻简栽培等方面研究。扬州 扬州大学江苏省作物遗传生理重点实验室, 225009。Email: yajiehu@163.com

*通信作者: 张洪程(1951—), 男, 江苏南通人, 教授、博导, 主要从事作物栽培高产技术及理论研究。扬州 扬州大学农业部长江流域稻作技术创新中心, 225009。Email: hc Zhang@yzu.edu.cn

行了研究,但结果不完全一致,而就机插株行距对不同穗型粳稻品种产量和光合物质生产的影响鲜有报道,更缺乏系统比较研究。本研究以大面积生产上具有代表性不同穗型水稻品种,系统比较研究机插株行距对不同穗型粳稻品种产量和光合物质生产的影响,为不同穗型粳稻品种配置适宜机插株行距及其高产形成规律提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点

2011—2012 年在扬州大学农学院校外试验基地江苏省兴化市钓鱼镇进行。该区位于江苏里下河腹部,属北亚热带湿润气候区,年平均温度 15℃左右,年降水量 1 024.8 mm 左右,全年日照时数 2 305.6 h 左右,无霜期 227 d 左右。试验地前茬为小麦(产量 6.7 t/hm²),土壤类型黏泥土,质地黏性。0~20 cm 土层含有机质 26.87 g/kg、全氮 1.78 g/kg、速效磷 13.2 mg/kg、速效钾 148.8 mg/kg。

1.2 试验设计

2010 年选取省内外 24 个品种(或组合)进行

预备试验,在高产栽培技术统一控制下种植,充分发挥其产量潜力,成熟期按平均单穗质量进行聚类分析,按欧式距离长短划分为大穗型(平均单穗质量≥5 g)、中穗型(3 g<平均单穗质量<5 g)和小穗型(平均单穗质量≤3 g)3 类。每穗型各选取 2 个最具代表性品种进行正式试验,小穗型品种为淮稻 5 号、淮稻 10 号,中穗型品种为武运粳 24 号、宁粳 3 号,大穗型品种为甬优 8 号、甬优 2640。

1.2.1 育秧与栽插规格

2011—2012 年采用塑料软盘播种旱育秧,5 月 28 日播种,6 月 15 日模拟机插移栽,秧龄为 18 d;行距 25、30 cm,每个行距处理下设 3 个株距,分别为 11.7、13.3、14.8 cm,具体见表 1。根据本课题组 2006—2007 年针对不同穗型品种机插稻每穴适宜苗数的研究结果^[20]和南京农业大学李刚华等研究^[21],确定了大穗型品种适宜每穴栽插 2 苗,中穗型品种适宜每穴栽插 3 苗,小穗型品种适宜每穴栽插 4 苗(表 1)。试验设置 36 个处理,3 次重复,共 108 个小区,随机区组排布,每个小区面积为 25 m²。

表 1 不同穗型品种基本苗构成情况

Table 1 Comprise of basic seedlings of different panicle-typed varieties

处理 Treatment	株行距 Row-plant spacing/cm	密度 Density /(10 ⁴ hill·667m ⁻²)	大穗型		中穗型		小穗型	
			Large panicle-typed variety		Medium panicle-typed variety		Small panicle-typed variety	
			穴苗数 Seedlings per hill	基本苗 Basic seedlings /(10 ⁴ plants·667m ⁻²)	穴苗数 Seedlings per hill	基本苗 Basic seedlings /(10 ⁴ plants·667m ⁻²)	穴苗数 Seedlings per hill	基本苗 Basic seedlings /(10 ⁴ plants·667m ⁻²)
A1	30.0×11.7	1.9	2	3.8	3	5.7	4	7.6
A2	30.0×13.3	1.7	2	3.4	3	5.1	4	6.8
A3	30.0×14.8	1.5	2	3.0	3	4.5	4	6.0
B1	25.0×11.7	2.2	2	4.4	3	6.6	4	8.8
B2	25.0×13.3	2.0	2	4.0	3	6.0	4	8.0
B3	25.0×14.8	1.8	2	3.6	3	5.4	4	7.2

注: A: 行距 30 cm; B: 行距 25 cm; 1: 株距 11.7 cm; 2: 株距 13.3 cm; 3: 株距 14.8 cm。下同。

Note: A: Row spacing 30 cm; B: Row spacing 25 cm; 1: Plant spacing of 11.7 cm; 2: Plant spacing of 13.3 cm; 3: Plant spacing of 14.8 cm. The same as below.

2012 年以甬优 2640、武运粳 24 号和淮稻 5 号为材料,进行大田机插验证试验,行距 25 cm 机插为扬州大学自主研发插秧机,行距 30 cm 机插为洋马 VP6 乘坐式插秧机。试验共选取 3 块大田,面积分别约为 2 600、2 800、2 500 m²,分别种植甬优 2 640、武运粳 24 号和淮稻 5 号,同一块大田 2 种行距机插面积各占一半,株距统一 13.0 cm,每穴 3~4 苗。

1.2.2 田间管理

总施纯氮 300 kg/hm²,基肥:穗肥=6:4,其中基肥和分蘖肥各占 50%,穗肥分 2 次等量施用,氮磷钾配比为 N:P₂O₅:K₂O=1:0.4:0.8,磷肥全作基肥 1 次施用,钾肥分 2 次施用,其中基肥和促花肥各占 50%。

机插时寸水移栽活棵,分蘖期稳定的浅水层灌溉;在有效分蘖临界叶龄的前 1 个叶龄(N-n-1),当茎蘖数达到预期穗数的 80%时,开始排水搁田,轻搁、多搁;拔节至成熟期实行湿润灌溉;收获前 5~7 d 断水。病、虫、草害按当地大面积生产统一实施。

1.3 测定内容与方法

1.3.1 干物质和叶面积

分别于拔节期、抽穗期、成熟期,按每小区茎蘖数的平均数取代表性植株 3 穴,105℃下杀青 30 min,80℃下烘干至质量恒定,测定各器官干物质质量,并采用比重法测定叶面积。在抽穗期测定叶面积时,将叶面积分为总叶面积(所有茎蘖的叶面积)、有效叶面积(有效茎蘖的叶面积)和高效

叶面积 (有效茎蘖顶 3 叶的叶面积)。

1.3.2 计产

成熟期采用五点法每小区普查 50 穴, 大田普查 250 穴, 计算有效穗数, 并根据平均成穗数取 5 穴调查每穗粒数、结实率, 测定千粒重, 计算理论产量, 并实收核产。

1.4 数据计算和统计分析

$$LARPT = \text{有效 LAI} / \text{最大 LAI} \times 100 \quad (1)$$

式中, $LARPT$ 为有效叶面积率, %。

$$LARFT = \text{高效 LAI} / \text{最大 LAI} \times 100 \quad (2)$$

式中, $LARFT$ 为高效叶面积率, %;

$$SLA = \text{总颖花数} / \text{抽穗期叶面积} \quad (3)$$

式中, SLA 为粒叶比, spikelet/cm²。

$$PP = 1/2(L_1 + L_2) \times (t_2 - t_1) \quad (4)$$

式中, PP 为光合势, 10⁴ m²·d/hm²; L_1 和 L_2 为前后 2 次测定的叶面积, t_1 和 t_2 为前后 2 次测定的时间, d。

$$DRLA = (LAI_2 - LAI_1) / (t_2 - t_1) \quad (5)$$

式中, $DRLA$ 为叶面积衰减率, LAI/d; LAI_1 和 LAI_2 为前后 2 次测定的叶面积指数。

$$CGR = (W_2 - W_1) / (t_2 - t_1) \quad (6)$$

式中, CGR 为群体生长率, g/(m²·d); W_1 和 W_2 为前后 2 次测定的干物质质量, g; t_1 和 t_2 为前后 2 次

测定的时间, d。

$$NAR = [(\ln LAI_2 - \ln LAI_1) / (LAI_2 - LAI_1) \times (W_2 - W_1) / (t_2 - t_1)] \quad (7)$$

式中, NAR 为净同化率, g/(m²·d)。

采用 Microsoft Excel 2003 进行数据的录入和计算, 运用 SPSS 软件进行统计分析。由于 2 a 试验结果趋势一致, 本文数据以 2 a 试验结果的平均值进行分析。

2 结果与分析

2.1 产量构成特征

由表 2 可知, 2 a 机插稻平均产量大穗型最高, 中穗型其次, 小穗型最低。对大穗型品种而言, A (行距 30 cm 机插) 处理较 B 处理 (行距 25 cm 机插) 表现增产优势, 2 a 分别增产 6.72% 和 6.49%, 随着株距增加, A 和 B 处理内水稻产量显著增加 ($P < 0.05$); 中穗型 2 种行距机插 2 a 平均产量相当, 随着株距增加, A 处理内水稻产量呈先增后减, B 处理内水稻产量显著增加 ($P < 0.05$); 小穗型品种 B 处理比 A 处理 2 a 分别增产 5.70% 和 4.85%, 随着株距增加, A 和 B 处理内水稻产量呈递减。

表 2 不同穗型品种机插稻产量及其构成因素

Table 2 Yield and its components of different panicle types in mechanical transplanted rice

品种类型 Variety type	处理 Treatment	穗数 Panicles ($\times 10^4$ hm ⁻²)	每穗粒数 Grains per panicle	群体颖花量 Population spikelets ($\times 10^4$ hm ⁻²)	结实率 Filled-grain percentage/%	千粒重 1000-grain weight/g	2011 年实产 Yield of 2011 (t·hm ⁻²)	2012 年实产 Yield of 2012 (t·hm ⁻²)
大穗型 Large panicle-type variety	A1	267.24BCc	188.05CDd	49839.82Cd	89.32Aab	27.28Aa	11.71Ccd	11.85Ccd
	A2	260.94Cd	202.97Bb	52391.84Bb	89.81Aa	27.05Aa	12.39Bb	12.44Bb
	A3	246.75De	224.32Aa	54990.68Aa	90.01Aa	27.32Aa	13.04Aa	13.11Aa
	B1	285.00Aa	170.78Ef	48335.37De	88.85Ab	27.07Aa	11.25De	11.32De
	B2	273.00Bb	181.89De	49291.11CDd	89.57Aa	27.03Aa	11.61CDd	11.67CDd
	B3	264.15Cc	195.17BCc	51293.71BCc	89.56Aa	27.24Aa	11.93BCc	12.14BCbc
	A	258.31Bb	205.11Aa	52407.45Aa	89.72Aa	27.22Aa	12.38Aa	12.47Aa
	B	274.05Aa	182.61Bb	49640.06Bb	89.32Aa	27.11Aa	11.60Bb	11.71Bb
	A1	348.32Cc	119.60BCc	41648.82BCbc	95.18Aa	27.49Aa	10.60BCbc	10.59BCbc
	A2	329.66Dd	128.39Aab	42286.94ABb	95.70Aa	27.60Aa	10.87ABb	10.88ABab
中穗型 Medium panicle-type variety	A3	308.25Ee	132.57Aa	40845.61Ccd	95.62Aa	27.43Aa	10.47Ccd	10.39Ccd
	B1	383.90Aa	105.09Dd	40295.32Cd	94.85Aa	27.34Aa	10.14Cd	10.15Cd
	B2	368.50Bb	114.82Cc	42197.73ABb	95.26Aa	27.35Aa	10.81ABb	10.68ABb
	B3	346.26Cc	126.01ABb	43563.45Aa	95.24Aa	27.45Aa	11.23Aa	11.17Aa
	A	328.74Bb	126.85Aa	41593.79Aa	95.50Aa	27.50Aa	10.64Aa	10.62Aa
	B	366.22Aa	115.31Bb	42018.83Aa	95.12Aa	27.38Aa	10.73Aa	10.67Aa
小穗型 Small panicle-type variety	A1	394.25BCc	95.09Bb	37495.98BCc	97.12Aa	27.41Aa	9.68BCbc	9.72ABab
	A2	367.40De	100.51ABa	36916.50Cd	96.67Aa	27.38Aa	9.47Ccd	9.48BCbc
	A3	345.75Ef	103.89Aa	35914.26Ce	96.83Aa	27.45Aa	9.25Cd	9.28Cc
	B1	430.92Aa	91.49Bc	39426.17Aa	96.99Aa	27.24Aa	10.27Aa	10.22Aa
	B2	402.15Bb	95.42Bb	38373.81ABb	96.70Aa	27.54Aa	9.96ABa	9.95ABab
	B3	384.30Cd	100.48ABa	38614.42ABb	96.26Aa	27.20Aa	9.82ABab	9.68ABb
	A	369.13Bb	99.83Aa	36775.58Bb	96.88Aa	27.42Aa	9.47Bb	9.49Bb
	B	405.79Aa	95.80Ab	38804.80Aa	96.65Aa	27.33Aa	10.01Aa	9.95Aa

注: 穗数、每穗粒数、群体颖花量、结实率、千粒重为 2011 和 2012 年平均值; 大、小写字母分别表示 1% 和 5% 差异显著水平。下同。

Note: Panicles, grains per panicle, population spikelets, filled-grain percentage, 1000-grain weight were the mean in 2011 and 2012; Values followed by different letters within the same column are significantly different at 1% and 5% probability levels, respectively. The same as below.

就产量构成因素而言,大穗型群体颖花量 A 处理比 B 处理高出 5.57%,随着株距增加,A 和 B 处理内显著增加 ($P<0.05$);中穗型群体颖花量 A 与 B 处理相当,随着株距增加,A 处理内呈先增后减,B 处理内显著增加 ($P<0.05$);小穗型群体颖花量 A 处理比 B 处理减少 5.23%。对颖花量构成因素进一步分析,3 种穗型品种穗数 A 处理比 B 处理分别减少 5.74%、10.23%和 9.03%,每穗粒数分别增加 12.32%、10.01%和 4.21%,随着株距增加,A 和 B 处理内穗数显著减少,每穗粒数大、中穗型显著增加 ($P<0.05$)。而 3 种穗型品种结实率和千粒重 A 处理高于 B 处理,但差异不显著。

说明大穗型行距 30 cm 机插,扩大株距,利于形成大穗;小穗型行距 25 cm 机插,适当缩小株距,提高基本苗,形成足穗而高产;而中穗型品种 2 种

行距机插产量相当,但行距 25 cm 机插提高了群体基本苗,增加用种量,相对降低机械工效,且行距 30 cm 机插通风透光条件优于行距 25 cm 机插,利于提高千粒重和结实率,综合来看,中穗型更适宜采用行距 30 cm 机插。

2.2 光合物质生产特征

2.2.1 叶面积指数和抽穗期叶面积组成

由表 3 可知,拔节期,大、中穗型叶面积指数 A 与 B 处理差异不显著;小穗型 A 处理极显著低于 B 处理 ($P<0.01$),随着株距增加,A 和 B 处理内 LAI 呈递减。抽穗期和成熟期,大穗型叶面积指数 A 处理比 B 处理分别大 3.28%和 8.41%,A 和 B 处理内 LAI 随着株距增加而增加;中穗型 A 与 B 处理相当;小穗型叶面积指数 A 处理比 B 处理分别小 4.43%和 11.7%,A 和 B 处理内 LAI 随株距增加而减小。

表 3 不同穗型品种机插稻叶面积指数和抽穗期叶面积组成

Table 3 Leaf area index and leaf area composition at heading of different panicle type in mechanical transplanted rice

品种类型 Variety type	处理 Treatment	叶面积指数 Leaf area index			抽穗期叶面积组成 Leaf area composition at heading			
		拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity	有效叶面积率 Leaf area rate of productive tillers/%	高效叶面积率 Leaf area rate of flag leaf to 3rd leaf from top of productive tillers/%	粒叶比 Spikelet per cm ² leaf area /(Spikelet·cm ⁻²)	叶面积衰减率 Decreasing rate of leaf area/(LAI·d ⁻¹)
大穗型 Large panicle-type variety	A1	4.34Aab	7.68BCc	4.36Bbc	95.12Ab	71.35ABb	0.641ABb	0.0562Bc
	A2	4.27ABbc	7.81Bb	4.49Bb	95.35Ab	72.19Aa	0.681Aab	0.0563Bc
	A3	4.18Bc	8.11Aa	4.67Aa	96.23Aa	72.84Aa	0.742Aa	0.0583ABb
	B1	4.42Aa	7.45Dd	4.03Cd	93.35Bc	68.24Ce	0.610Bc	0.0580ABb
	B2	4.32Aab	7.62Cc	4.15Cd	93.14Bc	69.43BCd	0.629Bbc	0.0588Aa
	B3	4.23ABbc	7.79Bb	4.31BC _c	94.52ABb	70.25Bc	0.661ABb	0.0589Aa
	A	4.26Aa	7.87Aa	4.51Aa	95.57Aa	72.13Aa	0.688Aa	0.0569Ab
	B	4.32Aa	7.62Bb	4.16Bb	93.67Bb	69.31Bb	0.633Ab	0.0586Aa
中穗型 Medium panicle-type variety	A1	4.22ABb	7.60ABb	3.56Bb	94.24Bb	72.34Bc	0.563Aab	0.0709Aa
	A2	4.27Aab	7.83Aa	3.99Aa	95.49Aa	73.26Ab	0.585Aa	0.0673Bc
	A3	4.02Bc	7.27Cc	3.20Ce	95.34Aa	73.98Aa	0.579Aa	0.0713Aa
	B1	4.40Aa	7.43Cc	3.46Cd	93.15Cc	71.36Cd	0.541Ab	0.0696ABb
	B2	4.29Aab	7.68Bb	3.59BC _c	94.54Bb	72.15Bc	0.570Aab	0.0717Aa
	B3	4.21ABb	7.82Aa	3.89Aa	95.62Aa	73.18ABb	0.596Aa	0.0689ABb
	A	4.17Aa	7.56Aa	3.58Aa	95.02Aa	73.19Aa	0.576Aa	0.0699Aa
	B	4.30Aa	7.64Aa	3.65Aa	94.44Ab	72.23Ab	0.569Aa	0.0701Aa
小穗型 Small panicle-type variety	A1	4.10ABc	7.60ABb	3.51Bc	96.25ABbc	73.06Bc	0.519Aab	0.0704Aa
	A2	4.01Bc	7.37Ce	3.30Cd	96.84ABb	74.01Ab	0.505ABc	0.0701Aa
	A3	3.79Cd	7.02Dd	3.13Ce	97.23Aa	74.82Aa	0.497Bc	0.0670Bc
	B1	4.39Aa	7.79Aa	3.88Aa	95.12Bd	73.26Bc	0.523Aa	0.0674Bc
	B2	4.20Ab	7.68ABb	3.73AB _b	95.36Bd	73.98ABb	0.513Ab	0.0680ABb
	B3	4.11ABc	7.53Bc	3.66Bb	96.14Bc	74.26Aab	0.519Aab	0.0667Bc
	A	3.97Bb	7.33Bb	3.32Bb	95.77Aa	73.96Aa	0.507Bb	0.0692Aa
	B	4.24Aa	7.67Aa	3.76Aa	95.54Aa	73.83Aa	0.520Aa	0.0674Ab

抽穗期叶系组成决定着水稻群体质量的优劣和生育后期光合物质生产。分析表 3 可知,有效叶面积率和高效叶面积率,大穗型 A 处理极显著高于 B 处理 ($P<0.01$),中穗型 A 处理显著高于 B 处理 ($P<0.05$),小穗型 A 与 B 处理相当,随着株

距增加,3 种穗型 A 和 B 处理内有效叶面积率和高效叶面积率有增加趋势。大穗型粒叶比 A 处理显著高于 B 处理 ($P<0.05$),A 和 B 处理内粒叶比随着株距增加而增加;中穗型粒叶比 A 与 B 处理相当;小穗型粒叶比 A 处理极显著低于 B 处理 ($P<0.01$)。

大穗型叶面积衰减率 A 处理显著低于 B 处理 ($P<0.05$)，随着株距增加而增加；中穗型叶面积衰减率相当；小穗型叶面积衰减率 A 处理显著高于 B 处理 ($P<0.05$)。

2.2.2 光合势

由表 4 可知，播种期至拔节期，大、中和小穗型光合势表现为 A 处理小于 B 处理，小穗型 A 与 B 处理差异达显著水平 ($P<0.05$)。拔节期至抽穗期，大穗型 A 处理光合势显著大于 B 处理 ($P<0.05$)，A 和 B 处理内光合势随着株距增加而增加；中穗型 A 与 B 处理光合势大小相当；小穗型 A 处理光合势

显著小于 B 处理 ($P<0.05$)，A 和 B 处理内光合势随着株距增加而减小。抽穗期至成熟期，大穗型 A 处理光合势极显著大于 B 处理 ($P<0.01$)，A 和 B 处理内光合势随着株距增加而增加；中穗型 A 处理光合势略小于 B 处理，差异不显著；小穗型 A 处理光合势极显著小于 B 处理 ($P<0.01$)，A 和 B 处理内光合势随着株距增加而递减。总光合势与生育后期光合势变化规律相同，大穗型总光合势 A 处理极显著高于 B 处理 ($P<0.01$)；中穗型总光合势大小相当；小穗型总光合势 A 处理极显著低于 B 处理 ($P<0.01$)。

表 4 不同穗型品种机插稻光合势

Table 4 Photosynthetic potential of different panicle types in mechanical transplanted rice

品种类型 Variety type	处理 Treatment	播种期-拔节期 Sowing-Jointing	拔节期-抽穗期 Jointing-Heading	抽穗期-成熟期 Heading-Maturity	总光合势 Total $\times 10^4 \text{ m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{hm}^{-2}$
大穗型 Large panicle-type variety	A1	126.20Aa	219.60Aab	361.22BCbc	707.02Bbc
	A2	123.98Aab	220.63Aa	368.94Bb	713.55ABb
	A3	121.70Ab	224.48Aa	383.61Aa	729.79Aa
	B1	128.30Aa	216.82Ab	348.88Cd	694.01Cc
	B2	125.35Aa	218.00Ab	358.48Cc	701.83BCc
	B3	122.80Aab	219.47Aab	367.84Bb	710.11ABb
	A	123.96Aa	221.57Aa	371.25Aa	716.79Aa
	B	125.48Aa	218.10Ab	358.40Bb	701.98Bb
	A1	133.85Aa	159.52Aab	317.91Bb	610.27Bb
	A2	135.53Aa	163.31Aa	336.77Aa	634.61Aa
中穗型 Medium panicle-type variety	A3	127.49Ab	152.34Ab	298.40Cc	577.23Cd
	B1	136.55Aa	158.34Aab	304.87Cc	602.75Bc
	B2	133.11Aa	160.20Aa	315.54Bb	611.85Bb
	B3	130.60Aab	161.09Aa	337.22Aa	631.91Aa
	A	132.29Aa	158.39Aa	317.69Aa	608.37Aa
	B	133.42Aa	159.88Aa	319.21Aa	614.50Aa
	A1	127.12Aab	160.81Aab	327.38ABab	615.31ABbc
	A2	124.19Aab	156.32Ab	315.41Bb	595.92Cd
小穗型 Small panicle-type variety	A3	117.45Ab	148.60Ab	298.44Bc	564.50De
	B1	136.10Aa	167.46Aa	336.05Aa	639.61Aa
	B2	130.34Aa	163.31Aab	329.73ABa	623.38ABb
	B3	127.55Aab	160.08Aab	321.61ABb	609.24Bc
	A	122.92Ab	155.25Bb	313.74Bb	591.91Bb
	B	131.33Aa	163.62Aa	329.13Aa	624.08Aa

2.2.3 干物质质量

由表 5 可知，拔节期、抽穗期和成熟期 3 种穗型品种单茎干质量均是 A 处理大于 B 处理，A 和 B 处理内随着株距增加而单茎干质量增加。说明行距 30cm 机插和扩大株距利于形成粗壮茎秆，提高单茎干物质质量。再从群体干质量来看，拔节期 3 种穗型品种群体干质重都是 A 处理小于 B 处理，差异不显著。抽穗期和成熟期，大穗型群体干质重 A 处

理极显著高于 B 处理 ($P<0.01$)，A 和 B 处理内群体干质重随着株距增加而增加；中穗型群体干质重 A 与 B 处理相当，差异不显著；小穗型群体干质重 A 处理显著低于 B 处理 ($P<0.05$)，A 和 B 处理内群体干质重随着株距增加而递减。

不同穗型品种水稻收获指数在 0.499~0.534，大、中穗型收获指数 A 处理大于 B 处理，而小穗型收获指数 A 处理小于 B 处理。

表 5 不同穗型品种机插稻干物质质量和收获指数

Table 5 Dry matter weight and harvest index of different panicle types in mechanical transplanted rice

品种类型 Variety type	处理 Treatment	拔节期 Jointing		抽穗期 Heading		成熟期 Maturity		收获 指数 Harvest index
		群体干质量 Dry matter weight of population (t·hm ⁻²)	单茎干质量 Dry matter weight per stem/g	群体干质量 Dry matter weight of population (t·hm ⁻²)	单茎干质量 Dry matter weight per stem/g	群体干质量 Dry matter weight of population (t·hm ⁻²)	单茎干质量 Dry matter weight per stem/g	
大穗型 Large panicle-type variety	A1	4.69Aa	1.128ABb	12.54Bb	3.894BCc	20.30Cc	6.664Cd	0.506
	A2	4.63Aab	1.173ABb	12.85ABab	4.102Ab	21.08Bb	6.973Bc	0.513
	A3	4.53Abc	1.278Aa	13.15Aa	4.237Aa	21.74Aa	7.556Aa	0.522
	B1	4.89Aa	1.054Bc	12.27Cc	3.745Cd	19.87Dd	6.639Cd	0.499
	B2	4.62Aab	1.175ABb	12.36Cc	3.944Bbc	20.06CDcd	6.987Bc	0.506
	B3	4.47Ac	1.233Aa	12.49BCbc	4.051ABb	20.47Cc	7.380Ab	0.516
	A	4.62Aa	1.193Aa	12.85Aa	4.078Aa	21.04Aa	7.064Aa	0.514
	B	4.66Aa	1.154Aa	12.37Bb	3.913Ab	20.13Bb	7.002Ab	0.507
中穗型 Medium panicle-type variety	A1	4.14ABa	1.036Bc	11.11ABb	2.967Bc	18.09BCc	4.680BCc	0.509
	A2	3.95ABb	1.181ABb	11.19ABb	3.134ABb	18.33Bb	4.815Bb	0.516
	A3	3.73Bc	1.239Aa	10.82Bc	3.247Aa	17.77Cd	5.201Aa	0.510
	B1	4.25Aa	1.030Bc	11.58Aa	2.886Bd	18.68Aa	4.382Ce	0.465
	B2	4.01ABab	1.140ABb	11.17ABb	3.064Bc	18.38Bb	4.544Cd	0.505
	B3	3.78Bb	1.233Aa	10.96Bbc	3.138ABb	18.08BCc	4.750BCbc	0.534
	A	3.94Aa	1.152Aa	11.04Aa	3.116Aa	18.06Aa	4.899Aa	0.512
	B	4.01Aa	1.134Aa	11.24Aa	3.029Ab	18.38Aa	4.559Ab	0.501
小穗型 Small panicle-type variety	A1	3.70Aab	0.967BCc	10.04Bb	2.178BCc	16.51ABbc	3.922Cd	0.512
	A2	3.63Aab	1.064Bb	9.94Bbc	2.316ABb	16.15BCd	4.281Bc	0.510
	A3	3.49Ab	1.252Aa	9.79Bc	2.471Aa	15.88Cd	4.629Aa	0.509
	B1	3.89Aa	0.872Cc	10.28Aa	2.048Cd	16.95Aa	3.844Cd	0.521
	B2	3.81Aa	1.082Bb	10.16ABab	2.233Bbc	16.72ABb	4.382Bc	0.513
	B3	3.69Aab	1.153ABb	10.05Bb	2.417Aa	16.56Bcd	4.463ABb	0.514
	A	3.61Aa	1.094Aa	9.92Ab	2.322Aa	16.18Bb	4.277Aa	0.510
	B	3.80Aa	1.036Ab	10.16Aa	2.233Ab	16.74Aa	4.230Ab	0.516

2.2.4 阶段物质积累及其比例

由表 6 可知,播种期至拔节期,大、中和小穗型物质积累量都是 A 处理小于 B 处理,差异不显著。拔节期至抽穗期,大穗型物质积累量 A 处理极显著高于 B 处理 ($P<0.01$),其积累比例 A 处理大于 B 处理, A 和 B 处理内物质积累量随着株距增加而增加;中穗型物质积累量及其积累比例 A 与 B 处理相当;小穗型物质积累量 A 处理显著低于 B 处理 ($P<0.05$),随着株距增加, A 和 B 处理内物质积累量呈递减。抽穗期至成熟期,大穗型物质积累 A 处理极显著高于 B 处理 ($P<0.01$),其积累比例 A 处理大于 B 处理,随着株距增加, A 和 B 处理内物质积累量呈递增;中穗型物质积累量 A 处理低于 B 处理,差异不显著;小穗型物质积累量 A 处理显著低于 B 处理 ($P<0.05$),其积累比例 A 处理小于 B 处理,随着株距增加, A 和 B 处理内物质积累量呈递减。

2.2.5 群体生长率和净同化率

群体生长率反映干物质的日生产量,是描述群体生产速率的重要指标。由表 7 可知,播种期至拔节期,大、中和小穗型群体生长率 A 与 B 处理差异不显著。拔节期至抽穗期,大穗型群体生长率 A 处理极显著高于 B 处理 ($P<0.01$), A 和 B 处理内群体生长率随着株距增加而增加;中穗型群体生长率 A 与 B 处理相当;小穗型群体生长率 A 处理极显著低于 B 处理 ($P<0.01$), A 和 B 处理内群体生长率随着株距增加而减少。抽穗期至成熟期,大穗型群体生长率 A 处理显著高于 B 处理 ($P<0.05$),随着株距增加, A 和 B 处理内群体生长率呈递增;中穗型群体生长率 A 处理略低于 B 处理,差异不显著;小穗型群体生长率 A 处理极显著低于 B 处理 ($P<0.01$),随着株距增加, A 和 B 处理内群体生长率呈递减。

表 6 不同穗型品种机插稻主要生育阶段物质积累量及其比例

Table 6 Key growth period dry matter accumulation and its rate of different panicle type in mechanical transplanted rice

品种类型 Variety type	处理 Treatment	播种期-拔节期	Sowing-Jointing	拔节期-抽穗期	Jointing-Heading	抽穗期-成熟期	Heading-Maturity
		物质积累量 Dry matter accumulation /(t·hm ⁻²)	比例 Ratio to total/%	物质积累量 Dry matter accumulation /(t·hm ⁻²)	比例 Ratio to total/%	物质积累量 Dry matter Accumulation /(t·hm ⁻²)	比例 Ratio to total/%
大穗型 Large panicle-type variety	A1	4.69Aa	23.14	7.84Bc	38.64	7.76BCcd	38.22
	A2	4.63Aa	21.94	8.22ABb	38.99	8.24ABb	39.07
	A3	4.53Aab	20.82	8.62Aa	39.68	8.59Aa	39.50
	B1	4.89Aa	24.62	7.38Cd	37.15	7.60Cd	38.23
	B2	4.62Aab	23.05	7.74BCcd	38.59	7.70Ccd	38.36
	B3	4.47Ab	21.85	8.02Bbc	39.16	7.98BCbc	38.99
	A	4.62Aa	21.97	8.23Aa	39.10	8.20Aa	38.93
	B	4.66Aa	23.17	7.71Bb	38.30	7.76Bb	38.53
中穗型 Medium panicle-type variety	A1	4.14Aa	22.87	6.97Bb	38.52	6.99Bbc	38.61
	A2	3.95Aab	21.55	7.24Aa	39.51	7.14ABb	38.94
	A3	3.73Ab	20.97	7.09ABb	39.91	6.95Bc	39.12
	B1	4.25Aa	22.40	7.34Aa	38.65	7.39Aa	38.95
	B2	4.01Aab	21.82	7.16ABab	38.96	7.21Aab	39.22
	B3	3.78Ab	20.88	7.18ABab	39.70	7.13ABb	39.42
	A	3.94Aa	21.80	7.10Aa	39.31	7.03Aa	38.89
	B	4.01Aa	21.70	7.23Aa	39.10	7.24Aa	39.20
小穗型 Small panicle-type variety	A1	3.68Aab	22.28	6.36ABb	38.51	6.48ABab	39.24
	A2	3.65Aab	22.60	6.19Bbc	38.32	6.28ABbc	38.88
	A3	3.61Ab	22.73	6.08Bc	38.29	6.15Bc	38.73
	B1	3.71Aa	21.88	6.63Aa	39.11	6.71Aa	39.58
	B2	3.69Aab	22.21	6.48Aab	39.00	6.65Aa	38.82
	B3	3.66Aab	22.37	6.34ABb	38.75	6.46ABab	38.87
	A	3.65Aa	22.54	6.21Ab	38.37	6.30Ab	38.95
	B	3.69Aa	22.15	6.48Aa	38.95	6.61Aa	39.09

表 7 不同穗型品种机插稻群体生长率和净同化率

Table 7 Crop growth rate and net assimilation rate of different panicle type in mechanical transplanted rice

品种类型 Variety type	处理 Treatment	群体生长率 Crop growth rate/(g·m ⁻² ·d ⁻¹)			净同化率 Net assimilation rate/(g·m ⁻² ·d ⁻¹)		
		播种期-拔节期 Sowing-Jointing	拔节期-抽穗期 Jointing-Heading	抽穗期-成熟期 Heading-Maturity	播种期-拔节期 Sowing-Jointing	拔节期-抽穗期 Jointing-Heading	抽穗期-成熟期 Heading-Maturity
大穗型 Large panicle-type variety	A1	8.18Bb	21.94Cc	13.04Cd	2.848Aa	3.937BCc	2.212Bc
	A2	8.05BCbc	22.94Bb	13.84Bb	2.784Aab	4.064Bb	2.359ABb
	A3	7.88Cc	24.05Aa	14.43Aa	2.741ABb	4.283Aa	2.430Aa
	B1	8.52Aa	20.66Ee	12.77De	2.855Aa	3.525Df	2.209Bd
	B2	8.06BCbc	21.67Dd	12.94De	2.703ABb	3.658De	2.206Bd
	B3	7.78Cc	22.46Cc	13.41BCc	2.636Bc	3.838Cd	2.266Bc
	A	8.04Aa	22.98Aa	13.77Aa	2.791Aa	4.095Aa	2.334Aa
	B	8.12Aa	21.60Bb	13.04Ab	2.731Aa	3.674Bb	2.227Bb
中穗型 Medium panicle-type variety	A1	6.56Aa	25.80Cc	12.25Bc	2.199Aa	4.393Bc	2.322ABb
	A2	6.38ABab	26.80ABb	12.52ABb	2.130ABb	4.721Aa	2.373ABb
	A3	5.94Bb	26.25Bb	12.19Bc	2.032Bc	4.227Bd	2.245Bc
	B1	6.58Aa	27.15Aa	12.96Aa	2.203Aa	4.652Ab	2.411Aa
	B2	6.36ABab	26.50Bb	12.64ABb	2.112ABb	4.378Bc	2.344ABb
	B3	5.91Bb	26.58Bb	12.50ABb	2.034Bc	4.343Bc	2.258Bc
	A	6.29Aa	26.28Aa	12.32Aa	2.120Aa	4.447Aa	2.313Aa
	B	6.28Aa	26.74Aa	12.70Aa	2.116Aa	4.458Aa	2.338Aa
小穗型 Small panicle-type variety	A1	6.14Aa	23.03ABa	11.17ABb	2.155Aa	4.172ABb	2.106Aa
	A2	5.95Aab	22.67BCb	10.70Bc	2.084ABb	4.092Bc	2.066ABb
	A3	5.82Ab	22.02Cc	10.49Bd	1.949Bc	4.002Bc	2.005Bc
	B1	6.17Aa	23.23Aa	11.50Aa	2.161Aa	4.267Aa	2.198Aa
	B2	5.92Aab	23.10ABa	11.12ABb	2.068ABb	4.183ABb	2.083ABb
	B3	5.75Ab	22.93Bb	10.87Bc	1.936Bc	4.038Bc	2.032ABc
	A	5.97Aa	22.57Bb	10.79Bb	2.063Aa	4.089Bb	2.059Bb
	B	5.95Aa	23.09Aa	11.16Aa	2.055Aa	4.163Aa	2.104Aa

净同化率是单位叶面积在单位时间内所积累的干物质量,是白天光合生产量与夜间呼吸消耗量的差值。分析表 7 可知,播种期至拔节期,大、中和小穗型净同化率 A 与 B 处理差异不显著。拔节期至抽穗期,大穗型净同化率 A 处理极显著高于 B 处理 ($P<0.01$),随着株距增加, A 和 B 处理内净同化率呈递增;中穗型品净同化率 A 处理略低于 B 处理,差异不显著;小穗型净同化率 A 处理极显著低于 B 处理 ($P<0.01$),随着株距增加, A 和 B 处理内净同化率呈递减。抽穗期至成熟期,大穗型净同化率 A 处理极显著高于 B 处理 ($P<0.01$),随着株距增加, A 处理内净同化率呈递增, B 处理内有增加趋势;中穗型净同化率 A 处理略低于 B 处理,差异不显著;小穗型净同化率 A 处理极显著低于 B 处理 ($P<0.01$),随着株距增加, A 和 B 处理内净同化率呈递减。

2.3 生产性示范验证及其评价

大田验证试验表明(表 8),相同株距条件下,大穗型品种产量行距 30 cm 机插比行距 25 cm 机插高出 7.17%;中穗型和小穗型品种产量行距 25 cm 机插比行距 30 cm 机插分别高出 1.23%和 5.21%,大和小穗型产量差异达极显著水平 ($P<0.01$)。行距 25 cm 机插 3 穗型品种穗数极显著显著增加 ($P<0.01$),每穗粒数显著或极显著减少,结实率和千粒重差异不大。说明大穗型品种需要配套较宽行距,显著增加每穗粒数而高产;中穗型品种配套窄行距,增产优势不显著,且易形成过大群体,增加后期倒伏危险;小穗型品种配套窄行距机插,依靠穗数显著增多而增产。此结果亦佐证小区试验。但自主研发的行距 25 cm 机插存在漏苗,抓秧面积不稳定,工作效率低等问题,还需要进一步改进机械。

表 8 2 种行距机插稻产量及其构成因素

Table 8 Yield and its components of mechanical rice of two row spacing mechanical rice planter

品种 Variety	处理 Treatment	穗数 Panicles ($\times 10^4 \text{hm}^{-2}$)	每穗粒数 Grains per panicle	群体颖花量 Population spikelets ($\times 10^4 \text{hm}^{-2}$)	结实率 Filled-grain percentage/%	千粒重 1000-grain weight/g	理论产量 Theoretical yield ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	实产 Yield ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)
Large panicle-type variety	A	235.81Bb	231.17Aa	54512.20Aa	93.18Aa	25.28Aa	12.84Aa	12.55Aa
	B	253.41Aa	201.33Bb	51019.04Bb	93.07Aa	25.17Aa	11.95Bb	11.71Bb
Medium panicle-type variety	A	330.45Bb	130.56Aa	43143.55Aa	95.16Aa	27.41Aa	11.25Aa	11.01Aa
	B	380.10Aa	116.43Ab	44256.31Aa	94.08Aa	27.28Aa	11.36Aa	11.14Aa
Small panicle-type variety	A	367.20Bb	102.32Aa	37571.90Bb	96.39Aa	27.25Aa	9.87Bb	9.55Bb
	B	417.75Aa	94.53Ab	39489.91Aa	95.62Aa	27.29Aa	10.30Aa	10.05Aa

3 讨论

3.1 不同穗型品种机插稻产量结构及其适宜株行距配置

前人关于不同株行距或移栽密度对机插稻产量的影响进行了较多研究报道,叶厚专等^[9]研究南方双季稻地区不同行距对机插稻产量的影响,发现在相同株距条件下,行距 23.3 和 26.7 cm 机插产量均高于行距 30 cm 机插,早稻产量分别高出 2.32%~4.24%和 4.34%~5.98%,晚稻产量分别高出达 2.00%~3.19%和 3.90%~4.25%。刘强等^[14]研究淮北稻区不同行距机插秧对产量的影响,认为中熟中粳水稻主要靠足穗来夺取高产,而行距过大不利于协调穗粒结构。邢春秋等^[15]、吴雪源^[18]和陈立才等^[24]研究也表明窄行距机插稻比行距 30 cm 机插稻增产。而不同穗型品种机插粳稻适宜株行距配置尚未见系统研究报道。本试验研究表明,机插稻大穗型品种平均产量行距 30 cm 机插显著高于行距 25 cm 机插,中穗型品种 2 行距机插平均产量相当,小穗型品种平均产量行距 25 cm 机插比行距 30 cm 机插

表现出高产,其增产途径不一。机插稻大穗型品种适当稀植,降低密度,减少基本苗,足穗数基础上,增加每穗粒数而高产;中穗型品种需要协调穗数和每穗粒数,配置适宜株行距,移栽密度过大或过小,均不能增产;小穗型品种适当增加移栽密度,提高群体基本苗,稳定每穗粒数基础上,显著增加有效穗数而增产。这与钱银飞^[22]研究结果一致。因此,针对不同穗型品种配置适合的行距插秧机,充分发挥不同穗型品种机插稻产量潜力。即大穗型品种宜用行距 30 cm 机插,小穗型品种宜用行距 25 cm 机插,中穗型行距 25 cm 机插增产不显著,且提高基本苗,增加用种量,减低机械工效,故中穗型品种宜用行距 30 cm 机插。

本研究还表明机插稻平均产量大穗型品种最高,中穗型品种其次,小穗型品种最低。说明大穗型品种产量潜力大,是获得机插稻超高产的关键。但大穗型品种稳产能力比中、小穗型品种差,特别是在超秧龄和晚栽条件下,机插秧苗素质较差,移栽后大田分蘖能力较弱,导致大穗型穗数不足或粒数较少,而中小穗型品种,特别是小

穗品种, 每穗粒数、结实率和千粒重较稳定, 通过采用行距 25 cm 机插, 增加密度, 提高基本苗, 能够获得足量有效穗数而增产稳产。而且在中国南方双季稻地区、江苏中、北部水稻生长季节较紧, 易造成机插稻超秧龄和晚播晚栽, 更适宜行距 25 cm 机插, 增加单位面积穴数, 提高基本苗, 依靠穗数稳产。

3.2 不同株行距条件下不同穗型品种机插稻光合物质生产特征

水稻籽粒产量一部分来自抽穗前贮藏在叶茎鞘而于抽穗后转运到穗部的非结构性碳水化合物, 另一部分来自抽穗后光合物质生产积累, 其中后者占 80%~90%。关于水稻干物质积累与产量的关系, 前人已经围绕不同栽培方式或类型材料(种植方式^[26]、大穗型^[28]、超高产品种^[29]、超级杂交稻^[30]等)进行了大量研究。大多数学者^[25-30]研究认为水稻产量与成熟期干物质质量及拔节至抽穗期和抽穗至成熟期的干物质积累量关系密切, 而与拔节前的干物质积累量及收获指数相关不明显。吴文革等^[31]研究认为超级稻具有显著的物质生产与积累优势, 产量随成熟期物质积累量的增加而提高, 特别是生育中、后期物质生产积累高。杨从党等^[32]研究高产粳稻品种的物质生长特性时认为, 品种间生物产量的差异主要出现在抽穗以后, 生物产量高的品种, 籽粒产量也高, 两者的相关性达极显著($r=0.9579^{**}$)。本试验研究结果表明不同株行距条件下不同穗型品种机插稻产量与成熟期干物质质量($r=0.978^{**}$)、抽穗至成熟期干物质积累量($r=0.994^{**}$)和拔节至抽穗期干物质积累量($r=0.983^{**}$)呈极显著正相关关系, 与拔节前干物质积累量($r=0.287$)和经济系数($r=0.198$)相关不显著。这与李杰^[26]和吴文革^[31]的研究结果一致。大穗型品种群体干物质积累表现为生育前期行距 25 cm 机插大于行距 30 cm 机插, 随着株距增加而减少, 生育中、后期行距 30 cm 机插大于行距 25 cm 机插, 随着株距增加而增加; 中穗型行距 30 cm 各生育阶段物质积累均略小于行距 25 cm 机插, 但行距 30 cm 机插收获指数大于行距 25 cm 机插; 小穗型群体干物质积累全生育期表现为行距 25 cm 机插大于行距 30 cm 机插, 随着移栽密度增加而增加。说明大穗型品种行距 30 cm 机插生育前期物质积累量相对较小, 而生育中、后期物质积累高, 这可能是行距 30 cm 机插生育中期群体质量优, 生育后期光合势、群体生长率和净同化率高, 从而显著提高生育中后期物质积累量; 中穗型品种行距 30 cm 机插物质积累略低, 但收获指数较高, 这可能由于行距 30 cm 机插通风透光条件优, 利于干物质向籽粒充实。小穗型品种行距 25 cm 机

插各个生育阶段物质积累均有一定优势, 这可能是品种株型紧凑和叶片小而挺拔, 群体叶面积较大, 充分利用光照, 提高了光合利用效率, 进而积累较多干物质。

本试验还观察到机插株行距对不同穗型粳稻品种株型、冠层配置, 抗倒伏能力也存在显著影响, 特别是增加移栽密度和提高基本苗, 形成较大群体, 易发生倒伏, 是否根据品种倒伏指数来确定适宜株行距, 还有待深入研究。

4 结 论

大穗型品种宜采用行距 30 cm 机插, 依靠增加每穗粒数而高产, 较行距 25 cm 机插增产 6.49%~6.72%; 中穗型品种宜采用行距 30 cm 机插, 协调穗粒结构, 提高结实率和千粒重而稳产高产; 小穗型品种宜采用行距 25 cm 机插, 依靠有效穗数显著增多而增产, 较行距 30 cm 机插增产 4.85%~5.70%。大穗型品种行距 30 cm 机插生育前期物质积累量少, 抽穗期有效叶面积率和高效叶面积率高, 粒叶比高, 叶面积衰减率低, 生育中后期形成较大光合势、群体生长率和净同化率的高积累群体; 中穗型品种行距 30 cm 机插生物学产量略低, 但收获指数高, 且 2 种行距机插叶面积指数、光合势、群体生长率和净同化率大小相当; 小穗型品种行距 25 cm 机插具有叶面积指数大, 粒叶比高, 叶面积衰减率低, 生育中后期物质积累量光合势、群体生长率和净同化率群体生长率、净同化率、物质积累量均较高。

[参 考 文 献]

- [1] 朱德峰, 陈惠哲. 水稻机插秧发展与粮食安全[J]. 中国稻米, 2009(6): 4—7.
Zhu Defeng, Chen Huizhe. The development of machine transplanted rice and food security[J]. China Rice, 2009(6): 4—7. (in Chinese with English abstract)
- [2] 陆为农. 水稻生产机械化发展现状及展望[J]. 农机科技推广, 2006(2): 13—16.
Lu Weinong. Progress and development of mechanical rice production[J]. Agriculture Machinery Technology Extension, 2006(2): 13—16. (in Chinese with English abstract)
- [3] 吴崇友, 金诚谦, 卢晏. 我国水稻种植机械发展问题探讨[J]. 农业工程学报, 2000, 16(2): 21—23.
Wu Chongyou, Jin Chengqian, Lu Yan. Discussion of developing rice planting machine in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2000, 16(4): 7—10. (in Chinese with English abstract)

- [4] 朱德峰, 陈惠哲, 徐一成. 我国水稻种植机械化的发展前景与对策[J]. 北方水稻, 2007(5): 13—18.
Zhu Defeng, Chen Huizhe, Xu Yicheng. Countermeasure and perspective of mechanization of rice planting in China[J]. North Rice, 2007(5): 13—18. (in Chinese with English abstract)
- [5] 牛盾. 我国农业机械化的新形势和水稻生产机械化问题[J]. 农业工程学报, 2000, 16(4): 7—10.
Niu Dun. New situation of agricultural mechanization and the development of paddy production mechanization in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2000, 16(4): 7—10. (in Chinese with English abstract)
- [6] 于林惠, 李刚华, 徐晶晶, 等. 基于高产示范方的机插水稻群体特征研究[J]. 中国水稻科学, 2012, 26(4): 451—456.
Yu Linhui, Li Ganghua, Xu Jingjing, et al. Population characteristics of machine-transplanted japonica rice based on high-yield demonstration fields[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2012, 26(4): 451—456. (in Chinese with English abstract)
- [7] 张洪程, 赵品恒, 孙英菊, 等. 机插杂交粳稻超高产形成群体特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 39—44.
Zhang Hongcheng, Zhao Pinheng, Sun Yingju, et al. Population characteristics of super high yield formation of mechanical transplanted japonica hybrid rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(2): 39—44. (in Chinese with English abstract)
- [8] 高连兴, 赵秀荣. 机械化移栽方式对水稻产量及主要性状的影响[J]. 农业工程学报, 2002, 18(5): 45—48.
Gao Lianxing, Zhao Xiurong. Effect of mechanized transplanting methods on rice yield and rice Population growth trends[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2002 18(5): 45—48. (in Chinese with English abstract)
- [9] 叶厚专, 李艳大, 沈显华, 等. 不同机插行距对水稻产量的影响[J]. 中国农机化, 2012(4): 59—62.
Ye Houzhuang, Li Yanda, Shen Xianhua, et al. Effects of different machine-transplanted row spacing on rice yield[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2012(4): 59—62. (in Chinese with English abstract)
- [10] 马振国, 潘九明. 水稻插秧机行距问题探索[J]. 江苏农机化, 2012(3): 49.
Ma Zhengguo, Pan Jiuming. Explore on problem of row spacing of mechanical rice[J]. Jiangsu Agricultural Mechanization, 2012(3): 49. (in Chinese with English abstract)
- [11] 沈才标, 王驾清, 孙祖高, 等. 水稻窄行插秧机的引进示范[J]. 上海农业科技, 2012(2): 51—52.
Shen Caibiao, Wang Jiaqing, Sun Zugao, et al. Demonstration of narrow spacing of mechanical rice[J]. Shanghai Agriculture Science and Technology, 2012(2): 51—52. (in Chinese with English abstract)
- [12] 陈俊义, 杨东平, 吴国良, 等. 杂粳“常优 1 号”机插超高产栽培技术[J]. 上海农业科技, 2007(3): 30—31.
Chen Junyi, Yang Dongping, Wu Guoliang, et al. Technology of super-high-yielding of mechanical transplanted hybrid japonica rice of changyou 1[J]. Shanghai Agriculture Science and Technology, 2007(3): 30—31. (in Chinese with English abstract)
- [13] 黄大山. 播期、播量和移栽密度对宁粳 1 号机插稻产量形成及氮素吸收利用的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2008.
Huang Dashan. Effects of Sowing Date, Sowing Rate and Transplanting Density on The Yield Formation and Nitrogen Absorption of Mechanical Transplanting Rice Nanjing 1[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [14] 刘强, 杨波, 段瑞华, 等. 淮北稻区不同行距机插秧对产量影响的研究[J]. 现代农业科技, 2010(4): 83—84.
Liu Qiang, Yang Bo, Duan Ruihua, et al. Study on effect of yield of different row spacing mechanical rice in Huaibei region[J]. Modern Agricultural Sciences and Technology, 2010(4): 83—84. (in Chinese with English abstract)
- [15] 邢春秋, 付有权, 闫彬. 浅谈水稻八行与六行插秧机应用效果[J]. 垦殖与稻作, 2006(5): 74—75.
Xing Chunqiu, Fu Youquan, Yan Bing. Effect on eight and six row spacing of mechanical transplanting rice[J]. Reclaim and Rice Cultivate, 2006(5): 74—75. (in Chinese with English abstract)
- [16] 李世峰, 刘蓉蓉, 吴九林. 不同播量与移栽密度对机插水稻产量形成的影响[J]. 作物杂志, 2008(1): 71—73.
Li Shifeng, Liu Rongrong, Wu Jiulin. Effects of different sowing rates and transplanting densities on yield formation of machine-transplanted rice[J]. Crops, 2008(1): 71—73. (in Chinese with English abstract)
- [17] 彭长青, 李世峰, 卞新民, 等. 机插水稻精确定量栽培调控技术研究[J]. 上海农业学报, 2006, 22(1): 20—24.
Peng Changqing, Li Shifeng, Bian Xinming, et al. Study on quantitative planting practice of machine-transplanted rice[J]. Acta Agriculture Shanghai, 2006, 22(1): 20—24. (in Chinese with English abstract)
- [18] 吴雪源, 王依明. 不同机插密度对水稻产量的影响试验简报[J]. 上海农业科技, 2012(3): 47—50.

- Wu Xueyuan, Wang Yiming. Bulletin effect on yield of different density of mechanical rice[J]. Shanghai Agriculture Science and Technology, 2012(3): 47—50. (in Chinese with English abstract)
- [19] Akita K, Tanaka N. Effects of planting density and planting patterns of young seedlings transplanting on the growth and yield of rice plants[J]. Jpn J Crop Sci, 1992, 61: 80—86.
- [20] 钱银飞. 不同穗型水稻品种机插规格的综合研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2009.
- Qian Yinfei. Studies on Effect of Transplanting Pattern on Different Panicle Type Mechanical Transplanted Rice[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [21] 李刚华, 于林惠, 侯朋福, 等. 机插水稻适宜基本苗定量参数的获取与验证[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 98—104.
- Li Ganghua, Yu Linhui, Hou Pengfu, et al. Calculation and verification of quantitative parameters of optimal planting density of machine-transplant rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(8): 98—104. (in Chinese with English abstract)
- [22] 谢成林, 王曙光, 王汝利, 等. 不同类型粳稻品种机插产量表现及高产途径研究[J]. 江苏农业科学, 2009(3): 57—59.
- Xie Chenglin, Wang Shuguang, Wang Ruli, et al. Study on yield and approach of high-yield in different panical types of mechanical transplanted japonica rice[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2009(3): 57—59. (in Chinese with English abstract)
- [23] 钱银飞, 张洪程, 吴文革, 等. 机插穴苗数对不同穗型粳稻品种产量及品质的影响[J]. 作物学报, 2009, 35(9): 1689—1707.
- Qian Yinfei, Zhang Hongcheng, Wu Wenge, et al. Effects of seedlings number per hill on grain yield and quality in different panicle types of mechanical transplanted japonica rice [J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(9): 1689—1707. (in Chinese with English abstract)
- [24] 陈立才, 叶厚专, 舒时富. 8 寸行距插秧机的研制与应用[C]// 2012 年中国作物学会学术年会论文摘要集, 2012: 28.
- Chen Licai, Ye Houzhuan, Shu Shifu. Research and application of mechanical transplanted rice of eight cun row spacing[C]// Abstract of Crop Academic Conference in 2012: 28. (in Chinese with English abstract)
- [25] 凌启鸿. 作物群体质量[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2000: 44—107.
- [26] 李杰, 张洪程, 常勇, 等. 不同种植方式水稻高产栽培条件下的光合物质生产特征研究[J]. 作物学报, 2011, 37(7): 1235—1248.
- Li Jie, Zhang Hongcheng, Chang Yong, et al. Characteristics of photosynthesis and matter production of rice with different planting methods under high-yielding cultivation condition[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(7): 1235—1248. (in Chinese with English abstract)
- [27] Ying Jifeng, Peng Shaobing, He Qingrui, et al. Comparison of high-yield rice in tropical and subtropical environments I. Determinants of grain and dry matter yields[J]. Field Crops Res, 1998, 57: 71—84.
- [28] 戚昌翰, 贺浩华, 石庆华, 等. 大穗型水稻的物质生产特性与产量能力的研究[J]. 作物学报, 1986, 12(2): 121—127.
- Qi Changhan, He Haohua, Shi Qinghua, et al. Studies on the relationship between the characteristics of the dry matter production and yield potential in the large-panicle type rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 1986, 12(2): 121—127. (in Chinese with English abstract)
- [29] 杨惠杰, 李义珍, 杨仁崔, 等. 超高产水稻干物质生产特性研究[J]. 中国水稻科学, 2001, 15(4): 265—270.
- Yang Huijie, Li Yizhen, Yang Rencui, et al. Dry matter production characteristics of super high yielding rice[J]. Chin J Rice Sci, 2001, 15(4): 265—270. (in Chinese with English abstract)
- [30] San-oh Y, Mano Y, Ookawa T, et al. Comparison of dry matter production and associated characteristics between direct-sown and transplanted rice plants in a submerged paddy field and relationships to planting patterns[J]. Field Crops Res, 2004, 87: 43—58.
- [31] 吴文革, 张洪程, 钱银飞, 等. 超级杂交中籼水稻物质生产特性分析[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(3): 287—293.
- Wu Wenge, Zhang hongcheng, Qian Yinfei, et al. Analysis on dry matter production characteristics of middle-season indica super hybridrice[J]. Chin J Rice Sci, 2007, 21(3): 287—293. (in Chinese with English abstract)
- [32] 杨从党, 周能, 袁平荣, 等. 高产水稻品种的物质生长特性[J]. 西南农业学报, 1998(增刊 3): 89—94.
- Yang Congdang, Zhou Neng, Yuan Pingrong, et al. Analysis of dry matter production in high-yielding rice cultivars[J]. Southwest China journal of Agricultural Sciences, 1998(Suppl.3): 89—94. (in Chinese with English abstract)

Suitable spacing in and between rows of plants by machinery improves yield of different panicle type japonica rices

Hu Yajie¹, Xing Zhipeng¹, Gong Jinlong¹, Zhang Hongcheng^{1*}, Dai Qigen¹, Huo Zhongyang¹, Xu Ke¹, Wei Haiyan¹, Li Dejian², Sha Anqin², Zhou Youyan², Liu Guolin², Lu Xiujun², Liu Guotao¹, Zhu Jiawei¹

(1. Innovation Center of Rice Cultivation Technology in the Yangtze Valley, Ministry of Agriculture/Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2. Bureau of Agriculture of Xinghua County of Jiangsu Province, Xinghua 225700, China)

Abstract: Mechanical transplanted rice had many advantages, such as stabilizing yield, saving cost, maintaining high efficiency and freeing labor, and its area was larger and larger in China in recent years. It was reported that the existing row-spacing of mechanical transplanted rice was too big in some rice cultivars with small panicle. Therefore, three panicle types of rice cultivars including large panicle type (LPT include yongyou 2640 and yongyou 8) and medium panicle type (MPT include wuyunjing 24, ningjing 3) and small panicle type (SPT include huaidao 5, huaidao 10) were grown in the field in 2011 and 2012 to investigate the reasonable row-plant spacing of each type of cultivars, the characteristics of dry matter production and the rules of yield formation in mechanical transplanted rice. And the effect of row-plant spacing on grain yield and yield components, leaf area index (LAI), photosynthetic potential (PP), dry matter production and accumulation, crop growth rate (CGR) and net assimilation rate (NAR) were all studied. Results showed that with 30cm row-spacing and expanded plant spacing, it is easy for LPT to obtain high yield due to the larger size of panicle. For MPT, There was no significant difference in grain yield between RS30 (row-spacing of 30cm in mechanical transplanted japonica rice) and RS25 (row-spacing of 25 cm in mechanical transplanted japonica rice), but RS30 had higher yield potential because of well wind and light conditions which may improve filled-grain percentage and 1000-grain weight. For SPT, RS25 was conducive to increase the basic seedlings, and with stable spikelets per panicle, it will obtain high yield because of the significant increase of panicles per unit area. With plant-spacing increased, panicles per unite area of different varieties decreased while spikelets per panicle increased significantly. The filled-grain percentage and 1000-grain weight of RS30 were all higher than that of RS25. With RS30, LPT had higher LAI at heading and maturity, larger spikelet per cm² leaf area, lower decreasing rate of leaf area, higher dry matter accumulation and PP, CGR, NAR at the medium and late growth period. For MPT, dry matter accumulation of RS30 was fewer than that of RS25, but there were no differences in LAI, PP and NAR between RS30 and RS25. For SPT, because of the larger number of basic seedlings, the LAI at all period stages, PP, CGR and NAR at the medium and late growth period, as well as the amount of dry matter accumulation of RS25 were all higher than that of RS30. Therefore, we concluded that the proper row spacing for LPT and MPT is 30 cm while for SPT is 25 cm. And the japonica rice transplanted by mechanism will realize its yield potential only when different panicle types of rice cultivars match suitable plant-spacing.

Key words: agricultural machinery, cultivation, photosynthesis, row-plant spacing, panicle type, mechanical transplanted japonica rice, yield

(责任编辑: 刘丽英)