

李泽华, 马旭, 李宏伟, 等. 低播种量下杂交稻不同机械化种植方式的产量构成及特征 [J]. 华南农业大学学报, 2020, 41(4): 22-29.
LI Zehua, MA Xu, LI Hongwei, et al. Yield components and characteristics of hybrid rice with different mechanical transplanting methods under low sowing rate[J]. Journal of South China Agricultural University, 2020, 41(4): 22-29.

低播种量下杂交稻不同机械化种植方式的产量构成及特征

李泽华¹, 马旭², 李宏伟², 郭林杰², 刘朝东³, 傅荣富³, 杨明祥⁴, 梁振宇⁴
(1 华南农业大学 数学与信息学院, 广东 广州 510642; 2 华南农业大学 工程学院, 广东 广州 510642;
3 江门市农业科学研究所, 广东 江门 529060; 4 江门市农业技术服务中心, 广东 江门 529000)

摘要:【目的】比较低播种量下杂交稻不同机械化种植方式的产量构成及特征, 探索杂交稻机械化种植方法。【方法】在广东省肇庆市和江门市进行了早、晚稻毯状苗机插和麻膜毯状苗机插 2 种机械化种植方式对比试验, 以钵苗人工手插为对照, 采用低播种量精密播种培育壮秧, 配合插秧机精准栽插。【结果】当播种量为每盘 65 g 芽种时, 早、晚稻试验中 2 种机插与钵苗人工手插的实际产量差异为 0.17%~0.66% 和 1.01%~3.24%, 差异不显著; 有效穗数是产量的主要影响因素, 提高杂交稻产量的关键是保证适度有效穗数; 不同种植方式穗部性状差异主要表现为二次枝梗数的差异, 一次枝梗数差异较小。【结论】毯状苗机插可以在低播种量下通过提高中穗占比、大穗和中穗累计占比和协调结实率等因素实现高产栽培。

关键词: 杂交稻; 机械化种植; 低播种量; 产量构成; 穗部性状

中图分类号: S233.71

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2020)04-0022-08

Yield components and characteristics of hybrid rice with different mechanical transplanting methods under low sowing rate

LI Zehua¹, MA Xu², LI Hongwei², GUO Linjie², LIU Chaodong³, FU Rongfu³, YANG Mingxiang⁴, LIANG Zhenyu⁴
(1 College of Mathematics and Informatics, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2 College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 3 Jiangmen Institute of Agricultural Sciences, Jiangmen 529060, China; 4 Jiangmen Agricultural Technology Service Center, Jiangmen 529000, China)

Abstract: 【Objective】To compare yield components and characteristics of hybrid rice with different mechanical transplanting methods under low sowing rate, and explore mechanical transplanting methods for hybrid rice. 【Method】Two kinds of mechanical transplanting methods (mechanical transplanting of blanket seedling and mechanical transplanting of blanket seedling with bast fiber mulch film) for early and late rice under low sowing rate were arranged and compared in Zhaoqing and Jiangmen in Guangdong Province. Artificial transplanting of pot seedling was used as the control. The robust seedlings were cultivated by precision sowing with low sowing rate. The accurate transplanting was achieved by transplanter. 【Result】When the sowing rate was 65 g buds per plate, there was no significant difference between the actual yields of two kinds of mechanical transplanting and artificial transplanting of pot seedling, and the differences among three different transplanting methods in early and late rice experiments were 0.17%–0.66% and 1.01%–3.24%. The effective

收稿日期: 2019-09-11 网络首发时间: 2020-06-17 10:01:18

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20200616.1721.006.html>

作者简介: 李泽华 (1977—), 男, 副教授, 博士, E-mail: lzhjl@scau.edu.cn; 通信作者: 马旭 (1959—), 男, 教授, 博士, E-mail: maxu1959@scau.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFD0700703); 国家自然科学基金 (51675188); 现代农业产业技术体系建设专项资金 (CARS-01-43)

panicle number was the key influencing factor of yield. Ensuring moderate effective panicle number was the key for raising yield. The main difference of panicle traits of different transplanting methods was found in the number of secondary branch. There was little difference in the number of primary branch. 【Conclusion】 Mechanical transplanting of blanket seedling can realize high yield by increasing the proportions of middle panicle, cumulative proportion of large and middle panicles, and coordinating seed setting rate and other factors under low sowing rate.

Key words: hybrid rice; mechanical transplanting; low sowing rate; yield component; panicle trait

机械化是我国水稻生产方式发展的主要方向,种植机械化是我国水稻生产方式机械化发展的“瓶颈”^[1]。制约水稻种植机械化发展的主要影响因素之一是杂交稻机械化种植技术^[2],与人工手插相比,现有的杂交稻机械化种植方式存在减产现象^[3-4]。我国杂交稻种植面积占全国水稻种植面积的50%以上^[5]。因此,探索杂交稻机械化种植方式对彻底解决水稻机械化种植难题具有重要的理论意义和应用价值。

针对杂交稻机械化种植技术难题,现有研究已从品种改良、秧苗培育、大田移栽技术和高产形成规律等农机农艺方面做了大量探索^[6-10]。研究认为杂交稻机械化种植问题的症结主要表现为机械化种植(机插或直播)使得杂交稻大田用种量增加、生育期缩短,导致个体生长量变小,难以获得足穗大穗^[11-12]。现有的解决思路有:1) 培育适应机械化种植的品种,但至今未有显著性突破;2) 采用钵苗机插降低播种量、延长秧龄、减少植伤和提高群体优势,该技术有利于杂交稻取得高产^[13-14],但目前钵苗专用插秧机及育秧设备价格较高,作业效率不及传统插秧机,不宜大面积推广应用^[15];3) 采用毯状大苗机插,使用专用播种机械与带胶水的印刷播种纸,定量定位精准播种,结合化控技术培育35 d左右秧龄的大壮苗,该技术机械移栽时伤苗较重,落谷密度稀,移栽大田漏穴率高,大田栽插效果不及钵苗^[15]。鉴于上述方法的不足,我们秉着适度低播种量精密播种培育适龄壮秧,结合机械精准栽插提高单产的思路,对南方双季稻区杂交稻机械化种植方式进行对比研究。降低播种量有利于培育壮秧,但播种量太低不利于机械栽插质量的提升^[16]。2014年广东省江门市和肇庆市的试验表明,对杂交稻而言,从栽插质量和满足栽插的农艺要求角度看钵体毯状苗和毯状苗育秧的最佳播种量为每盘65~80 g芽种^[16]。然而,2014年广东省肇庆市早、晚季的2次试验发现当播种量为每盘75 g芽种时,机械化种植的产量依然低于人工手插^[17]。为此,我们对华南农业大学研制的“水稻田间工厂化育秧精

密播种机”进行了性能优化^[18],期望进一步提高播种均匀性、降低播种量,从提升育插秧技术角度解决杂交稻机械化种植问题。

本研究基于改良后的播种机械,进一步降低播种量,于2016年在广东省肇庆市和江门市进行了毯状苗机插、麻膜毯状苗机插和钵苗人工手插的大田生产对比试验,从产量构成及特征等方面探索双季稻区低播种量下杂交稻不同机械化种植方式对水稻产量的影响及作用机理。研究结果对解决杂交稻机械化种植难题具有参考意义。

1 材料与方法

1.1 材料和试验地概况

早稻供试品种为‘五优308’,晚稻品种为‘泰丰优55’,均为广东省农业科学院水稻研究所选育推广的籼型三系杂交稻。试验共2次,早稻在广东省肇庆市鼎湖区国家水稻产业技术体系肇庆综合试验站种植,晚稻在广东省江门市恩平试验基地种植。肇庆试验田的土壤质地为黏性壤土,肥力中等,地势平坦,早、晚季都种植水稻,土壤有机质 $18.8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 $122.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷 $80.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $207.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH 5.85。恩平试验田的土壤质地为砂质壤土,肥力中等,常年种植水稻,土壤有机质 $29.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 $0.86 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 $115.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷 $28.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $129.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH 4.76。

1.2 试验方案

为了与实际生产条件一致,试验采用大面积田间裂区对比试验。大区对比试验处理为毯状苗机插、麻膜毯状苗机插,对照为钵苗人工手插,每个处理3次重复。毯状苗机插和麻膜毯状苗机插的种植面积均为 0.40 hm^2 ,秧苗全部采用华南农业大学研制的水稻田工厂化育秧精密播种机进行田间播种培育;钵苗人工手插种植面积为 0.2 hm^2 ,钵苗以相同的播种量通过人工撒播在田间培育。

各处理施肥方法和施肥量与当地常规生产基本一致。肇庆早稻试验中,秧田期于播种前施标普拉金龙稻牌复合肥(深圳标普拉国家贸易有限公司)150

kg·hm⁻² 作为基肥; 本田期于移栽前 1 天施碳酸氢铵 187.5 kg·hm⁻² 和过磷酸钙 187.5 kg·hm⁻² 作为基肥; 返青期施 112.5 kg·hm⁻² 尿素, 移栽后第 13 天追施复合肥 300 kg·hm⁻²、尿素 37.5 kg·hm⁻²、钾肥 75 kg·hm⁻² 作为分蘖肥; 孕穗期追施钾肥 75 kg·hm⁻² 和复合肥 150 kg·hm⁻² 作为穗肥。恩平晚稻试验中, 采用彩虹牌水稻专业肥 (广东天禾中加化肥有限公司), 氮磷钾质量比为 24:7:19, 施肥量为 750 kg·hm⁻², 折合氮磷钾的施用量为氮 180 kg·hm⁻²、磷 52.5 kg·hm⁻²、钾 142.5 kg·hm⁻², 1 季施肥 4 次, 基肥、返青肥、分蘖肥和穗肥的质量比为 4:2:3:1。其余的田间管理均采用常规措施, 不同种植方式间的病虫害防治和水分管理等其他农艺管理措施基本一致。

肇庆早稻于 2016 年 4 月 1 日播种, 播种密度为每盘 65 g 芽种 (刚破胸露白); 4 月 16 日 (秧龄 15 d) 进行田间栽植试验, 采用井关 PG6 水稻高速插秧机栽插, 每公顷栽插 250 000 穴, 平均每穴 2~3 株苗; 7 月 22 日 (生育期 112 d) 采用久保田 4LBZ-145 (PRO 488) 半喂入联合收割机收获。恩平晚稻于 2016 年 7 月 14 日播种, 播种密度为每盘 65 g 芽种; 7 月 29 日 (秧龄 15 d) 插秧, 采用久保田 2ZGQ-8B (NSD8) 乘坐式高速插秧机栽插, 每公顷栽插 250 000 穴, 平均每穴 2~3 株苗; 11 月 8 日 (生育期 117 d) 采用久保田 4LZ-2.5 (PRO688Q) 全喂入履带联合收割机收获。人工手插的栽插密度与机插基本一致。

1.3 测定项目与方法

1) 每公顷基本苗数: 每公顷基本苗数=平均每穴苗数×每公顷总穴数。插秧时, 每种种植方式随机连续调查 100 穴, 记录每穴苗数, 同时测定单位面积的穴数, 3 次重复取平均值, 并用收获时测定的单

位面积穴数进行验证。

2) 产量及其构成因素: 采用三点测产法测算理论产量。每个处理选取有代表性的 3 个点, 机插每个点按插秧机的行走方向取 1 个 3 行×10 穴的长方形区域 (约 30 穴) 进行取样, 计数总穴数, 同时测量长和宽 2 个方向的距离; 人工手插每个点选取约 1.1 m², 计数总穴数。取样后, 脱粒称质量, 记录质量和有效苗数, 做好标记带回实验室。采用水选法区分空壳和实粒, 测量实粒数、空壳数、千粒质量和含水率。实际产量采用联合收割机进行收割称质量, 每种种植方式每次重复的测试面积约 0.067 hm²。

3) 考种: 每种种植方式的每次重复选取有代表性的 10 穴, 割取稻穗, 每穗分开装袋带回实验室考种。考察有效穗数、穗长、穗质量、每穗粒数、一次枝梗数、二次枝梗数、结实率和千粒质量等指标。根据试验数据, 计算群体颖花量、库容量、着粒密度和实际生产效率等指标。群体颖花量=有效穗数×每穗粒数; 库容量/(t·hm⁻²)=群体颖花量×千粒质量÷10; 着粒密度/(粒·cm⁻¹)=每穗粒数/穗长; 一、二次枝梗数比值=每穗一次枝梗数/每穗二次枝梗数; 实际生产效率=实际产量/最优理论产量×100%; 最优理论产量经多项式回归估算得出。

1.4 统计方法

采用 Microsoft Excel 2010 软件录入数据并计算; 运用 SPSS 20 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同种植方式杂交稻产量及其构成因素

2.1.1 产量及其构成因素的比较 不同种植方式杂交稻产量及其构成见表 1。早稻试验中, 不同种

表 1 不同种植方式杂交稻产量及其构成因素¹⁾

Table 1 Hybrid rice yields and yield components with different transplanting methods

材料 Material	种植方式 ²⁾ Transplanting method	有效穗数/ (×10 ⁴ hm ⁻²) No. of effective panicle	每穗粒数 No. of spikelet per panicle	群体颖花量/ (×10 ⁸ hm ⁻²) No. of total spikelet	结实率/% Seed setting percentage	千粒质量/g 1 000 grain weight	库容量/ (t·hm ⁻²) Sink capacity	理论产量/ (kg·hm ⁻²) Theoretical yield	实际产量/ (kg·hm ⁻²) Actual yield
早稻 Early rice	BS	242.59Aa	178.03Aa	4.32Aa	74.27Aa	29.88Aa	12.90Aa	9 583.95Aa	9 368.85Aa
	BW	233.60Aa	182.07Aa	4.25Aa	74.86Aa	29.98Aa	12.75Aa	9 545.40Aa	9 322.95Aa
	PS	256.45Aa	168.02Aa	4.31Aa	73.20Aa	30.42Aa	13.11Aa	9 595.05Aa	9 384.45Aa
晚稻 Late rice	BS	212.31Aa	156.80Aa	3.33Aa	84.80Aa	30.68Aa	10.21Aa	8 660.85Aa	8 091.45Aa
	BW	214.76Aa	154.74Aa	3.32Aa	83.51Aa	30.72Aa	10.21Aa	8 525.40Aa	7 916.40Aa
	PS	210.83Aa	154.67Aa	3.26Aa	82.89Aa	31.10Aa	10.14Aa	8 406.15Aa	7 837.35Aa

1) 相同材料、同列数据后不同大写字母和小写字母分别表示在 0.01 和 0.05 水平差异显著 (Duncan's 法); 2) BS: 毯状苗机插, BW: 麻膜毯状苗机插, PS: 钵苗人工手插

1) Different uppercase and lowercase letters in the same column and material indicate significant differences at 1% and 5% levels respectively (Duncan's test); 2) BS: Mechanical transplanting of blanket seedling, BW: Mechanical transplanting of blanket seedling with bast fiber mulch film, PS: Artificial transplanting of pot seedling

植方式的实际产量表现为钵苗人工手插>毯状苗机插>麻膜毯状苗机插, 差异为 0.17%~0.66%; 晚稻试验中, 不同种植方式的实际产量表现为毯状苗机插>麻膜毯状苗机插>钵苗人工手插, 差异为 1.01%~3.24%。单因素方差分析发现早、晚稻试验中 3 种种植方式的理论产量差异均不显著 ($P=0.986$, $P=0.853$)。各产量构成因素中, 有效穗数、每穗粒数、群体颖花量、结实率和千粒质量的差异都不显著。早稻试验中, 不同种植方式实际产量从高到低的顺序与有效穗数一致, 与每穗粒数和结实率相反, 表明有效穗数是决定产量的关键因子; 晚稻试验中, 不同种植方式实际产量从高到低的顺序与每穗粒数、群体颖花量和结实率一致, 与千粒质量相反, 表明群体颖花量和结实率是决定产量的关键因子。从

早、晚稻 2 个品种特征角度看, 早稻的有效穗数和每穗粒数明显多于晚稻, 从而群体颖花量 ($4.29 \times 10^8 \text{ hm}^{-2}$) 也明显多于晚稻 ($3.30 \times 10^8 \text{ hm}^{-2}$), 但结实率 (74.11%) 明显低于晚稻 (83.73%), 说明早稻品种 ‘五优 308’ 的特点是穗多粒多, 晚稻品种 ‘泰丰优 55’ 的特点是结实率高。早、晚稻试验结果表明, 不论是穗多粒多型品种还是高结实率型品种, 在适度低播种量下, 采用毯状苗机插能较好地发挥杂交稻高产优势, 达到与常规钵苗人工手插基本相当的效果。

2.1.2 产量构成因素的相关性分析 表 2 表明, 早稻中理论产量与有效穗数、群体颖花量和库容量呈极显著正相关 (r 依次为 0.767、0.862 和 0.871), 与每穗粒数呈显著正相关 ($r=0.404$), 与结实率和千粒

表 2 杂交稻产量及构成因素间的相关系数¹⁾

Table 2 Correlation coefficients between yield and yield components of hybrid rice

材料 Material	因子 Factor	有效穗数 No. of effective panicle	每穗粒数 No. of spikelet per panicle	群体颖花量 No. of total spikelet	结实率 Seed setting percentage	千粒质量 1 000 grain weight	库容量 Sink capacity	理论产量 Theoretical yield	
早稻 Early rice	有效穗数 No. of effective panicle	1.000							
	每穗粒数 No. of spikelet per panicle	-0.619**	1.000						
	群体颖花量 No. of total spikelet	0.777**	0.388*	1.000					
	结实率 Seed setting percentage	-0.735**	0.521**	-0.526**	1.000				
	千粒质量 1 000 grain weight	0.005	-0.296	-0.225	0.004	1.000			
	库容量 Sink capacity	0.797**	-0.044	0.983**	-0.539**	-0.045	1.000		
	理论产量 Theoretical yield	0.767**	0.404*	0.862**	0.262	-0.045	0.871**	1.000	
	晚稻 Late rice	有效穗数 No. of effective panicle	1.000						
		每穗粒数 No. of spikelet per panicle	-0.301	1.000					
		群体颖花量 No. of total spikelet	0.718**	0.443*	1.000				
结实率 Seed setting percentage		-0.261	-0.038	-0.265	1.000				
千粒质量 1 000 grain weight		-0.158	-0.522**	-0.502**	0.521**	1.000			
库容量 Sink capacity		0.746**	0.374	0.981**	-0.167	-0.326	1.000		
理论产量 Theoretical yield		0.630**	0.362	0.867**	0.419*	-0.119	0.924**	1.000	

1) “*” 和 “**” 分别表示在 0.05 和 0.01 水平显著相关 (Pearson 法)

1) “*” and “**” indicate significant correlations at 0.05 and 0.01 levels respectively (Pearson method)

质量的相关性不显著,说明增加产量主要通过提高库容量和群体颖花量。由于库容量/(t·hm⁻²)=群体颖花量×千粒质量+10,千粒质量与理论产量的相关性不显著,库容量与群体颖花量呈极显著正相关 ($r=0.983$),说明群体颖花量是决定产量的重要基础。进一步分析群体颖花量 2 个构成因素,有效穗数与群体颖花量呈极显著正相关 ($r=0.777$),每穗粒数与群体颖花量呈显著正相关 ($r=0.388$),说明有效穗数是决定群体颖花量的最主要影响因子。有效穗数与每穗粒数呈极显著负相关 ($r=-0.619$),表明增加有效穗数对每穗粒数存在一定的抑制作用。因此有效穗数过高或过低均不利于群体颖花量的提高。晚稻中理论产量与有效穗数、群体颖花量和库容量也呈极显著正相关 (r 依次为 0.630、0.867 和 0.924),与结实率呈显著正相关 ($r=0.419$),与每穗粒数和千粒质量的相关性不显著,这再次说明产量增加的主要原因是提高了库容量和群体颖花量。与早稻相似,晚稻千粒质量与理论产量的相关性不显著,库容量与群体颖花量呈极显著正相关 ($r=0.981$),有效穗数与群体颖花量呈极显著正相关 ($r=0.718$),每穗粒数与群体颖花量呈显著正相关 ($r=0.443$),有效穗数与每穗粒数相关性不显著,呈负相关关系 ($r=-0.301$)。早稻与晚稻的不同点是,早稻的理论产量与每穗粒数呈显著正相关,与结实率相关性不显著;晚稻的理论产量与结实率呈显著正相关,与每穗粒数相关性不显著。早稻‘五优 308’属于穗多粒多型杂交稻品种,‘泰丰优 55’属于高结实率型杂交稻品种,实际栽培中提高产量必须充分考虑品种特性。对同一杂交稻品种,提高产量的关键是保证适度的有效穗数,提高库容量和群体颖花量。

将早稻和晚稻的理论产量(Y)与有效穗数(X)进行多项式回归分析,得到早稻的回归方程为:

$$Y = -0.959X^2 + 480.343X - 50\,391.081 \quad (1)$$

$(P = 0.018) (P = 0.018) (P = 0.035),$

晚稻的回归方程为:

$$Y = -1.803X^2 + 782.579X - 75\,862.191 \quad (2)$$

$(P = 0.017) (P = 0.015) (P = 0.021),$

式中,各系数下方括号中的数值表示该回归系数的检验 P 值,各回归系数都在 0.05 水平通过了统计检验。早稻回归方程 F 检验的统计量的值 $F=5.210, P=0.049<0.05$,回归方程有意义,模型的拟合优度 $R^2=0.635$;晚稻回归方程 F 检验的统计量的值 $F=10.033, P=0.012<0.05$,回归方程有意义,模型的拟合优度 $R^2=0.770$ 。

模型 (1) 和 (2) 分别较好地拟合了早稻和晚稻

理论产量与有效穗数之间的关系,根据二次曲线求最优值的方法可得:当早稻最优有效穗数 $X_1 = 250.44 \times 10^4 \text{ hm}^{-2}$ 时,最优理论产量 $Y_1 = 9\,757.35 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,毯状苗机插、麻膜毯状苗机插和钵苗人工手插的实际生产效率分别为 96.02%、95.55% 和 96.18%,3 种植方式生产效率的差异较小;当晚稻最优有效穗数 $X_2 = 217.02 \times 10^4 \text{ hm}^{-2}$ 时,最优理论产量 $Y_2 = 9\,055.99 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,毯状苗机插、麻膜毯状苗机插和钵苗人工手插的实际生产效率分别为 89.35%、87.42% 和 86.54%,3 种植方式中毯状苗机插的实际生产效率最高。早、晚稻试验中 2 种植机械化种植方式的有效穗数都没有达到理论最优值,表明有效穗数不足是杂交稻毯状苗机插产量的重要限制因子。

2.2 穗部构成特征比较

穗部特征是水稻经济产量的最终表现,分析不同种植方式的穗部特征将有利于探索水稻群体生产力增长途径。由于试验数据量大,本文仅以晚稻的考种数据进行分析。对晚稻每种种植方式的每次重复选取有代表性的 10 穴进行考种,共 90 穴 1 411 穗:毯状苗机插 30 穴 496 穗,膜毯状苗机插 30 穴 485 穗,钵苗人工手插 30 穴 430 穗。分别考察了每穗的穗长、穗质量、一次枝梗数、二次枝梗数、每穗粒数、结实率和千粒质量等指标。

2.2.1 穗型特征 穗型大小无明确的量化界定和定义,通常根据穗质量和穗粒数等将水稻穗分为大穗、中穗和小穗^[19]。考种试验发现部分水稻穗整穗空瘪,原本应属于大穗,穗质量却很轻。穗长明显表征穗型大小,穗长与穗质量呈极显著正相关 ($r=0.882$),因此,本文以穗长为标准对穗型进行划分。划分的标准为:样本平均值±标准差的范围为中穗,在此范围以上和以下分别为大穗和小穗。经 Kolmogorov-Smirnov 正态性检验,穗长服从正态分布 ($P<0.001$)。样本平均值为 22.028 cm,标准差为 2.296 cm,因此小穗和中穗的临界值为 19.732 cm,中穗和大穗的临界值为 24.324 cm。根据以上标准,得到 3 种植方式的穗型特征如表 3 所示。

钵苗人工手插的大穗占比为 18.14%,明显高于毯状苗机插 (14.31%) 和麻膜毯状苗机插 (10.93%)。机插秧存在植伤等问题,这可能是杂交稻机插产量不及人工手插的重要原因之一。毯状苗机插的中穗占比为 71.57%,高于人工手插 (67.21%);大穗和中穗累计占比达到 85.88%,略高于钵苗人工手插 (85.35%)。晚稻毯状苗机插的实际产量为 8 091.45 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,高于钵苗人工手插 (7 837.35 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$);毯

表 3 不同种植方式杂交稻的穗型特征

Table 3 Panicle type characteristics of hybrid rice with different transplanting methods

种植方式 ¹⁾	总穗数	大穗数	大穗占比/%	中穗数	中穗占比/%	大穗和中穗累计占比/%	小穗数	小穗占比/%
Transplanting method	No. of total panicle	No. of large panicle	Ratio of large panicle	No. of medium panicle	Ratio of medium panicle	Total ratio of large and medium panicles	No. of miniature panicle	Ratio of miniature panicle
BS	496	71	14.31	355	71.57	85.88	70	14.11
BW	485	53	10.93	346	71.34	82.27	86	17.73
PS	430	78	18.14	289	67.21	85.35	63	14.65

1)BS: 毯状苗机插; BW: 麻膜毯状苗机插; PS: 钵苗人工手插

1)BS: Mechanical transplanting of blanket seedling; BW: Mechanical transplanting of blanket seedling with bast fiber mulch film; PS: Artificial transplanting of pot seedling

状苗机插结实率为 84.80%，也高于钵苗人工手插 (82.89%) (表 1)。说明对高结实率型杂交稻品种 ‘泰丰优 55’ 而言，提高中穗占比、攻取较高的大穗和中穗累计占比是机插杂交稻发挥高产的重要前提。麻膜毯状苗机插的中穗占比为 71.34%，与毯状苗机插相近，小穗占比为 17.33%，明显高于毯状苗机插，但实际产量不及毯状苗机插。

机插杂交稻攻取大穗的能力不及钵苗人工手插，但可以通过提高中穗占比、大穗和中穗累计占比，协调结实率等措施实现高产栽培。

2.2.2 穗部构成特征 不同种植方式的穗部构成特征见表 4。从平均值来看，不同种植方式杂交稻的单穗质量、着粒密度、一次枝梗数和二次枝梗数

都呈现相同的规律，即毯状苗机插>钵苗人工手插>麻膜毯状苗机插，穗长表现为钵苗人工手插>毯状苗机插>麻膜毯状苗机插。从穗型角度看，钵苗人工手插最有可能获得大穗，与“2.2.1”结论一致。晚稻试验中，3 种植方式的有效穗数相差不大，由于毯状苗机插的结实率比钵苗人工手插高，单穗质量也略高于钵苗人工手插。实际产量最终表现为毯状苗机插高于钵苗人工手插；麻膜毯状苗机插的穗长最短，穗最小，单穗质量最轻，由于麻膜毯状苗机插的有效穗数最多 (表 1)，实际产量处于中间水平。从群体的变异程度看，不同种植方式杂交稻穗长、单穗质量、二次枝梗数的变异系数呈现相同的规律，即毯状苗机插<麻膜毯状苗机插<钵苗人工手

表 4 不同种植方式杂交稻穗部构成特征

Table 4 Panicle characteristics of hybrid rice with different transplanting methods

种植方式	统计指标	穗长/cm	单穗质量/g	着粒密度/ (粒·cm ⁻¹)	一次枝梗数	二次枝梗数	一、二次枝梗数比
Transplanting method	Statistical index	Panicle length	Single panicle weight	Grain density	No. of primary branch	No. of secondary branch	No. of primary branch/ No. of secondary branch
毯状苗机插 Mechanical transplanting of blanket seedling	平均值 Average	22.071	3.831	6.529	10.761	28.524	0.497
	最大值 Maximum	27.200	7.400	11.610	18.000	62.000	5.000
	最小值 Minimum	14.900	0.800	1.943	6.000	2.000	0.212
	变异系数/% Variable coefficient	10.105	34.206	27.332	13.234	41.917	83.662
麻膜毯状苗机插 Mechanical transplanting of blanket seedling with bast fiber mulch film	平均值 Average	21.761	3.771	6.498	10.358	25.882	0.517
	最大值 Maximum	27.600	7.900	11.157	16.000	57.000	4.500
	最小值 Minimum	13.400	0.600	1.480	5.000	2.000	0.179
	变异系数/% Variable coefficient	10.421	34.803	27.262	14.499	42.771	76.158
钵苗人工手插 Artificial transplanting of pot seedling	平均值 Average	22.281	3.830	6.502	10.481	27.986	0.524
	最大值 Maximum	27.600	7.900	12.292	16.000	57.000	8.000
	最小值 Minimum	13.000	0.600	1.482	5.000	1.000	0.218
	变异系数/% Variable coefficient	10.648	36.629	28.977	14.148	45.102	117.362

插, 毯状苗机插一次枝梗数的变异系数也是最小的, 说明 3 种植方式中毯状苗机插的群体变异最小, 钵苗人工手插群体最不稳定, 这可能就是本研究毯状苗机插实际产量高于钵苗人工手插的另一个重要原因, 也是实际生产中机械化种植方式优于人工手插的重要表现之一。机械化作业的水稻群体生长协调, 穗型变异小, 利于获取高产。从穗部构成各项指标的变异系数来看, 3 种植方式中穗长和一次枝梗数的变异系数较小, 分别为 10.105%~10.648% 和 13.234%~14.499%; 单穗质量, 着粒密度, 二次枝梗数, 一、二次枝梗数比的变异系数相对较大, 最大的是一、二次枝梗数比, 为 76.158%~117.362%。不同种植方式对穗部构成影响相对较大的是一、二次枝梗数比, 二次枝梗数, 单穗质量和着

粒密度。

由表 5 可知, 3 种植方式杂交稻穗部各性状之间均呈极显著相关; 单穗质量与着粒密度的相关性最强, 其次是与二次枝梗数, 都呈极显著正相关; 着粒密度与二次枝梗数的相关性最强; 穗长与二次枝梗数的相关性强于与一次枝梗数的相关性; 结果说明影响单穗质量的最主要因素是着粒密度和二次枝梗数, 着粒密度与二次枝梗数呈极显著正相关。不同水稻穗之间一次枝梗数差异较小。试验和相关研究^[20]发现不同水稻穗着粒密度相差不大, 通常一次枝梗着粒 5~7 粒, 6 粒居多, 二次枝梗着粒 2~4 粒, 3 粒居多。二次枝梗着粒密度显著增多时, 水稻穗粗大, 单穗质量显著增加, 水稻穗的差异主要表现为二次枝梗数的差异。

表 5 不同种植方式杂交稻穗部性状之间的相关系数¹⁾

Table 5 Correlation coefficients of panicle traits of hybrid rice with different transplanting methods

种植方式 Transplanting method	因子 Factor	穗长 Panicle length	单穗质量 Single panicle weight	着粒密度 Grain density	一次枝梗数 No. of primary branch	二次枝梗数 No. of secondary branch
毯状苗机插 Mechanical transplanting of blanket seedling	单穗质量 Single panicle weight	0.869**				
	着粒密度 Grain density	0.795**	0.987**			
	一次枝梗数 No. of primary branch	0.771**	0.743**	0.704**		
	二次枝梗数 No. of secondary branch	0.885**	0.905**	0.867**	0.784**	
麻膜毯状苗机插 Mechanical transplanting of blanket seedling with bast fiber mulch film	一、二次枝梗数比 No. of primary branch/No. of secondary branch	-0.638**	-0.619**	-0.623**	-0.488**	-0.689**
	单穗质量 Single panicle weight	0.897**				
	着粒密度 Grain density	0.787**	0.942**			
	一次枝梗数 No. of primary branch	0.786**	0.769**	0.708**		
钵苗人工手插 Artificial transplanting of pot seedling	二次枝梗数 No. of secondary branch	0.846**	0.891**	0.816**	0.740**	
	一、二次枝梗数比 No. of primary branch/No. of secondary branch	-0.622**	-0.598**	-0.593**	-0.469**	-0.695**
	单穗质量 Single panicle weight	0.888**				
	着粒密度 Grain density	0.831**	0.988**			
	一次枝梗数 No. of primary branch	0.719**	0.774**	0.769**		
	二次枝梗数 No. of secondary branch	0.882**	0.942**	0.917**	0.762**	
	一、二次枝梗数比 No. of primary branch/ No. of secondary branch	-0.571**	-0.521**	-0.546**	-0.452**	-0.541**

1) “*” 和 “**” 分别表示在 0.05 和 0.01 水平显著相关 (Pearson 法)

1) “*” and “**” indicate significant correlations at 0.05 and 0.01 levels respectively (Pearson method)

为了定量探索单穗质量与二次枝梗数的关系, 基于试验采集的 1 411 穗数据, 得到穗质量 (G) 与二次枝梗数 (M) 的一次线性回归方程为 $G=0.983+0.104M(R^2=0.823, F=6\ 489.82, P=0)$, 二次枝梗数每增加 1 条, 单穗质量增加 0.104 g。

综上所述, 不同种植方式和穗部性状之间的差

异主要来源于二次枝梗数, 一次枝梗数的差异较小。二次枝梗由一次枝梗分化而来, 直接影响一、二次枝梗数的比例和着粒密度。因此, 二次枝梗数是协调穗部构成、提高单产的关键性状, 若能稳定和提高二次枝梗数并充实灌浆, 将有效提高水稻的经济产量和生产力。

3 结论

通过优化播种机械性能、降低单位面积育秧播种量培育适合机插的健壮秧苗,实现低播种量下毯状苗精准栽插,从产量及构成特征方面探索杂交稻机械化种植方式对水稻产量的影响及其规律,得到如下结论:

1) 当播种量为每盘 65 g 芽种时,穗多粒多型杂交稻品种‘五优 308’和高结实率型杂交稻品种‘泰丰优 55’通过毯状苗机插都能较好地发挥杂交稻高产优势,达到与常规钵苗人工手插相近的效果。早稻和晚稻试验中 2 种机插与钵苗人工手插的实际产量差异分别为 0.17%~0.66% 和 1.01%~3.24%,差异不显著。

2) 库容量和群体颖花量是杂交稻产量的主要影响因素,有效穗数是决定产量的关键因子;对同一杂交稻品种,提高产量的关键是保证适度的有效穗数,从而提高库容量和群体颖花量。

3) 不同种植方式和穗部性状之间的差异主要是二次枝梗数,一次枝梗数差异较小;二次枝梗数是协调穗部构成和提高单产的关键性状;机插杂交稻攻取大穗的能力不及人工手插,在低播种量下可以通过提高中穗占比、大穗和中穗累计占比,协调结实率等措施实现高产栽培。

参考文献:

- [1] 白人朴. 关于水稻生产机械化技术路线选择的几个问题[J]. 中国农机化, 2011(1): 15-18.
- [2] 李泽华, 马旭, 李秀昊, 等. 水稻栽植机械化技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 1-20.
- [3] 姚雄. 杂交中稻大苗机插植株生长特性与育秧技术研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2010.
- [4] 曾勇军, 潘晓华, 石庆华, 等. 不同种植方式对陆两优 996 产量和品质的影响[J]. 江西农业大学学报, 2012, 34(5): 859-865.
- [5] MA G H, YUAN L P. Hybrid rice achievements, development and prospect in China[J]. *J Integr Agric*, 2015, 14(2): 197-205.
- [6] HUANG M, SHAN S L, XIE X B, et al. Why high grain yield can be achieved in single seedling machine-trans-

planted hybrid rice under dense planting conditions[J]. *J Integr Agric*, 2018, 17(6): 1299-1306.

- [7] HUANG M, TANG Q Y, AO H J, et al. Yield potential and stability in super hybrid rice and its production strategies[J]. *J Integr Agric*, 2017, 16(5): 1009-1017.
- [8] 张洪程, 赵品恒, 孙菊英, 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.
- [9] 蒲石林, 邓飞, 胡慧, 等. 杂交稻不同机插穴距及苗数配置对干物质生产与产量的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2018, 44(1): 21-30.
- [10] 姜元华, 张洪程, 赵可, 等. 机插条件下籼粳杂交稻茎秆的抗倒性评价及成因分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(19): 19-29.
- [11] 张洪程, 龚金龙. 中国水稻种植机械化高产农艺研究现状及发展探讨[J]. 中国农业科学, 2014, 47(7): 1273-1289.
- [12] 陈立云, 雷东阳, 唐文帮, 等. 中国杂交稻发展面临的挑战与策略[J]. 杂交水稻, 2015, 30(5): 1-4.
- [13] 张洪程, 朱聪聪, 霍中洋, 等. 钵苗机插水稻产量形成优势及主要生理生态特点[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 50-59.
- [14] 胡雅杰, 邢志鹏, 龚金龙, 等. 钵苗机插水稻群体动态特征及高产形成机制的探讨[J]. 中国农业科学, 2014, 47(5): 865-879.
- [15] 张军, 王兴龙, 石广跃, 等. 不同机栽方式下杂交稻产量及其形成特征比较[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 84-91.
- [16] 李泽华, 马旭, 谢俊锋, 等. 双季稻区杂交稻机插秧低播量精密育秧试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 17-27.
- [17] 李泽华, 马旭, 齐龙, 等. 华南双季稻区水稻不同机械化栽植方式对比试验与评价[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 40-47.
- [18] 鹿芳媛, 马旭, 齐龙, 等. 基于离散元法的杂交稻振动匀种装置参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 17-25.
- [19] 龚金龙, 胡雅杰, 龙厚元, 等. 大穗型杂交粳稻产量构成因素协同特征及穗部性状[J]. 中国农业科学, 2012, 45(11): 2147-2158.
- [20] 靳德明, 王维金, 蓝盛银, 等. 矮培 64s/E32 产量构成因素和穗部性状的杂种优势及相关分析[J]. 华中农业大学学报, 2001, 20(6): 516-521.

【责任编辑 李庆玲】