DOI: 10.3724/SP.J.1006.2021.02032

水稻机械精量有序抛秧栽培的产量形成和生长发育特征研究

王慰亲¹ 唐启源^{1,*} 陈元伟¹ 贾巍¹ 罗友谊¹ 王小卉¹ 郑华斌¹
熊娇军²

¹ 湖南农业大学农学院, 湖南长沙 410128; ² 大通湖区宏硕生态农业农机合作社, 湖南益阳 413207

摘 要: 水稻机械精量有序抛秧栽培是指通过有序抛秧机进行水稻分行分茔有序抛栽的机械化种植方式, 解决了传统抛秧栽培田间种植无序和作业效率低等问题。本研究以手插秧和手抛秧模式作为对照, 通过 2018—2019 年的比较试验系统探究了精量有序机抛秧模式下水稻产量形成的特点及生长发育特性。研究表明, 精量有序机抛秧较手插秧增产 22.4%~28.3%, 较手抛秧增产 2.8%~8.9%。生长发育特性方面, 精量有序机抛秧群体通风性好, 生育后期的干物质同化积累能力强, 花后干物质积累量较手插秧和手抛秧分别增加 52.8%和 23.4%; 叶片衰老较慢、库充实度高, 与手插秧相比, 其单位面积有效穗数显著增加 20.9%~64.2%; 与手抛秧相比, 结实率增加 3~5 个百分点, 进而促进其高产。然而, 精量有序机抛秧栽培模式下抛秧机及配套育秧技术等方面还有待改进以进一步发挥高产潜能, 同时围绕精量有序机抛秧技术的立苗缓青特征、分蘖发生特性和根系生长特点等方面的研究还有待深入开展。

关键词: 水稻; 有序机抛秧; 产量; 生长发育特性

Evaluation of orderly mechanical seedling-broadcasting on yield formation and growth characteristics of rice

WANG Wei-Qin¹, TANG Qi-Yuan^{1,*}, CHEN Yuan-Wei¹, JIA Wei¹, LUO You-Yi¹, WANG Xiao-Hui¹, ZHENG Hua-Bin¹, and XIONG Jiao-Jun²

¹ College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, Hunan, China; ² The Corporation of Hongshuo Agriculture, Yiyang 413207, Hunan, China

Abstract: Orderly mechanical seedling-broadcasting refers to the rice establishment methods that throw-transplanted the rice seedlings to the field in rows and lines by seedling broadcasting machine. Which are suggested to prominently increase the uniformity and efficiency of rice crops compared with manual seedling broadcasting. The present study was carried out to compare the differences between orderly mechanical seedling-broadcasting, manual transplanting and manual seedling broadcasting regarding yield formation and growth characteristics of rice. The results suggested that the grain yield of rice under orderly mechanical seedling-broadcasting was increased compared with manual transplanting and manual seedling broadcasting by 22.4%–28.3% and 2.8%–8.9%, respectively. On the aspect of growth traits, the orderly mechanical seedling-broadcasting was characterized as good ventilation, better assimilation ability of dry matter at late growth stages, delayed leaf senescence and high grain filling percentage, which increased the panicle numbers per square meter by 20.9%–64.2% compared with that of manual transplanting and increased the seed setting rate as compared with manual seedling-broadcasting. However, in order to further develop the potential of high yield, the techniques and planting machines of orderly mechanical seedling-broadcasting still need to be improved. In addition, the process of seedling recovery, tiller development and root growth traits of rice under orderly mechanical seedling-broadcasting should be explored in future studies.

Keywords: rice; orderly mechanical seedling-broadcasting; yield; growth characteristics

水稻是我国最重要的粮食作物之一, 我国人多 地少, 对粮食有着巨大的需求, 然而随着经济的发

本研究由国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-01-26)资助。

This study was supported by the Earmarked Fund for China Agriculture Research System (CARS-01-26).

* 通信作者(Corresponding author): 唐启源, E-mail: cntqy@aliyun.com

第一作者联系方式: E-mail: wwqbrad@163.com

Received (收稿日期): 2020-05-12; Accepted (接受日期): 2020-11-13; Published online (网络出版日期): 2020-12-23.

URL: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20201223.0844.002.html>

展和城市化进程的加快,农村劳动力的迅速减少使得传统人工栽插的种植方式不能满足当前水稻生产的需求。为保证口粮安全,我国传统水稻生产方式必须朝机械化、轻简化的方向转型。

抛秧栽培是采用塑盘育苗或旱育苗,育出根部带土球(钵)的秧苗,移栽时依靠带土球(钵)秧苗的自身重力,通过人工或机械均匀的抛栽到田里的一种轻简型栽培方式^[1]。和传统人工移栽相比,抛秧栽培大幅度地减轻了移栽过程中的劳动力投入。自20世纪80年代以来,我国对抛秧栽培进行了大量的科学研究和示范推广工作,抛秧种植面积迅速增加^[2-4]。

抛秧栽培主要有手工抛栽和机械抛栽2种形式,而我国目前以手工抛栽为主。前人围绕手抛秧稻的生长发育特性和产量形成特点进行了大量研究,发现手抛秧的生长特点主要包括移栽后缓苗期短、植伤轻,根系发达,前期分蘖多,单位面积穗数和有效颖花数多^[4-5]。然而,和手插秧稻相比,手抛秧的最大特点是种植无序,不成行成株,田间通风透光条件差,湿度大,导致下部叶片衰老腐烂、病虫害滋生严重、易倒伏等^[6-8]。同时,手抛秧移栽作业效率低,在当前农村劳动力严重缺乏的现状和土地流转承包、水稻规模化生产的发展趋势下,传统手抛秧正朝机抛秧发展转型。

国内外围绕抛秧机械及配套栽培技术开展了多年研究^[9],目前我国应用的抛秧机主要有无序抛秧机和有序抛秧机2种类型^[10]。其中无序抛秧机虽然作业效率高,省工省成本,但是其抛秧无序,秧苗在田间分布杂乱,田间通风透光差,产量优势难以发挥^[11]。为了解决无序抛秧存在的问题,前人进行了播栽、摆栽等有序方式的尝试研究^[12-13];湖南翼地农机于2018年发明生产了国内第一台由井关机头牵引的高速有序抛秧机,现由湖南中联重机有限公司收购并加以完善,可实现水稻分行分宽有序抛栽,基本解决了传统人工抛秧或机抛秧种植无序的问题,同时可满足不同稻作季别、不同品种的种植要求,是未来发展的重要方向^[14]。本课题组近几年围绕水稻精量有序机抛栽培技术开展了相关研究并在湖南多地推广示范,发现和传统插秧或手抛秧相比,其增产效应明显。然而目前围绕精量有序机抛栽培的研究较少,其生长发育特性和高产形成特点还鲜有研究报道。

本研究以国内第一台由井关机头牵引的高速有序抛秧机(2ZP-13)实现水稻有序抛秧,通过比较其

与手抛秧和手插秧在产量形成、干物质积累转运、分蘖发生等方面的差异,探究精量有序机抛栽培水稻的产量形成特点和生长发育特性,以期为水稻机械精量有序栽培技术的研发应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验地点

试验于2018—2019年在湖南省益阳市大通湖区千山红镇(112°15'28"E, 29°01'19"N)进行。土壤成土母质系河湖沉积物,土壤基础地力情况为 pH 8.02,有机质 27.9 g kg⁻¹,碱解氮 117.37 mg kg⁻¹,有效磷 15.57 mg kg⁻¹,缓效钾 335.3 mg kg⁻¹,速效钾 111.07 mg kg⁻¹。供试材料为黄华占(常规籼稻)和甬优 1538(籼粳杂交稻)。

1.2 试验设计

试验采用裂区设计,主区处理为种植方式,分别为手插秧、手抛秧和精量有序机抛秧,副区处理为品种,分别为黄华占和甬优 1538。试验设3次重复,小区面积为 81 m² (9 m × 9 m),小区之间做田埂隔开并且覆膜,防止小区间窜水窜肥。2018年于5月27日播种,6月15日进行移栽,2019年于5月27日播种,6月17日进行移栽。手抛秧和有序机抛秧分别用353孔塑料软盘和416孔专用秧盘,每孔3~5粒,泥浆湿润育秧;手插秧采用传统湿润育秧,播种量 15 kg hm⁻²,每穴栽插3粒谷秧苗。3种植植方式的移栽密度保持一致,手插秧行株距为 20 cm × 20 cm;精量有序机抛秧行株距为 25 cm × 16 cm,手抛秧密度为 25 穴 m⁻²。试验各品种按照 N P₂O₅ K₂O = 1.0 0.5 1.0 的比例进行施肥,甬优 1538 施纯 N 240 kg hm⁻²、P₂O₅ 120 kg hm⁻²、K₂O 240 kg hm⁻²,黄华占施纯 N 195 kg hm⁻²、P₂O₅ 97.5 kg hm⁻²、K₂O 195 kg hm⁻²,其中氮肥按基肥(50%)、分蘖肥(20%)和穗肥(30%)施用,磷肥全部用作基肥,钾肥按基肥和穗肥各 50%施用。其他田间管理方式同当地高产栽培习惯。

1.3 测定指标

1.3.1 产量与产量构成 于成熟期,按对角线取样法,从小区中间选取代表性植株 5 丛调查有效穗数(实粒数大于5粒的稻穗),手工脱粒后用自来水分离实粒和秕粒,实粒称取3份30 g,秕粒称取3份3 g,计数后在 70℃下烘干至恒质量,考察每穗粒数、结实率和千粒重(恒质量),茎秆和叶在 80℃下烘干至恒重,测定干物质质量。成熟期总干物质质量为样

本茎秆和叶、实粒、秕粒和枝梗干质量之和。从每小区中心收割 5 m²用于测产,含水量按粳稻 14%、籼稻 13%进行折算。

1.3.2 干物质积累 于分蘖中期、幼穗分化期、抽穗期、齐穗后 10 d (FL+10 d)和收获期(PM)取样,每个小区取 6 穴,然后剪去根,按叶、茎+鞘、穗分开,置于 105℃。恒温下杀青 30 min, 80℃鼓风机干燥箱烘干至恒重,冷却至恒温后称重,计算干物质重量

1.3.3 分蘖动态 于移栽返青后各处理定 0.25 m²面积秧苗,调查基本苗,每 3 d 调查 1 次分蘖数,直至分蘖数保持稳定下降后或到齐穗期为止。

1.3.4 SPAD 值及株高 于分蘖中期、幼穗分化期、齐穗期、齐穗后 10 d 采用 SPAD 仪对每小区生长均匀具有代表性的(除开边 3 行)水稻主茎的上三叶进行相对叶绿素含量的测量,每片叶子分别测叶片上部、中部、下部 3 个位置,得出平均值,每个小

区测量 3 株。

1.3.5 风速和阵风速度 为比较精量有序机抛秧与手插秧、手抛秧的田间通风性差异,于 2019 年 8 月 28 日 15 时至 8 月 29 日 15 时(齐穗期),采用 HOBO datalogger 测定不同种植方式下水稻群体的风速和阵风速度。测定群体风速时各品种在不同种植方式下的株高、生物量等基础数据如表 1 所示。

1.4 数据处理与分析

采用Microsoft Excel对数据进行收集整理和作图,采用Statistix 8.0进行统计分析, SigmaPlot 10.0 作图。处理间的样本均值在最小差异显著法(LSD)进行比较。

2 结果与分析

2.1 生育期

3 种植方式的生育期差异较小(表 2)。2018 年

表 1 田间群体风速测定时各品种和种植方式的群体特征指标

Table 1 Growth characteristics of rice varieties and planting model with the measurement of wind speed

品种 Variety	种植方式 Planting pattern	株高 Plant height (cm)	地上部生物量 Above-ground biomass (g m ⁻²)	叶面积指数 Leaf area index
黄华占	手插秧 Manual transplanting	104.2	863.5	4.13
Huanghuazhan	手抛秧 Manual seedling-broadcasting	109.7	1325.7	7.23
	机抛秧 Mechanical seedling-broadcasting	105.1	1172.8	6.88
甬优 1538	手插秧 Manual transplanting	104.6	1042.4	4.32
Yongyou 1538	手抛秧 Manual seedling-broadcasting	105.4	1602.6	7.84
	机抛秧 Mechanical seedling-broadcasting	103.6	1248.1	7.26

表 2 黄华占和甬优 1538 在不同种植方式下的生育期表现

Table 2 Growth durations of Huanghuazhan and Yongyou 1538 under different rice establishment methods

年份 Year	品种 Variety	种植方式 Establishment methods	播种-移栽 Seeding- Transplanting (d)	移栽-齐穗 Transplanting- Heading (d)	齐穗-成熟 Heading- Maturity (d)	全生育期 Growth durations (d)
2018	黄华占	手插秧 Manual transplanting	20	65	38	123
	Huanghuazhan	手抛秧 Manual seedling-broadcasting	20	65	36	121
		机抛秧 Mechanical seedling-broadcasting	20	65	36	121
	甬优 1538	手插秧 Manual transplanting	20	74	50	144
	Yongyou 1538	手抛秧 Manual seedling-broadcasting	20	73	49	142
		机抛秧 Mechanical seedling-broadcasting	20	73	49	142
2019	黄华占	手插秧 Manual transplanting	21	65	33	119
	Huanghuazhan	手抛秧 Manual seedling-broadcasting	21	64	33	118
		机抛秧 Mechanical seedling-broadcasting	21	67	33	121
	甬优 1538	手插秧 Manual transplanting	21	67	50	138
	Yongyou 1538	手抛秧 Manual seedling-broadcasting	21	68	51	140
		机抛秧 Mechanical seedling-broadcasting	21	69	52	142

黄华占和甬优 1538 在精量有序机抛秧模式下的生育期分别为 121 d 和 142 d, 与手抛秧生育期一致, 且较手插秧生育期缩短 2 d。2019 年的生育期表现与 2018 年存在一定差异。黄华占精量有序机抛秧的生育期为 121 d, 较手插秧和手抛秧分别延长 2 d 和 3 d, 而甬优 1538 精量有序抛秧的生育期与手插秧和手抛秧相比分别延长了 4 d 和 2 d。

2.2 产量与产量构成

黄华占和甬优 1538 在不同种植方式下的产量如图 1 所示, 2018 年黄华占在机械精量有序抛秧模式下的产量为 9.75 t hm⁻², 较手插秧增产 8.8%, 但与

手抛秧产量无显著性差异。甬优 1538 机械精量有序抛秧在 3 种植方式下的产量最高, 达 12.39 t hm⁻², 与手插秧和手抛秧相比分别增加 33.3%和 5.1%。2019 年精量有序机抛秧模式下的产量显著高于手插秧和手抛秧, 其中黄华占机抛秧的产量为 9.90 t hm⁻², 较手插秧和手抛秧分别增产 39.2%和 9.8%, 而甬优 1538 机抛秧产量为 12.23 t hm⁻², 与手插秧与手抛秧相比产量分别增加 20.6%和 8.2%。综合品种表现, 精量有序机抛秧较手插秧增产 22.4%~28.3%, 较手抛秧增产 2.8%~8.9%。分析产量构成因子(表 3)发现, 机械精量有序抛秧的单位面积有效穗数较手插秧增

图 1 黄华占和甬优 1538 在不同种植方式下的产量

Fig. 1 Grain yield of Huanghuazhan and Yongyou 1538 under different rice establishment methods

不同小写字母代表同一年份下同一品种在不同种植方式间的多重比较(LSD 测验 5%水平)。

Different lowercase letters denote the variances of different establishment methods of the same variety in a year (5% level according to LSD test).

表 3 黄华占和甬优 1538 在不同种植方式下的产量构成因子

Table 3 Yield components of Huanghuazhan and Yongyou 1538 under different rice establishment methods

年份	品种	种植方式	单位面积有效穗数	每穗粒数	结实率	千粒重	
Year	Variety	Establishment methods	Panicle numbers per m ²	Spikelets per panicle	Seed setting rate (%)	1000-grain weight (g)	
2018	黄华占	手插秧	Manual transplanting	254.7 b	164.0 a	88.3 a	19.4 a
		手抛秧	Manual seedling-broadcasting	340.0 a	156.6 a	85.6 a	19.7 a
		机抛秧	Mechanical seedling-broadcasting	308.0 a	158.7 a	88.5 a	19.4 a
		平均值	Mean value	300.9 A	159.8 A	87.5 A	19.5 A
	甬优 1538	手插秧	Manual transplanting	190.7 b	320.6 a	70.5 b	20.0 a
		手抛秧	Manual seedling-broadcasting	310.7 a	312.7 a	76.3 ab	20.7 a
		机抛秧	Mechanical seedling-broadcasting	313.3 a	307.7 a	79.7 a	20.3 a
		平均值	Mean value	271.6 A	313.7 A	77.6 A	20.9 A
2019	黄华占	手插秧	Manual transplanting	282.7 b	170.0 a	78.4 b	18.1 a
		手抛秧	Manual seedling-broadcasting	372.0 a	146.8 b	79.3 ab	18.9 a
		机抛秧	Mechanical seedling-broadcasting	377.3 a	151.7 ab	83.4 a	19.1 a
		平均值	Mean value	344.0 A	156.2 A	80.4 B	18.7 A
	甬优 1538	手插秧	Manual transplanting	193.3 b	303.4 a	76.2 b	21.1 a
		手抛秧	Manual seedling-broadcasting	289.3 a	261.6 b	76.3 b	20.9 a
		机抛秧	Mechanical seedling-broadcasting	286.7 a	263.9 b	80.4 a	20.9 a
		平均值	Mean value	256.4 A	276.3 A	75.5 A	20.3 A

同一列中, 小写字母代表同一年份同一品种不同种植方式间的多重比较, 大写字母代表同一品种在不同年份间的多重比较(LSD 测验 5%水平)。Different lowercase letters within the same column denote the variances of different establishment methods of the same variety in a year, different uppercase letters denote the variances of the same variety between two years (5% level according to LSD test).

加 20.9%~64.2%，这可能是其增产的主要原因。另一方面，与手抛秧相比，精量有序机抛秧的结实率增加了 3~5 个百分点，但单位面积有效穗数、每穗粒数和千粒重未出现显著性差异，这在 2 个品种和 2 年间均呈现一致规律。

2.3 分蘖动态

不同种植方式下的分蘖发生特性存在明显差异(图 2)。与手抛秧和精量有序机抛秧相比，手插秧的分蘖速度和最终分蘖数明显降低，这可能是其单位面积有效穗数降低的主要原因。2 种抛秧模式的分蘖发生动态亦存在一定差异，与手抛秧相比，精量有序机抛秧在生长前期分蘖发生较慢，而随着水稻群体的进一步生长，其分蘖速度逐步增加，其最终分蘖数与手抛秧基本无明显差异(2019 年甬优 1538 除外，其机抛秧分蘖数明显低于手抛秧)。

2.4 干物质积累

不同种植方式在不同生育时期的地上部干物质积累量如图 3 所示，分蘖中期各种种植方式下的地上部生物量无显著性差异，随着植株进一步生长，精量有序机抛秧在幼穗分化期、齐穗期和成熟期的地上部干物质积累量均显著大于手插秧。同时，精量

有序机抛秧的地上部生物量在幼穗分化期和齐穗期小于手抛秧或无显著性差异，而在成熟期，精量有序抛秧和手抛秧的地上部生物量差异不显著。

分析不同种植方式下的花后干物质积累量发现，精量有序机抛模式下的花后干物质积累量较大，较手插秧和手抛秧分别增加 52.8%和 23.4% (图 4)，这在不同年份和品种间均呈现一致规律。而手抛秧和手插秧的花后干物质积累量存在年际差异。2018 年黄华占和甬优 1538 的花后干物质积累量均表现为手抛秧大于手插秧，而 2019 年 2 种植方式间无显著性差异。

2.5 叶片 SPAD 值

不同种植方式在不同生育时期的叶片 SPAD 值如图 5 所示，精量有序机抛秧的 SPAD 值在分蘖中期、幼穗分化期、齐穗期均大于手插秧和手抛秧模式，而在齐穗后 10 d，精量有序机抛秧叶片 SPAD 值的下降程度要小于其他 2 种模式，这在 2 个品种间均呈现一致规律，表明其叶片衰老速率可能较慢。另一方面，黄华占在手抛秧模式下的叶片 SPAD 值与手插秧无显著性差异，但在甬优 1538 中，手抛秧的叶片 SPAD 值在各生育时期均显著大于手插秧。

图 2 黄华占和甬优 1538 在不同种植方式下的分蘖动态

Fig. 2 Tillering dynamics of Huanghuazhan and Yongyou 1538 under different rice establishment methods

图 3 黄华占和甬优 1538 在不同种植方式下的地上部生物量

Fig. 3 Above-ground biomass of Huanghuazhan and Yongyou 1538 under different rice establishment methods

MT: 分蘖中期; PI: 幼穗分化始期; HD: 抽穗期; PM: 成熟期。每张副图中, 不同小写字母代表不同种植方式在同一生育时期的多重比较(LSD 测验 5%水平)。

MT: middle tillering; PI: Panicle initiation; HD: heading; PM: physiological maturity. In each sub-figure, different lowercase letters denote the variances between different establishment methods at the same growth period (5% level according to LSD test).

图 4 黄华占和甬优 1538 在不同种植方式下的花后干物质积累量

Fig. 4 Dry matter accumulation of Huanghuazhan and Yongyou 1538 at post-flowering stage under different rice establishment methods

不同小写字母代表不同种植方式在 5% 差异显著水平上的多重比较(LSD 测验)。

Different lowercase letters denote the variances between different establishment methods at the 5% probability level according to LSD test.

图 5 黄华占和甬优 1538 在不同种植方式下的 SPAD 值变化特征

Fig. 5 SPAD values of Huanghuazhan and Yongyou 1538 under different rice establishment methods

TS: 分蘖中期; PI: 幼穗分化始期; HD: 抽穗期; 10 DAH: 抽穗后 10 d.

TS: middle tillering; PI: panicle initiation; HD: heading; 10 DAH: 10 days after heading.

2.6 田间通风性

为比较不同种植模式的田间通风性差异, 本研究于 2019 年在各品种齐穗期对水稻群体的田间风速和阵风速度进行了测定(图 6)。研究结果发现, 精量有序机抛秧群体的田间风速和阵风速度明显大于手抛秧群体, 表明其在生育后期的田间通风性能优于手抛秧。但是, 精量有序机抛秧的田间风速和阵风速度低于手插秧。甬优 1538 和黄华占在不同种植方式下的通风性能表现均呈现一致规律。

3 讨论

本研究结果表明, 精量有序机抛秧的产量在不同年份和不同品种间均显著高于手插秧, 且 2018 年在甬优 1538 和 2019 年在 2 个品种中的产量均高于手抛秧, 产量优势明显。表明精量有序机抛秧是一种高产的水稻种植方式, 有较大的推广潜力和价值。

分析不同种植方式下水稻的产量构成和生长特性发现, 精量有序机抛秧模式前期生长快, 分蘖数量多, 群体生物量大, 使得成熟期单位面积有效穗

图 6 黄华占和甬优 1538 在不同种植方式下的风速和阵风速度

Fig. 6 Wind and gust velocity of Huanghuazhan and Yongyou 1538 under different rice establishment methods

数较手插秧模式显著提升。前人围绕抛秧稻的生长发育特性的研究也与本文结果基本一致^[3,15]。人工撒抛秧和精量有序机抛秧在栽插过程和群体田间分布等方面均存在较大差别,进而可能导致生长发育特性和产量形成等方面的差异。前人研究指出撒抛秧苗根系入土较浅,部分根系裸露在土表,导致下部叶片易死亡,秧苗素质差^[16-18]。而有序抛栽(点抛或摆秧)秧苗垂直入土、根系下扎深,立苗返青快^[19]。同时,有序抛栽分蘖发生叶位比手抛秧低2个叶位,一次分蘖数较多,二次分蘖较少^[20-21]。而本研究发现,精量有序机抛秧前期分蘖能力和群体生长速率基本弱于手抛秧,与前人研究结果存在一定差异,这可能是因为机抛秧作业过程中对秧苗存在机械损伤,进而影响群体缓青及发苗速度。同时,机抛秧移栽对大田耕整和水层深度要求更高,若土表较硬或水层较深,可能导致机抛秧立苗困难^[14]。在生育中期,精量有序机抛秧的分蘖速度加快,移栽后45~50 d与手抛秧分蘖数相当(2019年甬优1538除外),这可能是精量有序机抛秧群体田间分布均匀,通风透光良好,进而有利于群体生长。分析产量构成因子发现,精量有序机抛秧的单位面积有效穗数和每穗粒数与手抛秧无显著性差异。而前人研究结果认为有序抛栽的有效穗数小于手工抛栽,但每穗粒数呈现相反趋势^[17,22]。综上所述,本研究中精量有序机抛秧在前期生长、分蘖发生和单位面积总颖花数等方面较手抛秧未表现出明显优势,未来研究需通过抛秧机械改进、育秧和抛栽配套技术的优化等来充分挖掘精量有序机抛秧前期生长优势。同时,精量有序机抛秧模式下的立苗缓青过程、秧苗素质和分蘖发生特性等还需要进一步深入研究。

本研究发现,精量有序机抛秧的结实率优于手抛秧,同时其花后干物质积累量大,叶片SPAD值在生育后期衰减较慢,表明与手抛秧相比,精量有序机抛秧高产的主要原因可能是生育后期较强的光合同化能力和较高的库充实度。进一步研究发现,精量有序机抛秧群体田间通风条件优于手抛秧,而前人围绕有序抛秧(手工点抛)的研究指出也点抛群体分布均匀,使田间通风透光条件得以改善,光合作用和光合势增强^[23],这种后期生长势为大库提供了足源,为抛秧群体高产潜力得以充分发挥奠定了基础^[16,19]。此外,精量有序机抛秧后期光合同化能力强、叶片衰老慢的特性可能还得益于较高的根系活

力。郭保卫等研究指出,和撒抛秧相比,有序摆栽和半有序点抛均可显著提升水稻群体各生育时期的群体根干质量、根冠比和根系活力,同时耕作底层根量大于撒抛^[24]。然而本研究中,精量有序机抛秧模式的根层分布特征和根系生长特性还不清晰,其根系生长规律与高产形成的联系还需深入研究来揭示。

4 结论

精量有序机抛秧是一种高产的水稻种植方式,其产量较手插秧平均增加22.4%~28.3%,较手抛秧增加2.8%~8.9%。生长发育特性方面,精量有序机抛秧田间分布有序,田间通风性好,群体生育后期的干物质同化积累能力强,叶片衰老较慢、库充实度高,与手插秧相比,其单位面积有效穗数显著提升,与手抛秧相比,其结实率明显增加,进而促进其高产。然而,精量有序机抛秧模式下抛秧机和配套育秧栽插技术等方面还有待改进以进一步发挥高产潜能。同时,未来研究还需围绕精量有序机抛秧技术的立苗缓青特征、分蘖发生特性和根系生长特点等方面深入开展。

References

- [1] 金千瑜. 我国水稻抛秧栽培技术的应用与发展. 中国稻米, 1996, (1): 10-13.
Jin Q Y. The application and development of rice seedling broadcasting in China. *China Rice*, 1996, (1): 10-13 (in Chinese with English abstract).
- [2] 陈健. 水稻栽培方式的演变与发展研究. 沈阳农业大学学报, 2003, 34: 389-393.
Chen J. Evolution and development of rice planting pattern. *J Shenyang Agric Univ*, 2003, 34: 389-393 (in Chinese with English abstract).
- [3] 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕. 中国抛秧稻作技术体系及其特征. 中国农业科学, 2008, 41: 43-52.
Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y. Cultivation technical system of rice seedling broadcasting and its characteristics. *Sci Agric Sin*, 2008, 41: 43-52 (in Chinese with English abstract).
- [4] 胡雅杰, 张洪程, 龚金龙, 龙厚元, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 李德剑, 沙安勤, 周有炎, 罗学超, 刘国林, 赵德亮. 不同栽培方式对水稻产量和物质生产特征影响. 中国稻米, 2012, 18(5): 15-19.
Hu Y J, Zhang H C, Gong J L, Long H Y, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Li D Y, Sha A Q, Zhou Y Y, Luo X C, Liu G L, Zhao D L. Effects of cultivation methods on the grain yield and biomass production characteristics of rice. *China Rice*, 2012, 18(5): 15-19 (in Chinese with English abstract).
- [5] 戴其根, 霍中洋, 张洪程, 苏宝林, 许轲, 邱枫. 抛秧水稻生长发育与产量形成的生态生理机制 II 秧苗田间垂直分布格局

- 及其生态生理效应. 作物学报, 2001, 27: 600–611.
- Dai Q G, Huo Z Y, Zhang H C, Su B L, Xu K, Qiu F. The eco-physiological mechanism of growth, development and yield formation of broadcasted rice seedlings, the characteristics of II spatial distribution of plant on perpendicular and its eco-physiological effect. *Acta Agron Sin*, 2001, 27: 600–611 (in Chinese with English abstract).
- [6] 戴其根, 张洪程, 霍中洋, 许珂, 邱枫. 抛秧稻生长发育特征及产量形成规律的探讨. 江苏农业研究, 2000, 21(1): 1–7.
- Dai Q G, Zhang H C, Huo Z Y, Xu K, Qiu F. Characteristics of growth and yield formation of broadcasting-seedling of rice. *Jiangsu Agric Res*, 2000, 21(1): 1–7 (in Chinese with English Abstract).
- [7] 闫凤宇, 于凤阁. 水稻抛秧应用现状及技术要点. 现代农业科技, 2011, (3): 99–101.
- Yan F Y, Yu F G. The application status and technical essentials for rice seedling broadcasting. *Adv Agric Technol*, 2011, (3): 99–101 (in Chinese with English abstract).
- [8] 孙永健, 徐徽, 秦俭, 贾现文, 马均. 栽培方式与免耕对杂交稻 II 优 498 灌浆期根系衰老和籽粒灌浆的影响. 中国农业科学, 2013, 46: 1347–1358.
- Sun Y J, Xu H, Qin J, Jia X W, Ma J. Influence of cultivation methods and no-tillage on root senescence at filling stage and grain-filling properties of II you 498. *Sci Agric Sin*, 2013, 46: 1347–1358 (in Chinese with English abstract).
- [9] 罗锡文, 王在满. 水稻生产全程机械化技术研究进展. 现代农业装备, 2014, (1): 23–29.
- Luo X W, Wang Z M. Research progress of rice production mechanization technology. *Mod Agric Equip*, 2014, (1): 23–29 (in Chinese with English abstract).
- [10] 夏倩倩, 张文毅, 纪要, 李坤. 我国机械抛秧技术与装备的研究现状及趋势. 中国农机化学报, 2019, 40(6): 201–208.
- Xia Q Q, Zhang W Y, Ji Y, Li K. Research status and trend of mechanical throwing seedling technology and equipment in China. *J Chin Agric Mechan*, 2019, 40(6): 201–208 (in Chinese with English abstract).
- [11] 谭艳红. 水稻抛秧机关键部件机构设计与试验研究. 湖南农业大学硕士学位论文, 湖南长沙, 2016.
- Tan Y H. Design and Experimental Research of Key Components on Rice Throwing Machine. MS Thesis of Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan, China, 2016 (in Chinese with English abstract).
- [12] 陈旭暄, 宋建农, 刘建军, 魏青. 水稻钵苗输秧拔秧机构参数优化. 中国农业大学学报, 2005, 10(2): 19–21.
- Chen X X, Song J N, Liu J J, Wei Q. Parametric optimization of a transporting and evulsing mechanism of potted rice seedlings. *J China Agric Univ*, 2005, 10(2): 19–21 (in Chinese with English abstract).
- [13] 王国强. 浅析 2ZU-6 型播秧机性能与推广. 农业装备技术, 2002, (1): 17–18.
- Wang G Q. The extension and evaluation of 2ZU-6 rice transplanting machine. *Technol Agric Equip*, 2002, (1): 17–18 (in Chinese).
- [14] 汪友祥, 彭洪巽. 2ZP-13 型水稻有序抛秧机的研发与推广. 农业机械, 2018, (11): 87–90.
- Wang Y X, Peng H X. The development and extension of 2ZP-13 orderly rice throw-transplanting machine. *Agric Machine*, 2018, (11): 17–18 (in Chinese).
- [15] 张洪程, 戴其根, 邱枫, 霍中洋, 许珂, 董明辉, 杨海生. 抛秧稻产量形成的生物学优势及高产栽培途径的研究. 江苏农学院学报, 1998, 19(3): 11–17.
- Zhang H C, Dai Q G, Qiu F, Huo Z Y, Xu K, Dong M H, Yang H S. Studies on the biological superiority of yield formation of broadcasting-seedling rice and its high-yielding cultured way. *J Jiangsu Agric Coll*, 1998, 19(3): 11–17 (in Chinese with English abstract).
- [16] 郭保卫, 陈厚存, 张春华, 魏海燕, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许珂, 邢琳, 管文文, 黄幸福, 杨雄. 水稻抛秧秧苗立苗中的形态与生理变化. 作物学报, 2010, 36: 1715–1724.
- Guo B W, Chen H C, Zhang C H, Wei H Y, Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Xing L, Guan W W, Huang X F, Yang X. Morphological and physiological changes in seedling standing and establishment of broadcasted rice seedlings. *Acta Agron Sin*, 2010, 36: 1715–1724 (in Chinese with English abstract).
- [17] 张洪程, 朱聪聪, 霍中洋, 许珂, 蒋晓鸿, 陈厚存, 高尚勤, 李德剑, 赵成美, 戴其根, 魏海燕, 郭保卫. 钵苗机插水稻产量形成优势及主要生理生态特点. 农业工程学报, 2013, 29(21): 50–59.
- Zhang H C, Zhu C C, Huo Z Y, Xu K, Jiang X H, Chen H C, Gao S Q, Li D J, Zhao C M, Dai Q G, Wei H Y, Guo B W. Advantages of yield formation and main characteristics of physiological and ecological in rice with nutrition bowl mechanical transplanting. *Trans CSAE*, 2013, 29(21): 50–59 (in Chinese with English abstract).
- [18] 于磊, 牟雪雷, 韩休海, 沈亮. 水稻钵育摆栽技术的应用及发展. 农机化研究, 2011, 33(9): 212–215.
- Yu L, Mou X L, Han X H, Shen L. The application and development of rice bowl-seedling transplanting technology. *J Agric Mechan Res*, 2011, 33(9): 212–215 (in Chinese with English abstract).
- [19] 郭保卫. 水稻有序摆栽超高产形成及其生理生态特征的研究. 扬州大学博士学位论文, 江苏扬州, 2013.
- Guo B W. Studied on Super High Yield Formation and Its Eco-Physiological Characteristics of Ordered Transplanting and Optimized Broadcasting Rice. PhD Dissertation of Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu, China, 2013 (in Chinese with English abstract).
- [20] 刘华招, 王春江. 不同移栽方式对秧苗返青分蘖的影响. 现代化农业, 2006, (10): 15–16.
- Liu H Z, Wang C J. The effects of transplanting methods on the recovery and tillering ability of rice seedlings. *Mod Agric*, 2006, (10): 15–16 (in Chinese with English abstract).
- [21] 江立庚, 徐世宏, 李如平, 何礼健, 陈德威, 秦华东, 杨为芳, 谭素宁, 陈明才, 郑希, 陆福勇, 唐茂艳. 稻田耕作方式对抛秧稻分蘖特性的影响. 杂交水稻, 2006, (增刊 1): 23–25.
- Jiang L G, Xu S H, Li R P, He L J, Chen D W, Qin H D, Yang W F, Tan S N, Chen M C, Zheng X, Lu F Y, Tang M Y. effects of tillage methods on the tillering ability of seedling-broadcasting rice. *Hybrid Rice*, 2006, (S1): 23–25 (in Chinese with English abstract).
- [22] 陈国建. 水稻钵育摆栽高产稳产机理分析. 垦殖与稻作, 2004, (5): 28–30.

- Chen G J. High yielding mechanisms of rice with nutrition bowl mechanical transplanting. *Reclaim Rice Cult*, 2004, (5): 28–30 (in Chinese with English abstract).
- [23] 林贤青, 周伟军, 朱德峰, 张玉屏, 杨国花. 强化栽培下水稻穗分化期叶片光合速率与水分利用率的研究. *中国水稻科学*, 2005, 19: 132–136.
- Lin X Q, Zhou W J, Zhu D F, Zhang Y P, Yang G H. Photosynthetic rate and water use efficiency of leaves at different positions during panicle initiation stage under the system of rice intensification. *Chin J Rice Sci*, 2005, 19: 132–136 (in Chinese with English abstract).
- [24] 郭保卫, 许轲, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 魏海燕, 陈厚存. 有序摆抛栽超高产栽培对水稻根系形态生理特征的影响. *中国水稻科学*, 2016, 30: 611–625.
- Guo B W, Xu K, Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Wei H Y, Chen H C. Effects of ordered transplanting and optimized broadcasting on rice root system morphological and physiological characteristics under super high-yielding cultivation. *Chin J Rice Sci*, 2016, 30: 611–625 (in Chinese with English abstract).