

文章编号:1000-8551(2020)05-1088-09

多效唑对杂交中稻不同密肥群体产量和抗倒伏性的影响

徐富贤* 蒋鹏 周兴兵 刘茂 张林 熊洪 朱永川 郭晓艺

(四川省农业科学院水稻高粱研究所/农业农村部西南水稻生物学与遗传育种重点实验室/
作物生理生态及栽培四川省重点实验室,四川 德阳 618000)

摘要:为探究高产稻田中防止倒伏发生的早期诊断技术,2015-2016年,以大面积推广的杂交中稻高产新品种蓉18优1015为试验材料,设计3因素完全因子试验,研究不同密肥群体下喷施多效唑对稻谷产量和抗倒伏性的影响。结果表明,随着施氮量和移栽密度的增加,稻谷产量提高,植株抗倒力下降,以施氮量 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和移栽密度 $18.75\text{ 万穴}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的产量较高。不同密肥群体下施用多效唑对产量和植株抗倒伏性有显著影响,施用多效唑后植株抗倒力增强,但产量因穗粒数下降而减少。不同密肥处理下施用多效唑对产量影响各异。于水稻最高苗期施用多效唑使植株重心高度、弯曲力矩、倒伏指数显著降低,折断弯矩则明显提高,穗粒数平均减少 $5.24\sim 7.87$ 粒。多效唑对产量的影响表现为低施氮量下因穗粒数减少而减产;中施氮量下产量差异不显著;高施氮量下植株未倒伏、籽粒灌浆结实正常,因结实率和千粒重高而增产。综上所述,肥力水平和施氮量高的稻田于最高苗期施用多效唑有利于水稻产量提高和控制后期倒伏。本研究为指导大面积水稻高产稳产提供了科学依据。

关键词:多效唑;杂交中稻;密肥运筹;产量;抗倒伏性

DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2020.05.1088

提高单位面积产量是水稻生产的主题。水稻高产常伴随着倒伏发生,以致水稻产量降低、品质下降^[1-2]、机收难度增大^[3],高产条件下植株的倒伏已成为制约水稻产量、品质等的重要问题。

目前国内外已有较多关于控制水稻倒伏的研究,主要集中在三个方面:一是水稻植株茎秆机械强度与抗倒伏性关系。研究认为,采取遗传改良降低植株高度^[4],缩短基部1、2节间长度,增加茎粗度、茎壁厚度、基部节间充实度^[4-7]、非结构性碳水化合物含量^[8]和单位体积木质素和纤维素含量^[9],可增强品种自身抗倒机能。二是农艺措施对抗倒力的影响。研究表明,施氮可以增加水稻节间长度,各节间粗度随着施氮水平的提高而增加,施氮对茎秆壁厚无影响,各节间至穗顶高以及穗顶重与施氮量间呈极显著相关,各节间抗折力随施氮量增加而降低^[10];通过降低大田栽秧密度、减少施氮量^[11-13]、适期晒田^[14]、及时防治病虫

害^[15]等田间管理措施能显著提高植株抗倒伏性。三是化学调控。研究指出,在水稻拔节前喷施化学药品来防止水稻植株基部第1、第2节过度生长,如多效唑和缩节胺可通过调控水稻株型降低倒伏风险^[16];又如喷施30%矮烯微乳剂可显著提高水稻齐穗期基部节间的碳氮比和籽粒灌浆后期茎秆中纤维素、半纤维素和木质素含量,进而增强水稻的抗倒能力^[17];在水稻拔节期前1周施用立丰灵 $450\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$,水稻基部节间缩短增粗,抗倒性增强,大面积推广示范的效果良好^[18]。以上研究虽然对提高水稻抗倒伏能力有较大作用,但如何早期诊断有倒伏风险稻田,并及时采取相应措施实现高产稳产的研究极少。为此,四川省农业科学院水稻高粱研究所中试组以多个杂交中稻品种为材料,研究了冬水田区水稻不同生育时期施用不同量多效唑对其抗倒伏性和产量的影响,发现多效唑最佳施用时期是水稻最高苗期,最

收稿日期:2018-09-30 接受日期:2018-12-04

基金项目:国家粮食丰产科技工程(2018YFD0301201),国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-01-25)

作者简介:徐富贤,男,主要从事水稻高产优质技术与生理、生态研究。E-mail:xu6501@163.com

* 通讯作者:同第一作者。

佳施用量为 $3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 可湿性粉剂 (含多效唑 15%), 此条件下可显著提高植株中后期抗倒伏性, 但对产量有一定负作用。因此, 本试验基于此进一步于最高苗期按最佳用量施用多效唑, 研究其对杂交中稻本田不同密肥群体下抗倒伏性和产量的影响, 以期在水稻高产条件下控制倒伏提供理论与实践依据。

表 1 试验稻田土壤基础肥力

Table 1 Basic fertility of soil for experiment field

年度 Year	pH 值 pH value	有机质 Organic fertilizer/%	全氮 Total N /%	全磷 Total P /%	全钾 Total K /%	有效氮 Available N /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效磷 Available P /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效钾 Available K /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
2015	6.4	3.38	0.16	0.05	1.92	134.0	1.9	95.8
2016	6.1	2.83	0.12	0.03	1.76	119.0	1.4	78.8

1.2 试验设计

以大面积推广的杂交中稻高产品种蓉 18 优 1015 为材料, 2015、2016 年分别于 3 月 5 日、3 月 8 日播种, 地膜湿润培育中苗秧, 4.5 叶龄期移栽本田, 每穴栽双株。试验设置 3 个施氮量: 75、150、225 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 尿素, 以施 75 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 过磷酸钙 (P_2O_5) 和 75 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 氯化钾 (K_2O) 作底肥, 按目前冬水田高产高效施氮法施肥, 即底肥占 70%、粪肥 30%; 3 种移栽密度: 12.50、18.75、28.13 万穴 $\cdot \text{hm}^{-2}$; 2 个多效唑用量水平: 3 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 即于最高苗期用 3 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 可湿性粉剂 (含多效唑 15%) 兑水 375 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 制成喷雾 (基于先期水稻多效唑施用时期与施用量试验的最佳方案, 将另文发表); 0, 即喷施等量清水 (CK)。试验采用裂区设计, 以施氮量为主区, 移栽密度为裂区, 多效唑施用量为再裂区, 共 18 个处理, 3 次重复。小区面积 13.34 m^2 , 各施氮量的区组四周用田间肥料试验专用塑料板隔离, 塑料隔板高度 45 cm, 其中入泥 30 cm 左右, 隔板与第一行秧苗间距 6~8 cm, 小区间不隔离。除试验处理外, 水分管理和病虫害防治等措施均与大田生产相同。

1.3 考查项目与方法

移栽后 10 d 开始, 试验所有处理 3 次重复的每小区按对角定两点, 每点 10 穴, 每 7 d 调查 1 次苗情动态, 至苗峰下降为止。当最近 1 次调查苗数与前次持平或增减极少时, 将此时确定为最高苗期, 并于第 2 天施用多效唑, 最高苗期相近的小区作为同一批次施多效唑, 所有处理分 2 批次施完。

始穗开始每 2 d 调查 1 次抽穗进度, 将抽穗比例达有效茎蘖数 80% 的日期定为齐穗期, 各小区分别在齐穗后第 25 天按小区平均有效茎蘖数取样 3 穴, 考查

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2015–2016 年分别在四川省农业科学院水稻高粱研究所泸县基地两块冬水田进行。稻田土质均匀, 中上等肥力, 土壤理化性质详见表 1。

植株重心高度, 将新鲜植株水平放在食指指尖上, 通过调整支点位置使其保持平衡时, 基部至指尖的长度为重心高度; 按照 Islam 等^[19]的方法选择倒 3 节 (蓉 18 优 1015 主茎 15 片叶, 有 5 个生长节间) 测定节间茎秆的抗折力, 并计算弯曲力矩 (bending moment), 折断弯矩 (breaking strength) 和倒伏指数 (%)^[20–21]。成熟期用量角器测量每小区植株倒伏状态 (每小区 60% 以上植株与地面倾斜度达 0~30° 记“卧”、30°~60° 记“倒”、60°~80° 记“斜”、≥80° 记“立”), 成熟期所有试验小区, 按其小区平均有效茎蘖数取样 5 穴, 在室内考查穗粒数、结实率和千粒重, 并收小区实产。小区实产和千粒重均按含水量 13.5% 折合为标准重量。

1.4 统计分析

在对试验抗倒伏性指标、产量和产量相关性状进行方差分析基础上, 利用各性状 3 重复的平均值, 进行 2 种多效唑施用量在相同密肥下的产量差值与相同密肥下产量性状差值间的相关、回归和通径分析等。所有计算由 DPS 9.5 数据处理系统和 Excel 2003 软件完成。

2 结果与分析

2.1 不同移栽密肥下施用多效唑对植株抗倒伏性和产量的影响

由表 2 可知, 水稻植株抽穗后的重心高度、弯曲力矩、折断弯矩和倒伏指数 4 个抗倒伏性指标分别在不同密肥处理间差异达显著或极显著水平 (F 值 2.86~5.33)。最高苗期施用多效唑处理的两年平均折断弯矩分别增强 74.59、93.88 $\text{g} \cdot \text{cm}$, 而重心高度、弯曲力

矩和倒伏指数则分别下降了 2.64、3.45 cm, 219.53、119.84 g·cm 和 27.68、21.90 个百分点, 成对数据差异 t 检验值为 4.12~10.52, 达极显著水平。

就各处理的产量及其穗粒结构表现来看, 所有产量性状在不同密肥处理间的差异均达显著或极显著水平 (F 值 2.76~12.37), 最高苗期施用多效唑处理的两年平均穗粒数分别较对照减少 5.24、7.87 粒, 成对数

据差异 t 检验值为 0.11~4.82, 达显著或极显著水平。以低肥低密处理 (75 N kg·hm⁻² 和 12.5 万穴·hm⁻²) 最高, 达 177.04~218.35 粒/穗, 高肥高密处理 (225 N kg·hm⁻² 和 28.13 万穴·hm⁻²) 最低, 为 131.02~165.37 粒/穗。施用多效唑与未施多效唑两处理间的有效穗、结实率和千粒重差异不显著 (表 3)。以上两年试验结果表现趋势一致。

表 2 不同密肥群体下施用多效唑的抗倒性表型值

Table 2 The phenotypic values of lodging resistance force for paclobutrazol application under different dense -fertilizer populations

年份 Year	施氮量 Nitrogen rate /(kg·hm ⁻²)	密度 Planted density /(×10 ⁴ ·hm ⁻²)	多效唑用量 Paclobutrazol content/(g·hm ⁻²)							
			0		3 000		0		3 000	
			重心高度 Plant gravity height/cm		弯曲力矩 Bending moment/(g·cm)		折断弯矩 Breaking strength/(g·cm)		倒伏指数 Lodging index/%	
2015	75	12.50	54.77	50.22	2 012.93	1 832.15	1 349.00	1 422.00	149.22	128.84
	75	18.75	51.62	50.84	1 865.12	1 757.82	1 221.31	1 343.00	152.71	130.89
	75	28.13	49.68	47.76	1 912.17	1 638.58	1 154.31	1 247.50	165.65	131.35
	150	12.50	53.62	47.50	1 955.67	1 835.11	1 287.5	1 394.19	151.90	131.63
	150	18.75	52.17	51.97	1 895.85	1 657.79	1 196.25	1 229.56	158.48	134.83
	150	28.13	52.68	50.73	2 188.31	1 930.39	1 303.31	1 244.31	167.90	155.14
	225	12.50	49.91	48.52	1 946.65	1 782.35	1 112.19	1 255.56	175.03	141.96
	225	18.75	51.01	48.16	2 249.03	1 953.38	1 125.19	1 273.25	199.88	153.42
	225	28.13	53.69	49.65	1 987.98	1 650.34	978.44	989.38	203.18	166.81
		F 值 F value		2.86*	3.54*	4.62**	3.17*	4.05**	4.22**	3.93**
	平均值 Mean		52.13	49.49	2 001.52	1 781.99	1 191.94	1 266.53	169.33	141.65
	多效唑与对照均差 MDPC		-2.64		-219.53		74.59		-27.68	
	成对数据 t 值 t -test value		4.12**		8.21**		3.28**		7.91**	
2016	75	12.50	52.33	48.95	1 805.73	1 624.13	1 504.60	1 546.98	120.01	104.99
	75	18.75	46.90	45.90	1 363.48	1 343.98	1 092.25	1 266.75	124.83	106.10
	75	28.13	48.03	44.05	1 261.95	1 217.13	978.28	1 117.83	129.00	108.88
	150	12.50	54.25	49.55	1 771.73	1 611.23	1 233.55	1 287.98	143.63	125.10
	150	18.75	52.33	48.18	1 607.88	1 534.03	1 077.28	1 169.2	149.25	131.20
	150	28.13	51.48	45.65	1 749.83	1 531.43	1 029.85	1 102.1	169.91	138.96
	225	12.50	54.88	49.10	1 725.43	1 690.63	1 083.90	1 191.2	159.19	141.93
	225	18.75	50.33	49.53	1 782.68	1 568.85	1 051.08	1 096.73	169.60	143.05
	225	28.13	51.55	50.10	1 781.43	1 650.23	968.53	1 085.53	183.93	152.02
		F 值 F value		3.85*	3.61*	3.80*	4.17**	5.33**	3.94**	4.25**
	平均值 Mean		51.34	47.89	1 650.02	1 530.18	1 113.26	1 207.14	149.93	128.03
	多效唑与对照均差 MDPC		-3.45		-119.84		93.88		-21.90	
	成对数据 t 值 t -test value		5.31**		4.58**		6.24**		10.52**	

注: * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平差异显著; MDPC: 多效唑与对照均差。下同。

Note: * and ** indicate significant difference at 0.05 and 0.01 level, respectively. MDPC: Means differences between paclobutrazol and CK. The same as following.

表3 不同密肥群体下施用多效唑的产量及其穗粒结构表型值

Table 3 The phenotypic values of yield and panicle structure for paclobutrazol application under different dense-fertilizer populations*

年份 Year	施氮量 Nitrogen rate /(kg· hm ⁻²)	密度 Planted density /(×10 ⁴ · hm ⁻²)	多效唑用量 Paclobutrazol content/(g·hm ⁻²)															
			0		3 000		0		3 000		0		3 000		0		3 000	
			最高苗 Max. tiller /(×10 ⁴ ·hm ⁻²)	有效穗数 Effective panicle /(×10 ⁴ ·hm ⁻²)	穗粒数 Spikelets per panicle	结实率 Seed set percentage/%	千粒重 1000-grain weight/g	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)										
2015	75	12.50	278.70	288.30	207.45	208.80	190.18	177.04	78.47	79.29	30.74	30.45	8 935.87	8 230.82				
	75	18.75	337.50	350.70	227.40	221.85	171.1	162.76	81.77	81.63	30.90	31.38	9 155.43	8 432.26				
	75	28.13	400.20	384.45	245.10	243.90	153.51	148.61	81.60	81.45	31.70	31.43	9 194.86	8 850.46				
	150	12.50	320.85	334.95	226.65	230.85	186.98	172.49	78.85	80.58	30.56	31.20	9 355.25	9 200.40				
	150	18.75	388.65	368.85	259.35	248.85	161.93	154.69	78.97	79.51	31.27	31.25	9 457.12	9 238.06				
	150	28.13	414.30	422.70	272.85	268.35	142.37	145.12	83.48	83.12	30.98	31.25	9 535.23	9 574.22				
	225	12.50	359.10	362.90	240.60	245.55	168.41	170.61	79.64	79.41	30.23	30.93	9 282.47	9 600.37				
	225	18.75	414.45	416.35	276.15	275.65	147.97	145.42	78.05	81.62	30.21	31.88	9 492.45	9 808.6				
	225	28.13	501.45	495.00	301.95	292.35	132.5	131.02	76.52	80.94	30.42	31.41	9 068.80	9 527.25				
		F 值 F value		5.28**	9.05**	7.17**	4.36**	8.43**	6.81**	3.61*	2.88*	5.80**	4.30**	4.04**	5.66**			
	平均值 Mean		379.47	380.46	250.83	248.46	161.66	156.42	79.71	80.84	30.78	31.24	9 275.28	9 162.50				
	多效唑与对照 均差 MDPC		-1.01		-2.37		-5.24		1.133		0.46		-112.78					
	成对数据 t 值 t-test value		0.242 3		1.277 0		2.559 1*		1.927 1		2.198 7		0.779 1					
2016	75	12.50	197.85	209.85	153.00	153.60	227.73	218.35	81.51	82.58	29.72	29.54	7 912.55	7 237.56				
	75	18.75	245.40	250.80	173.40	176.20	197.49	188.22	87.41	86.78	29.83	30.30	8 565.00	8 010.04				
	75	28.13	313.20	323.10	191.70	203.70	184.34	170.34	87.01	86.90	29.91	29.70	8 782.20	8 445.18				
	150	12.50	228.60	230.40	164.85	166.80	223.03	213.77	81.44	82.94	29.20	29.11	8 655.06	8 430.00				
	150	18.75	278.40	285.60	193.20	199.80	190.06	179.98	85.50	87.08	29.16	29.18	8 820.24	8 692.53				
	150	28.13	364.50	330.75	205.80	215.10	182.36	168.89	83.07	82.97	29.32	29.72	8 707.53	8 790.07				
	225	12.50	245.55	226.35	173.85	172.95	218.68	217.28	80.86	81.08	29.08	29.45	8 610.04	8 520.81				
	225	18.75	286.35	306.15	205.80	202.05	188.15	186.76	76.67	81.96	28.62	29.36	8 245.09	8 602.59				
	225	28.13	394.35	396.75	224.55	226.65	167.93	165.37	75.49	79.34	28.69	29.80	7 815.27	8 617.54				
		F 值 F value		7.23**	4.81**	12.37**	9.07**	6.89**	10.22**	2.76*	3.48*	4.62**	2.78*	4.16**	7.32**			
	平均值 Mean		283.80	284.42	187.35	190.76	197.75	189.88	82.11	83.51	29.28	29.57	8 457.00	8 371.81				
	多效唑与对照 均差 MDPC		0.62		3.41		-7.87		1.41		0.29		-85.18					
	成对数据 t 值 t-test value		0.110 8		2.043 5		4.817 5**		2.134 2		1.951 8		0.560 2					

为进一步明确不同处理间抗倒伏性和产量的差异性,利用表2、表3数据分别进行不同年度、施氮量、移栽密度和多效唑用量的联合方差分析,其多重比较结果如表4所示。结果表明,年度间除植株重心高度差异不显著外,其他抗倒伏性指标和产量均达到差异显

著水平,且各项指标均表现为2015年较2016年高;不同施氮量间的重心高度差异不显著,弯曲力矩、倒伏指数随着施氮量的增加呈升高趋势,产量表现为先升后降趋势,折断弯矩呈下降趋势;随着移栽密度的增加,重心高度、弯曲力矩、折断弯矩呈下降趋势,倒伏指数

和产量则呈上升趋势;施用多效唑后,植株重心高度、弯曲力矩、倒伏指数和产量均显著降低,折断弯矩则显著提高。除重心高度外的抗倒伏性状及产量在各试验处理间均存在一定互作效应,其中施氮量与密度的互作效应均对弯曲力矩、折断弯矩和产量的影响达到极显著水平,施多效唑与密度、施多效唑与施氮量的互作

效应对产量的影响均达到显著或极显著水平。

综上所述,稻田施用多效唑对不同密肥群体下植株的抗倒伏性和产量有明显影响,随着施氮量和移栽密度的增加,表现为抗倒力下降和产量提高,以施氮量 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和移栽密度 $18.75 \text{ 万穴} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的产量较高。

表 4 不同密肥群体下施用多效唑的抗倒伏性和产量比较

Table 4 Comparison of lodging resistance and yield for paclobutrazol application under different dense-fertilizer populations

项目 Item		重心高度 Plant gravity height/cm	弯曲力矩 Bending moment /(g·cm)	折断弯矩 Breaking strength /(g·cm)	倒伏指数 Lodging index/%	产量 Yield /(kg·hm ⁻²)
年度 Year	2015	50.8a	1 891.76a	1 229.24a	155.49a	9 218.88a
	2016	49.62a	1 590.10b	1 160.20b	138.99b	8 414.41b
多效唑用量 Paclbutracol content/(g·hm ⁻²)	0	51.74a	1 825.77a	1 152.60b	159.63a	8 866.14a
	3 000	48.69b	1 656.09b	1 236.84a	134.84b	8 767.15b
施氮量 Nitrogen rate /(kg·hm ⁻²)	75	49.25a	1 636.26c	1 270.32a	129.37c	8 479.35b
	150	50.43a	1 739.96b	1 197.93b	145.99b	9 037.98a
	225	50.95a	1 846.56a	1 115.90c	166.34a	8 932.61a
密度 Planted density /(×10 ⁴ ·hm ⁻²)	12.50	51.55a	1 831.95a	1 320.71a	139.96c	8 664.27b
	18.75	49.91ab	1 714.99b	1 178.49b	146.19b	8 876.62a
	28.13	49.17b	1 675.84b	1 084.96c	155.56a	8 909.05a
F 值 F value	年度 A	4.03	213.43 **	13.02 *	148.71 **	540.29 **
	多效唑 B	26.49 **	67.53 **	19.39 **	335.10 **	8.18 *
	施氮量 C	2.87	34.58 **	21.74 **	249.23 **	98.07 **
	密度 D	5.88 *	20.63 **	51.34 **	44.84 **	19.68 **
	A×B	0.44	11.75 *	0.85	3.20	0.16
	A×C	3.35	12.42 *	7.34 *	13.64 *	14.12 *
	A×D	2.52	14.95 **	12.31 *	0.63	0.99
	B×C	0.41	1.58	2.78	4.94	58.51 **
	B×D	1.62	2.10	1.25	1.67	10.37 *
	C×D	2.06	32.52 **	18.17 **	2.89	23.08 **
	A×B×C	0.31	0.71	0.61	2.39	0.10
	A×B×D	0.02	1.67	3.56	0.79	1.65
	A×C×D	0.38	12.08 *	12.37 *	0.64	6.30 *
	B×C×D	0.06	2.57	1.66	0.48	0.49
	A×B×C×D	0.05	2.13	2.02	1.16	0.63

注:同列不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level. The same as following.

2.2 多效唑对稻谷产量作用与本田密肥运筹关系

由表 5 可知,施用多效唑对稻谷产量有显著影响,但不同密肥处理对产量影响效应各异。2015 年,低施氮量($75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)时,3 种移栽密度条件下施用多效唑后稻谷产量均较 CK 显著减少;中施氮量(150

$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)时,3 种移栽密度条件下施用多效唑后稻谷产量与 CK 间无显著差异;而高施氮量($225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)时,3 种移栽密度条件下施用多效唑后产量均较 CK 显著增加。2016 年,除施氮量 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、栽秧密度 $12.50 \text{ 万穴} \cdot \text{hm}^{-2}$ 条件下施用多效唑后产量与 CK 差异

不显著外,其他处理施用多效唑与CK间产量差异趋势与2015年表现一致。

以上结果表明,施用多效唑对产量的影响在不同肥力条件下表现为低肥减产、中肥平产、高肥增产。究其原因,由施用多效唑处理与CK产量构成因素差值对产量差值的通径分析可知,有效穗差值对产量差值因直接作用和间接作用分别为正效应和负效应,相抵后对产量影响极小,而穗粒数、结实率和千粒重均表现为较高的正效应(表6)。因此,施用多效唑对稻谷产量的影响主要由穗粒数、结实率和千粒重间的差异所

致。施用多效唑时水稻正处于幼穗分化始期,对颖花形成有一定抑制作用,以致施用多效唑处理的穗粒数比未施用多效唑处理平均减少了5.24~7.87粒,同时由于多效唑增强了植株的抗倒力(表2),使其在高肥高密度下仍未倒伏,而未施多效唑的相同处理则因倒伏致结实率和千粒重有所下降(表3、表5)。换言之,施用多效唑在低肥低密条件下因穗粒数减少而减产,在高肥高密度条件下则因植株未倒伏籽粒灌浆结实正常,较CK的结实率和千粒重高,因而增产。

表5 不同密肥处理下施用多效唑对倒伏情况与稻谷产量的影响

Table 5 Effects of paclobutracol on lodging and grain yield under different density-fertilizer management

施氮量 Nitrogen rate /(kg·hm ⁻²)	密度 Planted density /(×10 ⁴ ·hm ⁻²)	2015年 Year 2015					2016年 Year 2016				
		CK /(kg·hm ⁻²)	倒伏 情况 Lodging	多效唑 Paclbutracol /(kg·hm ⁻²)	倒伏 情况 Lodging	差值 Difference /(kg·hm ⁻²)	CK/ (kg·hm ⁻²)	倒伏 情况 Lodging	多效唑 Paclbutracol /(kg·hm ⁻²)	倒伏 情况 Lodging	差值 Difference /(kg·hm ⁻²)
75	12.50	8 935.87d	立	8 230.82e	立	-705.05**	7 912.55c	立	7 237.56d	立	-674.99**
75	18.75	9 155.43bcd	立	8 432.26de	立	-723.17**	8 565.00a	立	8 010.04c	立	-554.96**
75	28.13	9 194.86abcd	立	8 850.46d	立	-344.40*	8 782.20a	立	8 445.18b	立	-337.02*
150	12.50	9 355.25abc	立	9 200.40c	立	-154.85	8 655.06a	立	8 430.00b	立	-225.06
150	18.75	9 457.12ab	斜	9 238.06bc	立	-219.06	8 820.24a	立	8 692.53ab	立	-127.71
150	28.13	9 535.23a	倒	9 574.22ab	斜	38.99	8 707.53a	立	8 790.07a	立	82.54
225	12.50	9 282.47abcd	倒	9 600.37a	斜	317.90*	8 610.04a	斜	8 520.81ab	立	-89.23
225	18.75	9 492.45ab	卧	9 808.60a	倒	316.15*	8 245.09b	倒	8 602.59ab	斜	357.50*
225	28.13	9 068.80cd	卧	9 527.25abc	倒	458.45*	7 815.27c	卧	8 617.54ab	斜	802.27**
F值 F value		3.25*		5.41**			3.67*		3.82*		

表6 施用多效唑与未施产量构成因素差值对产量差值的通径分析

Table 6 Path analysis of yield-related aronomic differences on yield differences between two treatments of paclobutracol

年度 Year	因子 Trait	决定系数 R ²	相关系数 r	直接作用 Direct effect	间接作用 Indirect effect				
					总和 Total	→X ₁	→X ₂	→X ₃	→X ₄
2015	X ₁	0.853 9	-0.022 9	0.232 9	-0.255 8		-0.131 5		-0.124 3
	X ₂		0.693 6	0.745 4	-0.051 8	-0.041 1			-0.010 7
	X ₃		0.555 8	0.615 8	-0.060 0	-0.047 0	-0.013 0		
2016	X ₁	0.917 3	-0.190 3	0.785 7	-0.976 0		-0.486 5		-0.304 4
	X ₂		0.541 1	0.572 5	-0.031 4	-0.667 7			0.351 4
	X ₃		0.714 0	0.534 0	0.180 0	-0.447 8	0.376 7		
	X ₄		0.810 2	0.451 1	0.359 1	-0.322 4	0.384 3		0.297 2
合计 Total	X ₁	0.776 2	-0.073 3	0.382 9	-0.456 2		-0.276 9		-0.132 6
	X ₂		0.599 2	0.548 2	0.051 0	-0.193 4			0.121 6
	X ₃		0.641 3	0.453 0	0.188 3	-0.112 1	0.147 2		
	X ₄		0.718 6	0.257 9	0.460 7	-0.069 4	0.261 1		0.2690 4

注: X₁: 有效穗; X₂: 穗粒数; X₃: 结实率; X₄: 千粒重。

Note: X₁: Effective panicle. X₂: Spikelets per panicle. X₃: Seed set percentage. X₄: 1 000-grain weight.

3 讨论

3.1 化学调控对水稻抗倒性和产量的影响

孙旭初^[4]指出降低株高是提高水稻植株抗倒性的主要途径。马均等^[6]通过优化节间配置,即缩短水稻基部1、2节间长度,适当增加上部节间长度与茎壁厚度,显著提高了水稻植株的抗倒伏能力。何冲霄等^[22]研究表明,杂交水稻于抽穗初期和齐穗期喷施浓度为 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的蛋氨酸,对控制基部节间生长过长,增强抗倒能力,延长剑叶功能期,提高结实率,增加千粒重和产量等均有明显效果,且抗倒能力与喷施浓度呈线性正相关,而产量在浓度低于 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时呈线性正相关,在浓度高于 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时区间内呈线性负相关。前人研究一致认为,水稻分蘖盛期至拔节期施用多效唑可使茎秆内细胞壁增厚、节间长度缩短,株型变矮,从而增强水稻抗倒伏能力^[16,23-25]。但对产量影响结果各异,姜龙等^[24]研究表明,施用多效唑减小了植株的倒伏程度,增加了小区产量,其作用机制是倒伏植株通风透光条件差,功能叶面积急剧衰减,营养物质运转受阻,提高了抗倒能力,反而延长了有效光合时间。汤日圣等^[25]以高秆品种龙睛4号为材料,发现抽穗前30~40 d施用多效唑抑制株高和防止倒伏的效果最好,但与未施多效唑处理相比减产 $0.33\%\sim 2.37\%$ 。本研究结果表明,于水稻最高苗期施用多效唑使植株重心高度、弯曲力矩、倒伏指数显著降低,折断弯矩明显提高,植株抗倒力明显增强,这与前人研究结论基本一致^[16,23-25]。但由于本研究施用多效唑时水稻正处于幼穗分化始期,对颖花形成具有一定的抑制作用,以致施用多效唑处理的穗粒数较未施用多效唑平均减少了 $5.24\sim 7.87$,从而导致减产。进一步分析发现,不同密肥处理条件下施用多效唑对产量影响各异,表现为低施氮量条件下因穗粒数减少而减产;高施氮量条件下因植株未倒伏籽粒灌浆结实正常,较未施多效唑处理植株发生倒伏后的结实率和千粒重高,进而增产;中施氮量下产量差异不显著。因此,通过施用多效唑来提高水稻的抗倒性要因田制宜。

3.2 水稻倒伏的早期诊断与调控措施

在生产上,施氮有利于水稻高产,但氮肥施用不当也是引起水稻倒伏的重要原因之一^[26-27]。石扬娟等^[12]认为,随着施氮量的增加,倒伏指数呈先降低后升高的趋势。Zhang等^[28]研究表明,随着施氮量增加,水稻倒伏率和倒伏指数显著增加。程慧煌等^[29]研究发现,倒伏指数随着施氮量的增加而增加,但倒伏指数

对施氮量的响应因品种而异,中低产品种的折断弯矩随着施氮量的增加而降低,高产品种随着施氮量的增加其折断弯矩变化较小,说明增施肥料对中低产品种的折断弯矩影响更大,使其更易受氮肥影响而发生倒伏。艾治勇等^[30]通过正交旋转组合试验,建立了肥料用量与倒伏指数和产量的数学模型,提出了抗倒与高产兼顾的肥料施用方案。此外,氮肥运筹也会对水稻的倒伏指数产生影响。Zhang等^[31]研究发现,随着穗肥施氮量的增加,水稻重心高度升高,茎秆直径增加,而茎壁厚度变化较小,大、小维管束面积和茎秆抗折力显著下降,倒伏指数显著增加。张明聪等^[32]指出,优化施肥使水稻重心高度和株高增加,基部节间长度降低,茎粗和充实度增加从而实现了水稻高产抗倒。伦志安等^[33]认为,水稻增施氮肥其抗倒伏力下降,增施钾肥和硅肥其抗倒伏力提高。籼粳杂交品种比籼稻品种抗倒伏能力强^[34]。

以上结果表明,通过施肥调控可达到高产抗倒的目标,但水稻优化施肥的高产抗倒效应与本田基础肥力水平有关,生产上稻田肥力水平差别较大,常出现前期生长过旺而后期倒伏减产的现象,急需水稻倒伏风险的早期诊断技术,以便尽早采取措施控制倒伏。刘金友等^[35]研究表明,抽穗期主茎顶部叶色可作为诊断水稻抗倒伏能力大小的指标,但此时水稻生长节间长度和充实度已定型,其诊断结果对施肥不足的稻田补施氮肥获得高产有指导作用,但对生长过旺的稻田防倒调控为时已晚。萧长亮等^[36]指出在较高施氮量下,施用稀效唑能较明显地增强水稻抗倒伏能力。本研究结果表明,最高苗期施用多效唑对本田密肥群体植株抗倒性和产量有明显影响,随着施氮量和移栽密度的增加,抗倒力下降,产量提高;在水稻低肥低密小群体下施多效唑会减产,而在高肥高密大群体下则会增产。因此,肥力水平高和施氮量高的稻田于最高苗期施用多效唑有利于高产和控制后期倒伏,肥力水平低、施氮量低的稻田则没必要施用多效唑。对可施用多效唑的稻田可以最高苗数为早期诊断指标,但尚需进一步深入研究。

4 结论

本研究结果表明,随着施氮量和移栽密度的增加,稻谷产量增加,倒伏风险增加。施用多效唑后植株抗力增强,但产量因穗粒数下降而减产。在不同密肥处理下施用多效唑对产量影响各异,即低施氮量下因穗粒数减少而减产,中施氮量下产量差异不显著,高施氮

量下则因植株未倒伏、籽粒灌浆结实正常,较未施多效唑处理植株发生倒伏后的结实率和千粒重高而增产。因此,肥力水平高和施氮量高的稻田于最高苗期施用多效唑有利于高产和控制后期倒伏。

参考文献:

- [1] 郎有忠,杨晓东,王美娥,朱庆森. 结实阶段不同时期倒伏对水稻产量及米质的影响[J]. 中国水稻科学, 2011, 25(4): 407-412
- [2] Berry P M, Sterling M, Spink J H, Baker C J, Sylvester-Bradley R, Mooney S J, Tams A R, Ennos A R. Understanding and reducing lodging in cereals[J]. *Advance in Agronomy*, 2004, 84: 217-271
- [3] Kono M. Physiological aspects of lodging [M]//In: Matsuo T, Kumazawa K, Ishii R, Ishihara K, Hirata H, eds. *Science of the Rice Plant, Physiology*. Tokyo: Food and Agriculture Policy Research Center, 1995: 971-982
- [4] 孙旭初. 水稻茎秆抗倒性的研究[J]. 中国农业科学, 1987, 20(4): 32-37
- [5] Liu C, Zheng S, Gui J S, Fu C J, Yu H S, Song D L, Shen J H, Peng X, Liu X M, Han B, Yang Y Z, Li L G. Shorten basal internodes encodes a gibberellin 2-oxidase and contributes to lodging resistance in rice[J]. *Molecular Plant*, 2018, 11(2): 288-299
- [6] 马均,马文波,田彦华,杨建昌,周开达,庆森. 重穗型水稻植株抗倒伏能力的研究[J]. 作物学报, 2004, 30(2): 143-148
- [7] Quang D P, Abe A, Hirano M. Analysis of lodging-resistant characteristics of different rice genotypes grown under the standard and nitrogen-free basal dressing accompanied with sparse planting density practices[J]. *Plant Production Science*, 2004, 7(3): 243-251
- [8] Ookawa T, Yasuda K, Kato H. Biomass production and lodging resistance in Leaf Star, a new long-culm rice forage cultivar[J]. *Plant Production Science*, 2010, 13(1): 58-66
- [9] 郭玉华,朱四光,张龙步. 不同栽培条件对水稻茎秆化学成分的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2003, 34(2): 89-91
- [10] 房贤涛,何花榕,谢祖钦,张居念,卓传营,蔡光璟,杨惠杰. 不同施氮量对杂交稻茎秆性状及抗倒伏性的影响[J]. 福建农业学报, 2016, 31(10): 1034-1038
- [11] 杨世民,谢力,郑顺林,李静,袁继超. 氮肥水平和栽插密度对杂交稻茎秆理化特性与抗倒伏性的影响[J]. 作物学报, 2009, 35(1): 93-103
- [12] 石扬娟,黄艳玲,申广勒,王维刚,张志转,石英尧,陈多璞. 氮肥用量和栽插密度对水稻茎秆力学特性的影响研究[J]. 中国农学通报, 2008, 24(7): 101-106
- [13] 宋云攀,牛信双,张俊,李刚华,杨从党,丁艳峰. 氮肥运筹对超级稻Ⅱ优084产量及抗倒性的影响[J]. 中国稻米, 2013, 19(4): 13-15
- [14] 王士强,顾春梅,沈巧梅,赵黎明,王丽萍,王贺. 水稻倒伏发生规律及防御技术的研究进展[J]. 北方水稻, 2011, 41(5): 69-72
- [15] 周继勇,肖层林,王仁祥. 水稻抗倒性研究进展[J]. 作物研究, 2006(5): 388-392
- [16] 游晴如,马宏敏,杨东,涂诗航,张水金,董瑞霞,黄庭旭. 水稻倒伏性研究进展[J]. 安徽农学通报, 2007, 13(6): 84-86
- [17] 张倩,张明才,张海燕,谭伟明,李召虎,段留生. 30%矮·烯微乳剂对水稻茎秆理化特性的调控[J]. 作物学报, 2013, 39(6): 1089-1095
- [18] 王焱,邵平,姚仪敏,闫浩亮,陈建珍,田小海. 立丰灵防止杂交水稻倒伏的大面积示范效果[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(18): 4266-4271
- [19] Islam M S, Peng S, Visperas R M, Ereful N, Bhuiya M S U, 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] 郭玉华,朱四光,张龙步,都华. 不同栽培条件对水稻茎秆材料学特性的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2003, 34(1): 4-7
- [21] Ookawa T, Ishihara K. Varietal difference of physical characteristic of the culm related to lodging resistance in paddy rice[J]. *Japanese Journal of Crop Science*, 2008, 61(3): 419-425
- [22] 何冲霄,姚立生,顾来顺,孙明法,严国红,唐红生,王爱民,朱国永,任仲玲. 蛋氨酸和多效唑对杂交水稻抗倒性及产量的影响[J]. 杂交水稻, 2000, 15(5): 32-33
- [23] 朱纪谷. 多效唑在水稻抗倒伏上的应用效果研究[J]. 现代农业科技, 2013(20): 133
- [24] 姜龙,曲金玲,孙国宏,白艳凤,孟祥海,姜宝杰,孙远卓. 矮壮素、烯效唑和多效唑对水稻倒伏及产量的影响[J]. 中国林副特产, 2018, 153(4): 10-13, 18
- [25] 汤日圣,刘宝祥,张金渝,杨家和,张远海,孙育东,吴光南,朱宗武. 多效唑防止水稻倒伏的施用技术[J]. 江苏农业科学, 1987(S1): 9-10
- [26] 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[J]. 中国农业科学, 2013, 46(7): 1323-1334
- [27] 吴晓然,张巫军,伍龙梅,翁飞,李刚华,刘正辉,唐设,丁承强,王绍华,丁艳峰. 超级杂交籼稻抗倒伏能力比较及其对氮素的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(14): 2705-2717
- [28] Zhang W J, Wu L M, Ding Y F, Wang F, Wu X R, Li G H, Liu Z H, Tang S, Ding C Q, Wang S H. Top-dressing nitrogen fertilizer rate contributes to decrease culm physical strength by reducing structural carbohydrate content in japonica rice [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(5): 992-1004
- [29] 程慧煌,易振波,曾勇军,郑厚亮,高庆银. 超级杂交稻抗倒伏能力及其对施肥量的响应[J]. 核农学报, 2018, 32(8): 1063-1610
- [30] 艾治勇,马国辉. 超级杂交稻抗倒高产肥料运筹技术的数学模型研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 803-808
- [31] Zhang W J, Wu L M, Wu X R, Ding Y F, Li G H, Li J Y, Wang F, Liu Z H, Tang S, Ding C Q, Wang S H. Lodging resistance of japonica rice (*Oryza sativa* L.): Morphological and anatomical traits due to top-dressing nitrogen application rates [J]. *Rice*, 2016, 9(1): 31
- [32] 张明聪,刘元英,罗盛国,彭显龙,陈丽楠,李宗云,李佳. 养份综合管理对寒地水稻抗倒伏性的影响研究[J]. 中国农业科学, 2010, 43(21): 4536-4542

- [33] 伦志安, 李德萍, 冯世超, 王振东, 穆娟微. 不同施肥水平条件下水稻抗倒伏研究[J]. 北方水稻, 2018, 48(1): 13-16
- [34] 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
- [35] 刘金友, 李刚华, 王高鹏, 黄文晓, 张巫军, 丁艳锋. 水稻茎秆抗倒伏性与叶色的关系分析[J]. 中国稻米, 2013, 19(4): 8-12
- [36] 萧长亮, 解保胜, 王安东, 王士强, 李春光, 那永光. 氮和稀效唑调控对寒地水稻倒伏和产量的影响[J]. 作物杂志, 2017(6): 96-103

Effects of Paclobutrazol on Yield and Lodging Resistance With Different Dense-fertilizer Population in Mid-season Hybrid Rice

XU Fuxian* JIANG Peng ZHOU Xingbing LIU Mao ZHANG Lin
XIONG Hong ZHU Yongchuan GUO Xiaoyi

(Rice and Sorghum Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Southwest Rice Biology and Genetic Breeding, Ministry of Agriculture and Rural Areas/Crop Ecophysiology and Cultivation Key Laboratory of Sichuan Province, Deyang, Sichuan 618000)

Abstract: In order to explore the early diagnostic techniques for lodging prevention in high-yielding paddy fields, a new high-yielding hybrid rice variety "Rong 18 You 1015", which was widely popularized, was used to design a three-factor complete factor experiment in 2015-2016, and to study the effects of Paclobutrazol spraying on rice yield and lodging resistance under different dense-fertilizer population. The results showed that with the increase of nitrogen application rate and transplanting density, rice yield increased and plant lodging resistance decreased. The yield of 150 kg hm⁻² N application and 187.5 million holes hm⁻² transplanted was higher. The application of Paclobutrazol in different dense-fertilizer population had significant effects on yield and lodging resistance of plants. After application of paclobutrazol, plant resistance increased and yield decreased with the decrease of grain number per panicle. However, the effect of Paclobutrazol on yield was different under different dense-fertilizer treatments. The application of Paclobutrazol at the highest seedling stage of rice significantly reduced the height of plant center of gravity, bending moment and lodging index, but significantly increased the breaking strength. Average number of grains per panicle decreased by 5.24-7.87 grains. The effects of Paclobutrazol on yield were as follows: yield decreased with the decrease of grain number per panicle under low nitrogen application rate; yield difference was not significant under medium nitrogen application rate; plant lodging was not observed under high nitrogen application rate; grain filling was normal; and yield was increased due to high seed setting rate and 1 000-grain weight. In summary, the application of Paclobutrazol at the highest seedling stage in paddy fields with high fertility level and nitrogen application rate is conducive to the improvement of rice yield and the control of late lodging.

Keywords: paclobutrazol (PP333), mid-season hybrid rice, density-fertilizer management, grain yield, lodging resistance