

研究报告

Research Report

分子标记辅助选育优质、抗病杂交粳稻新品种 '申优 28'

牛付安^{1,4} 储黄伟^{1,4} 孙滨^{1,4} 周继华^{1,4} 张安鹏¹ 黄玮雯^{1,2} 李瑶^{1,3} 姚瑶^{1,2} 程灿^{1,4*} 曹黎明^{1,4*}

1 上海市农业科学院作物育种栽培研究所, 上海, 201403; 2 江西农业大学农学院, 南昌, 330000; 3 上海海洋大学水产与生命学院, 上海, 201306; 4 上海农产品保鲜加工工程技术研究中心, 上海, 201403

* 通信作者, clm079@163.com; chengcan222@126.com

摘要 发展杂交粳稻对保障我国优质粳米供应和粮食安全均具有重要意义。针对目前生产上杂交粳稻存在生育期偏迟、产量不稳定、稻米品质和制种产量有待提高等问题, 利用水稻高密度基因芯片技术辅助培育了早熟、优质、高产、稳产、抗稻瘟病、易于制种的杂交粳稻新组合 '申优 28'。'申优 28' 是以 BT 型粳稻不育系 '申 21A' 和恢复系 '申恢 26-28' 配制的粳型三系杂交稻, 2018~2019 两年区域试验平均产量达到 10 588.5 kg/hm², 2019 年生产试验达到 10 473.0 kg/hm², 比对照 '花优 14' 分别增产 11.6% 和 4.8%。'申优 28' 米质优良, 有香味(含香味基因 *badh2-p-5'UTR*), 达到国标二级优质米标准, 综合抗性好, 聚合了 *Pi2*、*Pita*、*Pib*、*Pi9*、*Pi54*、*Pikm*、*Pit* 等稻瘟病抗性基因以及 *Xa21* 等白叶枯病抗性基因, 2020 年通过了上海市品种审定。本研究介绍了 '申优 28' 的选育过程、特征特性以及高产机械化制种技术要点。

关键词 杂交粳稻; '申优 28'; 分子标记; 优质; 抗病

Molecular Marker Assisted Breeding of a New *Japonica* Hybrid Rice 'Shenyou28' with Good Quality and Disease Resistance

Niu Fuan^{1,4} Chu Huangwei^{1,4} Sun Bin^{1,4} Zhou Jihua^{1,4} Zhang Anpeng¹ Huang Yiwen^{1,2} Li Yao^{1,3} Yao Yao^{1,2} Cheng Can^{1,4*} Cao Liming^{1,4*}

1 Crop Breeding and Cultivation Research Institute, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai, 201403; 2 School of Agricultural Sciences, Jiangxi Agricultural University, Nanchang, 330045; 3 College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai, 201306; 4 Shanghai Agri-food Storage and processing engineering technology research center, Shanghai, 201403

* Corresponding author, clm079@163.com; chengcan222@126.com

DOI: 10.5376/mpb.cn.2021.19.0015

Abstract The development of *Japonica* hybrid rice is of great significance to ensure supply of good quality *Japonica* rice and food security in China. Aiming at the problems of late growth period, unstable yield, and the need to improve rice quality and seed production yield of *Japonica* hybrid rice, a new *Japonica* hybrid rice combination 'Shenyou28' with early maturity, good quality, blast resistance, stable and high yield and easy seed production was developed by using molecular breeding techniques including high-density rice gene chip. 'Shenyou28', bred by Shanghai Academy of Agricultural Sciences, is a three-line *Japonica* hybrid rice with 'Shen21A' as sterile line and 'Shenhui26-28' as restorer line. For two-year regional trials, the average output were 10 588.5 kg/hm², which was 11.6% higher than the control variety 'Huayou14'. For the one-year production trial, the output reached 10 473.0 kg/hm², which was 4.8% higher than the control variety 'Huayou14'. 'Shenyou28' has

本文首次发表在《分子与植物育种》上, 现依据版权所有人授权的许可协议, 采用 Creative Commons Attribution License, 协议对其进行授权, 再次发表与传播

收稿日期: 2021 年 4 月 2 日; 接受日期: 2021 年 4 月 6 日; 发表日期: 2021 年 4 月 13 日

引用格式: 牛付安, 储黄伟, 孙滨, 周继华, 张安鹏, 黄玮雯, 李瑶, 姚瑶, 程灿, 曹黎明, 2021, 分子标记辅助选育优质、抗病杂交粳稻新品种 '申优 28', 分子植物育种(网络版), 19(15): 1-8 (doi: 10.5376/mpb.cn.2021.19.0015) (Niu F., Chu H.w., Sun B., Zhou J.h., Zhang A. p., Huang Y.W., Li Y., Yao Y., Cheng C., and Cao L.M., 2021, Molecular marker assisted breeding of a new japonica hybrid rice 'Shenyou28' with good quality and disease resistance, Fengzi Zhiwu Yuzhong (Molecular Plant Breeding (online)), 19(15): 1-8 (doi: 10.5376/mpb.cn.2021.19.0015))

good quality, reaching the second grade of national standard, and has fragrance because it carries fragrance gene *badh2-p-5'UTR*. It also has good resistance to rice blast and bacterial blight because it aggregates the rice blast resistance genes *Pi2*, *Pita*, *Pib*, *Pi9*, *Pi54*, *Pikm*, *Pit*, and bacterial blight resistance gene *Xa21*. It was approved by the Crop Variety Certification Committee of Shanghai in 2020. The breeding process, variety characteristics and key points of high yield mechanized seed production technology of 'Shenyou28' are introduced in this study.

Keywords *Japonica* hybrid rice; 'Shenyou28'; Molecular marker; Good quality; Disease resistance

水稻(*Oryza sativa* L.)为我国第一大粮食作物,其产量占到了全国粮食总产量的40%左右,对保障我国粮食安全做出了重要贡献。随着人们生活水平的提高,稻米消费结构发生了较大变化,开始从吃得饱向吃得好转变,粳米因口感柔软、细腻越来越受消费者青睐,但目前全球仅有中国、日本和韩国等少数几个国家种植和出口粳米,国内粳米产量已远不能满足民众消费需求,保障粳米供应将会是我国今后粮食安全的重点。发展杂交粳稻是提高粳稻产量和满足粳米供应的重要途径,杂交粳稻虽然已经取得了举世瞩目的成就,然而杂交粳稻的发展却较为缓慢,目前我国杂交粳稻种植面积仅占粳稻种植面积的5%左右,尚具有极大的发展空间(牛付安等,2019a)。

传统育种主要凭借育种经验、依据表型对后代进行选择,选择准确性低且易受环境影响,利用分子标记可从DNA水平上直接鉴定样品基因型,从而显著提高了选择效率和准确性,目前,以分子标记辅助选择为应用主体的生物育种技术在水稻品种培育中发挥了越来越重要的作用(鲁秀梅等,2017;郭韬等,2019)。SSR等传统的分子标记存在标记数量少、基因组覆盖度低和检测费工费力等缺陷,随着DNA测序技术的迅猛发展,测序成本大大降低,有力促进了水稻重测序和简化基因组测序的开展,SNP标记在水稻分子育种中得以广泛应用。基因芯片是检测SNP的重要手段,近年来服务于育种的水稻高密度基因芯片的开发实现了对水稻重要性状功能基因的快速准确检测,该技术通过检测样品中特定基因的多个功能性SNP变异位点,帮助育种家快速找到品种的优良基因,进而了解品种的优良特性,显著提高了育种效率(喻辉辉等,2016;邱树青等,2018)。针对目前上海地区生产上主栽的杂交粳稻组合生育期偏迟、产量不稳定、制种双亲花时相遇较差等问题,我们以传统杂交技术为基础,结合水稻高密度基因芯片技术辅助培育了早熟、优质、抗稻瘟病、稳产丰产、易于制种的杂交粳稻新组合'申优28',于2020年通过了上海市品种审定(审定编号:沪审稻2020002),在长江中下游地区具有较大推广应用潜力。本文介绍了'申优

28'的选育过程、特征特性及高产机械化制种技术。

1 结果与分析

1.1 '申优28'选育经过

经鉴定,不育系'申21A'表现不育性稳定,穗较大,着粒密度中等,株型紧凑,分蘖力强,叶色绿,剑叶挺,后期熟相清秀,每穗总粒数130粒左右,千粒重24g,抗倒性强,米质优良,有香味(经分子标记检测,携带*badh2-p-5'UTR*香味基因),开花习性好,花时早且集中,开花时间主要集中在10:30~12:30,颖角度大,可恢复性好,异交结实率高。杂交粳稻新恢复系'申恢26-28'表现株高适中,分蘖力强,株型紧凑,穗大粒多,着粒密,青秆活熟,千粒重26g,配合力高,产量优势强(牛付安等,2019b),米质优,外观透明,异交性状好,颖花多,花粉量大(表1),盛花期持续时间长,花时集中,晴天一般开花时间在10:30~13:00,自始至终能保持较大的群体花粉量,易于机械化制种。

稻瘟病是长三角地区水稻高发病害,利用水稻高密度基因芯片对9个稻瘟病主效抗性基因进行单倍型分析发现,不育系'申21A'携带主效稻瘟病抗性基因*Pita*和*Pi2*,恢复系'申恢26-28'携带主效稻瘟病抗性基因*Pi9*,进一步利用分子标记对4个稻瘟病抗性基因*Pib*、*Pi54*、*Pit*、*Pikm*进行检测发现,'申21A'还含有*Pit*和*Pib*, '申恢26-28'还含有*Pikm*和*Pi54*,因此'申21A'与'申恢26-28'杂交配组可以聚合*Pita*、*Pib*、*Pi2*、*Pi9*、*Pi54*、*Pikm*和*Pit*等7个稻瘟病主效抗性基因,易于选出抗稻瘟病杂交粳稻新组合。利用水稻高密度基因芯片对5个白叶枯病抗性基因进行单倍型分析,发现'申21A'和'申恢26-28'均含有白叶枯病抗性基因*Xa21*。

将'申恢26-28'与'申21A'测交配组,杂交组合表现青秆活熟、综合抗性好、产量优势强,于2020年7月通过了上海市品种审定。

1.2 '申优28'产量表现

2018~2019年'申优28'在奉贤庄行(庄行)、崇明

表 1 恢复系 '申恢 26-28' 与 '繁 14' 单花药花粉数、每穗颖花数和有效穗比较

Table 1 Comparison of pollen number of single anther, spikelets per panicle and effective panicle number between restorer lines 'Shenhui26-28' and 'Fan 14'

名称	申恢 26-28	繁 14/CK	增加百分比(%)
Name	Shenhui 26-28	Fan14/CK	Percentage increase (%)
单花药花粉数	2306.0	1820.0	26.7
Pollen number of single anther			
每穗颖花数	176.2	165.3	6.6
Spikelets per panicle			
有效穗($10^4/\text{hm}^2$)	267.0	253.5	5.3
Effective panicle number ($10^4/\text{hm}^2$)			

光明种业(光明)、奉贤潘垫(潘垫)、浦东祝桥(祝桥)、崇明上实集团(上实)、浙江衢州(衢州)、安徽合肥(合肥)等地进行多点鉴定示范种植,2018 年平均产量 10 880.4 kg/hm², 较对照 '花优 14' 增产 12.6%,2019 年平均产量 10 705.7 kg/hm², 较对照 '花优 14' 增产 8.1%(表 2)。2019 年 '申优 28' 在上海、浙江、安徽、江西、江苏等地示范种植,表现良好,其中在浙江嘉兴市嘉善天凝基地产量达到 10 731.0 kg/hm²。

'申优 28' 于 2018~2019 年参加上海市杂交粳稻区域试验,平均产量 10 588.5 kg/hm²,较对照增产 11.6%,增产极显著;2019 年参加上海市杂交粳稻生产试验,产量达到 10 473.0 kg/hm²,较对照增产 4.8%(表 3)。「申优 28」表现高产且稳产,在长江中下游区域显示出了广泛的适应性。

1.3 '申优 28' 农艺性状

'申优 28' 在上海作单季晚稻种植全生育期约 155 d,较对照 '花优 14' 早熟 6 d,表现成熟期早,有利于缓解同后茬作物的矛盾。该品种株型适中,分蘖力强,叶色绿,青秆活熟,穗长 17.1 cm,穗大粒多,粒型中等,着粒密,籽粒灌浆速度快,结实率高达 92.0%,株高 115.0 cm,抗倒性强,每 667 m² 有效穗数 17.4×10⁴,每穗总粒数 193.6 粒,千粒重 26.8 g。

1.4 '申优 28' 稻米品质鉴定

经上海市种子管理总站委托农业农村部稻米及制品质量监督检验测试中心检验,'申优 28' 除了糙米率和直链淀粉含量之外,所有检测指标均达到了国标优质米一级标准(依据 NY/T593-2013《食用稻品种品质》标准),其中垩白粒率为 3%,垩白度为 0.4%,透明度为 1 级(表 4),外观品质表现尤其突出。「申优 28」米质优良,整体上达到优质二等食用粳稻品种品质规定要求。

1.5 '申优 28' 抗病性鉴定

杂交粳稻新组合 '申优 28' 综合抗性好,抗倒性强,对稻瘟病和白叶枯病均具有较好抗性。2019 年上海市农业技术推广服务中心委托江苏省农业科学院进行接种鉴定,'申优 28' 表现高抗苗瘟(HR),抗穗瘟(R),中抗叶瘟(MR),稻瘟病综合抗性评价为抗(R);对白叶枯病接种鉴定显示,'申优 28' 对白叶枯病代表致病菌株 PX079 和 JS49-6 具有较好抗性。

1.6 '申优 28' 高产机械化制种技术要点

(一)合理安排父母本播差期

'申优 28' 父母本在同时播种、移栽情况下,父本抽穗期较母本迟 4 d,为使父母本制种时盛花期相遇,父本 '申恢 26-28' 于 5 月 15 日和 5 月 22 日分两期播种,母本 '申 21A' 于 6 月 7 日单期播种。母本秧盘播种,每盘播 90 g 干谷;父本秧田育秧,秧田播种量 225 kg/hm²,秧板盖薄膜或无纺布,促早发。

(二)合理设置父母本行比和移栽期

拖拉机辅助授粉时父母本行比宜为 2:7~2:8,行株距宜为 25×13 cm,保证母本基本苗 75×10⁴ 株/hm² 左右。父本 '申恢 26-28' 较母本提前 10 d 左右栽插(6/20 日左右),待返青后机插母本 '申 21A',秧苗浅插。

(三)及时做好水肥管理,构建好的制种群体

'申优 28' 制种母本移栽期偏晚,施肥要求底肥足,追肥早,促进早分蘖,以保证母本在移栽后 25~30 d 最高苗达到 300~330×10⁴ 苗/hm²,父本 90~105×10⁴ 苗/hm²。水浆管理要有利于分蘖生长,搁田时采取轻搁、分次搁的策略。

(四)及时进行花期预测和调整

7 月底母本 '申 21A' 带肥搁田,母本偏施尿素 225 kg/hm²,幼穗分化开始后制种田持续灌深水。同

表 2 2018~2019 年杂交粳稻新组合 '申优 28' 多点鉴定产量表现
Table 2 Yield performance of multi-point identification of the new Japonica hybrid rice combination 'Shenyou28' in 2018 and 2019, respectively

年份 Year	试验地点 Test place	产量(kg/hm ²) Yield (kg/hm ²)		增产(%) Yield increase (%)
		申优 28 Shenyou 28	花优 14 Huayou 14	
		2018	庄行 Zhuanghang	
	光明 Guangming	10 920.2	9 567.3	14.1
	潘垫 Pandian	10 479.0	9 793.5	7.0
	祝桥 Zhuqiao	11 355.0	10 417.5	9.0
	上实 Shangshi	11 130.0	9 228.0	20.6
	衢州 Quzhou	9 337.5	8 962.5	4.2
	合肥 Hefei	11 416.5	10 645.5	7.2
	平均 Average	10 880.4	9 677.2	12.6
2019	庄行 Zhuanghang	10 276.5	9 975.0	3.0
	光明 Guangming	10 899.0	9 706.5	12.3
	潘垫 Pandian	9 352.5	9 295.5	0.6
	祝桥 Zhuqiao	11 607.0	10 867.5	6.8
	上实 Shangshi	10 375.5	9 082.5	14.2
	衢州 Quzhou	10 192.5	9 186.0	11.0
	合肥 Hefei	12 237.0	11 260.5	8.7
	平均 Average	10 705.7	9 910.5	8.1

时,自 7 月底开始每隔 3 d 组织相关人员逐田开展幼穗剥查并进行发育进度分析,若母本幼穗分化较父本快或相仿,则继续对母本偏施氮肥,施肥前放干田间水浆,偏施母本中间 5 行,尽量不让父本吸收肥料。最终调节效果以一期父本早母本 1~2 d 始穗为最佳。

(五)喷施赤霉素及机械化割叶、赶粉

母本 '申 21A' 的剑叶偏短,可在见穗 5%时用园

林修割专用机器进行机械割叶,割去剑叶长度的 1/3~2/3。为了便于散粉,父本可割去剑叶 2/3 (程灿等, 2017)。见穗期割叶后父本单打赤霉素 90 g/hm²,隔天父母本统打赤霉素 90 g/hm²。割叶后第 2 d 开始机械赶粉,晴天赶粉时间一般在 10:50~12:30,以母本开花时间为准,单趟不来回,每隔 20~30 min 赶粉 1 次,阴雨天也正常赶粉。

(六)机械化收割和烘干精选

于各个制种环节(主要是分蘖期,花期,成熟收割前和父本收获后)认真、严格去除杂株,保证种子纯度,父本收割且田间验收合格后,再机械收获母本。制种田种子宜适时提早收割,并在收割后及时上机烘干和进行精选,从而保证发芽率。

2 讨论

基于测序技术开发的 SNP 标记已开始广泛应用于水稻分子育种研究,近年来开发的水稻高密度基因芯片通过对基因区域以及基因临近区段一组多态性标记的联合分析(单倍型分析),实现了对水稻重要性状功能基因的快速和准确鉴定 (邱树青等, 2018)。本研究利用水稻高密度基因芯片对杂交粳稻骨干亲本一些重要的稻瘟病和白叶枯病抗性基因进行了鉴定,所得结果为抗病性杂交粳稻新组合选育打下了坚实基础。

稻瘟病是世界上最严重的水稻病害之一,生产上每年可造成 35%~50%的损失 (Singh et al., 2015),严重时甚至颗粒无收。利用优质基因资源培育抗病性水稻新品种被证明是防治稻瘟病最经济、环保、有效的方法 (梁廷敏等, 2019)。由于稻瘟病菌与水稻的互作符合基因对基因假说,稻瘟病菌株的定向变异会令携带单一或少数稻瘟病抗性基因的品种逐渐丧失抗性 (Li et al., 2017; 杨德卫等, 2019)。目前已克隆的稻瘟病抗性基因至少 35 个 (朱业宝等, 2020),其中多数为显性。研究表明,多个抗性基因聚合于同一个品种,不仅可以拓宽抗谱,一定程度上还可以提高品种对特定生理小种的抗性水平 (Sakowicz et al., 2004; 孙滨等, 2020),因此,聚合双亲较多的主效稻瘟病抗性基因是提高杂交粳稻稻瘟病抗性水平的有效途径,在水稻杂交配组前可先进行双亲稻瘟病抗性基因的分子检测,通过合理的杂交配组来聚合较多的稻瘟病抗性基因,从而实现杂种一代的稻瘟病抗性预测。本研究中的 '申优 28' 不仅聚合了稻瘟病抗性基因 *Pita Pib*、*Pi54*、*Pikm*、*Pit*, 还聚合了复等位基

表 3 2018~2019 年 '申优 28' 区域试验和生产试验产量

Table 3 Regional trials and production trial yield of 'Shenyou28' in 2018 and 2019, respectively

组别 Group	年份 Year	产量(kg/hm ²) Yield (kg/hm ²)		增产(%) Yield increase (%)
		申优 28 Shenyou28	花优 14 Huayou14	
		市区试 Municipal regional trial	2018	
	2019	11 050.5	9 955.5	11.0
	平均 Average	10 588.5	9 486.8	11.6
市生试 Municipal production trial	2019	10 473.0	9 993.0	4.8

表 4 农业农村部稻米及制品质量监督检验测试中心 '申优 28' 品质测试结果

Table 4 Quality test results of 'Shenyou28' from rice and product quality inspection center of Ministry of Agriculture

项目 Project	一级优质米标准 First class standard of high quality rice	测定结果 Test result
糙米率(%) Brown rice rate (%)	≥83	81.9
精米率(%) Milled rice rate (%)	-	74.0
整精米率(%) Head rice rate (%)	≥69	72.3
垩白粒率(%) Chalkiness rate (%)	-	3
垩白度(%) Chalkiness degree (%)	≤1.0	0.4
透明度 transparency	≤1	1
直链淀粉含量(%) Amylose content (%)	13~18	18.4
碱消值 Alkali dissipation value	≥7.0	7.0
胶稠度(mm) Gel consistency (mm)	≥70	79

因 Pi2 和 Pi9, 生产上稻瘟病抗性良好。稻瘟病显性抗性基因互补育种策略在杂交粳稻抗病性育种上的应用有利于新品种稻瘟病持久抗性水平的提高。

杂交水稻的推广应用对保障我国粮食产量十几年连续稳定增长功不可没(唐文帮等, 2020)。然而, 近些年杂交水稻种植面积出现了下降趋势, 究其原因, 制种产量低和成本高是重要的原因, 严重影响了杂交新组合的推广速度。杂交水稻种子生产的全程机械化是提高杂交水稻制种效率, 促进杂交水稻进一步发展的必由之路(徐庆国和黄丰, 2010)。杂交粳稻新组合 '申优 28' 母本 '申 21A' 具有开花习性好、开

颖角度大、异交结实率高等特性, 父本 '申恢 26-28' 具有花粉量大、花时集中、盛花期持续时间长等特性, 因此 '申优 28' 易于机械化制种, 具有高产制种的基础。通过对 '申优 28' 父母本播差期、机械化制种父母本行比、机械化制种田水肥管理、机械割叶、喷施赤霉素及机械化赶粉等技术的系统研究, 我们建立了杂交粳稻 '申优 28' 高产机械化制种技术, 有利于实现杂交粳稻 '申优 28' 种子生产全程机械化, 提高制种产量, 降低制种成本, 为 '申优 28' 大面积推广应用打下了坚实基础。

稻米品质性状遗传机制复杂, 杂种一代虽然表

型比较稳定,但其稻谷已经是 F2 代,米质性状发生了分离,所以杂交粳稻米质改良难于常规粳稻,尤其是外观品质,一般杂交粳稻落后于常规粳稻(闵捷等, 2007)。理论上,不育系和恢复系米质均优良,且两者间各项米质指标差异较小,更易配制出优质杂交新组合。根据该原则,我们选取优质不育系 '申 21A' 和优质恢复系 '申恢 26-28' 进行配组,选育出了优质杂交粳稻新品种 '申优 28',该品种表现品质优良,尤其外观品质取得了明显突破,垩白粒率 3%,垩白度 0.4%,透明度 1 级,3 项指标均达到了国标一级优质米标准。'申优 28' 表现熟期早、米质优、高产稳产、抗病性强,易于机械化制种,在长江中下游区域应用前景广阔。

3 材料与方 法

3.1 供试材料

供试材料包括 '申 21A' 和 '申恢 26-28'。'申 21A' 是 2015 年春季以系选株系 '申 21' 与粳稻不育系 '申 9A' 杂交并连续回交置换而成的粳型不育系,2017 年不育系育性稳定,株高 90.8 cm,感光性较强;粳型恢复系 '申恢 26-28' 是 2016 年正季在 '申恢 26' 繁种圃中系选的优良株系,播始历期 104 d 左右,较 '申恢 26' 提早 1~2 d。

3.2 '申 21A' 和 '申恢 26-28' 抗性和香味基因的分子标记检测

利用水稻高密度基因芯片对 '申 21A' 和 '申恢 26-28' 稻瘟病和白叶枯病抗性基因进行了单倍型分析。抗性基因单倍型分析是通过基因区域以及基因上下游 100 kb 区域特异的一组多态性标记,对样品是否含有某种抗性基因进行判断,分析的抗性基因包括稻瘟病抗性基因 *Pi1*、*Pi2*、*Pi5*、*Pi9*、*Pia*、*Pid2*、*Pid3*、*Pigm*、*Pita* 以及白叶枯病抗性基因 *xa13*、*Xa21*、*Xa23*、*xa5* 和 *Xa7*,分析检测方法参见文献(Chen et al., 2014)。

为了检测更多稻瘟病抗性基因在两个亲本中的分布,利用文献报道的功能性分子标记对稻瘟病抗性基因 *Pib* (Fjellstrom et al., 2004; 刘洋等, 2008)、*Pi54* (*Pikh*) (Sharma et al., 2010; Ramkumar et al., 2011)、*Pit* (Hayashi et al., 2010)、*Pikm* (Ashikawa et al., 2008)进行了分子标记检测,稻瘟病抗性基因 *Pib*、*Pi54* 和 *Pit* 引物信息、PCR 扩增以及产物检测方法参照文献(储黄伟等, 2018); *Pikm* 检测方法参照文献(宋兆强等, 2017); 对两个亲本香味基因的检测方法参照文献

(Shi et al., 2014)。

作者贡献

牛付安是本研究的执行人并负责实验结果数据分析以及论文写作;储黄伟参与分子标记检测和数据分析;孙滨参与数据采集、分析和论文初稿的修改;周继华、张安鹏、黄炜雯、李瑶和姚瑶参与数据采集与分析;曹黎明和程灿是本项目的负责人,指导实验设计、论文写作和修改。全体作者都阅读并同意最终的文本。

致谢

本研究由上海市水稻产业技术体系建设项目(沪农科产字(2020)第 3 号)、上海市科委优秀技术带头人项目(18XD1424300)、上海市农业科学院卓越团队建设(农科创 2017(A-05))和上海市科技创新行动计划农业领域项目(19391900400)共同资助。

参考文献

- Ashikawa I., Hayashi N., Yamane H., Kanamori H., Wu J.Z., Matsumoto T., Ono K., and Yano M., 2008, Two adjacent nucleotide-binding site-leucine-rich repeat class genes are required to confer *Pikm*-specific rice blast resistance, *Genetics*, 180(4): 2267-2276.
- Cheng C., Zhou J.H., Niu F.A., Chu H.W., Wang X.X., Luo Z.Y., Wang X.Q., Cao L.M., and Yuan Q., 2017, Mechanized seed production techniques of new Japonica hybrid rice combination Shenyong 17, *Zajiao Shuidao (Hybrid Rice)*, 32(3): 25-26. (程灿, 周继华, 牛付安, 储黄伟, 王新新, 罗忠永, 王新其, 曹黎明, 袁勤, 2017, 杂交粳稻新组合申优 17 机械化制种技术, *杂交水稻*, 32(3): 25-26.)
- Chen H.D., Xie W.B., He H., Yu H.H., Chen W., Li J., Yu R.B., Yao Y., Zhang W.H., He Y.Q., Tang X.Y., Zhou F.S., Deng X.W., and Zhang Q.F., 2014, A High-Density SNP Genotyping Array for Rice Biology and Molecular Breeding, *Molecular Plant*, 7(3): 541-553.
- Chu H.W., Cheng C., Niu F.A., Zhou J.H., Tu R.J., Luo Z.Y., Wang X.Q., and Cao L.M., 2018, Distribution of 8 rice blast-resistant genes in parents of three-line hybrid keng rice, *Shanghai Nongye Xuebao (Acta Agriculturae Shanghai)*, 34(1): 8-13. (储黄伟, 程灿, 牛付安, 周继华, 涂荣剑, 罗忠永, 王新其, 曹黎明, 2018, 8 个稻瘟病抗性基因在三系杂交粳稻亲本中的分布, *上海农业学报*, 34(1): 8-13.)
- Fjellstrom R.G., Conaway-Bormans C.A., McClung A.M., Marchetti M.A., and Park W.D., 2004, Development of DNA markers suitable for marker assisted selection of three

- Pi genes conferring resistance to multiple *pyricularia grisea* pathotypes, *Crop Science*, 44(5): 1790-1798.
- Guo T., Yu H., Qiu J., Li J.Y., Han B., and Lin H.X., 2019, Advances in rice genetics and breeding by molecular design in China, *Zhongguo Kexue: Shengming Kexue (Sci Sin Vitae)*, 49(10): 1185-1212. (郭韬, 余泓, 邱杰, 李家洋, 韩斌, 林鸿宣, 2019, 中国水稻遗传学研究进展与分子设计育种, *中国科学: 生命科学*, 49(10): 1185-1212.)
- Hayashi K., Yasuda N., Fujita Y., and Yoshida S.K., 2010, Identification of the blast resistance gene Pit in rice cultivars using functional markers, *Theoretical and Applied Genetics*, 121(7): 1357-1367.
- Li W.T., Zhu Z.W., Chern M., Yin J.J., Yang C., Ran L., Cheng M.P., He M., Wang K., Wang J., Zhou X.G., Zhu X.B., Chen Z.X., Wang J.C., Zhao W., Ma B.T., Qin P., Chen W.L., Wang Y.P., Liu J.L., Wang W.M., Wu X.J., Li P., Wang J.R., Zhu L.H., Li S.G., and Chen X.W., 2017, A natural allele of a transcription factor in rice confers broad-spectrum blast resistance, *Cell*, 170(1): 114-126.
- Liang T.M., Chen Z.J., and Chen S.B., 2019, Research and progress of the application of genomewide analysis strategy in gene identification of rice blast resistance, *Fenzi Zhiwu Yuzhong (Molecular Plant Breeding)*, 17(5): 1525-1530. (梁廷敏, 陈在杰, 陈松彪, 2019, 全基因组分析策略应用于水稻抗稻瘟病基因鉴定的研究和进展, *分子植物育种*, 17(5): 1525-1530.)
- Liu Y., Xu P.Z., Zhang H.Y., Xu J.D., Wu F.Q., and Wu X.J., 2008, Marker-assisted selection and application of blast resistant gene Pib in rice, *Zhongguo Nongye Kexue (Scientia Agricultura Sinica)*, 41(1): 9-14. (刘洋, 徐培洲, 张红宇, 徐建第, 吴发强, 吴先军, 2008, 水稻抗稻瘟病 Pib 基因的分子标记辅助选择与应用, *中国农业科学*, 41(1): 9-14.)
- Lu X.M., Zhang N., Chen J.F., and Qian C.T., 2017, The research progress in crops pyramiding breeding, *Fenzi Zhiwu Yuzhong (Molecular Plant Breeding)*, 15(4): 1445-1454. (鲁秀梅, 张宁, 陈劲枫, 钱春桃, 2017, 作物基因聚合育种的研究进展, *分子植物育种*, 15(4): 1445-1454.)
- Min J., Zhu Z.W., Xu L., and Mou R.X., 2007, Studies on grain quality and high quality rate of japonica hybrid rice in china, *Zajiao Shuidao (Hybrid Rice)*, 22(1): 67-70. (闵捷, 朱智伟, 许立, 牟仁祥, 2007, 中国杂交粳稻的米质及优质达标率研究, *杂交水稻*, 22(1): 67-70.)
- Niu F.A., Cheng C., Zhou J.H., Chu H.W., Cao L.M., 2019a, Study on the yield stability of Japonica hybrid rice by combining ability analysis, *Shanghai Nongye Xuebao (Acta Agriculturae Shanghai)*, 35 (3): 1-6. (牛付安, 程灿, 周继华, 储黄伟, 曹黎明, 2019a, 利用配合力分析研究杂交粳稻的产量稳定性, *上海农业学报*, 35(3): 1-6.)
- Niu F.A., Cheng C., Zhou J.H., Chu H.W., Cao L.M., and Luo Z. Y., 2019b, Analysis of combining ability of yield related characters and appearance quality character of restorer lines in japonica hybrid rice, *Shanghai Nongye Xuebao (Acta Agriculturae Shanghai)*, 35(1): 16-21. (牛付安, 程灿, 周继华, 储黄伟, 曹黎明, 罗忠勇, 2019b, 杂交粳稻新恢复系产量相关性状和外观品质性状的配合力分析, *上海农业学报*, 35(1): 16-21.)
- Qiu S.Q., Lu Q., Yu H.H., Ni X.M., Zhang G.Y., He H., Xie W. B., and Zhou F.S., 2018, The development and application of rice whole genome selection breeding platform, *Shengming Kexue (Chinese Bulletin of Life Sciences)*, 30 (10): 1120-1128. (邱树青, 陆青, 喻辉辉, 倪雪梅, 张耕耘, 何航, 谢为博, 周发松, 2018, 水稻全基因组选择育种技术平台构建与应用, *生命科学*, 30(10): 1120-1128.)
- Ramkumar G., Srinivasarao K., Mohan K.M., Sudarshan I., Sivaranjani A.K.P., Gopalakrishna K., Neeraja C.N., Balachandran S.M., Sundaram R.M., Prasad M.S., Rani N.S., Prasad A.M.R., Viraktamath B.C., and Madhav M.S., 2011, Development and validation of functional marker targeting an InDel in the major rice blast disease resistance gene Pi54 (Pikh), *Molecular Breeding*, 27 (1): 129 -135.
- Sakowicz R., Finer J.T, and Beraud C., 2004, Antitumor activity of a kinesin Inhibitor, *Cancer Research*, 64(9): 3276-3280.
- Sharma T.R., Rai A.K., Gupta S.K., and Singh N.K., 2010, Broad-spectrum blast resistance gene Pi-kh cloned from rice line tetep designated as Pi54. *Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology*, 19(1): 87-89.
- Shi Y.Q., Zhao G.C., Xu X.L., and Li J.Y., 2014, Discovery of a new fragrance allele and development of fu44nctional markers for identifying diverse fragrant genotypes in rice, *Mol Breeding*, 33(1): 701-708.
- Singh W.H., Kapila R.K., Sharma T.R., and Rathour R., 2015, Genetic and physical mapping of a new allele of Pik locus from japonica rice 'Liziangxintuanheigu', *Euphytica*, 205(3): 889-901.
- Song Z.Q., Liu Y., Wang B.X., Wang F.Q., Chi M., Liu J.B., Chen T.M., Fang Z.W., Xing Y.G., Xu B., Yang B., Yang J., and Xu D.Y., 2017, Application value of blast resistant genes Pi-ta, Pi-b, Pi54 and Pi-km in rice breeding, *Jiangsu Nongye Xuebao (Jiangsu Journal of Agricultural Sciences)*, 33(5): 968-974. (宋兆强, 刘艳, 王宝祥, 王芳权, 迟铭, 刘金波, 陈庭木, 方兆伟, 邢运高, 徐波, 杨波, 杨杰, 徐大勇, 2017, 稻瘟病抗性基因 Pi-ta、Pi-b、Pi54 和 Pi-km 的育种利用价值评价, *江苏农业学报*, 33(5): 968-974.)
- Sun B., Niu F.A., Zhou J.H., Chu H.W., Luo Z.Y., Cheng C., and Cao L.M., 2020, Characteristics and key cultivation techniques of new Japonica three-line hybrid rice 'Shenyou26', *Fenzi Zhiwu Yuzhong (Molecular Plant Breeding)*, 18(10): 3449-3454. (孙滨, 牛付安, 周继华, 储黄伟, 罗忠勇, 程灿,

- 曹黎明, 2020, 粳型三系杂交水稻 '申优 26' 的选育及其栽培技术, *分子植物育种*, 18(10): 3449-3454.)
- Tang W.B., Zhang G.L., Deng H.B., 2020, Technology exploration and practice of hybrid rice mechanized seed production, *Zhongguo Shuidao Kexue (Chinese Journal of Rice Science)*, 34(2): 95-103. (唐文帮, 张桂莲, 邓化冰, 2020, 杂交水稻机械化制种的技术探索与实践, *中国水稻科学*, 34(2): 95-103.)
- Xu Q.G, and Huang F., 2010, Studies and progress on seed production mechanization technology in hybrid rice, *Nongye Gongcheng Xuebao (Transactions of the CSAE)*, 26(1): 37-41. (徐庆国, 黄丰, 2010, 杂交水稻机械化种子生产技术的进展, *农业工程学报*, 26(1): 37-41.)
- Yang D.W., Wang M., Han L.B., Tang D.Z., and Li S.P., 2019, Progress of cloning and breeding application of blast resistance genes in rice and avirulence genes in blast fungi. *Zhiwu Xuebao (Chinese Bulletin of Botany)*, 54(2): 265-276. (杨德卫, 王莫, 韩利波, 唐定中, 李生平, 2019, 水稻稻瘟病抗性基因的克隆、育种利用及稻瘟菌无毒基因研究进展, *植物学报*, 54(2): 265-276.)
- Yu H.H., Zhang Q.F., and Zhou F.S., 2016, Rice genomic breeding chips and its applications, *Shengming Kexue (Chinese Bulletin of Life Sciences)*, 28(10): 1258-1267. (喻辉辉, 张启发, 周发松, 2016, 水稻基因组育种芯片及其应用, *生命科学*, 28(10): 1258-1267.)
- Zhu Y.B., Fang S.R., Shen W.F., Chen L.Z., Jiang C., and Wang J.Y., 2020, Detection and evaluation of blast resistance genes in exotic rice germplasm resources, *Zhiwu Yichuan Ziyuan Xuebao (Journal of Plant Genetic Resources)*, 21(2): 418-430. (朱业宝, 方珊茹, 沈伟峰, 陈立喆, 江川, 王金英, 2020, 国外引进水稻种质资源的稻瘟病抗性基因检测与评价, *植物遗传资源学报*, 21(2): 418-430.)