

精准条播育秧对广西机插水稻栽插质量、干物质生产及产量的影响

钟晓媛¹ 王众¹ 陈雷¹ 张晓丽¹ 黄严² 朱德峰³ 王亚梁³ 覃勇² 高国庆¹
张隆葵⁴ 唐茂艳^{1,*} 梁天锋^{1,*}

(¹ 广西壮族自治区农业科学院/广西水稻遗传育种重点实验室, 南宁 530007; ² 广西壮族自治区农业机械化服务中心, 南宁 530023; ³ 中国水稻研究所, 杭州 311400; ⁴ 广西隆星禾农业科技有限公司, 钦州 535000; *通信作者, email: tangmaoyan@gxaas.net, tfliang@gxaas.net)

Effects of Precision Drill Sowing on Transplanting Quality, Dry Matter Production, and Yield of Machine-transplanted Rice in Guangxi Zhuang Autonomous Region

ZHONG Xiaoyuan¹, WANG Zhong¹, CHEN Lei¹, ZHANG Xiaoli¹, HUANG Yan², ZHU Defeng³,
WANG Yaliang³, QIN Yong², GAO Guoqing¹, ZHANG Longkui⁴, TANG Maoyan^{1,*}, LIANG Tianfeng^{1,*}

(¹ Guangxi Academy of Agricultural Sciences/Guangxi Key Laboratory of Rice Genetics and Breeding, Nanning 530007, China; ² Guangxi Zhuang Autonomous Region Agricultural Mechanization Service Center, Nanning 530023, China; ³ China National Rice Research Institute, Hangzhou 311400, China; ⁴ Guangxi Longxinghe Agricultural Science and Technology Co., Ltd, Qinzhou 535000, China; *Corresponding author, email: tangmaoyan@gxaas.net, tfliang@gxaas.net)

Abstract: 【Objective】 The aim of this study was to clarify the effects of precision drill sowing (PS) on yield of machine-transplanted rice in Guangxi, and to provide technical support for mechanized production and improvement of large-scale yield per unit area of rice in Guangxi Zhuang Autonomous Region. 【Method】 The seeds of Changliangyou 8, Changliangyoufuxiangzhan, Huashengyoujingguizhan, Jingmeisixiang, Juxiangsimiao and Guangliangxingui were precisely drill-sown (PS) with the same seed sowing rate used in traditional broadcast sowing (BS) as the control. The seedling quality, mechanical transplanting quality, dry matter production, and yield were investigated. 【Result】 1) Compared with BS, PS improved the seedling uniformity and root interlocking force by 5.68%–15.47% and 7.65%–24.21%, respectively. 2) PS significantly reduced the rate of missing hills by 54.72%–76.67%, increased the uniformity of the seedling number per hill, the peak number of seedlings, and the uniformity of the number of productive tillers by 37.91%–104.73%, 16.49%–24.18%, and 6.67%–13.72%, respectively. 3) Compared with BS, PS increased the leaf area index (LAI) and effective LAI during heading stage, photosynthetic potential, and improved the dry matter accumulation from transplanting to jointing and from jointing to heading stages, as well as the dry matter accumulation of population at maturity stage. 4) The significant increase in the number of productive tillers and population spikelets in the PS treatment was one of the important reasons for achieving high grain yield. 【Conclusion】 Precision drill sowing in mechanical transplanting reduced the rate of missing hills, improved the uniformity of the seedling number under mechanical transplanting, increased the number of productive tillers and its uniformity, LAI, and photosynthetic potential, promoted the accumulation of dry matter, which resulted in an increase in grain yield.

Key words: rice; precision drill sowing; machine transplanting; mechanical transplanting quality; grain yield

摘要: 【目的】明确精准条播育秧机插对广西机插稻产量的影响, 为广西水稻机械化生产和大面积单产提升提供技术支撑。【方法】以昌两优8号、昌两优馥香占、华盛优京贵占、菁美丝香、聚香丝苗、广粮新桂等6个籼稻品种为供试材料, 设置精准条播(precision drill sowing, PS)育秧机插和传统撒播(broadcast sowing, BS)育秧机插两个处理, 测定分析秧苗素质、机插质量、干物质积累及产量形成等性状指标。【结果】1)与BS处理相比, PS处理分别提高了秧苗均匀度和根系盘结力5.68%~15.47%和7.65%~24.21%。2)PS处理显著降低漏插率54.72%~76.67%,

收稿日期: 2025-06-16; 修改稿收到日期: 2026-02-27。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFD1902804, 2023YFD1902805); 广西农业科学院基本科研业务专项资金资助项目(桂农科 2024YP010, 桂农科 2025YP034、桂农科 2026YT070); 国家自然科学基金资助项目(32160501, 32201901); 国家现代农业产业技术体系广西创新团队建设专项资金资助项目(nycytxgxcxtid-2021-01-04); 广西农业科学院成果转化项目(NCZ202602)。

提高机插苗数均匀度、分蘖高峰苗数以及有效穗数均匀度 37.91%~104.73%、16.49%~24.18%和 6.67%~13.72%，其中昌两优 8 号 PS 处理下机插苗数均匀度最高。3)与 BS 处理相比，PS 处理增加齐穗期叶面积指数和有效叶面积指数、光合势，提高了移栽—齐穗阶段的干物质积累量以及成熟期群体干物质积累量。4)群体有效穗数和群体颖花数的显著增加是 PS 处理获得高产的重要原因之一。【结论】精准条播育秧机插能够降低漏插率，提高机插苗数均匀度，增加群体有效穗数及其均匀度、叶面积指数和光合势，促进干物质积累，进而提高产量。

关键词：水稻；精准条播；机插；机插质量；产量

水稻种植比较效益低，农村劳动力缺乏且用工成本上涨，导致从事水稻生产的人数不断下降，水稻生产向轻简化、机械化种植转变已呈必然趋势^[1-2]。采用水稻机械化插秧是减少劳动投入、提高种植效率和实现水稻稳产丰产的有效途径^[3]。广西是南方水稻主产省区之一，受地形、农田基础设施、机械化育秧技术、土地经营制度等因素限制，机插秧在广西稻区的发展速度较慢^[4-6]，2020 年广西机插秧水平仅为 43.24%^[7]，栽植机械化已成为广西水稻保面积、增产量的关键技术。目前，我国传统毯苗机插育秧以撒播育秧为主，播种量大，导致种子成本高、秧苗素质较差、群体生长不均匀，机插取秧不均匀、机插伤秧率高，而降低播种量又导致机插漏插率高，增加人工补苗成本^[8-10]。为此，中国水稻研究所研发了杂交稻精准播种机插技术，该技术将传统秧盘撒播转为精准定量定位条播，配套机插取秧，显著降低机插漏插率，提高机插均匀度，实现了杂交稻机插技术的突破^[11-13]。此外，前人对精准条播育秧机插开展了不少研究，从播种方式^[14-16]、播种量^[11-12, 17]、秧龄^[16]、栽插密度^[18]、氮肥运筹^[14, 19]等方面研究水稻秧苗素质、机插质量、分蘖特性、群体均匀度、干物质生产、氮素吸收、

产量及品质形成的特点。精准条播育秧机插技术目前在浙江省应用比较广，然而，全国各水稻产区气候差异大，得出的结论具有一定局限性，且精准条播育秧对广西水稻机插质量及产量的效应鲜有报道。因此，本研究选用 6 个籼稻品种为研究对象，以撒播育秧为对照，研究精准条播育秧对广西机插水稻栽插质量、干物质生产及产量的影响，以期为广西稻区机插丰产高效生产提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料及试验条件

供试水稻品种为广西近年来常用水稻品种，包含 3 个杂交籼稻(昌两优 8 号、昌两优馥香占、华盛优京贵占)和 3 个常规籼稻(菁美丝香、聚香丝苗和广粮新桂)，早晚季都用相同的品种，具体品种信息见表 1。试验于 2024 年早季和晚季试验在广西钦州市钦南区黄屋屯镇屯南村的钦南区惠农农机专业合作社水稻田进行(21°59'41" N, 108°30'8" E)，该地属于南亚热带季风气候区，水稻生长季节相关气象数据见图 1(数据来源于国家气象科学数据中心 <http://data.cma.cn>)。2024 年早、晚季试验都在同一

表 1 供试水稻品种信息

Table 1. Information of tested rice varieties

品种 Variety	类型 Type	选育单位 Breeding unit	亲本来源 Parental origin	千粒重 1000-grain weight (g)	生育期 Growth duration(d)
昌两优 8 号 CLY8	籼型两系杂交水稻	广西恒茂农业科技有限公司	昌 S×恒恢 8 号	24.5	116.8
昌两优馥香占 CLYFXZ	籼型两系杂交水稻	广西恒茂农业科技有限公司、江西科源种业 有限公司、南宁市恒茂种业科学研究院	昌 S×馥香占[田东香×中嘉早 17/ 黄华占//合美占///野丝占]	23.7	120.2
华盛优京贵占 HSYJGZ	籼型三系杂交水稻	北京金色农华种业科技股份有限公司	华盛 A×京贵占[华占/粤农丝苗]	25.3	126.0
菁美丝香 JMSX	籼型常规水稻	广西粮研农业科技有限公司	黄壳香占×长丝占	18.9	119.2
聚香丝苗 JXSM	籼型常规水稻	广东省农业科学院植物保护研究所	白香占×金农丝苗	21.0	122.2
广粮新桂 GLXG	籼型常规水稻	广西粮发种业有限公司	N2-5×珍桂矮 1 号	25.0	121.0

CLY8, Changliangyou 8; CLYFXZ, Changliangyoufuxiangzhan; HSYJGZ, Huashengyoujingguizhan; JMSX, Jingmeisixiang; JXSM, Juxiangsimiao; GLXG, Guangliangxingui. The same below.

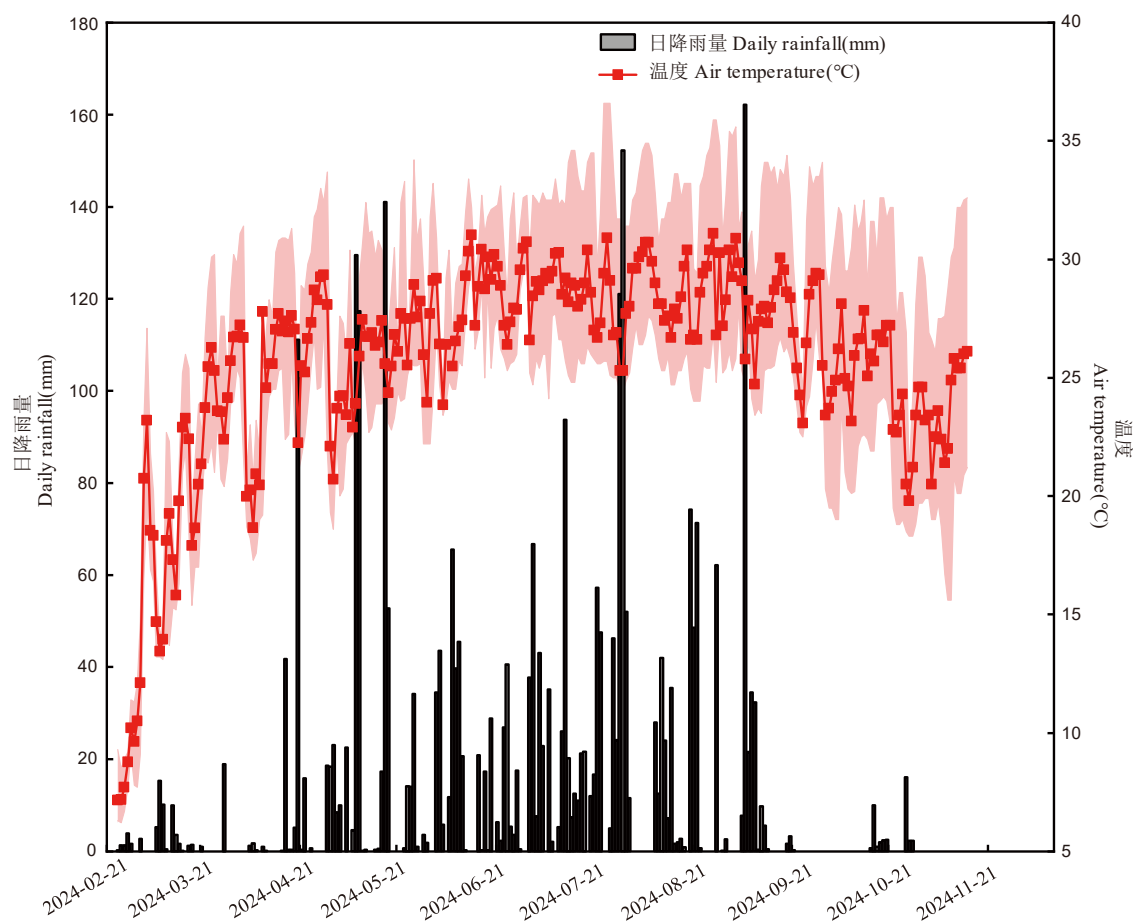


图1 2024年水稻生长季节的气象资料

Fig. 1. Climatic data during the rice growing season in 2024

块田块上开展, 土壤类型为重壤土, 早季 0–20 cm 土层含有机质 34.70 g/kg, 全氮 1.70 g/kg, 全磷 0.41 g/kg, 全钾 3.17 g/kg, 水解氮 222.80 mg/kg, 有效磷 3.77 mg/kg, 速效钾 106.00 mg/kg, pH 4.57; 晚季 0–20 cm 土层含有机质 27.35 g/kg, 全氮 1.35 g/kg, 全磷 0.57 g/kg, 全钾 2.50 g/kg, 水解氮 190.80 mg/kg, 有效磷 4.55 mg/kg, 速效钾 83.50 mg/kg, pH 4.64。

1.2 试验设计

采用裂区试验设计, 品种为主区, 包括昌两优 8 号、昌两优馥香占、华盛优京贵占、菁美丝香、聚香丝苗和广粮新桂 6 个品种; 播种方式为副区, 设置精准条播(precision drill sowing, PS)和传统撒播(broadcast sowing, BS) 2 个处理。播种育秧地点为广西钦州市钦南区黄屋屯镇屯南村的钦南区惠农农机专业合作社的智能育秧工厂, 采用的是标准秧盘(长×宽×高为 58 cm×28 cm×2.8 cm), 育秧基质用的是淮安柴米河农业科技股份有限公司生产的水稻专用育秧基质。精准条播采用水稻精准播种流水线进行(2BPG-500, 杭州赛得林智能装备有限

公司, 杭州), 传统撒播采用普通机插播种流水线进行(2BZP-800, 久保田水稻育秧播种机)。精准条播设置横向精准 18 条条播(PDS-18)规格。早季播种时间为 2024 年 2 月 27 日, 栽插时间为 2024 年 4 月 2 日, 秧龄 35 d; 晚季播种时间为 7 月 16 日, 栽插时间为 8 月 5 日, 秧龄 20 d。根据水稻机插取秧次数确定秧盘取秧穴数, PDS-18 横向机插取秧 18 次, 纵向取秧 40 次, 每秧盘总计取秧 720 穴, 机插秧盘每穴播种 3.5 粒种子, PDS-18 对应播种量分别为 54.8 g/盘(昌两优 8 号)、55.6 g/盘(昌两优馥香占)、61.7 g/盘(华盛优京贵占)、49.1 g/盘(菁美丝香)、53.8 g/盘(聚香丝苗)、63.0 g/盘(广粮新桂)。传统撒播(BS)与精准条播播种量一致。用久保田插秧机(SPU-68C, 久保田乘坐式水稻插秧机)进行机插, 横向机插取秧 18 次, 纵向取秧 40 次(经调节实现), 机插秧种植规格为 30 cm×18 cm。小区面积 3.6 m×10 m=36 m², 3 次重复, 共 36 个小区。主区之间起埂隔离, 单独肥水管理。早晚季施肥量和运筹方式一致, 施氮肥(折合纯氮)150 kg/hm²(基肥: 分蘖肥: 促花

肥:保花肥=4.2:1.8:2.4:1.6)。磷肥(折合 P_2O_5) 75 kg/hm² 按基肥一次性施入。钾肥(折合 K_2O) 150 kg/hm², 分基肥:穗肥(促花肥)=5:5 比例施入。早晚稻季基肥分别于移栽前 2 d 施用, 分蘖肥于栽后 10 d 施用, 促花肥于水稻倒 4 叶期施用, 保花肥于水稻幼穗分化第 4 期施用。其他栽培措施与当地高产栽培技术一致。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 成苗率与秧苗均匀度

移栽当天, 每个品种每个播种处理随机选 3 个秧盘作为 3 个重复, 每个秧盘取 10 cm×10 cm 大小的方块秧苗, 考察秧苗数、未成苗种子数, 并测量秧苗高度(茎基部至最长叶片的顶端), 利用苗高均匀度衡量秧苗均匀度(U_{sh})。成苗率=秧苗数/(秧苗数+未成苗种子数)×100%。

秧苗均匀度(U_{sh}):

$$U_{sh} = (1 - S_{sh}/\overline{x_{sh}}) \times 100\%;$$

$$S_{sh} = \sqrt{1/(n-1) \sum_{i=1}^n (xi_{sh} - \overline{x_{sh}})^2}.$$

式中, S_{sh} 表示苗高的标准差; xi_{sh} 表示苗高观测值; n 表示调查的秧苗数; $\overline{x_{sh}}$ 表示苗高的平均数。

1.3.2 秧苗素质

移栽当天, 每个品种每个播种处理随机选 3 个秧盘作为 3 个重复, 每个秧盘取长势一致的秧苗 30 株, 测定苗高、叶龄、茎基宽(离秧苗发根处 1 cm 处的苗宽)、白根数, 并从中选取长势一致秧苗 100 株, 分茎叶和根分别装袋, 在 105℃下杀青 30 min, 80℃烘干至恒重, 测定地上部干质量。利用数显拉力计测定根系盘结力。每个品种每个播种处理切取 6 个 10 cm×10 cm 秧块, 将秧块两端用铁夹固定, 固定一端, 用数显拉力计沿水平方向缓慢钩拉另一端, 当秧块断裂时, 记录数显拉力计显示的最大数值, 该数值即为秧块盘结力(单位: N)。

1.3.3 机插质量

栽插 3 d 后, 每小区选取 1.8 m×5.4 m 面积记录机插总穴数、机插每穴苗数、漏插穴数, 计算机插漏秧率、机插苗数均匀度、2~3 苗比例和每穴 2~4 苗比例。

漏插率=漏插穴数/调查总穴数×100%;

机插 2~3 苗比例=(机插 2 苗/穴数+机插 3 苗/穴数)/调查总穴数×100%;

机插 2~4 苗比例=(机插 2 苗/穴数+机插 3 苗/穴数+机插 4 苗/穴数)/调查总穴数×100%;

机插苗数均匀度(U_{nst}):

$$U_{nst} = (1 - S_{nst}/\overline{x_{nst}}) \times 100\%;$$

$$S_{nst} = \sqrt{1/(n-1) \sum_{i=1}^n (xi_{nst} - \overline{x_{nst}})^2}.$$

式中, S_{nst} 表示机插每穴苗数的标准差; xi_{nst} 表

示机插每穴苗数的观测值; n 表示调查的穴数; $\overline{x_{nst}}$ 表示机插每穴苗数的平均值。

1.3.4 茎蘖动态及成穗率

机插后, 分别在分蘖高峰期、拔节期、齐穗期和成熟期调查每小区 60 穴的茎蘖数。成穗率(%)=有效穗数/高峰苗数×100%。有效穗数均匀度的计算(U_{et})通过有效穗数的变异程度进行计算:

$$U_{et} = (1 - S_{et}/\overline{x_{et}}) \times 100\%;$$

$$S_{et} = \sqrt{1/(n-1) \sum_{i=1}^n (xi_{et} - \overline{x_{et}})^2}.$$

式中, S_{et} 表示有效穗数的标准差; xi_{et} 表示有效穗数的观测值; n 表示调查的穴数; $\overline{x_{et}}$ 表示有效穗数的平均值。

1.3.5 干物质积累和叶面积

每小区按照拔节期、齐穗期、成熟期调查 60 穴茎蘖数(有效穗数)的平均值取样 3 穴, 将样品分茎、叶、穗(拔节期除外)三部分, 齐穗期和成熟期先测定叶面积, 然后将各组织分别装袋在 105℃下杀青 30 min, 80℃烘干至恒重, 测定各部分干物质量。用自动叶面积仪(LI-3100, 美国 LI-COR 公司)测定取样的植株绿叶面积, 计算叶面积指数(leaf area index, LAI)。将叶面积分为叶面积(所有茎蘖的叶面积)和有效叶面积(有效茎蘖的叶面积)。

叶面积相关计算公式如下:

叶面积指数 (LAI)=绿色叶片总面积/单位土地总面积;

有效叶面积指数 (ELAI)=有效叶面积/单位土地总面积;

叶面积指数衰减速率($LAI_1 d^{-1}$)=($LAI_1 - LAI_2$)/($t_2 - t_1$); 式中, LAI_1 和 LAI_2 为前后 2 次测定的叶面积指数, t_1 和 t_2 为前后 2 次测定的时间 (d);

光合势 ($m^2 d/m^2$)=($LAI_1 + LAI_2$)/2×($t_2 - t_1$), 式中, LAI_1 和 LAI_2 为前后 2 次测定的叶面积指数, t_1 和 t_2 为前后 2 次测定的时间(d)。

1.3.6 产量及其构成因素

成熟期每小区调查 60 穴有效穗数, 按平均取样法每小区取 7 穴, 考察穗数、每穗颖花数、空秕粒数、结实率、千粒重等; 各小区实收 36 m², 单打单收和晒干后, 测定稻谷质量和含水率, 然后折算成标准含水量 13.5%记为实收产量。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2016 统计数据并整理, 采用 SPSS 22 软件对数据进行方差分析, 并采用最小显著性差异法 (LSD) 进行多重比较(5%概率水平), 利用 Origin 21 作图。

2 结果与分析

2.1 秧苗素质

由表 2 可知，与 BS 处理相比，PS 处理显著提高了秧苗成苗率、秧苗均匀度和根系盘结力。早、晚稻条件下各品种 PS 处理显著提高秧苗均匀度和根系盘结力。早稻各品种 PS 处理的秧苗均匀度和根系盘结力分别比 BS 处理高 5.68%~11.77%和 7.65%~16.87%，晚稻各品种 PS 处理的秧苗均匀度

和根系盘结力分别比 BS 处理高 9.81%~15.47%和 13.06%~24.21%。以上结果表明，PS 处理显著提高了秧苗均匀度和根系盘结力。

2.2 机插质量

播种方式极显著影响机插漏插率、机插苗数均匀度、机插 2~3 苗比例及机插 2~4 苗比例(表 3)。早稻各品种 PS 处理的漏插率比 BS 处理显著低 54.72%~67.17%，而机插苗数均匀度比 BS 处理显著高 79.17%~104.73%；晚稻各品种 PS 处理的漏插率

表 2 播种方式对水稻秧苗素质的影响

Table 2. Effects of sowing methods on seedling quality of rice

生长季 Growing season	品种 Variety	播种方式 Sowing method	苗高 Seedling height (cm)	叶龄 Leaf age	茎基宽 Stem base width (mm)	白根数 Number of white roots	成苗率 Seedling establishment rate (%)	秧苗均匀度 Seedling uniformity (%)	根系盘结力 Root interlocking force (N)	百株茎叶干质量 Shoot dry weight of 100 plants (g)
早稻 Early rice	昌两优 8 号	PS	14.99±0.16 a	2.16±0.02 a	1.53±0.03 a	6.96±0.25 a	98.24±0.06 a	80.45±0.87 a	23.33±0.21 a	1.57±0.02 a
	CLY8	BS	15.04±0.12 a	2.16±0.01 a	1.53±0.01 a	6.93±0.18 a	97.24±1.40 a	75.71±0.83 b	21.17±0.99 b	1.57±0.02 a
	昌两优馥香占	PS	13.94±0.26 a	2.16±0.04 a	1.54±0.02 a	8.65±0.20 a	98.34±0.97 a	80.72±0.45 a	23.62±0.32 a	1.56±0.02 a
	CLYFXZ	BS	13.74±0.34 a	2.16±0.03 a	1.52±0.01 a	8.02±0.71 b	97.14±0.28 a	76.38±0.56 b	21.30±0.51 b	1.56±0.02 a
	华盛优京贵占	PS	19.27±0.61 a	2.82±0.08 a	1.79±0.00 a	10.49±0.25 a	98.45±0.96 a	81.80±1.49 a	27.18±0.63 a	1.62±0.01 a
	HSYJGZ	BS	18.61±0.45 b	2.80±0.06 a	1.78±0.01 a	10.36±0.47 a	96.92±0.52 a	75.68±0.73 b	24.92±0.25 b	1.63±0.01 a
	菁美丝香	PS	14.69±0.55 a	2.45±0.10 a	1.55±0.05 a	8.20±0.13 a	97.30±1.19 a	81.17±0.99 a	22.93±0.28 a	1.55±0.02 a
	JMSX	BS	14.34±0.26 a	2.44±0.05 a	1.56±0.03 a	8.09±0.04 a	94.49±1.94 b	74.82±1.53 b	21.30±0.61 b	1.56±0.02 a
	聚香丝苗	PS	14.50±0.38 a	2.24±0.04 a	1.61±0.01 a	6.98±0.17 a	98.39±0.79 a	80.99±2.31 a	22.62±0.10 a	1.55±0.02 a
	JXSM	BS	14.39±0.46 a	2.21±0.03 a	1.62±0.02 a	6.87±0.07 a	96.66±1.05 a	73.03±1.81 b	20.18±0.23 b	1.56±0.02 a
	广粮新桂	PS	14.64±0.40 a	2.24±0.03 a	1.66±0.03 a	7.05±0.17 a	97.98±0.84 a	84.25±1.76 a	26.47±0.51 a	1.56±0.02 a
	GLXG	BS	14.48±0.11 a	2.20±0.03 a	1.65±0.02 a	7.00±0.18 a	96.17±1.28 a	75.38±1.23 b	22.65±0.41 b	1.55±0.02 a
	平均 Mean	PS	15.34±1.89 A	2.35±0.26 A	1.62±0.10 A	8.05±1.39 A	98.13±0.41 A	81.56±1.39 A	24.36±1.95 A	1.57±0.03 A
		BS	15.10±1.87 A	2.33±0.25 A	1.61±0.10 A	7.88±1.33 A	96.44±1.03 B	75.17±1.16 B	21.92±1.67 B	1.57±0.03 A
品种	Variety (V)		146.59**	144.62**	98.82**	129.85**	2.72*	2.95*	81.61**	12.25**
播种方式	Sowing method (S)		3.59	1.06	0.49	3.21	23.14**	208.16**	230.25**	0.03
晚稻 Late rice	昌两优 8 号	PS	16.88±0.23 a	2.10±0.00 a	1.92±0.05 a	12.22±0.04 a	98.38±0.99 a	82.51±1.66 a	41.00±0.90 a	1.82±0.02 a
	CLY8	BS	16.73±0.54 a	2.10±0.00 a	1.90±0.01 a	12.13±0.07 a	96.96±1.01 a	75.14±1.12 b	35.27±0.29 b	1.81±0.02 a
	昌两优馥香占	PS	16.50±0.24 a	2.10±0.00 a	1.82±0.02 a	12.29±0.08 a	98.41±1.05 a	83.90±0.20 a	38.52±0.45 a	1.81±0.02 a
	CLYFXZ	BS	16.13±0.19 a	2.10±0.00 a	1.82±0.02 a	12.26±0.12 a	97.12±0.65 a	76.25±1.86 b	34.07±0.72 b	1.81±0.02 a
	华盛优京贵占	PS	18.35±0.29 a	2.10±0.00 a	1.91±0.00 a	12.67±0.13 a	98.17±0.98 a	82.37±1.62 a	40.53±0.63 a	1.83±0.01 a
	HSYJGZ	BS	18.22±0.64 a	2.10±0.00 a	1.88±0.01 a	12.58±0.14 a	96.49±1.43 b	74.50±0.82 b	32.63±2.25 b	1.84±0.03 a
	菁美丝香	PS	17.90±0.07 a	2.42±0.08 a	2.04±0.03 a	12.09±0.04 a	98.38±0.35 a	83.57±0.68 a	32.75±0.88 a	1.75±0.03 a
	JMSX	BS	17.71±0.20 a	2.37±0.02 a	1.98±0.04 a	12.04±0.08 a	97.62±0.75 a	75.44±1.92 b	27.87±0.97 b	1.75±0.02 a
	聚香丝苗	PS	15.76±0.30 a	2.47±0.02 a	1.95±0.02 a	12.18±0.17 a	97.77±0.42 a	84.15±1.18 a	37.83±0.24 a	1.69±0.01 a
	JXSM	BS	15.35±0.37 a	2.44±0.02 a	1.90±0.04 a	12.09±0.10 a	96.98±0.45 a	73.61±0.78 b	33.10±2.30 b	1.68±0.01 a
	广粮新桂	PS	13.88±0.34 a	2.48±0.03 a	2.27±0.05 a	12.31±0.10 a	98.19±0.98 a	89.21±0.45 a	41.20±1.89 a	1.66±0.02 a
	GLXG	BS	13.69±0.21 a	2.49±0.01 a	2.23±0.05 a	12.22±0.08 a	96.83±0.82 a	77.26±0.37 b	35.47±0.73 b	1.65±0.01 a
	平均	PS	16.55±1.61 A	2.28±0.19 A	1.99±0.15 A	12.29±0.20 A	98.22±0.24 A	84.29±2.52 A	38.64±3.20 A	1.76±0.07 A
	Mean	BS	16.31±1.65 A	2.27±0.19 A	1.95±0.14 A	12.22±0.19 A	97.00±0.37 B	75.37±1.28 B	33.07±2.79 B	1.76±0.08 A
品种	Variety (V)		139.12**	303.62**	125.65**	22.34**	0.51	12.97**	34.00**	75.62**
播种方式	Sowing method (S)		4.55	1.12	9.09	4.36	17.40**	494.95**	184.23**	0.31

PS: 精准条播;BS: 传统撒播。数据为平均数±标准差 (n=3)。同列数据后的不同小写字母表示在不同播种方式下同一种品种在 5%水平上有显著性差异(LSD 法), 同列数据后的不同加粗大写字母表示播种方式间在 5%水平上有显著性差异(LSD 法)。*和**分别表示达到 5%和 1%显著水平。下同。

PS, Precise drill-sowing; BS, Traditional broadcast sowing. Data are shown as Mean±SD (n=3). PS, Precise drill sowing; BS, Broadcast sowing; CLY8, Changliangyou 8; CLYFXZ, Changliangyoufuxiangzhan; HSYJGZ, Huashengyoujingguizhan; JMSX, Jingmeisixiang; JXSM, Juxiangsimiao; GLXG, Guangliangxingui. Different lowercase letters in a column represent significant (P<0.05) differences between sowing methods for a variety (LSD test). Different bold capital letters within a column represent significant (P<0.05) differences between sowing methods (LSD test). * and ** indicate different significances at 5% and 1% levels, respectively. The same below.

表 3 播种方式对水稻机插质量的影响

Table 3. Effects of sowing methods on the mechanical transplanting quality of rice

生长季 Growing season	品种 Variety	播种方式 Sowing method	每穴机插苗数 Seedling number transplanted per hill	漏插率 Rate of missing hills (%)	机插苗数均匀度 Uniformity of seedling number per hill under mechanical transplanting (%)	机插 2~3 苗比例 Ratio of hills with 2-3 seedlings transplanted(%)	机插 2~4 苗比例 Ratio of hills with 2-4 seedlings transplanted(%)
早稻 Early rice	昌两优 8 号	精准条播 PS	2.73±0.09 a	4.79±0.16 b	50.08±1.51 a	53.75±1.25 a	75.00±1.08 a
	CLY8	传统撒播 BS	2.77±0.13 a	14.59±0.36 a	24.63±0.77 b	37.92±1.30 b	52.50±2.50 b
	昌两优馥香占	精准条播 PS	2.66±0.09 a	5.42±0.36 b	46.70±2.24 a	51.25±1.08 a	70.00±1.88 a
	CLYFXZ	传统撒播 BS	2.68±0.16 a	14.38±0.62 a	22.81±3.49 b	41.04±0.95 b	53.54±2.01 b
	华盛优京贵占	精准条播 PS	2.66±0.13 a	6.04±0.95 b	45.71±1.73 a	55.63±3.48 a	69.38±1.65 a
	HSYJGZ	传统撒播 BS	2.57±0.10 a	13.96±0.72 a	22.96±0.71 b	41.67±6.56 b	53.75±5.34 b
	菁美丝香	精准条播 PS	2.61±0.11 a	5.42±0.36 b	45.60±2.26 a	50.63±2.17 a	68.34±1.57 a
	JMSX	传统撒播 BS	2.69±0.09 a	14.59±0.36 a	25.45±3.33 b	41.25±0.63 b	54.79±2.37 b
	聚香丝苗	精准条播 PS	2.59±0.07 a	5.84±0.95 b	46.79±1.47 a	54.58±3.82 a	70.63±1.65 a
	JXSM	传统撒播 BS	2.66±0.11 a	14.59±0.95 a	23.88±1.24 b	42.09±4.43 b	54.79±4.85 b
	广粮新桂	精准条播 PS	2.65±0.05 a	6.04±0.36 b	45.68±1.18 a	56.25±2.86 a	71.46±0.95 a
	GLXG	传统撒播 BS	2.68±0.16 a	13.34±0.95 a	23.41±2.43 b	41.88±3.13 b	54.17±0.72 b
	平均 Mean	精准条播 PS	2.65±0.05 A	5.59±0.48 B	46.76±1.71 A	53.68±2.30 A	70.80±2.32 A
		传统撒播 BS	2.67±0.06 A	14.24±0.58 A	23.86±1.02 B	40.98±1.55 B	53.93±0.87 B
品种 Variety (V)			1.11	0.43	1.73	1.38	0.68
播种方式 Sowing method (S)			0.42	1167.93**	1116.37**	147.90**	375.36**
晚稻 Late rice	昌两优 8 号	精准条播 PS	2.72±0.06 a	2.92±0.36 b	55.69±3.02 a	60.84±4.85 a	78.54±4.77 a
	CLY8	传统撒播 BS	2.70±0.05 a	8.13±0.63 a	39.09±1.61 b	49.79±3.08 b	64.17±4.16 b
	昌两优馥香占	精准条播 PS	2.68±0.09 a	2.30±0.72 b	50.53±1.96 a	56.05±1.91 a	72.50±2.50 a
	CLYFXZ	传统撒播 BS	2.71±0.06 a	8.54±0.95 a	36.64±3.09 b	47.09±1.30 b	61.25±3.13 b
	华盛优京贵占	精准条播 PS	2.68±0.06 a	2.71±0.72 b	54.08±1.28 a	58.34±4.16 a	76.25±1.25 a
	HSYJGZ	传统撒播 BS	2.69±0.07 a	10.42±1.91 a	33.74±1.65 b	45.84±2.95 b	59.38±4.88 b
	菁美丝香	精准条播 PS	2.67±0.06 a	2.09±0.95 b	54.97±1.14 a	57.50±2.25 a	77.50±1.65 a
	JMSX	传统撒播 BS	2.68±0.09 a	8.96±0.95 a	30.53±1.68 b	47.08±1.44 b	60.63±1.88 b
	聚香丝苗	精准条播 PS	2.66±0.10 a	2.92±1.57 b	53.53±2.08 a	58.54±3.44 a	76.04±0.36 a
	JXSM	传统撒播 BS	2.64±0.08 a	10.00±1.88 a	32.94±0.85 b	46.46±2.89 b	60.00±4.96 b
	广粮新桂	精准条播 PS	2.70±0.08 a	3.33±1.91 b	53.98±2.78 a	56.25±1.08 a	76.25±2.86 a
	GLXG	传统撒播 BS	2.68±0.04 a	8.75±0.63 a	38.53±4.00 b	47.09±1.30 b	62.50±2.17 b
	平均 Mean	精准条播 PS	2.69±0.02 A	2.71±0.46 B	53.80±1.78 A	57.92±1.76 A	76.18±2.04 A
		传统撒播 BS	2.68±0.03 A	9.13±0.89 A	35.24±3.38 B	47.23±1.35 B	61.32±1.76 B
品种 Variety (V)			0.47	1.03	3.99**	1.47	1.40
播种方式 Sowing method (S)			0.01	247.70**	596.40**	130.53**	190.30**

比 BS 处理显著低 61.94%~76.67%，而机插苗数均匀度显著高 37.91%~80.05%。同时，早、晚稻各品种 PS 处理的机插 2~3 苗比例及机插 2~4 苗比例显著高于 BS 处理。机插每穴苗数在 PS 和 BS 处理间差异不显著。以上结果表明，PS 处理显著降低机插漏插率，而提高机插苗数均匀度、机插 2~3 苗比例及机插 2~4 苗比例。

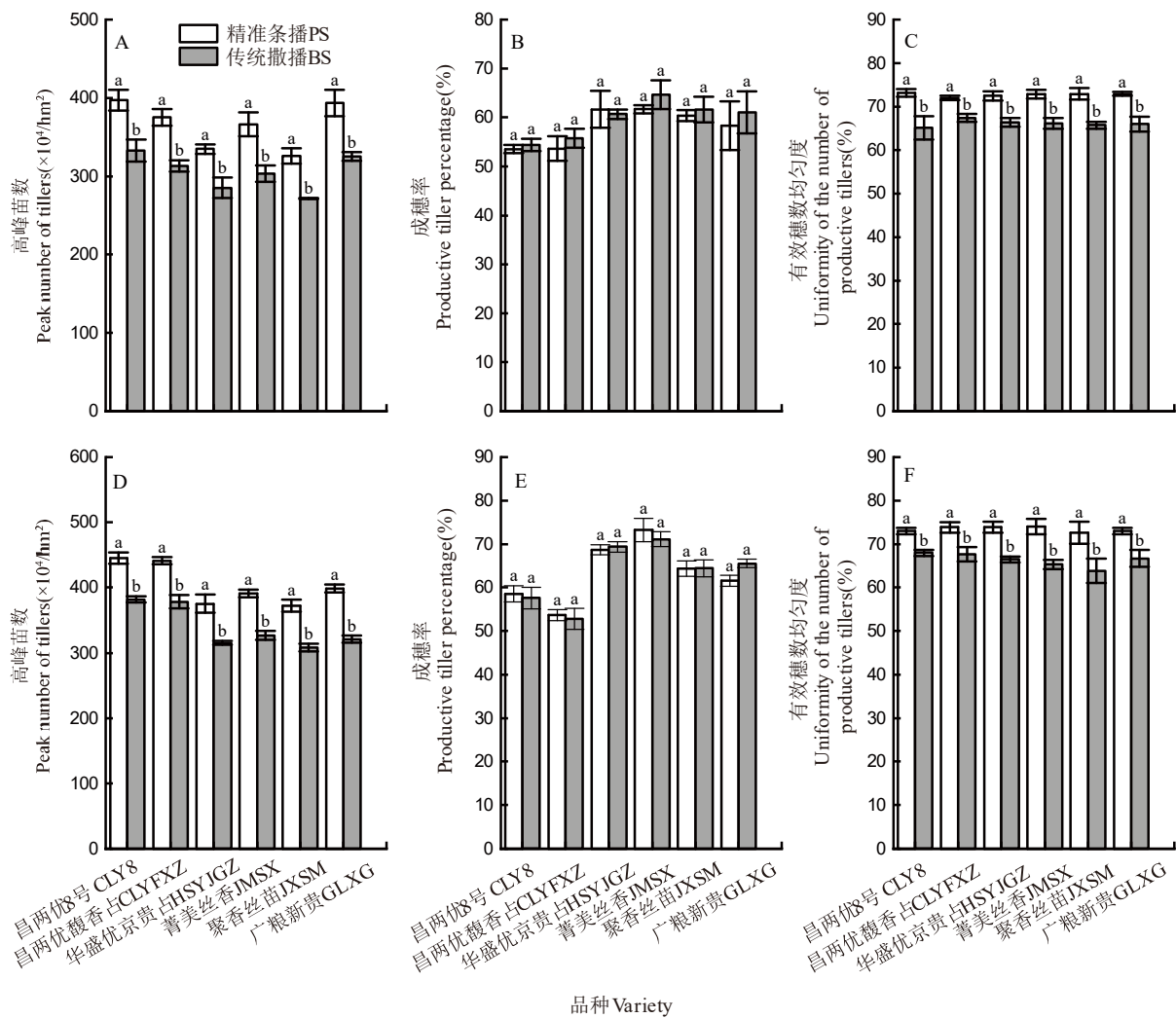
2.3 分蘖高峰苗数、成穗率及有效穗数均匀度

早稻各品种 PS 处理的分蘖高峰苗数和有效穗均匀度分别比 BS 处理高 17.36%~21.02% 和 6.67%~12.30%(图 2-A~C)，晚稻各品种 PS 处理的

分蘖高峰苗数和有效穗均匀度分别比 BS 处理高 16.49%~24.18%和 7.31%~13.72%(图 2-D~F)。而成穗率在播种方式间没有显著差异。以上结果表明，PS 处理可提高机插群体分蘖高峰苗数和有效穗数均匀度。

2.4 群体叶面积指数

播种方式对叶面积指数、叶面积指数衰减率和光合势产生极显著影响(表 4)。早稻各品种 PS 处理的齐穗期和成熟期叶面积指数分别比 BS 处理高 22.44%~31.83%和 10.58%~38.61%，晚稻各品种 PS 处理的齐穗期和成熟期叶面积指数分别比 BS 处理



A~C: 早稻群体高峰苗数、成穗率和有效穗均匀度; D~F: 晚稻群体高峰苗数、成穗率和有效穗均匀度。不同小写字母表示同一品种在不同播种方式下在 5%水平上有显著性差异。下同。

A-C, Peak number of tillers, productive tiller percentage, and uniformity of the number of productive tillers for early rice; D-F, Peak number of tillers, productive tiller percentage, and uniformity of the number of productive tillers for late rice. CLY8, Changliangyou 8; CLYFXZ, Changliangyoufuxiangzhan; HSYJGZ, Huashengyoujingguizhan; JMSX, Jingmeisixiang; JXSM, Juxiangsimiao; GLXG, Guangliangxingui; Different lowercase letters represent significant ($P<0.05$) differences under various sowing methods for a variety. The same below.

图 2 播种方式对水稻群体高峰苗数、成穗率和有效穗均匀度的影响

Fig. 2. Effects of sowing methods on peak number of tillers, productive tiller percentage, and uniformity of the number of productive tillers

高 13.68%~33.60%和 17.79%~36.74%; 同时, 早、晚稻各品种 PS 处理的齐穗期和成熟期有效叶面积指数显著高于 BS 处理。此外, 与 BS 相比, PS 显著提高叶面积指数衰减率和光合势。早稻昌两优 8 号、昌两优馥香占和菁美丝香 PS 处理的叶面积指数衰减率显著高于 BS 处理, 晚稻昌两优 8 号、昌两优馥香占和聚香丝苗 PS 处理的叶面积指数衰减率显著高于 BS 处理。与 BS 相比, 早晚稻各品种 PS 处理的光合势显著高于撒播(18.53%~33.87%和 15.63%~34.15%)。

2.5 干物质积累

播种方式对早晚稻各阶段干物质积累量和积累速率产生显著或极显著的影响(表 5)。与 BS 相比, PS 处理显著提高主要生育阶段的干物质积累量和积累速率。早稻各品种 PS 处理下移栽-拔节和拔节-齐穗阶段的干物质积累量分别比 BS 处理高 14.15%~23.33%和 10.61%~19.35%, 晚稻各品种 PS 处理下移栽-拔节和拔节-齐穗阶段的干物质积累量分别比 BS 处理高 18.89%~25.36%和 14.33%~20.36%。此外, 晚稻除了华盛优京贵占和菁

表 4 播种方式对水稻叶面积指数的影响
Table 4. Effects of sowing methods on the LAI of rice

生长季 Growing season	品种 Variety	播种方式 Sowing method	齐穗期 Heading stage		成穗期 Maturity stage		叶面积指数	光合势
			叶面积指数 LAI	有效叶面积 指数 ELAI	叶面积指数 LAI	有效叶面积 指数 ELAI	衰减率 Leaf area index decay rate (%)	Photosynthetic potential (m ² d/m ²)
早稻 Early rice	昌两优 8 号	精准条播 PS	4.41±0.14 a	4.03±0.06 a	1.86±0.26 a	1.83±0.29 a	9.10±0.65 a	87.85±5.27 a
	CLY8	传统撒播 BS	3.41±0.10 b	3.18±0.10 b	1.46±0.05 b	1.44±0.06 b	7.00±0.15 b	68.16±2.13 b
	昌两优馥香占	精准条播 PS	4.40±0.09 a	4.06±0.09 a	1.67±0.10 a	1.64±0.08 a	10.10±0.69 a	82.01±0.77 a
	CLYFXZ	传统撒播 BS	3.57±0.13 b	3.14±0.19 b	1.29±0.07 b	1.26±0.07 b	8.45±0.70 b	65.52±1.13 b
	华盛优京贵占	精准条播 PS	3.82±0.01 a	3.50±0.05 a	2.22±0.08 a	2.18±0.10 a	5.00±0.19 a	96.77±1.42 a
	HSYJGZ	传统撒播 BS	3.12±0.22 b	2.94±0.09 b	1.86±0.09 b	1.82±0.11 b	3.92±0.42 a	79.66±5.02 b
	菁美丝香	精准条播 PS	4.53±0.30 a	4.32±0.26 a	3.03±0.14 a	3.01±0.11 a	5.55±0.89 a	102.11±5.39 a
	JMSX	传统撒播 BS	3.64±0.04 b	3.48±0.02 b	2.74±0.13 b	2.70±0.09 b	3.34±0.62 b	86.15±1.13 b
	聚香丝苗	精准条播 PS	4.33±0.28 a	4.14±0.21 a	3.18±0.26 a	3.06±0.20 a	3.98±0.50 a	108.92±7.50 a
	JXSM	传统撒播 BS	3.51±0.13 b	3.32±0.18 b	2.56±0.14 b	2.51±0.16 b	3.27±0.36 a	88.08±3.54 b
	广粮新桂	精准条播 PS	4.10±0.04 a	3.92±0.07 a	2.19±0.10 a	2.15±0.10 a	6.60±0.24 a	91.19±1.81 a
	GLXG	传统撒播 BS	3.11±0.10 b	2.99±0.08 b	1.58±0.17 b	1.58±0.17 b	5.29±0.88 b	68.12±1.35 b
	平均 Mean	精准条播 PS	4.27±0.26 A	3.99±0.28 A	2.36±0.61 A	2.31±0.59 A	6.72±2.41 A	94.81±9.81 A
		传统撒播 BS	3.40±0.23 B	3.17±0.20 B	1.92±0.60 B	1.89±0.59 B	5.21±2.13 B	75.95±9.96 B
品种 Variety (V)			13.31**	17.57**	104.61**	102.99**	90.78**	41.65**
播种方式 Sowing method (S)			268.67**	326.48**	84.99**	80.75**	61.40**	232.03**
晚稻 Late rice	昌两优 8 号	精准条播 PS	4.97±0.21 a	4.61±0.22 a	1.10±0.04 a	1.10±0.04 a	13.79±0.74 a	84.92±3.03 a
	CLY8	传统撒播 BS	3.72±0.17 b	3.43±0.09 b	0.86±0.05 b	0.86±0.05 b	10.20±0.57 b	64.12±2.64 b
	昌两优馥香占	精准条播 PS	4.39±0.21 a	4.14±0.23 a	1.11±0.11 a	1.11±0.11 a	12.14±1.08 a	74.35±2.19 a
	CLYFXZ	传统撒播 BS	3.63±0.23 b	3.40±0.20 b	0.90±0.05 b	0.90±0.05 b	10.09±0.77 b	61.09±3.58 b
	华盛优京贵占	精准条播 PS	5.38±0.31 a	5.16±0.24 a	1.92±0.07 a	1.92±0.07 a	10.82±1.11 a	116.73±4.47 a
	HSYJGZ	传统撒播 BS	4.68±0.19 b	4.47±0.19 b	1.63±0.02 b	1.63±0.02 b	9.53±0.64 a	100.95±2.78 b
	菁美丝香	精准条播 PS	5.35±0.06 a	5.27±0.06 a	2.16±0.02 a	2.16±0.02 a	11.81±0.28 a	101.43±0.62 a
	JMSX	传统撒播 BS	4.42±0.15 b	4.24±0.11 b	1.82±0.03 b	1.82±0.03 b	9.64±0.65 b	84.26±1.65 b
	聚香丝苗	精准条播 PS	5.79±0.27 a	5.55±0.16 a	2.68±0.12 a	2.68±0.12 a	10.73±1.18 a	122.81±3.32 a
	JXSM	传统撒播 BS	4.35±0.14 b	4.21±0.12 b	1.96±0.09 b	1.96±0.09 b	8.22±0.17 b	91.55±3.22 b
	广粮新桂	精准条播 PS	5.65±0.05 a	5.32±0.05 a	2.71±0.09 a	2.71±0.09 a	10.14±0.17 a	121.32±1.85 a
	GLXG	传统撒播 BS	4.97±0.14 b	4.57±0.21 b	2.26±0.07 b	2.26±0.07 b	9.34±0.42 a	104.80±2.73 b
	平均 Mean	精准条播 PS	5.25±0.51 A	5.01±0.53 A	1.95±0.72 A	1.95±0.72 A	11.57±1.31 A	103.59±20.32 A
		传统撒播 BS	4.29±0.53 B	4.05±0.51 B	1.57±0.57 B	1.57±0.57 B	9.51±0.71 B	84.46±18.42 B
品种 Variety (V)			39.94**	52.10**	522.81**	522.81**	9.88**	271.94**
播种方式 Sowing method (S)			225.25**	282.27**	268.50**	268.50**	72.01**	408.21**

LAI, Leaf area index; ELAI, Effective leaf area index.

美丝香外, PS 处理显著提高其他 4 个品种齐穗-成熟阶段的干物质积累量。与 BS 处理相比, PS 处理显著提高早、晚稻主要生育时期群体干物质积累量(图 3 和图 4)。早稻各品种 PS 处理拔节期、齐穗期和成熟期的群体干物质积累量分别比 BS 处理高 14.15%~23.33%、11.56%~18.65% 和 12.28%~18.16%, 晚稻各品种 PS 处理的拔节期、齐穗期和成熟期的群体干物质积累量分别比 BS 高 18.89%~25.36%、15.52%~20.27%和 14.20%~25.67%。以上结果表明, PS 处理主要通过增加花前干物质积累和提高干物质积累速率来提高成熟期群体干物质积

累量。

2.6 产量及产量结构

播种方式显著影响群体有效穗数、群体颖花数和产量(表 6)。与 BS 相比, PS 处理显著提高机插产量, 早、晚稻各品种 PS 处理的产量分别比 BS 高 12.06%~15.50%和 8.54%~16.56%。对产量结构进行分析, PS 处理显著提高群体有效穗数和群体颖花数。早稻各品种 PS 处理的群体有效穗数和群体颖花数分别比 BS 处理高 14.48%~17.90%和 6.32%~17.90%, 晚稻 PS 处理的群体有效穗数和群体颖花数分别比 BS 高 16.66%~23.32%和 10.86%~19.93%。

表 5 播种方式对水稻主要生育阶段的群体干物质积累量和积累速率的影响

Table 5. Effects of sowing methods on the dry matter accumulation of population and rate at main growth periods of rice

生长季 Growing season	品种 Variety	播种方式 Sowing method	移栽-拔节		拔节-齐穗		齐穗-成熟	
			Transplanting-Jointing		Jointing-Heading		Heading-Maturity	
			干物质积累	干物质积累速	干物质积累	干物质积累速率	干物质积累	干物质积累速率
			DMA (t·hm ⁻²)	率 DMAR (kg·hm ⁻² d ⁻¹)	DMA (t·hm ⁻²)	DMAR (kg·hm ⁻² d ⁻¹)	DMA (t·hm ⁻²)	DMAR (kg·hm ⁻² d ⁻¹)
早稻 Early rice	昌两优 8 号	精准条播 PS	2.10±0.17 a	43.81±3.51 a	8.08±0.40 a	237.59±11.71 a	1.64±0.12 a	58.44±4.20 a
	CLY8	传统撒播 BS	1.80±0.11 b	37.52±2.33 b	6.77±0.27 b	199.30±7.92 b	1.55±0.63 a	55.31±22.36 a
	昌两优馥香占	精准条播 PS	2.05±0.06 a	41.86±1.19 a	7.46±0.23 a	213.21±6.63 a	2.06±0.67 a	76.34±24.89 a
	CLYFXZ	传统撒播 BS	1.73±0.07 b	35.33±1.34 b	6.74±0.14 b	192.59±4.09 b	1.33±0.12 b	49.41±4.33 b
	华盛优京贵占	精准条播 PS	2.34±0.09 a	54.36±2.04 a	6.15±0.32 a	205.05±10.74 a	2.09±0.15 a	65.17±4.55 a
	HSYJGZ	传统撒播 BS	2.05±0.15 b	47.73±3.38 b	5.56±0.10 b	185.36±3.44 b	1.49±0.07 a	46.60±2.11 b
	菁美丝香	精准条播 PS	2.22±0.12 a	49.37±2.78 a	5.97±0.24 a	180.80±7.40 a	2.66±0.28 a	98.50±10.27 a
	JMSX	传统撒播 BS	1.80±0.05 b	40.05±1.19 b	5.36±0.33 b	162.31±9.99 b	2.04±0.35 a	75.67±12.96 a
	聚香丝苗	精准条播 PS	2.33±0.10 a	51.75±2.24 a	6.04±0.36 a	188.53±11.19 a	1.96±0.60 a	67.72±20.73 a
	JXSM	传统撒播 BS	2.00±0.04 b	44.41±0.86 b	5.24±0.35 b	163.66±11.00 b	1.96±0.10 a	67.56±3.53 a
	广粮新桂	精准条播 PS	2.18±0.14 a	48.52±3.03 a	6.18±0.22 a	193.16±7.02 a	2.20±0.38 a	75.84±12.99 a
	GLXG	传统撒播 BS	1.81±0.03 b	40.17±0.77 b	5.45±0.34 b	170.35±10.77 b	1.95±0.45 a	67.11±15.39 a
	平均 Mean	精准条播 PS	2.20±0.12 A	48.28±4.72 A	6.65±0.90 A	203.06±20.52 A	2.10±0.33 A	73.67±13.91 A
		传统撒播 BS	1.87±0.13 B	40.87±4.53 B	5.85±0.71 B	178.93±15.66 B	1.72±0.30 B	60.28±11.55 B
品种 Variety (V)			8.18**	24.81**	45.11**	24.13**	3.06*	4.17**
播种方式 Sowing method (S)			96.78**	96.97**	66.84**	65.92**	8.68**	8.41**
晚稻 Late rice	昌两优 8 号	精准条播 PS	2.29±0.06 a	58.71±1.41 a	7.30±0.01 a	251.61±0.33 a	4.25±0.13 a	125.07±3.72 a
	CLY8	传统撒播 BS	1.91±0.05 b	49.17±1.28 b	6.12±0.15 b	210.99±5.00 b	3.57±0.07 b	105.00±2.20 b
	昌两优馥香占	精准条播 PS	2.13±0.07 a	53.14±1.74 a	7.10±0.09 a	228.99±2.94 a	3.48±0.41 a	105.41±12.50 a
	CLYFXZ	传统撒播 BS	1.78±0.04 b	44.44±1.10 b	6.21±0.30 b	200.43±9.58 b	2.68±0.43 b	81.19±13.08 b
	华盛优京贵占	精准条播 PS	2.62±0.18 a	74.88±5.28 a	6.30±0.33 a	217.37±11.52 a	4.10±0.42 a	117.23±11.95 a
	HSYJGZ	传统撒播 BS	2.09±0.06 b	59.72±1.82 b	5.48±0.22 b	188.96±7.42 b	3.84±0.30 a	109.88±8.56 a
	菁美丝香	精准条播 PS	2.55±0.06 a	72.74±1.74 a	6.42±0.41 a	178.19±11.49 a	4.51±0.13 a	160.98±4.71 a
	JMSX	传统撒播 BS	2.07±0.11 b	59.33±3.14 b	5.37±0.24 b	149.24±6.80 b	4.06±0.15 a	145.07±5.46 a
	聚香丝苗	精准条播 PS	2.58±0.14 a	73.71±3.98 a	6.68±0.33 a	215.27±10.51 a	4.47±0.23 a	124.06±6.49 a
	JXSM	传统撒播 BS	2.17±0.10 b	61.85±2.89 b	5.55±0.31 b	178.95±10.12 b	3.85±0.18 b	107.00±4.91 a
	广粮新桂	精准条播 PS	2.44±0.09 a	69.67±2.66 a	7.40±0.29 a	217.73±8.43 a	3.72±0.61 a	112.70±18.44 a
	GLXG	传统撒播 BS	2.03±0.03 b	58.11±0.82 b	6.30±0.28 b	185.16±8.10 b	2.46±0.65 b	74.66±19.55 b
	平均 Mean	精准条播 PS	2.44±0.19 A	67.14±9.03 A	6.87±0.47 A	218.19±23.85 A	4.09±0.41 A	124.24±19.43 A
		传统撒播 BS	2.01±0.14 B	55.44±3.96 B	5.84±0.41 B	185.62±21.18 B	3.41±0.67 B	103.80±24.95 B
品种 Variety (V)			18.34**	54.47**	15.59**	43.00**	13.15**	24.32**
播种方式 Sowing method (S)			183.44**	176.13**	130.59**	136.22**	31.74**	32.19**

DMA, Dry matter accumulation; DMAR, Dry matter accumulation rate.

而 PS 处理的每穗颖花数、结实率和千粒重与 BS 处理在早稻季没有显著差异，在晚稻季仅有较小差异。以上结果说明，PS 处理通过增加机插群体的有效穗数和群体颖花数进而提高水稻产量。

3 讨论

3.1 精准条播对水稻秧苗素质的影响

培育壮秧是提高水稻机插群体产量的关键途

径^[15]。毯苗机插秧需要整齐度高、盘根效果好、成毯性好及机插适应性强的秧苗^[20-21]。与大田育秧相比，秧盘育秧时盘内基质(或营养土)的养分是有限的^[22]。传统撒播下，种子分布不均，秧盘内种子密度大的区域，种子间竞争压力大；而种子密度小的区域，种子空间和养分供给过剩，最终导致种子出苗不整齐^[15,23]。本研究结果表明，与传统撒播相比，精准条播显著提高秧苗均匀度(表 2)。这是由于精准条播有效地对种子进行空间排序，使种子成行排

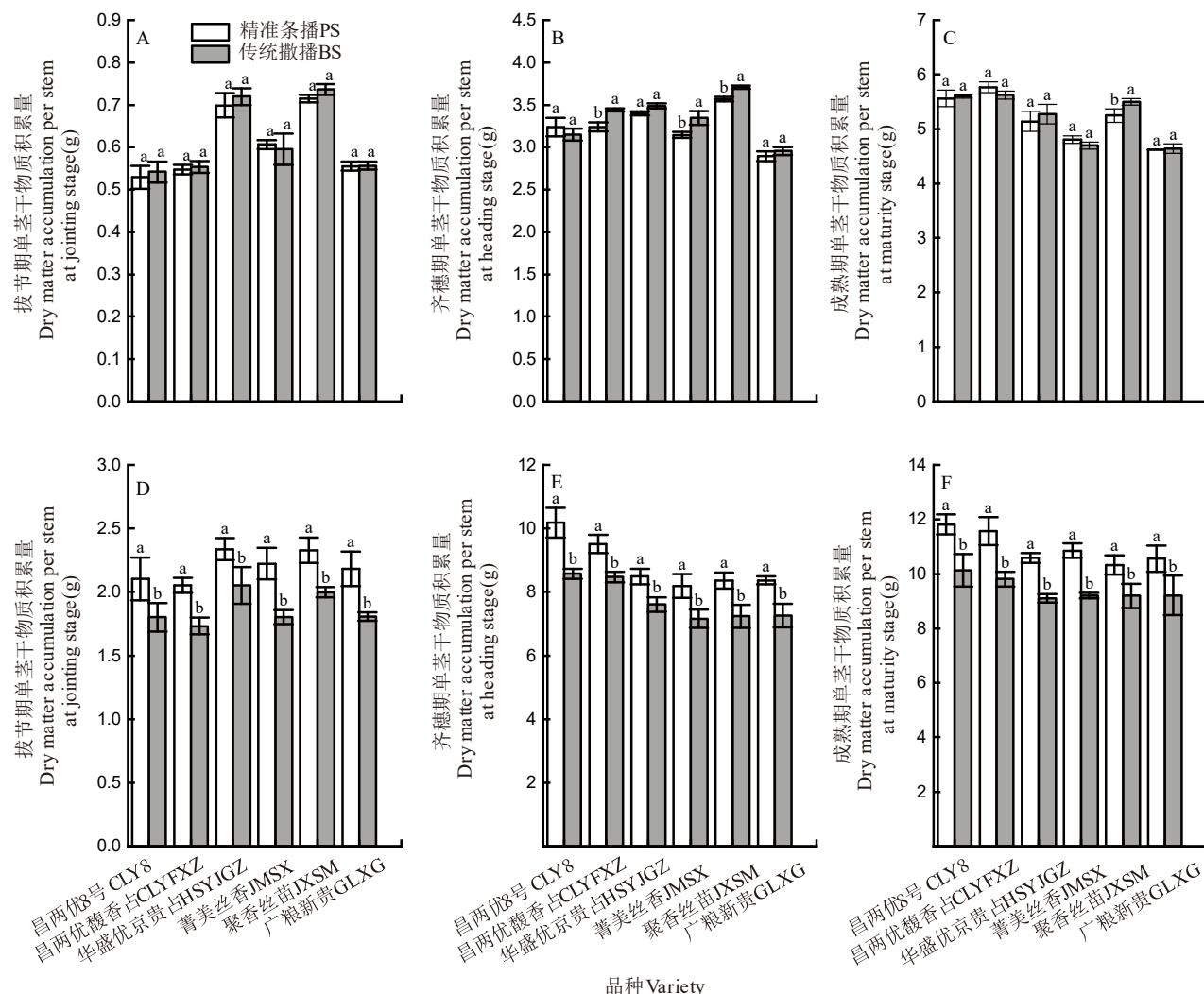


图3 播种方式对早稻主要生育时期单茎和群体干物质积累量的影响

Fig. 3. Effects of sowing methods on the dry matter accumulation of single stem and population at main growth stages of early rice

列, 分布均匀, 秧盘内每粒种子所处的空间和养分供给更为均衡, 促进秧苗叶片光合速率和氮素积累的增加, 促进秧苗均匀发育^[12, 15-16], 进而提高秧苗均匀度。根系是影响秧苗形态建成的重要器官^[24], 且根系盘结力是量化秧苗成毯的重要指标^[20]。本研究表明, 相比传统撒播, 精准条播显著提高秧苗根系盘结力(表2)。这可能是精准条播使种子在秧盘上分布均匀, 促进根系均匀分布, 且根系生长空间和养分资源分布均匀, 有利于提高根系活性, 促进根系均衡伸长增粗, 形成较为发达的地下根系, 进而使根系盘结力更大, 使秧苗在秧盘上的成毯性更好^[20, 25]。本研究还发现, 两种播种方式处理下秧苗茎基宽(<2.00 mm)均低于前人研究结果(>3.00 mm)^[12, 16], 这可能是由于广西稻区使用的杂交籼稻或常规籼稻品种粒型比较细长, 千粒重也比

较小, 培育出来的秧苗相对来说比较细长, 没有那么粗壮。我们将在后续试验示范时考虑开展配套壮秧剂类型、用量等方面的研究, 这样更有利于我们培育壮秧。

3.2 精准条播对水稻机插质量的影响

机插质量较好地反映了秧苗机插适应性^[20]。前人研究表明水稻群体均匀度和产量形成密切相关, 且精准条播机插最为显著的优势在于降低漏插率和提高机插均匀度^[12, 16]。精准条播的种子成行排列、分布均匀, 秧苗群体通风透光性好, 有利于培育壮秧, 且秧苗成行分布与插秧机取秧相对应, 因而能够降低机插时漏插率, 提高机插苗数均匀度^[16]。本研究表明, 与撒播相比, 精准条播显著降低漏插率, 提高机插苗数均匀度和机插 2~3 苗比例(表3), 这与前人研究结果一致^[12, 16]。本研究还发现精准条播

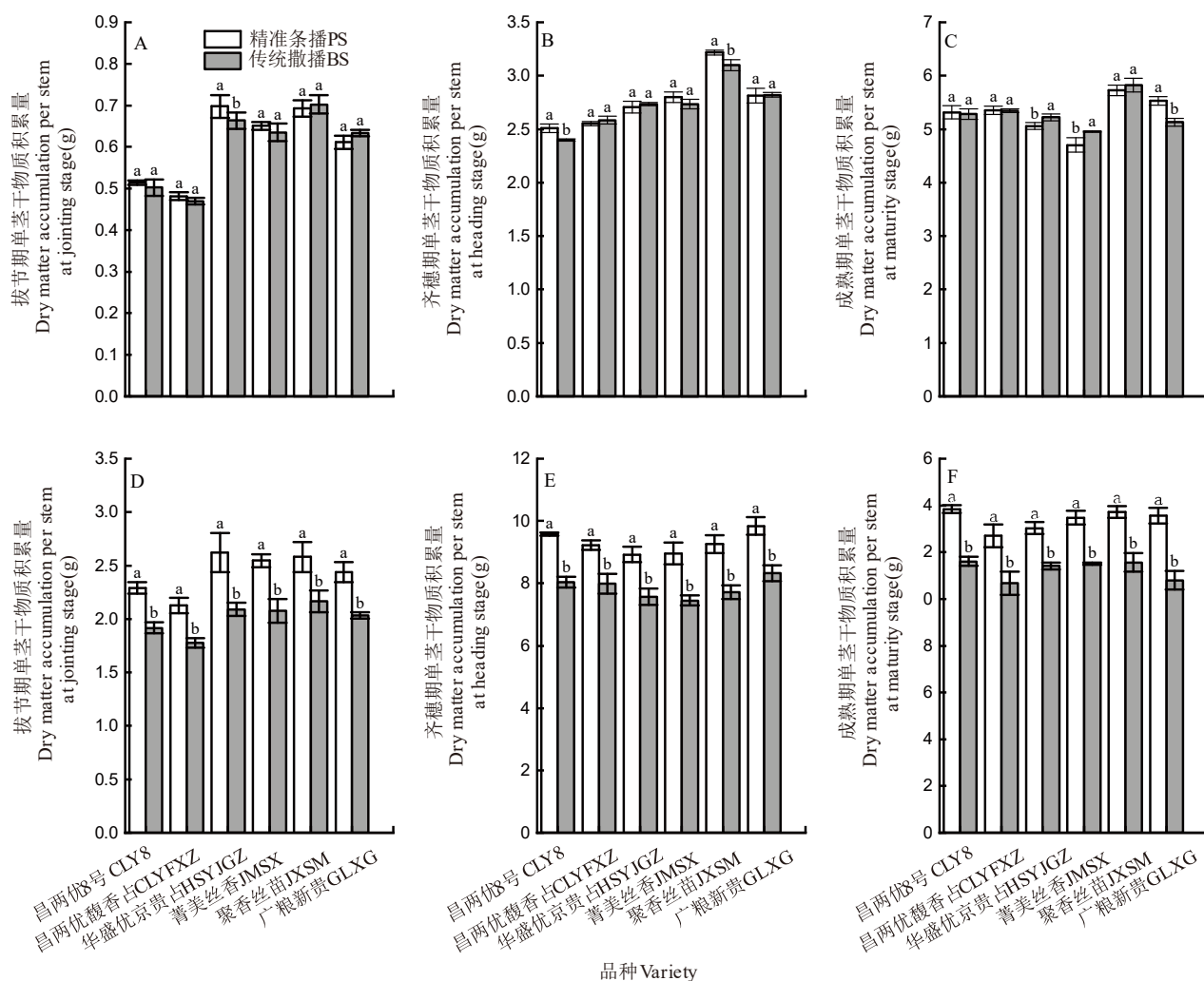


图4 播种方式对晚稻主要生育时期单茎和群体干物质积累量的影响

Fig. 4. Effects of sowing methods on the dry matter accumulation of single stem and population at main growth stages of late rice

漏插率的降幅、机插苗数均匀度和机插2~3苗比例增幅没有前人研究大。这可能是由于广西稻区使用的杂交籼稻或常规籼稻品种种子比较细长,种子千粒重也比较小,通过精准条播培育出来的秧苗素质(秧苗均匀度和根系盘结力除外)与撒播差异不显著,两种播种方式的机插质量差异较小。

3.3 精准条播对水稻干物质生产的影响

水稻干物质生产特性是光合产物在植株不同器官中积累与分配的结果^[26],叶面积指数、光合物质生产、干物质积累等群体特征与作物产量密切相关^[27-28]。叶面积指数和光合势能够较好反映作物群体大小和光合时间长短,与群体光合作用和物质生产紧密相关^[29]。较大的叶面积指数有利于抽穗前的物质生产和抽穗后光合势的提高^[30]。本研究表明,早晚季各品种精准条播处理移栽至拔节阶段和拔节至齐穗阶段的干物质积累量和积累速率显著高

于撒播(表5),使得成熟期群体干物质积累量显著高于撒播(图3)。这可能是由于精准条播育秧机插降低了机插漏插率^[16],提高了机插苗数均匀度^[12],进而提高群体高峰苗数和有效穗均匀度(图2),移栽-拔节阶段和拔节-齐穗阶段的干物质积累量增加(表5),群体叶面积指数^[14]、有效叶面积指数和光合势(表4)上升,最终提高了成熟期群体干物质积累量(图3和图4)。

3.4 精准条播对水稻产量的影响

水稻产量各构成因素直接决定产量。杨惠杰等^[31]和吴文革等^[32]研究认为群体颖花量对水稻产量贡献最大;吴桂成等^[33]认为高产主要通过提高单位面积有效穗数和每穗粒数实现。前人研究表明,通过调控有效穗数的方式来提高机插水稻产量最为有效^[34]。王亚梁等^[12, 14, 16]研究认为,精准条播机插主要通过增加群体有效穗数来提高水稻产量。本研究

表 6 播种方式对水稻产量及产量结构的影响
Table 6. Effects of sowing methods on rice yield and yield component

生长季 Growing season	品种 Variety	播种方式 Sowing method	有效穗数 Number of productive tillers ($\times 10^4/\text{hm}^2$)	每穗颖花数 Spikelets per panicle	群体颖花数 Spikelets of population ($\times 10^6/\text{hm}^2$)	结实率 Seed setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield (t/hm^2)
早稻 Early rice	昌两优 8 号	精准条播 PS	210.66 $\pm$ 9.14 a	145.16 $\pm$ 1.60 a	305.74 $\pm$ 11.48 a	77.95 $\pm$ 1.45 a	21.62 $\pm$ 0.16 a	5.17 $\pm$ 0.14 a
	CLY8	传统撒播 BS	181.61 $\pm$ 10.47 b	145.71 $\pm$ 4.08 a	264.34 $\pm$ 8.30 b	75.84 $\pm$ 1.01 a	21.90 $\pm$ 0.18 a	4.56 $\pm$ 0.05 b
	昌两优馥香占	精准条播 PS	199.68 $\pm$ 6.29 a	147.81 $\pm$ 2.00 a	295.06 $\pm$ 5.32 a	75.68 $\pm$ 0.77 a	21.80 $\pm$ 0.15 a	5.03 $\pm$ 0.07 a
	CLYFXZ	传统撒播 BS	174.42 $\pm$ 5.63 b	143.44 $\pm$ 5.40 a	250.26 $\pm$ 14.85 b	75.57 $\pm$ 1.17 a	22.00 $\pm$ 0.78 a	4.38 $\pm$ 0.04 b
	华盛优京贵占	精准条播 PS	204.60 $\pm$ 3.17 a	145.05 $\pm$ 8.14 a	296.65 $\pm$ 13.44 a	73.01 $\pm$ 1.10 a	24.40 $\pm$ 0.39 a	5.11 $\pm$ 0.14 a
	HSYJGZ	传统撒播 BS	175.71 $\pm$ 8.96 b	145.16 $\pm$ 7.26 a	254.62 $\pm$ 0.89 b	73.14 $\pm$ 0.39 a	24.18 $\pm$ 0.62 a	4.56 $\pm$ 0.08 b
	菁美丝香	精准条播 PS	225.56 $\pm$ 6.45 a	133.19 $\pm$ 7.62 b	300.55 $\pm$ 21.89 a	77.92 $\pm$ 3.48 a	20.99 $\pm$ 0.21 a	4.88 $\pm$ 0.05 a
	JMSX	传统撒播 BS	195.00 $\pm$ 4.30 b	145.01 $\pm$ 3.54 a	282.68 $\pm$ 0.79 a	76.90 $\pm$ 1.46 a	20.31 $\pm$ 0.47 a	4.35 $\pm$ 0.08 b
	聚香丝苗	精准条播 PS	192.35 $\pm$ 2.16 a	185.24 $\pm$ 4.84 b	356.26 $\pm$ 6.76 a	64.32 $\pm$ 3.57 a	20.36 $\pm$ 0.66 a	4.68 $\pm$ 0.11 a
	JXSM	传统撒播 BS	163.14 $\pm$ 7.72 b	195.93 $\pm$ 8.71 a	319.19 $\pm$ 1.01 b	63.91 $\pm$ 1.61 a	20.20 $\pm$ 0.88 a	4.15 $\pm$ 0.10 b
	广粮新桂	精准条播 PS	227.23 $\pm$ 11.88 a	137.85 $\pm$ 3.85 a	313.36 $\pm$ 21.86 a	77.53 $\pm$ 2.87 a	21.17 $\pm$ 0.38 a	5.29 $\pm$ 0.17 a
	GLXG	传统撒播 BS	196.42 $\pm$ 16.75 b	135.55 $\pm$ 3.41 a	265.90 $\pm$ 16.63 b	79.38 $\pm$ 0.79 a	20.98 $\pm$ 0.53 a	4.58 $\pm$ 0.04 b
	平均 Mean	精准条播 PS	210.01 $\pm$ 14.05 A	149.05 $\pm$ 18.55 A	311.27 $\pm$ 23.02 A	74.40 $\pm$ 5.29 A	21.72 $\pm$ 1.41 A	5.03 $\pm$ 0.22 A
		传统撒播 BS	181.05 $\pm$ 12.84 B	151.80 $\pm$ 21.95 A	272.83 $\pm$ 25.33 B	74.12 $\pm$ 5.40 A	21.59 $\pm$ 1.48 A	4.43 $\pm$ 0.17 B
	品种 Variety (V)		14.40**	78.58**	20.99**	45.16**	42.27**	23.09**
	播种方式 Sowing method (S)		100.61**	2.22	83.46**	0.19	0.59	331.17**
晚稻 Late rice	昌两优 8 号	精准条播 PS	260.46 $\pm$ 3.23 a	177.63 $\pm$ 2.11 a	462.70 $\pm$ 9.98 a	81.51 $\pm$ 0.11 a	22.18 $\pm$ 0.05 a	6.98 $\pm$ 0.11 a
	CLY8	传统撒播 BS	219.86 $\pm$ 7.21 b	181.18 $\pm$ 4.38 a	398.31 $\pm$ 16.03 b	80.86 $\pm$ 0.05 a	21.05 $\pm$ 0.10 b	6.17 $\pm$ 0.05 b
	昌两优馥香占	精准条播 PS	237.25 $\pm$ 7.89 a	179.19 $\pm$ 5.28 a	425.33 $\pm$ 24.27 a	78.51 $\pm$ 0.08 a	21.69 $\pm$ 0.19 a	6.66 $\pm$ 0.08 a
	CLYFXZ	传统撒播 BS	199.59 $\pm$ 9.13 b	177.86 $\pm$ 5.64 a	354.65 $\pm$ 6.07 b	74.94 $\pm$ 0.10 b	22.20 $\pm$ 0.59 a	6.04 $\pm$ 0.10 b
	华盛优京贵占	精准条播 PS	257.64 $\pm$ 5.36 a	166.51 $\pm$ 6.58 a	428.80 $\pm$ 9.87 a	78.15 $\pm$ 0.01 a	23.82 $\pm$ 0.08 a	6.48 $\pm$ 0.01 a
	HSYJGZ	传统撒播 BS	218.79 $\pm$ 5.18 b	165.13 $\pm$ 2.96 a	361.38 $\pm$ 14.26 b	76.95 $\pm$ 0.12 a	23.34 $\pm$ 0.16 a	5.97 $\pm$ 0.12 b
	菁美丝香	精准条播 PS	286.53 $\pm$ 8.73 a	175.48 $\pm$ 3.98 a	502.85 $\pm$ 20.71 a	80.95 $\pm$ 0.11 a	21.31 $\pm$ 0.43 a	6.74 $\pm$ 0.11 a
	JMSX	传统撒播 BS	232.34 $\pm$ 0.95 b	181.74 $\pm$ 3.71 a	422.24 $\pm$ 7.16 b	79.83 $\pm$ 0.07 a	20.87 $\pm$ 0.49 a	6.06 $\pm$ 0.07 b
	聚香丝苗	精准条播 PS	239.57 $\pm$ 0.94 a	204.31 $\pm$ 2.79 b	489.47 $\pm$ 8.17 a	76.30 $\pm$ 0.06 a	21.23 $\pm$ 0.20 a	6.56 $\pm$ 0.06 a
	JXSM	传统撒播 BS	198.49 $\pm$ 2.60 b	222.45 $\pm$ 3.89 a	441.52 $\pm$ 9.74 b	75.09 $\pm$ 0.10 a	20.39 $\pm$ 0.73 b	5.99 $\pm$ 0.10 b
	广粮新桂	精准条播 PS	245.42 $\pm$ 2.66 a	177.87 $\pm$ 2.50 a	436.47 $\pm$ 1.42 a	79.40 $\pm$ 0.26 a	23.29 $\pm$ 0.16 a	7.25 $\pm$ 0.26 a
	GLXG	传统撒播 BS	210.38 $\pm$ 5.96 b	176.38 $\pm$ 7.39 a	370.86 $\pm$ 11.20 b	77.73 $\pm$ 0.07 a	23.21 $\pm$ 0.06 a	6.22 $\pm$ 0.07 b
	平均 Mean	精准条播 PS	254.48 $\pm$ 18.30 A	180.17 $\pm$ 12.68 A	457.60 $\pm$ 32.88 A	79.14 $\pm$ 0.29 A	22.25 $\pm$ 1.08 A	6.78 $\pm$ 0.29 A
		传统撒播 BS	213.24 $\pm$ 13.05 B	184.12 $\pm$ 19.71 A	391.49 $\pm$ 35.17 B	77.57 $\pm$ 0.10 B	21.84 $\pm$ 1.26 B	6.08 $\pm$ 0.10 B
	品种 Variety (V)		44.44**	75.28**	39.66**	8.13**	63.91**	18.36**
	播种方式 Sowing method (S)		469.77**	6.80*	229.91**	6.66*	12.52**	365.91**

表明，与撒播相比，精准条播显著提高群体有效穗数和群体颖花数，进而显著提高产量(表 6)；而成穗率、单茎干质量、每穗颖花数在两个播种方式处理间无显著差异(图 2~4、表 6)。本研究中，精准条播与撒播处理每穴苗数没有显著差异，但对于撒播处理来说，漏插和部分机插穴苗数降低的同时增加了其他穴的机插苗数，由于栽插苗数多，无法充分发挥分蘖优势，还增加了无效分蘖的竞争，撒播处理机插群体高峰苗数和有效穗数降低。这些结果说明精准条播育秧机插降低机插漏插率，提高机插苗数均匀度，提高群体有效穗数和有效穗数均匀度^[12]，提高齐穗期叶面积指数^[14]和光合势(表 4)，进而提高成熟期干物质积累量(图 3 和图 4)，最终提高水稻产量(表 6)。

4 结论

与传统撒播育秧相比，精准条播育秧分别提高

秧苗均匀度和根系盘结力 5.68%~15.47%和 7.65%~24.21%，秧苗长势均匀。通过配套机插取秧，精准条播显著降低了机插漏插率(54.72%~76.67%)，提高了机插苗数均匀度 37.91%~104.73%，进而提高群体有效穗数及其均匀度、叶面积指数、光合势和干物质积累量，最终提高产量。

参考文献:

[1] 王飞, 彭少兵. 水稻绿色高产栽培技术研究进展[J]. 生命科学, 2018, 30(10): 1129-1136.
Wang F, Peng S B. Research progress in rice green and high-yield management practices[J]. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 2018, 30(10): 1129-1136. (in Chinese with English abstract)
[2] 黄玛兰, 李晓云, 曾琳琳. 农村劳动力价格上涨与劳动力转移对作物种植结构的区域性影响差异[J]. 农业现代化研究, 2019, 40(1): 98-108.
Huang M L, Li X Y, Zeng L L. Different regional impacts of rural labor price increase and rural labor mitigation on crop structure in China[J]. *Research of Agricultural*

- Modernization*, 2019, 40(1): 98-108. (in Chinese with English abstract)
- [3] 朱德峰, 张玉屏, 陈惠哲, 向镜, 张义凯. 中国水稻高产栽培技术创新与实践[J]. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3404-3414.
Zhu D F, Zhang Y P, Chen H Z, Xiang J, Zhang Y K. Innovation and practice of high-yield rice cultivation technology in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(17): 3404-3414. (in Chinese with English abstract)
- [4] 覃丽玲, 黄严, 曾永跃, 梁天锋, 唐国荣, 黄敏, 韦善清, 江立庚. 广西水稻生产全程机械化现状及对策研究[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(5): 283-287.
Qin L L, Huang Y, Zeng Y Y, Liang T F, Tang G R, Huang M, Wei S Q, Jiang L G. Current situation and countermeasures of full mechanization of rice production in Guangxi[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2014, 35(5): 283-287. (in Chinese with English abstract)
- [5] 陈世凡. 广西水稻生产机械化问题与思考[J]. 南方农机, 2016, 47(2): 22-24.
Chen S F. Problems and thoughts on mechanization of rice production in Guangxi[J]. *China Southern Agricultural Machinery*, 2016, 47(2): 22-24. (in Chinese)
- [6] 韦朝勇. 广西丘陵山区水稻机械化生产现状与发展建议[J]. 农业技术与装备, 2021(6): 46-47.
Wei C Y. The current situation and development suggestions of rice mechanization production in Guangxi hilly and mountainous areas[J]. *Agricultural Technology & Equipment*, 2021(6): 46-47. (in Chinese)
- [7] 徐峰, 刘德普, 彭俊明, 何林. 南方双季稻栽植机械化发展的影响因素和关键技术措施[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(2): 1-7.
Xu F, Liu D P, Peng J M, He L. Influencing factors and key technical measures of mechanization development of double cropping rice in South China[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2023, 44(2): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [8] 蒋明金, 李敏, 罗德强, 周维佳, 江学海, 姬广梅, 李立江. 播种量对不同粒型机插优质杂交籼秧苗素质、机插质量及产量的影响[J]. 四川农业大学学报, 2020, 38(4): 399-408, 422.
Jiang M J, Li M, Luo D Q, Zhou W J, Jiang X H, Ji G M, Li L J. Effect of seeding rate on seedling quality, transplanting quality and grain yield of mechanical transplanted high-quality indica rice with different grain shape[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2020, 38(4): 399-408, 422. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张桥, 向开宏, 孙永健, 武云霞, 郭长春, 唐源, 刘芳艳, 马均. 不同育秧方式下播种量和插秧机具对水稻产量及群体质量的影响[J]. 核农学报, 2020, 34(11): 2595-2606.
Zhang Q, Xiang K H, Sun Y J, Wu Y X, Guo C C, Tang Y, Liu F Y, Ma J. Effects of seeding amount and transplanting machines on rice yield and population quality under different seedling raising methods[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2020, 34(11): 2595-2606. (in Chinese with English abstract)
- [10] 董立强, 张义凯, 杨铁鑫, 冯莹莹, 马亮, 梁潇, 张玉屏, 李跃东. 北方粳稻密苗机插育秧对秧苗素质及取秧特性的影响[J]. 中国水稻科学, 2025, 39(4): 516-528
Dong L Q, Zhang Y K, Yang T X, Feng Y Y, Ma L, Liang X, Zhang Y P, Li Y D. Effect of dense sowing nursery on seedling quality and picking characteristics for mechanized transplanting in northern japonica rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2025, 39(4): 516-528. (in Chinese with English abstract)
- [11] 王亚梁, 朱德峰, 向镜, 陈惠哲, 张玉屏, 徐一成, 张义凯. 交稻低播量精量播种育秧及机插取秧特性[J]. 中国水稻科学, 2020, 34(4): 332-338.
Wang Y L, Zhu D F, Xiang J, Chen H Z, Zhang Y P, Xu Y C, Zhang Y K. Characteristics of seedling raising and mechanized transplanting of hybrid rice with a low seeding rate by precise seeding method[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2020, 34(4): 332-338. (in Chinese with English abstract)
- [12] 王亚梁, 朱德峰, 陈若霞, 方文英, 王晶卿, 向镜, 陈惠哲, 张玉屏, 湛江华. 杂交稻低播量精准条播育秧机插提高群体均匀度和产量的效应分析[J]. 中国农业科学, 2022, 55(4): 666-679.
Wang Y L, Zhu D F, Chen R X, Fang W Y, Wang J Q, Xiang J, Chen H Z, Zhang Y P, Chen J H. Beneficial effects of precision drill sowing with low seeding rates in machine transplanting for hybrid rice to improve population uniformity and yield[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(4): 666-679. (in Chinese with English abstract)
- [13] 朱德峰, 王亚梁, 陈惠哲, 张玉屏, 向镜. 杂交稻精准播种育秧机插技术[J]. 中国稻米, 2021, 27(5): 19-22.
Zhu D F, Wang Y L, Chen H Z, Zhang Y P, Xiang J. Hybrid rice machine transplanting technology with precision sowing and seedling raising [J]. *China Rice*, 2021, 27(5): 19-22. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王亚梁, 朱德峰, 陈惠哲, 张玉屏, 向镜, 王志刚, 张义凯. 籼粳杂交稻精准条播育秧机插减氮增产的效应研究[J]. 中国水稻科学, 2021, 35(5): 495-502.
Wang Y L, Zhu D F, Chen H Z, Zhang Y P, Xiang J, Wang Z G, Zhang Y K. Effects of precise drill sowing-based seedling raising of indica-japonica hybrid rice for mechanical transplanting on yield increase under nitrogen reduction conditions[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2021, 35(5): 495-502. (in Chinese with English abstract)
- [15] 唐承翰, 陈惠哲, 张玉屏, 向镜, 张义凯, 王志刚, 杨志远, 王亚梁. 精准条播与叠盘出苗互作对机插水稻群体均匀度及产量与构成的影响[J]. 农业工程学报, 2025, 41(15): 22-29.
Tang C H, Chen H Z, Zhang Y P, Xiang J, Zhang Y K, Wang Z G, Yang Z Y, Wang Y L. Effects of the interaction

- between precision drill sowing and seedling tray overlapping on population uniformity, yield and its composition of machine-transplanted rice[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2025, 41(15): 22-29. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王亚梁, 朱德峰, 张玉屏, 陈若霞, 向镜, 陈惠哲, 谌江华, 汪峰. 连作杂交晚稻精准条播长秧龄机插的生长及产量特性分析[J]. 作物学报, 2022, 48(1): 215-225. Wang Y L, Zhu D F, Zhang Y P, Chen R X, Xiang J, Chen H Z, Chen J H, Wang F. Analysis on the plant growth and yield formation of double cropping late season hybrid rice in machine transplanting with long seedling age by precision drill sowing[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(1): 215-225. (in Chinese with English abstract)
- [17] 唐承翰, 王晶卿, 陈惠哲, 张玉屏, 向镜, 张义凯, 王志刚, 怀燕, 陈佳峰, 王亚梁. 杂交稻条播育秧机插秧苗素质对产量的影响[J]. 中国水稻科学, 2025, 39(2): 245-254. Tang C H, Wang J Q, Chen H Z, Zhang Y P, Xiang J, Zhang Y K, Wang Z G, Huai Y, Chen J F, Wang Y L. Effects of hybrid rice seedling quality in drill-seeding nursery on grain yield in mechanical transplanting [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2025, 39(2): 245-254. (in Chinese with English abstract)
- [18] 方文英, 朱德峰, 怀燕, 陈佳麒, 陈惠哲, 王亚梁. 精准条播育秧提高单季杂交稻机插稀植群体产量的效应分析[J]. 作物杂志, 2023(5): 124-130. Fang W Y, Zhu D F, Huai Y, Chen J Q, Chen H Z, Wang Y L. Analysis on the effects of precision drill sowing in machine transplanting for single-season hybrid rice to improve yield of sparsely planted population[J]. *Crops*, 2023(5): 124-130. (in Chinese with English abstract)
- [19] 江达仁, 熊若愚, 吴家青, 毛付琴, 冯俊杰, 陶磊, 谢小兵, 潘晓华, 曾勇军, 王亚梁, 曾研华. 精准条播育秧机插下侧深施肥对优质早籼稻产量、品质形成及氮素吸收的影响[J]. 作物学报, 2024, 50(12): 3096-3106. Jiang D R, Xiong R Y, Wu J Q, Mao F Q, Feng J J, Tao L, Xie X B, Pan X H, Zeng Y J, Wang Y L, Zeng Y H. Effects of side-deep fertilization on yield formation and nitrogen absorption of high-quality early indica rice under precision sowing in line and machine planting[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(12): 3096-3106. (in Chinese with English abstract)
- [20] 唐磊, 邓飞, 周涛, 李珍珍, 贾媛丽, 周伟, 宋小勤, 吕天星, 陶有凤, 任万军, 陈勇. 露场叠盘暗化出苗与无纺布覆盖对杂交晚稻成苗特性的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(6): 23-34. Tang L, Deng F, Zhou T, Li Z Z, Jia Y L, Zhou W, Song X Q, Lu T X, Tao Y F, Ren W J, Chen Y. Effects of darkened emergence by stacked plates in open space and seedlings mulched with non-woven fabric on seedling characteristics of indica hybrid rice[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(6): 23-34. (in Chinese with English abstract)
- [21] 李玉祥, 解双喜, 刘扬, 丁艳锋, 王绍华, 刘正辉, 唐设, 丁承强, 陈琳, 李刚华. 营养液浓度对水稻机插水培毯状苗秧苗素质及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 201-209. Li Y X, Xie S X, Liu Y, Ding Y F, Wang S H, Liu Z H, Tang S, Ding C Q, Chen L, Li G H. Effects of nutrient solution concentrations on quality and yield of hydroponically grown long-mat rice seedlings under mechanical transplanting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(24): 201-209. (in Chinese with English abstract)
- [22] 史鸿志, 朱德峰, 张玉屏, 向镜, 张义凯, 朱从桦, 武辉, 陈惠哲. 生物降解秧盘及播种量对机插水稻秧苗素质及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 27-34. Shi H Z, Zhu D F, Zhang Y P, Xiang J, Zhang Y K, Zhu C H, Wu H, Chen H Z. Effects of biodegradable seedling tray and sowing rate on seedling quality and yield of mechanical transplanting rice[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(24): 27-34. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王亚梁, 朱德峰, 向镜, 陈惠哲, 张玉屏, 徐一成, 张义凯. 杂交水稻机插定位定量播种技术[J]. 杂交水稻, 2020, 35(3): 42-45. Wang Y L, Zhu D F, Xiang J, Chen H Z, Zhang Y P, Xu Y C, Zhang Y K. Sowing techniques of seed location and quantitation for machine transplanting of hybrid rice [J]. *Hybrid Rice*, 2020, 35(3): 42-45. (in Chinese with English abstract)
- [24] 徐春梅, 陈丽萍, 王丹英, 陈松, 章秀福, 石庆华. 低氧胁迫对水稻幼苗根系功能和氮代谢相关酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(8): 1625-1634. Xu C M, Chen L P, Wang D Y, Chen S, Zhang X F, Shi Q H. Effects of low oxygen stress on the root function and enzyme activities related to nitrogen metabolism in roots of rice seedlings[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(8): 1625-1634. (in Chinese with English abstract)
- [25] 谭雪明, 彭龙龙, 李木英, 石庆华, 潘晓华. 播种量对机插双季稻分蘖及成穗特性的影响[J]. 江西农业大学学报, 2019, 41(2): 207-218. Tan X M, Peng L L, Li M Y, Shi Q H, Pan X H. Effects of seeding quantity on tillering and panicle formation in mechanically transplanted double-cropping rice[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis: Natural Sciences Edition*, 2019, 41(2): 207-218. (in Chinese with English abstract)
- [26] 刘琦, 胡剑锋, 周伟, 杨志平, 陈勇, 任万军. 四川盆地不同类型水稻品种机插栽培的干物质生产及产量特性分析[J]. 中国水稻科学, 2019, 33(1): 35-46. Liu Q, Hu J F, Zhou W, Yang Z P, Chen Y, Ren W J. Dry matter production and yield characteristics of machine-transplanted rice varieties falling into different types in Sichuan Basin[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2019,

- 33(1): 35-46. (in Chinese with English abstract)
- [27] Wang B, Cai W W, Li J L, Wan Y F, Li Y E, Guo C, Wilkes A, You S C, Qin X B, Gao Q Z, Liu K W. Leaf photosynthesis and stomatal conductance acclimate to elevated $[CO_2]$ and temperature thus increasing dry matter productivity in a double rice cropping system[J]. *Field Crops Research*, 2020, 248: 107735.
- [28] Wang C, Zhou L B, Zhang G B, Gao J, Peng F L, Zhang C L, Xu Y, Zhang L Y, Shao M B. Responses of photosynthetic characteristics and dry matter formation in waxy sorghum to row ratio configurations in waxy sorghum-soybean intercropping systems[J]. *Field Crops Research*, 2021, 263: 108077.
- [29] 郭保卫, 王岩, 蔡嘉鑫, 唐健, 唐闯, 胡雅杰, 邢志鹏, 张洪程. 氮肥用量对机插优质晚稻光合物质生产的影响[J]. *核农学报*, 2023, 37(4): 833-843.
- Guo B W, Wang Y, Cai J X, Tang J, Tang C, Hu Y J, Xing Z P, Zhang H C. Effect of nitrogen application on photosynthetic matter production of mechanical transplanting high quality late rice[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2023, 37(4): 833-843. (in Chinese with English abstract)
- [30] 苏祖芳, 郭宏文, 李永丰, 张洪程, 张海泉. 水稻群体叶面积动态类型的研究[J]. *中国农业科学*, 1994, 27(4): 23-30.
- Su Z F, Guo H W, Li Y F, Zhang H C, Zhang H Q. Study on dynamic types of leaf area of rice population[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1994, 27(4): 23-30. (in Chinese with English abstract)
- [31] 杨惠杰, 李义珍, 杨仁崔, 姜照伟, 郑景生. 超高产水稻的干物质生产特性研究[J]. *中国水稻科学*, 2001, 15(4): 265-270.
- Yang H J, Li Y Z, Yang R C, Jiang Z W, Zheng J S. Dry matter production characteristics of super high yielding rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2001, 15(4): 265-270. (in Chinese with English abstract)
- [32] 吴文革, 张洪程, 吴桂成, 翟超群, 钱银飞, 陈烨, 徐军, 戴其根, 许珂. 超级稻群体籽粒库容特征的初步研究[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(2): 250-257.
- Wu W G, Zhang H C, Wu G C, Zhai C Q, Qian Y F, Chen Y, Xu J, Dai Q G, Xu K. Preliminary study on super rice population sink characters[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(2): 250-257. (in Chinese with English abstract)
- [33] 吴桂成, 张洪程, 钱银飞, 李德剑, 周有炎, 徐军, 吴文革, 戴其根, 霍中洋, 许珂, 高辉, 徐宗进, 钱宗华, 孙菊英, 赵品恒. 粳型超级稻产量构成因素协同规律及超高产特征的研究[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(2): 266-276.
- Wu G C, Zhang H C, Qian Y F, Li D J, Zhou Y Y, Xu J, Wu W G, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Gao H, Xu Z J, Qian Z H, Sun J Y, Zhao P H. Rule of grain yield components from high yield to super high yield and the characters of super-high yielding japonica super rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(2): 266-276. (in Chinese with English abstract)
- [34] 吴文革, 杨剑波, 张健美, 周永进, 蔡海涛, 许有尊, 吴然然, 陈刚. 穴基本苗对机插杂交中籼稻群体构建及产量的影响[J]. *安徽农业大学学报*, 2014, 41(3): 401-405.
- Wu W G, Yang J B, Zhang J M, Zhou Y J, Cai H T, Xu Y Z, Wu R R, Chen G. Effects of seedling number per hole on population quality and yield of mechanical transplanting middle-season indica hybrid rice[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2014, 41(3): 401-405. (in Chinese with English abstract)