

引用格式:

车凡昊, 黄俊, 邹玉莹, 邓吉奇, 周庚, 姚威, 黄浩, 黄希来, 易晓璇, 谌强, 李家鑫, 刘金灵, 刘雄伦. *Pi9* 基因标记辅助选择改良水稻不育系金 23A 稻瘟病抗性[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2023, 49(5): 503–508.

CHE F H, HUANG J, ZOU Y Y, DENG J Q, ZHOU G, YAO W, HUANG H, HUANG X L, YI X X, CHEN Q, LI J X, LIU J L, LIU X L. Improving blast resistance of rice CMS line Jin23A using marker-assisted selection of the *Pi9* gene[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2023, 49(5): 503–508.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



## *Pi9* 基因标记辅助选择改良水稻不育系金 23A 稻瘟病抗性

车凡昊<sup>1</sup>, 黄俊<sup>1</sup>, 邹玉莹<sup>1</sup>, 邓吉奇<sup>1</sup>, 周庚<sup>1</sup>, 姚威<sup>1</sup>, 黄浩<sup>1</sup>, 黄希来<sup>1</sup>,  
易晓璇<sup>1</sup>, 谌强<sup>1</sup>, 李家鑫<sup>1</sup>, 刘金灵<sup>1,2,3</sup>, 刘雄伦<sup>1,2,3\*</sup>

(1.湖南农业大学农学院, 湖南 长沙 410128; 2.作物基因工程湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410128; 3.水稻油菜抗病育种湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410128)

**摘 要:** 以携带广谱持久的抗稻瘟病基因 *Pi9* 的籼稻品系 75-1-127 为供体亲本, 以保持系金 23B 及其不育系金 23A 为受体亲本, 采用 *Pi9* 基因共显性标记 CoInDF1R2 进行 MAS 回交育种, 以改良三系不育系金 23A 及其保持系金 23B 的稻瘟病抗性; 用 25 份稻瘟菌代表性菌株进行室内苗瘟接种, 观察苗瘟抗性表现。结果显示: 金 23A 和金 23B 的抗性频率仅为 28%, 而 75-1-127 的抗性频率为 92%; 田间病圃抗性鉴定结果显示, 75-1-127 高抗苗瘟, 而金 23A 和金 23B 受体亲本均高感苗瘟; 共显性标记 CoInDF1R2 在 75-1-127 基因组上扩增出大小为 354 bp 的 PCR 产物, 对金 23A 或金 23B 基因组的扩增产物大小约 470 bp, 说明该标记在 2 个亲本间的多态性明显且稳定; 利用 CoInDF1R2 开展连续多年 MAS 回交育种实践, 培育出了农艺性状优良、丰产性较好的抗病不育系金 23A-*Pi9*-1 及抗病保持系金 23B-*Pi9*-1, 为三系法杂种优势利用提供了新的抗稻瘟病亲本材料。

**关 键 词:** 水稻; 稻瘟病; 抗性改良; 分子标记辅助选择; *Pi9* 基因

中图分类号: S511.034

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2023)05-0503-06

## Improving blast resistance of rice CMS line Jin23A using marker-assisted selection of the *Pi9* gene

CHE Fanhao<sup>1</sup>, HUANG Jun<sup>1</sup>, ZOU Yuying<sup>1</sup>, DENG Jiqi<sup>1</sup>, ZHOU Geng<sup>1</sup>, YAO Wei<sup>1</sup>, HUANG Hao<sup>1</sup>,  
HUANG Xilai<sup>1</sup>, YI Xiaoxuan<sup>1</sup>, CHEN Qiang<sup>1</sup>, LI Jiaxin<sup>1</sup>, LIU Jinling<sup>1,2,3</sup>, LIU Xionglin<sup>1,2,3\*</sup>

(1.College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2.Crop Gene Engineering Key Laboratory of Hunan Province, Changsha, Hunan 410128, China; 3.Rice and Rapeseed Disease Resistance Breeding Key Laboratory of Hunan Province, Changsha, Hunan 410128, China)

**Abstract:** To improve blast resistance of the rice cytoplasmic male sterile(CMS) line Jin23A and its maintainer Jin23B, the indica rice line 75-1-127 carrying a broad-spectrum and durable blast resistance gene *Pi9* was used as the donor parent, and Jin 23B and Jin 23A were used as the acceptor parents, a co-dominant marker, CoInDF1R2, was developed according to *Pi9* sequence, then was employed in marker-assisted selection breeding practice. Greenhouse inoculation assay was performed using twenty-five *Magnaporthe oryzae* isolates collected from different rice areas. The results showed that the *Pi9* gene donor rice line 75-1-127 showed much higher resistance frequency(92%) than those of two acceptor parents Jin23A and Jin23B(28%). Accordingly, 75-1-127 showed high-level seedling blast resistance but highly susceptible for the receptors in natural nursery. CoInDF1R2 showed clear and stable co-dominant polymorphism between

收稿日期: 2023-01-13

修回日期: 2023-09-11

基金项目: 湖南省科技重大专项(2021NK1001); 国家自然科学基金项目(31972256)

作者简介: 车凡昊(1997—), 男, 贵州铜仁人, 硕士研究生, 主要从事水稻分子育种研究, 1103334982@qq.com; \*通信作者, 刘雄伦, 博士, 教授, 主要从事水稻分子育种研究, xionglun@hunau.edu.cn

the donor and acceptor parents, amplifying a 354 bp DNA band from genome of 75-1-127, while the PCR product from either genome of Jin23A or Jin23B was about 470 bp. An improved CMS line Jin23A-*Pi9* and the corresponding maintainer Jin23B-*Pi9* were created through consecutive backcross breeding practice by marker-assisted selection of the CoInDF1R2 marker. Then, Jin23A-*Pi9*-1 and Jin23B-*Pi9*-1 were screened as the goal CMS line and maintainer. This study had set the stage for developing elite hybrid rice varieties with superior blast resistance using the three-line method of heterosis utilization.

**Keywords:** rice; blast; resistance improvement; molecular marker-assisted selection; *Pi9* gene

稻瘟病是由稻瘟菌引起的全球性水稻真菌病害。近年来,中国稻瘟菌年发生面积约  $5 \times 10^6 \text{ hm}^2$ , 年损失稻谷约  $1.0 \times 10^9 \text{ kg}^{[1]}$ 。当前,化学防治与培育抗稻瘟病水稻品种仍是最普遍的防治措施,但是化学防治稻瘟病不仅耗费大量时间与精力,同时破坏自然生态环境:因此,防治稻瘟病应以培育高抗水稻品种为核心,辅以化学防治和田间管理。利用已克隆或定位的抗瘟基因培育广谱、持久的高抗水稻新品种(组合)是降低稻瘟病危害的经济、有效、绿色手段<sup>[2]</sup>。小粒野生稻(*Oryza minuta*)是 *Pi9* 基因的来源, *Pi9* 基因对来自 20 个国家(地区)的稻瘟菌菌株表现出抗性,且已被成功克隆<sup>[3-4]</sup>。分子标记辅助选择育种(简称 MAS 育种)相较于传统育种具有不受环境影响、不受等位基因显(隐)性干扰的优点,选择效率高,育种进程快,越来越受育种家们青睐。近年来多名研究人员<sup>[5-9]</sup>根据 *Pi9* 基因序列信息开发了多个功能分子标记,用于杂交稻亲本稻瘟病抗性改良,效果显著。三系不育系金 23A 及其保持系金 23B 是由湖南省常德市农业科学研究所选育而来,具有株型紧凑、败育彻底、配合力强、米质优良等特点<sup>[10]</sup>,但易感稻瘟病。本研究以籼稻品系 75-1-127 作为 *Pi9* 基因的供体亲本,先后用保持系金 23B 及其不育系金 23A 作受体亲本,利用 *Pi9* 基因功能标记,开展 MAS 连续回交育种实践,旨在改良其稻瘟病抗性,为三系法杂种优势利用提供新的抗稻瘟病亲本材料。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

抗病基因 *Pi9* 供体为籼型水稻品系 75-1-127, 源自国际水稻研究所,由小粒野生稻与籼稻 IR3197 远缘杂交后连续回交选育而来,含有广谱、持久的抗稻瘟病基因 *Pi9*,对来自 13 个国家的 43 个稻瘟菌菌株均表现出较强的抗性。

受体亲本为三系不育系金 23A 及其保持系金

23B。

感病对照为粳型水稻品系 CO39,对绝大多数稻瘟菌生理小种(菌株)表现高感。

作物基因工程湖南省重点实验室保存的来自国内外不同稻区的 25 份稻瘟菌菌株用于室内接种抗菌谱分析。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 分子标记辅助选择育种实践

自 2012 年起,在湖南长沙和海南三亚两地利用获选的标记 CoInDF1R2 持续多年进行 MAS 回交育种,于 2018 年成功繁育出金 23B $\times$ 75-1-127 的 BC<sub>4</sub>F<sub>3</sub> 群体;选择表现优异的抗病保持系纯系金 23B-*Pi9* 作为供体亲本及轮回亲本,同时以金 23A 作为受体亲本,继续进行成对杂交/回交,进一步改良金 23A 的稻瘟病抗性。于 2021 年获得多个金 23A $\times$ 金 23B-*Pi9* 的 BC<sub>3</sub>F<sub>1</sub> 抗病不育系群体和金 23B-*Pi9* 的 BC<sub>4</sub>F<sub>7</sub> 改良抗病保持系群体。对所获改良不育系及其保持系进行综合分析,遴选出综合性状优良的抗病不育系金 23A-*Pi9* 及其保持系金 23B-*Pi9*。

#### 1.2.2 抗稻瘟病的鉴定与评价

稻瘟菌的接种及苗瘟表型鉴定。2018—2022 年,在人工气候室播种金 23B、金 23A、75-1-127 和 CO39,幼苗长至 4 叶期,分别用 25 份稻瘟菌菌株的单孢悬浮液喷雾接种。接种孢子浓度约  $1 \times 10^5$  个/mL,温度 26~28 °C,相对湿度>90%,暗培养 1 d 后,12 h 光照/12 h 黑暗继续培养 5~6 d,调查发病情况。如果感病对照 CO39 没发病,则重复该菌株的接种试验。参考 BONMAN 等<sup>[11]</sup>的 0~5 级抗性分级标准分类(0~2 级为抗病,3~5 级为感病),按照文献[9]的方法计算各水稻材料的抗性频率。

田间病圃苗瘟的表型鉴定。于 2020—2022 年在湖南省浏阳大围山天然病圃开展田间病圃苗瘟的表型鉴定。鉴定材料为金 23B 及其改良系金

23B-*Pi9*、金 23 A 及其改良系金 23 A-*Pi9*、75-1-127(抗病对照)、CO39(感病对照及诱发品种)。条播催芽后的鉴定材料种子, 诱发品种 CO39 播于厢面四周, 2 叶 1 心期移栽于苗床四周, 诱导发病; 按 6 级标准调查苗瘟发病情况, 评估材料抗病等级: 0~1 级为高度抗病; 2 级为抗病; 3 级为感病; 4~5 级为高度感病。

1. 2. 3 标记基因型的分析

DNA 的提取。取金 23A-*Pi9* 与金 23B-*Pi9* 嫩叶各 0.2 g, 放入 2 mL 离心管中, 采用 CTAB 法<sup>[12]</sup>提取 DNA。

标记基因型的鉴定。用 *Pi9* 基因功能标记 ColnDF1R2(F, 5'-ATCCACGAAACATCCACCATC C-3'; R, 5'-TGAGCTAGCTCTTGCCTCCGAG-3') 鉴定各单株的基因型。DNA 模板经 PCR 扩增后, 采用 1.5% 琼脂糖凝胶电泳进行基因型分析。PCR 反应体系(10  $\mu$ L): 模板 DNA 1.0  $\mu$ L, 2 pmol/ $\mu$ L primer pairs 1.0  $\mu$ L, ddH<sub>2</sub>O 3.0  $\mu$ L, 2 $\times$ Taq PCR Master Mix 5  $\mu$ L。PCR 程序: 94  $^{\circ}$ C 预变性 5 min; 94  $^{\circ}$ C 变性 30 s, 56  $^{\circ}$ C 左右(具体退火温度视引物而定)退火 30 s, 72  $^{\circ}$ C 延伸 1 min, 共 35 个循环; 最后 72  $^{\circ}$ C 终延伸 5 min。

1. 2. 4 不育系不育特性的调查

参考王明等<sup>[13]</sup>的方法, 2022 年调查改良不育系金 23A-*Pi9* 及受体亲本金 23A 的不育特性。于改良不育系金 23A-*Pi9* 及受体亲本金 23A 孕穗末期, 使用羊皮纸袋随机套袋 10 株, 2 次重复, 20 d 后取下羊皮纸袋, 调查不育系的自交结实率。于不育系终

花后, 随机取 10 株, 每株 3 穗, 共 30 穗, 2 次重复, 调查柱头外露率(包括单边外露和双边外露)。不育系开花盛期, 随机取 10 株, 每株取 1 穗, 每穗取不同部位 3 朵颖花的花药, 用镊子捣碎后, 再用 1% I<sub>2</sub>-KI 染色, 观察花粉粒密度、形状及染色情况。每个株系重复镜检 3 次, 调查花粉育性及败育类型。

1. 2. 5 农艺性状与产量性状的调查

2022 年记载改良不育系金 23A-*Pi9* 及其改良保持系金 23B-*Pi9* 的播始历期, 以相应受体亲本金 23A 和金 23B 为对照。成熟期各材料每个小区随机取样 15 株, 参照文献<sup>[14-15]</sup>的方法, 调查株高、剑叶长、剑叶宽、单株有效穗数、每穗总颖花数、每穗实粒数以及主穗穗长等。

1. 2. 6 米质分析

随机称取 50 g 改良保持系金 23B-*Pi9* 及其受体亲本金 23B 的种子, 经糙米机和精米机打磨后称量 15 g 精米, 4  $^{\circ}$ C 保存 24 h 后做成米饭, 采用米饭食味计(日本佐竹 STA1B)测定米饭口感、外观和综合食味值; 采用米饭硬度黏度计(日本佐竹 RHS1A)测定米饭的硬度、黏度等指标。

2 结果与分析

2.1 亲本苗瘟抗性评价

25 份稻瘟菌菌株室内人工接种苗瘟的表型结果(表 1) 显示: 对于日本菌株 KOH 和韩国菌株 ROR1,

表 1 亲本材料的苗瘟抗性表现及抗菌谱

Table 1 Seedling blast resistance and resistance spectrum to 25 tested <i>Magnaporthe oryzae</i> isolates of parental materials											
菌株	来源	抗性				菌株	来源	抗性			
		75-1-127	CO39	金 23B	金 23A			75-1-127	CO39	金 23B	金 23A
110-2	湖南	R	S	S	S	RB4	广东	R	S	S	S
193-1-1	湖南	R	S	S	S	RB5	广东	R	S	S	S
195-2-2	湖南	R	S	R	R	M2006123A2	福建	R	S	R	R
318-2	湖南	R	S	S	S	CHL506	福建	R	S	S	S
Apr-87	湖南	R	S	S	S	E2007046A2	湖北	R	S	S	S
CHL329	湖南	R	S	S	S	CHL645	贵州	R	S	R	R
CHL438	湖南	R	S	S	S	ROR1	韩国	S	S	S	S
CHL440	湖南	R	S	S	S	KJ105	韩国	R	S	R	R
CHL446	湖南	R	S	S	S	KJ197	韩国	R	S	S	S
CHL471	湖南	R	S	S	S	KJ201	韩国	R	S	S	S
CHL473	湖南	R	S	R	R	KOH	日本	S	S	R	R
X2007A-1	湖南	R	S	S	S	GUY11	法国	R	S	S	S
CHL1743	广东	R	S	R	R	抗性频率/%		92.0	0.0	28.0	28.0

R、S 分别表示抗病和感病。

*Pi9* 供体亲本 75-1-127 表现感病, 对其余 23 份菌株均表现抗病, 抗性频率为 92.0%; 受体亲本金 23A 和金 23B 仅对 7 份菌株(195-2-2、CHL473、CHL1743、M2006123A2、CHL645、KJ105、KOH) 表现抗病, 而对 18 份菌株表现感病, 抗性频率仅为 28.0%; 金 23A 与金 23B 的抗性表型、抗菌谱一致, 表明稻瘟病抗性受核基因控制, 2 个材料具有相同的细胞核背景; 25 份供试菌株均对感病对照 CO39 致病; 日本菌株 KOH 与韩国菌株 ROR1 对 75-1-127 致病, 但 KOH 对金 23A 和金 23B 不致病, 说明供体亲本和受体亲本间存在交叉抗菌谱, 通过杂交重组可以培育出抗菌谱比 75-1-127 更广的新型不育系及其保持系。

## 2.2 MAS 改良抗病不育系及其保持系

CoInDF1R2 多态性明显且稳定, 属于 InDel 共显性标记。该标记在 *Pi9* 供体亲本 75-1-127 基因组上的 PCR 扩增产物大小为 354 bp, 在受体亲本金 23B 和金 23A 基因组的扩增产物大小均为 470 bp 左右, 条带单一稳定, 凝胶电泳能轻易区分(图 1)。采用 CoInDF1R2 开展连续多年的 MAS 育种实践, 先后改良金 23B 和金 23A 的稻瘟病抗性。2018 年夏季获得 6 个金 23B×75-1-127 的 BC<sub>4</sub>F<sub>3</sub> 群体, 根据稻瘟病抗性及其主要农艺性状、产量性状, 遴选出 1 个优系金 23B-*Pi9*-4。2018 年开始用于金 23A 的 MAS 回交改良, 于 2021 年夏季获得金 23A×金 23B-*Pi9*-4 的 BC<sub>3</sub>F<sub>1</sub> 群体(金 23A 改良系)和保持系金 23B-*Pi9*-4 的 BC<sub>4</sub>F<sub>7</sub> 群体(金 23B 改良系)。2022 年进行田间病圃抗性鉴定, 从鉴定结果(图 2)可以看

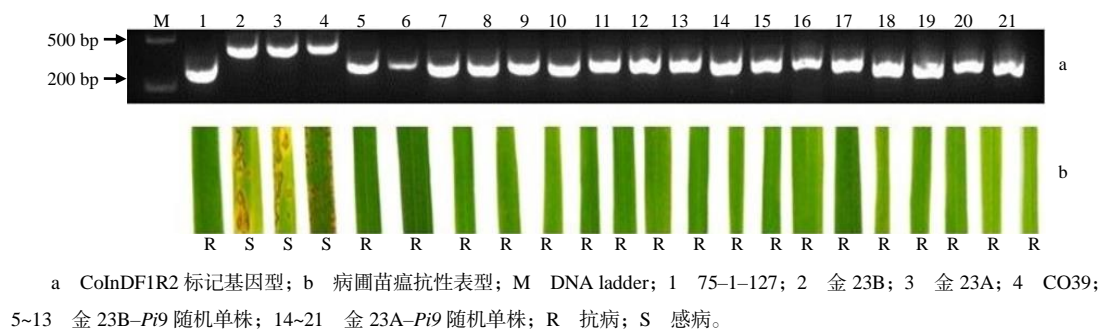


图 1 改良不育系及其保持系的标记基因型与苗瘟抗性表型

Fig.1 Marker genotype and seedling blast resistance phenotype of improved CMS line and its maintainer

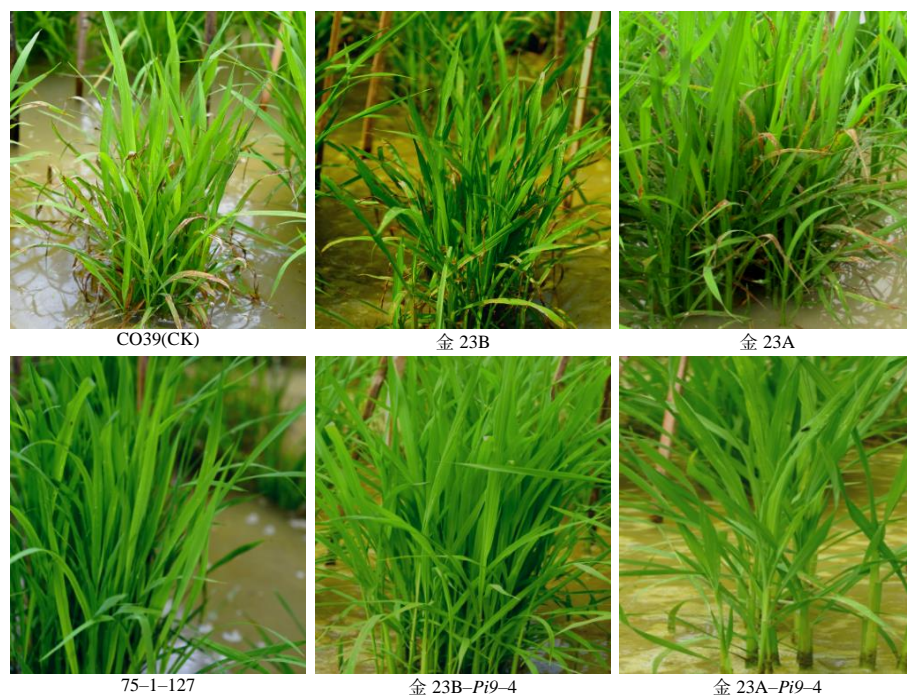
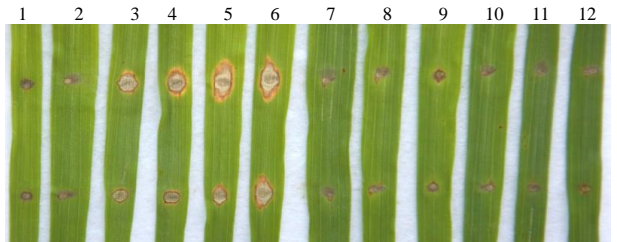


图 2 改良不育系及其保持系的病圃苗瘟抗性表现

Fig.2 Seedling blast resistance of improved CMS line and its maintainer in nursery



出, 金 23A-*Pi9*-4、金 23B-*Pi9*-4 高抗稻瘟病。2022 年秋季用湖南稻区稻瘟菌优势菌株 110-2 室内接种改良不育系及其保持系, 进一步验证了改良系金 23A-*Pi9*-4、金 23B-*Pi9*-4 高抗稻瘟病(图 3)。



1~2 75-1-127; 3~4 CO39; 5 金 23B; 6 金 23A; 7~9 金 23B-*Pi9*-4; 10~12 金 23A-*Pi9*-4。

图 3 改良不育系及其保持系的离体接种苗瘟抗性表型  
Fig.3 Seedling blast resistance of improved CMS line and its maintainer by in vitro inoculation

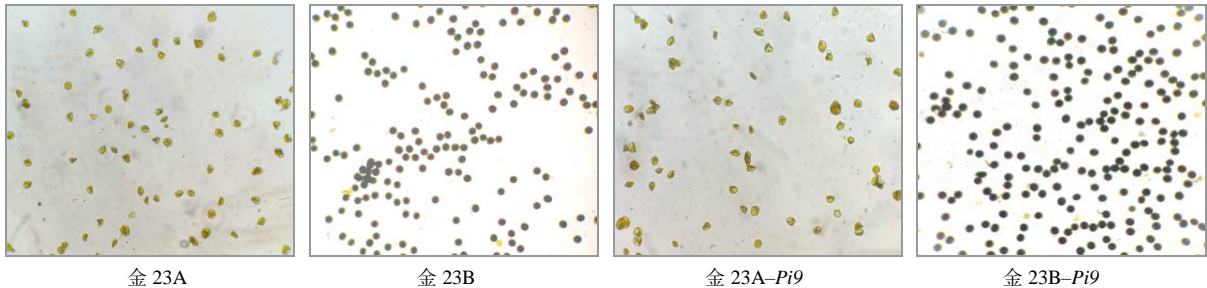


图 4 金 23A 与金 23B 及其改良系的花粉育性鉴定结果

Fig.4 Pollen fertility microscopy result of CMS lines and its maintainers

2.4 金 23A-*Pi9* 与金 23B-*Pi9* 的主要农艺性状

从表 2 可以看出, 金 23A-*Pi9* 和金 23B-*Pi9* 播始历期分别为 65、62 d, 比相应受体亲本延长 2 d, 均属于早熟类型。由于 2 个不育系都有包颈现象, 其株高均比对应保持系矮 10 cm 左右; 金 23A-*Pi9* 的株高

2.3 改良抗病不育系金 23A-*Pi9* 的不育特性

金 23A-*Pi9* 与受体亲本金 23A 的开花习性和不育特性高度相似, 两不育系均有明显的包颈现象, 盛花期 5 d 左右, 花时较早(夏季晴天约 10:00 始花, 11:00 盛花), 张颖角度较大。金 23A-*Pi9* 的柱头外露率为 65.1%, 略高于金 23A 的柱头外露率(62.3%); 花药短小、浅白色, 套袋自交结实率为 0。镜检花粉粒少, 呈典败(图4)。保持系金 23B-*Pi9* 和金 23B 均能正常抽穗开花, 不包颈, 花药呈鲜黄色, 充盈饱满, 花粉数量充足, 花粉粒具有正常的育性, 碘染后呈现蓝黑色(图4)。可见改良抗病不育系金 23A-*Pi9* 异交习性好, 不育性彻底。

约 68 cm, 较金 23A 略有增加, 但不影响配组。金 23A-*Pi9* 及金 23B-*Pi9* 的株型紧凑, 剑叶长虽比受体亲本略有增加, 但叶片挺举不披。改良不育系及其保持系的分蘖力增强, 有效穗数增多, 穗长虽略有变短, 但着粒密度增大, 穗粒数增加, 丰产性更好。

表 2 不育系和保持系的主要农艺性状

Table 2 Main agronomic traits of CMS lines and maintainers

品系	播始 历期/d	株高/cm	剑叶长/cm	剑叶宽/cm	单株有效 穗数	穗长/cm	每穗总颖 花数	每穗实粒数	结实率/%	千粒质量/g
金 23B	60	75.0±2.4	26.57±4.55	1.07±0.11	10.40±1.20	16.40±3.40	98.4±10.3	82.9±6.9	84.2±2.6	19.65±3.40
金 23A	63	66.8±2.0	33.15±6.07	1.10±0.15	10.10±0.87	15.50±2.24	99.8±7.5	0	0	0
金 23B- <i>Pi9</i>	62	80.6±2.7	34.96±8.01	1.16±0.17	12.30±2.03	14.20±2.48	106.4±11.7	90.7±4.3	85.2±4.7	21.55±2.70
金 23A- <i>Pi9</i>	65	68.2±2.7	35.00±6.38	1.13±0.20	10.90±1.68	15.40±2.38	103.2±5.0	0	0	0

2.5 改良抗病保持系金 23B-*Pi9* 米质分析

金 23B-*Pi9* 及受体亲本金 32B 的外观及食味品质分析结果见表 3。相较于金 23B, 金 23B-*Pi9* 的米饭外观评分略低, 米饭弹性指标无差异, 但米饭

口感、硬度、黏度及综合得分均优; 金 23B-*Pi9* 米饭黏度较金 23B 的高 650%, 这可能也是米饭综合评分相较亲本有所提升的主要原因。

表 3 保持系米质分析结果

Table 3 Rice quality analysis result of maintainer lines

品系	米饭综合得分	外观得分	口感得分	硬度/N	黏度/N	弹性
金 23B	42.4	5.090±0.430	3.130±0.600	52.626±3.920	0.196±0.206	0.890±0.030
金 23B- <i>Pi9</i>	64.2	4.770±0.160	4.370±0.690	41.356±3.136	1.470±0.196	0.890±0.005

### 3 结论与讨论

稻瘟病是威胁水稻安全生产的病害之一。为了降低其危害, 培育和推广抗性品种是最有效的手段。分子标记辅助选择准确率高且操作简便, 在水稻抗病虫育种中被广泛应用, 获得了许多优良水稻品种或育种材料<sup>[16-23]</sup>。

本研究利用筛选出的 *Pi9* 基因特异共显性 InDel 标记 CoInDF1R2, 以金 23B 和金 23A 为受体亲本, 连续多年开展了 MAS 回交育种实践, 获得的改良抗病不育系金 23A-*Pi9* 不育性稳定且败育彻底; 对应的改良抗病保持系育性正常。改良后的金 23A-*Pi9* 及其保持系金 23B-*Pi9* 的株高适中, 株型良好, 较受体亲本稻瘟病抗性提高, 丰产性更好, 具有更好的应用前景, 可为三系法杂交水稻育种提供新的亲本资源。

从室内接种试验结果来看, 金 23A 及其保持系金 23B 的抗性差, 抗菌谱较窄, 而 75-1-127 的抗性好, 抗菌谱广。日本菌株 KOH 虽对 75-1-127 致病, 但对金 23A 和金 23B 不致病, 这表明供体亲本和受体亲本间存在交叉抗菌谱, 利用 *Pi9* 基因定向改良金 23A 及其保持系金 23B 的稻瘟病抗性具有可行性, 可以通过杂交重组培育出抗菌谱比 75-1-127 更广的新型不育系及其保持系。因 2 种对 75-1-127 致病的稻瘟菌菌株(ROR1、KOH)都来自国外稻区, 推测本研究培育出的改良抗病不育系、保持系及其杂交种更适合在国内推广应用。此外, 本研究发现, 改良抗病不育系及其保持系的剑叶长和剑叶长宽比相较受体亲本明显增加, 这可能是受供体亲本 75-1-127 的影响。75-1-127 源自小粒野生稻, 拥有较长的叶型和较大的叶面积指数。根据作物的“源库流”理论, 只有当“源”充足时, 才能满足“库”所需的供应, 从而提高产量。推测更长的叶型和更大的叶面积指数可提升金 23A-*Pi9*-1 及其保持系金 23B-*Pi9*-1 的丰产特性。

### 参考文献:

- [1] 刘杰, 姜玉英, 黄冲, 等. 2021 年全国粮食作物重大病虫害发生趋势预报[J]. 中国植保导刊, 2021, 41(1): 37-39.
- [2] 吴俊, 刘雄伦, 戴良英, 等. 水稻广谱抗稻瘟病基因研究进展[J]. 生命科学, 2007, 19(2): 233-238.
- [3] LIU G, LU G, ZENG L, et al. Two broad-spectrum blast resistance genes, *Pi9(t)* and *Pi2(t)*, are physically linked on rice chromosome 6[J]. Molecular Genetics and Genomics, 2002, 267(4): 472-480.
- [4] QU S H, LIU G F, ZHOU B, et al. The broad-spectrum blast resistance gene *Pi9* encodes a nucleotide-binding site-leucine-rich repeat protein and is a member of a multigene family in rice[J]. Genetics, 2006, 172(3): 1901-1914.
- [5] 李永聪, 匡博文, 周小龙, 等. 广谱抗稻瘟病基因 *Pi9* 的共显性功能标记的开发与利用[J]. 分子植物育种, 2019, 17(16): 5342-5346.
- [6] 廖花, 黄俊, 刘雄伦, 等. MAS 育种改良籼稻恢复系 R747 及其杂交种稻瘟病抗性[J]. 分子植物育种, 2019, 17(10): 3289-3296.
- [7] 李永聪, 黄俊, 廖花, 等. 分子标记辅助选择改良水稻恢复系 R389 及其杂交种稻瘟病抗性[J]. 华北农学报, 2018, 33(2): 112-118.
- [8] 吴婷婷, 陈海龙, 黄俊, 等. *Pi9* 基因分子标记辅助选择改良水稻不育系丰源 A 的稻瘟病抗性[J]. 华北农学报, 2021, 36(5): 191-197.
- [9] 张婷, 黄俊, 梁毅, 等. 分子标记辅助选择 *Pi9* 基因改良籼型三系不育系三香 A 稻瘟病抗性[J]. 植物遗传资源学报, 2022, 23(2): 605-613.
- [10] 夏胜平, 李伊良, 贾先勇, 等. 籼型优质米不育系金 23A 的选育[J]. 杂交水稻, 1992, 7(5): 29-31.
- [11] BONMAN J M, VERGEL DE DIOS T I, KHIN M M. Physiologic specialization of *Pyricularia oryzae* in the Philippines[J]. Plant Disease, 1986, 70(8): 767.
- [12] MURRAY M G, THOMPSON W F. Rapid isolation of high molecular weight plant DNA[J]. Nucleic Acids Research, 1980, 8(19): 4321-4325.
- [13] 王明, 刘烨, 张海清, 等. 水稻光温敏核不育系育性敏感期高温对异交特性的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2017, 43(4): 347-352.

(下转第 515 页)

- 初筛[J]. 浙江农业学报, 2022, 34(8): 1582–1590.
- [18] 王金香, 张阿良, 秦敏, 等. 镉胁迫对玉米幼苗光合特性及活性氧代谢的影响[J]. 天津农业科学, 2023, 29(1): 1–6.
- [19] 宇克莉, 邹婧, 邹金华. 镉胁迫对玉米幼苗抗氧化酶系统及矿质元素吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(6): 1050–1056.
- [20] 李陈贞, 孙亚莉, 刘红梅, 等. 镉胁迫下不同水稻品种幼苗生长及光合性能的差异[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(2): 147–152.
- [21] VACULÍK M, PAVLOVIČ A, LUX A. Silicon alleviates cadmium toxicity by enhanced photosynthetic rate and modified bundle sheath's cell chloroplasts ultrastructure in maize[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, 120: 66–73.
- [22] 宇克莉, 孟庆敏, 邹金华. 镉对玉米幼苗生长、叶绿素含量及细胞超微结构的影响[J]. 华北农学报, 2010, 25(3): 118–123.
- [23] 岳莉然, 刘曙光, 刘颖婕, 等. 干旱和镉胁迫对过表达 *cgr-MIR398a* 拟南芥生理的影响[J/OL]. 分子植物育种: 1–8 [2022–07–22]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20220722.0924.004.html>.
- [24] 顾丹丹, 姜维民, 王卓仁, 等. 玉米苗期耐镉胁迫的基因型差异[J]. 西北农业学报, 2014, 23(10): 76–81.
- [25] KOSOLSAKSAKUL P, FARMER J G, OLIVER I W, et al. Geochemical associations and availability of cadmium(Cd) in a paddy field system, northwestern Thailand[J]. *Environmental Pollution*, 2014, 187: 153–161.

责任编辑: 毛友纯

英文编辑: 柳 正

(上接第 508 页)

- [14] 潘清洁, 赵福胜, 罗洪发, 等. 5 个新选水稻三系不育系主要农艺性状配合力分析[J]. 南方农业学报, 2020, 51(1): 36–41.
- [15] 陈能刚, 鄢小青, 陈锋, 等. 贵州水稻三系不育系品资 5 A 的主要农艺性状配合力分析和食味评价[J]. 种子, 2021, 40(5): 139–142.
- [16] 姚姝, 陈涛, 张亚东, 等. 分子标记辅助选择改良宁恢 8 号的条纹叶枯病抗性[J]. 中国水稻科学, 2014, 28(1): 85–91.
- [17] 金素娟, 柳武革, 朱小源, 等. 利用分子标记辅助选择改良温敏核不育系 GD-8S 的稻瘟病抗性[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(6): 599–604.
- [18] 谢艳平, 何泽威, 贺继奎, 等. 分子标记辅助选育高饲用价值低硫甘油菜新品种[J]. 分子植物育种, 2022, 20(21): 7132–7142.
- [19] 马作斌, 全东兴, 时羽, 等. 分子标记辅助选育聚合抗稻瘟病基因 *Pi5* 及 *Pita* 的水稻新品系[J]. 分子植物育种, 2021, 19(1): 173–179.
- [20] 赵国超, 王冬翼, 张珍, 等. 分子标记辅助选育含有抗稻瘟病基因和软米基因两系不育系水稻新品系[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2019, 48(5): 591–596.
- [21] 王石光, 陆展华, 刘维, 等. 应用 CRISPR/Cas9 技术与分子标记辅助选择创制广东丝苗米新种质[J]. 中国水稻科学, 2023, 37(1): 29–36.
- [22] 李晓雪, 鄢卫东, 彭田伟, 等. 利用分子标记辅助选择技术聚合多基因改良两系不育系创 5S 的褐飞虱抗性[J]. 杂交水稻, 2021, 36(6): 84–88.
- [23] 降好宇, 曾盖, 郝明, 等. 广谱抗稻瘟病种质 75-1-127 的褐飞虱抗性基因鉴定及分子标记辅助选择育种[J]. 中国水稻科学, 2019, 33(3): 227–234.

责任编辑: 毛友纯

英文编辑: 柳 正