

不同机直播方式对南方优质晚籼稻产量及抗倒伏特性的影响

王文霞 周燕芝 曾勇军 吴自明 谭雪明 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; *通信联系人, E-mail: zyh74049501@163.com)

Effects of Different Mechanical Direct Seeding Patterns on Yield and Lodging Resistance of High-Quality Late *indica* Rice in South China

WANG Wenxia, ZHOU Yanzhi, ZENG Yongjun, WU Ziming, TAN Xueming, PAN Xiaohua, SHI Qinghua, ZENG Yanhua*

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

*Corresponding author, E-mail: zyh74049501@163.com)

Abstract: 【Objective】To investigate the effects of different mechanical direct seeding patterns on lodging resistance and yield of high quality late *indica* rice in South China, and provide the reference for high yield and lodging resistance cultivation of high quality late *indica* rice in South China.【Method】the *indica* inbred rice variety Huanghuazhan and the *indica* hybrid rice variety Taiyou 398 were used as materials and three direct seeding patterns, including dry direct seeding, wet direct seeding and flooded direct seeding were designed to determine the yield and yield components, emergence rate, dry matter accumulation, leaf area index, stem morphology and mechanical properties of high quality late *indica* rice. 【Result】Compared with wet direct seeding or flooded direct seeding, dry direct seeding significantly increased seedling emergence rate of late rice varieties by 6.10% to 22.96%, and the dry matter accumulation and leaf area index also increased. At the same time, dry direct seeding pattern was conducive to increasing the yield of late rice varieties by 6.99% to 27.77%, and Taiyou 398 had higher yield increasing rate than Huanghuazhan. In terms of yield components, the increasing of yield of late rice varieties under mechanical direct seeding was mainly attributed to the increase in the number of effective panicles. In addition, the plant height of dry direct seeded rice was relatively low, and basal internodes were relatively short, but the stem was stronger and the stem wall was thicker than the two treatments, which was conducive to improving the break force and culm phenotype index of the plant, and reducing the bending moment and lodging index. The correlation analysis showed that the stem diameter, wall thickness and culm phenotype index were positively correlated with the break force, but negatively correlated with the lodging index. The plant height, panicle length and bending moment were negatively correlated with the break force, and positively correlated with the lodging index. 【Conclusion】Mechanical dry direct seeding practice could not only contribute to yield increase of high-quality late *indica* rice in South China, but also significantly increase the stem strength, and improve the lodging resistance of plants and reduce the risk of direct seeded rice production.

Key words: mechanical direct seeding; late *indica* rice; grain yield; lodging resistance

摘要: 【目的】研究不同机直播方式对南方优质晚籼稻茎秆抗倒伏能力及产量的影响,为南方优质晚籼稻高产抗倒栽培提供参考。【方法】以籼型常规稻品种黄华占和籼型杂交稻品种泰优398为材料,设置旱直播、湿直播和淹水直播3个处理,分别测定优质晚籼稻的产量及产量构成、出苗率、干物质生产、叶面积指数和茎秆形态与力学特性。【结果】与湿直播方式或淹水直播方式相比,旱直播方式可显著提高供试晚籼稻品种的出苗率,增幅为6.10%~22.96%,且干物质生产和叶面积指数均增加。同时,旱直播方式有利于提高供试晚籼稻品种产量,两品种增产幅度为6.99%~27.77%,其中泰优398产量增幅高于黄华占,从产量构成因素来看,机械旱直播方式下供试晚籼稻品种产量的提高主要得益于有效穗数增加。此外,旱直播方式下供试水稻株高相对较矮,基部各节间较短,但茎秆粗壮,茎壁较厚,有利于提高植株茎秆抗折力和秆型指数,降低弯曲力矩与倒伏指数。相关分析表明,茎

收稿日期: 2019-07-03; 修改稿收到日期: 2019-10-16。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31760366); 国家重点研发计划资助项目(2016YFD0300501, 2017YFND0301605); 江西省重点研发计划资助项目(20171BBF60030); 江西省研究生创新专项(YC2017-S178)。

粗、壁厚和秆型指数与抗折力显著正相关,而与倒伏指数显著负相关;株高、穗长、弯曲力矩与抗折力显著负相关,与倒伏指数显著正相关。【结论】采用机械旱直播方式不仅有利于增加南方优质晚籼稻产量,还能显著增加茎秆强度,提高植株抗倒伏能力,降低直播生产的风险。

关键词: 机直播; 优质晚籼稻; 产量; 倒伏特性

中图分类号: S511.034; S511.042

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2020)01-0046-11

随着我国经济的快速发展和农村劳动力向城市大量转移,优质劳动力日益短缺,全面实现机械化是我国水稻生产的发展方向。水稻机直播具有作业速度快、成本低、标准化程度高等优势,且种植面积呈加快发展趋势^[1-3]。水稻机械化直播按土壤水分状况可分为机械淹水直播、机械湿直播和机械旱直播,机械旱直播省时省力,又节水节本,提高直播稻产量,但对前期整地及土壤含水量要求极其严格^[4]。机械淹水直播由于长期的水层阻隔,易导致烂种烂秧,降低直播稻出苗率,稻田更容易滋生水生性杂草,降低水稻产量。机械湿直播需将稻田耕整成类似育秧的软泥苗床后直播,水稻产量介于旱直播和水直播之间^[5]。随着人民生活水平的提升,对优质稻米的需求量日益增加,优质高产已成为我国水稻生产的发展走向^[6, 7]。与机插秧相比,优质直播稻茎秆较细弱、叶片狭长,更容易引起倒伏,而倒伏是制约优质直播稻高产的重要因素之一。在机直播条件下,探讨不同机直播方式对优质直播稻倒伏现象的调控,对于促进南方稻区优质稻直播生产具有重要意义。前人研究发现水稻一旦发生倒伏,将会造成植株郁闭,光合效率降低,茎秆输导组织受到损伤,结实率明显下降,产量和稻米品质亦呈变劣趋势^[8-9]。水稻倒伏是多个因素共同作用的结果,可从茎秆的形态特性与力学特性两方面来考查^[10, 11]。除自然因素外,品种选择、水肥管理、栽培措施等都对水稻倒伏具有一定的影响^[12-14]。研究表明在选择抗倒伏的水稻品种时应综合考虑植株茎秆的粗细程度、基部节间长、株高等相关因素,株高过高以及基部节间较长的品种不宜采用直播种植方式,在一定范围内,株高与水稻植株的抗倒伏能力显著负相关^[15]。此外,增施硅、钾肥也可增加水稻基部节间的充实度和茎秆强度,增强植株抗倒伏能力^[16]。关于水稻倒伏特性的研究,前人主要集中在机插等种植方式,水稻机插增加了基部节间茎粗和壁厚,抗折力增加,倒伏指数降低^[17]。但对直播种植方式,尤其是机械精量穴直播方式下探讨水稻植株抗倒伏性状的研究较少,且前人的研究对象主要以早稻为主,而对优质晚籼稻的研究较少。生产中优质稻容易倒伏,不利于优质稻品种的优质高产栽培。

本研究以籼型常规稻黄华占和杂交稻泰优398为试验材料,采用人工模拟机械穴直播的种植方式,在田间开展旱直播、湿直播与淹水直播的比较研究,系统研究不同直播方式下晚籼稻出苗率、干物质生产、叶面积指数、抗倒伏性状及产量形成的变化特征,以期为优质晚籼稻品种在南方稻区同步实现高产和抗倒提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地点与供试材料

试验于 2017—2018 年在江西农业大学科技园(115°49'53"E, 28°46'8"N)进行田间试验,供试品种为籼型常规稻黄华占和杂交稻泰优 398,均由广东省农业科学院水稻研究所提供,黄华占与泰优 398 品种全生育期分别为 125 d 和 118 d。试验田前茬为双季早稻,前耕层土壤(0—20 cm)基本理化性质为有机质 30.35 g/kg,全氮 2.40 g/kg,速效磷 25.17 mg/kg,速效钾 84.02 mg/kg, pH 值为 6.1。

1.2 试验设计

试验采用裂区设计,直播方式为主区,品种为副区,设置 3 个处理:旱直播(DDS),采用 HJWG-88 型小型旋耕机(永康市暖天工贸有限公司)进行旱耕早整,在土壤含水量为 40%~50%的土壤中进行直播,播后用细土覆盖,进行间歇灌溉,保持土壤湿润,以促进种子吸水发芽;湿直播(WDS),采用小型旋耕机进行水耕水整田,将稻田耕整成类似育秧的软泥苗床,在土壤水分饱和而无积水的田块直播,播后田间保持湿润状态。淹水直播(FDS),采用小型旋耕机进行水整田,在淹水达 2~3 cm 深度的水层中进行直播,播后前期间保持 2~3 cm 的水层,适当粗糙的苗床有利于秧苗的固定生根。试验设 3 次重复,每个小区 20 m²,每小区之间筑埂并用塑料薄膜包埂,各处理均设有单独的排水口和进水口,单排单灌。

试验于 7 月 3 日(2018 年试验为 7 月 5 日)播种,11 月 5 日(2018 年试验为 11 月 6 日)收割,采用人工模拟机械穴直播的种植方式,行株距为 16.5 cm×16.5 cm。选取刚破胸露白的种子进行播种,播种量为每穴 6~8 粒。氮肥(N)施用量为 195 kg/hm²,其中 $m_{\text{基肥}}:m_{\text{穗肥}}=4:2:4$;钾肥(K₂O)施用量为 170 kg/hm²,

表1 不同机直播方式对南方优质晚籼稻产量及其构成因素的影响

Table 1. Effects of different mechanical direct seeded patterns on the yield and yield components of high-quality late indica rice in South China.

年份 Year	品种 Variety	处理 Treatment	有效穗数 Effective panicles /($\times 10^4$ hm ⁻²)	每穗粒数 Grains per panicle	结实率 Seed setting rate/%	千粒重 1000-grain weight/g	产量 Yield /(t hm ⁻²)	
2017	黄华占 Huanghuazhan	DDS	310.0 a	100.5 a	71.7 a	21.5 a	6.17 a	
		WDS	290.0 a	102.9 a	72.8 a	21.2 a	5.73 ab	
		FDS	252.3 b	104.4 a	73.0 a	20.7 a	5.17 b	
	泰优 398 Taiyou 398	DDS	320.0 a	112.2 a	72.5 a	22.0 a	6.43 a	
		WDS	300.0 a	115.6 a	74.5 a	21.6 a	5.80 b	
		FDS	261.7 b	116.6 a	75.4 a	21.1 a	5.37 b	
2018	黄华占 Huanghuazhan	DDS	301.5 a	101.8 a	73.3 a	21.7 a	6.58 a	
		WDS	282.4 b	103.6 a	74.0 a	21.6 a	6.15 b	
		FDS	225.0 c	105.9 a	74.9 a	20.9 a	5.15 c	
	泰优 398 Taiyou 398	DDS	316.0 a	113.4 a	74.1 a	22.1 a	6.93 a	
		WDS	299.0 a	113.4 a	72.2 a	21.7 a	6.18 ab	
		FDS	247.5 b	117.1 a	75.5 c	21.4 a	5.65 b	
		年份 Year(Y)		2.23	0.18	0.67	4.14	13.46**
		品种 Variety(V)		3.91	90.73**	0.79	12.31*	6.87*
		处理 Treatment(T)		30.70**	1.65	1.66	4.15	58.77**
	Y×V		0.33	0.29	1.00	0.66	0.42	
	Y×T		0.55	0.27	0.53	0.05	1.23	
	V×T		0.03	0.01	0.29	0.70	1.08	
	Y×V×T		0.03	0.11	0.40	0.43	0.29	

DDS—旱直播; WDS—湿直播; FDS—淹水直播。不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$), *和**分别表示在 $P=0.05$ 和 0.01 水平差异显著。下同。

DDS, Dry direct seeding; WDS, Wet direct seeding; FDS, Flooded direct seeding. Different lowercase letters in the same column mean significant difference at 0.05 level, *and**indicate significant effects at 0.05 and 0.01 levels, respectively. The same as below.

其中分 $m_{\text{穗肥}} : m_{\text{基肥}} = 7 : 3$; 磷肥(P_2O_5)施用量为 90 kg/hm^2 , 全部作为基肥施用。氮、磷、钾肥分别为尿素、钙镁磷肥和氯化钾。播种后喷施除草剂直播保, 4 叶期喷施除草剂精克草星。

1.3 测定项目和方法

1.3.1 考种测产

在成熟期每处理调查3个重复, 每重复调查120 颖水稻的有效穗数。按平均有效穗数选取考种样, 每小区分别取样3颖, 调查每穗粒数、结实率及千粒重。每小区选取 5 m^2 水稻进行实际测产。

1.3.2 出苗率

于出苗整齐后调查出苗数, 出苗率(%)=出苗数 / 播种粒数 $\times 100\%$ 。

1.3.3 干物质及叶面积指数(LAI)

于分蘖盛期、幼穗分化期、抽穗期、成熟期, 每个小区调按5点取样法选取代表性的植株3颖, 按茎鞘、叶、穗分开包扎, 在烘箱内 105°C 下杀青 30 min , 再在 80°C 下烘至恒重, 冷却至室温后称重; 同时按小叶干重法计算叶面积指数(LAI)。

1.3.4 倒伏测定

齐穗后 20 d , 按照五点取样法, 选取代表性的水稻10颖, 每株取1个主茎, 共10个主茎, 作为1个样本, 3次重复^[18], 测定株高、穗长及基部各

节间的长度, 用YYD-1茎秆强度测定仪测量倒数第二节间茎秆的抗折力F, 用游标卡尺测定各节茎秆的粗度、茎壁厚度。用下列公式计算各力学参数^[19]:

茎粗(mm)=(长轴外径+短轴外径)/2;

茎壁厚(mm)=轴外径-轴内径;

弯曲力矩(g cm)=节间基部至穗顶长度(cm) \times 该节间基部至穗顶鲜重(g)^[20];

倒伏指数=弯曲力矩(g cm)/折断弯矩(g cm) $\times 100\%$;

秆型指数=茎秆外径(长短径的平均值, cm)/秆长(cm) $\times 100\%$ 。

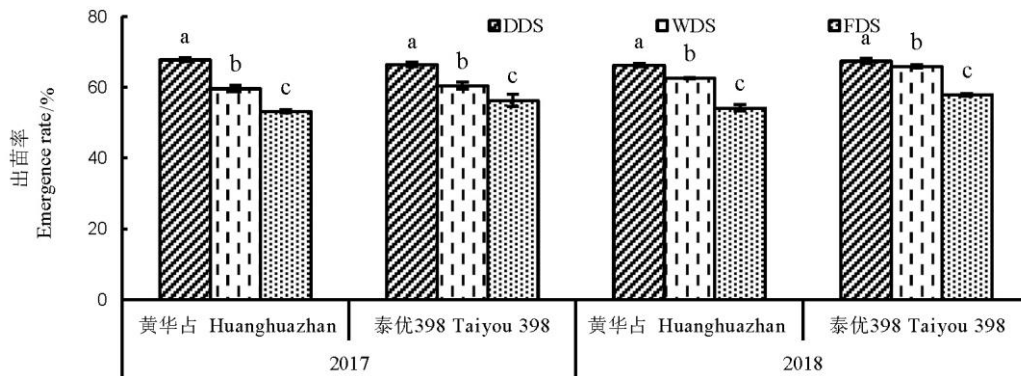
1.4 数据分析

试验数据均采用Excel 2010和DPS 7.05软件进行分析和处理, 用LSD法进行差异显著性检验($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 机直播方式对优质晚籼稻产量的影响

由表1可知, 直播方式对有效穗数和产量有极显著影响, 品种对每穗粒数、千粒重和产量的影响达显著或极显著水平, 年份对产量有极显著影响。不同直播方式处理下, 旱直播处理较湿直播或淹水



DDS—早直播; WDS—湿直播; FDS—淹水直播。柱上不同小写字母表示在 5% 水平上差异显著。下同。

DDS, Dry direct seeding; WDS, Wet direct seeding; FDS, Flooded direct seeding. Various lowercase letters above the bars mean significant difference at 0.05 probability level. The same as in figures below.

图 1 不同机直播方式对南方优质晚籼稻出苗率的影响

Fig. 1. Effects of different mechanical direct seeding patterns on emergence rate of high-quality late *indica* rice in South China.

直播处理增加了供试品种产量, 其中两年中常规稻黄华占产量增幅为 6.99% ~ 27.77%, 杂交稻泰优 398 产量增幅为 10.86% ~ 22.65%, 且早直播处理与淹水直播处理差异达显著水平, 年度间趋势一致; 各直播处理下, 泰优 398 的产量增幅高于黄华占。从产量构成因素来看, 两年数据结果表明, 与湿直播方式或淹水直播方式相比, 早直播方式增加有效穗数, 且与淹水直播方式差异达显著水平, 千粒重呈增加趋势, 但无显著性差异。说明机械早直播方式有利于提高供试优质晚籼稻产量, 主要得益于有效穗数的显著增加。

2.2 不同机直播方式对南方优质晚籼稻出苗率的影响

从图1可知, 南方优质晚籼稻供试品种两年的出苗率均呈早直播 > 湿直播 > 淹水直播的趋势, 且差异达显著水平。2017年, 常规稻黄华占和杂交稻泰优398在早直播、湿直播和淹水直播方式下的出苗率分别为65.79%、59.64%、53.21% 和66.43%、64.93%、56.36%, 2018年, 黄华占和泰优398在早直播、湿直播和淹水直播方式下的出苗率分别为66.29%、61.14%、54.21% 和67.43%、65.93%、57.86%。与湿直播方式或淹水直播方式相比, 早直播方式出苗率增幅为6.10% ~ 22.96%。说明机械早直播有利于提高南方优质晚籼稻的出苗率。

2.3 不同机直播方式对南方优质晚籼稻干物质质量的影响

分析不同机直播方式对南方优质晚籼稻分蘖盛期至穗分化期、穗分化期至抽穗期、抽穗到成熟期干物质质量及总干物质生产的影响(图 2), 结果表明, 各生育期阶段干物质生产大体呈早直播 > 湿直

播 > 淹水直播的趋势, 且早直播方式与淹水直播方式差异显著, 其中在穗分化期至抽穗期阶段, 两品种干物质积累早直播处理均显著高于湿直播、淹水直播处理, 年度间趋势一致。全生育期总干物质生产早直播方式要高于湿直播、淹水直播方式, 黄华占两年平均高出 3.40% ~ 16.23%, 泰优 398 两年平均高出 5.04% ~ 22.58%。表明早直播处理有利于提高南方优质晚籼稻干物质生产。

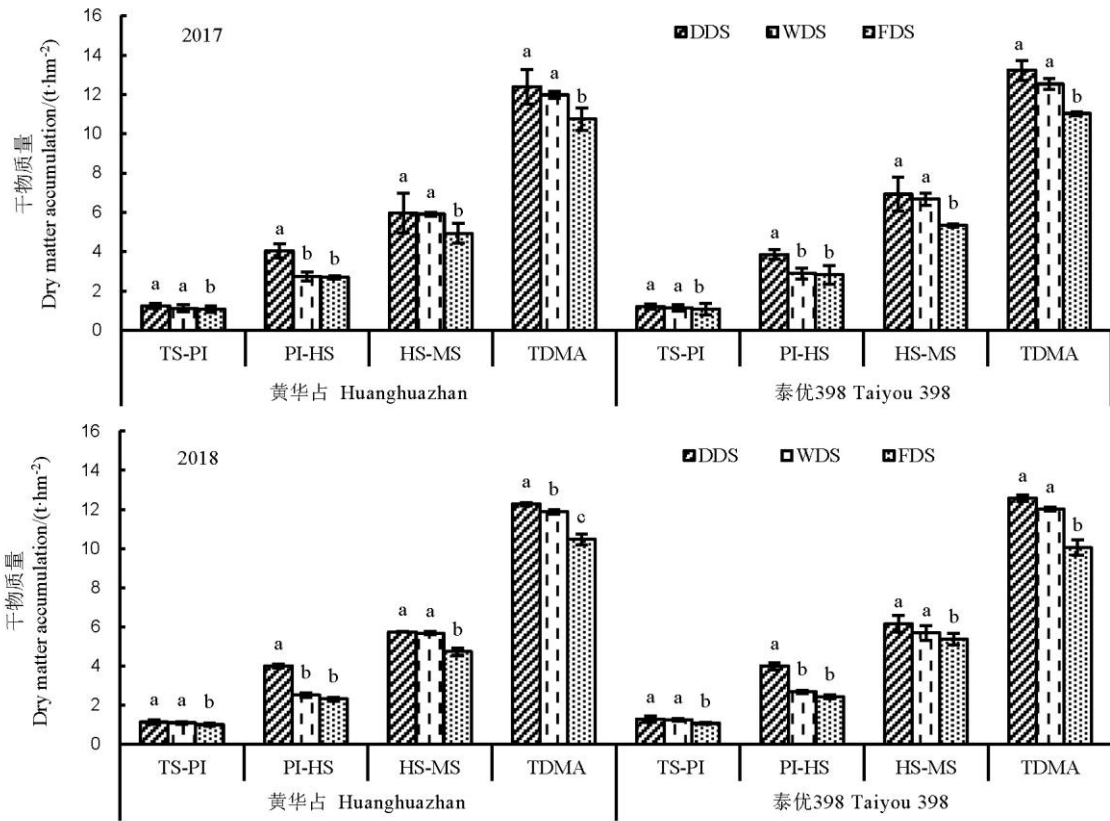
2.4 不同机直播方式对南方优质晚籼稻叶面积指数的影响

由图 3 可知, 优质晚籼稻品种在 4 个生育期中叶面积指数表现为先升高后降低的趋势, 于抽穗期达到最高值, 成熟期又有所下降。与湿直播方式或淹水直播方式相比, 早直播方式各生育时期叶面积指数增加, 两品种在抽穗期差异较大, 说明早直播处理有利于提高南方优质晚籼稻叶面积指数。

2.5 不同机直播方式对南方优质晚籼稻倒伏特性的影响

2.5.1 茎秆形态

由表 2 可知, 直播方式和品种对株高、穗长、各节间长度的影响达显著或极显著水平, 年份对株高、穗长、第 1 节间、第 3 节间长度存在显著或极显著影响, 年份与品种、品种与处理对株高和第 1 节间影响的互作效应达显著水平, 年份与处理对株高和第 3 节间影响的互作效应达显著水平。不同直播方式下, 供试品种两年株高与穗长均呈早直播 < 湿直播 < 淹水直播的趋势, 早直播处理与淹水直播处理间株高差异达显著水平; 穗长差异不明显(2017 年黄华占除外); 早直播处理各节间长度均不同程度低于湿直播处理或淹水直播处理, 其中, 第 1、2



TS—分蘖期; PI—幼穗分化期; HS—抽穗期; MS—成熟期; TDMA—干物质总量。下同。

TS, Tilling stage; PI, Panicle differentiation; HS, Heading stage; MS, Maturity stage; TDMA, Total dry matter accumulation. The same as follows.

图2 不同机直播方式对南方优质晚籼稻干物质质量的影响

Fig. 2. Effects of different mechanical direct seeding patterns on dry matter accumulation of high-quality late *indica* rice in South China.

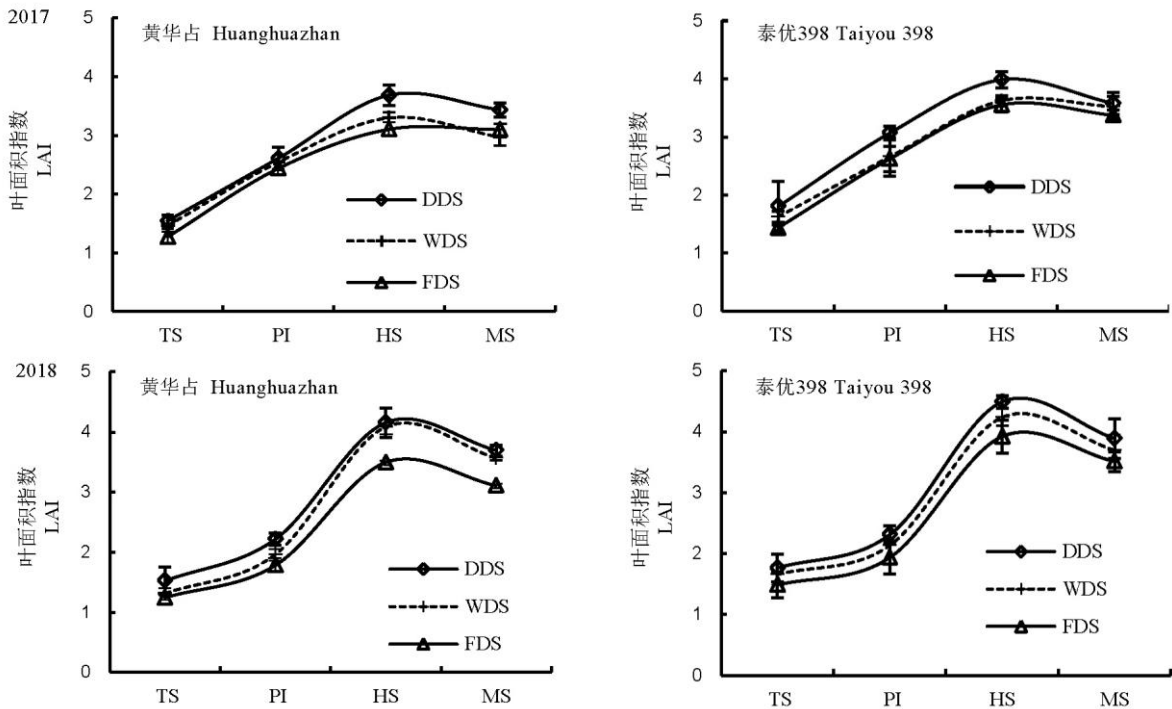


图3 不同机直播方式对南方优质晚籼稻叶面积指数的影响

Fig. 3. Effects of different mechanical direct seeded patterns on LAI of high-quality late *indica* rice in South China.

表 2 不同机直播方式对主茎形态的影响

Table 2. Effects of different mechanical direct seeding patterns on main stem morphology.

年份 Year	品种 Variety	处理 Treatment	株高 Plant height/cm	穗长 Panicle length/cm	各节间长度 Internode length/cm		
					N ₁	N ₂	N ₃
2017	黄华占 Huanghuazhan	DDS	93.7 b	20.5 b	6.07 a	8.43 b	14.13 b
		WDS	95.4 a	21.5 b	6.13 a	9.60 a	15.50 ab
		FDS	96.4 a	23.3 a	6.17 a	9.64 a	16.69 a
	泰优 398 Taiyou 398	DDS	83.4 b	20.9 a	4.59 b	7.60 b	12.81 c
		WDS	85.5 a	21.4 a	5.98 a	8.41 a	15.10 b
		FDS	87.4 a	22.2 a	6.08 a	8.85 a	16.59 a
2018	黄华占 Huanghuazhan	DDS	90.1 b	23.1 a	6.17 b	8.73 a	13.63 b
		WDS	92.0 b	23.4 a	6.47 ab	9.05 a	15.25 a
		FDS	97.8 a	24.6 a	6.55 a	9.42 a	15.74 a
	泰优 398 Taiyou 398	DDS	84.5 b	21.8 a	5.32 b	7.65 b	13.73 c
		WDS	86.5 a	22.5 a	6.40 a	8.53 a	14.91 b
		FDS	87.2 a	22.8 a	6.48 a	8.97 a	15.65 a
	年份 Year(Y)		5.44*	62.58**	94.49**	0.09	6.41*
	品种 Variety(V)		967.81**	20.14**	123.54**	65.01**	8.12*
	处理 Treatment(T)		80.67**	27.88**	150.52**	43.70**	144.52**
	Y×V		22.58**	8.49*	8.97*	1.59	3.90
	Y×T		5.053*	1.61	0.07	1.27	7.18*
	V×T		5.66*	3.19	77.08**	0.98	1.40
Y×V×T		13.93**	0.70	5.70*	1.79	3.37	

N₁—第 1 节间, N₂—第 2 节间, N₃—第 3 节间。N₁, First internode, N₂, Second internode, N₃, Third internode.

表 3 不同机直播方式对基部节间茎秆特征的影响

Table 3. Effects of different mechanical direct seeding patterns on basal internode stem characteristics.

年份 Year	品种 Variety	处理 Treatment	茎粗	壁厚	秆型指数
			Diameter of stem/mm	Stem wall thickness/mm	Culm phenotype index/%
2017	黄华占 Huanghuazhan	DDS	8.28 a	4.03 a	2.30 a
		WDS	8.10 a	3.62 b	2.21 b
		FDS	7.36 b	3.46 c	2.01 c
	泰优 398 Taiyou 398	DDS	8.44 a	4.10 a	2.55 a
		WDS	8.15 a	3.68 a	2.32 ab
		FDS	7.75 b	3.64 b	2.13 b
2018	黄华占 Huanghuazhan	DDS	8.26 a	4.03 a	2.49 a
		WDS	7.85 b	3.60 b	2.30 b
		FDS	7.37 c	3.52 b	2.02 c
	泰优 398 Taiyou 398	DDS	8.40 a	4.29 a	2.52 a
		WDS	8.15 b	3.67 b	2.34 a
		FDS	7.94 c	3.61 b	2.26 b
	年份 Year(Y)		0.04	1.00	10.72**
	品种 Variety(V)		38.67**	15.14**	39.80**
	处理 Treatment(T)		103.86**	118.61**	97.84**
	Y×V		2.90	0.34	1.63
	Y×T		2.39	1.07	0.12
	V×T		7.16*	1.07	2.15
Y×V×T		0.78	1.67	5.90*	

节间旱直播与淹水直播总体差异显著, 湿直播与淹水直播处理差异不明显, 泰优 398 第 3 节间在各直播方式间差异达显著水平, 黄华占第 3 节间旱直播与淹水直播处理差异显著。

2.5.2 对茎秆力学特性的影响

由表 3 可知, 直播方式和品种对茎粗、壁厚和秆型指数的影响达极显著水平, 年份对秆型指数存在极显著影响, 品种与直播方式对茎粗影响的互作

表4 不同机直播方式对茎秆力学特性的影响

Table 4. Effect of different mechanical direct seeding patterns on mechanical properties of stem.

年份 Year	品种 Variety	处理 Treatment	弯曲力矩 Bending weight(WP)/(g cm)	抗折力 Break force(L)/g	倒伏指数 Lodging index(LI)/%
2017	黄华占 Huanghuazhan	DDS	1512.6 b	2211.2 a	68.7 b
		WDS	1530.6 b	2027.7 b	72.8 b
		FDS	1765.3 a	1867.4 c	83.9 a
	泰优 398 Taiyou 398	DDS	1214.5 b	2295.9 a	53.1 b
		WDS	1278.2 b	2152.0 ab	57.1 a
		FDS	1515.9 a	1948.5 b	69.9 a
2018	黄华占 Huanghuazhan	DDS	1422.1 b	2119.4 a	67.3 b
		WDS	1477.0 b	2052.0 ab	72.0 b
		FDS	1786.8 a	1858.2 b	91.7 a
	泰优 398 Taiyou 398	DDS	1229.8 b	2292.1 a	53.9 b
		WDS	1294.2 b	2208.2 ab	64.1 ab
		FDS	1506.1 a	1945.5 b	72.1 a
	年份 Year(Y)		2.08	7.22*	4.84
	品种 Variety(V)		5638.84**	25.71**	148.84**
	处理 Treatment(T)		608.26**	7.42**	87.74**
Y×V		6.60	2.02	0.41	
Y×T		0.82	0.45	1.75	
V×T		52.43	0.02	1.48	
Y×V×T		1.92	0.18	2.71	

表5 茎秆性状与抗折力和倒伏指数的相关系数 (n=12)

Table 5. Correlation coefficients between stem properties and break force and lodging index.

指标 Index	抗折力 Break force	倒伏指数 Lodging index
株高 Plant height	-0.798**	0.880**
穗长 Panicle length	-0.830**	0.725**
茎粗 Diameter of stem	0.739**	-0.884**
壁厚 Stem wall thickness	0.644*	-0.721**
弯曲力矩 Bending weight	-0.811**	0.974**
秆型指数 Culm phenotype index	0.649*	-0.871**

相关系数为 $R_{0.05}=0.576$, $R_{0.01}=0.707$ 。

$R_{0.05}=0.576$, $R_{0.01}=0.707$ 。

效应达显著水平, 年份、直播方式与品种对秆型指数的影响的互作效应达显著水平。不同直播方式下, 在不同年份中, 供试品种茎粗、壁厚和秆型指数均表现为早直播>湿直播>淹水直播, 茎粗、壁厚和秆型指数指标在早直播处理与淹水直播处理间差异总体达显著水平(2017年黄华占除外), 表明早直播有利于改善基部节间茎秆特征。

研究结果表明(表4), 直播方式、品种对弯曲力矩、抗折力和倒伏指数的影响达极显著水平, 年份对抗折力存在显著影响。不同直播方式下, 早直播方式的弯曲力矩与倒伏指数均低于湿直播或淹水直播处理, 且与淹水直播处理差异显著; 对于抗折

力而言, 早直播处理均高于湿直播或淹水直播处理, 且与淹水直播处理差异达显著水平, 说明早直播方式有利于改善基部茎秆力学特性, 增强茎秆抗倒伏能力。

2.5.3 茎秆性状与抗倒伏特性的相关分析

相关分析表明(表5), 茎秆性状指标与植株抗倒伏特性存在显著相关性。茎粗、壁厚和秆型指数与抗折力显著正相关, 且与倒伏指数显著负相关。株高、穗长、弯曲力矩与抗折力显著负相关, 与倒伏指数显著正相关。表明优质晚籼稻茎秆的抗折力和倒伏指数受茎秆性状多种指标因素影响, 株高、穗长、茎粗、壁厚、弯曲力矩和秆型指数等显著影响植株的倒伏指数与抗折力, 与植株倒伏性密切相关。

3 讨论

3.1 不同机直播方式对南方优质晚籼稻生长特性及产量形成的影响

机直播符合现代稻作高效化、轻简化的发展方向, 其应用面积不推自广^[21, 22], 但机直播对水稻产量的影响, 因直播方式^[23]、水肥管理^[24]、播种密度^[25]等因素的影响结果并不一致。前人研究表明, 适宜的直播方式能够提高机直播稻产量、协调产量构成

因子从而获得高产^[26]。出苗率一直是制约直播稻高产稳产的首要因子, 直接影响植株的群体起点。本研究表明与湿直播方式或淹水直播方式相比, 旱直播方式有利于提高优质晚籼稻出苗率。这可能由于旱直播方式下, 种子播种后处于疏松通透的土壤环境中, 土壤氧化还原电位低, 土壤氧气比较充足, 能促使种子萌发和秧苗的快速生长, 而淹水直播方式种子萌发时在淹水条件下, 处于低氧胁迫环境, 加之晚稻播后高温天气容易导致烂种烧苗现象, 降低晚稻出苗率^[27, 28]。研究指出机直播方式提高了水稻干物质积累、叶面积指数及倒伏特性, 促进了结实率、千粒重及产量的提高^[29]。本研究进一步表明机械旱直播方式具有类似的作用。旱直播方式下供试品种产量的显著增加主要得益于有效穗数的提高。这是因为前期适度干旱有效控制了水稻无效分蘖的发生, 有利于提高植株的分蘖成穗^[30]。值得一提的是, 旱直播方式下优质晚籼稻能否实现优质丰产的协同增效, 还有待于对稻米品质进一步研究。

3.2 不同机直播方式对南方优质晚籼稻倒伏特性的影响

倒伏是影响水稻优质高产的重要限制因子^[31]。在水肥管理、生育敏感期遭遇不利气候环境会引起倒伏或加重倒伏程度, 收割难度加大, 导致水稻产量降低^[32]。优质稻茎秆普遍较细弱、叶片狭长, 生产中容易倒伏。旱直播处理采用干湿交替灌溉可为植株粗壮生长提供充足的氧气环境, 有利于水稻根系的生长, 提高植株抗倒伏能力^[33]。本研究结果与其相似, 机械旱直播方式提高了植株基部节间茎粗、茎壁厚和秆型指数, 同时增强了茎秆的抗折力, 降低倒伏指数, 说明机械旱直播方式有利于植株塑造良好的株型, 可为生产中优质稻抗倒调优栽培提供途径。同时, 水稻倒伏不仅与机直播方式、自身特性等因素有关, 还受外界天气的影响^[34-36]。而抗折力和倒伏指数等指标可用来评价水稻倒伏的风险。本研究条件下, 尽管不同机直播方式植株抗倒伏能力存在差异, 但田间各处理未见明显倒伏, 可能与抽穗后天气状况有关。

3.3 优质晚籼稻机械化直播优质丰产栽培途径

水稻机直播受机械、生态环境及土壤条件等因素影响, 对于其配套的高产栽培技术要求较高。优质稻机直播要实现优质高产, 首先是要高产, 而倒伏是影响直播稻产量的重要因素, 这需要相关栽培措施的跟进。精细整地、选用适合直播的高产优质品种、生态有效的病虫害防治技术、合理的肥水管理等措施都是机直播高产栽培的重要因素。本研究

发现在南方双季稻区优质晚籼稻进行旱直播处理要优于湿直播和淹水直播, 有利于提高晚稻产量, 同时, 优质晚籼稻机直播种植时, 也应注意种子出苗问题, 一播全苗是水稻机直播成功与否的关键。机直播作业时, 前期需做到精细化整地。机械淹水直播若整地质量达不到要求, 淹水后水层深浅不一, 加之晚稻直播后温度较高, 且光照强度较大^[37], 易造成烂种烂芽, 从而降低出苗率, 影响植株的全苗壮苗, 不利于直播稻产量提升、生产中也可通过选用耐淹性优质品种来增加水稻产量。机械旱直播整地越平、齐, 越有利于全苗、齐苗, 否则会造成旱苗^[38]。此外, 机械旱直播方式需使土壤含水量保持 40%~50%, 避免田块过于干旱, 以提高出苗率。本研究表明采用机械化旱直播处理可提高优质晚籼稻植株的抗倒伏能力, 增加其稳产性。选用具有抗倒能力及抗旱性强的优质稻品种并采用精量定穴直播机进行直播, 可实现轻简有序种植, 使直播稻抗倒伏能力大大增强, 同时在辅以化控技术的基础上, 如在直播稻拔节前喷施多效唑、猛发兜等生长调节物质, 可降低植株基部节间长度和株高, 显著增加植株茎秆强度, 提高植株抗倒伏能力, 实现优质稻直播产量的提升。

4 结论

机械旱直播有利于提高南方优质晚籼稻供试品种的出苗率, 增幅为 6.10%~22.96%; 旱直播处理干物质生产和叶面积指数均高于湿直播与淹水直播; 机械旱直播增加供试品种优质晚籼稻产量, 两品种增产幅度达 6.99%~27.77%, 主要得益于单位面积有效穗的提高。此外, 旱直播处理有利于提高茎秆抗折力和秆型指数, 降低株高、基部节间长度、弯曲力矩与倒伏指数, 有利于茎秆粗壮和增加茎壁厚度。茎粗、壁厚和秆型指数与抗折力显著正相关, 与倒伏指数显著负相关。株高、穗长、弯曲力矩与抗折力显著负相关, 与倒伏指数显著正相关。综上分析, 机械旱直播不仅有利于增加晚籼稻产量, 还有利于提高南方优质晚籼稻的抗倒伏能力。

参考文献:

- [1] Farooq M, Siddique K H M, Rehman H, Aziz T, Lee D J, Wahid A. Rice direct seeding: Experiences, challenges and opportunities[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011,

- 111(2): 87-98.
- [2] Chauhan B S, Opeña J. Effect of tillage systems and herbicides on weed emergence, weed growth, and grain yield in dry-seeded rice systems[J]. *Field Crops Research*, 2012, 137:56-69.
- [3] 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[J]. *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[J]. *Transactions of the Chinese society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(12): 52-56. (in Chinese with English abstract)
- [4] 徐莹莹, 刘玉涛, 王俊河, 王宇先, 高盼, 杨慧莹, 樊景胜. 水稻旱直播研究现状及发展前景[J]. *黑龙江农业科学*, 2018 (6): 150-152.
Xu Y Y, Liu Y T, Wang J H, Wang Y X, Gao P, Yang H Y, Fan J S. Research status and development prospect of rice direct seeding in dry land[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2018(6): 150-152. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王文霞, 曾研华, 曾勇军, 梁喜欢, 谭雪明, 石庆华, 潘晓华. 不同直播方式对南方稻田杂草发生及早籼稻产量的影响[J]. *核农学报*, 2018, 32(3): 555-560.
Wang W X, Zeng Y H, Zeng Y J, Liang X H, Tan X M, Shi Q H, Pan X H. Effects of different direct seeding methods on weed occurrence in paddy field and grain yield of early season indica rice in South of China[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2018, 32(3): 555-560. (in Chinese with English abstract)
- [6] 杨仕华, 程本义, 沈伟峰, 廖西元. 我国长江流域籼稻品种选育进展及改良策略[J]. *中国水稻科学*, 2004, 18(2): 89-93.
Yang S H, Cheng B Y, Shen W F, Liao X Y. Progress and Strategy of the improvement of indica rice varieties in the Yangtse Valley of China[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2004, 18(2): 89-93. (in Chinese with English abstract)
- [7] 赖穗春, 河野元信, 王志东, 三上隆司, 黄道强, 李宏, 卢德城, 周德贵, 周少川. 米饭食味计评价华南籼稻食味品质[J]. *中国水稻科学*, 2011, 25(04): 435-438.
Lai S C, Kawano M, Wang Z D, Mikami T, Huang D Q, Li H, Lu D C, Zhou D G, Zhou S C. Cooking and eating quality of indica rice varieties from South China by using rice taste analyzer[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2011, 25(04): 435-438. (in Chinese with English abstract)
- [8] 雷小龙, 刘利, 刘波, 黄光忠, 马荣朝, 任万军. 杂交籼稻 F 优 498 机械化种植的茎秆理化性状与抗倒伏性[J]. *中国水稻科学*, 2014, 28(6): 612-620.
Lei X L, Liu L, Liu B, Huang G Z, Ma R C, Ren W J. Physical and chemical characteristics and lodging resistance of culm of indica hybrid rice F you 498 under mechanical planting[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2014, 28(6): 612-620. (in Chinese with English abstract)
- [9] 赵新勇, 邵在胜, 吴艳珍, 赵轶鹏, 王余龙, 王云霞, 杨连新. 花后人为模拟倒伏对超级稻生长、产量和品质的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(7): 48-57.
Zhao X Y, Shao Z S, Wu Y Z, Zhao Y P, Wang Y L, Wang Y X, Yang L X. Influence of artificial lodging at grain-filling stage on plant growth, yield and quality of super rice[J]. *Chinese Journal of Ecological Agriculture*, 2018, 26(7): 48-57. (in Chinese with English abstract)
- [10] 赖上坤, 陈春, 赖尚科, 王磊, 陈卫军. 水稻主要农艺性状和抗倒性的基因型差异及其相互关系[J]. *核农学报*, 2018, 32(7): 14-24.
Lai S K, Chen C, Lai S K, Wang L, Chen W J. Genotypic Differences and Correlations between rice main agronomic traits and lodging-resistance[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2018, 32(7): 14-24. (in Chinese with English abstract)
- [11] 丁明亮, 苏振喜, 邹茜, 朱振华, 袁平荣, 陈于敏, 刘慰华, 陆树刚, 戴陆园. 高原粳稻抗倒性与农艺性状及亲本抗倒性的关系[J]. *中国水稻科学*, 2012, 26(03): 325-330.
Ding M L, Su Z X, Zou Q, Zhu Z H, Yuan P R, Chen Y M, Liu W H, Lu S G, Dai L Y. Relationship Between lodging resistance and either agronomic traits or parents' lodging resistance in plateau japonica rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2012, 26(3): 325-330. (in Chinese with English abstract)
- [12] 孙加威, 李娜, 王春雨, 赵建红, 张绍文, 蒋明金, 孙永健, 马均. 栽插方式和施钾量对杂交籼稻抗倒伏能力的影响[J]. *核农学报*, 2017, 31(12): 2408-2417.
Sun J W, Li N, Wang C Y, Zhao J H, Zhang S W, Jiang M J, Sun Y J, Ma J. Effects of transplanting methods and potassium rates on lodging resistance of hybrid rice[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(12): 2408-2417. (in Chinese with English abstract)
- [13] 申广勤, 石英尧, 黄艳玲, 石扬娟, 王维刚, 张从合, 陈多璞. 水稻抗倒伏特性及其与茎秆性状的相关性研究[J]. *中国农学通报*, 2007, 23(12): 58-62.
Shen G L, Shi Y Y, Huang Y L, Shi Y J, Wang W G, Zhang C H, Chen D P. Study on rice lodging resistance character and correlation between the culm traits and lodging resistance traits[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(12): 58-62. (in Chinese with English abstract)
- [14] 杨志远, 孙永健, 徐徽, 秦俭, 贾现文, 马均. 不同栽培方式对免耕水稻茎鞘物质积累转运与抗倒伏能力的影响[J]. *中国水稻科学*, 2013, 27(5): 511-519.
Yang Z Y, Sun Y J, Xu H, Qin J, Jia X W, Ma J. Effects of different cultivation methods on accumulation and transformation of assimilation products and lodging resistance of stem-sheaths of no-tillage rice[J]. *Chinese*

- Journal of Rice Science*, 2013, 27(5): 511-519. (in Chinese with English abstract)
- [15] 雷小龙, 刘利, 刘波, 黄光忠, 郭翔, 马荣朝, 任万军. 机械化种植对杂交籼稻 F 优 498 产量构成与株型特征的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(4): 719-730.
Lei X L, Liu L, Liu B, Huang G Z, Guo X, Ma R C, Ren W J. Effects of mechanized planting methods on yield components and plant type characteristics of indica hybrid rice Fyou 498[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(4): 719-730. (in Chinese with English abstract)
- [16] Ishimaru K, Togawa E, Ookawa T, Kashiwagi T, Madoka Y, Hirotsu N. New target for rice lodging resistance and its effect in a typhoon[J]. *Planta*, 2008, 227 (3): 601-609.
- [17] 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穗型水稻品种产量、株型和抗倒伏能力的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(05): 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[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(05): 743-757. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张俊, 李刚华, 宋云攀, 张巫军, 杨从党, 王绍华, 丁艳锋. 超级稻 Y 两优 2 号在两生态区的抗倒性分析[J]. 作物学报, 2013, 39(4): 682-692.
Zhang J, Li G, Song Y P, Zhang W J, Yang C D, Wang S H, Ding Y F. Lodging resistance of super-hybrid rice Y Liangyou 2 in two ecological regions[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(4): 682-692. (in Chinese with English abstract)
- [19] Ookawa T. Varietal difference of physical characteristics of the culm related to lodging resistance in paddy rice[J]. *Japanese Journal of Crop Science*, 2008, 61(3): 419-425.
- [20] Islam M S, Peng S, Visperas R M, Ereful N, UddinBhuiya M S, Julfikar A W. Lodging-related morphological traits of hybrid rice in a tropical irrigated ecosystem[J]. *Field Crops Research*, 2007, 101(2): 240-248.
- [21] Wang D, Chen S, Wang Z, Ji C, Xu C, Zhang X, Chauhan B S. Optimizing hill seeding density for high-yielding hybrid rice in a single rice cropping system in South China[J]. *PLoS ONE*, 2014, 9(10), e109417.
- [22] 郭长春, 孙知白, 孙永健, 殷尧翥, 武云霞, 唐源, 杨志远, 向开宏, 马均. 优质丰产杂交籼稻品种机直播产量构成及其群体质量研究[J]. 中国水稻科学, 2018, 32(5): 462-474.
Guo C C, Sun Z B, Sun Y J, Yin Y Z, Wu Y X, Tang Y, Yang Z Y, Xiang K H, Ma J. Study on yield formation and population quality of indica hybrid rice with good quality and high yield under mechanical direct seeding[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2018, 32(05): 462-474. (in Chinese with English abstract)
- [23] 张耗, 余超, 陈可伟, 孔祥胜, 刘海浪, 陈俊义, 顾骏飞, 刘立军, 王志琴, 杨建昌. 直播方式对水稻生理性状和产量的影响及其成本分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 58-64.
Zhang H, Yu C, Chen K W, Kong X S, Liu H L, Chen J Y, Gu J F, Liu L J, Wang Z Q, Yang J C. Effect of direct-seeding methods on physiological characteristics and grain yield of rice and its cost analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(13): 58-64. (in Chinese with English abstract)
- [24] 许炜, 孙志贵, 田贺培, 张运波, 卢碧林. 播种和施肥方式对直播稻分蘖特性和产量的影响[J]. 华中农业大学学报, 2018, 37(3):1-9.
Xu W, Sun Z G, Tian H P, Zhang Y B, Lu B L. Effects of sowing and fertilization on tiller characteristics and yield of direct-seeded rice[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2018, 37(3):1-9. (in Chinese with English abstract)
- [25] 殷春渊, 王书玉, 刘贺梅, 孙建权, 胡秀明, 王和乐, 田芳慧, 王玲燕. 播量和施氮量对直播稻产量和品质的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(20): 1-6.
Yin C Y, Wang S Y, Liu H M, Sun J Q, Hu X M, Wang H L, Tian F H, Wang L. Sowing amounts and nitrogen application levels affect yield and quality of direct sowing rice[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(20): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [26] 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. 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[J]. 中国农业科学, 2019, 52(15): 2729-2742.
Yi Y H, Wang W X, Zeng Y J, Tan X M, Wu Z M, Chen Xi F, Pan X H, Shi Q H, Zeng Y H. Artificial simulation of hill-drop drilling mechanical technology to improve yield and lodging resistance of early season indica rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(15): 2729-2742. (in Chinese with English abstract)
- [27] 信彩云, 周学标, 刘奇华, 赵庆雷, 王瑜, 马加清. 不同直播方式对水稻出苗状况的影响[J]. 山东农业科学, 2017, 49(3): 69-72.
Xin C Y, Zhou X B, Liu Q H, Zhao Q L, Wang Y, Ma J Q. Effects of direct seeding models on seedling emergence of rice[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2017, 49(3): 69-72. (in Chinese with English abstract)
- [28] 孙凯, 李冬秀, 杨靖, 董骥驰, 严贤诚, 罗立新, 刘永柱, 肖武名, 王慧, 陈志强, 郭涛. 水稻耐淹成苗率相关性状全基因组的关联分析[J]. 中国农业科学, 2019, 52(3): 385-398.
Sun K, Li D X, Yang J, Dong J C, Yan X C, Luo L X, Liu

- Y Z, Xiao W M, Wang H, Chen Z Q, Guo T. Genome-wide association analysis for rice submergence seedling rate[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(03): 385-398. (in Chinese with English abstract)
- [29] 孙永健, 郑洪帆, 徐徽, 杨志远, 贾现文, 程洪彪, 马均. 机械旱直播方式促进水稻生长发育提高产量[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 10-18.
Sun Y J, Zheng H Z, Xu H, Yang Z Y, Jia X W, Cheng H B, Ma J. Mechanical dry direct-sowing modes improving growth, development and yield of rice[J]. *Transactions of the Chinese society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(20): 10-18. (in Chinese with English abstract)
- [30] 王建飞. 辽宁水稻机械旱直播高产栽培模式研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
Wang J F. Research on the high yield cultivation model of mechanical dry direct seeding rice in Liaoning[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [31] Setter T L, Laureles E V, Mazaredo A M. Lodging reduces yield of rice by self-shading and reductions in canopy photosynthesis[J]. *Field Crops Research*, 1997, 49(2-3):95-106.
- [32] 韦叶娜, 杨国涛, 范永义, 范存留, 赵祥, 敬银钦, 罗红梅, 胡运高, 彭友林. 不同肥料处理对‘II优 725’茎秆物理性状的影响[J]. 中国农学通报, 2016, 32(9): 15-19.
Wei Y N, Yang G T, Fan Y Y, Fan C L, Zhao X, Jing Y Q, Luo H M, Hu Y G, Peng Y L. Stalk physical properties of hybrid rice II You 725 under different fertilizer treatments[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(9): 15-19. (in Chinese with English abstract)
- [33] 王振昌, 郭相平, 杨静晗, 陈盛, 黄双双, 王甫, 邱让建, 刘春伟, 操信春, 朱建彬, 高雅娴. 旱涝交替胁迫对水稻干物质生产分配及倒伏性状的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 114-123.
Wang Z C, Guo X P, Yang J H, Chen S, Huang S S, Wang F, Qiu R J, Liu C W, Cao X C, Zhu J B, Gao Y X. Effect of alternate flooding and drought stress on biomass production, distribution and lodging characteristic of rice[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(24): 114-123. (in Chinese with English abstract)
- [34] 刘畅, 李来庚. 水稻抗倒伏性状的分子机理研究进展[J]. 中国水稻科学, 2016, 30(2): 216-222.
Liu C, Li L G. Advances in molecular understanding of rice lodging resistance[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2016, 30(2): 216-222. (in Chinese with English abstract)
- [35] 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[J]. 作物学报, 2015, 41(11): 1767-1776.
Xu J W, Meng T Y, Jing P P, Zhang H C, Li Chao, Dai Q G, Wei H Y, Guo B W. Effect of mechanical-transplanting density on lodging resistance and yield in different types of rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(11): 1767-1776. (in Chinese with English abstract)
- [36] 许钊, 唐磊, 郭保卫, 张洪程, 霍中洋, 戴其根, 魏海燕. 不同水直播方式水稻植株抗倒特性研究[J]. 华北农学报, 2014, 29(6): 226-232.
Xu Ke, 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 with English abstract)
- [37] 吕伟生, 曾勇军, 石庆华, 潘晓华, 黄山, 商庆银, 谭雪明, 李木英, 胡水秀, 曾研华. 近30年江西双季稻安全生长期及温光资源变化[J]. 中国水稻科学, 2016, 30(03): 323-334.
Lu W S, Zeng Y J, Shi Q H, Pan X H, Huang S, Shang Q Y, Tan X M, Li M Y, Hu S X, Zeng Y H. Changes in safe production dates and heat-light resources of double cropping rice in Jiangxi Province in recent 30 years. *Chinese Journal of Rice Science*, 2016, 30(03): 323-334. (in Chinese with English abstract)
- [38] 邱东峰, 张再君, 杨金松. 水稻两优 0328 旱直播栽培技术初探[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(20): 3817-3818.
Qiu D F, Zhang Z J, Yang J S. Preliminary study on cultivation techniques of direct seeding rice Liangyou 0328. *Hubei Agricultural Sciences*, 2017, 56(20): 3817-3818. (in Chinese with English abstract)