

引用格式:

刘玉喜, 熊佳铭, 吴建军, 杨晓艳, 王悦, 胡亚军, 陈光辉. 苗期不同叶龄喷施多效唑对优质籼稻倒伏性状的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2024, 50(3): 1-9.

LIU Y X, XIONG J M, WU J J, YANG X Y, WANG Y, HU Y J, CHEN G H. Effects of spraying paclobutrazol at different leaf age in the seedling stages on lodging characteristics of high-quality *indica* rice[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2024, 50(3): 1-9.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



苗期不同叶龄喷施多效唑对优质籼稻倒伏性状的影响

刘玉喜¹, 熊佳铭¹, 吴建军², 杨晓艳³, 王悦¹, 胡亚军¹, 陈光辉^{1*}

(1.湖南农业大学农学院, 湖南 长沙 410128; 2.华容县农业农村局, 湖南 岳阳 414299; 3.长沙哲农农业科技有
限公司, 湖南 长沙 410145)

摘要:以优质晚籼稻‘泰优 553’和‘玉针香’为材料, 在水稻秧苗的 1 叶 1 心期和 2 叶 1 心期进行多效唑处理(15% 多效唑 1 500 g 兑水 750 kg), 以喷施清水为对照(CK), 在水稻成熟期测定水稻的农艺性状与产量、茎秆的物理性状、力学和抗倒伏特性, 并分析植株抗倒伏特性与主茎性状的相关性。结果表明: 2 个时期喷施多效唑均显著增加‘泰优 553’的产量, 而对‘玉针香’的增产效果不显著, 其中 1 叶 1 心期和 2 叶 1 心期处理下‘泰优 553’的产量较对照处理分别增加了 20.63%和 15.29%; 2 个时期喷施多效唑均可降低 2 个水稻品种成熟期的株高, 缩短其节间长度, 增加节间粗度和茎壁厚度, 从而提高节间充实度和折断弯矩, 提高水稻抗倒伏能力; 在 2 叶 1 心期喷施多效唑较 1 叶 1 心期喷施更能提高‘玉针香’的抗倒伏能力, 其中 2 叶 1 心期处理下‘玉针香’茎秆抗倒指数较对照显著增加了 36.46%, 而 1 叶 1 心期处理下‘玉针香’茎秆抗倒指数较对照处理差异不显著; 多效唑对‘玉针香’的抗倒伏参数的影响大于‘泰优 553’。总之, 苗期合理喷施多效唑能够提高水稻产量和成熟期的抗倒伏能力, 但不同品种的长效效果可能不一样。

关键词: 优质晚籼稻; 多效唑; 苗期; 抗倒伏能力

中图分类号: S511.05

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2024)03-0001-09

Effects of spraying paclobutrazol at different leaf age in the seedling stages on lodging characteristics of high-quality *indica* rice

LIU Yuxi¹, XIONG Jiaming¹, WU Jianjun², YANG Xiaoyan³, WANG Yue¹, HU Yajun¹, CHEN Guanghui^{1*}

(1.College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2.Huarong County Bureau of Agriculture and Rural Affairs, Yueyang, Hunan 414299, China; 3.Changsha Zhenong Agricultural Technology Co. Ltd, Changsha, Hunan 410145, China)

Abstract: In this study, we took the high-quality late *indica* rice ‘Taiyou 553’ and ‘Yuzhenxiang’ as the test materials, and sprayed rice seedlings with paclobutrazol(15% paclobutrazol 1 500 g with 750 kg water) at the one-leaf-one-center stage and the two-leaf-one-center stage, and sprayed water as CK. At the maturity stage, we measured the agronomic traits and yield of rice, the physical traits of the stalks, the mechanics and lodging resistance traits, and analyzed the correlation between the lodging resistance traits of the plants and the main stem traits. The results showed that the spraying of paclobutrazol significantly increased the yield of ‘Taiyou 553’ in both periods, while it did not significantly increase the yield of ‘Yuzhenxiang’, in which the yields of ‘Taiyou 553’ in creased by 20.63% and 15.29% under the treatments of one-leaf-one-center stage and two-leaf-one-center stage, respectively, compared with the control treatment. Overall, the spraying had the tendency to reduce the plant height, shorten the internode length, increase the internode thickness and

收稿日期: 2023-10-20

修回日期: 2024-06-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300509)

作者简介: 刘玉喜(1999—), 男, 湖南郴州人, 硕士研究生, 主要从事水稻高产高效栽培研究, 1206364281@qq.com; *通信作者, 陈光辉, 博士, 教授, 主要从事水稻高产高效栽培研究, cgh68@163.com

stem node wall thickness of the two rice varieties at the maturity stage, which in turn increased the internode fullness and fracture bending moment, and improved the lodging resistance. In addition, the spraying at the two-leaf-one-center stage improved the lodging resistance of 'Yuzhenxiang' more than that at the one-leaf-one-center stage, in which the lodging resistance index of 'Yuzhenxiang' under two-leaf-one-center treatment increased significantly by 36.46% compared with control, while the difference between the one-leaf-one-center stage treatment and the control treatment was not significant. The effect of paclobutrazol on the lodging resistance parameter of 'Yuzhenxiang' was higher than that of 'Taiyou 553'. Reasonable spraying of paclobutrazol at the seedling stage could improve the yield and lodging resistance of rice at the maturity stage, with its long-lasting effect depending on the rice varieties.

Keywords: high-quality *indica* rice; paclobutrazol; seedling stage; lodging resistance

倒伏是水稻高产的主要制约因素,对稻米品质也产生显著的负面影响^[1-2]。倒伏的发生和倒伏程度受水稻自身株型性状、栽培方式和气候条件等综合影响^[3-4]。前人^[5-7]研究发现,粳稻在株高和形态特性方面优于籼稻,粳稻比籼稻具有更好的抗倒伏能力。蒋明金等^[8]发现,播栽方式主要影响水稻茎秆长度、基部节间形态结构和化学成分含量,从而影响水稻茎秆抗倒伏能力。雷小龙等^[9]研究发现,人工栽插的水稻比机插的具有更高的抗倒伏能力,人工栽插的水稻基部节间短,茎粗壁厚,秆型指数、茎鞘充实度高,弯曲应力大,最终表现为植株折断弯矩大,抗倒伏能力强。提高环境中 CO₂ 浓度也能诱导水稻基部节间的淀粉的沉积,提高茎秆的充实度,从而提高水稻的抗倒伏能力^[10]。总的来说,抗倒伏能力较强的水稻主要表现为植株较矮,重心高度较低,节间长度较短,基部节间较粗,茎壁较厚,节间充实度较高^[11-13]。

提高抗倒伏能力的措施主要是选育抗倒伏品种^[14-15]、优化种植条件、水肥管理^[16-18]和化学调控等^[19]。化学调控是除遗传育种和栽培管理外最直接、有效的方法^[20]。多效唑作为一种人工合成的植物生长调节剂被广泛应用于水稻抗倒伏^[20-21]。胡杨等^[22]研究发现,水稻拔节前期叶面喷施 600 mg/L 的多效唑,明显降低了植株高度与重心高度,缩短了基部 3 个节间的长度,提高了水稻产量和收获指数。多效唑随分蘖肥一起撒施也能降低水稻株高和节间长度,提高水稻的抗倒伏能力^[23-24]。肖志芳等^[25]研究表明,水稻 1 叶 1 心期喷施 150 mg/L 多效唑显著增加秧苗绿叶数、白根数、总根数、茎基宽,控高效果显著,能够培育适宜机插的矮壮秧苗。可见多效唑具有培育矮壮苗和控高的作用,但一般认为不同品种对多效唑的敏感性具有差异,相对杂交籼

稻,多效唑对常规粳稻和常规籼稻株高的调控效果更好^[26];另外,多效唑对株高较高的水稻品种比株高较低的品种的调控作用更大。

随着人们生活水平的提高,南方高档优质籼稻种植面积逐年扩大,部分高档优质籼稻易出现倒伏问题。本试验以高档优质籼稻为研究对象,研究苗期不同叶龄喷施多效唑对水稻成熟期的抗倒伏能力的影响,旨在探究多效唑培育矮壮秧的同时是否对提升水稻抗倒伏能力具有长效效应。

1 材料与方 法

1.1 材 料

水稻品种为杂交优质晚籼稻‘泰优 553’(株高 114.6 cm 左右)和常规优质晚籼稻‘玉针香’(株高 119.0 cm 左右),‘泰优 553’和‘玉针香’均获得国家优质稻品种食味品质鉴评金奖。多效唑可湿性粉剂(有效成分含量为 15%)由江苏七洲绿色化工股份有限公司提供。

1.2 试验设计和田间管理

试验于 2021 年在长沙市长沙县路口镇明月村基地(113°14'E, 28°24'N)进行。多效唑喷施时期为 1 叶 1 心期和 2 叶 1 心期,以喷施清水为 CK,每公顷稻田使用 15% 多效唑 1 500 g,兑水 750 kg 喷施。TCK 示‘泰优 553’不喷施多效唑, TOP 示‘泰优 553’于 1 叶 1 心期喷施多效唑, TTP 示‘泰优 553’于 2 叶 1 心期喷施多效唑; YCK 示‘玉针香’不喷施多效唑, YOP 示‘玉针香’于 1 叶 1 心期喷施多效唑, YTP 示‘玉针香’于 2 叶 1 心期喷施多效唑。

6 月 25 日播种,采用抛秧盘育秧方式。秧盘规格为手抛 353 孔,外观尺寸为 60 cm×33 cm,孔口径为 23 mm,深度 18 mm,底径 11 mm。每个处理

育秧 6 盘, 使用秧田泥浆作为育秧床土和盖土。播种量为 ‘泰优 553’ 种子 35 g/盘, ‘玉针香’ 40 g/盘。各处理组合秧床间隔 1 m。

7 月 24 日采用手抛的方式移栽秧苗, 抛秧密度为 1 500 盘/hm²。各处理秧苗均于同一天完成。试验田总施氮量为 180 kg/hm², N、P₂O₅、K₂O 的施用比例为 2:1:1, 氮肥用于基肥、分蘖肥、穗肥的施用比例为 3:4:3, 磷肥作基肥一次性施用, 钾肥用于基肥与穗肥的施用比例为 1:1。每个处理设置 3 个重复。试验共 18 个小区, 小区面积为 33.35 m²。其他栽培管理方式参照当地高产田进行。

1.3 样品采集及指标测定

于水稻成熟期(齐穗后第 30 天), 随机取 3 个主茎, 测量其株高、重心高度、穗长、单穗质量、节间基部至穗顶长度、节间长度、节间中部粗度(去鞘、分长径和短径)、茎壁厚度以及穗下第 1、第 2、第 3、第 4 节间(N1、N2、N3、N4)去鞘的抗折力和节间(包括节间、叶片和叶鞘)的鲜质量和干质量。同时, 从各处理区随机选取长势一致、具有代表性的 7 蔸水稻, 将其根、茎、叶和穗分离, 于 105 °C 杀青 1 h, 80 °C 烘干至恒重, 称量各部位干质量, 以考查经济系数等指标。各节间干质量处理同上。

按杨世明等^[27]的方法测定重心高度, 用茎秆强度测定仪(型号 YYD-1, 托普仪器有限公司)测定抗折力。

按雷小龙等^[9]的方法计算相对重心高度、弯曲力矩、节间折断弯矩、断面模数、弯曲应力、倒伏指数、秆型指数、比茎重和经济系数。按李金才等^[28]的方法计算茎秆抗倒指数。

1.4 统计分析

采用 DPS 7.05 进行单因素差异显著性分析, 选用 Duncan's 新复极差法进行显著性检验; 采用 SPSS 26.0 进行双因素方差分析和 Person 相关性分析。

2 结果与分析

2.1 喷施多效唑时期对茎秆物理和产量性状的影响

2.1.1 株高、节间长度和实际产量

未喷施多效唑处理下, 2 个水稻品种实际产量的差异不显著, 但经济系数的差异显著(表 1)。2 个

叶龄期喷施多效唑均能提高 2 个水稻品种的产量, 其中 1 叶 1 心期和 2 叶 1 心期处理下 ‘泰优 553’ 的产量较对照处理分别显著增加了 20.63% 和 15.29%; 2 个叶龄期喷施多效唑对 ‘泰优 553’ 的经济系数影响不显著, 但 1 叶 1 心期喷施多效唑显著提高 ‘玉针香’ 的经济系数, 较对照提高了 11.65%。

表 1 不同处理 2 个水稻品种的实际产量和经济系数

品种	处理	实际产量/(t hm ⁻²)	经济系数/%
‘泰优 553’	TCK	(8.24±0.06)b	(52.40±0.39)A
	TOP	(9.94±0.44)a	51.67±1.01
	TTP	(9.50±0.55)a	52.04±1.13
‘玉针香’	YCK	8.41±0.33	(46.18±0.97)bB
	YOP	8.84±0.32	(51.56±1.44)a
	YTP	9.40±0.42	(45.78±1.31)b
F 值	V	1.86	7.18*
	P	0.02	5.18*
	V×P	1.27	6.69*

同列数据不同小写字母示同一水稻品种不同处理间的差异有统计学意义($P<0.05$); 不同大写字母示不喷施多效唑处理 2 个品种间的差异有统计学意义($P<0.05$); V、P 分别示品种和喷施时期, V×P 表示品种和多效唑喷施时期的交互效应; “*”示 0.05 水平显著。

从表 2 和表 3 可知, 2 个叶龄期喷施多效唑均能提高 2 个水稻品种的相对重心高度, 降低株高和 N2–N4 节长。与 CK 相比, 1 叶 1 心期喷施多效唑, ‘泰优 553’ 的株高以及 N2、N3、N4 节长分别降低了 9.50%、9.29%、26.00%、27.67%, ‘玉针香’ 的株高和 N2、N3、N4 节长分别降低了 5.33%、13.99%、10.50%、14.21%; 2 叶 1 心期喷施多效唑, ‘泰优 553’ 的株高以及 N2、N3、N4 节长分别降低了 2.78%、5.39%、11.14% 和 14.49%, ‘玉针香’ 品种的株高和 N2、N3、N4 节长分别降低了 2.84%、7.85%、10.23%、3.55%。可见, 1 叶 1 心期喷施多效唑对 2 个品种的株高和节长影响更大。2 个叶龄期喷施多效唑均提高 ‘泰优 553’ 的穗长, 但降低了 ‘玉针香’ 的穗长。2 个叶龄期喷施多效唑对 ‘泰优 553’ 的单穗质量影响不显著, 但 2 叶 1 心期喷施多效唑显著提高 ‘玉针香’ 的单穗质量。

品种和多效唑喷施时期除对经济系数、重心高度和相对重心高度具有显著交互效应外, 对实际产量、株高和单穗质量, 以及各节间长均无显著交互效应。

表2 不同处理2个水稻品种的株高、重心高度、相对重心高度、N1-N4节长和穗长

Table 2 Plant heights, center of gravity heights, relative center of gravity heights, N1-N4 knot lengths and ear lengths of two rice varieties under different treatments

品种	处理	株高/cm	重心高度/cm	相对重心高度/%	N1-N4节长/cm	穗长/cm
‘泰优 553’	TCK	(114.73±0.65)aB	(53.54±1.04)ab	46.74±0.86	(84.95±0.48)aB	(25.23±0.37)B
	TOP	(103.83±1.74)b	(50.73±1.13)b	48.84±0.51	(74.50±1.58)c	25.82±0.51
	TTP	(111.54±0.81)a	(54.26±0.82)a	48.65±0.69	(81.01±0.48)b	26.39±0.45
‘玉针香’	YCK	(125.22±0.84)aA	55.01±1.51	(43.95±1.22)b	(89.99±1.17)aA	(28.77±1.21)A
	YOP	(118.54±1.29)b	57.21±0.36	(48.30±0.54)a	(82.90±0.91)b	27.98±0.56
	YTP	(121.67±1.78)ab	54.78±0.98	(45.05±0.71)b	(88.02±1.21)a	28.71±0.46
F值	V	72.57**	16.10**	11.17**	47.48**	20.10**
	P	13.81**	0.39	7.74**	27.01**	1.69
	V×P	2.48	11.66**	6.10*	0.38	0.03

N1-N4节长表示从穗部向下第1至第4节间总长度;同列数据不同小写字母示同一水稻品种不同处理间的差异有统计学意义($P<0.05$);不同大写字母示不喷施多效唑处理2个品种间的差异有统计学意义($P<0.05$);V、P分别示品种和喷施时期, V×P表示品种和多效唑喷施时期的交互效应;“**”“*”分别示0.05、0.01水平显著。

表3 不同处理2个水稻品种的节间长度和单穗质量

Table 3 Internode lengths and panicle weights of two rice varieties under different treatments

品种	处理	节间长度/cm				单穗质量/g
		N1	N2	N3	N4	
‘泰优 553’	TCK	38.41±0.57	(22.06±0.27)a	(14.54±0.62)aB	(9.94±0.47)aB	3.95±0.16
	TOP	36.54±0.68	(20.01±0.34)b	(10.76±0.98)b	(7.19±0.26)c	3.73±0.30
	TTP	38.72±0.98	(20.87±0.27)b	(12.92±0.90)ab	(8.50±0.42)b	4.22±0.17
‘玉针香’	YCK	35.83±1.67	(23.30±1.13)a	(18.19±0.41)aA	(12.67±0.81)A	(4.22±0.27)b
	YOP	35.71±1.11	(20.04±0.45)b	(16.28±0.63)b	10.87±0.66	(4.01±0.32)b
	YTP	38.00±0.82	(21.47±0.22)ab	(16.33±0.56)b	12.22±0.46	(5.05±0.12)a
F值	V	0.72	0.90	32.37**	61.28**	5.25*
	P	5.97*	11.63**	2.00	7.96**	10.09**
	V×P	0.00	0.72	1.81	0.00	1.30

同列数据不同小写字母示同一水稻品种不同处理间的差异有统计学意义($P<0.05$);不同大写字母示不喷施多效唑处理2个品种间的差异有统计学意义($P<0.05$);V、P分别示品种和喷施时期, V×P表示品种和多效唑喷施时期的交互效应;“**”“*”分别示0.05、0.01水平显著。

2.1.2 节间物理性状和主茎充实度

由表4和表5可知,未喷施多效唑处理,除‘泰优 553’N1节间茎壁厚度显著高于‘玉针香’的, N2和N3节间比茎重显著低于‘玉针香’的外,2个水稻品种其他节间物理性状差异均不显著。2个叶龄期喷施多效唑对‘泰优 553’4个节间的节间粗度和比茎重影响均不显著,但2叶1心期喷施多效唑能显著提高‘玉针香’4个节间的节间粗度和N2、N3、N4节的比茎重。2个叶龄期喷施多效唑处理均能提高

2个水稻品种N1-N3节间的茎壁厚度和秆型指数;1叶1心期喷施多效唑,‘泰优 553’各节间的茎壁厚度和秆型指数的提高幅度更大;2叶1心期喷施多效唑,‘玉针香’4个节间的茎壁厚度和秆型指数的提高幅度更大。

品种和多效唑喷施时期对4个节间粗度和秆型指数、N3节的茎壁厚度,以及N2、N3和N4节的比茎重均具有显著的交互效应。

表 4 不同处理 2 个水稻品种的主茎节间粗度和茎壁厚度

品种	处理	节间粗度				茎壁厚度			
		N1	N2	N3	N4	N1	N2	N3	N4
‘泰优 553’	TCK	2.42±0.05	3.77±0.08	4.56±0.12	5.27±0.10	(0.33±0.02)A	(0.36±0.01)b	(0.45±0.02)b	0.59±0.03
	TOP	2.50±0.10	4.25±0.23	4.70±0.12	5.04±0.16	0.35±0.01	(0.44±0.03)a	(0.53±0.02)a	0.58±0.02
	TTP	2.45±0.06	4.07±0.13	4.66±0.11	5.08±0.14	0.34±0.01	(0.40±0.02)ab	(0.50±0.02)a	0.58±0.02
‘玉针香’	YCK	(2.32±0.10)b	(4.02±0.15)b	(4.84±0.17)b	(5.41±0.21)b	(0.26±0.01)bB	(0.34±0.01)b	0.48±0.03	(0.52±0.03)b
	YOP	(2.21±0.07)b	(3.87±0.14)b	(4.64±0.15)b	(5.22±0.19)b	(0.32±0.01)a	(0.39±0.01)a	0.50±0.02	(0.57±0.02)ab
	YTP	(2.61±0.05)a	(4.63±0.11)a	(5.55±0.12)a	(6.24±0.14)a	(0.34±0.01)a	(0.41±0.01)a	0.55±0.02	(0.63±0.02)a
F 值	V	0.84	0.33	11.00**	17.43**	1.65	0.97	0.18	0.85
	P	5.98*	3.23	12.28**	10.95**	0.95	0.23	0.23	2.04
	V×P	9.75**	8.92**	14.56**	9.42**	1.65	2.57	6.50*	1.88

同列数据不同小写字母示同一水稻品种不同处理间的差异有统计学意义($P<0.05$); 不同大写字母示不喷施多效唑处理 2 个品种间的差异有统计学意义($P<0.05$); V、P 分别示品种和喷施时期, V×P 表示品种和多效唑喷施时期的交互效应; “*”“**”分别示 0.05、0.01 水平显著。

表 5 各处理下 2 个水稻品种的主茎节间秆型指数和比茎重

品种	处理	秆型指数/%				比茎重/(mg·cm ⁻¹)			
		N1	N2	N3	N4	N1	N2	N3	N4
‘泰优 553’	TCK	(0.27±0.01)b	(0.42±0.01)b	(0.51±0.02)b	(0.59±0.01)b	4.55±0.18	(6.77±0.23)B	(9.01±0.45)B	13.31±0.71
	TOP	(0.32±0.02)a	(0.55±0.04)a	(0.60±0.02)a	(0.65±0.02)a	4.70±0.38	8.25±1.01	12.15±1.55	14.88±1.79
	TTP	(0.29±0.01)ab	(0.48±0.02)ab	(0.55±0.02)b	(0.60±0.02)ab	5.02±0.24	8.06±0.46	11.42±0.76	15.00±0.88
‘玉针香’	YCK	(0.24±0.01)b	(0.42±0.02)b	(0.50±0.02)b	(0.56±0.02)b	(5.06±0.39)a	(9.38±0.64)bA	(14.00±0.73)bA	(15.68±1.40)b
	YOP	(0.24±0.01)b	(0.43±0.02)b	(0.51±0.02)b	(0.58±0.02)b	(4.15±0.29)b	(8.95±0.67)b	(12.20±1.11)b	(14.65±1.46)b
	YTP	(0.28±0.01)a	(0.50±0.01)a	(0.60±0.01)a	(0.67±0.01)a	(5.46±0.14)a	(12.55±0.74)a	(18.70±1.39)a	(22.17±1.43)a
F 值	V	15.75**	4.81*	1.57	0.01	0.04	12.17**	8.75**	5.90*
	P	0.03	0.00	0.79	1.58	8.71**	5.25*	5.42*	7.14*
	V×P	11.00**	9.33**	17.72**	15.35**	3.20	6.51*	8.52**	6.70*

同列数据不同小写字母示同一品种不同处理间的差异有统计学意义($P<0.05$); 不同大写字母示不喷施多效唑处理 2 个品种间的差异有统计学意义($P<0.05$); V、P 分别示品种和喷施时期, V×P 表示品种和多效唑喷施时期的交互效应; “*”“**”分别示 0.05、0.01 水平显著。

2.2 不同时期喷施多效唑对茎秆力学特性及抗倒伏性的影响

2.2.1 茎秆力学特性

从表 6 和表 7 可知, 未喷施多效唑处理下, ‘泰优 553’N1 节间的弯曲应力、N4 节间的弯曲力矩和 N3 节间的抗折力均显著低于‘玉针香’的, 2 个水稻品种其他节间之间的断面模数、弯曲应力、弯曲力矩和节间抗折力差异均不显著。整体上, 2 个叶龄期喷施多效唑对‘泰优 553’4 个节间的弯曲力矩、节

间抗折力和 2 个水稻品种 N2、N3、N4 节间的弯曲应力影响均不显著, 但 2 叶 1 心期喷施多效唑显著提高‘玉针香’4 个节间的断面模数、弯曲力矩以及 N2、N3、N4 节的抗折力。

品种和多效唑喷施时期对 4 个节间的断面模数、N1 节的弯曲应力和 N2、N3 节的抗折力以及 N2、N3、N4 节的弯曲力矩均具有显著或极显著的交互效应。

表6 不同处理2个水稻品种的主茎节间断面模数和弯曲应力

Table 6 Section modulus and bending stress of main stem internode of two rice varieties under different treatments

品种	处理	断面模数/mm ³				弯曲应力/(×10 ⁶ N m ⁻²)			
		N1	N2	N3	N4	N1	N2	N3	N4
‘泰优 553’	TCK	2.55±0.18	(7.57±0.45)b	13.59±1.05	22.65±1.61	(8.38±0.47)abB	3.12±0.39	2.45±0.26	3.11±0.30
	TOP	2.86±0.29	(11.76±1.85)a	16.18±1.10	20.44±1.73	(7.28±0.35)b	2.80±0.47	3.26±0.58	3.34±0.52
	TTP	2.70±0.20	(9.80±0.94)ab	15.39±0.95	20.85±1.51	(8.85±0.43)a	2.81±0.34	3.36±0.35	3.62±0.31
‘玉针香’	YCK	(2.06±0.23)b	(8.36±0.85)b	(16.70±1.90)b	(22.82±2.74)b	(10.47±0.47)A	3.87±0.29	3.41±0.47	3.10±0.34
	YOP	(2.01±0.17)b	(8.70±0.90)b	(15.42±1.68)b	(22.16±2.56)b	10.33±1.45	3.81±0.28	3.04±0.23	3.10±0.20
	YTP	(3.13±0.14)a	(13.39±0.87)a	(24.69±1.72)a	(35.19±1.91)a	8.16±0.49	3.27±0.16	3.07±0.18	2.69±0.31
F 值	V	1.01	0.05	9.22**	16.65**	2.10	4.86*	0.48	2.71
	P	5.17*	1.27	9.10**	11.64**	0.14	0.63	0.03	0.03
	V×P	9.10**	7.57**	12.82**	10.28**	5.25*	0.70	0.01	0.92

同列数据不同小写字母示同一品种不同处理间的差异有统计学意义($P<0.05$);不同大写字母示不喷施多效唑处理2个品种间的差异有统计学意义($P<0.05$);V、P分别示品种和喷施时期,V×P表示品种和多效唑喷施时期的交互效应;“*”“**”“***”分别示0.05、0.01水平显著。

表7 不同处理2个水稻品种的主茎节间弯曲力矩和抗折力

Table 7 Bending moment and bending resistance of main stem of two rice varieties under different treatments

品种	处理	弯曲力矩/(N cm)				节间抗折力/N			
		N1	N2	N3	N4	N1	N2	N3	N4
‘泰优 553’	TCK	4.91±0.21	8.16±0.31	11.33±0.33	(14.55±0.46)B	1.65±0.12	1.84±0.25	(2.72±0.46)B	5.70±0.83
	TOP	5.24±0.41	8.70±0.60	11.32±0.63	13.34±0.70	1.65±0.19	2.57±0.55	4.13±0.76	5.04±0.60
	TTP	5.71±0.35	9.38±0.51	12.42±0.50	14.88±0.51	1.84±0.09	2.06±0.22	4.01±0.42	5.69±0.33
‘玉针香’	YCK	(5.00±0.43)b	(8.71±0.70)b	(12.83±0.90)b	(16.88±0.98)bA	1.66±0.19	(2.50±0.28)b	(4.31±0.53)bA	5.35±0.75
	YOP	(4.80±0.41)b	(7.94±0.64)b	(11.30±0.82)b	(14.17±1.09)b	1.59±0.19	(2.52±0.20)b	(3.59±0.37)b	5.25±0.51
	YTP	(6.47±0.20)a	(11.02±0.30)a	(15.78±0.45)a	(20.56±0.68)a	2.01±0.16	(3.45±0.30)a	(5.89±0.39)a	7.45±0.85
F 值	V	0.21	0.69	7.29*	17.67**	0.13	3.78*	1.70*	2.71
	P	9.18**	12.62**	20.52**	26.25**	3.47	0.37	4.52*	5.64*
	V×P	2.86	5.17*	7.48*	9.81**	0.49	4.34*	5.63*	1.65

同列数据不同小写字母示同一品种不同处理间的差异有统计学意义($P<0.05$);不同大写字母示不喷施多效唑处理2个品种间的差异有统计学意义($P<0.05$);V、P分别示品种和喷施时期,V×P表示品种和多效唑喷施时期的交互效应;“*”“**”“***”分别示0.05、0.01水平显著。

2.2.2 植株抗倒伏能力

由表8可知,未喷施多效唑处理下,除‘玉针香’N3节间的折断弯矩显著高于‘泰优553’外,2个品种其他节间的折断弯矩以及各节间的倒伏指数和茎秆整体的抗倒指数之间差异不显著。2个叶龄期喷施多效唑对2个水稻品种的倒伏指数以及‘泰优553’4个节间的折断弯矩和茎秆抗倒指数影响均

不显著;2叶1心期喷施多效唑显著提高‘玉针香’N2和N3节的折断弯矩以及‘玉针香’的茎秆抗倒指数,其中2叶1心期处理下‘玉针香’茎秆抗倒指数较对照显著增加了36.46%;2个叶龄期喷施多效唑降低了2个水稻品种N3和N4节的倒伏指数。

品种和多效唑喷施时期除对N2、N3节的折断弯矩以及茎秆抗倒指数具有显著的交互效应外,对其他节间的折断弯矩和倒伏指数均无显著交互效应。

表 8 不同处理 2 个水稻品种的主茎抗倒伏能力

Table 8 Lodging resistance of main stems of two rice varieties under different treatments

品种	处理	节间折断弯矩/(N cm)				倒伏指数/%				茎秆抗倒指数
		N1	N2	N3	N4	N1	N2	N3	N4	
‘泰优 553’	TCK	2.11±0.15	2.35±0.32	(3.47±0.58)B	7.27±1.06	238.34±10.90	396.50±48.01	402.51±66.63	233.88±30.43	5.17±0.94
	TOP	2.10±0.24	3.27±0.70	5.27±0.97	6.42±0.76	261.69±16.45	448.02±143.72	269.13±43.97	225.76±22.83	8.37±1.70
	TTP	2.34±0.12	2.63±0.28	5.11±0.53	7.26±0.42	244.63±10.97	395.91±49.03	273.18±40.74	211.40±15.30	7.42±0.80
‘玉针香’	YCK	2.12±0.24	(3.19±0.35)b	(5.49±0.67)bA	6.82±0.96	245.58±15.56	297.64±38.62	278.27±51.90	291.33±49.95	(7.90±0.95)b
	YOP	2.03±0.25	(3.21±0.26)b	(4.58±0.47)b	6.70±0.64	272.81±46.43	262.22±33.42	265.23±31.60	227.10±28.54	(6.28±0.66)b
	YTP	2.57±0.20	(4.39±0.38)a	(7.51±0.50)a	9.50±1.08	264.61±21.86	264.12±21.96	218.53±17.07	289.44±86.16	(10.78±0.74)a
F 值	V	0.13	3.78	1.70*	2.71	0.32	4.09	0.70	0.70	1.35
	P	3.47	0.37	4.52*	5.64*	0.21	0.10	0.37	0.26	0.11
	V×P	0.49	4.34*	5.63*	1.65	0.03	0.12	0.53	0.65	5.32*

同列数据不同小写字母示同一品种不同处理间的差异有统计学意义($P<0.05$);不同大写字母示不喷施多效唑处理 2 个品种间的差异有统计学意义($P<0.05$); V、P 分别示品种和喷施时期, V×P 表示品种和多效唑喷施时期的交互效应; “*”“**”“***”分别示 0.05、0.01 水平显著。

2.3 植株抗倒伏特性与主要物理性状、力学特性的相关性

不同叶龄期喷施多效唑水稻植株的主要物理性状、力学特性与节间折断弯矩、倒伏指数、茎秆抗倒指数之间的相关分析结果(表 9) 表明, N1、N2、N3、N4 节间的折断弯矩与单穗质量、穗长、节间粗度、茎壁厚度、秆型指数、比茎重、断面模数、弯曲力矩和节间抗折力呈显著或极显著正相关; N2、N3、N4 节间的折断弯矩与重心高度、相对重心高度和节间长度呈负相关。N1、N2、N3、

N4 节间的倒伏指数与弯曲应力、节间抗折力和节间折断弯矩呈显著或极显著负相关; 部分节间的倒伏指数与株高、重心高度、相对重心高度和节间长度呈正相关。N3 节的倒伏指数与节间粗度、茎壁厚度、秆型指数、比茎重、断面模数呈极显著负相关。茎秆抗倒指数与单穗质量、穗长、节间粗度、茎壁厚度、秆型指数、比茎重、断面模数、弯曲应力、弯曲力矩和节间折断弯矩呈极显著正相关, 与株高、相对重心高度和节间长度呈负相关, 与重心高度呈极显著负相关。此外, 茎秆抗倒指数与各节

表 9 节间折断弯矩和倒伏指数与植株主要物理性状、力学特性的相关系数

Table 9 Correlation coefficients between internode breaking moment and lodging resistance index and main physical and mechanical properties of plants

指标	相关系数								
	J_{N1}	J_{N2}	J_{N3}	J_{N4}	Z_{N1}	Z_{N2}	Z_{N3}	Z_{N4}	茎秆抗倒指数
株高	0.032	0.034	0.004	0.057	0.084	-0.166	0.074	0.226	-0.105
重心高度	0.097	-0.126	-0.226	-0.231	0.066	0.035	0.262	0.284*	-0.376**
相对重心高度	0.066	-0.169	-0.232	-0.301*	-0.027	0.225	0.179	0.046	-0.266
单穗质量	0.454**	0.365**	0.446**	0.334*	0.261	-0.124	-0.121	0.256	0.386**
节间长度	0.381**	-0.224	-0.249	-0.144	-0.004	0.200	0.247	0.353**	-0.152
穗长	0.295*	0.321*	0.401**	0.306*	0.083	-0.170	-0.253	0.041	0.348**
节间粗度	0.688**	0.568**	0.608**	0.515**	-0.247	-0.179	-0.373**	0.005	0.552**
茎壁厚度	0.414**	0.646**	0.697**	0.610**	-0.208	-0.295*	-0.561**	-0.323*	0.717**
秆型指数	0.510**	0.494**	0.637**	0.554**	-0.204	-0.087	-0.449**	-0.171	0.637**
比茎重	0.585**	0.733**	0.693**	0.613**	-0.009	-0.414**	-0.426**	-0.163	0.699**
断面模数	0.692**	0.665**	0.673**	0.610**	-0.241	-0.245	-0.424**	-0.088	0.604**
弯曲应力	0.372**	0.534**	0.683**	0.501**	-0.510**	-0.742**	-0.714**	-0.653**	0.302**
弯曲力矩	0.597**	0.390**	0.497**	0.427**	0.166	-0.031	-0.174	0.187	0.440**
节间抗折力	0.664**	0.817**	0.900**	0.881**	-0.352**	-0.485**	-0.634**	-0.493**	0.883**
节间折断弯矩	1.000**	1.000**	1.000**	1.000**	-0.654**	-0.705**	-0.794**	-0.670**	0.883**
茎秆抗倒指数	0.480**	0.762**	0.984**	0.624**	-0.224	-0.415**	-0.785**	-0.284*	1.000**

J_{N1} 、 J_{N2} 、 J_{N3} 、 J_{N4} 分别示 N1、N2、N3、N4 节间折断弯矩; Z_{N1} 、 Z_{N2} 、 Z_{N3} 、 Z_{N4} 分别示 N1、N2、N3、N4 节间的倒伏指数; “*”“**”“***”分别示 0.05、0.01 水平显著。

间的折断弯矩呈极显著正相关,尤其是N3节折断弯矩与茎秆抗倒指数的相关系数为0.984 ($P<0.01$);而茎秆抗倒指数与N2、N3和N4节间的倒伏指数呈显著或极显著负相关,N3节倒伏指数与茎秆抗倒指数相关系数达-0.785 ($P<0.01$)。说明基部节间的物理性状与茎秆整体的抗倒伏能力相关程度更高。

3 结论与讨论

施用多效唑可以提高水稻分蘖能力,进而提高产量。成臣等^[29]研究认为,1叶1心期喷施适宜浓度的多效唑可显著提高水稻秧苗素质,增加有效穗数和产量;但是适宜的施用浓度因品种而异。多效唑施用浓度过高,会导致千粒质量和产量降低^[30]。周伟等^[31]研究发现,1叶1心期喷施150 mg/kg多效唑溶液,移栽秧龄为32 d时,秧苗最为矮壮,移栽后返苗快,符合机械插秧的工作要求,且水稻产量明显增加。石泉等^[32]研究发现,2叶1心期喷施多效唑,水稻的产量最高;在多效唑喷施时期与播种量互作效应中,以播种量105 g/盘与1叶1心期喷施多效唑的处理产量最高。本研究中,2个时期喷施多效唑,‘泰优553’和‘玉针香’的水稻产量均高于对照,说明苗期喷施多效唑处理有助于水稻产量的提高,这与前人^[32]研究结果一致。

水稻的抗倒伏能力与其茎秆的物理性状和力学特性密切相关^[13,33]。多效唑处理会显著影响植株茎秆的性状和抗倒伏能力^[34]。杨志鑫^[35]研究发现,多效唑处理显著降低了水稻株高和节间长度,增加了节间粗度、茎壁厚度、弯曲力矩和抗折力,提升了水稻抗倒伏能力。吴海洋等^[23]研究发现多效唑能够显著降低水稻株高和重心高度,提高基部节间抗折力。本研究结果发现,2个时期喷施多效唑处理均降低了‘泰优553’和‘玉针香’的株高,缩短了‘泰优553’N2、N3、N4节和‘玉针香’N2、N3节的节间长度,增加了‘泰优553’N2、N3节和‘玉针香’N1、N2、N4节间的茎壁厚度,说明多效唑处理在一定程度上能通过缩短节长、提高茎壁厚度来提高水稻的抗倒伏能力。

不同品种对多效唑的敏感程度不一样^[26],不同时期施用多效唑对植株茎秆性状影响程度也不一样^[36]。本研究中,与1叶1心期喷施处理相比,2叶1心期喷施多效唑显著提高了‘玉针香’4个节间

的粗度、秆型指数、比茎重、断面模数和弯曲力矩,以及N2、N3节的抗折力、节间折断弯矩和茎秆抗倒指数;而1叶1心期喷施多效唑相较于2叶1心期喷施多效唑处理更能降低‘泰优553’4个节间长度,提高N2和N3节的节间粗度、茎壁厚度、秆型指数、节间抗折力和茎秆抗倒指数。品种和多效唑喷施时期对4个节间粗度、秆型指数和断面模数,以及N2、N3、N4节间的比茎重、弯曲力矩和茎秆抗倒指数存在显著的交互效应。由此说明品种和喷施时期能显著影响多效唑提升水稻茎秆抗倒伏能力的效果。对于‘玉针香’来说,2叶1心期喷施多效唑更能提高其茎秆力学特性,从而提高其抗倒伏能力。此外,本研究中,喷施多效唑处理对‘泰优553’各节间的节粗、比茎重、弯曲力矩、抗折力、节间折断弯矩和茎秆抗倒指数均无显著影响,可能是因为‘泰优553’株高、重心高度、穗长和基部节间长度较‘玉针香’的低,具有较好的茎秆特性,再加上对多效唑的敏感程度较‘玉针香’弱。刘晓娜等^[26]研究发现不同品种对多效唑的敏感程度不同,相对于杂交籼稻,多效唑对常规粳稻和常规籼稻的调控效果更明显。

综上所述,苗期不同叶龄喷施多效唑处理均有降低水稻成熟期的株高,缩短其节间长度,增加节间粗度和茎节壁厚度的趋势,从而提高节间充实度和折断弯矩,提升水稻抗倒伏能力。水稻苗期适量喷施多效唑对水稻成熟期的抗倒伏能力具有长效效应。2叶1心期喷施多效唑处理较1叶1心期更能提高‘玉针香’的抗倒伏能力,常规优质稻品种‘玉针香’相较于杂交优质稻品种‘泰优553’对多效唑更加敏感,苗期喷施多效唑对水稻抗倒伏的长效效应大小与水稻品种类型有关。

参考文献:

- [1] 郎有忠,杨晓东,王美娥,等. 结实阶段不同时期倒伏对水稻产量及稻米品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2011, 25(4): 407-412.
- [2] 赵新勇,邵在胜,吴艳珍,等. 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): 980-989.
- [3] 滕祥勇,王金明,李鹏志,等. 水稻抗倒伏性的影响因素及评价方法研究进展[J]. 福建农业学报, 2021, 36(10): 1245-1254.
- [4] 欧阳慧,杨贤莉,王立志,等. 水稻抗倒伏性评价方法及机理的研究现状与展望[J]. 中国稻米, 2023, 29(2):

- 12–17.
- [5] 刘伟. 寒地水稻抗倒伏品种筛选[J]. 中国稻米, 2014, 20(4): 100–101.
- [6] 龚金龙, 邢志鹏, 胡雅杰, 等. 籼、粳超级稻茎秆抗倒支撑特征的差异研究[J]. 中国水稻科学, 2015, 29(3): 273–281.
- [7] 姜元华, 张洪程, 赵可, 等. 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.
- [8] 蒋明金, 大川泰一郎, 马均. 播栽方式对 2 个籼稻品种抗倒伏能力的影响[J]. 四川农业大学学报, 2020, 38(4): 391–398.
- [9] 雷小龙, 刘利, 苟文, 等. 种植方式对杂交籼稻植株抗倒伏特性的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(10): 1814–1825.
- [10] ZHAO X Y, ZHOU N, LAI S K, et al. Elevated CO₂ improves lodging resistance of rice by changing physicochemical properties of the basal internodes[J]. *The Science of the Total Environment*, 2019, 647: 223–231.
- [11] 张俊, 李刚华, 宋云攀, 等. 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.
- [12] 邢志鹏, 吴培, 朱明, 等. 机械化种植方式对不同品种水稻株型及抗倒伏能力的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 52–62.
- [13] 江云珠, 沈希宏, 曹立勇. 水稻茎秆性状的研究进展[J]. 中国稻米, 2012, 18(2): 1–7.
- [14] HIRANO K, OKUNO A, HOBOT, et al. Utilization of stiff culm trait of rice smos1 mutant for increased lodging resistance[J]. *PLoS One*, 2014, 9(7): e96009.
- [15] OKUNO A, HIRANO K, ASANO K, et al. New approach to increasing rice lodging resistance and biomass yield through the use of high gibberellin producing varieties[J]. *PLoS One*, 2014, 9(2): e86870.
- [16] 孙永健, 陈宇, 孙园园, 等. 不同施氮量和栽插密度下三角形强化栽培杂交稻抗倒伏性与群体质量的关系[J]. 中国水稻科学, 2012, 26(2): 189–196.
- [17] 王振昌, 程鑫鑫, 谢毅, 等. 不同水肥模式对籼稻和粳稻抗倒伏性能的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(9): 108–118.
- [18] CHEN L M, YI Y H, WANG W X, et al. Innovative furrow ridging fertilization under a mechanical direct seeding system improves the grain yield and lodging resistance of early indica rice in South China[J]. *Field Crops Research*, 2021, 270: 108184.
- [19] SHAH L, YAHYA M, ALI SHAH S M, et al. Improving lodging resistance: using wheat and rice as classical examples[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2019, 20(17): 4211.
- [20] 苏兰少. 水稻倒伏化学调控技术研究进展[J]. 青海农技推广, 2021(4): 18–21.
- [21] 李珊, 吕艳梅, 肖层林. 杂交水稻制种及生产的化学调控技术研究进展[J]. 作物研究, 2011, 25(4): 400–404.
- [22] 胡杨, 段斌, 何世界, 等. 豫南直播稻多效唑调控试验研究[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(5): 68–72.
- [23] 吴海洋, 姜钦龙, 李云, 等. 多效唑对万象优华占茎秆及产量性状的影响[J]. 杂交水稻, 2020, 35(6): 57–59.
- [24] 周建霞, 丰兆平, 陈晓阳, 等. 分蘖期施用多效唑对杂交水稻 C 两优 817 产量及主要性状的影响[J]. 杂交水稻, 2021, 36(2): 72–74.
- [25] 肖志芳, 陈光辉. 早稻苗期喷施不同植物生长调节剂对秧苗生长特性的影响[J]. 分子植物育种, 2020, 18(13): 4435–4442.
- [26] 刘晓娜, 朱德峰, 陈惠哲. 多效唑对我国水稻主导品种机插秧苗控高效效应的研究[J]. 中国稻米, 2011, 17(5): 14–17.
- [27] 杨世民, 谢力, 郑顺林, 等. 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.
- [28] 李金才, 尹钧, 魏凤珍. 播种密度对冬小麦茎秆形态特征和抗倒指数的影响[J]. 作物学报, 2005, 31(5): 662–666.
- [29] 成臣, 雷凯, 程慧煌, 等. 苗期不同浓度多效唑对南方晚粳秧苗素质、茎蘖动态及产量的影响[J]. 中国水稻科学, 2020, 34(2): 150–158.
- [30] 孙长占, 邵喜文, 赵炳南, 等. 多效唑对水稻产量性状及产量的影响[J]. 吉林农业大学学报, 1993, 15(S1): 46–49.
- [31] 周伟, 王世伟, 左振朋, 等. 秧龄和多效唑浓度对机械插秧水稻秧苗素质及产量的影响[J]. 河北农业科学, 2019, 23(6): 40–43.
- [32] 石泉, 唐利忠, 杨国俊, 等. 播种量与多效唑喷施时期对湘南早稻产量的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2019, 45(5): 449–455.
- [33] 石英尧, 申广勤, 黄艳玲, 等. 不同抗倒伏能力水稻品种的相关性状表现研究[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(2): 533–537.
- [34] 鱼冰星, 王宏富, 王振华, 等. 多效唑对谷子茎秆特征及抗倒性的影响[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(8): 37–44.
- [35] 杨志鑫. 多效唑施用方式对水稻抗倒伏能力及产量的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2022.
- [36] 鱼冰星, 王宏富, 原向阳, 等. 多效唑和乙烯利对‘张杂谷 10 号’光合特性及产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(9): 17–26.

责任编辑: 毛友纯

英文编辑: 柳 正