

播种量对机插水卷苗秧苗素质及产量形成的影响

李玉祥^{1,2} 何知舟¹ 丁艳锋¹ 王绍华¹ 刘正辉¹ 唐设¹ 丁承强¹ 陈琳¹ 李刚华^{1,*}

(¹江苏省现代作物生产协同创新中心/南京农业大学 国家信息农业工程技术中心/农业部南方作物生理生态重点开放实验室, 南京 210095; ²新疆石河子大学 农学院/新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室, 新疆 石河子 832003; * 通讯联系人, E-mail: lgh@njau.edu.cn)

Effects of Sowing Densities on Quality and Yield Formation of Hydroponically Grown Long-mat Rice Seedlings Under Mechanical Transplanting

LI Yuxiang^{1,2}, HE Zhizhou¹, DING Yanfeng¹, WANG Shaohua¹, LIU Zhenghui¹, TANG She¹,
DING Chengqiang¹, CHEN Lin¹, LI Ganghua^{1,*}

(¹Jiangsu Collaborative Innovation Center for Modern Crop Production / National Engineering and Technology Center for Information Agriculture / Key Laboratory of Crop Physiology and Ecology in Southern China, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; ²The Key Laboratory of Oasis Eco-agriculture of Xinjiang Production Construction Group / Agricultural College of Shihezi University, Shihezi 832003, China; * Corresponding author, E-mail: lgh@njau.edu.cn)

Abstract:【Objective】The objective of the research is to determine the suitable sowing density of hydroponically grown long-mat rice seedlings (HLMS) under mechanical transplanting. 【Method】The effects of sowing densities on seedling quality, mechanical transplanting quality, field growth characteristics and yield of HLMS were analyzed. A widely grown conventional *japonica* rice cultivar (Wuyunjing 24) and an *indica* hybrid rice cultivar (6 Liangyou 9368) were used as test materials. 【Result】Dry weight of shoot and root, root-developing ability, root activity, seedling emergence rate, seedling base stem diameter, dry weight per unit of seedling height and photosynthetic rate were significantly increased and the leaf area index was significantly decreased with decreasing sowing density for both cultivars before transplantation. There were advantages of seedling reviving in the paddy field, tillering capacity and spikelet number per panicle for thin sowing treatments, but less basic seedlings and panicles at too low sowing density. The grain yield was not decreased significantly when the sowing density reduced to 738.9 g/m² for Wuyunjing 24 and 431.0 g/m² for 6 Liangyou 9368, respectively. However, the yield was decreased significantly when sowing density reduced continuously for both cultivars. 【Conclusion】The suitable sowing density of HLMS was 2.03 cm⁻² for Wuyunjing 24 and 1.14 cm⁻² for 6 Liangyou 9368, respectively.

Key words: rice (*Oriza sativa*); yield; mechanical transplanting; seedling; sowing density

摘 要:【目的】本研究旨在探明水卷苗机插高产适宜的播种量。【方法】以长江中下游地区代表性品种武运粳 24 号(常规粳稻)和 6 两优 9368(杂交粳稻)为供试材料, 研究不同播种量对水卷苗秧苗素质、机插质量、大田生长特性及产量的影响。【结果】移栽前秧苗地上部和根系干物质质量、发根力、根系活性、成苗率、苗基宽、重高比及光合速率均随着播种量的降低而显著增强, 叶面积指数显著下降。小播量处理秧苗返青活棵快、分蘖发生力强、每穗粒数多, 但播量过小导致基本苗和穗数不足, 当武运粳 24 号播种量从 180 g/盘降低到 120 g/盘(738.9 g/m²)、6 两优 9368 播种量从 110 g/盘降低到 70 g/盘(431.0 g/m²)时, 产量没有显著变化; 但播种量继续降低, 产量均显著下降。【结论】水卷苗育秧方法适宜播种量, 常规粳稻为 2.03 粒/cm², 杂交粳稻为 1.14 粒/cm²。

关键词: 水稻; 产量; 机插; 秧苗素质; 播种量

中图分类号: S223.91; S511.042

文献标志码: A

文章编号: 1001-7216(2018)03-0247-10

水稻机插育秧——水卷苗育秧方法最早是由日本学者在 20 世纪末提出的, 在日本已有一定的示范应用面积^[1-4]。其主要有两个基本特征: 1) 摒弃了

传统育秧方法所用的泥土(基质), 以无纺布作为育秧介质, 采用水培的方式进行秧苗培育; 2) 秧苗改变了传统秧块的长方形短块形式(0.28 m×0.58 m),

收稿日期: 2017-08-29; 修改稿收到日期: 2017-11-22。

基金项目: 国家重点研究计划资助项目(2017YFD0301200, 2016YFD0300505); 江苏省重点研发计划资助项目(BE2017369); 江苏现代农业产业体系资助项目(SXGC[2017]283); 石河子大学高层次人才资助项目(RCSX201724)。

表 1 播种量设置

Table 1. Design of experimental treatments (sowing density).

品种 Cultivar	播种量(常规秧盘) Sowing density/(g nursery ⁻¹) (0.58 m×0.28 m×0.03 m)	播种量(水卷苗苗床) Sowing density/(g nursery ⁻¹) (4 m×0.28 m×0.05 m)	播种量 Sowing density (g m ⁻²)	单位面积种子数 Number of seeds per cm ²
武运粳 24 号 Wuyunjing 24	90	620.7	554.2	1.52
	120	827.6	738.9	2.03
	150	1034.5	923.6	2.54
	180	1241.4	1108.4	3.05
6 两优 9368	50	344.8	307.9	0.82
6 liangyou 9368	70	482.8	431.0	1.14
	90	620.7	554.2	1.47
	110	758.6	677.3	1.80

而是成为了长度为 3~6 m 的秧苗卷。为了解决我国毯苗机插水稻育秧取土难、劳动强度大、根系盘结力小等问题,促进我国水稻育秧向轻简化、工厂化、集约化方向发展,本课题组在 2011 年从日本引进了水卷苗育秧方法相关技术体系,并结合我国水稻生产实际,从育秧装置、育秧介质、营养液配方、育秧工序、秧苗管理等方面进行了优化研究^[5-12],初步实现了育秧轻量化、清洁化和高效化,产量达到常规营养土和基质育秧的水平^[11-13]。

适宜播种量的确定是机插高产的基础。常规营养土育秧,播种量需要考虑盘根性、漏插率和基本苗等问题,所以经常导致育秧播种密度偏高。水卷苗育秧方法以无纺布和稻壳为育秧介质,与常规营养土育秧方法相比,根系盘结力显著增强,能够满足水稻育秧、起秧等农事操作及机插要求^[11,13]。但在适龄移栽期,如何协调产量与用种量间的关系进而确定适宜播种量。针对此问题,本研究以长江中下游地区主栽水稻品种常规粳稻武运粳 24 号和杂交籼稻 6 两优 9368 为供试材料,研究不同播种量对水卷苗育秧方法移栽前秧苗素质、机插质量、大田群体生长特性、产量及产量构成因子的影响,探析播种量与产量之间的关系,明确播种量对水卷苗育秧方法对水稻生长发育的影响。研究结果可为水卷苗育秧方法的应用提供技术参考和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点及品种

试验在江苏省丹阳市延陵镇南京农业大学试验基地(31°54'31"N, 119°28'21"E)进行。水卷苗育秧(HLMS)在玻璃温室中进行。大田土壤为黏壤土,土壤全氮质量分数为 1.11 g/kg,碱解氮质量分数为 86.40 mg/kg,速效磷质量分数为 13.23 mg/kg,速效

钾质量分数为 98.83 mg/kg。选择长江中下游地区主栽水稻品种常规粳稻武运粳 24 号和杂交籼稻 6 两优 9368 为供试材料,两者籽粒千粒重分别为 28 g 和 29 g。

1.2 试验设计

2013 年以长江中下游地区主栽水稻品种常规粳稻武运粳 24 号和杂交籼稻 6 两优 9368 为供试材料,以常规育秧盘计量(0.58 m×0.28 m×0.03 m)。武运粳 24 号设置芽谷质量 90 g/盘、120 g/盘、150 g/盘和 180 g/盘 4 个播种量处理,6 两优 9368 设置芽谷质量 50 g/盘、70 g/盘、90 g/盘和 110 g/盘 4 个播种量处理,具体播种量设置见表 1 所示。每个处理播 1 个育秧槽(0.28 m×4 m),重复 3 次;其中,芽谷质量为稻种质量 1.3 倍。于 6 月 1 日播种,6 月 18 日用高速插秧机[PG63DVRF + Long mat (PG6, 63) SET, Iseki Co., Ltd, Ehime county, Japan] 大田机插。大田行株距武运粳 24 号为 30 cm×13.3 cm,6 两优 9368 为 30 cm×15 cm,小区面积 54 m²(5.4 m×10 m),重复 3 次。大田施氮量(尿素,折合成纯氮)为 270 kg/hm², $m_{基肥}:m_{穗肥}=6:4$,其中基肥和分蘖肥各占 50%,穗肥分两次等量施用(分别于倒 4 叶和倒 2 叶施用);氮磷钾配比为 $m_N:m_{P_{2O_5}}:m_{K_2O}=10:5:7$,磷肥全作基肥一次施用,钾肥分两次施用,其中,基肥和促花肥各占 50%。

水卷苗育秧方法以 20 g 白色纺黏无纺布(南通康达复合材料有限公司)+1 cm 稻壳(丹阳市延陵镇延丰大米加工厂的下脚料)为育秧介质^[6],采用“水稻水培育秧苗床”进行秧苗培育^[8],苗床长 4 m,每个苗床由 4 个育秧槽(0.28 m×4 m)组成,采用“水稻水培育秧营养液及其制备方法”配方为秧苗供给养分^[5],用 HCl 和 NaOH 调节营养液 pH,使其维持为 4.5~5.5。播种后采用黑色 40 g 纺黏无纺布覆盖育苗,至秧苗立针后揭膜,从秧苗 1 叶 1 心期开始适

时炼苗。播种后至秧苗 2 叶期(播种后第 6 天)用清水喷施浇灌秧苗, 从 2 叶期开始用营养液通过水泵循环浇灌秧苗。于播种后第 7 天用 15% 多效唑可湿性粉剂(50 g/667m²)兑水均匀喷施秧苗。大田水分管理 & 病虫害防治按照当地常规管理要求进行。

1.3 取样及测定方法

1) 秧苗素质: 移栽前每处理随机取 20 株秧苗测定叶片数、株高、根长、根数、苗基宽等, 量取秧苗叶片长宽, 用于计算秧苗单株叶面积; 每处理取 100 株秧苗分地上部与地下部两部分, 称鲜质量后置于 105 ℃ 烘箱中烘 30 min 杀青, 之后在 80℃ 下烘至恒重, 记录干质量, 并计算质量高度比(质量高度比=地上部干质量/苗高)。切取 8 cm×8 cm 板面的秧苗一块, 记录苗数, 并计算成苗率[成苗率=(总苗数/种子数)×100%]和单位面积成苗数(单位面积成苗数=总苗数/面积)。移栽前每处理选取生长均匀的秧苗 20 株, 仔细剪去根系, 后置于水培箱中, 7 d 后计数新发根数(≥5 mm), 即为水培发根力。取根系用 α-萘胺法测定根系活力。

2) 机插指标: 按照《GB/T6243—86 水稻插秧机试验方法》评价。机插大田 5 d 后, 每小区选取代表性观测点, 每个测定点 6 行(1 个插秧机作业幅宽, 6 行), 每行连查 100 穴, 计数空穴数; 每行测定 20 穴, 分别计数每穴苗数、漂秧数、伤秧数及翻倒数。

3) 群体茎蘖动态: 从移栽至拔节期, 每 5 d 一次, 拔节至抽穗期每 7 d 一次调查茎蘖数, 每个小区定 1 个 6 行监测点, 每行连查 10 穴; 并计算单株分蘖数(单株分蘖数=每穴分蘖数/每穴基本苗数)和分蘖发生力(分蘖发生力=单株最大分蘖数/移栽到最大分蘖数所用时间)。

4) 干物质积累: 于移栽期(transplanting stage,

TS)、穗分化期(panicle initiation stage, PI)、抽穗期(heading stage, HS)和成熟期(maturing stage, MS), 每小区普查 60 穴茎蘖(穗)数, 按平均茎蘖(穗)数取 5 穴完整植株, 105℃ 下杀青 30 min, 然后 80℃ 下烘至恒重后测定干物质量。

5) 产量: 成熟期每小区按平均穗数取 5 穴, 计算每穗粒数、空瘪粒数、千粒重。按 14% 的籽粒含水量折算产量。

1.4 数据统计与分析方法

在 Excel 2007 软件中进行数据常规处理和作图, 在 SPSS 20.0 中进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 秧苗素质

2.1.1 成苗率和单位面积成苗数

播种量对成苗率和单位面积成苗数的影响见图 1。随着播种量的增加两品种成苗率均显著下降, 且随着播量的增加下降幅度增加; 而单位面积成苗数随着播种量的增加显著增加, 但增加速度随着播种量的增加呈下降趋势。与武运梗 24 号 90 g/盘处理相比, 播种量增加到 120 g/盘、150 g/盘和 180 g/盘时成苗率分别下降 1.1%、7.0% 和 19.8%, 单位面积成苗数分别增加 31.9%、56.0% 和 61.4%; 与 6 两优 9368 50 g/盘处理相比, 播种量增加到 70 g/盘、90 g/盘和 110 g/盘时成苗率分别下降 3.7%、11.4% 和 20.6%, 单位面积成苗数分别增加 30.6%、64.5% 和 83.5%。

2.1.2 秧苗形态指标

移栽前, 随着播种量的增加两品种叶面积指数均显著增加(图 2-A~B), 而比叶重显著下降(图

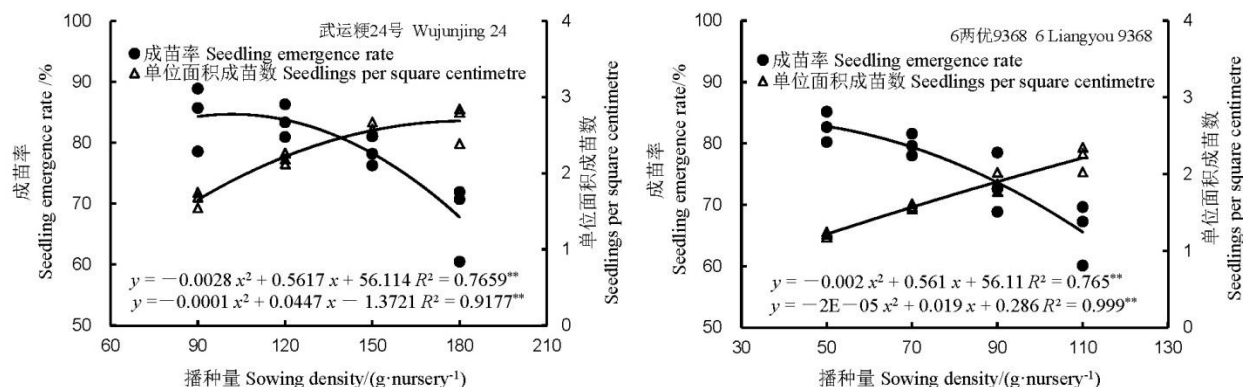
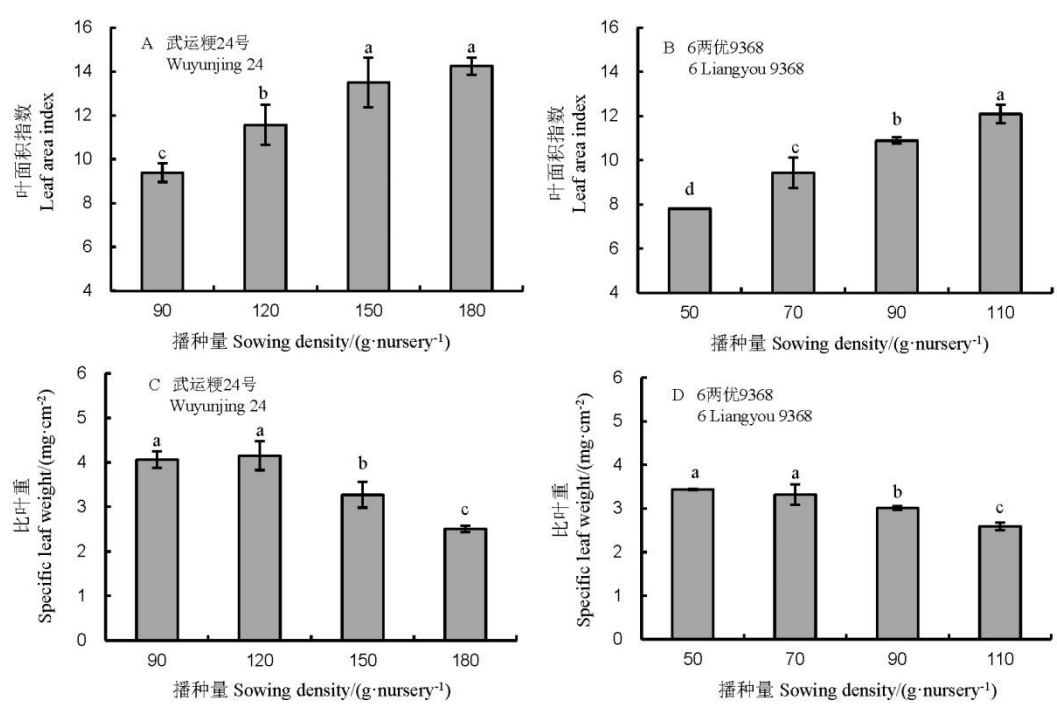


图 1 播种量对机插水卷秧苗成苗率及单位面积成苗数的影响

Fig. 1. Seedling emergence rate and seedling number per cm² of two cultivars under different sowing densities before transplanting for hydroponically grown long-mat rice seedlings(HLMS).



柱上不同小写字母表示同一品种下在 5% 水平上差异显著($n=3$, 最小显著差数法)。下同。
Different letters above the bars are significantly different at $P<0.05$ ($n=3$, LSD). The same as below.

图 2 播种量对机插水卷秧苗秧苗形态指标的影响

Fig. 2. Leaf area index and specific leaf weight of two rice cultivars under different sowing densities before transplanted for hydroponically grown long-mat rice seedlings(HLMS).

2-C~D)。其中, 武运梗 24 号 90 g/盘和 120 g/盘、6 两优 9368 50 g/盘和 70 g/盘处理间比叶重无显著差异。武运梗 24 号播种量由 90 g/盘增加到 120 g/盘、150 g/盘和 180 g/盘时, 叶面积指数分别增加 22.9%、44.6%和 52.7%, 比叶重分别降低 2.2%、19.5%和 38.2%; 6 两优 9368 播种量由 50 g/盘增加到 70 g/盘、90 g/盘和 110 g/盘时, 叶面积指数分别增加 20.9%、38.7%和 54.8%, 比叶重分别降低 3.2%、12.2%和 24.5%。由图 3 也可知, 单位面积成苗数和

叶面积指数呈显著正相关, 而与比叶重呈显著负相关。

2.1.3 秧苗物质积累

随着播种量的增加, 秧苗地上部和根系干物量、质量高度比、苗基宽、根系活力及水培发根力显著降低, 两品种表现一致(表 2)。其中, 武运梗 24 号播种量由 90 g/盘增加到 120 g/盘、150 g/盘和 180 g/盘时, 秧苗质量高度比分别下降 3.8%、32.5%和 53.8%, 90 g/盘和 120 g/盘处理间无显著差异; 6

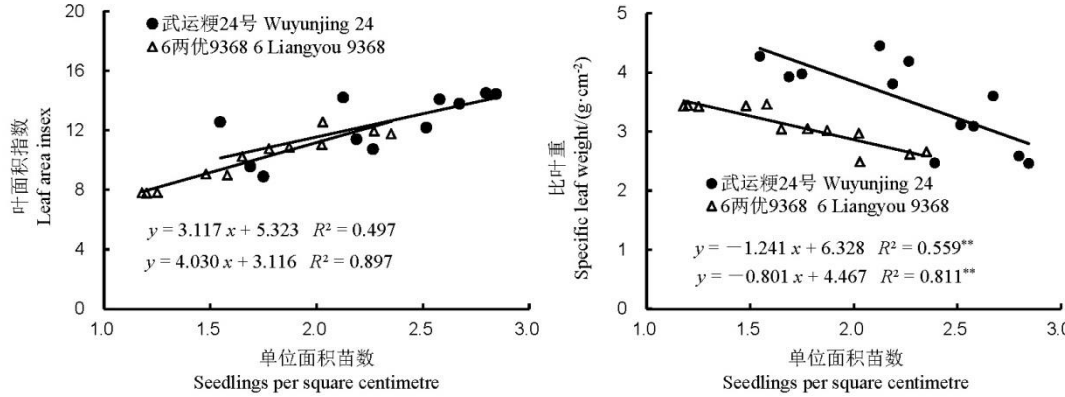


图 3 苗床单位面积成苗数和叶面积及比叶重相关性分析

Fig. 3. Relationship among seedlings per square centimetre and leaf area index and specific leaf weight of both cultivars before transplanting for hydroponically grown long-mat rice seedlings(HLMS).

表 2 播种量对机插水卷秧苗物质积累的影响

Table 2. Seedling biomass accumulation of two cultivars under different sowing densities before transplanting for hydroponically grown long-mat rice seedlings(HLMS).

播种量 Sowing density /(g nursery ⁻¹)	叶龄 NAL	株高 SH/cm	根数 NR	根长 LR/cm	地上部干质量 DWS/g	根质量 DWR/g	质量高度比 DW/H/(mg cm ⁻¹)	根冠比 R/S	苗基宽 SD/mm	根系活性 RA/(ug ⁻¹ g ⁻¹)	发根力 RDA
武运粳 24 号 Wuyunjing 24											
90	3.9±0.2 a	10.8±0.2 a	10.7±0.6 a	8.2±1.4 a	4.51±0.49 a	2.29±0.10 a	4.16±0.36 a	0.51±0.08 a	2.9±0.131 a	105.1±7.0 a	8.4±0.7 a
120	3.8±0.1 a	10.0±0.9 a	10.1±1.5 a	7.3±0.8 a	4.34±0.37 a	2.22±0.05 a	4.32±0.69 a	0.51±0.03 a	2.6±0.06 b	98.6±9.1 ab	7.6±0.2 a
150	3.9±0.6 a	11.2±0.3 a	10.3±2.1 a	8.6±0.6 a	3.14±0.71 b	2.00±0.14 ab	2.81±0.62 b	0.66±0.14 a	2.6±0.09 b	93.3±6.3 ab	6.3±0.4 b
180	3.9±0.1 a	10.8±0.2 a	10.8±1.2 a	8.8±0.5 a	2.38±0.55 c	1.50±0.11 c	2.21±0.54 c	0.65±0.16 a	2.7±0.14 b	79.4±6.5 b	4.5±0.1 c
6 两优 9368 6 liangyou 9368											
50	2.9±0.2 a	10.3±0.4 c	6.8±0.9 a	9.7±2.7 a	4.40±0.53 a	2.47±0.30 a	4.26±0.41 a	0.57±0.14 a	2.9±0.12 a	34.2±1.8 a	7.9±0.7 a
70	3.0±0.2 a	12.0±0.8 ab	6.5±0.2 a	9.4±0.9 a	3.95±0.27 ab	2.29±0.10 a	3.31±0.37 b	0.58±0.04 a	2.8±0.10 a	35.7±2.0 a	7.2±1.0 a
90	2.9±0.1 a	10.3±0.5 c	7.2±0.8 a	7.9±0.7 a	3.47±0.15 c	2.06±0.17 ab	3.35±0.06 b	0.59±0.07 a	2.5±0.11 b	33.9±1.7 a	6.7±0.6 ab
110	3.1±0.2 a	11.2±0.9 a	6.8±0.7 a	9.3±1.2 a	2.82±0.17 d	1.85±0.28 c	2.52±0.25 c	0.65±0.07 a	2.5±0.11 b	29.4±0.5 b	5.1±1.2 b

同品种处理下数据(平均值±标准差)后不同字母表示在 5% 水平上差异显著(n=3, 最小差异显著法)。NAL—出叶数(叶龄); SH—苗高; NR—根数; LR—根长; DWS—地上部百株干质量; DWR—根系百株干质量; DW/H—质量高度比; R/S—根冠比; SD—苗基宽; RA—根系活性; RDA—水培发根力。下同。

For a given variety, values (mean±SD) followed by different letters are significantly different at $P<0.05$ ($n=3$, LSD); NAL, Number of leaves; SH, Seedling height; NR, Number of root per seedling; DWS, Dry weight of shoot per 100 seedlings; DWR, Dry weight of the root per 100 seedlings; SD, Seedling base stem diameter; DW/H, Seedling shoot weight/seedling height; R/S, Root-shoot ratio; RA, Root-activity; RDA, Root-developing ability in water. The same as below.

两优 9368 播种量由 50 g/盘增加到 70 g/盘、90 g/盘和 110 g/盘时, 质量高度比分别下降 22.3%、21.4%和 40.8%。除 6 两优 9368 株高外, 处理间叶龄、根长、根数及根冠比无显著差异。

2.1.4 净光合速率

随着播种量的增加, 移栽前秧苗净光合速率显著下降, 两品种表现一致(图 4)。其中, 武运粳 24 号处理 90 g/盘和 120 g/盘间无显著差异, 但均显著高于 150 g/盘和 180 g/盘处理; 6 两优 9368 处理 50 g/盘和 70 g/盘间也无显著差异, 并均显著高于 90 g/盘和 110 g/盘处理。

2.2 机插质量

播种量对水卷秧机插质量影响见表 3。随着播种量的增加, 机插空穴率显著降低, 而漂秧率及每穴苗数显著增加, 两品种表现一致。其中, 与武运

粳 24 号 90 g/盘处理相比, 播种量增加到 120 g/盘、150 g/盘和 180 g/盘时, 空穴率分别降低 28.9%、54.4%和 62.4%, 而每穴苗数分别增加 10.2%、27.9%和 70.3%; 与 6 两优 9368 50 g/盘处理相比, 播种量增加到 70 g/盘、90 g/盘和 110 g/盘时, 空穴率分别降低 36.7%、54.7%和 72.7%, 而每穴苗数分别增加 11.5%、15.9%和 45.3%。不同播种量对伤秧率、翻倒率和勾秧率影响较小, 两品种表现一致。由图 5 可知, 苗床单位面积成苗数与机插空穴率呈极显著负相关, 而与每穴苗数呈极显著正相关。以上结果表明, 为了满足一定的机插质量要求和大田基本苗数, 苗床成苗数不应过少。

2.3 大田生长特性

2.3.1 茎蘖动态及分蘖发生力

播种量对机插水卷秧大田群体茎蘖动态及单

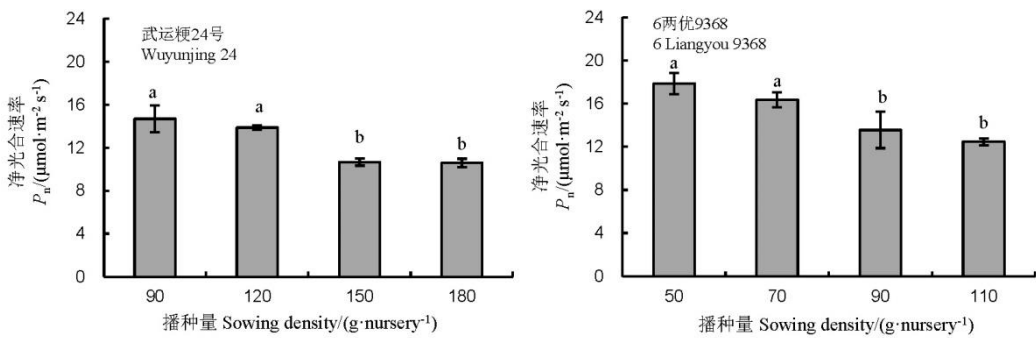


图 4 播种量对机插水卷秧移栽前净光合速率(P_n)的影响

Fig. 4. Photosynthetic rate (P_n) of two rice cultivars under different sowing densities before transplanted for hydroponically grown long-mat rice seedlings(HLMS).

表 3 播种量对水卷苗机插质量的影响

Table 3. Mechanical transplanting quality in paddy field of two cultivars under different sowing densities for hydroponically grown long-mat rice seedlings(HLMS).

播种量 Sowing density /(g nursery ⁻¹)	空穴率 Missing hill rate/%	漂秧率 Floating seedling rate/%	伤秧率 Damaged seedling rate/%	勾秧率 Folded seedling rate/%	翻倒率 Overturned seedling rate/%	每穴苗数 Seedlings per hill
武运粳 24 号 Wuyunjing 24						
90	12.1±8.3 a	2.11±1.35 b	0.44±0.51 a	0.44±0.39 a	0.89±0.38 a	3.2±0.6 b
120	8.6±1.5 b	3.04±2.31 ab	1.00±0.33 a	0.44±0.77 a	0.66±0.34 a	3.5±0.7 b
150	5.5±3.9 b	6.44±0.39 a	0.33±0.34 a	0.77±0.50 a	0.44±0.51 a	4.1±0.3 b
180	4.6±2.5 c	4.89±1.68 a	0.33±0.34 a	1.22±0.51 a	0.33±0.01 a	5.5±0.8 a
6 两优 9368 6 Liangyou 9368						
50	18.8±4.7 a	3.33±1.76 b	0.44±1.96 a	0.66±0.34 a	0.33±0.34 a	3.0±0.5 b
70	11.9±2.7 b	2.66±1.20 b	0.66±0.34 a	0.56±0.39 a	0.44±0.20 a	3.3±0.1 b
90	8.5±1.3 bc	4.18±2.14 ab	0.89±0.38 a	0.23±0.19 a	0.22±0.19 a	3.4±0.2 b
110	5.1±3.7 d	5.33±2.01 a	1.55±0.96 a	0.33±0.34 a	0.11±0.19 a	4.3±0.4 a

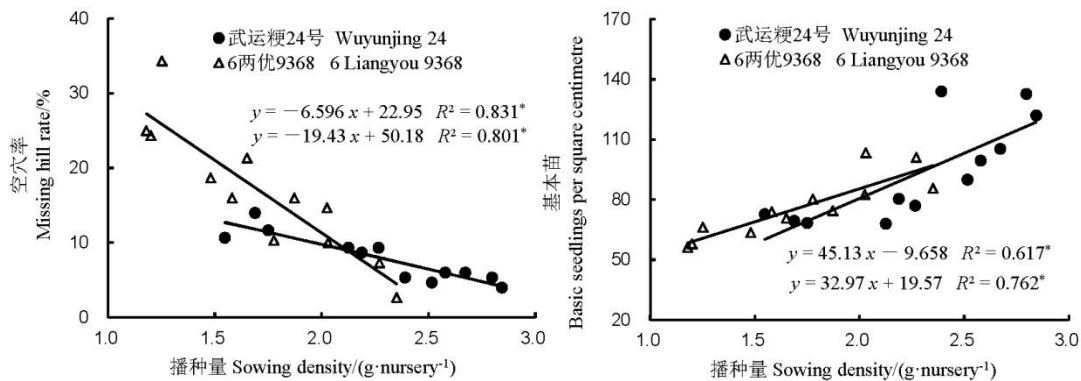


图 5 播种量和机插空穴率及基本苗数相关性分析

Fig. 5. Regression analysis of sowing density on missing hill rate and basic seedlings of two cultivars for hydroponically grown long-mat rice seedlings(HLMS).

株分蘖发生动态的影响见图 6。随着播种量的增加,两品种群体茎蘖数均呈增加趋势(图 6-A~B);其中,武运粳 24 号单位面积最大茎蘖数分别为 357、409、422 和 458,6 两优 9368 分别为 402、519、555 和 679。然而,茎蘖成穗率为小播量处理高于大播量处理;随着播种量的增加,武运粳 24 号茎蘖成穗率分别为 58.4%、60.8%、57.2 和 56.4%,6 两优 9368 茎蘖成穗率分别为 47.7%、48.0%、47.0%和 39.9%。此外,单株分蘖数随着播种量的增加均呈下降趋势,且分蘖发生推迟(图 6-C~D);随着播种量的增加,武运粳 24 号最大单株分蘖数分别为 5.3、5.5、4.5 和 3.2,单株成穗数分别为 3.2、3.4、2.3 和 1.8;6 两优 9368 最大单株分蘖数分别为 7.7、7.4、7.0 和 6.5,单株成穗数分别为 4.1、4.0、3.8 和 2.8。

随着播种量的增加,两品种分蘖发生力均呈下降趋势,小播量处理显著大于大播量处理,两品种表现一致(图 7)。其中,武运粳 24 号分蘖发生力

分别为 0.19、0.20、0.16 和 0.11,6 两优 9368 分别为 0.28、0.27、0.25 和 0.20。上述结果表明,随着苗床播种量的增加,大田群体茎蘖数呈增加趋势,但严重限制了单株分蘖的发生,单株分蘖发生力显著下降。

2.3.2 干物质积累量

播种量对大田关键生育期干物质积累量影响见图 8 所示。武运粳 24 号在移栽期和穗分化期、6 两优 9368 在移栽期,干物质积累量处理间无显著差异;而武运粳 24 号在抽穗期、6 两优 9368 在穗分化期和抽穗期,干物质积累量均随着播种量的增加呈增加趋势。在成熟期,当武运粳 24 号播种量由 90 g/盘增加到 120 g/盘、6 两优 9368 播种量由 50 g/盘增加到 70 g/盘时,干物质积累量显著增加,而其他处理间无显著差异。在成熟期,当武运粳 24 号播种量由 90 g/盘增加到 120 g/盘、150 g/盘和 180 g/盘时,干物质积累量分别增加 12.6%、9.4%和

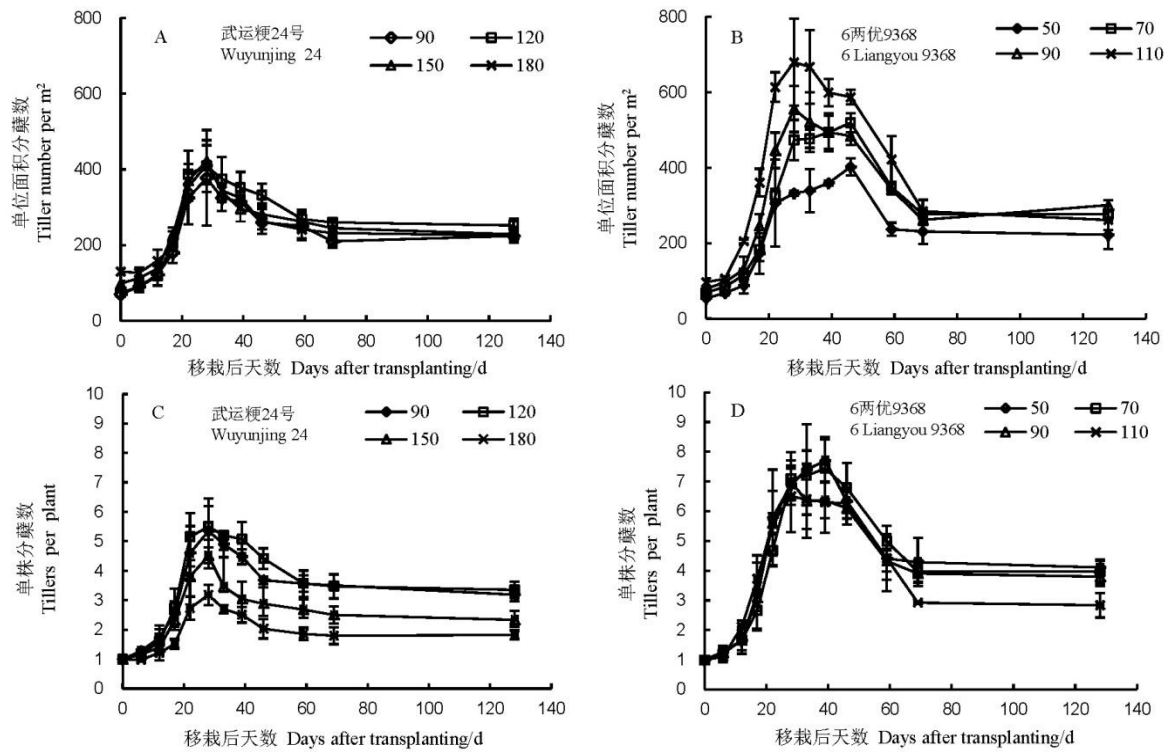


图 6 播种量对机插水卷苗群体茎蘖动态(A, B)及单株分蘖发生动态(C, D)的影响
Fig. 6. Tiller dynamics of population (A, B) and tiller number per plant (C, D) of two cultivars under different sowing densities in paddy field for hydroponically grown long-mat rice seedlings(HLMS).

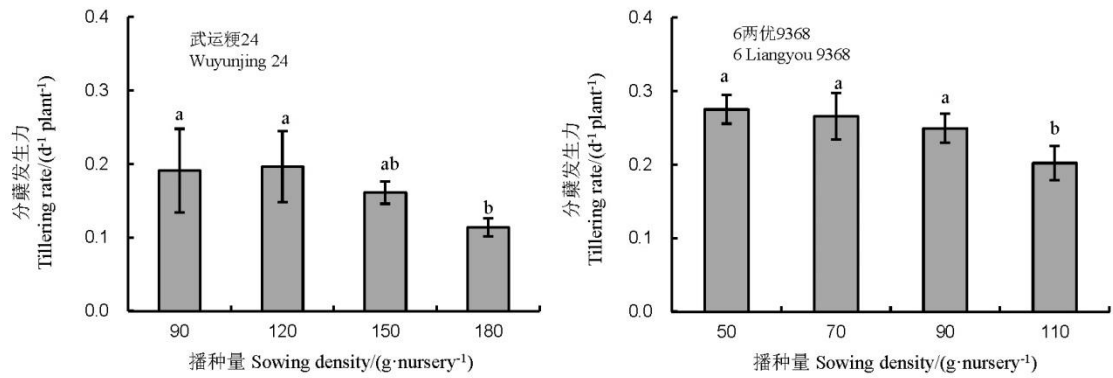


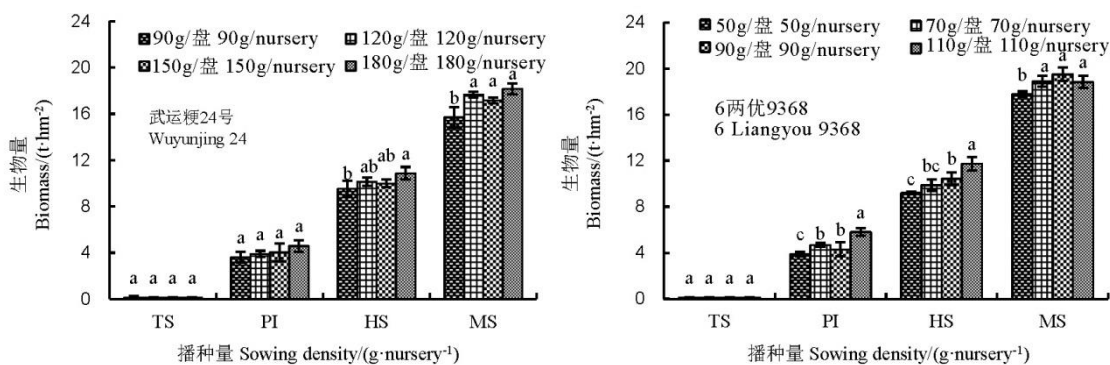
图 7 播种量对机插水卷苗分蘖发生力的影响
Fig. 7. Tillering rate per plant of two cultivars under different sowing densities from sowing to max-tillering for hydroponically grown long-mat rice seedlings(HLMS).

15.7%；6 两优 9368 播种量由 50 g/盘增加到 70 g/盘、90 g/盘和 110 g/盘时，干物质积累量分别增加 6.3%、9.4%和 6.0%。

2.4 产量及产量构成

两品种产量及产量构成见表 4，武运粳 24 号播种量由 120 g/盘降低到 90 g/盘、6 两优 9368 播种量由 70 g/盘降低到 50 g/盘时，产量均显著下降；但当武运粳 24 号播种量由 120 g/盘增加到 150 g/盘和 180 g/盘、6 两优 9368 播种量由 70 g/盘增加到 90 g/盘和 110 g/盘时，产量并没有显著差异。其中，武

运粳 24 号播种量由 90 g/盘增加到 120 g/盘、150 g/盘和 180 g/盘时，产量分别增加 23.4%、15.6%和 17.6%；6 两优 9368 播种量由 50 g/盘增加到 70 g/盘、90 g/盘和 110 g/盘时，产量分别增加 18.8%、26.7%和 26.6%。就产量构成而言，随着播种量的增加，穗数显著增加，两品种表现一致，这是小播量(武运粳 24 号，90 g/盘，6 两优 9368，50 g/盘)处理产量低的主要原因；相反，随着播量的增加，每穗粒数呈下降趋势，其中 6 两优 9368 达到显著水平。处理间千粒重无显著差异；6 两优 9368 结实率随着



TS—移栽期; PI—穗分化期; HS—抽穗期; MS—成熟期。
TS, Transplanting stage; PI, Panicle initiation stage; HS, Heading stage; MS, Maturity stage.

图 8 播种量对机插水卷苗关键生育期干物质积累的影响
Fig. 8. Biomass accumulation of two cultivars at different growth stages under different sowing densities for hydroponically grown long-mat rice seedlings(HLMS).

表 4 播种量对机插水卷苗育秧方法产量及产量构成的影响
Table 4. Grain yield and its components under different sowing densities for hydroponically grown long-mat rice seedlings(HLMS).

播种量 Sowing density /(g nursery ⁻¹)	穗数 Effective panicles /(×10 ⁴ hm ⁻²)	每穗粒数 Spikelet number per panicle	颖花量 Spikelets per square meter/(×10 ³ m ⁻²)	结实率 Seed setting rate/%	千粒重 1000-grain weight/g	产量 Yield /(t hm ⁻²)
武运粳 24 号 Wuyunjing 24						
90	201.6±13.5 c	150.8±13.1 a	31.4±1.5 b	92.7±0.7 a	27.27±0.05 a	7.96±0.33 b
120	248.7±10.4 ab	152.1±10.8 a	37.8±2.8 a	93.2±1.3 a	27.83±0.20 a	9.82±0.63 a
150	241.2±7.6 b	151.2±5.5 a	36.4±1.6 a	92.2±2.4 a	27.31±0.39 a	9.20±0.33 ab
180	258.3±7.9 a	145.9±9.7 a	36.8±3.3 a	91.7±3.1 a	27.06±0.96 a	9.36±1.08 a
6 两优 9368 6 liangyou 9368						
50	192.2±6.6 b	207.5±13.5 a	39.9±2.0 b	85.9±1.4 b	28.17±1.09 a	10.04±0.90 b
70	249.3±5.6 a	196.8±25.2 ab	49.1±5.6 a	87.5±1.7 ab	28.32±0.35 a	11.93±1.19 a
90	260.9±3.3 a	190.7±15.5 b	49.7±3.9 a	88.6±1.0 ab	28.74±0.81 a	12.67±0.79 a
110	271.3±20.1 a	184.9±3.6 b	50.1±4.0 a	89.6±2.5 a	28.31±0.27 a	12.71±1.13 a

播种量的增加有上升趋势,武运粳 24 号处理间无显著差异。

3 讨论

适宜播种量的确定不仅会影响高速插秧机的作业性能,也影响水稻产量形成。本研究中,秧苗地上部和根系干物质质量、发根力、根系活性、成苗率、苗基宽及质量高度比均随着播种量的降低而显著增加,秧苗个体素质增强。主要原因是低播量降低叶面积指数,增加了单个秧苗对养分的吸收和光截获量,促进了个体生长^[14],减少了个体间的竞争,生长环境优越^[15-16]。比叶重与氮含量相关^[17],而氮浓度与 rubisco 酶^[18]和光合速率^[19]紧密相关;本研究中,小播量处理比叶重和光合速率显著高于大播量处理,易形成壮秧。与常规育秧一致^[20],水卷苗

育秧小播量秧苗移栽大田后分蘖发生力显著高于大播量处理,这主要是小播种量有利形成壮秧,机插大田后,返青活棵快,能促进分蘖早生快发^[14, 21],保证穗数^[22-24]。Sun 等^[25]在旱直播种植中也发现包括常规稻和杂交稻,其单株分蘖发生力为随着播种密度的增加而呈下降趋势。同时,水卷苗育秧方法不受盘根力的限制^[11],更易培育出符合机插的健壮秧苗,同时满足起秧、运秧等农事操作要求;此外,小播种量处理机插植伤轻、返青活棵快且分蘖发生力强,个体潜力能够充分发挥。

高产的前提是建立适宜的群体结构^[26-28]。播量过大,秧苗素质弱、移栽植伤重,尽管机插质量好,但严重限制了秧苗个体潜力的发挥^[14],增加了生产投入^[25],产量甚至会下降^[14, 29]。然而,播量太小,尽管秧苗个体强壮、盘根性能够满足农事操作及机插要求、成苗率高、分蘖力强,个体潜力能够充分

发挥, 但机插质量较差、基本苗不足, 最终穗数不足也不能实现高产^[29]。因此, 高产建设, 重要的是协调个体与群体间的矛盾, 选择适宜的播种量, 一方面使个体能够充分发挥自身潜力; 另一方面能够保证高产需要的群体结构。本研究中, 当武运粳 24 号播种量为 120 g/盘(738.9 g/m²)时, 其产量(9.82 t/hm²)与 150 g/盘和 180 g/盘处理间无显著差异, 显著高于 90 g/盘处理; 6 两优 9368 播种量为 70 g/盘(431.0 g/m²)时, 其产量(11.93 t/hm²)与 90 g/盘和 110 g/盘处理间无显著差异, 显著高于 50 g/盘处理。其主要归因于较好的秧苗素质(成苗率高、比叶重大、根系活性和发根力强、光合速率强), 这与常规育秧方式基本一致^[30-31]; 尽管机插空穴率显著高于大播量处理, 但秧苗机插大田后返青活棵快、分蘖早发、单株分蘖发生力强, 在一定程度上弥补了空穴率高、基本苗少的劣势, 最终穗数与大播量处理无显著差异, 且每穗粒数略高于大播量处理, 这与前人在直播稻和机插稻种植中研究结果基本一致^[29, 32-36]。此外, 实际生产中, 最适播种量的选择还应考虑最终的经济效益^[14, 31]。本研究中, 当苗床播种量过大时, 水稻产量并没有显著增加, 而生产投入(用种量)却相应增加, 这会影响最终经济效益。

4 结论

对于机插水卷苗育秧方法而言, 常规粳稻武运粳 24 号和杂交籼稻 6 两优 9368 播种量分别降低到 2.03 粒/cm²(芽谷 120 g/盘)和 1.14 粒/cm²(芽谷 70 g/盘), 秧苗素质好、单株分蘖力强、穗粒数多、产量高。

参考文献:

- [1] Tasaka K, Ogura A, Karahashi M. Development of hydroponic raising and transplanting technology for mat type rice seedlings I: Raising test of seedlings. *J Japan Soc Agric Mach*, 1996, 58: 89-99.
- [2] Tasaka K, Ogura A, Karahashi M. Development of hydroponic raising and transplanting technology for mat type rice seedlings: II. Development and field test of rice transplanters for long mat type hydroponic rice seedlings. *J Japan Soci Agric Mach*, 1997, 59: 87-98.
- [3] Tasaka K. Raising and transplanting technology for long mat with hydroponically grown rice seedlings. *Jpn Agric Rrs Quar*, 1999, 33: 31-37.
- [4] Wang Y D, Tasaka K, Ogura A, Maruyama S. Growth and physiological characteristics of rice seedlings raised with long mat by hydroponics: Comparison with young seedlings raised in soil. *Plant Prod Sci*, 1999, 2: 115-120.
- [5] 李刚华, 李玉祥, 丁艳锋, 王绍华, 刘正辉, 唐设, 雷武生. 水稻水培育秧营养液及其制备方法: ZL 2011104579679. 2014-04-04.
Li G H, Li Y X, Ding Y F, Wang S H, Liu Z H, Tang S, Lei W S. Nutrient solution for the hydroponic cultivation and preparation of rice seedlings method: 2011104579 679. 2014-04-04. (in Chinese)
- [6] 李刚华, 李玉祥, 丁艳锋, 王绍华, 刘正辉, 唐设, 丁承强. 一种水稻无土育秧方法及应用: ZL 201410211815.4. 2015-09-09.
Li G H, Li Y X, Ding Y F, Wang S H, Liu Z H, Tang S, Ding C Q. One kind of soilless medium for rice seedling culture: 2014202617618. 2015-09-09. (in Chinese)
- [7] 李刚华, 李玉祥, 丁艳锋, 王绍华, 刘正辉, 唐设, 丁承强. 一种水稻育秧无土板及其在水稻无土机插领域应用: ZL 201410215744.5. 2016-04-13.
Li G H, Li Y X, Ding Y F, Wang S H, Liu Z H, Tang S, Ding C Q. A method of rice seedling soilless-raising and its application: 2014102118154. 2016-04-13. (in Chinese)
- [8] 李玉祥, 李刚华, 丁艳锋, 王绍华, 刘正辉, 唐设, 雷武生. 水稻水培育秧装置: ZL 2011205558872. 2012-10-03.
Li Y X, Li G H, Ding Y F, Wang S H, Liu Z H, Tang S and Lei W S. Nursery bed for hydroponic cultivation: 2011205558872. 2012-10-03. (in Chinese)
- [9] 李玉祥, 邢晓鸣, 李刚华, 王绍华, 刘正辉, 唐设, 丁承强, 丁艳锋. 机插水卷苗秧苗素质及本田生长特性研究. 全国青年作物栽培与生理学术研讨会论文集. 扬州: 中国作物学会. 2014.
Li Y X, Xing X M, Li G H, Wang S H, Liu Z H, Tang S, Ding C Q, Ding Y F. Studies on seedling quality and field growth characteristics of long mat seedlings cultivated with hydroponics of mechanical transplanting rice. Proceedings of the National Symposium on Crop Cultivation and Physiology in Young People. Yangzhou: The Crop Science Society of China. 2014. (in Chinese)
- [10] 李玉祥, 李刚华, 丁艳锋, 王绍华, 刘正辉, 唐设, 李小春, 邢晓鸣. 一种机插水稻无土育秧板: ZL 201520302874.2. 2015-09-09.
Li Y X, Li G H, Ding Y F, Wang S H, Liu Z H, Tang S, Li X C, Xing X M. One kind of seedling soilless-raising raising board for mechanical transplanting rice: ZL201520302874.2, 2015-09-09. (in Chinese)
- [11] Li Y X, He Z Z, Li X C, Ding Y F, Li G H, Liu Z H, Tang S, Wang S H. Quality and Field Growth Characteristics of Hydroponically Grown Long-Mat Seedlings. *Agron J*, 2016, 108: 1581-1591.
- [12] Lei W S, Ding Y F, Li G H, Tang S, Wang S H. Effects of soilless substrates on seedling quality and the growth of transplanted super japonica rice. *J Integ Agric*, 2017, 16 (5): 1053-1063.
- [13] 李玉祥. 水稻机插水卷苗育秧方法及配套技术研究. 南京: 南京农业大学, 2016.
Li Y X. Research on new method and matching technology for long mat seedlings cultivated with hydroponics of mechanical transplanting rice. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [14] Sarangi S K, Maji B, Singh S, Burman D, Mandal S, Sharma D K, Ismail A M, Haeefe S M. Improved nursery management further enhances the productivity of

- stress-tolerant rice varieties in coastal rainfed lowlands. *Field Crops Res*, 2015, 174: 61-70.
- [15] Fageria N K, Baligar V C, Clark R B. Physiology of crop production: plant canopy architecture. New York: Food Products Press, 2005: 8-12.
- [16] Liu Q H, Wu X, Ma J Q, Chen B, Xin C Y. Effects of delaying transplanting on agronomic traits and grain yield of rice under mechanical transplantation pattern. *PLoS ONE*, 2015, 10: 1-18.
- [17] Li J W, Yang J P, Li D S, Fei P P, Guo T T, Ge C S, Chen W Y. Chlorophyll meter's estimate of weight-based nitrogen concentration in rice leaf is influenced by leaf thickness. *Plant Prod Sci*, 2011, 14: 177-183.
- [18] Makino A, Mae T, Ohira K. Relation between nitrogen and ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase in rice leaves from emergence through senescence. *Plant Cell Physiol*, 1984, 25: 429-437.
- [19] Makino A, Harada M, Sato T, Shimada T, Yamamoto N. Plant growth and nitrogen allocation in rice under CO₂ enrichment. *Plant Physiol*, 1997, 115: 199-203.
- [20] Huang M, Yang C, Ji Q, Jiang L G, Tan J L, Li Y Q. Tillering responses of rice to plant density and nitrogen rate in a subtropical environment of southern China. *Field Crops Res*, 2013, 149: 187-192.
- [21] Hiroyuki S, Hisashi K, Kensuke O, Kazuyasu N, Mitsunori S, Akio O, Morio M, Staoko Y. Development of rice "seed-mats" consisting of hardened seeds with a cover of soil for the rice transplantor. *Plant Prod. Sci*, 2008, 1: 108-115.
- [22] Datta D S K. Principles and practices of rice production. New York: John Wiley & Sons, 1981.
- [23] Miller B C, Hill J E, Roberts S R. Plant population effects on growth and yield in water-seeded rice. *Agron. J*, 1991, 83: 291-297.
- [24] Pinson S R M, Jia Y. QTLs for early tiller production and relationships with rapid seedling growth and increased panicle number in rice. *Crop Sci*, 2016, 56: 505-519.
- [25] Sun L M, Hussain S, Liu H Y, Peng S B, Huang J L, Cui K H, Nie L X. Implications of low sowing rate for hybrid rice varieties under dry direct-seeded rice system in Central China. *Field Crops Res*, 2015, 175: 87-95.
- [26] Kato Y, Collard B C Y, Septiningsih E M, Ismail A M. Physiological analyses of traits associated with tolerance of long-term partial submergence in rice. *AoB Plants*, 2014, 6: 1-11.
- [27] 凌启鸿, 张洪程, 苏祖芳, 郭文善, 陈德华, 陆卫平, 冷锁虎, 凌励, 杨建昌, 丁艳锋, 吴云康, 曹显祖, 朱庆森, 朱耕如. 作物群体质量. 上海: 上海科学技术出版社, 2000.
- Ling Q H, Zhang H C, Su Z F, Guo W S, Chen D H, Lu W P, Leng S H, Ling L, Yang J C, Ding Y F, Wu Y K, Cao X Z, Zhu Q S, Zhu G R. Crop Population Quality. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2000. (in Chinese)
- [28] 凌启鸿, 张洪程, 丁艳锋. 水稻精确定量栽培理论与技术. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- Ling Q H, Zhang H C, Ding Y F. Theory and Technology of Precise and Quantitative Cultivation in Rice. Beijing: China Agriculture Press, 2007. (in Chinese)
- [29] 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)
- [30] 李泽华, 马旭, 谢俊峰, 陈国锐, 郑志雄, 谭永炘, 黄益强. 双季稻区杂交稻机插秧低播量精密育秧试验. 农业工程学报, 2014, 30(6): 17-27.
- Li Z H, Ma X, Xie J F, Chen G R, Zheng Z X, Tan Y X, Hang Y Q. Experiment on precision seedling raising and mechanized transplanting of hybrid rice under low sowing rate in double cropping area. *Trans CSAE*, 2014, 30(6): 17-27. (in Chinese with English abstract)
- [31] 胡剑锋, 杨波, 周伟, 张培培, 张强, 李培程, 任万军, 杨文钰. 播种方式和播种密度对杂交水稻机插秧节本增效的研究. 中国水稻科学, 2017, 31(1): 81-90.
- Hu J F, Yang B, Zhou W, Zhang P P, Zhang Q, Li P C, Ren W J, Yang W Y. Effect of Seeding Method and Density on the benefit of mechanical transplanting in indica hybrid rice. *Chin J Rice Sci*, 2017, 31(1): 81-90. (in Chinese with English abstract)
- [32] Gravois K A, Helms R S. Path analysis of rice yield components as affected by seeding rate. *Agron J*, 1992, 84: 1-4.
- [33] Jones D B, Synder G H. Seeding rate and row spacing effects on yield and yield components of ratoon rice. *Agron J*, 1987, 79: 627-629.
- [34] Bond J A, Walker T W, Bollich P K, Koger C H, Gerard P. Seeding rates for stale seedbed rice production in the mid southern United States. *Agron J*, 2005, 97: 1560-1563.
- [35] Bond J A, Walker T W, Ottis B V, Harrel D L. Rice seeding and nitrogen rate effects on yield and yield components of two rice cultivars. *Agron J*, 2008, 100: 393-397.
- [36] Harrell D L, Blanche S B. Tillage, seeding, and nitrogen rate effects on rice density, yield, and yield components of two rice cultivars. *Agron J*, 2010, 102: 592-597.