

李子玉, 李伟, 陈光毅, 等. 不同赤霉素处理对水稻不育系开花动态及异交态势的影响[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(4): 625-634.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.04.001

# 不同赤霉素处理对水稻不育系开花动态及异交态势的影响

李子玉<sup>1,2</sup>, 李伟<sup>1</sup>, 陈光毅<sup>1</sup>, 李天<sup>2</sup>, 朱从桦<sup>1</sup>, 邓世健<sup>1</sup>, 余俊奇<sup>1</sup>, 张瑶<sup>2</sup>,  
李旭毅<sup>1</sup>, 欧阳裕元<sup>1,2</sup>

(1. 四川省农业科学院作物研究所, 四川 成都 610066; 2. 四川农业大学农学院, 四川 成都 611130)

**摘要:** 为明确不同赤霉素处理对水稻不育系开花动态和异交态势的影响, 以早-6A×早 5-1、旌康1A×LR72 和川种3A×中种 R1607 组合为材料, 以不施赤霉素为对照(CK), 设置不育系幼穗分化第Ⅶ期喷施赤霉素 22.5 g/hm<sup>2</sup> 处理(S1)、不育系幼穗分化第Ⅷ期喷施赤霉素 15.0 g/hm<sup>2</sup> 及抽穗 10% 当日 7:00 和 19:00 分别喷施赤霉素 90.0 g/hm<sup>2</sup> 和 75.0 g/hm<sup>2</sup> 处理(S2)、不育系抽穗 20% 当日及其后 2 d 分别喷施赤霉素 75.0 g/hm<sup>2</sup>、45.0 g/hm<sup>2</sup> 及 45.0 g/hm<sup>2</sup> 处理(S3), 分析不同处理对不育系开花动态、植株形态、穗层结构、柱头外露率和产量构成的影响。结果表明, 3 个组合不施用赤霉素(CK)亲本花期偏移 5~6 d, 3 个组合 S1 处理花遇指数介于 73.33%~85.71%, S2 处理和 S3 处理花遇指数介于 43.75%~66.67%。S2 处理和 S3 处理 3 个不育系的株高显著高于 S1 处理和 CK, S2 处理和 S3 处理 3 个不育系的倒 1 节间长、倒 2 节间长、倒 3 节间长总体均显著高于 S1 处理和 CK。3 个不育系包颈穗率由低到高依次为 S3 处理、S2 处理、S1 处理、CK。S3 处理 3 个不育系的单边柱头外露率、双边柱头外露率及柱头总外露率总体上显著高于其他 3 个处理, 其中, S3 处理双边柱头外露率比 CK 增加 96.20%~140.03%。处理间 3 个不育系的有效穗数、每穗粒数、千粒重无显著差异, 3 个组合 S3 处理和 S2 处理的结实率和理论产量显著高于 S1 处理和 CK。综合来看, 亲本花期偏移导致花遇指数降低是杂交制种异交结实率下降的主要因素, S3 处理可有效提高花遇指数和改良不育系异交态势。

**关键词:** 杂交水稻; 机械化制种; 赤霉素; 不育系; 花期; 异交结实率

**中图分类号:** S334.2<sup>+</sup>4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)04-0625-10

## Effects of different gibberellin treatments on flowering dynamics and out-crossing characteristics of rice sterile lines

LI Ziyu<sup>1,2</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, CHEN Guangyi<sup>1</sup>, LI Tian<sup>2</sup>, ZHU Conghua<sup>1</sup>, DENG Shijian<sup>1</sup>, YU Junqi<sup>1</sup>,  
ZHANG Yao<sup>2</sup>, LI Xuyi<sup>1</sup>, OUYANG Yuyuan<sup>1,2</sup>

(1. Crop Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China; 2. College of Agronomy, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

收稿日期: 2024-07-30

**基金项目:** 四川省育种攻关项目(2021YFYZ0005); 国家重点研发计划项目(2023YFD1500401-4); 国家现代农业产业技术体系四川水稻创新团队项目(SCCXTD-2024-1); 四川省十四五生物育种重大科技专项(2022ZDZX0012)

**作者简介:** 李子玉(1998-), 男, 四川成都人, 硕士研究生, 主要从事水稻高产优质栽培研究。(E-mail) lmour626@163.com

**通讯作者:** 欧阳裕元, (E-mail) ouyang8805@126.com; 李旭毅, (E-mail) xuyili@163.com

**Abstract:** In order to clarify the effects of different gibberellin treatments on flowering dynamics and outcrossing situation of rice sterile lines, the combinations of Zao-6A × Zao5-1, Jingkang 1A × LR72 and Chuanzhong 3A × Zhongzhong R1607 were used as materials. The treatments included no gibberellin control (CK), spraying 22.5 g/hm<sup>2</sup> gibberellin at the VII stage of young panicle differentiation of sterile lines (S1), spraying 15.0 g/hm<sup>2</sup> gib-

berellin at the VIII stage of young panicle differentiation of sterile lines and spraying 90.0 g/hm<sup>2</sup> and 75.0 g/hm<sup>2</sup> gibberellin at 7:00 and 19:00 on the day of 10% heading (S2), spraying 75.0 g/hm<sup>2</sup>, 45.0 g/hm<sup>2</sup> and 45.0 g/hm<sup>2</sup> gibberellin on the day of 20% heading and the next two days (S3). The effects of different treatments on flowering dynamics, plant morphology, panicle structure, stigma exertion rate and yield composition of sterile lines were analyzed. The results showed that the flowering period of the parents of the three combinations in CK was shifted by 5–6 d. The flowering index of the three combinations under S1 treatment was 73.33%–85.71%, and the flowering index under S2 treatment and S3 treatment was 43.75%–66.67%. The plant height of the three sterile lines of S2 treatment and S3 treatment was significantly higher than that of S1 treatment and CK, and the lengths of the inverted 1st internode, inverted 2nd internode and inverted 3rd internode of the three sterile lines of S2 treatment and S3 treatment were significantly longer than those of S1 treatment and CK. The panicle rate of the three sterile lines from low to high was S3 treatment, S2 treatment, S1 treatment and CK. The unilateral stigma exertion rate, bilateral stigma exertion rate and total stigma exertion rate of the three sterile lines under S3 treatment were significantly higher than those under the other three treatments. Among them, the bilateral stigma exertion rate of S3 treatment increased by 96.20%–140.03% compared with CK. There were no significant differences in the number of effective panicles, the number of grains per panicle and 1 000-grain weight among the three sterile lines. The seed setting rate and theoretical yield of the three combinations under S3 treatment and S2 treatment were significantly higher than those of S1 treatment and CK. On the whole, the decrease of flowering index caused by flowering period deviation of parents is the main factor for the decrease of outcrossing rate of hybrid seed production. S3 treatment can effectively improve the flowering index and improve the outcrossing situation of sterile lines.

**Key words:** hybrid rice; mechanized seed production; gibberellin; sterile lines; flowering period; outcrossing seed setting rate

水稻是中国第一大口粮作物,有60%以上的人口以稻米为主食<sup>[1]</sup>。目前中国杂交水稻的种植面积约占水稻种植面积的50%。因此,杂交制种是保障中国水稻生产乃至粮食安全的重要要素。但居高不下的制种成本是限制杂交水稻大面积推广应用的一大难题。机械化生产是降低制种成本的有效措施,但机械化制种加大了花期不遇的风险,这导致传统制种向机械化制种转型受到限制<sup>[2-3]</sup>。因此,如何促进亲本花期相遇进而提高制种产量是杂交水稻机械化制种的关键<sup>[4-5]</sup>。杂交水稻制种的核心在于亲本间的异花授粉过程,亲本花期相遇程度是决定异交结实率的关键因素,并显著影响制种产量<sup>[6]</sup>。此外,不育系的穗层结构、柱头外露状况等异交态势也会对制种产量产生重要影响<sup>[7]</sup>。

赤霉素(GA3)是常用的生长调节激素,能协调杂交水稻制种亲本的异交态势,提高花期相遇程度<sup>[8]</sup>,但赤霉素喷施效果受喷施时期与剂量的交互影响。不育系破口期或始穗期喷施可缩短出穗时间,始穗期喷施可有效解除包颈,灌浆期喷施能够改善柱头活力<sup>[9]</sup>。黄益峰等<sup>[10]</sup>研究发现,赤霉素用量达到一定阈值后,进一步增施对制种产量的提升效应趋于平缓,且不同喷施时期和剂量组合的制种产量具有显著差异<sup>[7]</sup>。此外,赤霉素对不同播差期

(两亲本播种期之差)组合的调控效果存在明显差异。播差期 $\geq 10$  d的亲本需分次高剂量喷施赤霉素以延长花期重叠窗口,而播差期 $< 5$  d的亲本则需要精准低剂量赤霉素即可调控亲本抽穗同步性和优化柱头外露率<sup>[11-12]</sup>。前人围绕光温因素<sup>[13]</sup>、种植密度<sup>[14]</sup>、肥料运筹<sup>[15]</sup>、施用茉莉酸甲酯(MeJA)及其中间代谢物<sup>[16-17]</sup>等对杂交组合花期调控开展了较为系统的研究。目前,赤霉素对单一组合的杂交水稻花期调控已有较多研究,但相同赤霉素施用措施对不同品种组合花期相遇特征及异交态势的影响还缺乏系统研究,这在一定程度上制约了机械化技术在杂交水稻制种中的应用。因此,本试验拟在机械化制种的背景下,通过比较不同赤霉素处理对不育系异交态势和花期调控的影响,构建适宜于不同特性组合的花期调节技术,以期杂交水稻机械化高产制种提供依据和支撑。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 试验材料

采用播差期分别为5 d、17 d、25 d的早-6A $\times$ 早5-1、旌康1A $\times$ LR72和川种3A $\times$ 中种R1607 3个组合为试验材料。供试材料在四川地区的种植特性如表1所示。

表 1 供试材料特性

Table 1 Properties of tested materials

材料	株高 (cm)	主茎叶数 (张)	穗长 (cm)	播种至始穗 日数(d)
早-6A	80.6	11~12	18.5	84
早 5-1	95.0	13	19.5	89
旌康 1A	85.0	13	25.6	82
LR72	107.0	15~16	21.9	99
川种 3A	82.0	13~14	26.7	85
中种 R1607	110.0	16~17	23.5	110

### 1.2 试验设计

试验于 2023 年在四川省邛崃市天府种业园区 (30°40'N, 103°52'E) 进行。试验地土壤 pH 7.61、有机质含量 34.73 g/kg、全氮含量 1.79 g/kg、全磷含量 0.32 g/kg、全钾含量 12.14 g/kg、碱解氮含量 162.54 mg/kg、速效磷含量 8.60 mg/kg、速效钾含量 58.25 mg/kg。3 个组合分别采用随机区组试验设计,以不施赤霉素为对照(CK),设置 3 个赤霉素施用处理:不

育系幼穗分化第Ⅶ期喷施赤霉素 22.5 g/hm<sup>2</sup>(S1)、不育系幼穗分化第Ⅷ期喷施赤霉素 15.0 g/hm<sup>2</sup>及抽穗 10%当日7:00和19:00分别喷施赤霉素 90.0 g/hm<sup>2</sup>和 75.0 g/hm<sup>2</sup>(S2)、不育系抽穗 20%当日及其后 2 d 分别喷施赤霉素 75.0 g/hm<sup>2</sup>、45.0 g/hm<sup>2</sup>及 45.0 g/hm<sup>2</sup>(S3)。亲本育秧方式均为机插毯状苗硬盘暗化育秧,恢复系秧龄为 30 d,不育系秧龄为 25 d。按常规制种设置两期恢复系,间隔 7 d 播种。恢复系与不育系行比为 6 : 18,间距 30 cm,重复 3 次,各亲本播栽时间及栽插规格如表 2。全生育期施纯氮 180 kg/hm<sup>2</sup>,全田基施 600 kg/hm<sup>2</sup> 复合肥(N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 含量均为 15%)。恢复系于返青当天及返青后 5~7 d 分 2 次追施尿素(氮含量 46%),每次均为 97.83 kg/hm<sup>2</sup>。不育系于移栽后 5~7 d 追施尿素 195.65 kg/hm<sup>2</sup>。赶粉方式为六旋翼无人机平行于恢复系飞行赶粉,田块四周各设 2 m 保护行,水分管理及病虫害防治按照组合常规制种高产栽培要求实施。水稻生长季日均气温和降雨量见图 1。

表 2 亲本播种和移栽时间及移栽参数

Table 2 Sowing time, transplanting time and transplanting parameters of parents

材料	播种日期(月-日)		移栽日期 (月-日)	行距 (cm)	穴距 (cm)	穴苗数
	播期 I	播期 II				
早-6A	04-25	-	05-20	30	12	3~4
早 5-1	04-20	04-27	05-23	30	20	3~4
旌康 1A	05-07	-	06-01	30	12	3~4
LR72	04-20	04-27	05-23	30	20	3~4
川种 3A	05-15	-	06-09	30	12	3~4
中种 R1607	04-20	04-27	05-23	30	20	3~4

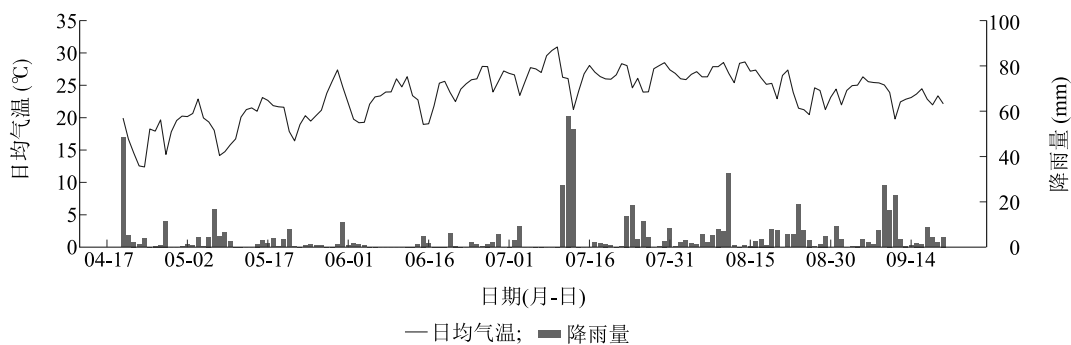


图 1 水稻生长季日均气温与降雨量变化特征

Fig.1 Variation characteristics of daily average temperature and precipitation in rice growing season

### 1.3 测定项目及方法

1.3.1 生育期 记录供试亲本播种、移栽、始穗

(10%植株的稻穗抽出叶鞘 1 cm)、齐穗(80%植株的稻穗抽出叶鞘 1 cm)、完穗(100%植株的稻穗抽

出叶鞘 1 cm) 和成熟的日期<sup>[18]</sup>。亲本花遇指数按下式计算:

$$\text{花遇指数} = \text{亲本抽穗重合天数} / \text{亲本抽穗总天数} \times 100\% \quad (1)$$

**1.3.2 抽穗及开花动态** 在亲本始穗期根据平均茎蘖数选取生育进程一致的 3 穴植株, 自第一穗抽出起, 每天 16:00 根据颖花内花药的有无或排列状况(整齐或散乱)记录各穗当天开花数量, 并去除已开颖花, 直至单株每穗开花结束, 计算逐日开花百分率。

**1.3.3 穗层结构** 开花结束后, 于不育系每个小区选取 10 株生长一致的植株, 测定每穗的包颈长度(穗颈节与剑叶叶枕重叠时为 0, 穗颈节在叶枕之上为正值, 在叶枕之下为负值), 出现负值即为包颈, 并以包在叶鞘内的颖花数除以总颖花数计算包颈粒率。

**1.3.4 植株形态** 开花结束后, 于不育系每个小区选取 3 株生长一致的植株, 用直尺测量主茎株高、穗长、剑叶长、茎秆倒 1 节间长、倒 2 节间长及倒 3 节间长。

**1.3.5 不育系柱头外露率** 每个小区选取生长一致的 3 株, 每株中选取最先完全开花的稻穗 3 个, 然后集中测量每个稻穗的双露颖花数、单露颖花数和未露颖花数。柱头外露率的计算方法如下<sup>[19]</sup>:

$$\text{总颖花数} = \text{单露颖花数} + \text{双露颖花数} + \text{未露颖花数} \quad (2)$$

$$\text{柱头单外露率} = (\text{单露颖花数} / \text{总颖花数}) \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{柱头双外露率} = (\text{双露颖花数} / \text{总颖花数}) \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{柱头总外露率} = [(\text{双露颖花数} + \text{单露颖花数} / 2) / \text{总颖花数}] \times 100\% \quad (5)$$

**1.3.6 理论产量** 于成熟期每个小区调查 60 穴, 计算平均有效穗数, 依据平均取样法在每个小区取 3 穴植株样, 自然晾干后考种, 分别测定其每穗粒数、结实率和千粒重。

## 1.4 数据处理及分析

利用 Microsoft Excel 2019 软件进行数据统计与分析, 利用 SPSS 26.0 软件和最小显著差数法(LSD)进行处理间差异显著性分析( $P < 0.05$ ), 利用 RStudio 2023 软件进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同赤霉素处理对亲本花期相遇的影响

不同赤霉素处理下 3 个杂交组合亲本花期相遇状态存在明显差异(图 2)。S1 处理早-6A×早 5-1、旌康 1A×LR72、川种 3A×中种 R1607 3 个组合的亲本抽穗期重合程度较高, 花遇指数分别为 75.00%、73.33%、85.71%(图 2A、图 2E、图 2I)。S2 处理早-6A×早 5-1、旌康 1A×LR72、川种 3A×中种 R1607 3 个组合的亲本抽穗重合时间较 S1 处理有所下降, 花遇指数分别为 53.85%、50.00%、66.67%(图 2B、图 2F、图 2J)。S3 处理早-6A×早 5-1、旌康 1A×LR72、川种 3A×中种 R1607 3 个组合的亲本抽穗重合时间进一步减少, 花遇指数分别为 46.15%、43.75%、50.00%(图 2C、图 2G、图 2K)。标准播差期处理(CK)下, 3 个组合亲本始穗时间出现 5~6 d 的偏差, 花遇指数进一步下降。在同一赤霉素处理下, 川种 3A×中种 R1607 组合的花遇情况优于另外 2 个组合。

### 2.2 不同赤霉素处理对不育系抽穗特性的影响

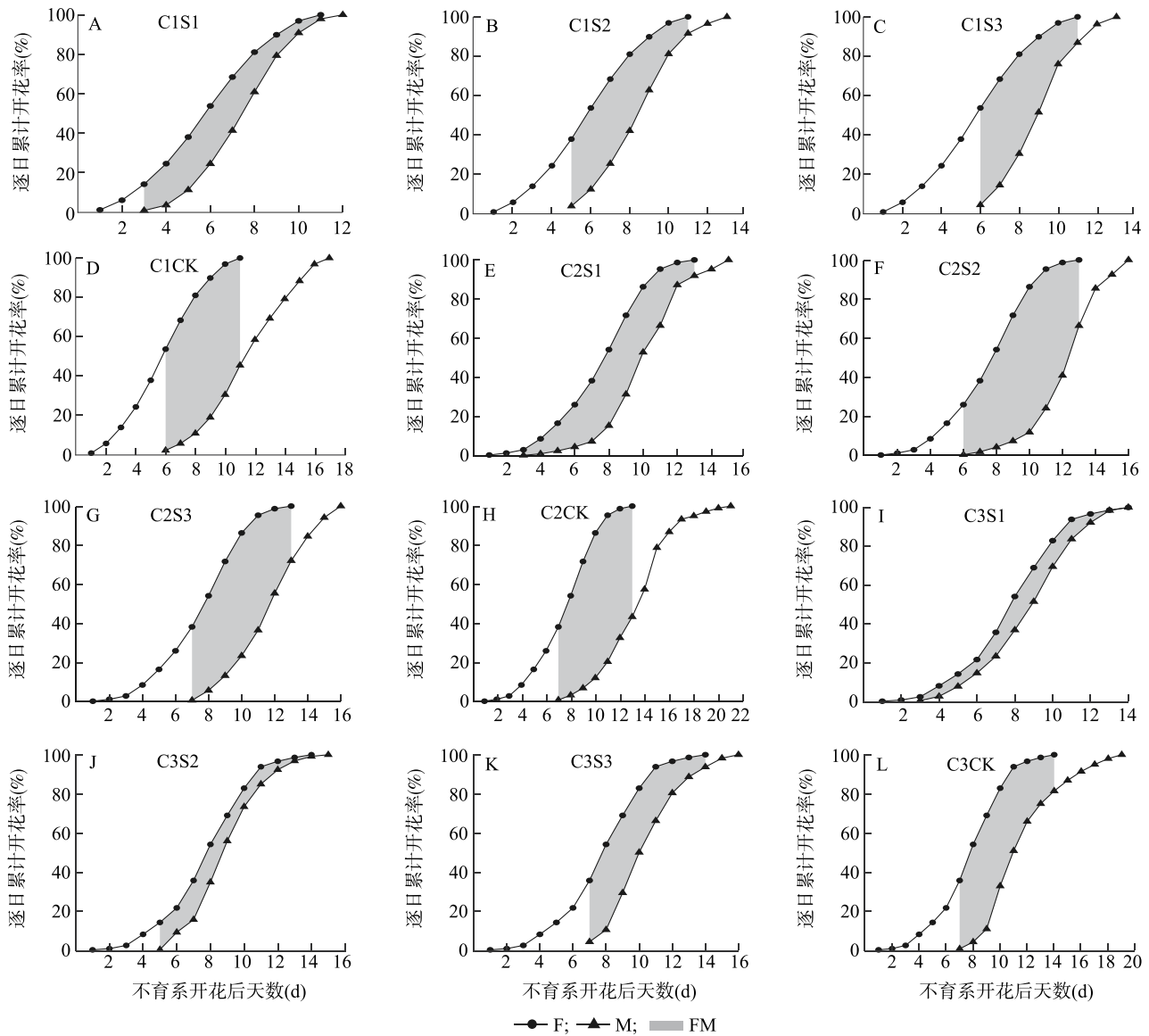
不同赤霉素处理对不育系抽穗特性的影响如表 3 所示。从表中可以看出, 不同赤霉素处理下 3 个不育系的始穗时间均为 S1 处理最早, S2 处理次之, S3 处理与 CK 一致。S1 处理和 S2 处理 3 个不育系的始穗日期分别比 CK 提前 3~4 d 和 1~2 d。3 个赤霉素处理 3 个不育系的始穗至完穗日数均低于 CK, 其中, S1、S2 和 S3 处理 3 个不育系的始穗至完穗日数分别比 CK 缩短 1~2 d、3~4 d 和 4~6 d。即 S1 处理 3 个不育系的开花时间提前更明显, S3 处理 3 个不育系的开花历期缩短更突出, 花期更加集中, 而 S2 处理既能提前不育系的开花时间, 又能缩短开花历期, 但效果分别弱于 S1 处理和 S3 处理。上述结果说明, 始穗前喷施赤霉素, 可使不育系始穗日期提前, 在始穗后进行赤霉素处理, 可有效缩短始穗到齐穗的时间。

### 2.3 不同赤霉素处理对不育系植株形态特征的影响

不同赤霉素处理对不育系植株形态特征的影响如表 4 所示。从表中可以看出, 3 个不育系品种 S2 和 S3 处理的株高无显著差异, 但两者均显著高于 S1 处理和 CK, 早-6A、旌康 1A、川种 3A 的 S2 和 S3 处理的株高分别比 CK 增加 32.45% 和 30.59%、

21.55%和18.45%、38.79%和36.30%。S1处理早-6A和川种3A的株高显著高于CK,而旌康1A的株高与CK无显著差异。3个不育系品种S2和S3处理的倒1节间长、倒2节间长和倒3节间长总体上均高于S1处理和CK。早-6A、旌康1A、川种3A的S2和S3处理的倒1节间长分别比CK增加26.01%和44.18%、41.31%和32.63%、17.03%和36.98%。S2和S3处理早-6A、旌康1A、川种3A的倒2节间长分别比CK增加79.43%和83.03%、55.50%和

60.00%、134.59%和128.74%。S2和S3处理早-6A、旌康1A、川种3A的倒3节间长分别比CK增加75.16%和67.88%、38.39%和32.04%、281.20%和271.51%。S2和S3处理川种3A的剑叶长度低于S1处理和CK,其他2个不育系不同赤霉素处理的剑叶长度与CK均无显著性差异。上述结果说明3种赤霉素处理对不育形的株型结构有较大影响,株型结构的变化势必影响到不育系的异交态势。



F: I期恢复系;M:不育系;FM:花期相遇。C1:早-6A×早5-1;C2:旌康1A×LR72;C3:川种3A×中种R1607。S1:不育系幼穗分化第Ⅶ期喷施赤霉素22.5 g/hm<sup>2</sup>处理;S2:不育系幼穗分化第Ⅷ期喷施赤霉素15.0 g/hm<sup>2</sup>及抽穗10%当日7:00和19:00分别喷施赤霉素90.0 g/hm<sup>2</sup>和75.0 g/hm<sup>2</sup>处理;S3:不育系抽穗20%当日及其后2 d分别喷施赤霉素75.0 g/hm<sup>2</sup>、45.0 g/hm<sup>2</sup>及45.0 g/hm<sup>2</sup>处理;CK:不喷施赤霉素对照。

图2 不同赤霉素处理的亲本花遇特征

Fig.2 Synchronous flowering characteristics of parents under different gibberellin treatments

表 3 不同赤霉素处理下不育系抽穗特性

Table 3 Heading characteristics of sterile lines under different gibberellin treatments

材料	处理	始穗日期 (月-日)	齐穗日期 (月-日)	完穗日期 (月-日)	播种至始穗 日数(d)	始穗至齐穗 日数(d)	始穗至完穗 日数(d)
早-6A	S1	07-17	07-21	07-24	83	4	7
	S2	07/19	07-23	07-25	85	4	6
	S3	07-20	07-23	07-25	86	3	5
	CK	07-20	07-25	07-29	86	5	9
早 5-1	-	07-15	07-19	07-23	86	4	8
旌康 1A	S1	07-29	08-04	08-08	83	6	10
	S2	08-01	08-06	08-08	86	5	7
	S3	08-02	08-06	08-07	87	4	5
	CK	08-02	08-08	08-13	87	6	11
LR72	-	07-28	08-03	08-07	99	6	10
川种 3A	S1	08-07	08-13	08-15	84	6	8
	S2	08-09	08-13	08-15	86	4	6
	S3	08-11	08-14	08-15	88	3	4
	CK	08-11	08-17	08-20	88	6	9
中种 R1607	-	08-05	08-11	08-15	107	6	10

S1、S2、S3、CK 见图 2 注。

表 4 不同赤霉素处理下不育系植株形态特性

Table 4 Morphological characteristics of sterile lines under different gibberellin treatments

材料	处理	株高 (cm)	剑叶长 (cm)	倒 1 节间长 (cm)	倒 2 节间长 (cm)	倒 3 节间长 (cm)
早-6A	S1	85.40±1.11b	25.38±1.15a	19.28±0.36c	22.20±1.29b	11.00±0.81b
	S2	99.77±1.63a	24.67±0.79a	23.16±0.79b	23.47±0.37ab	16.85±0.34a
	S3	98.37±2.11a	24.77±0.38a	26.50±0.22a	23.94±0.76a	16.15±0.32a
	CK	75.32±2.90c	25.13±1.42a	18.38±0.38c	13.08±0.39c	9.62±0.42c
旌康 1A	S1	96.03±1.91b	32.50±0.87a	28.76±0.62c	26.96±0.65b	20.58±0.84b
	S2	105.83±0.39a	29.02±1.27b	35.51±0.69a	29.00±0.80a	24.62±1.27a
	S3	103.13±1.01a	31.24±1.93ab	33.33±1.05b	29.84±0.65a	23.49±0.84a
	CK	87.06±3.25b	31.90±0.65ab	25.13±0.84d	18.65±0.83c	17.79±1.00c
川种 3A	S1	87.93±3.44b	31.65±1.79a	21.55±0.55c	18.62±1.10b	11.44±1.62b
	S2	109.78±4.32a	23.59±1.21b	24.40±1.22b	29.30±0.69a	25.96±0.42a
	S3	107.81±3.04a	21.83±1.04b	28.56±1.16a	28.57±0.31a	25.30±0.75a
	CK	79.10±1.74c	30.68±4.46a	20.85±0.29c	12.49±0.25c	6.81±1.02c

S1、S2、S3、CK 见图 2 注。同一材料同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

#### 2.4 不同赤霉素处理对不育系穗层结构的影响

不同赤霉素处理对不育系穗层结构的影响如表 5 所示。从表中可以看出,不施赤霉素(CK)不育系早-6A、旌康 1A、川种 3A 的平均穗包颈长度分别为 6.49 cm、7.02 cm、10.83 cm。在不同赤霉素处理

下,3 个不育系包颈程度均有所减轻。S1 处理、S2 处理和 S3 处理早-6A、旌康 1A、川种 3A 平均穗包颈长度分别降低 1.30~2.09 cm、4.32~10.56 cm、7.62~8.86 cm。结合表 4 分析可知,不育系的穗包颈长度与倒 1 节间长度呈极显著正相关。3 个赤霉

素处理下,3个不育系的包颈穗率和包颈粒率均低于CK。其中,S3处理早-6A、旌康1A和川种3A的包颈粒率分别比CK下降7.10个百分点、5.07个百分点和15.79个百分点。3个不育系包颈穗率由高到低均为CK>S1>S2>S3,即S3处理对穗包颈的解

除效果最好。赤霉素处理对3个不育系穗长均无显著影响。综上所述,3个赤霉素处理都能改善不育系穗层结构,其中S3处理的效果最好,且品种间的改善效果存在一定的差异。

表5 不同赤霉素处理下不育系的穗层结构

Table 5 The panicle layer structures of sterile lines under different gibberellin treatments

材料	处理	穗长 (cm)	穗包颈长 (cm)	包颈粒率 (%)	包颈穗率 (%)
早-6A	S1	18.39±0.84a	-5.19±0.28c	7.74±0.66b	85.71±1.72b
	S2	18.56±0.88a	-2.04±0.12b	3.00±0.54c	43.09±3.45c
	S3	18.63±1.04a	1.13±0.38a	2.64±0.43c	25.97±1.83d
	CK	18.48±0.33a	-6.49±0.11d	9.74±0.59a	100.00±0a
旌康1A	S1	22.75±0.75a	-4.93±0.56c	6.63±0.52b	81.72±1.83b
	S2	23.33±0.68a	3.54±0.51a	2.16±0.36c	45.46±1.97c
	S3	23.51±1.13a	1.84±0.27b	2.83±0.31c	38.24±0.96d
	CK	22.66±0.66a	-7.02±0.53d	7.90±0.79a	100.00±0a
川种3A	S1	25.27±1.42a	-9.38±0.65c	12.00±0.58b	77.65±3.03b
	S2	25.49±0.84a	-6.51±0.19b	8.31±1.33c	63.32±2.50c
	S3	25.80±0.66a	-2.45±0.22a	2.68±0.50d	53.29±2.31d
	CK	25.12±2.02a	-10.83±0.53d	18.47±1.00a	100.00±0a

S1、S2、S3、CK见图2注。同一品种同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

2.5 不同赤霉素处理对不育系柱头外露率的影响

不同赤霉素处理对不育系柱头外露率的影响如表6所示。从表中可以看出,在赤霉素处理下,3个不育系的柱头单外露率、柱头双外露率和柱头总外露率整体上均显著高于CK。其中,S3处理柱头外露率最大。S3处理早-6A、旌康1A和川种3A的柱头单外露率分别比CK增加54.97%、42.17%和50.66%。S3处理早-6A、旌康1A和川种3A的柱头总外露率分别比CK增加77.44%、76.69%和67.86%。S3处理早-6A、旌康1A和川种3A的柱头双外露率分别比CK增加99.49%、140.03%和96.20%。上述结果说明,3种赤霉素处理都能促进不育系的柱头外露,这有利于不育系柱头更好地接受恢复系花粉,其中S3处理的提升效果最好。

2.6 不同赤霉素处理对制种产量及其构成因素的影响

不同赤霉素处理对3个组合制种产量及产量构成因素的影响如表7所示。从表中可以看出,同一组合S3处理和S2处理理论产量差异不显著,但2者均显著高于S1处理和CK。S3处理早-6A×早5-1、旌康

表6 不同赤霉素处理下不育系柱头外露率

Table 6 The stigma exertion rate of sterile lines under different gibberellin treatments

材料	处理	柱头单外露率 (%)	柱头双外露率 (%)	柱头总外露率 (%)
早-6A	S1	34.09±0.97c	19.07±0.10c	36.11±0.56c
	S2	41.16±1.42b	25.81±2.51b	46.03±1.99b
	S3	48.01±0.38a	31.44±0.23a	55.45±0.41a
	CK	30.98±0.41d	15.76±1.01d	31.25±1.08d
旌康1A	S1	48.84±0.78c	23.07±1.11b	47.39±1.00c
	S2	58.36±0.79b	21.47±1.89b	50.65±1.50b
	S3	60.92±0.21a	28.06±0.25a	58.52±0.14a
	CK	42.85±1.07d	11.69±0.26c	33.12±0.79d
川种3A	S1	51.09±0.73c	22.18±1.79b	47.73±1.94c
	S2	61.11±0.96b	22.38±0.79ab	52.93±0.36b
	S3	63.91±1.85a	25.29±2.01a	57.24±1.29a
	CK	42.42±0.34d	12.89±0.90c	34.10±1.06d

S1、S2、S3、CK见图2注。同一品种同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

1A×LR72、川种3A×中种R1607的理论产量分别比CK增加49.03%、85.95%、87.30%。从产量构成因

素来看,3种赤霉素处理对有效穗数、每穗粒数及千粒重均无显著影响,差异主要体现在结实率上。同一组合S3处理和S2处理结实率差异不显著,但两者均显著高于S1处理和CK,这个变化特征与理论产量一致。S3处理和S2处理早-6A×早5-1组合的结实率分别比CK增加59.82%、47.95%,S3处理和S2处理旌康1A×LR72组合的结实率分别比CK增加88.15%、80.22%,S3处理和S2处理川种3A×中

种R1607组合的结实率分别比CK增加88.48%、65.89%。同一组合柱头总外露率与结实率正相关,早-6A×早5-1、旌康1A×LR72、川种3A×中种R1607S3柱头总外露率与结实率的决定系数( $R^2$ )分别为0.96、0.92、0.90。上述结果表明,制种产量的提高主要得益于异交结实率的显著提升,所以在不育系抽穗前后合理规划赤霉素的施用措施,是提高制种产量的关键。

表7 不同赤霉素处理下制种产量及产量构成

Table 7 Yield and yield components under different gibberellin treatments

组合	处理	有效穗数 ( $\times 10^4$ , 1 hm <sup>2</sup> )	每穗粒数 (粒)	千粒重 (g)	结实率 (%)	理论产量 (kg/hm <sup>2</sup> )
早-6A×早5-1	S1	322.22±0.98a	105.30±2.36a	26.15±0.08a	20.32±1.17b	1 535.14±194.51b
	S2	319.17±0.59a	105.03±4.57a	26.21±0.11a	25.92±2.45a	1 930.62±145.16a
	S3	303.70±0.74a	106.73±2.35a	26.15±0.11a	28.00±2.29a	2 015.29±193.47a
	CK	324.17±0.41a	105.97±1.65a	26.47±0.50a	17.52±1.17c	1 352.29±72.79b
旌康1A×LR72	S1	287.31±0.14a	165.13±3.78a	27.44±0.14a	23.73±1.30b	1 845.23±22.01b
	S2	293.52±0.55a	162.16±6.43a	27.40±0.03a	29.97±1.41a	2 370.63±124.21a
	S3	289.81±0.59a	164.23±7.75a	27.35±0.13a	31.29±1.07a	2 431.42±184.73a
	CK	291.67±0.40a	162.57±2.27a	27.53±0.24a	16.63±2.42c	1 307.56±201.36c
川种3A×中种R1607	S1	310.19±0.65a	116.30±7.08a	25.60±0.24a	22.23±1.63b	2 477.36±230.87b
	S2	308.33±0.26a	115.90±6.10a	25.64±0.11a	29.38±3.18a	3 210.28±476.31a
	S3	300.93±0.40a	115.37±4.95a	25.52±0.09a	33.38±2.64a	3 577.17±325.93a
	CK	302.78±0.26a	115.13±2.54a	25.75±0.09a	17.71±1.67b	1 909.82±215.40b

S1、S2、S3、CK 见图2注。同一组合同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

### 3 讨论

#### 3.1 赤霉素处理对不育系花期的影响

杂交水稻制种中亲本的生育动态直接影响花期相遇时长,进而影响产量<sup>[20]</sup>。秦琴等<sup>[18]</sup>的研究结果表明机械化栽培会改变水稻生长发育进程,进而造成亲本始穗期不同程度的偏移。赤霉素可有效调节亲本花期,秦永梅等<sup>[21]</sup>和莫科生<sup>[22]</sup>的研究结果表明在亲本幼穗分化第Ⅶ期末~第Ⅷ期初喷施赤霉素,可提早抽穗2~3 d。田大成等<sup>[23]</sup>研究发现,喷施赤霉素可提早或缩短不育系花期进而提高异交结实率。王丰等<sup>[24]</sup>研究发现喷施赤霉素可提高水稻抽穗整齐度。本研究结果表明,按照理论播差期进行机械化种植,3个组合不施赤霉素(CK)下亲本均表现出5~6 d的花期偏移。在幼穗分化期喷施赤霉素(S1处理),3个不育系始穗期提前,在不育系抽穗20%时喷施赤霉素(S3处理)只能起到缩短开花历

期的作用,而在不育系抽穗10%时喷施赤霉素(S2处理)可同时实现花期提前和开花历期缩短的作用。3个不育系未喷施赤霉素(CK)的开花历期较长,这会导致不育系开花相对分散,增大制种难度,降低制种效率。且实施机械化制种后,不育系始穗期都一定程度上滞后于恢复系,极易使不育系错过恢复系的开花高峰期。3个赤霉素处理均能提高杂交组合亲本的花遇指数。黄帮超等<sup>[25]</sup>的研究结果表明,花遇指数与异交结实率呈显著正相关,不育系结实率会随花遇指数的降低而降低。此外,异交结实率还受穗层结构、植株结构等异交态势的影响<sup>[26]</sup>。本研究中,虽然S1处理花遇指数高于S2和S3处理,但S1处理的异交结实与产量都低于S2和S3处理,这与前人研究结果一致。

#### 3.2 赤霉素处理对不育系植株形态和穗层结构的影响

杂交水稻制种中,不育系植株形态和穗层结构

等异交态势对异交授粉效果有较大影响<sup>[27-28]</sup>。改善不育系的异交态势能显著提高异交结实率,而喷施赤霉素是最为常用的不育系异交态势改善措施<sup>[29-30]</sup>。喷施赤霉素不仅可以调节不育系的开花动态,还影响到不育系的植株形态、穗层结构和包颈状态。刘希忠<sup>[31]</sup>的研究结果表明,合理施用赤霉素可促进亲本倒1节间、倒2节间和倒3节间的伸长,进而导致株高和包颈长度的变化,且赤霉素喷施时期越早,亲本株高的增加幅度就越大。但过早过量使用赤霉素亦会导致水稻节间过度伸长,不利于制种<sup>[32]</sup>。程建平等<sup>[33]</sup>研究发现喷施赤霉素对水稻穗层整齐度具有显著影响。汪良成<sup>[34]</sup>研究发现,抽穗时喷施赤霉素能明显提高倒1节间、倒2节间和倒3节间的长度和不育系异交结实率。李朝勇<sup>[35]</sup>的研究结果表明喷施赤霉素能调节亲本株高及穗位,可使不育系群体形成疏密适宜、通风透光的穗层结构,从而利于授粉。此外,不同不育系品种对赤霉素的响应程度也不尽相同<sup>[36-37]</sup>。本研究结果表明,S2处理和S3处理可显著增加3个不育系的植株高度及倒1节间~倒3节间的长度,而剑叶的长度总体变化不大;此外,S2处理和S3处理还能显著降低包颈穗率和包颈粒率。说明喷施赤霉素能有效改善株型结构和解除包颈。

### 3.3 赤霉素处理对不育系柱头外露和制种产量及其构成因素的影响

协调水稻产量构成要素是取得高产的关键。在杂交制种过程中,较高的不育系柱头外露率能克服颖壳对花粉的遮蔽作用,增加柱头接触花粉的概率,可有效提高杂交种产量<sup>[38]</sup>。Liu等<sup>[39]</sup>、苏仕华等<sup>[40]</sup>的研究结果表明,分蘖期喷施赤霉素能有效控制无效分蘖发生,提高成穗率。程建平等<sup>[41]</sup>研究发现,在破口期或始穗期施用赤霉素有利于提高水稻的千粒重、结实率。本研究结果表明,不同赤霉素施用方案对不育系的柱头单外露率、柱头双外露率和柱头总外露率有显著影响,3个组合柱头总外露率由高到低依次为S3处理、S2处理、S1处理和CK;4个处理3个组合的有效穗数、每穗粒数、千粒重均无显著差异,而S3处理和S2处理3个组合的结实率均显著高于S1处理和CK;柱头总外露率与结实率呈显著正相关。因此,本研究认为赤霉素处理能显著影响异交结实率,是其影响产量的主要因素。

## 4 结论

赤霉素处理下杂交水稻制种产量的增加得益于花遇指数的提高和异交态势的改良。S3处理和S2处理能修正花期偏移和缩短开花历期,显著增加不育系株高、柱头总外露率,降低包颈穗率和包颈粒率等,促进亲本的异交结实。在利用赤霉素调控不育系花期时,要根据不同目标选择适宜的处理方式,同时搭配穗后喷施来改良异交态势,提升结实率,进而实现高产制种。机械化制种时,合理调整亲本播种和移栽时间,科学喷施赤霉素提高亲本花遇指数,改良异交态势,有利于提升水稻杂交制种水平。

### 参考文献:

- [1] CHEN Q, HE A B, WANG W Q, et al. Comparisons of regeneration rate and yields performance between inbred and hybrid rice cultivars in a direct seeding rice-ratoon rice system in central China [J]. *Field Crops Research*, 2018, 223: 164-170.
- [2] 谢必武,张甲,张凤龙,等. 杂交水稻川农优528制种机插母本异交习性及其产量的相关和通径分析[J]. *四川农业大学学报*, 2013, 31(3): 239-244, 263.
- [3] 唐文帮,陈晓军,张桂莲,等. 杂交水稻机械化制种现状与技术突破[J]. *中国稻米*, 2022, 28(5): 20-27.
- [4] 胡建平. 浅析杂交水稻制种的产量构成与高产制种技术[J]. *种子*, 2010, 29(12): 119-122.
- [5] 林建荣,宋昕蔚,吴明国,等. 籼粳超级杂交稻育种技术创新与品种培育[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(2): 207-218.
- [6] 张文明,周凯,龚亚茄,等. 调花宝对杂交水稻制种亲本抽穗开花习性的影响[J]. *杂交水稻*, 2002, 17(6): 31-33.
- [7] 雷东阳,陈立云,肖层林,等. 超级杂交早稻陆两优996制种“九二〇”施用技术[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2007, 33(1): 1-4.
- [8] 王晓敏,李波,徐小健,等. 影响杂交水稻制种母本异交结实率的因素[J]. *作物研究*, 2015, 29(3): 317-320.
- [9] 王晓敏. 杂交水稻种子高活力形成机制及调控技术研究[D]. 长沙:湖南农业大学, 2020.
- [10] 黄益峰,阮颖龙,王美兴,等. 籼粳杂交稻制种亲本生长特性及赤霉素对产量影响[J]. *浙江农业科学*, 2023, 64(8): 1834-1839.
- [11] WANG X M, ZHENG H B, TANG Q Y, et al. Effects of gibberellic acid application after anthesis on seed vigor of indica hybrid rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Agronomy*, 2019, 9(12): 861.
- [12] KUMAR A, YADAV R, GUPTA J P. Optimization of GA3, DAP and boric acid for maximizing seed yield and its quality parameters in hybrid rice [J]. *International Journal of Chemical Studies*, 2020, 8(6): 184-191.
- [13] 宋远丽,栾维江. 水稻开花的光温调控分子机理[J]. *中国水稻*

- 科学,2012,26(4):383-392.
- [14] 李文红,彭兰华,杨维山,等. 杂交水稻制种花期预测与调节技术[J]. 安徽农业科学,2004,32(2):211-213.
- [15] 樊晓磊,杜雪竹,向甘驹,等. 不同氮肥水平对不育系 HD2086s 开花习性及其制种产量的影响[J]. 湖北大学学报(自然科学版),2023,45(6):908-916.
- [16] 许阳东. 开花期高温胁迫下茉莉酸甲酯对水稻光温敏核不育系开花结实的调节作用[D]. 扬州:扬州大学,2019.
- [17] 黄友明,曾晓春. 茉莉酸相关化合物对水稻颖花开放的诱导效应[J]. 湖北农业科学,2008,47(10):1125-1127.
- [18] 秦琴,陶有凤,黄帮超,等. 杂交水稻机插制种的亲本穗茎生长与花期特性[J]. 作物学报,2022,48(4):988-1004.
- [19] 周浩. 基于连锁和关联分析对水稻柱头外露率的研究[D]. 武汉:华中农业大学,2017.
- [20] 丁荻蛟,蔡壮夫. 水稻发育特性与制种花期相遇的关系[J]. 杂交水稻,2001,16(1):12-14.
- [21] 秦永梅,刘敏,韩凤英. 水稻杂交制种的花期预测及调控途径的研究[J]. 安徽农业科学,2015,43(10):73-74.
- [22] 莫科生. 杂交水稻制种花期预测与调控技术[J]. 广西农学报,2010,25(4):37-39.
- [23] 田大成,黄三奎,段永国,等. 水稻不育系花时和受粉时间与异交结实率的关系[J]. 杂交水稻,2004,19(3):50-54.
- [24] 王丰,程方民. 植物激素与水稻产量的关系及其在生产上的应用[J]. 现代化农业,2003(10):20-21.
- [25] 黄帮超,陶有凤,秦琴,等. 机插杂交稻制种异交结实特性研究[J]. 中国农业科学,2023,56(20):3960-3974.
- [26] 宋志远,聂波. 赤霉素在杂交水稻中的应用研究[J]. 现代农业研究,2020,26(9):65-66.
- [27] MATSUI T, KOBAYASI K, YOSHIMOTO M, et al. Dependence of pollination and fertilization in rice (*Oryza sativa* L.) on floret height within the canopy[J]. Field Crops Research, 2020, 249: 107741.
- [28] WIN A, TANAKA T S T, MATSUI T. Panicle inclination influences pollination stability of rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Plant Production Science, 2020, 23(1):60-68.
- [29] 肖层林,刘爱民,张海清,等. 中国杂交水稻制种技术的进步与发展方向[J]. 杂交水稻,2010,25(增刊1):46-50.
- [30] 汪发启,段洪波. 杂交水稻种子生产、检验、贮藏的研究与应用[M]. 武汉:湖北科学技术出版社,2001.
- [31] 刘希忠. BB肥和“九二〇”对水稻亲本繁殖产量影响的研究[D]. 重庆:西南大学,2005.
- [32] 李忠芹,曹跃先,陈海进,等. 杂交水稻制种机插母本喷施赤霉素技术[J]. 大麦与谷类科学,2013,30(3):25-26.
- [33] 程建平,罗锡文,樊启洲,等. 不同种植方式对水稻生育特性和产量的影响[J]. 华中农业大学学报,2010,29(1):1-5.
- [34] 汪良成. 论杂交稻制种产量来源于四支柱[J]. 杂交水稻,1989(增刊1):5-7.
- [35] 李朝勇. 提高杂交水稻制种异交结实率技术[J]. 种子世界,2017(7):47-48.
- [36] 杨艳华,张亚东,朱镇,等. 赤霉素(GA<sub>3</sub>)和脱落酸(ABA)对不同水稻品种生长和生理特性及GA20ox2、GA3ox2基因表达的影响[J]. 中国水稻科学,2010,24(4):433-437.
- [37] 张霜. 赤霉素对水稻生长的影响研究进展[J]. 现代农村科技,2015(16):54-56.
- [38] 杜雪树,戚华雄. 水稻柱头外露率研究进展[J]. 湖北农业科学,2015,54(16):3841-3843,3850.
- [39] LIU Y, CHEN W P, DING Y F, et al. Effect of gibberellic acid (GA<sub>3</sub>) and  $\alpha$ -naphthalene acetic acid (NAA) on the growth of unproductive tillers and the grain yield of rice (*Oryza sativa* L.) [J]. African Journal of Agricultural Research, 2012, 7(4):534-539.
- [40] 苏仕华,秦德荣,王珏,等. 水稻分蘖期喷施九二〇(GA<sub>3</sub>)对控蘖及产量的影响[J]. 垦殖与稻作,2000(5):20-22.
- [41] 程建平,赵锋,游爱兵,等. 赤霉素喷施量及时期对水稻穗层整齐度和产量的影响[J]. 华中农业大学学报,2011,30(6):657-662.

(责任编辑:石春林)