

人工模拟机械开沟穴直播提高早籼稻茎秆抗倒伏能力及产量

易艳红, 王文霞, 曾勇军, 谭雪明, 吴自明, 陈雄飞, 潘晓华, 石庆华, 曾研华

(江西农业大学/作物生理生态与遗传育种教育部重点实验室, 南昌 330045)

摘要: 【目的】研究机械开沟穴直播对早籼稻茎秆抗倒伏能力及产量的影响, 为水稻机械化直播技术提供理论依据与技术支撑。【方法】试验以常规稻中嘉早 17 和杂交稻株两优 171 品种为材料, 系统比较人工模拟机械开沟穴直播 (MFP)、表面穴直播 (SBP) 与覆土穴直播 (SCP) 对直播早籼稻出苗率、植株抗倒性能及产量与产量构成的影响。【结果】与表面穴直播和覆土穴直播相比, 人工模拟机械开沟穴直播可提高早籼稻供试品种的出苗率, 增幅为 5.19%—13.89%, 且与表面穴直播处理差异显著 ($P < 0.05$)。同时, 人工模拟机械开沟穴直播有利于提高直播水稻品种产量, 两品种增产幅度为 4.52%—11.20%; 从产量构成因素分析, 产量的提高主要得益于单位面积有效穗数、千粒重提高。此外, 人工模拟机械开沟穴直播有利于提高供试品种植株抗折力, 降低植株倒伏指数, 尤其是第 3 节间; 有利于增加株高、重心高度与第 3 节间 (I3) 茎壁厚度和节间粗度, 提高不同节间的单位长度节间干重、单位体积节间干重以及木质素含量。大部分节间的节间干重与抗折力有显著的正相关, 而与倒伏指数为显著的负相关。节间干重与单位长度节间干重是影响植株倒伏的主要因素, 而株高、重心高度、节间长度和节间粗度并不能同时影响植株抗倒伏能力与倒伏指数, 木质素与各节间抗折力有显著或极显著正相关。【结论】人工模拟机械开沟穴直播不仅有利于提高直播早籼稻产量, 还显著提高植株抗倒伏能力, 降低倒伏风险, 可在生产中推广使用。

关键词: 农业机械化; 穴直播; 早籼稻; 出苗; 抗倒伏特性; 产量

Artificial Simulation of Hill-Drop Drilling Mechanical Technology to Improve Yield and Lodging Resistance of Early Season *Indica* Rice

YI YanHong, WANG WenXia, ZENG YongJun, TAN XueMing, WU ZiMing, CHEN XiongFei,
PAN XiaoHua, SHI QingHua, ZENG YanHua

(Jiangxi Agricultural University/Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Ministry of Education,
Nanchang 330045)

Abstract: 【Objective】This study investigated the effects of hill-drop drilling mechanical technology with furrowing on the yield-related traits and lodging resistance of early season *indica* rice, which provided theoretical basis and technical support for the mechanical direct-seeding technology. 【Method】Two *indica* rice varieties, including inbred rice Zhongjiazao17 and hybrid rice Zhuliangyou171, with three treatments (hill-drop drilling mechanical technology with furrowing (MFP), surface bunch planting (SBP) and soil covering bunch planting (SCP)) were used to compare the effects on seedling emergence rate, yield-related traits and lodging resistance of rice. 【Result】The results showed that compared with SBP and SCP, MFP increased seedling emergence rate of early season *indica* rice by 5.19% to 13.89%, and the difference was significant ($P < 0.05$). At the same time, MFP was conducive to improving yield of direct seeding rice. Yield increase rate of the two varieties was ranged from 4.52% to 11.20%, and yield of inbred rice Zhongjiazao17 was significantly different to the others. From the analysis of yield components, the increase in yield was mainly

收稿日期: 2019-02-25; 接受日期: 2019-03-25

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFND0301605)、国家自然科学基金 (31760366)、江西省自然科学基金 (20161BAB214171)、江西省重点研发计划项目 (20171BBF60030, 20171ACF60018)、江西省水稻产业技术体系项目 (JXARS-02-03)、江西省研究生创新专项资金项目 (YC2017-S178)

联系方式: 易艳红, E-mail: yiyanh123@163.com. 通信作者曾研华, E-mail: zyh74049501@163.com

due to the synergistic improvement of effective panicles per unit area and 1000-grain weight. In addition, MFP was beneficial to improve resistance of plant and reduce lodging index, especially the upper internode, and it was beneficial to increase height, gravity center height, culm wall thickness and internode diameter of upper internode (I3), and increase dry weight per unit length of internode, dry weight per unit volume of internode and lignin. There was positive correlation between internode dry weight and breaking resistance, and negative correlation with lodging index. Therefore, dry weight, and dry weight per unit length of internode were the main factors for affecting lodging. Plant height, gravity center height, internode length and internode diameter could not both affect lodging resistance and lodging index. 【Conclusion】 MFP could improve the grain yield of direct seeding early *indica* rice, and also enhance plant lodging resistance, decrease lodging risk. It could be popularized in the production.

Key words: agricultural mechanization; hill-drop drilling; early season *indica* rice; seedling emergence; lodging resistance character; yield

0 引言

【研究意义】在我国经济快速转型和农村劳动力大量转移的大背景下,水稻直播作为一种轻型稻作方式,因其轻简高效,呈现迅速发展的趋势^[1]。其中南方稻区早籼稻直播种植面积也在逐年上升,但主要以人工撒直播方式为主,植株扎根浅,田间生长呈无序分布状态。华南农业大学发明的机械开沟穴直播可实现直播稻成行、成穴的有序栽培,且根系易深扎^[2]。倒伏是直播稻生长后期易出现的生产问题,严重影响直播水稻的丰产与稳产^[3-4]。研究机械开沟穴直播方式对早籼稻茎秆抗倒伏能力及产量的影响,对于促进南方稻区早籼稻机械化直播生产具有重要意义。【前人研究进展】水稻发生倒伏后,营养物质转运受到影响,严重阻碍了光合产物的贮藏和运输,使得产量及稻米品质明显下降^[5]。同等条件下直播稻相比移栽稻光能利用率少,干物质积累量低,抗倒伏能力弱,更易发生倒伏^[6-8]。前人研究结果表明节间长度、节间粗度、茎壁厚度和茎秆干重与抗倒伏性密切相关^[9-11]。且在一定范围内,株高与倒伏呈负相关^[12-13]。此外,倒伏还与外界的气候因素以及茎秆中木质素、氮、钾、硅等化学成分含量密切相关^[14-16]。【本研究切入点】关于水稻倒伏特性的研究,前人主要集中在手插^[17-18]与机插^[19-20]等种植方式,对直播种植方式,尤其是机械开沟穴直播方式下探讨水稻倒伏能力的研究较少,且前人的研究对象主要以一季稻为主,而对早籼稻的研究较少。【拟解决的关键问题】本研究以早籼稻为试验材料,采用人工模拟机械开沟直播的方法,在大田开展人工模拟机械开沟穴直播、表面穴直播与覆土穴直播的比较研究,系统研究不同播种方式下早籼稻出苗、抗倒伏性能及产量形成的变化特征,为机械化直播早稻抗倒高产栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

试验于 2017—2018 年在江西农业大学农业科技园实验基地(115°49'53"E、28°46'8"N)进行,供试品种为籼型常规稻中嘉早 17 和杂交稻株两优 171。试验地前茬为冬闲,土壤基础肥力为全氮 2.23 g·kg⁻¹、有机质 29.54 g·kg⁻¹、速效氮 97.64 mg·kg⁻¹、速效磷 27.62 mg·kg⁻¹、速效钾 102.34 mg·kg⁻¹, pH 为 5.63。

试验采用裂区设计,播种方式为主区,品种为副区,3 次重复,主区面积为 40 m²,副区面积为 20 m²(4 m×5 m)。在大田湿润直播方式的基础上,设置 3 种播种方式,分别为机械开沟穴直播(MFP)、表面穴直播(SBP)与覆土穴直播(SCP)。人工模拟机械开沟穴直播是采用水稻穴直播机(上海世达尔现代农机,型号为 2BDXS-10CP(25)),在土壤含水量保持 40%—50%的情况下,进行机械开沟(包括种沟及水沟),然后作埂分区,之后与其他处理一起进行人工模拟直播机播种,播种后不覆土,以达到生产上机械开沟播种的要求;表面穴直播即整田后,作埂分区,然后按行株距 25 cm×14 cm 进行人工精量穴播,保证播种均匀一致,处理不进行机械开沟;覆土穴直播是在表面穴直播的基础上,覆盖客土,约 0.5 cm,处理不进行机械开沟。

试验各处理播种量均为 37.5 kg·hm⁻²,根据各品种千粒重折算,中嘉早 17 每穴播 5 粒,株两优 171 每穴播 6 粒,播种行株距为 25 cm×14 cm,4 月 7 日播芽谷。各处理种子播种前均对种子进行浸种、消毒和催芽,待种子芽长 3 mm 左右时,适当摊开晾干,同时拌有防鸟剂丁硫克百威 125 g·hm⁻²,确保种子直播全苗。各处理肥料用量相同,氮肥(N)施用量为 165 kg·hm⁻²,其中 m(基肥):m(分蘖肥):m(穗肥)=5:2:3,穗肥分别于倒 4 叶和倒 2 叶

时期施入, 即基肥为 $82.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 分蘖肥为 $33.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 穗肥为 $49.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 磷肥 (P_2O_5) 施用量为 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 全部作为基肥; 钾肥 (K_2O) 施用量为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中 $m(\text{分蘖肥}) : m(\text{穗肥}) = 7 : 3$, 分蘖肥为 $105 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 穗肥为 $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。大田整地采用水整地的方式, 整地后用机械推平, 沉实 3 d, 土壤为湿润状态。其他

田间管理措施按当地高产田块栽培要求实施。试验实施期间温光、降雨等气候正常, 无重大气象灾害发生。温度、日照时数与降雨量等气象数据如图 1 所示, 2 年平均气温、日照时数与降雨量变化有较大差异, 尤其是在水稻抽穗扬花后, 2017 年日照时数总体要低于 2018 年。

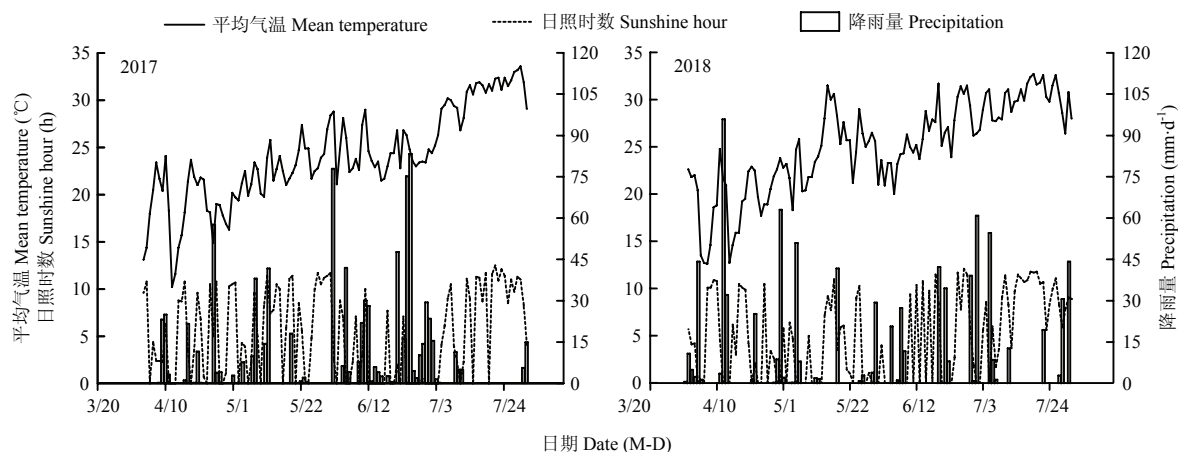


图 1 气温、日照时长以及降雨量

Fig. 1 Temperature, sunshine hour and precipitation

1.2 测定项目与方法

1.2.1 出苗率 于播种后 15 d, 以一叶一心为出苗标准, 调查出苗数, 出苗率 (%) = 出苗数/播种粒数 $\times 100\%$ 。

1.2.2 产量及产量构成 成熟期每个小区取 60 穴调查有效穗数, 按照平均穗数, 各小区取 10 穴进行考种, 考查每穗粒数、结实率、千粒重; 每小区实收 5 m^2 进行测产。

1.2.3 抗折力 采用茎秆强度测量仪(浙江托普仪器有限公司, YY-1 型)测定节间抗折力, 固定节间两端, 水平放置在两支点上, 在节间中点施力使其折断, 力的大小即为该节间抗折力。

1.2.4 倒伏性分析 在水稻齐穗后 20 d, 普查小区茎数, 计算平均茎数, 按照五点取样法, 选取代表性的水稻 10 株, 每株取 1 个主茎, 共 10 个主茎, 作为 1 个样本, 3 次重复, 测定株高、重心高度和基部各个节间的长度、内径和外径、干重、抗折力, 并计算节间粗度和茎壁厚度、单位长度节间干重、单位体积节间干重、节间基部至穗顶长度以及节间基部至穗顶鲜重^[21]。

倒伏指数 ($\text{cm} \cdot \text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) = 弯曲力矩 ($\text{cm} \cdot \text{g}$) / 抗折力

(g) $\times 100$;

弯曲力矩 ($\text{cm} \cdot \text{g}$) = 节间基部至穗顶长度 (cm) \times 该节间基部至穗顶鲜重 (g)^[22]。

1.2.5 木质素含量 参照 SYROS^[23]等方法, 在齐穗后 20 d, 选取代表性的水稻 10 株, 每株取 1 个主茎, 共 10 个主茎, 分节装好, 于 80°C 烘干至恒重, 粉碎, 过 80 目筛。取节间干粉 0.01 g , 放入 10 mL 玻璃试管中, 加入溴乙酰-乙酸 $2500 \mu\text{L}$, 将试管口加玻璃塞密封, 80°C 恒温水浴 40 min , 每隔 10 min 振荡一次。加入 $2500 \mu\text{L}$ 氢氧化钠-乙酸溶液终止反应, 取上清液 $20 \mu\text{L}$ 转移至 1 mL 试管, 并用乙酸定容至 1 mL 。取 $200 \mu\text{L}$ 于 96 孔板, 溶液在 280 nm 下测定吸光度值, 重复 3 次。

1.3 数据统计与方法

使用 Microsoft Excel 2013 进行数据处理以及 DPS7.05 软件进行方差分析, 用 OriginPro 9.0 进行作图。

2 结果

2.1 人工模拟机械开沟穴直播对早籼稻出苗的影响

从图 2 可知, 直播早籼稻供试品种的 2 年 (2017

—2018) 出苗率均呈人工模拟机械开沟穴直播>覆土穴直播>表面穴直播的趋势,且差异显著($P<0.05$)。2017 年,中嘉早 17 与株两优 171 在人工模拟机械开沟穴直播、表面穴直播、覆土穴直播处理下的出苗率分别为 70.9%、62.3%、66.0%与 65.8%、58.4%、63.6%。2018 年,中嘉早 17 与株两优 171 在人工模拟机械开沟穴直播、表面穴直播、覆土穴直播处理下的出苗率分别为 78.9%、70.0%、75.0%与 80.7%、71.3%、76.7%。与表面穴直播和覆土穴直播相比,人工模拟机械开沟穴直播处理下出苗率增幅为 5.19%—13.89%,可见人工模拟机械开沟穴直播有利于提高直播早籼稻的出苗率。

2.2 人工模拟机械开沟穴直播对早籼稻产量及其构成的影响

由表 1 可见,播种方式对有效穗数、千粒重和产量有极显著影响,品种对有效穗数、每穗粒数和千粒

重影响极显著,年份对结实率、产量有显著影响,年份和播种方式对千粒重以及产量存在极显著互作效应,年份和品种对有效穗数有显著互作效应。人工模拟机械开沟穴直播较表面穴直播和覆土穴直播增加了供试品种产量,2 年常规稻中嘉早 17 产量增幅达 4.52%—6.75%,杂交稻株两优 171 产量增幅达 6.16%—11.20%。从产量构成因素分析,与表面穴直播和覆土穴直播相比,人工模拟机械开沟穴直播通过协同增加水稻有效穗数与千粒重,从而有利于提高早稻产量。说明人工模拟机械开沟穴直播有利于提高有效穗数和千粒重,协同增加水稻产量。

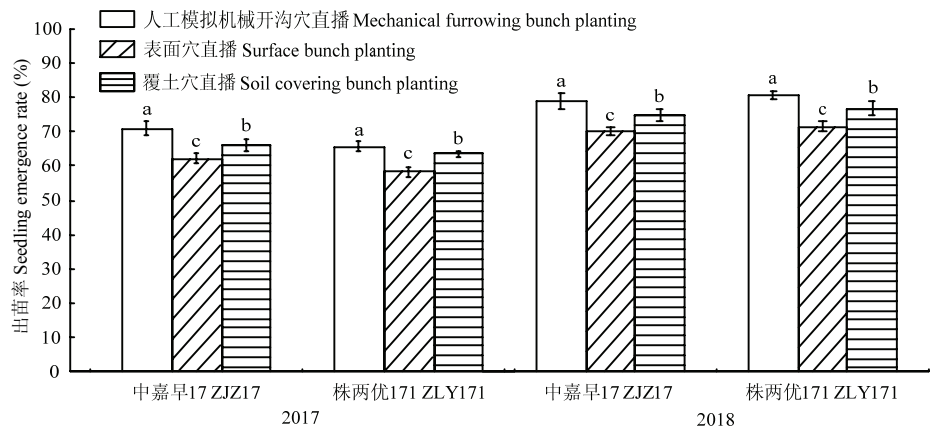
2.3 人工模拟机械开沟穴直播对茎秆抗倒伏能力的影响

2.3.1 倒伏指数 由图 3 可见,2017 年供试品种茎秆各节间倒伏指数各处理趋势为人工模拟机械开沟穴

表 1 不同播种方式对产量及产量构成因子的影响
Table 1 Effects of different sowing methods on grain yield and its components

年份 Year	品种 Variety	处理 Treatment	有效穗数 Effective panicle (m ²)	每穗粒数 Grains per panicle	结实率 Filled grain rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield (kg·hm ⁻²)
2017	中嘉早 17 ZJZ17	MFP	297.4a	121.8a	81.2b	27.8a	6883.1a
		SBP	276.9b	117.2a	85.8a	27.5a	6571.5b
		SCP	270.8b	115.4a	85.7a	27.0a	6447.8c
	株两优 171 ZLY171	MFP	340.5a	112.1a	84.2a	26.1a	7133.3a
		SBP	332.6ab	101.3b	85.2a	26.0a	6471.2b
		SCP	330.7b	97.7b	84.5a	25.4a	6415.0b
2018	中嘉早 17 ZJZ17	MFP	300.0a	114.4a	92.5a	28.3a	7742.4a
		SBP	279.2ab	112.4a	93.5a	27.2b	7368.5b
		SCP	270.8b	113.5a	94.3a	26.3b	77407.9b
	株两优 171 ZLY171	MFP	330.8a	108.7a	94.6a	27.2a	7850.7a
		SBP	313.1a	108.3a	90.4a	26.4b	7395.1b
		SCP	301.4a	107.6a	92.1a	25.9b	7369.1 b
F Value	T		5.7**	1.4	0.3	24.0**	29.7**
	V		57.5**	11.49**	0.54	59.2**	0.2
	Y		3.3	0.0	133.3**	0.5	226.5**
	T×V		0.4	0.2	2.9	0.8	1.9
	T×Y		0.4	1.0	2.1	6.1**	0.8
	V×Y		4.3*	2.5	0.6	2.0	0.0
	T×V×Y		0.3	0.2	0.3	0.3	0.8

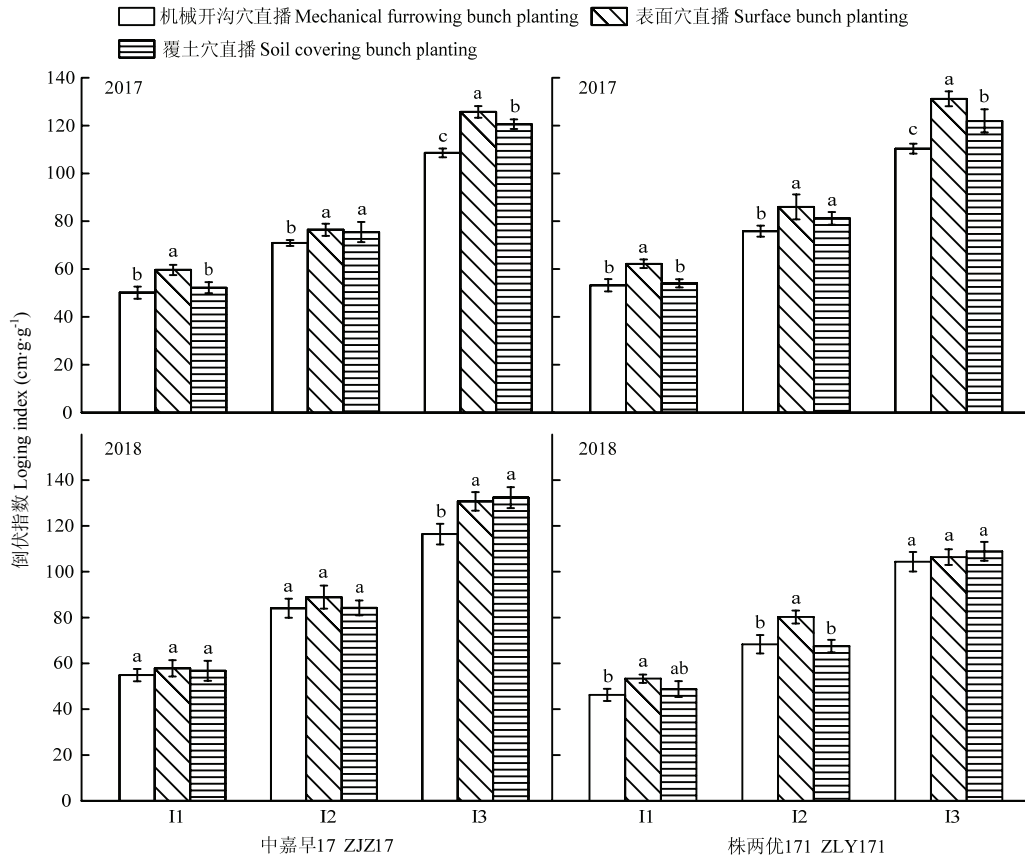
*, **分别表示差异达到 0.05 和 0.01 显著水平。MFP: 人工模拟机械开沟穴直播; SBP: 表面穴直播; SCP: 覆土穴直播。T 表示播种方式, V 表示品种, Y 表示年份。下同
*, ** indicate significance at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively. MFP: Furrowing bunch planting; SBP: Surface bunch planting; SCP: Soil covering bunch planting. T indicates sowing treatment, V indicates variety, Y indicates year. The same as below



不同小写字母表示在 5%水平上差异显著。ZJZ17: 中嘉早 17; ZLY171: 株两优 171。下同
Different letters indicate significant differences at 5% probability level; ZJZ17: Zhongjiazao17; ZLY171: Zhuliangyou171. The same as below

图 2 不同播种方式对早籼稻出苗率的影响

Fig. 2 Effect of different sowing methods on seedling emergence rate of early season *indica* rice



I1: 第一节间, I2: 第二节间, I3: 第三节间。下同
I1: First internode, I2: Second internode, I3: Third internode. The same as below

图 3 不同播种方式对早籼稻倒伏指数的影响

Fig. 3 Effect of different sowing method on lodging index of early season *indica* rice

直播<覆土穴直播<表面穴直播, 2018 年供试品种第 1 和第 2 节间与 2017 年趋势相同, 第 3 节间则表现为人工模拟机械开沟穴直播<表面穴直播<覆土穴直播。与表面穴直播和覆土穴直播相比, 人工模拟机械开沟穴直播 2 年第 1 节间(I1)降幅为 1.46%—15.90%; 第 2 节间 (I2) 降幅为 6.09%—11.80%, 2017 年人工模拟机械开沟穴直播处理与其他处理差异达显著水平; 第 3 节间 (I3) 降幅为 2.12%— 15.91%, 2017 年各处理差异均达显著水平 ($P<0.05$)。说明人工模拟机械开沟穴直播有利于降低植株倒伏指数, 影响第 3 节间 (I3) 和第 2 节间倒伏的原因有待进一步探讨。此外, 不同播种方式处理下两品种植株第 3 节间 (I3) 倒伏指数的变化规律年度间存在一定差异。

2.3.2 茎秆形态 由表 2 可知, 播种处理对株高、重心高度、第 3 节间 (I3) 的节间粗度与茎壁厚度存在

极显著的影响。播种方式与品种对 I2 与 I3 的茎壁厚度有极显著的互作效应。年份、品种与处理之间只在 I2 与 I3 的茎壁厚度有明显的互作效应。

不同播种方式下, 2017 年供试品种株高与重心高度均表现为人工模拟机械开沟穴直播大于表面穴直播与覆土穴直播, 且重心高度差异显著 ($P<0.05$), 2018 年株高和重心高度与 2017 年相比差异较大。在不同处理下, 各节间长度表现规律不一, 且品种间存在明显差异。在 I3 节间, 人工模拟机械开沟穴直播的节间粗度和茎壁厚度与其他处理相比较粗、较厚。

从表 3 得出, 播种处理对大部分的节间干重、单位长度节间干重与单位体积节间干重影响显著。品种、年份对部分节间干重、单位长度节间干重与单位体积节间干重影响显著, 处理与年份、处理与品种、品种

表 2 不同播种方式对株高、重心高度、节间长度、节间粗度及茎秆壁厚的影响

Table 2 Effect of different sowing methods on plant height, gravity center height, internode length, internode diameter, culm wall thickness

年份 Year	品种 Variety	处理 Treatment	株高 PH (cm)	重心高度 GCH (cm)	节间长度 INL (cm)			节间粗度 IND (mm)			茎壁厚度 CWT (mm)		
					I1	I2	I3	I1	I2	I3	I1	I2	I3
2017	中嘉早 17 ZJZ17	MFP	90.5a	37.5a	3.6a	10.2a	17.0a	5.9a	4.8a	4.2a	2.9a	2.6a	2.5a
		SBP	88.8ab	36.8a	2.3ab	7.5b	17.9 a	6.0a	4.9a	3.7b	2.3b	2.0b	1.8b
		SCP	85.7b	35.0b	2.8b	10.4a	17.3a	5.9a	4.8a	4.1a	2.7a	2.5a	1.9b
	株两优 171 ZLY171	MFP	98.4a	40.5a	8.1ab	13.5a	19.6ab	5.2a	4.6a	4.5a	2.1b	2.2a	2.2a
		SBP	97.5b	40.4b	7.5b	13.5a	20.2a	5.3a	4.6a	3.7b	2.8a	1.7b	1.3c
		SCP	93.8c	37.6c	8.3a	13.2a	17.2b	5.3a	4.8a	4.4a	2.0b	2.7a	1.8ab
2018	中嘉早 17 ZJZ17	MFP	95.3b	45.7b	3.0a	11.9a	18.7a	6.0a	5.5a	5.2a	2.8a	2.4a	2.3a
		SBP	94.0b	47.0a	2.9a	10.6b	17.9a	5.9a	5.4a	4.5b	2.3c	2.1b	1.9b
		SCP	96.8a	45.4b	2.4a	11.5a	18.7a	6.1a	5.5a	4.9a	2.5b	2.2a	2.1b
	株两优 171 ZLY171	MFP	97.2a	44.5b	6.9a	13.2a	20.2a	5.5a	5.2a	4.4a	2.4b	2.6a	2.2a
		SBP	94.6b	46.1a	7.8a	12.7a	20.5a	5.6a	5.1a	4.1b	2.7a	2.4a	1.4b
		SCP	95.4b	44.1b	7.4a	12.4a	19.7a	5.6a	5.3a	4.4a	2.4b	2.6a	1.8ab
F Value	T		7.0**	18.4**	2.1	0.5	0.8	0.1	0.2	9.9**	1.3	0.3	6.9**
	V		28.0**	14.7**	419.6**	92.5**	6.8*	17.4**	2.0	3.0	14.0**	3.4	2.8
	Y		12.3**	588.2**	2.3	1.7	2.3	4.7*	15.1**	19.9**	0.5	0.7	0.1
	T×V		0.0	0.6	0.3	1.7	0.7	0.2	0.1	0.1	2.3	11.3**	11.3**
	T×Y		0.1	8.2**	2.4	0.3	0.5	0.6	0.1	0.9	0.1	2.0	1.2
	V×Y		23.4**	56.6**	0.1	15.0**	0.0	2.1	0.1	16.0**	12.2**	2.2	3.2
	T×V×Y		0.1	0.5	0.1	2.1	0.3	0.5	0.0	0.9	1.0	5.4*	13.6**

PH: 株高; GCH: 重心高度; INL: 节间长度; IND: 节间粗度; CWT: 茎壁厚度。下同

PH: Plant height; GCH: Gravity center height; INL: Internode length; IND: Internode diameter; CWT: Culm wall thickness. The same as below

与年份互作明显，品种、年份、处理没有明显互作。2017 和 2018 年，I1、I2 节间干重在机械开沟穴直播下有所增加，但差异不显著；两品种的 I3 节间干重均在人工模拟机械开沟穴直播处理下显著高于表面穴直播、覆土穴直播。各个节间单位体积节间干重也均以人工模拟机械开沟穴直播最高。各节间单位长度节间干重与单位体积节间干重两品种的趋势较为一致，且人工模拟机械开沟穴直播处理较高，这可能是倒伏指数降低的原因。

表 4 不同播种方式下对抗折力的影响

Table 4 Effect of different sowing methods on breaking resistance (N)

年份 Year	品种 Variety	处理 Treatment	I1	I2	I3
2017	中嘉早 17 ZJZ17	MFP	27.4a	20.1a	15.2a
		SBP	24.4b	19.6a	10.5c
		SCP	25.4b	17.7a	12.2b
	株两优 171 ZLY171	MFP	26.1a	19.9a	11.3a
		SBP	24.6a	19.1a	10.9b
		SCP	22.9a	18.7a	9.1b
2018	中嘉早 17 ZJZ17	MFP	30.2a	19.7a	13.9a
		SBP	26.6b	18.8a	10.7c
		SCP	27.7b	18.3a	11.5b
	株两优 171 ZLY171	MFP	28.2a	19.4a	12.7a
		SBP	25.2b	18.2a	11.3b
		SCP	26.5b	17.6a	10.9b
F Value		T	6.5**	4.2*	42.4**
		V	4.1	0.3	27.1**
		Y	11.6**	1.23	1.8
		T×V	0.3	0.2	13.9**
		T×Y	0.1	0.7	14.5**
		V×Y	0.4	0.9	0.3
		T×V×Y	0.4	0.8	2.7

2.3.4 茎秆物理性状与抗倒伏特性相关分析 通过相关分析表明（表 5），茎秆物理性状指标与抗倒伏特性存在显著的相关性。节间粗度、茎壁厚度 I1 节间与抗折力呈显著的正相关关系。节间干重在 I1、I3 节间与抗折力呈显著正相关，与倒伏指数呈显著负相关。单位长度节间干重与抗折力呈正相关，在 I1、I3 有显著性。单位体积节间干重与抗折力呈正相关，在 I1 节间有显著性。由此说明，早稻茎秆的抗折力和倒伏指数受茎秆多种指标因素影响，并且

2.3.3 茎秆力学性状 由表 4 可知，不同播种方式下茎秆各节间抗折力存在显著或极显著差异，且播种方式与品种、年份在 I3 节间有极显著的互作效应。人工模拟机械开沟穴直播下各节间抗折力高于表面穴直播和覆土穴直播，且品种间趋势基本保持一致。其中，在 I3 节间中嘉早 17 人工模拟机械开沟穴直播与其余处理差异显著，株两优 171 则与覆土穴直播差异显著。说明人工模拟机械开沟穴直播有利于提高各节间抗折力，尤其是第 3 节间。

各节间的影响因子大有不同。而节间干重、单位长度节间干重以及单位体积节间干重与植株倒伏性能密切相关，与倒伏指数存在显著负相关，与抗折力存在显著正相关，节间干重、单位长度节间干重以及单位体积节间干重可能是人工模拟机械开沟穴直播提高植株倒伏的主要因素。

2.4 人工模拟机械开沟穴直播对茎秆木质素含量的影响

2.4.1 茎秆木质素含量 从图 4 可以看出，直播早籼

表 5 茎秆物理性状与抗折力和倒伏指数相关性
Table 5 Correlation coefficients between stem physical properties and lodging index and breaking resistance (n=36)

指标 Index	抗折力 Breaking resistance			倒伏指数 Lodging index		
	I1	I2	I3	I1	I2	I3
株高 PH	0.156	0.169	-0.123	0.001	0.037	-0.063
重心高度 GCH	0.471**	-0.103	0.048	-0.142	0.211	-0.093
节间长度 INL	-0.275	0.097	-0.015	-0.284	0.034	-0.204
节间粗度 IND	0.423*	-0.091	0.168	0.022	0.152	-0.123
茎壁厚度 CWT	0.432**	0.311	0.301	-0.144	-0.082	-0.143
节间干重 DWI	0.443**	0.377**	0.496**	-0.418**	0.041	-0.439**
单位长度节间干重 DLI	0.445**	0.240	0.424**	0.214	0.065	-0.257
单位体积节间干重 DVI	0.419*	0.234	0.263	0.193	-0.059	-0.240

相关系数为 $r_{0.05}=0.329$, $r_{0.01}=0.424$
The correlation coefficient is $r_{0.05}=0.329$, $r_{0.01}=0.424$

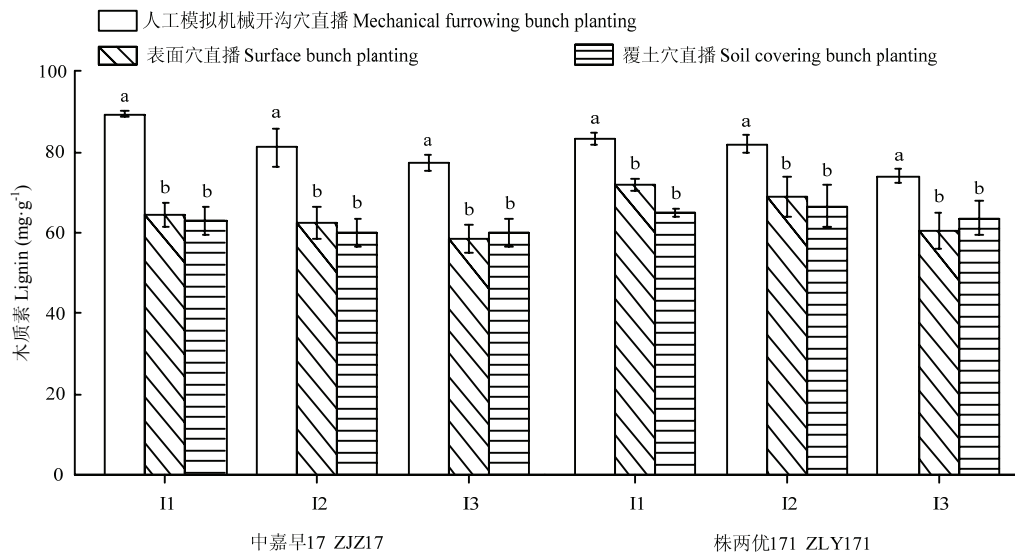


图 4 不同播种方式对早籼稻茎秆木质素含量的影响（2018 年）
Fig. 4 Effect of different sowing method on lignin (2018)

稻的木质素含量在人工模拟机械开沟穴直播处理下达到最高，差异达显著水平。人工模拟机械开沟穴直播下供试品种各节间的木质素含量比表面穴直播及覆土穴直播处理高 15.9%—41.9%。由此可知人工模拟机械开沟穴直播有利于提高直播早籼稻的木质素含量。

2.4.2 茎秆木质素与抗倒伏特性相关分析 由表 6 可知，茎秆的木质素含量与茎秆各节间的抗折力呈显著或极显著正相关，与倒伏指数则呈负相关，但不显

著。说明茎秆木质素含量反映了其抗倒伏性能。

3 讨论

3.1 人工模拟机械开沟穴直播对直播早籼稻产量形成的影响

前人关于直播稻产量的影响因素研究，主要集中在播种量^[24-25]、肥料^[26]、水分^[26-27]及播期^[28]等。总的来说，适当提高施氮量，增加播种量以及合理利用干湿交替灌溉或者湿润灌溉方法，有利于提高

表 6 茎秆木质素与抗折力和倒伏指数的相关性 (n=18)

Table 6 Correlation coefficients between stem lignin and lodging index and breaking resistance (n=18)

指标 Index	抗折力 Breaking resistance			倒伏指数 Lodging index		
	I1	I2	I3	I1	I2	I3
木质素 Lignin	0.571*	0.538*	0.801**	-0.207	-0.263	-0.069

相关系数为 $r_{0.05}=0.468$, $r_{0.01}=0.590$
The correlation coefficient is $r_{0.05}=0.468$, $r_{0.01}=0.590$

水稻产量^[24-25]。本研究基于直播早籼稻品种,探讨了不同直播方式对直播稻产量的影响,研究结果表明,人工模拟机械开沟穴直播较表面穴直播和覆土穴直播,有利于提高出苗率,增加秧苗的全苗与壮苗,实现早籼稻的早生快发,这与前人研究结果相似^[29]。惠秀芬^[30]等提出覆土厚度 1 cm 时,水稻出苗整齐、成苗率高。本试验的研究结果与其相似,覆土穴直播的出苗率高于表面穴直播。这可能是由于适当覆土减少鸟害,促进肥水吸收,降低天气变化带来的影响,具体原因需要进一步研究分析。凌启鸿^[31]指出直播稻由于出苗不易控制,严重影响水稻高产。因此,实现全苗壮苗,是直播稻高产稳产的重要基础。本试验结果表明,人工模拟机械开沟穴直播方式可增加水稻产量,增幅达 4.52%—11.20%,以常规稻品种增产明显,这与其品种分蘖成穗特性有关。有研究表明,人工模拟机械开沟穴直播有利于增加有效穗^[32],增加千粒重^[29],提高直播稻产量。本试验研究结果与其相似,但各处理水稻穗数的差异可能与前期种子出苗和植株生育后期分蘖成穗不同有关。此外,前人研究表明,光照不足会造成水稻光合作用不足,导致水稻生长所需的营养物质无法得到保障,同时水稻本身的同化作用降低,对水稻的正常生长产生不利影响^[33-34]。本试验年度间产量差异显著,可能是由于 2017 年早籼稻抽穗到成熟期阶段日照时数较 2018 年低,不利于水稻花后结实灌浆,使得籽粒不饱满,从而导致产量下降。

3.2 人工模拟机械开沟穴直播对直播早籼稻茎秆抗倒伏的影响

机械化精量穴直播技术是我国当前直播技术发展的方向,而人工模拟机械开沟穴直播有利于实现水稻起垄种植。目前关于人工模拟机械开沟穴直播对植株抗倒伏特性的影响研究报道较少^[29,32,35]。本研究表明,人工模拟机械开沟穴直播提高基部节间(I1、I2)的节间粗度与茎壁厚度,但对节间长度影响不明显。在不同播种方式下,节间长度、节间

粗度和茎壁厚度各节间受到品种和年份的影响,还与品种自身特性和外界环境有关。第 3 节间(I3)茎壁厚度和节间粗度以人工模拟机械开沟穴直播提升显著,说明人工模拟机械开沟穴直播增强地上部茎秆第 3 节间的壁厚。此外,人工模拟机械开沟穴直播不同程度地提高不同节间的单位长度节间干重与单位体积节间干重,且品种趋势一致,尤其对第 3 节间干重影响明显。其原因可能是人工模拟机械开沟穴直播方式有利于根系深扎,增强直播稻的抗倒伏特性。在基部节间抗倒性相对稳定的基础上,仍有利于第 3 节间的茎秆充实增加,也说明机械开沟穴播更加稳固地提高地上部植株的抗倒性,增强了植株整体的抗倒能力。另外,研究表明光照强度可以促进茎秆中木质素的合成^[36],而木质素含量的增加则能明显提高茎秆抗折力^[37]。人工模拟机械开沟穴直播由于成行成穴的田间群体结构特性,提高了直播早籼稻生育中后期叶片的光合能力^[29],有利于茎秆木质素的合成,从而提高直播早籼稻茎秆的抗倒性。

相关分析表明,大部分节间的节间干重、单位长度节间干重与抗折力有显著的正相关,而与倒伏指数为显著的负相关。说明影响植倒伏性能的茎秆主要形态指标是节间干重与单位长度节间干重。一般来说,株高越高,植株更易倒伏,而重心高度也影响植株倒伏^[11,38-39]。而本研究结果表明,与表面穴直播和覆土穴直播相比,人工模拟机械开沟穴直播提高植株抗折力,降低倒伏指数,第 3 节间表现明显;人工模拟机械开沟穴直播虽然提高株高,但是同时显著影响茎秆节间粗度、茎壁厚度、节间干重、单位长度节间干重与单位体积节间干重。一方面说明人工模拟机械开沟穴直播在促进植株根系深扎的同时^[29],有利于促进地上部茎秆的生长,并且一定程度上提高植株抗倒性能。此外,最终影响水稻倒伏的因素不仅仅是其自身抗倒伏能力,还取决于外界环境的作用。水稻自身抗倒伏能力只是可以确定

倒伏风险的大小, 是否发生倒伏还要取决于外界环境条件的好坏。本试验条件下, 虽然不同直播方式的抗倒伏能力存在明显差异, 但由于抽穗后天气较好, 田间各处理并没有出现大面积倒伏现象。

3.3 双季稻区水稻机械化直播高产途径

目前, 直播稻在生产中已成不推自广的态势, 且直播稻面积逐年递增。加强直播稻机械化生产的科学研究对于指导水稻直播生产与规避直播风险显得尤为必要。一般来说, 生产中水稻常见的直播方式有撒播、条播以及近来发展较快的机械化直播方式。研究表明, 机械开沟穴直播有利于提高水稻产量, 且生产效益相对其他直播方式更高^[29]。本研究也发现在南方双季稻区早稻进行人工模拟机械开沟穴直播要优于表面穴直播与覆土穴直播方式, 可实现早稻直播的轻简化与机械化, 有利于早稻直播的高产高效。同时, 人工模拟机械开沟穴直播可提高植株的抗倒伏能力, 一定程度上增加直播早稻的稳产性。

针对目前直播稻生产中遇到的全苗性差、倒伏性强、杂草难防等突出问题, 机械化直播稻要实现高产稳产, 需注意抗倒伏能力强的品种选择, 以及科学的栽培管理措施, 做到适期播种, 提高成苗率, 控制播种量^[29,40-41]; 合理肥水管理, 诱导根系深扎, 提高植株抗倒性, 并且提高田块的耕整水平, 增强机械播种的效果。同时, 还需注意杂草的防除, 做好“一封二杀三补”工作^[42], 特别要加强直播稻落粒谷对下季作物的影响研究^[43], 降低直播稻的生产风险。因此, 在双季稻直播生产中, 需科学规划、因地制宜、因势利导推广机械化直播技术。

4 结论

与表面穴直播和覆土穴直播相比, 人工模拟机械开沟穴直播有利于增加早籼稻品种出苗率, 增幅达 5.19%—13.89%。人工模拟机械开沟穴直播增加直播水稻品种产量, 增幅达 4.52%—11.20%, 主要与单位面积有效穗数和千粒重增多相关。人工模拟机械开沟穴直播有利于提高供试品种植株抗折力, 降低植株倒伏指数, 尤其是第 3 节间; 增加株高、重心高度与第 3 节间 (I3) 茎壁厚度和节间粗度, 提高不同节间的单位长度节间干重、单位体积节间干重以及木质素含量。在本试验中, 节间干重、单位长度节间干重与单位体积节间干重对倒伏的影响尤为重要。而在一定范围内, 株高增加并不会导致抗折力减小。节间长度和节间粗度并不能同时影响抗倒

伏能力与倒伏指数。综上分析, 人工模拟机械开沟穴直播不仅有利于增加直播水稻产量, 还有利于提高直播水稻的抗倒伏能力。

References

- [1] 袁志章, 胡祝祥, 华荣. 直播稻发展现状与应用前景分析. 耕作与栽培, 2008(6): 5-6.
YUAN Z Z, HU Z X, HUA R. Direct seeding rice and their current situation and application prospect. *Tillage and Cultivation*, 2008(6): 5-6. (in Chinese)
- [2] 王在满, 罗锡文, 唐相如, 马国辉, 张国忠, 曾山. 水稻精量穴直播机具与农艺相结合的探讨//纪念中国农业工程学会成立 30 周年暨中国农业工程学会 2009 年学术年会. 中国农业工程学会, 2009: 6.
WANG Z M, LUO X W, TANG X R, MA G H, ZHANG G Z, ZENG S. Study on combination of precision rice hill-drop drilling machines and agronomic techniques//*International Conference on Computer Science and Application Engineering 2009*. Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009: 6. (in Chinese)
- [3] 陈翻身, 许四五. 水稻直播栽培三个技术瓶颈问题形成原因及对策. 中国稻米, 2006(2): 33-34.
CHEN F S, XU S W. Causes and countermeasures of three technical bottlenecks in direct seeding rice cultivation. *China Rice*, 2006(2): 33-34. (in Chinese)
- [4] 中国农村技术开发中心. 我国水稻机械化直播技术体系日臻完善. 中国农业科技导报, 2017, 19(2): 139.
China Rural Technology Development Center. More and more perfect technology system of mechanized direct-sowing rice in China. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2017, 19(2): 139. (in Chinese)
- [5] KASHIWAGI T, HIROTSU N, UJIE K, ISHIMARU K. Lodging resistance locus *prl5* improves physical strength of the lower plant part under different conditions of fertilization in rice (*Oryza sativa* L.). *Field Crops Research*, 2010, 115(1): 107-115.
- [6] 张岳平, 张玉焯, 屠乃美, 曾翔, 谢建红. 水稻直播栽培发展现状及展望. 作物研究, 2005(S1): 307-312.
ZHANG Y P, ZHANG Y Z, TU N M, ZENG X, XIE J H. Status and prospect of rice direct cultivation. *Crop Research*, 2005(S1): 307-312. (in Chinese)
- [7] 杨波, 徐大勇, 张洪程. 直播、机插与手栽水稻生长发育、产量及稻米品质比较研究. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2012, 33(2): 39-44.
YANG B, XU D Y, ZHANG H C. Research on growth, yield, quality

- of rice under direct seeding, mechanical transplanting, and artificial transplanting. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2012, 33(2): 39-44. (in Chinese)
- [8] 杨艳, 柏丽芹. 直播稻倒伏的原因及防范措施. 现代农业科技, 2008(15): 269-271.
- YANG Y, BAI L Q. Reasons and preventive measures for the lodging of direct seeding rice. *Modern Agricultural Science and technology*, 2008(15): 269-271. (in Chinese)
- [9] 许珂, 唐磊, 郭保卫, 张洪程, 霍中洋, 戴其根, 魏海燕. 不同水直播方式对水稻植株抗倒特性研究. 华北农学报, 2014, 29(6): 226-232.
- XU K, TANG L, GUO B W, ZHANG H C, HUO Z Y, DAI Q G, WEI H Y. Lodging resistance of rice under the different pattern of water direct-seeding cultivation method. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*. 2014, 29(6): 226-232. (in Chinese)
- [10] 范永义, 杨国涛, 陈敬, 蒋芬, MUSLIM Q, 陈永军, 胡运高. 硅钾肥配施对水稻茎秆理化性状及抗倒伏能力的影响. 西北植物学报. 2017, 37(4): 751-757.
- FAN Y Y, YANG G T, CHEN J, JIANG F, MUSLIM Q, CHEN Y J, HU Y G. The physical, chemical characters and lodging resistance of rice stem with silicon potassium collocation application. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2017, 37(4): 751-757. (in Chinese)
- [11] 许珂, 唐磊, 张洪程, 郭保卫, 霍中洋, 戴其根, 魏海燕, 韦还和. 不同机械直播方式对水稻分蘖特性及产量的影响. 农业工程学报, 2014, 30(13): 43-52.
- XU K, TANG L, ZHANG H C, GUO B W, HUO Z Y, DAI Q G, WEI H Y, WEI H H. Effect of different mechanical direct seeding methods on tiller characteristics and yield of rice. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(13): 43-52. (in Chinese)
- [12] 李木英, 陈关, 潘晓华, 石庆华, 谭雪明, 陈志攀. 直播稻不同品种茎秆和根系性状与抗倒伏性关系. 中国稻米, 2012, 18(2): 17-21.
- LI M Y, CHEN G, PAN X H, SHI Q H, TAN X M, CHEN Z P. Relationship between traits of clum, root and lodging resistance in early rice varieties as the direct-seeded plant. *China Rice*, 2012, 18(2): 17-21. (in Chinese)
- [13] 邹德堂, 秋太权, 赵宏伟, 崔成焕. 水稻倒伏指数与其它性状的相关和通径分析. 东北农业大学学报, 1997, 28(1): 112-118.
- ZOU D T, QIU T Q, ZHAO H W, CUI C H. Correlation and path analysis on the lodging index and other characters in rice. *Journal of Northeast Agricultural University*, 1997, 28(1): 112-118. (in Chinese)
- [14] 王庭杰. 水稻茎组织构建与木质素代谢对抗倒伏的影响[D]. 新乡: 河南师范大学, 2015.
- WANG T J. Effects of stalk tissue and lignin metabolism on the lodging resistance of rice[D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2015. (in Chinese)
- [15] 蒋明金. 氮肥运筹对直播水稻抗倒伏能力及氮素利用特征的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2015.
- JIANG M J. Effect of nitrogen fertilizer management on the lodging-resistance capability and the characteristic of N utilization in hybrid rice[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [16] 刘红芳. 硅对水稻倒伏和白叶枯病抗性的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
- LIU H F. Effects of silicon on rice resistance against lodging and bacterial blight[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015. (in Chinese)
- [17] 刘立军, 袁莉民, 王志琴, 徐国伟, 陈云. 旱种水稻倒伏生理原因分析与对策的初步研究. 中国水稻科学, 2002, 16(3): 225-230.
- LIU L J, YUAN L M, WANG Z Q, XU G W, CHEN Y. Preliminary studies on physiological reason and countermeasure of lodging in dry-cultivated rice. *Chinese Journal of Rice Science*, 2002, 16(3): 225-230. (in Chinese)
- [18] 郭保卫, 朱大伟, 许珂, 张洪程, 周兴涛, 朱聪聪, 曹利强, 陈厚存, 陈京都, 戴其根, 霍中洋, 魏海燕, 李明银. 有序摆抛栽对超级稻植株抗倒伏能力的影响. 中国水稻科学, 2015, 29(1): 45-55.
- GUO B W, ZHU D W, XU K, ZHANG H C, ZHOU X T, ZHU C C, CAO L Q, CHEN H C, CHEN J D, DAI Q G, HUO Z Y, WEI H Y, LI M Y. Effect of ordered transplanting and optimized broadcasting on the culm lodging resistance of super rice. *Chinese Journal of Rice Science*, 2015, 29(1): 45-55. (in Chinese)
- [19] 陆江林, 张文毅, 金诚谦. 我国水稻育插秧机械化制约因素分析. 中国农机化学报, 2013, 34(2): 30-34.
- LU J L, ZHANG W Y, JIN C Q. Analysis on constraining factors for seedling's machine-raising and machine transplanting of rice in China. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2013, 34(2): 30-34. (in Chinese)
- [20] 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, 41(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 mechanically-transplanting density on lodging resistance and yield in different types of rice. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(11): 1767-1776. (in Chinese)

- [21] 李国辉, 钟旭华, 田卡, 黄农荣, 潘俊峰, 何庭蕙. 施氮对水稻茎秆抗倒伏能力的影响及其形态和力学机理. 中国农业科学, 2013, 46(7): 1323-1334.
- LI G H, ZHONG X H, TIAN K, HUANG N R, PAN J F, HE T H. Effect of nitrogen application on stem lodging resistance of rice and its morphological and mechanical mechanisms. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(7): 1323-1334. (in Chinese)
- [22] ISLAM M S, PENG S, VISPERAS R M, EREFUL N, UDDIN BHUIYA M S, JULFIQUAR A W. Lodging-related morphological traits of hybrid rice in a tropical irrigated ecosystem. *Field Crops Research*, 2007, 101(2): 240-248.
- [23] SYROS T, YUPSANIS T, ZAFIRIADIS H, ECONOMOU A. Activity and isoforms of peroxidases, lignin and anatomy, during adventitious rooting in cuttings of *Ebenus cretica* L. *Journal of Plant Physiology*, 2004, 161 (1): 69-77.
- [24] 梅少华, 陈兴国, 田剑, 程应德, 吴海亚, 刘诗晴, 陈新平, 柯洪进, 周中全, 周志华. 不同播种量和施氮量对黄华占直播产量及其构成因素的影响. 中国稻米, 2011, 17(3): 39-42.
- MEI S H, CHEN X G, TIAN J, CHENG Y D, WU H Y, LIU S Q, CHEN X P, KE H J, ZHOU Z Q, ZHOU Z H. Effects of different seeding amount and N fertilizer rate on Huang Hua Zhan's direct production and its components. *China Rice*, 2011, 17(3): 39-42. (in Chinese)
- [25] 曾新宇. 不同早稻品种的机直播方式和播种量研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2013.
- ZENG X Y. The Research in mechanization planting ways and seeding rates at different early direct seeding rice[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [26] 张鸿, 朱从桦, 李其勇, 李星月, 郭展, 郑家国, 李旭毅. 灌溉方式和施氮量对直播稻氮素和水分利用的影响. 中国生态农业学报, 2017, 25(12): 1802-1814.
- ZHANG H, ZHU C H, LI Q Y, LI X Y, GUO Z, ZHENG J G, LI X Y. Effect of irrigation management and nitrogen rate on nitrogen and water utilization of direct-seeded rice. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(12): 1802-1814. (in Chinese)
- [27] 郑天翔, 唐湘如, 罗锡文, 黎国喜, 王在满, 舒时富, 陈伟通. 不同灌溉方式对精量穴直播超级稻生产的影响. 农业工程学报, 2010, 26(8): 52-55.
- ZHENG T X, TANG X R, LUO X W, LI G X, WANG Z M, SHU S F, CHEN W T. Effects of different irrigation methods on production of precision hill-direct-seeding super rice. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(8): 52-55. (in Chinese)
- [28] 赵田芬, 韩根成, 沈庆雷. 不同播期对直播稻株型及穗部性状影响的研究. 中国稻米, 2014, 20(6): 78-80.
- ZHAO T F, HAN G C, SHEN Q L. Effects of different sowing date on plant type and ear characters of direct seeded rice. *China Rice*, 2014, 20(6): 78-80. (in Chinese)
- [29] 王在满. 同步开沟起垄水稻机械化穴播技术研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- WANG Z M. Design and experiments of precision rice hill-drop drilling technology with synchronous furrowing and ridging[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [30] 惠秀芬, 宗淑娟. 不同覆土厚度对水稻秧苗素质的影响. 农民致富之友, 2013(9): 49.
- HUI X F, ZONG S J. Effects of the variant thickness of soil covering on rice seedlings quality. *Nong Min Zhi Fu Zhi You*, 2013(9): 49. (in Chinese)
- [31] 凌启鸿. 关于水稻轻简栽培问题的探讨. 中国稻米, 1997(5): 3-9.
- LING Q H. Discussion on the cultivation of light and simplified rice cultivation *China Rice*, 1997(5): 3-9. (in Chinese)
- [32] 程建平, 罗锡文, 樊启洲, 张集文, 吴建平, 王在满, 臧英. 不同种植方式对水稻生育特性和产量的影响. 华中农业大学学报, 2010, 29(1): 1-5.
- CHENG J P, LUO X W, FAN Q Z, ZHANG J W, WU J P, WANG Z M, ZANG Y. Influence of different planting methods on growth and development characteristics and yield of rice. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2010, 29(1): 1-5. (in Chinese)
- [33] 骆鹏, 吴晗, 刘凯健, 王威. 分析气候因素对水稻生育及产量的影响. 种子科技, 2017, 35(4): 110-111.
- LUO P, WU H, LIU K J, WANG W. Analysis the effects of climatic factors on rice growth and yield. *Seed Science & Technology*, 2017, 35(4): 110-111. (in Chinese)
- [34] 高劲松, 董文佳. 影响农业生产的主要气象因素. 农民致富之友, 2011(3): 38.
- GAO J S, DONG W J. Climatic factors on agricultural production. *Nong Min Zhi Fu Zhi You*, 2011(3): 38. (in Chinese)
- [35] 罗锡文, 蒋恩臣, 王在满, 唐湘如, 李就好, 陈伟通. 开沟起垄式水稻精量穴直播机的研制. 农业工程学报, 2008, 24(12): 52-56.
- LUO X W, JIANG E C, WANG Z M, TANG X R, LI J H, CHEN W T. Precision rice hill-drop drilling machine. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(12): 52-56. (in Chinese)
- [36] 苏国兴. 多胺分解代谢在大豆生长发育和耐盐生理中的作用[D]. 南京: 南京农业大学, 2006.
- SU G X. The roles of polyamine catabolism in development and salt

- tolerance of soybean seedlings[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- [37] OOKAWA T, ISHIHARA K V. Difference of the cell wall components affecting the bending stress of the culm in relation to the lodging resistance in paddy rice. *Japanese Journal of Crop Science*, 1993, 62(3): 378-384.
- [38] 李杰, 张洪程, 龚金龙, 常勇, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕. 不同种植方式对超级稻植株抗倒伏能力的影响. *中国农业科学*, 2011, 44(11): 2234-2243.
- LI J, ZHANG H C, GONG J L, CHANG Y, DAI Q G, HUO Z Y, XU K, WEI H Y. Effects of different planting methods on the culm lodging resistance of super rice. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(11): 2234-2243. (in Chinese)
- [39] 萧长亮, 解保胜, 王安东, 王士强, 李春光, 那用光. 氮和稀效唑调控对寒地水稻倒伏和产量的影响. *作物杂志*, 2017(6): 96-103.
- XIAO C L, XIE B S, WANG A D, WANG S Q, LI C G, NA Y G. Effects of nitrogen and uniconazole regulation on lodging resistance and yield of rice in cold region. *Crops*, 2017(6): 96-103. (in Chinese)
- [40] 贾维强, 谭雪明, 李木英, 石庆华, 潘晓华. 不同机械直播穴距与播种量对早稻产量形成的影响. *江西农业大学学报*, 2017, 39(1): 9-17.
- JIA W Q, TAN X M, LI M Y, SHI Q H, PAN X H. Effects of different hole spaces and seed quantities in machine-direct-seeding on yield formation of early season rice. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2017, 39(1): 9-17. (in Chinese)
- [41] 史鸿志, 朱德峰, 张玉屏, 向镜, 张义凯, 陈慧哲. 机械穴直播对杂交水稻生长及产量的影响. *中国稻米*, 2017, 23(4): 75-77.
- SHI H Z, ZHU D F, ZHANG Y P, XIANG J, ZHANG Y K, CHEN H Z. Effects of mechanical hill-drop drilling on growth and yield of hybrid rice. *China Rice*, 2017, 23(4): 75-77. (in Chinese)
- [42] 徐庆琴, 骆建山, 徐翔. 直播稻栽培技术. *现代农业科技*, 2007(20): 126.
- XU Q Q, LUO J S, XU X. Cultivation technology for direct seeding rice. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2007(20): 126. (in Chinese)
- [43] 赵民军, 朱东安, 何吉昌, 谢绍祝, 邝茂平, 刘兴枝, 程义化, 谢春春. 杂交晚稻免耕抛栽稻田落粒谷秧苗的防除方法. *杂交水稻*, 2005, 20(1): 42-43.
- ZHAO M J, ZHU D A, HE J C, XIE S Z, KUANG M P, LIU X Z, CHENG Y H, XIE C C. Prevention and removal of volunteer rice seedlings in the fields by the zero-tillage and seedling-broadcasting cultivation of the second cropping hybrid rice. *Hybrid Rice*, 2005, 20(1): 42-43. (in Chinese)

(责任编辑 杨鑫浩)