

植物生长调节剂对再生稻头季抗倒伏能力和两季产量的影响

解振兴^{1, #} 张居念^{1, #} 林祁² 刘锋² 张初长³ 卓芳梅³ 姜照伟^{1, *} 卓传营²

(¹福建省农业科学院 水稻研究所, 福州 350018; ²尤溪县农业局, 福建 尤溪 365100; ³尤溪县梅仙镇农业技术推广站, 福建 尤溪 365101; [#]共同第一作者; ^{*}通讯联系人, E-mail: jiangzw1973@163.com)

Effect of Plant Growth Regulators on Rice Lodging Resistance and Grain Production of Main-crop and Ratooning Rice

XIE Zhenxing^{1, #}, ZHANG Junian^{1, #}, LIN Qi², LIU Feng², ZHANG Chuzhang³, ZHUO Fangmei³,
JIANG Zhaowei^{1, *}, ZHUO Chuanying²

(¹Rice Research Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350018, China; ²Agricultural Bureau of Youxi County, Youxi 365100, China;

³Meixian Agricultural Technical Extension Station, Youxi 365101, China; [#]These authors contributed equally to this work; ^{*}Corresponding author, E-mail: jiangzw1973@163.com)

Abstract: 【Objective】 The present study aims to evaluate the effect of plant growth regulators (PGRs) on rice lodging resistance and yield performance of ratoon rice. **【Method】** Jiafuzhan, Tianyouhuazhan, Yongyou 2640 were sampled with foliar application of paclobutrazol (PP₃₃₃), ethephon (ETH), trinexapac-ethyl (TE) at the initial jointing stage. The culm traits, mechanical index, grain yield and yield components of main-crop and ratooning rice were investigated. **【Result】** Yongyou 2640 had the strongest breaking resistance, plant thrust resistance and lodging resistance; Jiafuzhan had the longest internodes, the highest plant height, the maximum lodging index and the weakest lodging resistance among the three varieties while the lodging resistance of Tianyouhuazhan was between them. Compared with foliar application of water (control), application of PP₃₃₃ had no marked effect on internode length, plant height, culm wall thickness, but increased culm diameter of the 3rd internode (from the top), enhanced breaking resistance of the 4th (from the top) and the 3rd internodes, drove down lodging index of the 4th and 3rd internodes; application of ETH increased length of the 4th internode, culm diameter of the 3rd internode and plant height, but had no obvious effect on culm wall thickness, reduced lodging index of the 3rd internode; application of TE shortened length of the 4th and the 2nd (from the top) internodes and plant height, increased culm diameter of the 3rd internode and culm wall thickness of the 3rd and the 2nd internodes, strengthened breaking resistance of the 4th and the 3rd internodes, reduced lodging index. PP₃₃₃, TE decreased the grain production of main-crop but increased ratooning rice, while ETH decreased both main-crop and ratooning rice. Total grain production of Tianyouhuazhan and Yongyou 2640 was reduced by PGRs treatments, total yield of Jiafuzhan was increased by PP₃₃₃ and TE application while decreased by ETH. **【Conclusion】** Comprehensively, application of TE enhanced the plant lodging resistance without negative effect on total yield of ratooning rice, and thus it could be used as a practice to prevent lodging in rice production.

Key words: plant growth regulators; lodging; ratoon-season rice; culm traits; production

摘 要: 【目的】 为了探明植物生长调节剂对再生稻头季抗倒伏能力及两季产量的影响, **【方法】** 以佳辐占、天优华占和甬优 2640 为试验材料, 于拔节初期叶面喷施多效唑、乙烯利和抗倒酯, 研究不同植物生长调节剂对水稻头季茎秆特性、力学指标及两季产量形成的影响。 **【结果】** 甬优 2640 基部节间抗折力和植株抗推力最大, 抗倒伏能力强; 佳辐占基部节间最长, 株高最高, 倒伏指数高, 抗倒伏能力最差; 天优华占基部倒伏指数小, 抗倒伏能力介于前二者中间。与喷施清水对照相比, 多效唑处理植株节间长、株高、茎壁厚与对照差异较小, 增加了倒 3 节间(N₃)茎粗和倒 4 节间(N₄)和 N₃ 的抗折力, 降低了 N₄ 和 N₃ 的倒伏指数; 乙烯利处理则显著增加了 N₄ 长度, N₃ 茎粗和株高, 对茎壁厚没有明显影响, 增强了 N₃ 抗折力, 降低了 N₃ 倒伏指数; 抗倒酯处理缩短了 N₄、倒 2 节间(N₂)长, 降低株高, 增加 N₃ 茎粗和 N₃、N₂ 的茎壁厚度, 增强了 N₄、N₃ 的抗折力, 降低了各节间的倒伏指数。3 种植物生长调节剂处理均降低了头季产量, 多效唑和抗倒酯处理增加了再生季产量, 乙烯利降低了再生季产量。

收稿日期: 2018-06-13; 修改稿收到日期: 2018-11-28。

基金项目: 福建省属公益类科研院所基本科研专项 (2016R1020-6); 国家重点研发计划项目课题 (2017YFD0100105); 福建省农业科学院青年创新团队 (STIT2017-3-3); 再生稻安全生产技术研发与推广服务创新团队。

分析产量构成因素, 植物生长调节剂处理主要影响了总穗粒数, 头季总穗粒数减少, 再生季总穗粒数增加。天优华占和甬优 2640 两季总产量均较对照降低, 佳辐占总产量多效唑和抗倒酯处理较对照增加, 乙烯利处理较对照降低。【结论】抗倒酯处理增强了再生稻头季茎秆的抗倒伏能力, 而对两季总产量无显著影响, 对再生稻头季抗倒伏栽培具有现实意义。

关键词: 植物生长调节剂; 倒伏; 再生稻; 茎秆特性; 产量

中图分类号: Q945.7; S482.6; S511.01

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2019)02-0158-09

水稻对于保障我国粮食安全起着重要作用, 然而受种植大穗高生物量超级杂交稻、氮肥施用增多^[1], 机械化移栽和直播等轻简化栽培技术的推广^[2], 灌浆成熟期台风多发^[3]等因素的影响, 水稻倒伏风险加大, 制约了水稻高产稳产。水稻倒伏后群体结构遭到破坏, 光合作用和物质生产能力降低, 节间充实度变差, 直接影响产量和品质^[4-6]。再生稻由头季腋芽萌发而成, 正常情况下再生穗主要由倒 2—倒 3 节位腋芽的生长成穗^[7], 头季倒伏后, 阻碍了光合产物向倒 2—倒 4 节位运输, 造成再生穗以倒 5 和倒 6 节位腋芽萌发为主, 再生季有效穗数大幅减少, 产量降低 1/3 左右^[8], 群体内通风透光下降, 形成高温高湿的环境, 加剧水稻纹枯病、稻飞虱等病虫害危害, 极端情况下造成再生腋芽无法萌发, 再生季严重减产甚至绝收。因此, 提高水稻抗倒伏能力不仅对单季稻生产, 对再生稻栽培亦具有重要意义。

植物生长调节剂直接调节作物内源激素系统的平衡, 可以针对作物生长发育过程进行定向调控^[9], 在促进水稻种子萌发、抗逆性和灌浆等生育进程上广泛应用^[10]。“多效唑培育水稻壮秧技术”和“赤霉素调节杂交稻制种田花期技术”已作为常规栽培管理措施应用到水稻生产上^[11]。水稻内在抗倒伏能力与茎秆形态特征和机械强度、根系发达程度有关^[12], 多效唑抑制赤霉素的早期生物合成, 抗倒酯抑制赤霉素后期生物合成^[13], 乙烯通过与 GA 和 ABA 相互作用来调节水稻节间和不定根系的生长^[14]。关于多效唑的抗倒伏效应报道较多, 而对抗倒酯和乙烯利在水稻生产上抗倒伏应用研究较少。本研究选用适宜作再生稻种植的 3 个类型水稻品种, 叶面喷施多效唑、乙烯利和抗倒酯, 研究植物生长调节剂对水稻茎秆形态和力学指标的影响, 阐明生长调节剂对再生稻头季和再生季产量及产量形成的效应, 以期水稻抗倒伏栽培提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试品种为常规籼稻佳辐占、三系杂交籼稻天优华占和三系粳稻甬优 2640, 均为适宜福建

省作再生稻种植的品种^[15-17]。供试植物生长调节剂为抗倒酯(有效成分 130 g/L, 江苏辉丰农化股份有限公司生产), 用量为 900 mL/hm²; 40% 乙烯利(安阳全丰生物科技有限公司生产), 用量为 300 mL/hm²; 15% 多效唑可湿性粉剂(四川国光农化股份有限公司生产), 用量为 1350 g/hm², 各处理用水量均为 675 kg/hm²。于拔节初期叶面喷施, 以喷施清水作为对照。

1.2 试验设计

试验在福建省尤溪县梅仙镇下保村进行, 试验田肥力中等, 其中碱解氮 192 mg/kg、速效磷 15.3 mg/kg、速效钾 79 mg/kg、有机质 70 g/kg, 土壤 pH 值为 4.9。采用随机区组设计, 种植规格为 20 cm × 20 cm, 小区面积 20 m², 3 次重复。2017 年 3 月 14 日播种, 4 月 18 日移栽, 佳辐占于 6 月 18 日齐穗, 7 月 26 日收获; 天优华占于 6 月 26 日齐穗, 7 月 30 日收获; 甬优 2640 于 6 月 21 日齐穗, 7 月 30 日收获。头季收获时留桩高度 5 cm, 再生季三个品种统一于 10 月 5 日收获。头季总氮肥用量为 150 kg/hm², $m_{\text{基肥}} : m_{\text{分蘖肥}} : m_{\text{促花肥}} : m_{\text{保粒肥}} = 4 : 3 : 2 : 1$, 氮磷钾比例为 1 : 0.63 : 0.77, 基肥和分蘖肥分别于移栽前 2 d 和移栽后 7 d 施入, 肥料种类为氯化钾复合肥(N-P₂O₅-K₂O 含量 12 : 5 : 8), 促花肥和保粒肥分别于移栽后 38 d 和 48 d 施入, 肥料种类为复合肥(N-P₂O₅-K₂O 含量 16 : 16 : 16); 再生季总纯氮 172.5 kg/hm², 头季齐穗后 15 d 施纯氮 34.5 kg/hm²作促芽肥, 头季收割后 5 d 和 10 d 各施纯氮 69 kg/hm²作壮苗肥, 肥料种类为尿素。水分和病虫害防治等栽培管理技术措施与当地高产田管理一致。

1.3 测定项目和方法

头季齐穗后 25 d, 于每小区选取长势一致的 10 根单茎, 测量茎秆基部第 2 节间(N₂)、第 3 节间(N₃) 和第 4 节间(N₄)的抗折力, 然后将各个节间(包括穗部和穗下节)在节位连接处剪断, 保留相应部位的茎鞘和叶片, 称量鲜质量, 测量各个节间的长度, 之后去除叶片和茎鞘, 用卡钳表(DKG-5010 II)测量椭圆形茎秆的长、短轴处的外径粗和茎壁厚, 取平均值代表茎粗和茎壁厚^[18]。

表 1 植物生长调节剂对再生稻头季抗倒伏能力的影响
Table 1. Effect of PGRs on lodging resistance of main-season rice.

试验因素 Experiment factor	抗折力 Breaking resistance/kg			倒伏指数 Lodging index/(g cm g ⁻¹)			植株抗推力 Plant thrust resistance/kg
	N ₄	N ₃	N ₂	N ₄	N ₃	N ₂	
品种 Variety(V)							
佳辐占 Jiafuzhan	0.98±0.21 b	0.73±0.18 b	0.52±0.18 b	177.22±10.55 a	190.11±5.72 a	177.04±10.65 a	1.64±0.15 b
天优华占 Tianyouhuazhan	0.97±0.01 b	0.68±0.26 b	0.47±0.16 b	127.51±7.67 c	162.79±7.39 b	184.18±11.94 a	1.66±0.19 b
甬优 2640 Yongyou 2640	1.33±0.29 a	1.02±0.23 a	0.81±0.13 a	145.51±8.88 b	154.99±4.78 b	127.86±8.60 b	2.20±0.16 a
植物生长调节剂 PGR							
多效唑 PP ₃₃₃	1.15±0.31 a	0.85±0.34 b	0.57±0.23 a	147.20±6.10 b	171.80±7.43 b	173.05±6.98 a	1.89±0.09 a
乙烯利 ETH	1.02±0.36 b	0.81±0.26 b	0.61±0.22 a	166.75±7.96 a	169.25±12.04 b	163.67±11.11	1.81±0.10 ab
抗倒酯 TE	1.24±0.27 a	0.90±0.21 a	0.66±0.20 a	125.71±9.38 b	143.11±7.41 c	142.98±5.27 b	2.01±0.17 a
对照 Control	0.95±0.23 b	0.68±0.19 c	0.56±0.21 a	160.67±6.49 a	183.02±3.84 a	172.41±16.12 a	1.62±0.12 b
F 值 F value							
品种 Variety(V)	28.89**	36.15**	60.19**	22.73**	8.32**	19.32**	24.10**
植物生长调节剂 PGR	9.05**	7.21**	2.64 ^{ns}	8.90**	7.68**	3.03*	4.90**
V×PGR	3.16**	5.25**	1.75 ^{ns}	6.82**	2.36*	1.17 ^{ns}	3.81**

N₄、N₃ 和 N₂ 分别代表倒 4、倒 3 和倒 2 节间。同列后跟相同字母表示差异未达 0.05 显著水平(n=3, 最小显著差法); *和**分别表示差异达 0.05 和 0.01 显著水平, ns 表示差异不显著。下同。

PGR, Plant growth regulator; PP₃₃₃, Paclobutrazol; ETH, Ethephon; TE, Trinexapac-ethyl. N₄, N₃ and N₂ represent the 4th, 3rd and 2nd internodes from the top, respectively. Values followed by different letters are significantly different at 5% level(n=3, LSD). *and** mean significance at 5% and 1% levels, respectively; ns represents no significant differences. The same as in tables below.

1.3.1 抗折力测定

将待测节间置于支点距离为 5 cm 的支架上, 使用 YYD-1 型植物茎秆强度测定仪给待测节间施加压力, 直到茎秆折断, 此时仪器的读数即为该节间的抗折力。

1.3.2 植株抗推力

为了直观反映水稻群体在自然状态下抵抗外力(大风暴雨)的能力^[19], 于田间连续选择 10 株稻株, 将稻株距离地面 20 cm 处用绳子扎紧, 使用 YYD-1 型植物茎秆强度测定仪于捆扎处施加外力直至稻株倾斜 45°(自制一个边长为 20 cm 的正方形木板, 测定时将稻株推压至与木板的对角线重合即可), 此时仪器的读数即为植株抗推力, 同时测量株高。

1.3.3 抗倒伏指标的计算

弯曲力矩(g cm)=节间基部到穗顶的鲜质量(g)×节间基部到穗顶的长度(cm);

倒伏指数(g cm g⁻¹)=弯曲力矩(g cm)/抗折力(g)

1.3.4 产量和产量构成

头季和再生季成熟期每小区连续调查 20 株, 选择穗数接近平均数的 5 株考查有效穗数、每穗粒数、结实率和千粒重, 小区收割计产。

1.4 数据统计与分析

利用 Microsoft excel 2003 进行数据整理分析,

使用 SPSS 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 植物生长调节剂对再生稻头季抗倒伏能力的影响

由表 1 可以看出, 不同节间抗折力和植株抗推力大小在品种间表现一致, 均表现为甬优 2640 显著高于佳辐占和天优华占。倒伏指数在品种间表现不一致, 倒 4 和倒 3 节间表现为佳辐占显著高于天优华占和甬优 2640。倒 2 节间倒伏指数佳辐占与天优华占差异不显著, 均显著高于甬优 2640。植物生长调节剂处理抗折力增强, 倒 4 节间抗倒酯和多效唑处理较对照差异显著; 倒 3 节间各处理均较对照显著增加; 倒 2 节间各处理与对照差异均不显著。不同植物生长调节剂处理对倒伏指数的影响在不同节间表现不一致。其中, 倒 4 节间多效唑和抗倒酯处理较对照显著降低, 乙烯利处理较对照增加但差异不显著; 倒 3 节间各处理均较对照显著降低, 以抗倒酯处理降幅最大; 倒 2 节间乙烯利和抗倒酯处理较对照降低, 其中抗倒酯处理与对照差异显著, 多效唑处理与对照几乎没有差异。植物调节剂处理增加了植株抗推力, 多效唑和抗倒酯处理与对照差异显著, 乙烯利处理与对照差异不显著。品种和植物生长调节剂处理间倒 4 节间和倒 3 节间抗折

表 2 植物生长调节剂对再生稻头季茎秆形态的影响

Table 2. Effect of PGRs on culm morphologies of main-crop rice.

试验因素 Experiment factor	节间长 Internode length/cm			茎粗 Culm diameter/mm			茎壁厚 Culm wall thickness/mm			株高 Plant height/cm
	N ₄	N ₃	N ₂	N ₄	N ₃	N ₂	N ₄	N ₃	N ₂	
品种 Variety(V)										
佳辐占 Jiafuzhan	7.63±0.89 a	14.26±0.50 a	21.54±1.11 a	5.99±0.14 b	5.69±0.26 b	5.12±0.16 b	0.78±0.05 b	0.64±0.05 a	0.47±0.07 b	109.57±4.32 a
天优华 Tianyouhuazhan	3.14±0.22 c	8.91±0.50 b	18.71±0.33 b	5.37±0.34 c	5.16±0.38 c	4.83±0.32 c	0.71±0.05 c	0.56±0.06 c	0.42±0.05 c	95.83±2.83 b
甬优 2640 Yongyou 2640	6.05±0.53 b	14.38±0.47 a	16.61±2.28 c	6.37±0.24 b	6.19±0.25 a	5.84±0.24 a	0.92±0.07 a	0.81±0.07 a	0.68±0.03 a	91.02±3.24 c
植物生长调节剂 PGR										
多效唑 PP ₃₃₃	5.29±0.56 b	12.62±1.26 a	19.59±0.72 a	5.91±0.14 a	5.77±0.11 a	5.24±0.77 a	0.82±0.16 a	0.66±0.02 b	0.49±0.08 b	99.45±4.77 b
乙烯利 ETH	6.75±0.29 a	12.26±0.84 a	19.49±1.06 a	6.01±0.33 a	5.75±0.34 a	5.32±0.29 a	0.77±0.08 a	0.63±0.06 b	0.52±0.11 b	102.69±7.35 a
抗倒酯 TE	4.50±0.02 c	11.84±0.43 a	17.83±1.48 b	5.99±0.17 a	5.86±0.16 a	5.43±0.25 a	0.83±0.07 a	0.72±0.09 a	0.57±0.10 a	94.51±1.34 c
对照 Control	5.88±0.11 b	13.32±0.72 a	18.90±1.00 a	5.73±0.34 a	5.33±0.48 b	5.06±0.42 a	0.78±0.07 a	0.65±0.08 b	0.50±0.10 b	98.57±6.27 b
F 值 F value										
品种 Variety(V)	128.53**	71.82**	110.76**	51.82**	46.56**	39.61**	34.41**	52.12**	101.24**	218.37**
植物生长调节剂 PGR	16.82**	2.17 ^{ns}	8.93**	2.55 ^{ns}	7.32**	2.61 ^{ns}	1.48 ^{ns}	3.69*	5.092**	20.01**
V × PGR	5.58**	3.08**	15.33**	5.68**	4.38**	3.15**	3.51**	3.94**	3.93**	4.60**

力、倒伏指数、植株抗推力存在显著的交互作用。

2.2 植物生长调节剂对再生稻头季茎秆形态的影响

由表 2 可知，不同品种间基部节间长、茎粗、茎壁厚和株高差异显著。基部节间长表现为佳辐占>甬优 2640>天优华占；茎粗和茎壁厚表现为甬优 2640>佳辐占>天优华占；株高表现为佳辐占>天优华占>甬优 2640。植物生长调节剂处理各茎秆形态指标在不同节位间表现不一致，倒 4 节间长抗倒酯处理较对照显著缩短，乙烯利处理较对照显著增加，多效唑处理节间缩短，但与对照差异不显著；倒 3 节间长各处理较对照缩短，差异均不显著；倒 2 节间抗倒酯处理显著缩短，而多效唑和乙烯利处理节间长增加，与对照差异不显著。植物生长调节剂处理增加了倒 4、倒 3 和倒 2 节间的茎粗，且倒 3 节间与对照差异显著。抗倒酯处理显著增加了倒 3 和倒 2 节间的茎壁厚度，多效唑和乙烯利处理与对照差异不显著。各处理对株高的影响不一致，抗倒酯处理显著降低了株高，乙烯利处理显著增加了株高，多效唑处理与对照相当。茎秆形态指标品种和处理间存在显著的交互作用，表明植物生长调节剂对茎秆形态的调控受品种类型的影响，在生产上要依据品种特征特性有选择应用植物生长调节剂来达到调控水稻生长发育的目的。

2.3 倒伏指数与茎秆性状的关系

抗倒伏性能与茎秆性状相关分析表明(表 3)，倒伏指数与植株抗推力和茎壁厚度呈极显著负相关，与节间长和株高呈显著或极显著正相关，与节间粗相关性较弱($r=0.051$)。抗折力与茎粗、茎壁厚均达

到极显著正相关，而与节间长、株高呈负相关，且与节间长相关性达到极显著水平。植株抗推力与株高呈显著负相关($r=-0.495$)，与茎粗和茎壁厚度呈正相关，与节间长度呈负相关，但相关性未达显著。

2.4 植物生长调节剂对产量及其构成的影响

植物生长调节剂对再生稻头产量及产量结构的影响见表 4。从不同品种来看，天优华占显著高于佳辐占，甬优 2640 与其他两个品种差异不显著。从产量构成来看，佳辐占产量低是由于总穗粒数显著低于其他两个品种；甬优 2640 有效穗数和千粒重显著低于佳辐占和天优华占；天优华占产量高则是由于各构成因素比较均衡，均处于其他两个品种中间。从植物生长调节剂处理来看，产量较对照降低，乙烯利处理降低幅度最大，抗倒酯处理降幅最小，统计分析表明与对照差异不显著。产量构成方面，植物生长调节剂处理有效穗数和千粒重较对照增加，总穗粒数较对照减少，以多效唑处理减幅最大，抗倒酯处理减幅最小。

不同品种间再生季产量差异较大(表 4)，佳辐占产量显著高于天优华占和甬优 2640，天优华占和甬优 2640 产量相当。从产量构成来看，佳辐占产量高是由于有效穗数、千粒重和结实率显著高于天优华占和甬优 2640；天优华占有效穗数和总穗粒数介于中间，结实率较低；甬优 2640 总穗粒数多，有效穗数和千粒重较低。从植物生长调节剂处理来看，与对照相比，多效唑和抗倒酯处理增加了再生季产量，而乙烯利处理降低了再生季产量，统计分析表明不同处理间差异不显著。从产量构成来看，乙烯利和抗倒酯处理有效穗数较对照增加，多效唑

表 3 抗倒伏能力与茎秆性状的相关系数

Table 3. Correlation coefficients between lodging resistance and culm traits.

参数 Parameter	倒伏指数 Lodging index	抗折力 Breaking resistance	植株抗推力 Plant thrust resistance	节间长 Internode length	茎粗 Culm diameter	茎壁厚 Culm wall thickness
抗折力 Breaking resistance	−0.496**					
植株抗推力 Plant thrust resistance	−0.513**	0.329				
节间长 Internode length	0.398*	−0.877**	−0.190			
茎粗 Culm diameter	0.051	0.704**	0.101	−0.661**		
茎壁厚 Culm wall thickness	−0.418**	0.924**	0.173	−0.893**	0.816**	
株高 Plant height	0.511**	−0.337	−0.495**	0.274	−0.089	−0.268

*和**分别表示相关性达到 0.05 和 0.01 显著水平。
*and ** mean significant correlation at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

表 4 植物生长调节剂对再生稻产量及产量构成的影响

Table 4. Effects of PGRs on yield and ies components of ratoon-season rice.

季别 Growth Season	试验因素 Experiment factor	有效穗数 Effective panicle (/×10 ⁴ hm ^{−2})	颖花数 Spikelet number per panicle	结实率 Seed setting rate/%	千粒重 1000-grain weight/g	产量 Production (/kg hm ^{−2})
头季 Main-season	品种 Variety					
	佳辐占 Jiafuzhan	341.88±3.95 a	90.48±7.13 c	88.92±3.65 a	28.99±0.61 a	7552.80±502.03 b
	天优华占 Tianyouhuazhan	303.15±5.12 b	144.40±7.10 b	83.51±3.48 a	25.00±0.19 b	8137.60±199.62 a
	甬优 2640 Yongyou 2640	218.34±4.45 c	192.18±8.78 a	86.29±2.08 a	23.76±0.32 c	7887.57±343.83 ab
	植物生长调节剂 PGR					
	多效唑 PP ₃₃₃	293.34±13.59 a	133.55±2.32 a	88.37±3.91 a	26.01±0.77 a	7782.74±134.8 a
	乙烯利 ETH	285.85±12.96 a	135.71±9.41 a	86.16±1.17 a	26.26±1.02 a	7626.60±128.64 a
	抗倒酯 TE	286.95±15.99 a	140.31±1.18 a	83.33±3.35 a	25.85±1.02 a	7813.28±230.65 a
	对照 Control	285.01±16.71 a	151.52±6.85 a	87.11±3.79 a	25.54±0.59 a	8259.54±271.13 a
再生季 Ratoon-season	品种 Variety					
	佳辐占 Jiafuzhan	404.01±24.16 a	49.51±0.48 b	90.24±0.68 a	26.28±0.40 a	4457.49±103.79 a
	天优华占 Tianyouhuazhan	322.04±11.89 b	76.64±4.11 b	73.73±1.95 b	23.54±0.18 b	4085.29±262.99 b
	甬优 2640 Yongyou 2640	182.50±4.05 c	117.74±6.71 a	85.77±4.68 a	22.61±0.63 b	3958.89±198.42 b
	植物生长调节剂 PGR					
	多效唑 PP ₃₃₃	293.01±12.90 a	84.88±4.30 a	83.82±8.76 a	24.36±1.50 a	4340.01±291.45 a
	乙烯利 ETH	305.26±20.63 a	80.54±7.33 a	81.57±8.47 a	23.62±1.58 a	3965.46±383.05 a
	抗倒酯 TE	310.88±22.31 a	83.45±2.52 a	82.77±6.60 a	23.94±1.68 a	4215.09±248.25 a
	对照 Control	302.26±27.85 a	76.31±0.54 a	84.82±5.71 a	24.65±1.52 a	4148.33±189.04 a

处理较对照降低；3 个植物生长调节剂处理总穗粒数均较对照增加，结实率和千粒重较对照减小，各处理间产量构成差异均不显著，说明植物生长调节剂增加再生季产量是通过增加总穗粒数来实现的。

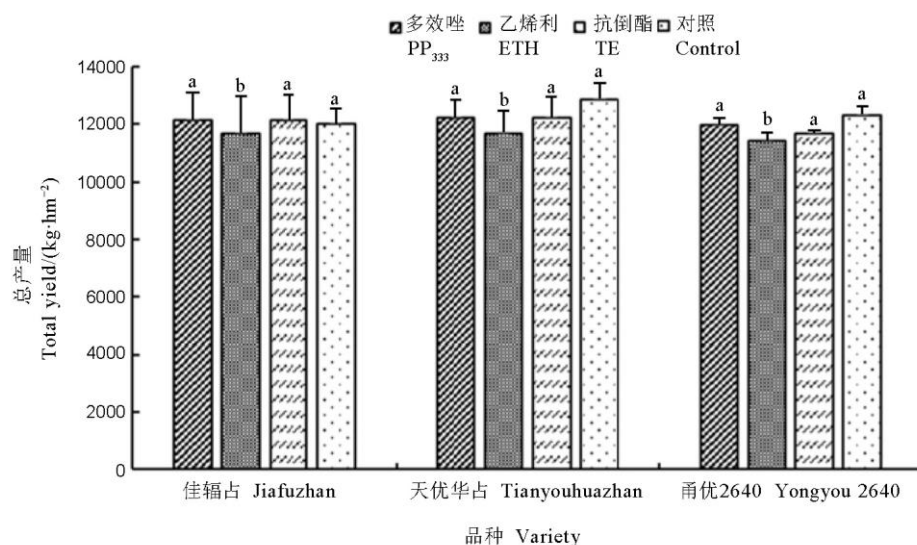
2.5 植物生长调节剂对两季总产量的影响

植物生长调节剂对再生稻总产量的影响见图 1。植物生长调节剂处理后天优华占和甬优 2640 总产量均较对照降低，天优华占降低了 4.84%~9.35%，甬优 2640 降低了 3.01%~7.40%，降幅最大的为乙烯利处理，降幅为 4.84%~9.35%；佳辐占总产量多效唑和抗倒酯处理较对照增加，增幅为 1.09%~1.15%，乙烯利处理较对照减少了 2.77%，统计分析表明乙烯利处理与对照间差异显著，多效唑和抗倒酯处理与对照差异均不显著。

3 讨论

3.1 水稻抗倒伏能力评价及不同品种间差异

评价水稻茎秆抗倒伏性能的指标一般有倒伏指数、抗折力和植株抗推力。倒伏指数为茎秆的负重、株高的乘积与茎秆机械强度的比值，通常来说倒伏指数越大，水稻植株倒伏的风险越高^[12]，降低倒伏指数可以提高水稻的抗倒伏能力^[20]，姜照伟^[18]、杨世民^[21]等研究表明水稻倒 3 和倒 4 节间是最容易倒伏的部位，倒伏指数 200 为倒伏发生的临界值，当倒伏指数高于 200 时田间植株易发生倒伏，本研究条件下倒数指数低于 200，小区没有出现水稻植株倒伏的情况。株高、节间长度、茎粗、茎壁



柱上不同小写字母表示 0.05 水平上差异显著($n=3$, 最小显著差法)。

PP₃₃₃, Paclobutrazol; ETH, Ethephon; TE, Trinexapac-ethyl. Values followed by different letters are significantly different at 5% level($n=3$, LSD).

图 1 植物生长调节剂对再生稻总产量的影响

Fig. 1. Effects of PGRs on total yield of ratoon rice.

厚度是水稻茎秆的主要形态特征, 多数研究表明^[2,22-23]倒伏指数与节间长呈正相关关系, 与茎粗和茎壁厚呈负相关关系, 而与株高的关系存在不确定性^[24]。本研究表明倒伏指数与节间长和株高呈显著或极显著正相关, 与茎壁厚度呈极显著负相关, 与茎粗相关性不显著, 说明茎秆外径粗、内径细是抗倒伏能力强的表现, 可作为评价水稻材料是否抗倒伏的一项参考性状指标。抗折力是评价茎秆机械强度的重要指标, 本研究表明抗折力与倒伏指数显著负相关, 与茎粗和茎壁厚呈显著正相关, 与已有研究结果^[2,12,24-25]较一致。植株抗推力在水稻自然生长的情况下测得, 能较好反映植株整体抵御外力的能力。本研究表明, 植株抗推力与倒伏指数呈显著负相关, 与株高呈极显著负相关, 而与单茎节间相关性状如抗折力、基部节间长、茎粗和茎壁厚相关性均不显著。这一方面启示人们抗倒伏研究中仅仅以取单茎做样本来测量评估试验材料存在局限性; 另一方面, 对高秆不抗倒品种栽培管理中适当降低株高有利于增强对外力(如台风)带来倒伏风险的抵御能力。

水稻抗倒伏能力与品种类型相关。Islam 等^[20]分析了杂交稻和常规稻倒伏相关性状, 提出育种上选择单位节间干重大和基部节间抗折力强的材料是改善杂交稻抗倒伏能力的方法。龚金龙^[25]通过比较籼、粳超级稻茎秆形态特征、充实性状和力学特性等指标, 认为粳稻较籼稻有较强的抗倒伏能力。段传人等^[26]比较了高、中、矮秆水稻品种的茎秆结

构及性能, 发现中秆类型品种茎秆力学性能好, 抗倒伏能力强。吴晓然等^[27]研究了不同抗倒性超级杂交粳稻的差异后, 指出缩短基部节间长度, 增加叶鞘充实程度是培育抗倒伏能力强的杂交粳稻品种的途径。本研究通过分析不同类型品种形态特征和力学指标后发现, 甬优 2640 抗折力、植株抗推力、倒伏指数、茎粗和茎壁厚度等指标均显著优于佳辐占和天优华占。佳辐占较天优华占抗折力和茎秆抗推力等茎秆力学指标几乎没有差异, 茎粗和茎壁厚度等形态指标优于天优华占, 但基部节间长度和株高显著高于天优华占, 倒伏指数也显著高于天优华占。综合来看, 甬优 2640 抗倒伏能力最强, 佳辐占倒伏风险最高, 天优华占介于二者中间, 这与已有研究结果相一致^[15,28]。

3.2 植物生长调节剂对再生稻头季茎秆抗倒性能的影响及应用前景

多效唑在调节水稻生长和抗倒伏方面研究较为深入。苗期施用多效唑减缓秧苗生长, 促进秧苗分蘖, 有效控制晚稻秧苗徒长^[29], 孕穗期和抽穗期喷施多效唑抑制上部节间伸长, 降低株高, 增强抗倒伏能力^[30]。本研究表明多效唑增强了基部节间力学性能, 降低了基部节间倒伏指数, 从而提高水稻抗倒伏能力, 而对节间长度和株高影响较小, 与前人研究不完全一致, 可能是施用时期和使用浓度不同所导致。乙烯利调控节间伸长, 且其效应受光照影响, 弱光条件下乙烯利促进节间伸长, 自然光照情况下没有伸长作用^[31]。本研究表明乙烯利处理促

进了节间伸长和株高显著增加,对茎壁厚没有影响。从倒伏指数来看,倒4节间有所增加,这与倒4节间弯曲力矩变大有关;倒3节间倒伏指数显著降低,与节间抗折力显著增强有关,表明拔节期施用乙烯利对水稻抗倒伏能力的提高没有明显正效应。抗倒酯广泛应用于草坪和牧草上,以延缓植株生长,从而减少修剪次数,提高草坪质量^[32], Han等^[33]于水稻齐穗前2 d施用抗倒酯,降低了倒伏指数,增强了抗折力和抗倒伏能力。本研究表明拔节初期施用抗倒酯同样可以改善茎秆形态特征和力学性能,降低倒伏指数,增强水稻的抗倒伏能力。

本研究拔节期叶面喷施多效唑、乙烯利和抗倒酯,在小区水稻材料没有出现倒伏的情况下,头季产量都较对照有所降低,通过分析产量构成后发现,总穗粒数减少是产量降低的重要原因,表明在拔节初期茎蘖数变动较小的情况下,施用生长延缓型植物生长调节剂不利于颖花分化,从而降低穗粒数。本研究还发现,多效唑和抗倒酯处理再生季产量较对照有所增加,一定程度上弥补了头季产量降低对两季总产量的损失。因此,植物生长调节剂要达到高产抗倒伏的双重效应需配套相应栽培技术,结合种植密度和肥水运筹,适当调整施用时期,避开穗分化的关键阶段。

4 结论

从不同品种来看,甬优2640抗倒伏能力强,天优华占次之,佳辐占抗倒伏能力较弱。从植物生长调节剂处理来看,多效唑处理增强了再生稻头季茎秆力学性能,提高了水稻抗倒伏能力,而对节间长度、株高、茎粗等形态指标影响较小;乙烯利处理增强了抗折力和植株抗推力,同时增加了节间长度和株高,倒伏指数并没有显著降低;抗倒酯处理缩短基部节间长度,降低株高,显著增强抗折力和植株抗推力,显著降低各节间倒伏指数。3个处理均降低了头季产量,多效唑和抗倒酯处理增加了再生季产量,一定程度上弥补了头季产量降低对总产量的损失。生产中配合适当栽培管理技术,植物生长调节剂处理可以在不影响产量的情况下增强水稻植株的抗倒伏能力。

参考文献:

[1] Zhang W J, Li G H, Yang Y M, Li Q, Zhang J, Liu J Y, Wang S H, Tang S, Ding Y F. Effects of nitrogen

application rate and ratio on lodging resistance of super rice with different genotypes. *J Integ Agric*, 2014, 13(1): 63-72.

- [2] 李杰, 张洪程, 龚金龙, 常勇, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕. 不同种植方式对超级稻植株抗倒伏能力的影响. *中国农业科学*, 2011, 44(11): 2234-2243.
Li J, Zhang H C, Gong J L, Chang Y, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y. Effects of different planting methods on the culm lodging resistance of super rice. *Sci Agric Sin*, 2011, 44(11): 2234-2243. (in Chinese with English abstract)
- [3] 何贤彪, 吴晓华, 马义虎. 台州沿海台风所致水稻倒伏对产量的影响. *中国稻米*, 2015, 21(2): 28-29.
He X B, Wu X H, Ma Y H. Effect of lodging caused by typhoon on grain yield of rice in Taizhou. *Chin Rice*, 2015, 21(2): 28-29. (in Chinese with English abstract)
- [4] Setter T L, Laureles E V, Mazaredo A M. Lodging reduces yield of rice by self-shading and reduction in canopy photosynthesis. *Field Crops Res*, 1997, 49: 95-106.
- [5] 刘立军, 袁莉民, 王志琴, 徐国伟, 陈云. 旱种水稻倒伏生理原因分析与对策的初步研究. *中国水稻科学*, 2002, 16(3): 225-230.
Liu L J, Yuan L M, Wang Z Q, Xu G W, Chen Y. Preliminary studies on physiological reason and countermeasure of lodging in dry-cultivated rice. *Chin J Rice Sci*, 2002, 16(3): 225-230. (in Chinese with English abstract)
- [6] Lang Y Z, Yang X D, Wang M E, Zhu Q S. Effects of lodging at different filling stages on rice yield and grain quality. *Rice Sci*, 2012, 19(4): 315-319.
- [7] 张桂莲, 屠乃美, 张顺堂. 杂交水稻腋芽再生特性. *中国水稻科学*, 2005, 19(4): 323-327.
Zhang G L, Tu N M, Zhang S T. ratooning properties of axillary buds in hybrid rice. *Chin J Rice Sci*, 2005, 19(4): 323-327. (in Chinese with English abstract)
- [8] 陈爱珠, 林玉婷, 李小萍. 再生稻头季倒伏对再生季生育的影响. *福建稻麦科技*, 2010(3): 16-18.
Chen A Z, Lin Y T, Li X P. Effects of lodging in the first crop of ratoon rice on development of the second crop. *Fujian Sci Technol Rice & Wheat*, 2010(3): 16-18. (in Chinese with English abstract)
- [9] 田晓莉, 李召虎, 段留生, 王保民, 何钟佩. 作物化学控制的研究进展及前景. *中国农业科技报*, 2004, 6(5): 11-15.
Tian X L, Li Z H, Duan L S, Wang B M, He Z P. Progress and prospect of crop chemical control technology. *Rev Chin Agric Sci Technol*, 2004, 6(5): 11-15. (in Chinese with English abstract)
- [10] 解振兴, 张居念, 姜照伟. 化学调控技术在水稻栽培中的研究进展. *福建稻麦科技*, 2016(4): 68-73.
Xie Z X, Zhang J N, Jiang Z W. Advances in chemical

- control practice of rice cultivation. *Fujian Sci Technol Rice & Wheat*, 2016, (4): 68-73. (in Chinese with English abstract)
- [11] 陶龙兴, 王熹, 黄效林, 俞美玉. 植物生长调节剂在农业中的应用及发展趋势. *浙江农业学报*, 2001, 13(5): 322-326.
- Tao L X, Wang X, Huang X L, Yu M Y. Application and prospects of plant growth regulators in agriculture. *Acta Agric Zhejiang*, 2001, 13(5): 322-326. (in Chinese with English abstract)
- [12] 孙旭初. 水稻茎秆抗倒性的研究. *中国农业科学*, 1987, 20(4): 32-37.
- Sun X C. Studies on the resistance of the culm of rice to lodging. *Sci Agric Sin*, 1987, 20(4): 32-37. (in Chinese with English abstract)
- [13] 孙旭春, 顾洪如, 沈益新, 王显国, 丁成龙. 抗倒酯对多花黑麦草生长与倒伏的影响. *江苏农业学报*, 2012, 28(1): 140-144.
- Sun X C, Gu H R, Shen Y X, Wang X G, Ding C L. Effects of growth regulator trinexapac-ethyl application on growth and lodging of Italian ryegrass (*Lolium multiflorum*). *Jiangsu J Agric Sci*, 2012, 28(1): 140-144. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王佳, 方俊, 易文凯, 田云, 卢向阳. 水稻体内的乙烯信号传导途径(综述). *亚热带植物科学*, 2011, 40(2): 72-78.
- Wang J, Fang J, Yi W K, Tian Y, Lu X Y. A review of ethylene signal transduction pathway in rice. *Subtrop Plant Sci*, 2011, 40(2): 72-78. (in Chinese with English abstract)
- [15] 赵雅静, 李小萍, 廖海林, 姜照伟. 再生稻佳辐占头季高产抗倒性的调控. *福建农业学报*, 2015, 30(10): 927-932.
- Zhao Y J, Li X P, Liao H L, Jiang Z W. Regulating yield and lodging-resistance of ratoon rice jiafuzhan. *Fujian J Agric Sci*, 2015, 30(10): 927-932. (in Chinese with English abstract)
- [16] 李先民, 郑永富, 肖步金. 清流县适宜机收再生稻品种筛选试验. *福建稻麦科技*, 2016(1): 16-20.
- Li X M, Zheng Y F, Xiao B J. Screening experiments of mechanical hybrid rice in qingliu county. *Fujian Sci Technol Rice & Wheat*, 2016(1): 16-20. (in Chinese with English abstract)
- [17] 姜照伟, 张数标, 郑家团, 徐倩华, 张琳. 低桩再生稻品种的筛选及主要机械化生产技术. *福建稻麦科技*, 2015, 33(4): 15-16.
- Jiang Z W, Zhang S B, Zheng J T, Xu Q H, Zhang L. Screening and mechanized production technology of ratoon rice combination. *Fujian Sci Technol Rice & Wheat*, 2015, 33(4): 15-16. (in Chinese with English abstract)
- [18] 姜照伟, 李小萍, 赵雅静, 李义珍, 陈双龙. 立丰灵对水稻抗倒性和产量性状的影响. *福建农业学报*, 2011, 26(3): 355-359.
- Jiang Z W, Li X P, Zhao Y J, Li Y Z, Chen S L. Effects of lifengling on lodging resistance and yield of rice. *Fujian J Agric Sci*, 2011, 26(3): 355-359. (in Chinese with English abstract)
- [19] 陈桂华, 邓化冰, 张桂莲, 唐文帮, 黄璜. 水稻茎秆性状与抗倒性的关系及配合力分析. *中国农业科学*, 2016, 49(3): 407-41.
- Chen G H, Deng H B, Zhang G L, Tang W B, Huang H. The correlation of stem characters and lodging resistance and combining ability analysis in rice. *Sci Agric Sin*, 2016, 49(3): 407-417. (in Chinese with English abstract)
- [20] Islam M S, Peng S B, Visperas R M. Lodging-related morphological traits of hybrid rice in a tropical irrigated ecosystem. *Field Crops Res*, 2007, 101: 240-248.
- [21] 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. *作物学报*, 2009, 35(1): 93-103.
- Yang S M, Xie L, Zheng S L, Li J, Yuan J C. Effects of nitrogen rate and transplanting density on physical and chemical characteristics and lodging resistance of culms in hybrid rice. *Acta Agron Sin*, 2009, 35(1): 93-103. (in Chinese with English abstract)
- [22] 杨惠杰, 杨仁崔, 李义珍, 姜照伟, 郑景生. 水稻茎秆性状与抗倒性的关系. *福建农业学报*, 2000, 15(2): 1-7.
- Yang H J, Yang R C, Li Y Z, Jiang Z W, Zheng J S. Relationship between culm traits and lodging resistance of rice Cultivars. *Fujian J Agric Sci*, 2000, 15(2): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [23] 范永义, 杨国涛, 陈敬, 蒋芬, Muslim Q, 陈永军, 胡运高. 硅钾肥配施对水稻茎秆理化性状及抗倒伏能力的影响. *西北植物学报*, 2017, 37(4): 751-757.
- Fan Y Y, Yang G T, Chen J, Jiang F, Muslim Q, Chen Y J, Hu Y G. The physical chemical characters and lodging resistance of rice stem with silicon potassium collocation application. *Acta Bota Bor-Occid Sin*, 2017, 37(4): 751-757. (in Chinese with English abstract)
- [24] 张明聪, 刘元英, 罗盛国, 彭显龙, 陈丽楠, 李宗云, 李佳. 养分综合管理对寒地水稻抗倒伏性能的影响. *中国农业科学*, 2010, 43(21): 4536-4542.
- Zhang M C, Liu Y Y, Luo S G, Peng X L, Chen L N, Li Z Y, Li J. Effects of integrated nutrient management on lodging resistance of rice in cold area. *Sci Agric Sin*, 2010, 43(21): 4536-4542. (in Chinese with English abstract)
- [25] 龚金龙, 邢志鹏, 胡雅杰, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 高辉. 粳/粳超级稻茎秆抗倒支撑特征的差异研究. *中国水稻科学*, 2015, 29(3): 273-281.
- Gong J L, Xing Z P, Hu Y J, Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Gao H. Difference in lodging resistance of culm between india and japonica upper rice.

- Chin J Rice Sci*, 2015, 29(3): 273-281. (in Chinese with English abstract)
- [26] 段传人, 王伯初, 王凭青. 水稻茎秆的结构及其性能的相关性. 重庆大学学报, 2003, 26(11): 38-40.
Duan C R, Wang B C, Wang P Q. The relationship between the structure and the property of rice stem. *J Chongqing Univ*, 2003, 26(11): 38-40. (in Chinese with English abstract)
- [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, 丁艳锋. 超级杂交籼稻抗倒能力比较及其对氮素的响应. 中国农业科学, 2015, 48(14): 2705-2717.
Wu X R, Zhang W J, Wu L M, Weng F, Li G H, Liu Z H, Tang S, Ding C Q, Wang S H, Ding Y F. Characteristics of lodging resistance of super-hybrid *indica* rice and its response to nitrogen. *Sci Agric Sin*, 2015, 48(14): 2705-2717. (in Chinese with English abstract)
- [28] 孟天瑶, 李晓芸, 李超, 韦还和, 史天宇, 马荣荣, 王晓燕, 杨筠文, 戴其根, 张洪程. 甬优系列籼粳杂交稻中熟高产品系的株型特征. 中国水稻科学, 2016, 30(2): 170-180.
Meng T Y, Li X Y, Li C, Wei H H, Shi T Y, Ma R R, Wang X Y, Yang J W, Dai Q G, Zhang H C. Plant-type characteristics of high-yielding lines of yongyou japonica/indica hybrid rice with medium maturity. *Chin J Rice Sci*, 2016, 30(2): 170-180. (in Chinese with English abstract)
- [29] 王熹, 姚福德, 高成伟, 陶龙兴. 多效唑对水稻的生物
- 学效应及其应用. 中国水稻科学, 1988, 2(1): 29-35.
Wang X, Yao F D, Gao C W, Tao L X. Biological responses of MET on rice and field applications. *Chin J Rice Sci*, 1988, 2(1): 29-35. (in Chinese with English abstract)
- [30] 吴同斌, 庞爱军, 吴睿, 庞伯良, 杨震. 多效唑对水稻抗倒伏能力影响的研究. 湖南农业科学, 2010, (11): 64-65.
Wu T B, Pang A J, Wu R, Pang B L, Yang Z. Studies on effects of paclobutrazol on rice lodging resistance. *Hunan Agric Sci*, 2010, (11): 64-65. (in Chinese with English abstract)
- [31] 吴光南, 汤日圣, 张金渝. 乙烯利和光强对水稻节间生长的协和效应. 中国水稻科学, 1986, 1(1): 53-57.
Wu G N, Tang R S, Zhang J Y. The interaction of ethrel and light intensity on the growth of rice culm. *Chin J Rice Sci*, 1986, 1(1): 53-57. (in Chinese with English abstract)
- [32] 王晓英, 呼天明, 王俭珍, 田立民, 张晓玲, 田凯. 氮肥和 Trinexapac-ethyl 配合施用对草地早熟禾草坪生长的影响. 中国农业科学, 2008, 41(11): 3679-3684.
Wang X Y, Hu T M, Wang Q Z, Tian L M, Zhang X L, Tian K. Growth of kentucky bluegrass as influenced by nitrogen and trinexapac-ethyl. *Sci Agric Sin*, 2008, 41(11): 3679-3684. (in Chinese with English abstract)
- [33] Han S W, Park J S, Cho Y C, Lim G J, Ju Y C. Effects of Trinexapac-ethyl on lodging-related traits in transplanted rice. *Korean J Crop Sci*, 1999, 44(3): 186-190.