

文章编号:1000-8551(2020)02-0383-09

旱直播提高南方早稻产量及抗倒伏性状

王文霞 易艳红 周燕芝 谭雪明 曾勇军 石庆华 潘晓华 曾研华*

(江西农业大学双季稻现代化生产协同创新中心/作物生理生态与遗传育种教育部重点实验室/

江西省作物生理生态与遗传育种重点实验室,江西 南昌 330045)

摘要:为探究南方稻区旱直播对早稻茎秆倒伏能力及产量的影响,本试验以早稻品种早优 73 和沪优 2 号为材料,进行不同直播方式大田晚稻试验,共设置 3 个处理:旱直播(DDS)、湿直播(WDS)和淹水直播(FDS),系统比较 3 种直播方式下早稻的产量、产量构成及抗倒伏特性。结果表明,与 WDS 和 FDS 相比,DDS 可提高早稻供试品种的出苗率,增幅为 6.57%~23.29%,且处理间差异达显著水平($P<0.05$)。同时,DDS 有利于提高供试品种早稻产量,两品种增产幅度为 7.89%~22.21%,其中沪优 2 号产量较早优 73 增加 3.87%。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的提高。此外,DDS 有利于提高供试品种茎秆抗折力和秆型指数,降低弯曲力矩与倒伏指数,株高与基部节间较短,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呈显著或极显著正相关,与倒伏指数呈极显著负相关。株高和弯曲力矩与抗折力呈极显著负相关,与倒伏指数呈极显著正相关。上述结果表明,采用 DDS 种植方式不仅有利于提高早稻产量,而且可明显提高植株抗倒伏能力,降低倒伏风险,可在生产中推广使用。本研究结果为南方稻区早稻品种直播高产稳产栽培提供了理论依据。

关键词:旱直播;早稻品种;产量形成;倒伏

DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2020.02.0383

随着农村劳动力成本的提高及规模化经营的发展,直播种植方式受到稻农的欢迎和采纳,推广应用面积日益增大^[1-2]。早稻是指在干旱条件下完成其生长发育过程的栽培品种^[3],具有节水抗旱及高效利用自然雨水的功能,在适度干旱条件下可保持其正常生理功能,实现早播早管、增产高效^[4]。旱直播因节水、省工、节能、减排明显、增产增效等优势而被称为极具推广价值的种植方式之一^[5-6]。随着直播稻的大面积推广应用,南方双季稻区晚稻也出现了较大面积的直播^[7]。然而倒伏是制约直播稻高产稳产的重要因素^[8],研究旱直播方式对早稻茎秆抗倒伏能力及产量的影响,对于促进南方稻区早稻直播生产具有重要意义。直播稻倒伏受品种类型、栽培方式、水分管理等因素的影响。淹水直播稻田中,倒伏较为严重,使得产量和稻米品质降低。张耗等^[9]研究表明,与常规灌溉相比,在旱直播条件下早稻品种能获得较高的产量和水

分利用效率,具有较好的根系性能,地上部植株的生理活性也较强。前人研究表明,水稻株高、节间长度、茎粗、茎壁厚均与抗倒伏性密切相关^[10-12],其中倒伏指数与倒伏能力呈负相关,倒伏指数越大,抗倒伏能力越弱。此外,倒伏还与外界环境、品种选择等因素密切相关^[13-14]。关于早稻直播的研究主要集中在栽培措施、生理特性及根系分布等方面^[15-16],而对不同直播方式下系统探讨早稻产量变化与抗倒伏能力的研究较少,且前人的研究对象主要以一季中稻为主,而对晚稻直播的研究较少。本研究以早稻品种沪优 2 号和早优 73 为试验材料,采用人工模拟机械穴直播的种植方式,在大田开展旱直播、湿直播与淹水直播的比较试验,系统研究不同直播方式下早稻出苗率、抗倒伏性状及产量形成的变化特征,以期早稻品种在南方稻区同步实现高产和抗倒提供理论依据。

收稿日期:2019-05-21 接受日期:2019-07-19

基金项目:国家自然科学基金项目(31760366),国家重点研发计划(2016YFD0300501、2017YFND0301605),江西省重点研发计划项目(20171BBF60030),江西省研究生创新专项资金项目(YC2017-S178)

作者简介:王文霞,女,主要从事水稻栽培理论与技术研究。E-mail:15797688640@163.com

* 通讯作者:曾研华,男,副教授,主要从事水稻栽培理论与技术研究。E-mail:zyh74049501@163.com

1 材料与方 法

1.1 试验材料与试验地概况

于 2017–2018 年在江西农业大学科技园 (115°49′53″E、28°46′8″N) 进行大田试验, 供试品种为早稻早优 73 和沪优 2 号, 均由上海市农业生物基因中心提供, 早优 73 与沪优 2 号品种全生育期分别为 123 和 115 d。试验田前茬为双季早稻, 土壤肥力中等。试验前耕层土壤 (0~20 cm) 基本理化性质为有机质 30.35 g·kg⁻¹、全氮 2.40 g·kg⁻¹、速效磷 25.17 mg·kg⁻¹、速效钾 84.02 mg·kg⁻¹, pH 值 6.1。

1.2 试验设计与田间管理

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 (dry direct seeded, DDS), 采用早耕早整早播的方式, 种子于田间干旱条件下直播, 播后用细土覆盖, 两叶一心期前间歇灌溉, 保持土壤湿润, 后期稻田水分管理采用间歇灌溉方式; 湿直播 (wet direct seeded, WDS), 采用水耕水整湿播的方式, 种子于田面湿润无积水状态下直播, 两叶一心期前田间保持湿润状态, 后期稻田水分管理采用间歇灌溉方式; 淹水直播 (flooded direct seeded, FDS), 采用水耕水整水播的方式, 种子于田面淹水达 2~3 cm 深度的水层进行直播, 两叶一心期前保持 2~3 cm 水层, 后期稻田水分管理采用间歇灌溉方式, 直至成熟。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 2017 年 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·hm⁻², 其中基肥: 分蘖肥: 穗肥 = 4:2:4; 钾肥 (K₂O) 施用量为 170 kg·hm⁻², 其中分蘖肥: 穗肥 = 7:3, 磷肥 (P₂O₅) 施用量为 90 kg·hm⁻², 全部作为基肥。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, 四叶期喷施除草剂精克草星 (美丰农化有限公司)。

1.3 测定项目与方法

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 蔸水稻的有效穗数。按平均有效穗数选取考种样, 每小区分别取样 3 蔸, 调查每穗粒数、结实率及千粒重。每小区选取 5 m² 水稻进行实际测产。

1.3.2 出苗率 于直播后 15 d, 以一叶一心为出苗标准, 调查出苗数。按照公式计算出苗率:

$$\text{出苗率} = \text{出苗数} / \text{播种粒数} \times 100\% \quad (1)$$

1.3.3 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 蔸, 每蔸取 1 个主茎, 共 10 个主茎, 作为 1 个样本, 3 次重复^[17], 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 (浙江托普云农科技股份有限公司) 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。按照公式计算各参数^[18-19]:

$$\text{茎粗 (mm)} = (\text{长轴外径} + \text{短轴外径}) / 2 \quad (1)$$

$$\text{茎壁厚 (mm)} = \text{轴外径} - \text{轴内径} \quad (2)$$

$$\text{弯曲力矩 (g} \cdot \text{cm)} = \text{节间基部至穗顶长度 (cm)} \times \text{该节间基部至穗顶鲜重 (g)} \quad (3)$$

$$\text{倒伏指数} = \text{弯曲力矩 (g} \cdot \text{cm)} / \text{折断弯矩 (g} \cdot \text{cm)} \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{秆型指数} = \text{茎秆外径 (长短径的平均值, cm)} / \text{秆长 (cm)} \times 100\% \quad (5)$$

1.4 数据分析

采用 Microsoft Office Excel 2010 和 DPS 7.5 等软件进行分析, 采用 LSD 法进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 旱直播方式对早稻产量及产量构成的影响

由表 1 可知, 除品种对产量的影响不显著外, 品种对产量构成因素以及直播方式对产量及其构成因素的影响均达显著或极显著水平; 年份、年份与品种的互作效应对千粒重的影响均达到显著水平。不同直播方式下, DDS 早稻产量最高, 其次为 WDS, 而 FDS 产量最低, 且与 DDS 差异显著, 年度间趋势一致。DDS 较 WDS 和 FDS 增产 7.89%~22.21%, 各直播方式下, 沪优 2 号的产量高于早优 73, 平均增幅为 3.87%。从产量构成因素来看, 两年数据结果表明 DDS 两品种有效穗数均要高于 WDS 和 FDS, 且与 FDS 差异显著, 但结实率与千粒重低于 WDS 和 FDS, 且结实率较 FDS 差异显著, 而每穗粒数各处理间差异不明显, 说明 DDS 产量的提高得益于有效穗数的增加。

2.2 旱直播方式对早稻出苗率的影响

由表 2 可知, 直播早稻品种的两年来 (2017–2018) 出苗率均呈 DDS>WDS>FDS 的趋势, 且差异均达显著水平; 与 WDS 和 FDS 相比, DDS 早优 73 两年出苗率增幅分别为 6.57%~7.20%、20.91%~23.29%, 沪优 2 号增幅为 9.64%~10.49%、19.05%~21.90%, 可见 DDS 有利于提高早稻品种の出苗率。

表 1 旱直播方式对早稻产量及其构成因素的影响

Table 1 Effects of dry direct seeded pattern on the yield and yield components of upland rice

年份 Years	品种 Varieties	处理 Treatments	有效穗 Effective panicles /($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	每穗粒数 Grains per panicle	结实率 Seed setting rate/%	千粒重 1000-grain weight/g	产量 Actual yield /($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	
2017	旱优 73 Hanyou 73	DDS	340.0a	117.7a	74.2b	25.2b	6.83a	
		WDS	310.0ab	119.0a	77.3ab	26.0ab	6.43ab	
		FDS	264.1b	120.9a	80.0a	26.7a	5.57b	
	沪优 2 号 Huyou 2	DDS	350.0a	120.8a	74.9c	27.0b	7.07a	
		WDS	340.0a	123.5a	79.49b	28.4ab	6.53b	
		FDS	281.2b	128.8a	82.1a	29.8a	5.60c	
2018	旱优 73 Hanyou 73	DDS	353.4a	118.4a	74.3c	26.2c	7.10a	
		WDS	312.4ab	119.3a	77.8b	26.9b	6.20b	
		FDS	268.3b	121.2a	80.6a	27.5a	5.87b	
	沪优 2 号 Huyou 2	DDS	364.6a	121.1b	75.7c	27.5b	7.20a	
		WDS	351.2a	123.8b	79.2b	28.2ab	7.02a	
		FDS	283.0b	129.7a	82.6a	29.4a	6.05b	
		Y		1.82	0.14	1.06	4.51*	2.19
		V		11.90**	17.10**	16.45*	87.39**	2.40
		T		61.42**	6.960**	88.67**	26.66**	22.26**
		Y×V		0.05	0.00	0.00	4.92*	0.60
		Y×T		0.30	0.01	0.11	0.54	0.22
		V×T		1.50	1.57	0.50	1.87	0.47
		Y×V×T		0.08	0.01	0.28	0.21	0.63

注:不同小写字母表示同一品种不同处理间差异显著($P < 0.05$);*和**分别表示在0.05和0.01水平上影响显著。Y表示年份;V表示品种;T表示直播方式。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among treatments of the same variety at 0.05 level. * and ** indicate significant difference at 0.05 and 0.01 level, respectively. Y: Years. V: Varieties. T: Direct seeded pattern. The same as following.

表 2 旱直播方式对早稻出苗率的影响

Table 2 Effects of dry direct seeded pattern on emergence rate of upland rice /%

年份 Years	品种 Varieties		
	处理 Treatments	旱优 73 Hanyou 73	沪优 2 号 Huyou 2
2017	DDS	73.00a	76.79a
	WDS	68.50b	69.50b
	FDS	59.21c	64.50c
	平均 Average	69.90	70.26
2018	DDS	74.01a	76.80a
	WDS	69.04b	70.05b
	FDS	61.21c	63.00c
	平均 Average	68.09	69.95

2.3 旱直播对茎秆抗倒伏能力的影响

2.3.1 茎秆形态 由表 3 可知,年份、品种和直播方式对早稻株高、穗长、各节间长度的影响均达到极显著水

平,年份和品种互作效应对各节间长度的影响达极显著水平,年份和直播方式互作效应对第三节间的影响达到极显著水平。不同直播方式下,供试品种两年株高和穗长均表现为 $DDS < WDS < FDS$,且沪优 2 号品种株高各处理间差异显著,穗长指标 DDS 与 FDS 差异显著;DDS 各节间长度均不同程度的低于 DDS 与 FDS,且第二、三节间长度分别与 FDS 差异显著,而第一节间各处理差异不明显(2018 年沪优 2 号品种除外)。

2.3.2 茎秆力学特性 由表 4 可知,品种与直播方式对茎粗、壁厚和秆型指数的影响均达极显著水平,年份对秆型指数的影响达极显著水平,年份和品种互作效应对茎粗、秆型指数的影响达显著水平。不同直播方式下,供试品种两年茎粗、壁厚和秆型指数均表现为 $DDS > WDS > FDS$,且 DDS 与 FDS 茎粗指标差异达显著水平;壁厚于 2017 年各处理差异不明显,而 2018 年 DDS 与 FDS 差异达显著水平;秆型指数各处理间差异显著,表明 DDS 有利于改善基部节间茎秆特征。

表 3 旱直播方式对主茎形态的影响

Table 3 Effects of dry direct seeded patterns on main stem morphology

年份 Years	品种 Varieties	处理 Treatments	株高 Plant height /cm	穗长 Panicle length /cm	各节间长度 Internodes length/cm		
					N1	N2	N3
2017	旱优 73 Hanyou 73	DDS	103.44a	24.22b	6.16a	8.50a	14.20b
		WDS	104.10a	25.34ab	6.41a	9.10a	15.64ab
		FDS	106.52a	25.81a	6.52a	9.72a	17.00a
	沪优 2 号 Huyou 2	DDS	112.66c	22.79b	6.27a	9.23b	14.29b
		WDS	117.31b	23.73a	6.53a	9.65a	15.67ab
		FDS	119.97a	23.92a	6.82a	10.10a	17.22a
2018	旱优 73 Hanyou 73	DDS	105.17c	25.18a	6.17a	9.63a	16.12b
		WDS	106.72b	25.41a	6.27a	9.87a	17.06ab
		FDS	109.69a	26.91a	6.66a	10.28a	17.43a
	沪优 2 号 Huyou 2	DDS	114.32c	23.22c	6.40b	9.01b	16.97b
		WDS	117.31b	23.68b	7.23ab	9.55b	18.07a
		FDS	121.59a	24.41a	7.62a	10.50a	18.22a
		Y	17.02**	14.52**	10.14**	14.40**	200.51**
		V	665.24**	199.19**	27.08**	20.00**	18.60**
		T	54.06**	38.64**	19.48**	30.21**	107.85**
		Y×V	2.61	2.56	9.90**	12.64**	11.03**
		Y×T	0.53	3.54	1.81	0.16	16.92**
		V×T	5.87*	1.71	2.69	0.45	0.01
	Y×V×T	0.72	0.34	1.59	2.43	0.26	

注: N1: 第一节间; N2: 第二节间; N3: 第三节间。

Note: N1: First internode; N2: Second internode. N3: Third internode.

表 4 旱直播方式对基部节间茎秆特征的影响

Table 4 Effects of dry direct seeded pattern on basal internode stem characteristics

年份 Years	品种 Varieties	处理 Treatments	茎粗	壁厚	秆型指数
			Diameter of stem /mm	Stem wall thickness /mm	Culm phenotype index /%
2017	旱优 73 Hanyou 73	DDS	7.85a	3.72a	1.95a
		WDS	7.35ab	3.52a	1.84b
		FDS	6.98b	3.46a	1.72c
	沪优 2 号 Huyou 2	DDS	7.62a	3.59a	1.89a
		WDS	7.20ab	3.48a	1.78b
		FDS	6.92b	3.42a	1.61c
2018	旱优 73 Hanyou 73	DDS	7.73a	3.64a	1.88a
		WDS	7.45b	3.50ab	1.71b
		FDS	7.28b	3.49b	1.62c
	沪优 2 号 Huyou 2	DDS	7.50a	3.56a	1.83a
		WDS	7.00b	3.32b	1.69b
		FDS	6.82b	3.27b	1.60c

表 4(续)

年份 Years	品种 Varieties	处理 Treatments	茎粗 Diameter of stem /mm	壁厚 Stem wall thickness /mm	秆型指数 Culm phenotype index /%
	Y		0.24	4.07	62.47**
	V		30.66**	11.52**	25.14**
	T		69.02**	14.93**	217.14**
	Y×V		5.85*	1.76	6.07*
	Y×T		1.86	0.10	3.38
	V×T		0.18	0.03	0.38
	Y×V×T		1.68	1.10	1.50

由表 5 可知,年份、品种和直播方式对弯曲力矩、抗折力、倒伏指数影响均达极显著水平,年份与品种、年份与直播方式互作效应对抗折力和倒伏指数的影响分别达极显著和显著水平,品种与直播方式互作效应对弯曲力矩和倒伏指数的影响达极显著水平。不同直

播方式下,DDS 的弯曲力矩与倒伏指数均要低于 WDS 和 FDS,且与 FDS 差异显著;而抗折力指标 DDS 均高于 WDS 和 FDS,且与 FDS 差异总体达显著水平(2017 年早优 73 品种除外),说明 DDS 方式有利于改善基部茎秆力学特性,提高茎秆抗倒的能力。

表 5 旱直播方式对茎秆力学特性的影响

Table 5 Effect of dry direct seeded patterns on mechaiccs characteristic of stem

年份 Years	品种 Varieties	处理 Treatments	弯曲力矩 Bending weight/(g·cm)	抗折力 Break force/g	倒伏指数 Lodging index/%	
2017	旱优 73 Hanyou73	DDS	1 887.0c	2 180.4a	86.9b	
		WDS	2 284.4b	2 119.4a	109.2a	
		FDS	2 391.9a	2 105.1a	115.6a	
	沪优 2 号 Huyou 2	DDS	2 488.7b	2 028.6a	122.6c	
		WDS	2 618.4ab	1 993.0a	133.8b	
		FDS	2 711.6a	1 879.6b	143.5a	
2018	旱优 73 Hanyou73	DDS	1 918.5c	2 098.2a	91.8b	
		WDS	2 338.3b	1 989.4ab	117.9a	
		FDS	2 471.4a	1 845.9b	134.5a	
	沪优 2 号 Huyou 2	DDS	2 552.4b	2 064.3a	123.2c	
		WDS	2 662.4a	1 962.3ab	136.0b	
		FDS	2 704.4a	1 828.6b	150.1a	
		Y		21.60**	35.61**	32.55**
		V		2 274.28**	45.08**	466.90**
		T		6 74.24**	50.93**	215.30**
		Y×V		3.47	24.06**	11.35**
		Y×T		0.35	6.98*	5.74*
		V×T		143.57**	0.82	10.84**
	Y×V×T		2.72	1.35	1.25	

2.3.3 茎秆性状与抗倒伏特性的相关分析 由表 6 可知,茎秆性状指标与抗倒伏特性存在显著的相关性(除穗长与倒伏指数之间的相关性)。茎粗、壁厚和秆型指数与抗折力呈显著或极显著正相关,与倒伏指数呈极显著负相关。株高和弯曲力矩与抗折力呈极显著负相关,与倒伏指数呈极显著正相关。穗长与抗折力呈极显著负相关,但与倒伏指数的相关性不显著。表明不同直播方式下早稻品种茎秆的抗折力和倒伏指数受茎秆性状多个指标因素的影响。株高、茎粗、壁厚、弯曲力矩和秆型指数等均影响植株的抗折力和倒伏指数,这可能是 DDS 提高早稻植株抗倒伏的主要因素。

表 6 茎秆性状与抗折力和倒伏指数的相关系数($n=12$)

Table 6 Correlation coefficients between stem properties and breaking resistance and lodging index ($n=2$)

指标 Indexes	抗折力 Break force	倒伏指数 Lodging index
株高 Plant height	-0.739 **	0.884 **
穗长 Panicle length	-0.739 **	-0.164
茎粗 Diameter of stem	0.664 *	-0.820 **
壁厚 Stem wall thickness	0.740 **	-0.856 **
弯曲力矩 Bending weight	-0.738 **	0.963 **
秆型指数 Culm phenotype index	0.875 **	-0.826 **

注: * 和 ** 分别表示相关性在 0.05 ($R_{0.05} = 0.576$) 和 0.01 ($R_{0.01} = 0.707$) 水平达到显著和极显著。

Note: * and ** indicates the correlation was significant and extremely significant at 0.05 and 0.01 level ($R_{0.05} = 0.576$, $R_{0.01} = 0.707$), respectively.

3 讨论

3.1 旱直播对早稻生长发育及产量的影响

旱直播(DDS)是我国应用面积较广的节水栽培技术之一,具有显著的节水效果,但对水稻产量的影响,因土壤环境、温度、湿度和降雨量等因素不同而异^[20-21]。本研究基于早稻品种,探讨了不同直播方式对早稻产量的影响,结果表明,DDS 较 WDS 和 FDS 有利于提高出苗率,增加早稻秧苗全苗壮苗。DDS 由于在早稻收割后进行旱整地,土壤水分保持旱地模式,播种前采用深翻耕方式扰动土层,同时 DDS 田间土壤保持碎小,土层为疏松状态,增加土壤透气,有利于种子的发芽出苗^[22];而水直播由于长期建立水层,土壤通透性较差,且当早稻品种作晚稻种植时,种子出苗易受到高温气候的影响,降低种子的出苗成苗率^[23-24]。前人研究发现,直播稻出苗不易控制,严重影响产量^[25]。

实现全苗壮苗,是直播稻高产稳产的重要基础。研究表明,直播稻前期适度干旱可控制无效分蘖发生,提高有效穗数,增加水稻产量^[26-27]。本试验研究结果与其相似,DDS 可提高早稻产量,增幅达 5.42%~22.63%。与 WDS 和 FDS 相比,DDS 供试品种产量的增加,与其较高的有效穗数有关,而有效穗数的增加得益于 DDS 较好的分蘖成穗。这与孙永健等^[28]的研究结果较为一致。说明早稻品种在 DDS 种植方式下有利于群体质量的优化,增产优势明显。

3.2 旱直播对早稻抗倒伏的影响

直播种植过程中经常会发生不同程度的倒伏,导致稻谷产量和品质降低,收获困难,甚至造成绝收^[29-31]。前人研究发现,长期淹水状态会导致土壤中有毒还原性产物积累^[32],对根系的生长发育造成负面影响。适度干旱处理可有效改善土壤的氧化还原性,去除土壤中有毒还原性产物,有利于水稻根系的生长,提高植株抗倒伏性状^[33]。早稻品种具有节水抗旱等优点,但关于早稻在 DDS 种植方式下的抗倒伏特性研究较少^[34]。本研究发现,DDS 提高基部节间茎粗与茎壁厚,且品种间存在显著性差异,这可能与品种特性和外界环境条件有关。株高对水稻倒伏的影响存在争议,有研究认为株高增加,水稻更容易倒伏,也有极少数学者认为株高对水稻抗倒性影响较小,但株高过高将加大水稻倒伏的危险性^[35]。此外,水稻倒伏与茎秆节间性状密切相关,茎秆低位节间越长越易倒伏。本研究中,DDS 不同程度地降低株高和各节间长度,增加了秆型指数,且各品种趋势一致,这可能是 DDS 有利于植株生长前期的根系深扎,增加低位节间的茎秆充实度。说明 DDS 更加稳固地提高地上部植株的抗倒性,增强植株的抗倒能力。倒伏指数是评价水稻品种的抗倒伏能力^[19]的重要指标。本研究结果表明,与 WDS 和 FDS 相比,DDS 可提高基部节间抗折力,降低倒伏指数,说明 DDS 有利于优化地上部茎秆各茎节的生长,提高植株抗倒性能。相关分析还表明,株高、茎粗、壁厚、弯曲力矩和秆型指数等影响了植株的抗折力和倒伏指数,这可能是 DDS 提高早稻植株抗倒伏的主要因素。同时,水稻倒伏不仅与种植方式及其自身遗传特性有关,还与外界环境因素有关。本试验条件下,沪优 2 号在 FDS 和 WDS 均发生了倒伏,DDS 未见明显倒伏。因此,DDS 可提高早稻倒伏能力并获得高产稳产。

3.3 早稻直播的高产途径

随着全球气候变暖、水资源短缺以及稻作方式的转型,早稻种植面积不断上升,发展早稻直播生产具有

广阔的应用前景^[36]。开展旱稻直播技术研究对于旱稻直播的高产稳产具有重要意义。在旱稻直播生产中,需注意选择合理的直播方式,本研究发现在南方双季稻区,DDS 有利于增加旱稻出苗率,提高旱稻产量,同时,DDS 可提高植株的抗倒伏能力,在一定程度上增加了旱稻直播的稳产性。此外,旱稻作晚稻种植时,需注意种子发芽出苗问题,由于晚稻种植前期温度相对较高,且光照强度较大^[37],FDS 易导致烂种烂秧,影响种子出苗全苗,不利于秧苗的早生快发。而 DDS 土壤需保持适宜的含水量,避免过于干旱。同时,旱稻在采用 DDS 时,注意在杂草的防除过程中特别要做好旱生性杂草的防除工作,因为长期采用半旱作的种植方式,稻田会增加旱生性杂草的发生,导致旱稻田间杂草的防除难度增加。

4 结论

本研究结果表明,DDS 有利于提高旱稻供试品种的出苗率,增幅为 6.57%~23.29%;增加供试品种旱稻产量,两品种增产幅度达 5.42%~22.63%,其主要得益于单位面积有效穗数的提高;DDS 有利于提高供试品种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,茎粗、壁厚和秆型指数与抗折力呈显著或极显著正相关关系,与倒伏指数呈极显著负相关关系。株高和弯曲力矩与抗折力呈极显著负相关,与倒伏指数呈极显著正相关。本试验中,株高、茎粗、壁厚、弯曲力矩和秆型指数等均影响植株的抗折力和倒伏指数。综上所述,DDS 不仅有利于增加旱稻产量,而且有利于提高旱稻的抗倒伏能力。

参考文献:

- [1] Liu H Y, Hussain S, Zheng M M, Peng S B, Huang J L, Cui K H, Nie L X. Dry direct-seeded rice as an alternative to transplanted-flooded rice in Central China [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2015, 35(1): 285-294
- [2] Ohno H, Banayo N P M C, Bueno C, Kashiwagi J I, Nakashima T, Lwama K, Corales A M, Garcia R, Kato Y. On-farm assessment of a new early-maturing drought-tolerant rice cultivar for dry direct seeding in rainfed lowlands [J]. *Field Crops Research*, 2018, 219: 222-228
- [3] 李明寿,梅捍卫,刘国兰,张安宁,王飞名,李天菲,罗利军. 杂交节水抗旱稻新组合沪优 2 号的选育 [J]. *分子植物育种*, 2010, 8(6): 1177-1179
- [4] Chu G, Chen T T, Wang Z Q, Yang J C, Zhang J H. Reprint of "Morphological and physiological traits of roots and their relationships with water productivity in water-saving and drought-resistant rice" [J]. *Field Crops Research*, 2014, 165(6): 36-48
- [5] Zheng M M, Tao Y, Hussain S, Jiang Q W, Peng S B, Huang J L, Cui K H, Nie L X. Seed priming in dry direct-seeded rice: Consequences for emergence, seedling growth and associated metabolic events under drought stress [J]. *Plant Growth Regulation*, 2016, 78(2): 167-178
- [6] Ali A M, Thind H S, Sharma S, Singh V. Prediction of dry direct-seeded rice yields using chlorophyll meter, leaf color chart and GreenSeeker optical sensor in northwestern India [J]. *Field Crops Research*, 2014, 161(1385): 11-15
- [7] 刘利成,刘三雄,闵军,黎宇朝. 湖南地区早晚稻双季配套直播品种风险初探 [J]. *湖南农业科学*, 2018, 397(10): 34-36
- [8] Liang Y Z, Yang X D, Wang M E, Zhu Q S. Effects of lodging at different filling stages on rice yield and grain quality [J]. *Rice Science*, 2012, 19(4): 315-319
- [9] 张耗, 副成欣, 陈婷婷, 曹转勤, 王志琴, 杨建昌. 节水灌溉对节水抗旱水稻品种产量的影响及生理基础 [J]. *中国农业科学*, 2012, 45(23): 4782-4793
- [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伏性的基因型差异及其相互关系 [J]. *核农学报*, 2018, 32(7): 1256-1266
- [11] 刘立军, 王康君, 葛立立, 范苗苗, 张自常, 王志琴, 杨建昌. 旱种水稻基部节间性状与倒伏的关系及其生理机制 [J]. *作物学报*, 2012, 38(5): 848-856
- [12] 许娜, 王嘉宇, 李清, 杨贤莉, 刘遵奇, 荆彦辉, 徐正进. 每穴苗数对北方不同穗型梗稻物质生产和抗倒伏能力的影响 [J]. *作物学报*, 2014, 40(8): 1506-1512
- [13] 张大雷. 赤霉素和多效唑对直播水稻产量及倒伏性的影响研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2016
- [14] 姜元华, 张洪程, 赵可, 许俊伟, 韦还和, 王文婷, 孟天瑶, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 郭保卫. 机插条件下籼粳杂交稻茎秆的抗倒性评价及成因分析 [J]. *农业工程学报*, 2014, 30(19): 19-29
- [15] Sarkar R K, Chakraborty A, Bala B. Effect of alternative cropping systems on yield and advantage in direct seeded upland rice areas in Indian sub-tropics [J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2010, 180(1): 1-6
- [16] Ohno H, Banayo N P M C, Bueno C, Kashiwagi J I, Nakashima T, Lwama K, Corales A M, Garcia R, Kato Y. On-farm assessment of a new early-maturing drought-tolerant rice cultivar for dry direct seeding in rainfed lowlands [J]. *Field Crops Research*, 2018, 219: 222-228
- [17] 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
- [18] 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
- [19] Islam M S, Peng S B, Visperas R M, Ereful N, Uddin M S, Bhuiya, Julfikar A W. Lodging-related morphological traits of hybrid rice in a tropical irrigated ecosystem [J]. *Field Crops Research*, 2007, 101(2): 240-248

- [20] Polthanee A, Tre-Loges V, Promsena K. Effect of rice straw management and organic fertilizer application on growth and yield of dry direct-seeded rice[J]. *Paddy and Water Environment*, 2008, 6(2): 237-241
- [21] Mahajan G, Sarlach R S, Japinder S, Gill M S. Seed priming effects on germination, growth and yield of dry direct-seeded rice[J]. *Journal of Crop Improvement*, 2011, 25(4): 409-417
- [22] 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
- [23] Furuhata M. Improvement of seedling emergence and establishment of rice direct seeded in flooded paddy fields[J]. *Japanese Journal of Crop Science*, 2009, 78(2): 153-162
- [24] 潘宝国, 江银荣, 魏亚凤. 灌溉水层对直播稻发芽率的影响[J]. *浙江农业科学*, 2012, 1(5): 624-624
- [25] 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
- [26] Singh Y V. Crop and water productivity as influenced by rice cultivation methods under organic and inorganic sources of nutrient supply[J]. *Paddy and Water Environment*, 2013, 11(1/2/3/4): 531-542
- [27] 尹春梅, 谢小立. 灌溉模式对红壤稻田土壤环境及水稻产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(6): 26-31
- [28] 孙永健, 郑洪帧, 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
- [29] Kashiwagi T, Hirotsu N, Ujiie K, Ishimaru K. Lodging resistance locus *prl5* improves physical strength of the lower plant part under different conditions of fertilization in rice [J]. *Field Crops Research*, 2010, 115(1): 107-115
- [30] 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
- [31] Salassi M E, Deliberto M A, Linscombe S D, Wilson C E. Impact of harvest lodging on rough rice milling yield and market price [J]. *Agronomy Journal*, 2013, 105(6): 1860
- [32] 秦江涛. 水稻不同栽培模式的节水效应、生产力特征及土壤微生物学性状研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2007
- [33] Straaten O V, Veldkamp E, Köhler M, Anas I. Spatial and temporal effects of drought on soil CO₂ efflux in a cacao agroforestry system in Sulawesi, Indonesia [J]. *Biogeosciences*, 2010, 7(4): 1223-1235
- [34] 余新桥, 李明寿, 梅捍卫, 刘国兰, 张安宁, 王飞名, 李天菲, 罗利军. 杂交节水抗旱稻新组合沪优 2 号的选育 [J]. *分子植物育种*, 2010, 8(6): 1177-1179
- [35] 张秋英. 水稻抗倒伏的茎部形态生理性状分析和相关 QTL 定位 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2005
- [36] Choudhary A K, Suri V K. Integrated nutrient-management technology for direct-seeded upland rice (*Oryza sativa*) in northwestern Himalayas [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2014, 45(6): 777-784
- [37] 王德鹏. 栽培模式、温光条件和土壤肥力对双季稻物质生产和产量形成的影响及其机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016

Study on Improving the Grain Yield and Lodging Resistance of Upland Rice by Dry Direct Seeded in South China

WANG Wenxia YI Yanhong ZHOU Yanzhi TAN Xueming ZENG Yongjun
SHI Qinghua PAN Xiaohua ZENG Yanhua*

(Collaborative Innovation Center for the Modernization Production of Double Cropping Rice, Jiangxi Agricultural University/
Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Ministry of Education/Jiangxi Key Laboratory of
Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Nanchang, Jiangxi 330045)

Abstract: In order to explore effects of dry direct seeded on stem lodging ability and yield of upland rice in southern China. Hanyou 73 and Huyou 2 were used as experimental materials, with three treatments of dry direct seeded (DDS), wet direct seeded (WDS) and flooded direct seeded (FDS) to compare the effects on seedling emergence rate, yield composition and lodging resistance of upland rice. The results showed that compared with WDS and FDS, the seedling emergence rate of DDS increased by 6.57%–23.29%, and the differences among the treatments were significant ($P < 0.05$). In addition, DDS was conducive to improve grain yield of upland rice varieties and the grain yield increase of the two varieties was 7.89%–22.21% and the yield of Huyou 2 was 3.87% higher than that of Hanyou 73. Through the analysis of yield components, the increase in grain yield was mainly due to the increase of effective panicles per unit area. In addition, DDS was beneficial to improvement of the bending resistance and culm shape index of the tested varieties, reduce of bending moment and lodging index, and the shorter plant height and base internodes were beneficial to strengthening the stalk growth and increasing stem wall thickness. Stem thickness, wall thickness and culm type index were significant or extremely significant positive correlation with bending resistance, and extremely significant negative correlation with lodging index. Plant height and bending moment had extremely significant negative correlation with break force, but had extremely significant positive correlation with lodging index. In conclusion, DDS was not only to improve the grain yield of direct seeded upland rice, but also to enhance plant lodging resistance, decrease lodging risk, which could be popularized in production. This study provides a theoretical basis for achieving high and stable yield cultivation of upland rice varieties in South China.

Keywords: dry direct seeded, upland rice variety, yield formation, lodging