

不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻光合生产及产量的影响

李应洪 王海月 吕腾飞 张绍文 蒋明金 何巧林 孙永健* 马均*

(四川农业大学 水稻研究所/农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室, 四川 温江 611130; *通讯联系人, E-mail: yongjians1980@163.com)

Effects of Mechanically-transplanted Modes and Density on Photosynthetic Production and Yield in Hybrid Rice at Different Seedling-ages

LI Yinghong, WANG Haiyue, LÜ Tengfei, ZHANG Shaowen, JIANG Mingjin, HE Qiaolin, SUN Yongjian*, MA Jun*

(Rice Research Institute, Sichuan Agricultural University / Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology, and Cultivation in Southwest China, Ministry of Agriculture, Wenjiang 611130, China; *Corresponding author, E-mail: yongjians1980@163.com)

Abstract: 【Objective】 In order to elucidate the effects of mechanical transplanting modes and density on photosynthetic production characteristics and yield of super hybrid rice (F you 498) and to lay a theoretical basis for the application of mechanical transplanting, 【Method】 a split-plot design was used as follows: bowl mechanical-transplanting with high density (M_1D_1), bowl mechanical-transplanting with middle density (M_1D_2), bowl mechanical-transplanting with low density (M_1D_3), carpet mechanical-transplanting with high density (M_2D_4), carpet mechanical-transplanting with middle density (M_2D_5), and carpet mechanical-transplanting with low density (M_2D_6) using 25-day-old and 40-day-old seedlings. 【Result】 The seedling-age and mechanically-transplanted modes coupled with density and grain yield played a significant role in the regulation of main growth stages in rice. The seedling quality, number of tillers, leaf area index (LAI), exportation and export rate of leaf, culm and sheath per shoot, dry matter weight per stem and population, dry matter accumulation during each stage, population growth rate, photosynthetic potential, net assimilation rate after heading stage and yield for 25-day-old seedling were significantly better than those of 40-day-old ones under the same mechanical-transplanting modes and density. The number of stems and tillers, leaf area index of each period and leaf area decay rate, dry matter weight of population, photosynthetic potential, and the dry matter accumulation before heading population growth rate, net assimilation rate before heading stage increased with the increasing density at the same seedling-age and mechanical-transplanting modes. The dry matter accumulation after heading, population growth rate, and net assimilation rate after heading under bowl mechanical-transplanting increased firstly and then decreased with the increase of density. In this experiment, M_1D_2 is the best. 【Conclusion】 For 25-day-old seedlings, the row of 33 cm and planting space of 15.5 cm had the advantages of total spikelet number and seed setting rate, and its yield was the highest. So the treatment could give full play to advantages of *indica* hybrid rice plant type of the local research area and improve photosynthetic production and yield. The yield will decrease when increase of seedling-age and planting density reduced of carpet mechanical-transplanting, which is because of the poor of population quality index and reduction of the number of effective panicles.

Key words: seedling-age; bowl mechanical-transplanting; carpet mechanical-transplanting; density; yield; photosynthetic production

摘要: 【目的】探究不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻光合生产及产量的影响, 为水稻机插秧配套技术的应用提供理论和实践依据, 【方法】以超级杂交稻 F 优 498 为材料, 采用两因素裂区试验设计, 在 25 d 和 40 d 秧龄下, 设置“钵苗机插+高密度(M_1D_1)”、“钵苗机插+中密度(M_1D_2)”、“钵苗机插+低密度(M_1D_3)”、“毯苗机插+高密度(M_2D_4)”、“毯苗机插+中密度(M_2D_5)”、“毯苗机插+低密度(M_2D_6)”6 种机插方式与密度的处理开展试验。

【结果】秧龄与插秧方式和密度对水稻主要生育期光合生产及最终产量均存在显著的调控作用, 且互作效应显著。同一机插方式及密度处理下, 机插 25 d 秧龄水稻的秧苗素质、群体茎蘖数、叶面积指数(LAI)、单茎叶片

收稿日期: 2016-06-01; 修改稿收到日期: 2016-08-01。

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2013BAD07B13); 四川省教育厅重点项目 (16ZA0644); 四川省科技支撑计划资助项目(2014NZ0041, 2014NZ0047)。

和茎鞘表观转运量及转运率、单茎和群体干物质质量、阶段干物质积累量、群体生长率、光合势、抽穗后净同化率以及产量均明显优于 40 d 秧龄处理。同一秧龄和机插方式下,水稻群体茎蘖数、各时期 LAI 和衰减率、群体干物质质量、光合势以及抽穗前干物质积累量、群体生长率、净同化率均表现出随密度的增加而增加的趋势;而抽穗后物质积累量、群体生长率、净同化率在 25 d 秧龄下钵苗机插均表现为随着密度的增加呈现先增加后降低的趋势,以 M_1D_2 处理最优,而毯苗机插则表现为随着密度的降低而降低的趋势,且钵苗机插各指标较毯苗优势明显。25 d 秧龄下,钵苗机插行距 33 cm、配套株距 14.5~15.5 cm,因群体总颖花数、结实率的优势,产量显著高于其余处理,其中又以行距 33 cm、株距 15.5 cm 最能充分发挥其杂交籼稻株型的优势,提高光合物质生产,产量最高可达到 12.74 t/hm²,是本研究最佳组合;而毯苗机插随秧龄增大以及栽插密度的降低,群体质量指标恶化,有效穗数不同程度降低,产量并不高。

关键词: 秧龄;钵苗机插;毯苗机插;密度;产量;光合生产

中图分类号: S223.91; S511.045

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2017)03-0265-13

水稻是我国主要的粮食作物,全国有 60% 人口以稻米为主食。随着经济的发展,从事农业的劳动力向其他产业转移,以及水稻种植机械化程度较低、水资源紧缺、稻作效益差等原因,种植面积大幅度减少^[1];且由于直播技术还未成熟^[2],推进以水稻机插秧为主的机械化高产种植技术,对稳定我国水稻种植面积,提高单产,保障粮食安全具有重要意义^[1-3]。目前,日本、韩国及中国台湾等地区机插秧技术应用广泛,主要采用盘育毯苗机插方式,技术普及率接近 100%^[4-5]。我国推广的机械化育插秧技术就是引自日本,前人对此技术已有较多的研究^[6-8],但多集中于长江中下游以及北方稻区。水稻钵苗机插作为南方稻区一种新兴的机插秧技术,能够实现无植伤精确移栽,且秧苗素质高,秧龄弹性大,栽后缓苗期短,活棵发苗快^[9-10];在我国江苏、安徽等水稻主产区的多年生产实践已初步证明其增产优势^[11-13]。但前人对于钵苗机插的研究多集中在杂交粳稻方面,将其与毯苗机插进行对比,或是在不同密度下进行研究^[11-13];而对于杂交籼稻研究较少,同时不同秧龄之间的对比研究也缺乏。西南稻区为我国水稻主产区,包括四川、重庆、云南和贵州等省份,其水稻种植以杂交籼稻为主,2014 年机械化种植水平分别为 13.34%、18.01%、5.85% 和 2.42%,远低于全国 38.53% 的平均水平。尤其在四川盆地,水旱轮作稻作区前茬作物的收获时间较晚(尤其是在稻麦、稻油两熟制的情况下),以及季节性干旱因素等,影响水稻的适时栽插,易造成秧苗素质差,且不同机插秧形式的适应性尚不明确,杂交水稻钵苗机插在该区域的应用鲜有报道。此外,移栽秧龄和栽插密度作为水稻栽培调控最关键的技术,前人已有大量的研究^[14-17],但在不同机插秧龄下,机插方式与密度对杂交稻光合物质生产及产量的对比研究未见详细报道。为此,本研究在不同秧龄下,设置钵苗和毯苗机插与不同密度,比较研究其对杂

交稻产量和光合物质生产的影响,为四川盆地稻作区水稻钵苗机插高产栽培提供理论依据和实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2015 年在成都崇州四川农业大学现代农业研发基地(N 30°33', E 103°38'; 海拔 520.6 m)进行。供试品种为该研究区域广泛应用且具有代表性的品种超级稻 F 优 498(中粳迟熟型杂交稻,生育期 145~152 d)。本区域常规机插以小苗移栽 25 d 左右秧龄为宜,但由于前茬作物(油菜/小麦)的收获期较晚,以及干旱等因素的影响,机插秧龄在 40 d 左右较为普遍^[18],故设置 25 d 和 40 d 两个秧龄。为了适时栽插,试验田选择一年两季轮作制度,前茬为蔬菜,耕层土壤质地为砂壤土,含有机质 12.62 mg/kg,速效氮 103.21 mg/kg,速效磷 25.61 mg/kg,速效钾 132.46 mg/kg, pH 5.56。4 月 2 日播种,育秧方式分别为钵苗和毯苗机械化播种,参照张洪程等^[19]对秧田进行管理。试验为两因素裂区设计。主区为不同机插秧龄,设 2 个处理:25 d(T_1)、40 d(T_2),分别于 4 月 27 日和 5 月 12 日移栽。副区为不同育插秧方式与密度的组合,综合插秧机机型和实际生产所需移栽密度考虑,共设 6 个处理: M_1D_1 、 M_1D_2 、 M_1D_3 、 M_2D_4 、 M_2D_5 、 M_2D_6 ,其中, M_1D_1 、 M_1D_2 、 M_1D_3 分别代表钵苗育插秧,行株距 33 cm×14.5 cm(高密度)、33 cm×15.5 cm(中密度)、33 cm×16.5 cm(低密度)三个处理; M_2D_4 、 M_2D_5 、 M_2D_6 分别代表毯苗育插秧,行株距 30 cm×12 cm(高密度)、30 cm×14 cm(中密度)、30 cm×18 cm(低密度)三个处理。钵苗育秧流水线作业机(2BD-600, LSPE-60AM)及插秧机(2ZB-6A, RXA-60T)均为常州亚美柯生产;毯苗育秧流水线作业机采用久保田 2BZP-800,插秧机采用洋马 VP6D。钵苗播种量依据张洪程等^[19]确定,为干种子 40 g;毯苗播种量依据我们前期研究

表 1 水稻生育期进程

Table 1. Growth stage of rice.

秧龄 Seedling-age	机插方式 Transplanting -method	分蘖盛期 Tillering (Month-day)	拔节期 Jointing (Month-day)	抽穗期 Heading (Month-day)	成熟期 Maturity (Month-day)	全生育期天数 WGD/d	移栽-拔节天数 DTJ/d	拔节-抽穗天数 DJH/d	抽穗-成熟天数 DHM/d
T ₁	M ₁	05-27	06-13	07-19	08-29	149	47	36	41
	M ₂	05-28	06-14	07-20	08-31	151	48	36	42
T ₂	M ₁	06-10	06-21	07-25	09-07	158	40	34	44
	M ₂	06-11	06-23	07-26	09-09	160	42	33	45

WGD—全生育期天数；DTJ—移栽至拔节期天数；DJH—拔节至抽穗期天数；DHM—抽穗至成熟期天数。

WGD, Whole growth duration; DTJ, Days from transplanting to jointing; DJH, Days from jointing to heading; DHM, Days from heading to maturity.

的结果^[14]确定，为干种子 75 g。各小区机插方式机插 18 行，重复 3 次，不同小区计产面积为 50 m²。

本研究施氮量(尿素，折合纯氮)150 kg/hm²，氮肥在移栽前、移栽后 7 d、幼穗分化期(倒 4 叶)和抽穗前(倒 2 叶)施用，其用量分别为施氮总量的 30%、30%、20%、20%；磷肥(过磷酸钙)施用量折合 P₂O₅ 为 90 kg/hm²，钾肥(氯化钾)施用量折合 K₂O 为 150 kg/hm²，磷、钾肥全部作基肥施用。其他田间管理按大面积生产田进行。生育期情况见表 1(不同密度间无显著差异，与同秧龄下相同机插方式的生育进程一致)。

1.2 测定项目

1.2.1 秧苗素质

于 25 d、40 d 秧龄，每个处理选取有代表性秧苗 30 株：钵苗直接从秧盘中获取，毯苗则将秧苗放入插秧机之后升起栽植部并进行空转，让秧爪对成毯的秧苗进行均匀切割(避免人为选取带来的误差，保证所取根系长度与田间栽插相同)。分别调查其主茎叶龄、株高、茎基宽、根数(5 mm 以上不定根条数)、根冠比、整齐度等。作者新构建整齐度计算公式：整齐度(%)=[1-(|x_a- \bar{x}_a |/ \bar{x}_a)]/2+[1-(|x_b- \bar{x}_b |/ \bar{x}_b)]/2，其中 a、b 分别代表株高、茎基宽。根长与根数：将两种秧苗的根系从根原基处剪掉，测定根系长度大于 5 mm 的根长，计数根数。根据宋云生等^[20]的方法测定秧苗发根力：计算平均每株新根数。重复 3 次。

1.2.2 茎蘖动态

定期定点调查茎蘖消长动态。各小区以 5 点取样法，每点 12 穴，每处理共定点 60 穴，拔节前 5 d 调查 1 次，拔节后每 7 d 调查 1 次。

1.2.3 叶面积指数与干物质积累

于移栽、拔节、抽穗与成熟期，按各小区平均茎蘖数取 5 株具有代表性的稻株，然后分茎、叶、穗(抽穗及成熟期)，用美国生产的 CID-203 叶面积仪测定绿叶面积，计算叶面积指数，并将样品烘干至恒重后测定干物质质量。

1.2.4 产量及其构成因素

收获时各小区调查具代表性稻株 80 穴，计数

有效穗数并计算均值；各小区分别取 10 穴具有代表性的稻株，脱粒后装入网袋自然风干后，用我国生产的小型种子吹风机(CFY-11)分离瘪粒与饱粒，并用微电脑自动数粒仪(SLY-A)计数，计算结实率(每穗饱粒数与总粒数之比)；然后再用日本生产的谷物水分测量仪(PM-8188 New)测定水分含量，折算成稻谷标准含水量(13.5%)，计算千粒重。各小区按计产面积为 50 m²(钵苗、毯苗机插测产面积分别为 5.94 m×8.40 m、5.40 m×9.25 m)，折算成稻谷标准含水量 13.5%计产。

1.3 数据计算与分析

抽穗-成熟期叶(鞘、茎)表观输出量=抽穗期叶(鞘、茎)干质量-成熟期叶(鞘、茎)干质量；

抽穗-成熟期叶(鞘、茎)表观输出率=抽穗-成熟期叶(鞘、茎)表观输出量/抽穗期叶(鞘、茎)干质量；

叶面积衰减率(LAI·d⁻¹)=(LAI₂-LAI₁)/(t₂-t₁)；

光合势(×10⁴ m² d·hm⁻²)=1/2(L₁+L₂)×(t₂-t₁)；

群体生长率(g·m⁻² d⁻¹)=(W₂-W₁)/(t₂-t₁)；

净同化率(g·m⁻² d⁻¹) = [(lnLAI₂-ln LAI₁)/(LAI₂-LAI₁)]×[(W₂-W₁)/(t₂-t₁)]；

收获指数=单位面积籽粒实际产量/单位面积地上总干物质质量。

上述公式中，LAI₁ 和 LAI₂ 为前后 2 次测定的叶面积指数；L₁ 和 L₂ 为前后 2 次测定的叶面积；W₁ 和 W₂ 为前后 2 次测定的干物质质量；t₁ 和 t₂ 分别为前后 2 次测定的时间。

采用 Microsoft Excel 2007、DPS 7.05 和 Origin 9.2 分析数据和图表绘制。

2 结果与分析

2.1 秧龄和育秧方式对秧苗素质的影响

由表 2 可见，随秧龄的增大，株高、叶龄、茎基宽、百苗干质量、发根力以及单位株高干质量显著增加，而绿叶数、整齐度以及毯苗育秧的根数呈不同程度的下降趋势。各秧龄下，叶龄、茎基宽、绿叶数、根数、发根力以及单位株高干质量钵苗均显著高于毯苗。但由于钵苗秧苗根系生存环境的限

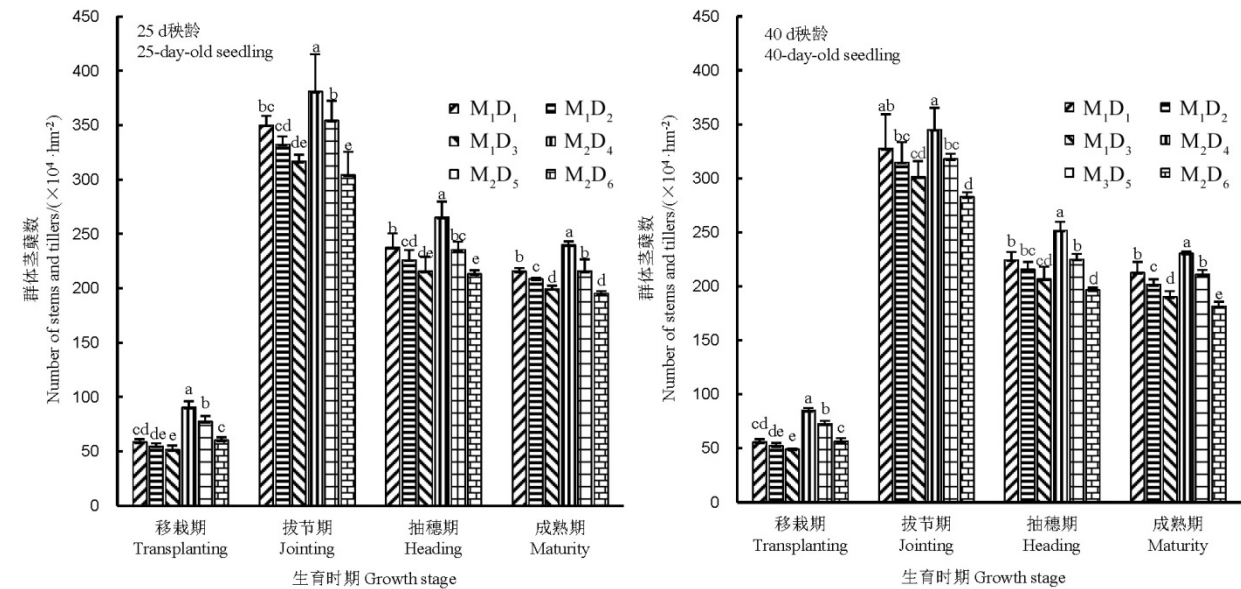
表 2 秧龄和育秧方式对秧苗素质的影响

Table 2. Effects of seedling-age on seedling quality under different seedling cultivation methods.

秧龄 Seedling age	育秧方式 Seedling cultivation methods	株高 Plant height /cm	叶龄 Leaf age	茎基宽 Stalk width /mm	单株绿叶数 Number of green leaves per plant	百苗干质量 Dry weight per hundred seedlings/g		根系性状 Root Traits(≥5 mm)			单位株高干质量 W/H /(mg·cm ⁻¹)	整齐度 Uniformity/%
						地上 Aboveground	地下 Underground	根数 Number of roots per plant	根长 Root length /cm	发根力 Root vitality		
T ₁	M ₁	19.87±0.88 a	4.25±0.12 a	3.15±0.32 a	3.97±0.12 a	4.01±0.10 a	1.90±0.20 a	12.80±0.44 a	7.23±0.09 b	6.27±0.06 a	2.02±0.07 a	90.97±1.71 a
	M ₂	18.86±1.16 a	4.08±0.10 b	2.57±0.02 b	3.40±0.26 b	3.28±0.12 a	1.60±0.60 a	10.70±0.52 b	8.50±0.12 a	5.47±0.50 b	1.73±0.11 b	88.73±2.46 a
	平均 Average	19.37	4.17	2.86	3.68	3.64	1.75	11.75	7.86	5.87	1.88	89.85
T ₂	M ₁	32.63±1.31 a	6.32±0.18 a	4.72±0.12 a	3.57±0.25 a	14.19±0.80 a	10.52±1.03 a	16.85±0.66 a	8.72±0.57 a	8.12±0.13 a	4.34±0.12 a	89.90±1.97 a
	M ₂	25.51±0.53 b	6.03±0.12 b	3.10±0.37 b	2.83±0.30 b	9.00±0.64 b	5.33±1.13 b	10.39±0.10 b	9.29±0.39 a	7.54±0.06 b	3.52±0.18 b	83.54±1.22 b
	平均 Average	29.07	6.18	3.91	3.19	11.59	7.92	13.62	9.01	7.83	3.94	86.72
变异来源 Source of variation												
F 值	T	231.34**	586.90**	62.12**	42.81*	328.38**	79.73*	67.08**	437.70**	258.16**	872.00**	45.43*
F value	M	43.56**	101.84**	42.54**	18.02*	162.63**	97.64**	177.48**	10.85**	25.82**	75.07**	37.16**
	T×M	24.61**	6.80	9.47*	0.31	92.56**	77.07**	46.10**	1.54	0.62	18.08*	8.55*

同秧龄处理下数据(平均值±标准差)后不同字母表示在 5%水平上差异显著($n=3$, 最小显著差数法)。*, ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。T₁—25 d 秧龄; T₂—40 d 秧龄; M₁—钵苗育秧; M₂—毯苗育秧; T—秧龄处理; M—育秧方式; T×M—秧龄和育秧方式处理交互; W/H—单位株高干质量。下同。

Values(mean±SD) under the same seedling-age treatments followed by different letters are significantly different at $P<0.05$ ($n=3$, LSD); *, ** indicate significant difference at $P<0.05$ and $P<0.01$ level, respectively. T₁, 25-day-old seedling, T₂, 40-day-old seedling; M₁, Bowl seedling cultivation; M₂, Carpet seedling cultivation; T, Seedling-age; M, Seedling cultivation method; T×M, Seedling-age × seedling cultivation method; W/H, Dry weight per unit plant height. The same as below.



柱上不同小写字母表示同一秧龄下不同机插方式与密度在 5%水平上差异显著($n=3$, 最小显著差数法)。M₁D₁—钵苗机插+高密度; M₁D₂—钵苗机插+中密度; M₁D₃—钵苗机插+低密度; M₂D₄—毯苗机插+高密度; M₂D₅—毯苗机插+中密度; M₂D₆—毯苗机插+低密度。下同。

Different lowercase letters mean significant difference for a given seedling-age among various mechanically-transplanted modes and density at 0.05 level ($n=3$, LSD). M₁D₁, Bowl mechanical-transplanting and high density; M₁D₂, Bowl mechanical-transplanting and middle density; M₁D₃, Bowl mechanical-transplanting and low density; M₂D₄, Carpet mechanical-transplanting and high density; M₂D₅, Carpet mechanical-transplanting and middle density; M₂D₆, Carpet mechanical-transplanting and low density. The same as in tables below.

图 1 不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻群体茎蘖数的影响

Fig. 1. Effects of mechanically-transplanted modes and density on number of stems and tillers in hybrid rice at different seedling-ages.

表 3 不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻叶面积指数和叶面积衰减率的影响
Table 3. Effects of mechanically-transplanted modes and density on leaf area index and decay rate in hybrid rice at different seedling-ages.

秧龄 Seedling-age	处理 Treatment	叶面积指数 Leaf area index				抽穗-成熟期 叶面积衰减率 HMDRLA/(LAI·d ⁻¹)
		移栽期 Transplanting	拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity	
T ₁	M ₁ D ₁	0.0272±0.0021 c	3.47±0.03 a	6.84±0.04 a	3.42±0.04 a	0.0834±0.0020 a
	M ₁ D ₂	0.0250±0.0004 d	3.33±0.04 b	6.80±0.05 a	3.40±0.05 a	0.0830±0.0020 a
	M ₁ D ₃	0.0239±0.0013 d	3.25±0.02 bc	6.77±0.07 a	3.38±0.03 a	0.0827±0.0024 a
	M ₂ D ₄	0.0366±0.0008 a	3.26±0.09 bc	6.67±0.02 b	3.31±0.02 b	0.0798±0.0009 b
	M ₂ D ₅	0.0313±0.0012 b	3.20±0.02 cd	6.21±0.06 c	3.09±0.03 c	0.0743±0.0016 c
	M ₂ D ₆	0.0244±0.0020 d	3.15±0.04 d	5.85±0.14 d	3.06±0.06 c	0.0665±0.0022 d
	平均 Average	0.0281	3.28	6.52	3.28	0.0783
T ₂	M ₁ D ₁	0.0436±0.0013 c	3.21±0.14 a	6.65±0.07 a	3.30±0.03 a	0.0761±0.0021 a
	M ₁ D ₂	0.0408±0.0029 d	3.18±0.16 a	6.21±0.08 b	3.26±0.02 ab	0.0672±0.0021 b
	M ₁ D ₃	0.0383±0.0027 e	3.15±0.15 a	6.02±0.02 c	3.25±0.03 ab	0.0630±0.0003 c
	M ₂ D ₄	0.0585±0.0007 a	2.97±0.07 b	5.99±0.05 c	3.23±0.05 b	0.0613±0.0006 c
	M ₂ D ₅	0.0501±0.0006 b	2.94±0.04 b	5.70±0.02 d	3.05±0.03 c	0.0589±0.0008 d
	M ₂ D ₆	0.0390±0.0017 de	2.90±0.04 b	5.36±0.02 e	2.84±0.05 d	0.0560±0.0012 e
	平均 Average	0.0451	3.06	5.99	3.15	0.0637
变异来源 Source of variation						
F 值	T	322.62**	34.12*	598.74**	61.29*	472.78**
F value	MD	100.20**	15.36**	242.71**	116.11**	98.43**
	T×MD	5.10**	1.59	13.51**	3.85*	13.50**

T—秧龄处理；MD—机插秧方式和密度处理；T×MD—秧龄处理与插秧方式和密度处理互作；HMDRLA—抽穗-成熟期叶面积衰减率。下同。
T, Seedling-age; M×D, Mechanical-transplanting × density; T×MD, Seedling-age × mechanical-transplanting with various densities. HMDRLA, The decay rate of leaf area from heading to maturity. The same as in tables below.

制，两个秧龄时期，钵苗的根长均较高。在 25 d 秧龄下株高、百苗干质量以及整齐度钵苗与毯苗差异不显著，但在 40 d 秧龄时达到显著水平，钵苗显著高于毯苗。整体来看，秧龄和育秧方式均对秧苗素质影响显著，钵苗秧苗素质显著高于毯苗，且随着秧龄增加趋势更明显。

2.2 不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻群体茎蘖数的影响

不同秧龄以及机插秧方式和密度之间，茎蘖消长规律存在明显差异（图 1）。由于基本苗的不同，不同秧龄下同一机插方式茎蘖数均呈现出随密度降低而降低的趋势，与毯苗机插茎蘖动态变幅较大相比，钵苗机插各处理稳升缓落，在抽穗前 D₁ 与 D₂、D₂ 与 D₃ 不显著，但 D₁ 均显著高于 D₃，变化幅度较小；而毯苗机插随着机插株距扩大，群体茎蘖数显著降低；且低密度处理由于基本苗少，群体内竞争小，最终成穗率更高。而在相同机插方式和密度下，各处理的茎蘖数 25 d 秧龄明显优于 40 d

秧龄。
2.3 不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻叶面积指数的影响

由表 3 可知，秧龄和机插方式与密度均对叶面积指数(LAI)及叶面积衰减率有影响显著。就 LAI 变化来看，移栽期受秧苗素质和群体起点的影响，同秧龄下毯苗机插高、中密度均优于钵苗各处理，但在拔节及拔节期后，钵苗的优势显现出来。相同秧龄和机插方式下，LAI 均表现为随密度增加而增加的趋势；且在整个生育期，在机插方式和密度相同的情况下，25 d 秧龄明显优于 40 d 秧龄。而叶面积衰减率在秧龄和机插方式相同的情况下均随密度降低而降低。但由于 40 d 秧龄抽穗到成熟的时间较 25 d 秧龄长（表 1），导致同一处理下 25 d 秧龄叶面积衰减率较高。

2.4 不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻叶片及茎鞘干物质转运的影响

由表 4 可知，两个秧龄处理下，钵苗与毯苗机

表 4 不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻单茎叶片及茎鞘干物质转运的影响
Table 4. Effects of mechanically-transplanted modes and density on leaves, culm and sheath per stem in hybrid rice at different seedling-ages.

秧龄 Seedling-age	处理 Treatment	单茎叶片 Leaves per shoot				单茎茎鞘 Culm and sheath per stem			
		抽穗期 Heading/g	成熟期 Maturity/g	表观转运量 Exportation/g	表观转运率 Export rate/%	抽穗期 Heading/g	成熟期 Maturity/g	表观转运量 Exportation/g	表观转运率 Export rate/%
T ₁	M ₁ D ₁	1.36±0.01 b	1.14±0.01 b	0.225±0.011 ab	16.53±0.71 c	3.03±0.07 b	2.65±0.05 b	0.387±0.025 b	12.74±0.56 b
	M ₁ D ₂	1.40±0.01 a	1.16±0.01 a	0.236±0.015 ab	16.90±0.89 bc	3.11±0.01 a	2.68±0.02 a	0.430±0.010 a	13.84±0.35 a
	M ₁ D ₃	1.42±0.02 a	1.18±0.01 a	0.240±0.019 a	17.00±1.21 bc	3.13±0.01 a	2.69±0.03 a	0.437±0.035 a	13.96±1.08 a
	M ₂ D ₄	1.18±0.02 e	0.96±0.05 e	0.217±0.026 b	18.43±2.48 ab	2.46±0.04 e	2.17±0.04 e	0.293±0.006 d	11.91±0.30 c
	M ₂ D ₅	1.22±0.02 d	0.99±0.01 d	0.231±0.006 ab	18.93±0.25 a	2.74±0.04 d	2.38±0.05 d	0.357±0.012 c	13.04±0.58 ab
	M ₂ D ₆	1.29±0.01 c	1.04±0.01 c	0.251±0.011 a	19.37±0.75 a	2.91±0.01 c	2.52±0.02 c	0.390±0.017 b	13.42±0.62 ab
	平均 Average	1.31	1.08	0.233	17.86	2.90	2.51	0.382	13.16
T ₂	M ₁ D ₁	1.29±0.02 c	1.09±0.03 c	0.205±0.007 ab	15.90±0.80 c	2.75±0.02 cd	2.40±0.03 bc	0.343±0.012 b	12.5±0.47 b
	M ₁ D ₂	1.35±0.03 b	1.13±0.01 b	0.216±0.027 ab	16.03±1.65 c	2.78±0.02 bc	2.42±0.02 b	0.363±0.015 b	13.07±0.53 ab
	M ₁ D ₃	1.39±0.01 a	1.16±0.01 a	0.226±0.010 a	16.27±0.59 bc	2.87±0.04 a	2.48±0.02 a	0.393±0.029 a	13.69±0.88 a
	M ₂ D ₄	1.13±0.04 f	0.93±0.01 e	0.198±0.048 b	17.40±3.58 abc	2.43±0.03 e	2.15±0.03 d	0.283±0.006 c	11.65±0.16 c
	M ₂ D ₅	1.16±0.01 e	0.95±0.01 e	0.212±0.006 ab	18.27±0.35 ab	2.72±0.01 d	2.37±0.03 c	0.350±0.020 b	12.87±0.76 b
	M ₂ D ₆	1.24±0.02 d	1.01±0.01 d	0.230±0.004 a	18.57±0.06 a	2.80±0.04 b	2.44±0.03 ab	0.363±0.015 ab	12.97±0.36 ab
	平均 Average	1.26	1.05	0.215	17.07	2.73	2.38	0.349	12.79
变异来源 Source of variation									
F 值	T	34.31*	26.99*	59.29*	96.58*	208.19**	272.54**	69.19*	15.67*
F value	MD	166.14**	214.00**	2.45	4.28**	276.17**	194.97**	30.53**	8.05**
	T×MD	1.00	1.06	0.02	0.02	31.37**	26.05**	1.75*	0.14

插在抽穗和成熟期水稻单茎叶片质量、单茎茎鞘质量及其表观转运量和转运率均表现为随密度增加而降低，且钵苗机插整体优势更明显。而在同一机插方式和密度下，各指标均为 25 d 秧龄高于 40 d 秧龄，其中叶片和茎鞘的表观转运量 25 d 比 40 d 秧龄分别高 8.37% 和 9.46%，但毯苗机插不同密度之间的变幅较钵苗机插更大。由表 4 还可看出，秧龄对单茎叶片和茎鞘各指标影响达显著或极显著水平，而密度和机插方式对单茎叶片和茎鞘的干物质质量及其转运率的影响达到极显著水平。

2.5 不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻单茎和群体干物质质量的影响

不同秧龄下不同机插方式与密度导致水稻主要生育期单茎和群体干物质质量存在明显的差异(表 5)。从单茎干物质质量的变化来看，除移栽期外，25 d 秧龄均高于 40 d 秧龄，且在同一秧龄下各生育期钵苗各密度处理均高于毯苗机插。其中，成熟期单茎干物质质量在两个移栽秧龄下均表现为 M₁D₃ 处理最高，M₂D₄ 最低。从群体干物质质量变化看，同一机插方式和密度下，25 d 秧龄明显优于 40 d 秧龄，且秧龄对拔节期以外的各时期群体干物质质量均有极显著影响。移栽期由于群体起点的差异，毯苗机插不同密度之间差异达到显著水平。整个生育期同一秧

龄和机插方式下，均表现为低密度<中密度<高密度；随着机插水稻群体的不断生长，拔节后密度处理之间差异不显著，而拔节和抽穗期由于钵苗群体之间的优势更明显，但随着密度的扩大优势降低，其中，成熟期干物质积累量最高的处理钵苗(T₁M₁D₂)较毯苗(T₁M₂D₄)高 9.86%。不同秧龄下，机插方式与密度不同水稻收获指数为 0.499~0.596，表现为同一机插方式下，随密度减小收获指数降低，且机插方式与密度对其有极显著影响，而秧龄对其影响不显著。

2.6 不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻阶段干物质积累量和群体生长率的影响

就阶段干物质积累量而言，移栽至拔节期和拔节至抽穗期在相同秧龄和机插方式下呈现出随密度的增加干物质积累量增加的趋势(表 6)，但抽穗至成熟期以 M₁D₂ 处理最优，且三个生育阶段的积累量钵苗机插的优势均较明显，但同一秧龄和机插方式下，不同密度间差异不显著，同时，25 d 秧龄的阶段物质积累量明显高于 40 d 秧龄。但由于 40 d 秧龄的毯苗机插各处理拔节到抽穗的时间较 25 d 短，所以毯苗机插在 40 d 秧龄下拔节到抽穗的群体生长率较高，但抽穗至成熟期群体生长率 25 d 比 40 d 秧龄整体高 6.92%。此外，机插方式与密度对主要生育期群体生长率均产生了极显著的影响。

表 5 不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻单茎和群体干物质质量的影响
Table 5. Effects of mechanically-transplanted modes and density on dry matter weight per stem and population in hybrid rice at different seedling-ages.

秧龄 Seedling -age	处理 Treatment	移栽 Transplanting		拔节 Jointing		抽穗 Heading		成熟 Maturity		收获指数 Harvest index
		单茎 DMWPS /g	群体 DMWP /(t·hm ⁻²)	单茎 DMWPS /g	群体 DMWP /(t·hm ⁻²)	单茎 DMWPS /g	群体 DMWP /(t·hm ⁻²)	单茎 DMWPS /g	群体 DMWP /(t·hm ⁻²)	
T ₁	M ₁ D ₁	0.040±0.005 a	0.028±0.003 bc	1.13±0.07 a	3.94±0.24 a	5.42±0.05 b	12.89±0.12 a	9.88±0.07 b	21.33±0.39 a	0.575±0.009 b
	M ₁ D ₂	0.040±0.005 a	0.026±0.003 bcd	1.15±0.09 a	3.81±0.34 ab	5.65±0.05 a	12.78±0.11 a	10.26±0.19 a	21.40±0.52 a	0.596±0.013 a
	M ₁ D ₃	0.040±0.005 a	0.025±0.003 cd	1.19±0.09 a	3.76±0.31 ab	5.67±0.05 a	12.23±0.10 b	10.29±0.09 a	20.52±0.17 b	0.566±0.007 b
	M ₂ D ₄	0.033±0.004 b	0.035±0.001 a	0.97±0.06 b	3.70±0.17 ab	4.29±0.03 e	11.39±0.09 c	8.13±0.14 e	19.48±0.10 c	0.569±0.023 b
	M ₂ D ₅	0.033±0.004 b	0.029±0.004 b	1.01±0.08 b	3.58±0.12 bc	4.76±0.02 d	11.21±0.05 d	8.70±0.34 d	18.76±0.23 d	0.538±0.017 c
	M ₂ D ₆	0.033±0.004 b	0.023±0.003 d	1.13±0.08 a	3.44±0.08 c	5.22±0.05 c	11.13±0.11 d	9.59±0.04 c	18.73±0.11 d	0.531±0.012 c
	平均 Average	0.116	0.082	1.10	3.71	5.17	11.94	9.47	20.04	0.563
T ₂	M ₁ D ₁	0.142±0.008 a	0.101±0.008 a	1.02±0.12 ab	3.33±0.08 a	5.13±0.02 c	11.52±0.04 a	9.21±0.27 b	19.57±0.33 a	0.576±0.002 a
	M ₁ D ₂	0.142±0.008 a	0.088±0.005 b	1.03±0.06 ab	3.25±0.05 a	5.22±0.07 b	11.28±0.16 b	9.47±0.16 b	19.11±0.78 ab	0.569±0.014 a
	M ₁ D ₃	0.142±0.008 a	0.073±0.008 d	1.07±0.09 a	3.20±0.11 a	5.40±0.03 a	11.17±0.07 b	9.90±0.26 a	18.81±0.06 b	0.549±0.012 bc
	M ₂ D ₄	0.090±0.006 b	0.090±0.006 b	0.85±0.06 d	2.91±0.15 b	4.31±0.04 e	10.85±0.11 c	8.12±0.06 d	18.72±0.06 b	0.557±0.007 ab
	M ₂ D ₅	0.090±0.006 b	0.077±0.005 c	0.91±0.10 cd	2.88±0.30 b	4.73±0.05 d	10.63±0.11 d	8.53±0.23 c	18.01±0.17 c	0.533±0.012 c
	M ₂ D ₆	0.090±0.006 b	0.060±0.004 e	0.96±0.04 bc	2.70±0.06 b	5.19±0.04 b	10.21±0.08 e	9.46±0.27 b	17.17±0.10 d	0.499±0.014 d
	平均 Average	0.036	0.028	0.90	3.05	5.00	10.94	9.11	18.57	0.547
变异来源 Source of variation										
F 值	T	229.34**	220.18**	12.45	70.40*	43.22*	269.52**	27.89*	240.97**	11.07
F value	MD	119.18**	50.55**	8.13**	6.67**	935.73**	338.45**	80.87**	58.46**	21.92**
	T×MD	67.83**	26.41**	0.22	0.36	35.08**	34.50**	3.40*	5.22**	1.38

DMWPS—单茎干物质质量；DMWP—群体干物质质量。
DMWPS, Dry matter weight per stem; DMWP, Dry matter weight of population.

表 6 不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻阶段干物质积累量及群体生长率的影响
Table 6. Effects of mechanically-transplanted modes and density on dry accumulation and crop growth rate in hybrid rice at different seedling-ages.

秧龄 Seedling-age	处理 Treatment	物质积累量 Dry accumulation /(t·hm ⁻²)			群体生长率 Population growth rate /(g·m ⁻² d ⁻¹)		
		移栽-拔节 Transplanting-jointing	拔节-抽穗 Jointing-heading	抽穗-成熟 Heading-maturity	移栽-拔节 Transplanting-jointing	拔节-抽穗 Jointing-heading	抽穗-成熟 Heading-maturity
T ₁	M ₁ D ₁	3.92±0.66 a	8.98±0.58 a	8.40±0.29 a	8.33±1.40 a	24.95±1.63 a	19.10±0.67 a
	M ₁ D ₂	3.79±0.34 ab	8.86±0.24 a	8.62±0.41 a	8.06±0.71 a	24.62±0.68 a	19.60±0.94 a
	M ₁ D ₃	3.73±0.32 ab	8.79±0.06 a	8.34±0.29 a	7.94±0.67 ab	24.41±0.16 a	18.96±0.65 ab
	M ₂ D ₄	3.59±0.18 abc	7.82±0.22 b	7.87±0.12 b	7.47±0.37 abc	21.71±0.63 b	18.30±0.27 b
	M ₂ D ₅	3.46±0.28 bc	7.73±0.19 b	7.45±0.16 c	7.22±0.58 bc	21.46±0.54 b	17.34±0.38 c
	M ₂ D ₆	3.27±0.30 c	7.69±0.08 b	7.35±0.23 c	6.81±0.63 c	21.35±0.21 b	17.08±0.53 c
	平均 Average	3.63	8.31	8.01	7.64	23.09	18.39
T ₂	M ₁ D ₁	3.23±0.08 a	8.04±0.31 a	8.14±0.25 a	8.06±0.20 a	23.66±0.91 a	18.08±0.56 a
	M ₁ D ₂	3.16±0.06 a	8.03±0.17 a	7.84±0.63 ab	7.91±0.14 a	23.61±0.49 a	17.41±1.39 ab
	M ₁ D ₃	3.13±0.12 a	7.97±0.05 a	7.71±0.05 b	7.82±0.30 a	23.44±0.13 a	17.13±0.11 b
	M ₂ D ₄	2.82±0.15 ab	7.75±0.17 ab	7.71±0.19 b	6.72±0.36 b	23.50±0.53 a	17.53±0.42 ab
	M ₂ D ₅	2.80±0.31 ab	7.69±0.09 ab	7.37±0.13 c	6.67±0.73 b	23.29±0.26 a	16.75±0.28 bc
	M ₂ D ₆	2.64±0.06 b	7.47±0.11 b	7.18±0.25 c	6.30±0.16 b	22.65±0.34 a	16.32±0.57 c
	平均 Average	2.96	7.83	7.66	7.25	23.36	17.20
变异来源 Source of variation							
F 值	T	654.69**	57.82*	8.31	46.87*	44.83*	19.12*
F value	MD	3.78*	17.27**	13.87**	6.60**	11.44**	9.10**
	T×MD	0.06	4.35**	1.65	0.23	6.46**	1.65

表 7 不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻光合势及净同化率的影响
Table 7. Effects of mechanically-transplanted modes and density on photosynthetic potential and net assimilation in hybrid rice at different seedling-ages.

秧龄 Seedling-age	处理 Treatment	光合势 Photosynthetic potential / ($\times 10^4 \text{ m}^2 \cdot \text{hm}^{-2}$)			净同化率 Net assimilation / ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)		
		移栽-拔节 Transplanting- jointing	拔节-抽穗 Jointing- heading	抽穗-成熟 Heading- maturity	移栽-拔节 Transplanting- jointing	拔节-抽穗 Jointing- heading	抽穗-成熟 Heading- maturity
T ₁	M ₁ D ₁	82.14±0.64 a	185.50±1.12 a	225.68±0.58 a	11.71±1.72 ab	5.03±0.36 a	3.87±0.15 a
	M ₁ D ₂	78.77±0.83 bc	182.36±0.29 b	224.46±1.06 ab	11.93±0.95 a	5.07±0.14 a	3.99±0.17 a
	M ₁ D ₃	77.02±0.57 cd	180.33±1.41 c	223.12±0.80 b	12.07±1.76 a	5.09±0.03 a	3.89±0.14 a
	M ₂ D ₄	79.12±2.27 b	178.65±1.91 c	209.56±0.22 c	10.41±1.11 c	4.56±0.16 c	3.82±0.06 a
	M ₂ D ₅	77.50±0.54 bcd	169.30±0.91 d	195.21±1.57 d	10.54±0.82 c	4.73±0.13 bc	3.88±0.10 a
	M ₂ D ₆	76.29±0.86 d	162.16±2.97 e	187.21±4.10 e	10.58±0.92 bc	4.89±0.11 ab	3.97±0.20 a
	平均 Average	78.47	176.38	210.87	11.21	4.89	3.90
T ₂	M ₁ D ₁	65.02±2.74 a	167.45±3.45 a	223.60±0.94 a	10.97±0.58 a	5.01±0.10 c	3.79±0.12 b
	M ₁ D ₂	64.44±3.31 a	159.71±1.99 b	213.11±1.63 b	10.99±0.57 a	5.22±0.20 b	3.80±0.30 b
	M ₁ D ₃	63.84±3.07 a	155.95±2.21 c	208.50±1.26 c	11.11±1.00 a	5.29±0.13 b	3.81±0.05 b
	M ₂ D ₄	63.60±1.50 a	147.77±1.30 d	198.18±1.89 d	9.07±0.48 b	5.54±0.07 a	3.93±0.14 ab
	M ₂ D ₅	62.86±0.93 ab	142.55±0.96 e	188.01±0.75 e	9.39±1.03 b	5.61±0.05 a	3.96±0.09 ab
	M ₂ D ₆	61.68±0.84 b	136.23±0.54 f	176.26±1.29 f	9.49±0.28 b	5.75±0.11 a	4.11±0.16 a
	平均 Average	63.57	151.61	201.28	10.17	5.40	3.89
变异来源 Source of variation							
F 值	T	402.17**	608.66**	255.41**	6.88	270.86**	0.01
F value	MD	6.01**	228.16**	582.31**	4.81**	2.60	1.58
	T×MD	1.08	10.40**	9.88**	0.07	10.92**	1.20

2.7 不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻光合势和净同化率的影响

就光合势而言，同一秧龄和机插方式下均表现出随密度降低而降低的趋势(表 7)，且钵苗机插整体高于毯苗机插各处理。拔节至抽穗期以及抽穗至成熟期各处理间差异显著，两个秧龄的 M₁D₁ 处理

均显著高于毯苗机插所有处理；且 25 d 秧龄各阶段的光合势均高于 40 d 秧龄，其中拔节至抽穗，以及抽穗至成熟分别高 16.34% 和 4.73%。各处理净同化率的最大值均在移栽至拔节期最大，同秧龄条件下，移栽至拔节期以及拔节至抽穗期相同机插方式中表现为随密度的增加而降低的趋势，但抽穗后以 M₁D₂ 处理最优；且钵苗机插各处理相比毯苗机插略有优势。25 d 秧龄在移栽至拔节期、抽穗至成熟期优于 40 d 秧龄，但在拔节至抽穗期趋势相反。此外，秧龄以及机插方式和密度均对整个阶段的光合势存在极显著影响。

2.8 不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻产量及其构成因素的影响

由表 8 可知，移栽时秧苗秧龄和机插方式与栽插密度对水稻的产量有极显著的影响。本研究稻谷实际产量以 T₁M₁D₂ 最高；而同秧龄毯苗机插与密

度最佳组合为 M₂D₄，较钵苗机插最高产处理(T₁M₁D₂)减产 12.95%，同时在此基础上毯苗机插若增大机插株距，扩大栽插密度，会导致产量显著降低，降幅 8.93%~10.19%。40 d 秧龄下不同机插方式与密度以 M₁D₁ 产量最高，但比 25 d 秧龄下 M₁D₁ 处理低 7.99%。但毯苗机插与高密度处理也有优势，而在此基础上增大机插株距，扩大栽插密度，同样会导致产量显著降低。而对产量构成因子的影响，不同秧龄处理总颖花数存在极显著差异；而机插方式和密度对有效穗数、每穗粒数和结实率有极显著影响，较高总颖花数和结实率是本研究获得高产的关键。但二者及其互作对千粒重影响较小，处理间差异不显著。机插方式和密度相同时，25 d 秧龄的各因子均高于 40 d 秧龄。有效穗数在两个秧龄下均随密度的降低而降低，但每穗粒数和结实率均以 M₂D₄ 最低。

3 讨论

3.1 不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻生长和光合生产的影响

机插对秧苗秧龄有严格的要求^[21]，邵文娟等^[22]

表 8 不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻产量及其构成因素的影响

Table 8. Effects of mechanically-transplanted modes and density on yield and yield components of hybrid rice at different seedling-ages.

秧龄 Seedling-age	处理 Treatment	有效穗数 Effective panicle number ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	每穗粒数 Spikelet number per panicle	总颖花数 Total spikelet number ($\times 10^7 \cdot \text{hm}^{-2}$)	结实率 Seed-setting rate /%	千粒重 1000-grain weight /g	稻谷产量 Grain yield ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)
T ₁	M ₁ D ₁	215.84±2.79 b	234.93±9.07 a	50.69±1.37 a	80.49±1.46 b	30.79±0.33 a	12.26±0.32 b
	M ₁ D ₂	208.64±1.28 b	239.18±1.64 a	49.56±0.37 a	84.23±0.92 a	30.57±0.31 a	12.74±0.11 a
	M ₁ D ₃	199.43±2.93 c	235.18±5.85 a	46.58±0.42 b	83.42±0.60 a	30.31±0.69 a	11.61±0.22 c
	M ₂ D ₄	239.80±3.26 a	198.24±4.45 d	48.67±2.30 a	77.90±0.70 c	30.71±0.21 a	11.09±0.40 d
	M ₂ D ₅	215.87±6.33 b	211.04±1.54 c	46.20±1.45 b	79.87±1.52 b	30.67±0.42 a	10.10±0.43 e
	M ₂ D ₆	195.42±1.87 c	221.12±8.60 b	42.16±0.43 c	80.54±1.36 b	30.86±0.39 a	9.96±0.26 e
	平均 Average	213.05	223.28	47.30	81.07	30.65	11.29
T ₂	M ₁ D ₁	212.71±4.71 b	215.02±4.94 ab	45.89±0.71 a	80.04±0.64 b	31.03±0.70 a	11.28±0.17 a
	M ₁ D ₂	201.67±4.84 c	218.25±7.36 a	44.91±0.23 ab	81.67±2.39 ab	31.08±0.31 a	10.88±0.20 a
	M ₁ D ₃	190.20±5.31 d	220.18±7.00 a	43.33±2.37 bc	82.45±2.09 a	31.15±0.06 a	10.33±0.24 b
	M ₂ D ₄	230.55±11.61 a	197.40±2.78 d	44.77±3.07 ab	74.91±1.26 d	30.98±0.16 a	10.43±0.17 b
	M ₂ D ₅	211.15±3.98 b	202.86±6.91 cd	41.86±0.69 c	76.37±0.84 cd	30.85±0.27 a	9.60±0.25 c
	M ₂ D ₆	181.62±4.13 e	207.95±2.71 bc	36.99±1.03 d	78.00±1.44 c	30.71±1.03 a	8.57±0.18 d
	平均 Average	204.65	210.28	42.97	78.91	30.97	10.18
变异来源 Source of variation							
F 值	T	330.13**	146.93**	155.45**	28.94*	4.79	580.32**
F value	MD	47.54**	24.68**	27.45**	20.81**	0.10	81.63**
	T×MD	0.74	2.23	0.35	1.08	0.67	4.90**

和沈建辉等^[23]对钵苗机插的研究结果表明最大适栽期的叶龄为 3.8~4.1。对照本研究结果，钵苗与毯苗在 25 d 时叶龄分别为 4.25 和 4.08，钵苗显著高于毯苗。而随着秧龄的延长，秧苗生长缓慢，底部黄叶增多，绿叶数减少，整齐度下降。但钵苗相比毯苗来说，恶化的速度更慢。而钵苗与毯苗在株高、百苗干质量以及整齐度等指标比较时，在 25 d 秧龄时不显著，40 d 秧龄时显著。综合秧苗素质以及田间栽插表现来看，25 d 较 40 d 更好，而钵苗较毯苗秧龄弹性更大、秧苗素质更好。

而群体茎蘖数方面，前人研究认为随秧龄的延长，水稻有效分蘖期提前，群体总茎蘖数减少^[24]，早栽有利于充分利用温光资源和促进有效分蘖^[9]。从本研究结果来看，密度对生育期的长短无影响，相同处理在 25 d 各时期的群体茎蘖数均优于 40 d 秧龄。钵苗和毯苗机插在不同密度下，由于群体起点不同，群体茎蘖动态差异较大，毯苗高密度的群体茎蘖数最高，但钵苗机插总体表现更占优，由于栽后立苗活棵快，所以分蘖发生更早，补偿了本田有效分蘖时间，群体茎蘖消长更平稳，能够有效减少无效分蘖的发生，避免了中期群体过大而造成物

质的消耗，成穗率更高，这进一步补充和完善了张洪程等^[10-11]的研究结果。

关于秧龄对水稻光合物质生产的影响，前人有过大量的研究，普遍认为随着秧龄的增长，抽穗期 LAI 和抽穗后光合速率降低，最终引起干物质积累量的减少^[9,14,24]。本研究结果表明，同一机插方式和密度下，随着秧龄的增加，各生育时期的 LAI、单茎叶片和茎鞘的表观转运量、拔节后单茎和群体干物质质量、阶段积累量、群体生长率以及光合势均有不同程度的降低。而不同栽插规格对机插稻的影响主要在于群体内部相互竞争环境资源^[25]，栽插密度过高或过低均会限制个体和群体生长优势的发挥，对群体源库特征及产量构成因素造成影响，最终影响产量^[26]。龙旭^[27]和朱聪聪等^[28]研究认为单株干物质积累量随着密度的增大而减少，群体干物质积累量则表现出相反趋势。本研究在同一秧龄下，钵苗机插和毯苗机插下不同密度处理的 LAI、叶面积衰减率、群体干物质质量、阶段积累量、群体生长率以及光合势均随栽插密度降低而降低；而单茎叶片和茎鞘的表观转运量和转运率、单茎干物质质量以及净同化率趋势相反，其中，拔节后的 LAI、拔节期和

抽穗期的群体干物质质量、移栽至拔节期以及拔节期至抽穗期的阶段积累量和群体生长率均以 M_1D_1 最大;而各时期单茎干物质质量和抽穗前各阶段净同化率均以 M_1D_3 最大。而对于钵苗和毯苗机插在光合物质生产上的差异,张洪程等^[10]和张军等^[12]的研究表明钵苗机插 LAI、光合势、干物质的积累以及后期单茎茎鞘物质输出和转运等群体指标均优于常规毯苗机插。本研究综合比较钵苗机插和毯苗机插可以发现,毯苗机插相比钵苗机插个体优势得不到发挥,特别是随着栽插密度的增大,单茎干物质质量在抽穗和成熟期随密度的增大而显著降低;在干物质生产、分配、转化以及光合生产等方面,钵苗机插尤其是在 25 d 秧龄时相比毯苗机插显示出了较大的优越性。

3.2 不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻产量及其构成因子的影响

关于不同秧龄对产量及其构成的影响,普遍认为随着秧龄的增大,群体总穗数、每穗总粒数和结实率会同步下降,产量随之而显著下降^[14,24];但也有研究表明通过培育长龄壮秧,能促进增产^[29-30]。而在密度方面,前人研究发现,对千粒重影响较小,但随栽插密度的降低,每穗粒数和结实率逐渐升高^[31-32],而由于总颖花数的降低,产量随之降低。对于钵苗机插和毯苗机插在产量及其构成上的差异,前人的研究表明每穗粒数、结实率、千粒重以及最终的产量均以钵苗机插更高^[10,12]。本研究中选用的两个秧龄在两种机插与三种密度的配置下对产量及其构成的影响不尽一致。随着秧龄的增加,同一机插方式和密度下有效穗数、每穗粒数和结实率均变小,随之各处理的产量均表现为 40 d<25 d,究其原因,长秧龄移栽缩短了秧苗本田生长时间和生育期,缩短了有效分蘖时间,导致干物质积累量的减少,最终导致产量的降低。本研究 $T_1M_1D_2$ 处理产量最高,虽然有效穗数显著低于 $T_1M_1D_1$ 处理,但其每穗粒数和结实率更高,这主要是由于杂交籼稻分蘖性强,密度稍高时群体生长量过大,遮蔽严重,阻碍其光合物质生产,而毯苗 25 d 秧龄下毯苗各处理的产量均显著低于钵苗的处理,其主要原因是每穗粒数的显著降低。而 40 d 秧龄下钵苗中 M_1D_1 处理、毯苗中 M_2D_4 处理产量最高,而在此基础上增大机插株距,扩大栽插密度,均会导致产量显著降低,且此时钵苗优势体现在总颖花数,而毯苗的优势体现在有效穗数上,表明大秧龄下必须保障较高的机插密度才可维持较高产量,而随着栽插密度的增加每穗粒数和结实率均不同程度的降低。无论是

25 d 还是 40 d 秧龄毯苗机插与密度最佳组合均为 M_2D_4 ,表明毯苗机插在高密度栽培措施下还可维持较高产量,尤其是小秧龄的产量优势更突出。张洪程等^[10]和胡雅杰等^[11,16]以不同粳稻品种、不同穗重型品种为材料,进行钵苗(30 d 秧龄,机插密度 33.0 cm×12.0 cm)和毯苗机插(20 d 秧龄,机插密度 30.0 cm×13 cm)的研究对比表明,在相同基本苗的情况下,最终的有效穗均以毯苗机插更高,而在每穗粒数、结实率和千粒重各产量构成因素方面,钵苗优势明显,其产量形成优势的主要特征是“穗大粒多”。本研究在杂交籼稻不同秧龄和机插方式与密度配合下也进一步表明,较毯苗机插,钵苗机插产量优势明显,钵苗机插杂交籼稻产量构成特征表现为“穗数足、粒数多、结实高”。同时本研究结果还表明,毯苗机插和钵苗机插两种方式比较,不同机插秧龄和密度下,秧龄是影响有效穗数、每穗粒数及稻谷产量的主要因素,机插方式和密度配合是调控手段;毯苗机插获得高产主要依靠单位面积的有效穗数,而钵苗机插则是在稳定穗数的基础上,有较高的每穗粒数和结实率,群体质量及产量构成更加协调,这与钵苗在前期生长发育优势、物质积累与后期的高效的物质转运显著相关。因此,今后对于钵苗机插杂交籼稻的研究可以考虑增加基本苗数以及做好水肥调控措施,提高成穗率,增加有效穗。但对于以杂交稻为主、品种类型多样、茬口以及生态环境复杂的西南稻区来说,钵育苗机插配套技术体系相对毯苗机插的研究来说还不尽完善。在品种选择、株行距调节、水肥运筹等关键农艺措施和配套农业机械方面的融合,还需要进一步的系统研究。

4 结论

本研究表明钵苗机插较毯苗机插优势显著,在 25 d 秧龄下,机插行株距为 33 cm×15.5 cm 时,能够充分利用光温资源,光合物质生产表现最好,产量结构优势明显,最终产量最高。机插大秧龄钵苗(40 d)可以适当缩减机插株距,行株距为 33 cm×14.5 cm 时,有利于通风透光和改善冠层对光能的充分利用,并协调好钵苗机插个体与群体间的矛盾,使群体结构优化,利于大秧龄杂交籼稻穗型优势的发挥,进而提高产量。而毯苗机插必须通过小秧龄以及高密度的优势来弥补个体所带来的缺陷,从而获得稳产。

参考文献:

- [1] 朱德峰, 陈惠哲. 水稻机插秧发展与粮食安全. 中国稻米, 2009, (6): 4-7.
Zhu D F, Chen H Z. Development of mechanical-transplanting rice and food safety. *China Rice*, 2009, (6): 4-7. (in Chinese)
- [2] 孙春梅, 张山泉, 钟平, 邵文奇, 陈川, 庄春. 直播稻与机插秧优缺点分析. 现代农业科技, 2008, 24: 213, 217.
Sun C M, Zhang S Q, Zhong P, Shao W Q, Chen C, Zhuang C. Advantages and disadvantages analysis of direct seeding with mechanical-transplanter. *Mod Agric Sci Technol*, 2008, 24: 213, 217. (in Chinese)
- [3] 朱德峰, 程式华, 张玉屏, 林贤青, 陈惠哲. 全球水稻生产现状与制约因素分析. 中国农业科学, 2010, 43(3): 474-479.
Zhu D F, Cheng S H, Zhang Y P, Lin X Q, Chen H Z. Analysis of status and constraints of rice production in the world. *Sci Agric Sin*, 2010, 43(3): 474-479. (in Chinese with English abstract)
- [4] 钱海峰, 魏清勇. 水稻插秧机国内外发展现状. 现代化农业, 2014, (3): 62-63.
Qian H F, Wei Q Y. The development status of domestic and foreign rice transplanter, *Modern Agric*, 2014, (3): 62-63. (in Chinese)
- [5] 李耀明, 徐立章, 向忠平, 邓玲黎. 日本水稻种植机械化技术的最新研究进展. 农业工程学报, 2005, 21(11): 182-185.
Li Y M, Xu L Z, Xiang Z P, Deng L L. Research advances of rice planting mechanization in Japan. *Trans CSAE*, 2005, 21(11): 182-185. (in Chinese with English abstract)
- [6] 李杰, 张洪程, 常勇, 龚金龙, 郭振华, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 高辉. 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. 作物学报, 2011, 37(7): 1235-1248.
Li J, Zhang H C, Chang Y, Gong J L, Guo Z H, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Gao H. Characteristics of photosynthesis and matter production of rice with different planting methods under high-yielding cultivation condition. *Acta Agron Sin*, 2011, 37(7): 1235-1248. (in Chinese with English abstract)
- [7] 沈建辉, 邵文娟, 张祖建, 景启坚, 杨建昌, 陈文林, 朱庆森. 苗床落谷密度、施肥量和秧龄对机插稻苗质及大田产量的影响. 作物学报, 2006, 32(3): 402-409.
Shen J H, Sao W J, Zhang Z J, Jing Q J, Yang J C, Chen W L, Zhu Q S. Effects of sowing density, fertilizer amount in seedbed and seedling age on seedling quality and grain yield in paddy field for mechanical transplanting rice. *Acta Agron Sin*, 2006, 32(3): 402-409. (in Chinese with English abstract)
- [8] 于林惠, 李刚华, 徐晶晶, 凌启鸿, 丁艳锋. 基于高产示范方的机插水稻群体特征研究. 中国水稻科学, 2012, 26(4): 451-456.
Yu L H, Li G H, Xu J J, Ling Q H, Ding Y F. Population characteristics of machine-transplanted japonica rice based on high-yield demonstration fields. *Chin J Rice Sci*, 2012, 26(4): 451-456. (in Chinese with English abstract)
- [9] 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. 中国农业科学, 2014, 47(7): 1273-1289.
Zhang H C, Gong J L. Research status and development discussion on high-yielding agronomy of mechanized planting rice in China. *Sci Agric Sin*, 2014, 47(7): 1273-1289. (in Chinese with English abstract)
- [10] 张洪程, 朱聪聪, 霍中洋, 许轲, 蒋晓鸿, 陈厚存, 高尚勤, 李德剑, 赵成美, 戴其根. 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. 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)
- [11] 胡雅杰, 邢志鹏, 龚金龙, 刘国涛, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 郭保卫, 沙安勤, 周有炎, 罗学超, 刘国林. 钵苗机插水稻群体动态特征及高产形成机制的探讨. 中国农业科学, 2014, 47 (5): 865-879.
Hu Y J, Xing Z P, Gong J L, Liu G T, Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Guo B W, Sha A Q, Zhou Y Y, Luo X C, Liu G L. Study on population characteristics and formation mechanisms for high yield of pot-seedling mechanical transplanting Rice. *Sci Agric Sin*, 2014, 47 (5): 865-879. (in Chinese with English abstract)
- [12] 张军, 王兴龙, 石广跃, 米长生, 郭保卫, 李必忠, 方书亮, 陆海空, 刘忠红, 张永进, 庚跃东. 不同机栽方式下杂交稻产量及其形成特征比较. 农业工程学报, 2015, 31(10): 84-91.
Zhang J, Wang X L, Shi G Y, Mi C S, Guo B W, Li B Z, Fang S L, Lu H K, Liu Z H, Zhang Y J, Geng Y D. Yield and its formation of hybrid rice under different mechanical transplanted methods. *Trans CSAE*, 2015, 31(10): 84-91. (in Chinese with English abstract)
- [13] 吴文革, 张健美, 周永进, 陈刚, 许有尊, 李胜群, 严文学, 高尚勤. 江淮水稻钵苗机插生育特性与高产栽培关键技术研究. 中国稻米, 2015, 21(4): 118-124.
Wu W G, Zhang J M, Zhou Y J, Chen G, Xu Y Z, Li S Q, Yan W X, Gao S Q. Study on growth and development characteristics and high-yielding cultivation techniques of rice with nutrition bowl mechanical transplanting in Jianghuai area. *China Rice*, 2015, 21(4): 118-124. (in Chinese with English abstract)
- [14] 马均, 孙永健, 苟永成, 李学根, 罗甫全. 杂交稻钵形毯状育秧机插不同播种密度与秧龄研究. 中国稻米,

- 2011, 17(3): 11-14.
- Ma J, Sun Y J, Gou Y C, Li X G, Luo F Q. Research of different sowing density and seedling age of transplanted hybrid rice bowl-carpet seedling machine. *China Rice*, 2011, 17(3): 11-14. (in Chinese)
- [15] 许俊伟, 孟天瑶, 荆培培, 张洪程, 李超, 戴其根, 魏海燕, 郭保卫. 机插密度对不同类型水稻抗倒伏能力及产量的影响. *作物学报*, 2015, 11: 1767-1776.
- Xu J W, Meng T Y, Jing P P, Zhang H C, Li C, Dai Q G, Wei H Y, Guo B W. Effect of mechanical-transplanting density on lodging resistance and yield in different types of rice. *Acta Agron Sin*, 2015, 11: 1767-1776. (in Chinese with English abstract)
- [16] 胡雅杰, 曹伟伟, 钱海军, 邢志鹏, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 郭保卫, 高辉, 沙安勤, 周有炎, 刘国林. 钵苗机插密度对不同类型水稻品种产量、株型和抗倒伏能力的影响. *作物学报*, 2015, 41(5): 743-757.
- Hu Y J, Cao W W, Qian H J, Xing Z P, Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Guo B W, Gao H, Sha A Q, Zhou Y Y, Liu G L. Effect of planting density of mechanically transplanted pot seedlings on yield, plant type and lodging resistance in rice with different panicle types. *Acta Agron Sin*, 2015, 41(5): 743-757. (in Chinese with English abstract)
- [17] 郑克武, 邹江石, 吕川根. 氮肥和栽插密度对杂交稻“两优培九”产量及氮素吸收利用的影响. *作物学报*, 2006, 32(6): 885-893.
- Zheng K W, Zou J S, Lv C G. Effects of transplanting density and nitrogen fertilizer on yield formation and N absorption in a two-line intersubspecific hybrid rice/Liangyoupeijiu. *Acta Agron Sin*, 2006, 32(6): 885-893. (in Chinese with English abstract)
- [18] 李应洪, 李玥, 严奉君, 孙加威, 赵建红, 李娜, 孙永健, 马均. 不同秧龄及剪根程度对杂交水稻生长特性和产量的影响. *杂交水稻*, 2016, 31(3): 50-57+63.
- Li Y H, Li Y, Yan F J, Sun J W, Zhao J H, Li N, Sun Y J, Ma J. Effects of seedling-age and root-cutting on growth characteristics and grain yield of hybrid rice. *Hybrid Rice*, 2016, 31(3): 50-57, 63. (in Chinese with English abstract)
- [19] 张洪程. 水稻钵苗精确机插高产栽培新技术. 北京: 中国农业出版社, 2014: 3-70
- Zhang H C. High yield cultivation technology of rice bowl mechanical-transplanting. Beijing: China Agriculture Press, 2014: 1-8. (in Chinese)
- [20] 宋云生, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 朱聪聪, 孙圳, 杨大柳, 王惟清, 刘俊, 吴爱国. 水稻钵苗机插秧苗素质的调控. *农业工程学报*, 2013, 29(22): 11-22.
- Song Y S, Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Zhu C C, Sun Z, Yang D L, Wang W Q, Liu J, Wu A G. Seedling quality regulation of rice potted-seedling in mechanical transplanting. *Trans CSAE*, 2013, 29(22): 11-22. (in Chinese with English abstract)
- [21] 张祖建, 王君, 郎有忠, 于林惠, 薛艳凤, 朱庆森. 机插稻超秧龄秧苗的生长特点研究. *作物学报*, 2008, 34(2): 297-304.
- Zhang Z J, Wang J, Lang Y Z, Yu L H, Xue Y F, Zhu Q S. Growing characteristics of rice seedlings of over-optimum age for mechanical transplanting. *Acta Agron Sin*, 2008, 34(2): 297-304. (in Chinese with English abstract)
- [22] 邵文娟, 沈建辉, 张祖建, 李伟海, 杨建昌, 朱庆森. 水稻机插双膜育秧床土培肥对秧苗素质和秧龄弹性的影响. *扬州大学学报农业与生命科学版*, 2004, 25(2): 22-26.
- Shao W J, Shen J H, Zhang Z J, Li W H, Yang J C, Zhu Q S. Effects of seedbed fertilizing on quality and flexibility of rice seedlings nursed with tow-layer plastic film for mechanical transplanting. *J Yangzhou Univ*, 2004, 25(2): 22-26. (in Chinese with English abstract)
- [23] 沈建辉, 邵文娟, 张祖建, 杨建昌, 曹卫星, 朱庆森. 水稻机插中苗双膜育秧落谷密度对苗质和产量影响的研究. *作物学报*, 2004, 30(9): 906-911.
- Shen J H, Shao W J, Zhang Z J, Yang J C, Cao W X, Zhu Q S. Effects of sowing density on quality of medium-seedling nursed with two-layer plastic film and grain yield in mechanical transplanting Rice. *Acta Agron Sin*, 2004, 30(9): 906-911. (in Chinese with English abstract)
- [24] [24] 贾现文, 朱起超, 杨志远, 孙永健, 郭翔, 石勇, 马均. 移栽秧龄对机插杂交稻产量及群体质量的影响. *农业工程学报*, 2014, 30(12): 18-25.
- Jia X W, Zhu Q C, Yang Z Y, Sun Y J, Guo X, Shi Y, Ma J. Effect of seedling age on yield and population quality of mechanized transplanted hybrid rice. *Trans CSAE*, 2014, 30(12): 18-25. (in Chinese with English abstract)
- [25] 钱银飞. 不同穗型水稻品种机插规格的综合研究. 扬州: 扬州大学, 2009.
- Qian Y F. Studies on effect of transplanting pattern on different panicle type mechanical transplanted rice. Yangzhou: Yangzhou University, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [26] 李木英, 石庆华, 王涛, 方慧铃, 潘晓华, 谭雪明. 种植密度对双季超级稻群体发育和产量的影响. *杂交水稻*, 2009, 24(2): 72-77.
- Li M Y, Shi Q H, Wang T, Fang H L, Pan X H, Tan X M. Effects of different transplanting densities on the population development and grain yield of double cropping super rice. *Hybrid Rice*, 2009, 24(2): 72-77. (in Chinese with English abstract)
- [27] 龙旭. 水稻强化栽培不同移栽秧龄、密度的研究. 成都: 四川农业大学, 2013.
- Long X. Study on the different seedling ages and

- densities of SRI. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [28] 朱聪聪, 张洪程, 郭保卫, 曹利强, 江峰, 葛梦婕, 花劲, 宋云生, 周兴涛, 霍中洋, 许轲, 戴其根, 魏海燕, 朱大伟. 钵苗机插密度对不同类型水稻产量及光合物质生产特性的影响. 作物学报, 2014, 40(1): 122-133.
Zhu C C, Zhang H C, Guo B W, Cao L Q, Jiang F, Ge M J, Hua J, Song Y S, Zhou X T, Huo Z Y, Xu K, Dai Q G, Wei H Y, Zhu D W. Effect of planting density on yield and photosynthate production characteristics in different types of rice with bowl mechanical-transplanting method. *Acta Agron Sin*, 2014, 40(1): 122-133. (in Chinese with English abstract)
- [29] 陈小荣, 潘晓华. 早育长秧龄抛栽水稻的养分及干物质积累特性初步研究. 中国水稻科学, 2001, 15(2): 34-39.
Chen X R, Pan X H. Preliminary study on the accumulation characters of nutrient and dry matter of dry land-raised long-age seedlings associated with scattered-planting in rice. *Chin J Rice Sci*, 2001, 15(2): 34-39. (in Chinese with English abstract)
- [30] 刘奇华, 吴修, 陈博聪, 马加清, 高洁, 张士永, 陈峰. 长秧龄机插稻氮素利用特性及其与环境温度的相关性. 农业工程学报, 2013, 29(22): 23-31.
Liu Q H, Wu X, Chen B C, Ma J Q, Gao J, Zhang S Y, Chen F. Nitrogen utilization in mechanical transplanted rice with long seedling age and its correlation with environmental temperatures. *Trans CSAE*, 2013, 29(22): 23-31. (in Chinese with English abstract)
- [31] 陈海飞, 冯洋, 蔡红梅, 徐芳森, 周卫, 刘芳, 庞再明, 李登荣. 氮肥与移栽密度互作对低产田水稻群体结构及产量的影响. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6): 1319-1328.
Chen H F, Feng Y, Cai H M, Xu F S, Zhou W, Liu F, Pang Z M, Li D R. Effect of the interaction of nitrogen and transplanting density on the rice population structure and grain yield in low-yield paddy fields. *Plant Nutr Fert Sci*, 2014, 20(6): 1319-1328. (in Chinese with English abstract)
- [32] 赵黎明, 李明, 郑殿峰, 顾春梅, 那永光, 解保胜. 灌溉方式与种植密度对寒地水稻产量及光合物质生产特性的影响. 农业工程学报, 2015, 31(6): 159-169.
Zhao L M, Li M, Zheng D F, Gu C M, Na Y G, Xie B S. Effects of irrigation methods and rice planting densities on yield and photosynthetic characteristics of matter production in cold area. *Trans CSAE*, 2015, 31(6): 159-169. (in Chinese with English abstract)