

江苏省优良食味粳稻的遗传与育种研究

王才林, 张亚东, 赵春芳, 魏晓东, 姚姝, 周丽慧, 朱镇, 陈涛, 赵庆勇, 赵凌, 路凯, 梁文化

江苏省农业科学院粮食作物研究所, 江苏省优质水稻工程技术研究中心, 国家水稻改良中心南京分中心, 南京 210014

摘要: 为了培育适合在江苏种植的优良食味粳稻品种, 以优良食味为主攻目标, 对江苏省优质、抗病、高产粳稻品种的遗传基础开展了系统研究。通过关联分析, 研究稻米蒸煮品质、营养品质与食味品质的关系, 明确直链淀粉含量是影响食味品质的关键性状。直链淀粉含量为 10%~14% 的半糯米米饭表面光泽透亮、质地柔软、富有弹性, 综合了糯米的柔软性和粳米的弹性, 冷饭不硬, 食味品质极佳, 符合长三角地区人们喜食柔软香型粳米的口感需求。筛选出直链淀粉含量在 10% 左右、含有低直链淀粉含量基因 *Wx^{mp}* 的日本半糯粳稻品种“关东 194”作为食味品质改良的核心种质。开发 *Wx^{mp}* 基因的分子标记, 结合利用与抗病、高产相关基因紧密连锁的分子标记, 开展优良食味、抗病、高产粳稻聚合育种。育成适合江苏省不同稻区种植的南粳 46、南粳 5055、南粳 9108 和南粳 5718 等优良食味粳稻系列新品种通过审定, 形成了覆盖江苏省不同稻区的优良食味粳稻品种布局, 累计推广面积超过 533 万公顷, 有力地促进了江苏省及周边地区优质稻米产业的发展, 为水稻产业供给侧结构调整, 提质增效, 保障粮食安全作出了重要贡献。

关键词: 粳稻; 优良食味; 品种; 遗传; 育种

Inheritance and breeding of *japonica* rice with good eating quality in Jiangsu province

Cailin Wang, Yadong Zhang, Chunfang Zhao, Xiaodong Wei, Shu Yao, Lihui Zhou, Zhen Zhu, Tao Chen, Qingyong Zhao, Ling Zhao, Kai Lu, Wenhua Liang

Institute of Food Crops, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Jiangsu High Quality Rice Research and Development Center, Nanjing Branch of China National Center for Rice Improvement, Nanjing 210014, China

Abstract: In order to develop a variety of *japonica* rice with good eating quality suitable for planting in Jiangsu Province, the genetic basis of high quality, disease resistance and high yield *japonica* rice varieties in Jiangsu Province was systematically studied. The relationship among different rice qualities of cooking, nutrition, and eating was studied by association analysis. It was clear that amylose content was the key factor affecting eating quality. The semi waxy rice with

收稿日期: 2020-12-31; 修回日期: 2021-03-01

基金项目: 国家现代农业产业技术体系建设专项资金项目(编号: CARS-01-62)和江苏省自主创新基金项目(编号: CX[20]2002)资助[Supported by the Special Fund for China Agriculture Research System (No. CARS-01-62), and Jiangsu Agriculture Science and Technology Innovation Fund (No. CX[20]2002)]

作者简介: 王才林, 博士, 研究员, 水稻遗传育种。E-mail: clwang@jaas.ac.cn

DOI: 10.16288/j.ycz.20-452

网络出版时间: 2021/3/18 9:52:17

URI: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1913.r.20210315.1628.006.html>

amylose content of 10%~14% has bright surface, soft texture, and elasticity, combining the softness of glutinous rice and the elasticity of *japonica* rice. The cold rice is not hard, and the taste is excellent. It meets the taste requirements of people in Yangtze River Delta region who like to eat soft fragrant *japonica* rice. The semi waxy *japonica* rice variety “Kantou 194” with a low expression of amylose content gene Wx^{mp} and an amylose content of about 10% was selected as the core germplasm for improving eating quality. Pyramiding breeding of *japonica* rice variety with good eating quality, disease resistance and high yield was carried out by examining the development of Wx^{mp} gene molecular markers and the use of closely linked molecular markers with disease resistance and high yield genes. A series of new *japonica* rice varieties with good taste such as Nanjing 46, Nanjing 5055, Nanjing 9108, and Nanjing 5718, suitable for different rice areas of Jiangsu Province, have been bred and approved by Jiangsu Provincial Variety Approval Committee. The layout of *japonica* rice varieties with good taste covering different rice areas in Jiangsu Province has been formed. These varieties have been planted with an accumulated area of more than 5.3 million hectares, which has effectively promoted the development of high quality rice industry in Jiangsu Province and its surrounding areas, and made important contributions to the structural adjustment of the supply side of rice industry, improving quality and efficiency, and ensuring food security.

Keywords: *japonica* rice; good eating quality; variety; heredity; breeding

水稻是我国最重要的粮食作物,提高水稻产量、改善稻米品质是保障中国口粮绝对安全、提高人民生活水平的重要举措^[1]。近几年,江苏省水稻种植面积稳定在 220 万公顷左右,其中粳稻面积近 200 万公顷,总产约 1700 万吨,分别占全国粳稻面积和总产的 22%和 24%左右,在保障江苏乃至全国粮食安全中的地位举足轻重^[2]。因此,上个世纪,江苏省的水稻育种一直以高产为主要目标。

进入 21 世纪以后,随着人民生活水平的提高,稻米品质越来越受到消费者的重视,水稻产业实行大力发展优质稻的战略性调整,优质成为江苏省粳稻育种的首要目标^[3]。同时条纹叶枯病开始在江苏粳稻区爆发流行,对江苏粳稻育种提出严峻挑战。而当时江苏水稻生产上大面积推广的高产粳稻品种往往高而不优、优而不抗。日本品种“越光”的食味品质堪称一绝,黑龙江五常生产的“稻花香 2 号”在国内也有较高的知名度,但日本和东北品种均属早中粳类型,且 not 抗条纹叶枯病,产量较低,不适合在江苏大面积种植。因此,江苏粳稻的优质育种必须以高产和抗病为基础。

稻米品质包括加工品质、外观品质、食味品质、营养品质和安全品质^[4]。食味品质指稻米在蒸煮和食用过程中所表现的各种理化及感官特性,是稻米品质的核心。优良食味就是食味好、好吃的意思,

优良食味粳稻就是指好吃的粳稻品种。然而,食味品质究竟与哪些因素有关?中国地域广大,水稻品种类型多样,不同地区人群对稻米品质的要求及嗜好性各不相同,作为南方粳稻主栽区的江苏,食味品质改良的路径该如何选择?近 20 年来,本研究团队以优良食味为主攻目标,对江苏省优质、抗病、高产粳稻品种选育的技术途径开展了系统研究。本文总结本团队在粳稻食味品质性状的遗传和改良方面取得的成绩,以期为育种工作者提供参考。

1 稻米食味品质主要基因的遗传变异及其对食味品质的影响

1.1 粳稻食味品质相关基因的关联分析

为了阐明影响稻米食味品质的遗传基础,对 253 个水稻品种(包括 83 个籼稻和 170 个粳稻品种)进行了全基因组关联分析。通过群体结构分析,发现籼粳两个亚种存在较强的群体分化($F_{st}>0.75$),因而对籼、粳两个亚种分别进行了关联分析。结果表明,在整个群体和籼粳两个亚种中,多数性状间存在显著的表型相关。在籼稻和粳稻亚种分别检测到 33 个和 30 个遗传位点。大多数位点与淀粉合成相关基因重叠,并在 Wx 基因上检测到控制直链淀粉含量

(amylose content, AC)、胶稠度(gel consistency, GC)和 RVA 谱特征值等 9 个性状的 14 个遗传位点,表明该位点是一个聚集了多个性状的多效性基因位点。8 个遗传位点表现出籼粳亚种的特异性,包括籼稻亚种特有的 *RM588*、*Wx*-(*CT*)*n*、*SSI* 和 *SBE1* 遗传位点,粳稻亚种特有的 *RM550*、*Wx^{mp}*、*SSIa* 和 *SBE4* 遗传位点,表明控制食味品质性状的遗传位点存在籼粳亚种间的分化。在粳稻亚种两年都检测到位于第 2 染色体上的一个 SSR 位点 *RM550*,是一个潜在的影响 AC 和糊化特性的稳定表达的新位点,可后续用于候选基因的精细定位^[5]。这些结果表明稻米食味品质等复杂性状存在大量微效遗传位点,这些位点为分子标记辅助选择改良水稻品种的食味品质提供了重要基因资源。

1.2 *Wx* 基因的遗传变异及其对食味品质的影响

稻米中 70%左右是淀粉,包括直链淀粉和支链淀粉两类,还有不到 10%的蛋白质、14%左右的水分和少量油脂和矿物质等^[6]。为了明确影响稻米食味品质的主要因素,本研究团队以中国东北、长江中下游和云贵高原粳稻及日本、韩国的优质粳稻与构建的遗传群体为材料,系统研究稻米加工品质(糙米率、整精米率)、外观品质(垩白粒率、垩白度)、食味品质(AC、GC、RVA 谱)、营养品质(籽粒蛋白质含量、游离氨基酸总含量、蛋白亚基所占百分比)、产量性状(单株穗数、主穗实粒数、结实率、收获指数)、植株形态性状(穗颈粗度、分蘖角、倒 1 叶宽、倒 2 叶宽、倒 3 叶宽、倒 1 叶基角、倒 1 叶开角等)与食味的关系,发现 AC 和蛋白质含量(protein content, PC)与食味的关系最密切,决定系数高达 60%

以上,明确 AC 是影响食味品质的关键性状^[7-9]。AC 低,米饭黏软、外观油润、有光泽、冷不回生、适口性好;反之,则米饭质地硬、黏性小、蓬松干燥、光泽差、冷饭容易回生、适口性差^[10]。

根据前人研究结果,稻米 AC 主要受 *Wx* 基因的控制。目前已经报道的 *Wx* 基因位点的自然等位变异有 *Wx^a*、*Wx^b*、*Wx^{op}*、*Wx^{hp}*、*Wx^{mp}*、*Wx^{mq}*、*W^{mw}*、*Wx^{lv}*、*Wx^{la}*、*Wxⁱⁿ* 和 *wx* 等^[11-14]。选用 *Wx* 位点不同基因型的籼稻(含 *Wx^a* 基因, AC 多在 20%以上)、粳稻(含 *Wx^b* 基因, AC 多在 14%~20%之间)、半糯粳稻(含 *Wx* 位点突变形成的低直链淀粉含量基因如 *Wx^{mp}*, AC 在 5%~14%之间)和糯稻(含 *wx* 基因, AC 在 2%以下)品种为材料,研究不同基因型 AC 的变化规律及其对食味品质的影响,发现低 AC 的半糯粳稻食味品质更佳。低 AC 的稻米俗称软米,其 AC 在 5%~14%之间,是介于一般黏米和糯米之间的中间类型,故又称为半糯米。其胚乳外观呈云雾状、乳白色,透明度略差(图 1)。但半糯米煮成的米饭表面光泽透亮,质地柔软,富有弹性,综合了糯米的柔软性和粳米的弹性,冷饭不硬,食味品质较佳,符合长江中下游地区喜食软糯粳米居民的饮食需求。

于是,本研究团队收集了已报道的 14 个低 AC 的半糯突变体^[11-14],研究不同突变体的外观和食味品质发现,半糯粳稻的食味品质虽然总体上均较好,但半糯粳稻的 AC 也不是越低越好。AC 低于 8%,米粒不透明,外观品质变差,口感太软,缺乏弹性;而 AC 达到 12%以上,不仅米饭晶莹剔透,富有弹性,冷而不硬,食味品质更佳,符合长江中下游地区人们喜食软香粳米的口感需求,而且外观品质也较好(图 2)。本研究团队从已报道的 14 个低直链淀

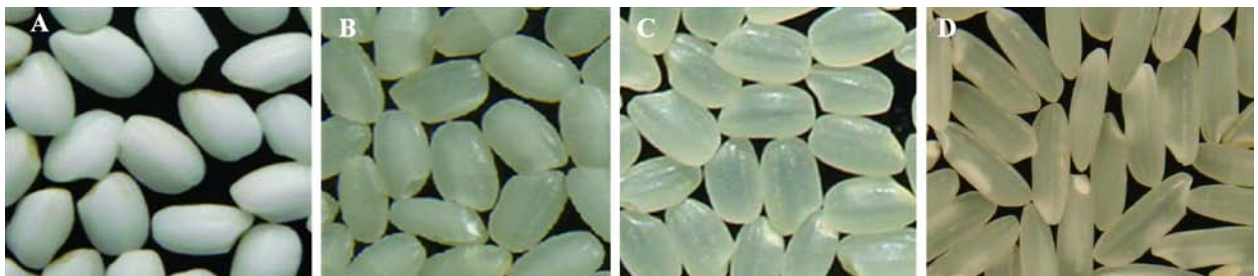


图 1 *Wx* 基因不同等位变异的直链淀粉含量与外观品质

Fig. 1 Amylose content and appearance quality of rice with different allelic variations of *Wx* gene

A: *wx*, 糯米, 直链淀粉含量(AC)<2%; B: *Wx^{mp}*, 半糯米, AC 5~14%; C: *Wx^b*, 黏米, AC 14~20%; D: *Wx^a*, 籼米, AC 20~30%。

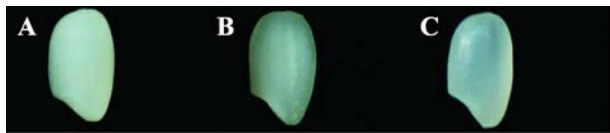


图 2 不同直链淀粉含量半糯粳稻米粒的外观品质
Fig. 2 The appearance of semi-waxy rice with different amylose content
A: 直链淀粉含量(AC)<8%, 米粒不透明; B: AC 10%左右, 米粒呈云雾状、半透明; C: AC>12%, 米粒透明。

粉含量基因中, 筛选出直链淀粉含量在 10%左右、含有低直链淀粉含量 Wx^{mp} 的日本半糯粳稻品种“关东 194”作为食味品质改良的核心种质^[15]。

1.3 淀粉合成相关基因等位变异及其对食味品质的影响

本研究团队在育种实践中发现, 同样半糯基因背景 Wx^{mp} 的情况下, 即使来源于同一杂交组合的不同半糯品系之间, AC 的变幅可达 5.40%~11.85%^[16]。肥料试验和分期播种试验结果表明, 穗分化期氮肥用量增加、灌浆初期温度过高或过低均可导致半糯粳稻的 AC 下降, 但下降幅度均在 1 个百分点以内^[17~19], 表明尚有其他基因影响 AC 或者基因与环境存在互作。迄今已报道与淀粉合成相关的基因有 20 多个, 其中编码淀粉合成酶的基因除了 Wx 以外, 还有 $GBSSII$ 、 SSI 、 $SSIIa$ ($SSII-3$)、 $SSIIb$ ($SSII-2$)、 $SSIIc$ ($SSII-1$)、 $SSIIIa$ ($SSIII-2$)、 $SSIIIb$ ($SSIII-1$)、 $SSIVa$ ($SSIV-2$)和 $SSIVb$ ($SSIV-1$); 编码淀粉分支酶的基因有 $SBE1$ 、 $SBE3$ 和 $SBE4$, 编码去分支酶的基因有 $ISA1$ 、 $ISA2$ 、 $ISA3$ 和 PUL ^[20~22]。本研究团队从已报道的 20 多个淀粉合成相关基因中, 筛选出亲本间有差异的淀粉合成酶基因 $SSIIa$ 、 $SSIIIa$ 和去分支酶基因 PUL , 研究这些基因在半糯基因 Wx^{mp} 背景下的遗传效应。

以淀粉合成酶基因 $SSIIa$ 和 $SSIIIa$ 表现多态性而

其他淀粉合成相关基因无多态性的武粳 13 与关东 194 (Milky Princess)杂交后代衍生的 64 个半糯品系为材料, 分析了 Wx^{mp} 基因背景下, $SSIIa$ 和 $SSIIIa$ 基因等位变异对 AC、GC、糊化温度(gelatinization temperature, GT)及 RVA 谱特征值的影响。结果表明, $SSIIa$ 和 $SSIIIa$ 等位变异对 AC、GC、GT 和 RVA 谱特征值都有显著影响, 且两个基因间存在互作效应。 $SSIIa^2$ 和 $SSIIIa^2$ (2 表示该基因来源于非半糯亲本武粳 13)有使 AC 增高的趋势, 分别使 AC 提高 1.87% 和 1.23%, 两年结果基本接近(表 1)。单个 $SSIIa$ 和 $SSIIIa$ 等位变异对 GT 无显著影响, 而基因型 $SSIIa^1SSIIIa^1$ (1 表示该基因来源于半糯亲本关东 194)的 GT 比 $SSIIa^2SSIIIa^2$ 高 1.34℃, 达到显著水平, 表明两个基因的互作对 GT 有显著影响。GC 在不同基因型间均存在极显著差异, $SSIIa^2$ 和 $SSIIIa^1$ 可分别使 GC 增加 8.74 mm 和 9.62 mm。从两个基因的互作效应来看, 基因型 $SSIIa^2SSIIIa^1$ 的 GC 比基因型 $SSIIa^1SSIIIa^2$ 和 $SSIIa^2SSIIIa^2$ 分别增加 10.64 mm 和 16.95 mm。 $SSIIa^2$ 使最高黏度、热浆黏度、冷胶黏度、崩解值增加, 回复值和消减值下降; 而 $SSIIIa^2$ 的效应则相反。两个基因的互作效应, 最高黏度、热浆黏度和冷胶黏度均以 $SSIIa^2SSIIIa^1$ 最大, 崩解值和回复值均以 $SSIIa^2SSIIIa^2$ 最大, 消减值 $SSIIa^2SSIIIa^1$ 最小^[23]。

选择在淀粉合成酶基因 $SSIIa$ 和去分支酶基因 PUL 存在多态性而其他淀粉合成酶相关基因没有多态性的半糯品系宁 0145 (来源于武粳 15//武粳 13/关东 194)和粳稻品种武运粳 21 进行杂交, 获得 F_2 群体与 F_3 株系。利用分子标记, 选择含有 Wx^{mp} 基因的 F_2 单株与 F_3 株系, 将这些 F_2 单株与 F_3 株系分成 $SSIIa^1PUL^1$ 、 $SSIIa^1PUL^2$ 、 $SSIIa^2PUL^1$ 和 $SSIIa^2PUL^2$ 4 种基因型(1 和 2 分别表示该基因来源于宁 0145 和

表 1 2013 年和 2014 年 64 个半糯品系 $SSIIa$ 和 $SSIIIa$ 位点不同等位基因对 AC 的效应
Table 1 Allelic effect on AC of $SSIIa$ and $SSIIIa$ genes for 64 semi-waxy lines in 2013 and 2014

位点	基因型	2013 年 AC	2014 年 AC	平均值	基因效应
$SSIIa$	$SSIIa^1$	9.05	8.85	8.95	1.87
	$SSIIa^2$	10.84**	10.80**	10.82**	
$SSIIIa$	$SSIIIa^1$	9.37	9.17	9.27	1.23
	$SSIIIa^2$	10.51**	10.48**	10.50**	

AC: 直链淀粉含量。1: 该基因来源于半糯亲本关东 194; 2: 该基因来源于非半糯亲本武粳 13。**: $P<0.01$ 。

武运梗 21), 分析不同基因型蒸煮食味品质性状的差异, 探讨同一 Wx^{mp} 基因背景下不同 $SSIIa$ 和 PUL 等位基因对蒸煮食味品质性状的影响。结果表明, 不同基因型间蒸煮食味品质性状均存在显著差异, 来源于武运梗 21 的 $SSIIa^2$ 基因和 PUL^2 基因分别使直链淀粉含量增加 0.29%~1.00% 和 0.62%~1.18%, 且 PUL 的效应大于 $SSIIa$, 两者间存在互作效应。 $SSIIa^2$ 基因和 PUL^2 基因对胶稠度和崩解值(breakdown viscosity, BDV)有降低作用, 对热浆黏度(hot paste viscosity, HPV)、冷胶黏度(cool paste viscosity, CPV)、消减值(setback viscosity, SBV)和回复值(consistency viscosity, CSV)有升高作用, 对 GT、最高黏度(peak viscosity, PKV)和峰值时间(peak time, PeT)的作用较小^[24]。研究结果明确了 Wx^{mp} 基因背景下 $SSIIa$ 和 PUL 基因对稻米蒸煮食味品质的遗传效应, 为 $SSIIa$ 和 PUL 基因的分子标记辅助选择改良稻米品质提供了理论依据。

上述研究表明, 在 Wx^{mp} 基因背景(AC 10%左右)下, 来源于非半糯亲本的 $SSIIa$ 、 $SSIIa$ 和 PUL 基因可分别使 AC 提高 0.5~1.0 个百分点, 基因间存在互作效应(表 1), 阐明了准确筛选 AC 在 10%~14% 之间的半糯梗稻基因型的分子机制。为在早期分离世代通过分子标记辅助选择, 筛选食味品质优良、外观品质好的理想基因型奠定了理论基础, 实现了优良食味梗稻育种理论的新突破。

1.4 香味基因的遗传变异及其对食味品质的影响

米饭的香味也是稻米品质的重要指标。品质好

的大米不仅外观晶莹剔透, 米饭柔软有弹性, 煮饭时还散发诱人香味, 品尝时清甜爽口, 满口留香。随着香味检测技术的研究与发展, 已在不同水稻品种中检测到 500 多种挥发性芳香物质, 其中已经得到鉴定的有 200 多种^[25-27], 主要包括碳氢化合物、酸类、醇类、醛类、酮类、酯类和酚类等^[28]。2-乙酰-1-吡咯啉是香稻中主要香味物质, 香稻中爆米花香味主要由 2-AP 形成^[26]。

研究表明, 稻米的香味是由于水稻第 8 号染色体上的 $Badh2$ 基因突变, 导致甜菜碱脱氢酶活性丧失, 使 2-AP 大量积累产生香味。而非香水稻中 $Badh2$ 基因编码的 $Badh2$ 蛋白具有甜菜碱脱氢酶的活性^[29-31]。多数研究者认为香味遗传受单个隐性基因的控制^[32,33], $Badh2$ 基因就是控制稻米中香味的隐性基因^[34-37]。 $Badh2$ 基因全长 1509 bp, 包含 15 个外显子和 14 个内含子, 编码 503 个氨基酸^[35,37]。 $Badh2$ 基因除在水稻的根中不表达外, 在水稻其余组织和器官中均有表达。 $Badh2$ 基因中至少存在 17 个变异位点。在香稻品种中, 常见的是 $Badh2$ 基因的第 7 外显子有 1 个 8 bp 的缺失和 3 个单核苷酸多态性位点^[38]; 在不同的香稻品种中, $Badh2$ 基因还在第 2 外显子有 1 个 7 bp 的缺失, 第 4 和第 5 外显子之间存在 1 个 803 bp 的缺失^[31,39,40], 并且在第 1、8、10、12、13 和 14 外显子均存在变异位点^[31,33,39,41]。

目前已经针对这些位点设计了一系列分子标记, 用于香味基因的鉴定和不同香稻品种的筛选以及香稻新品种的培育。功能标记 FMU1-2 不但可以检测 $Badh2$ 基因在第 7 外显子处的 8 bp 的缺失突变, 而

表 2 $SSIIa$ 和 PUL 等位基因蒸煮食味品质性状的遗传效应

Table 2 Allelic effects of $SSIIa$ and PUL locus originated from different parents on eating and cooking quality traits

基因型	F ₂ 直链 淀粉含量 AC(%)	F ₃ 直链 淀粉含量 AC(%)	胶稠度 GC (mm)	糊化 温度 GT(°C)	最高黏 度 PKV (cP)	热浆黏 度 HPV (cP)	崩解值 BDV (cP)	冷胶黏 度 CPV (cP)	消减值 SBV (cP)	回复值 CSV (cP)	峰值时 间 PeT (min)
$SSIIa^2$ - $SSIIa^1$	1.01	0.29	-2.79	0.12	2	30	-28	66	64	36	0.07
PUL^2 - PUL^1	1.18	0.62	-0.31	-0.06	19	89	-70	142	123	53	0.10
$SSIIa^1PUL^2$ - $SSIIa^1PUL^1$	1.90	0.35	-6.23	-0.64	-44	21	-65	115	158	94	0.07
$SSIIa^2PUL^1$ - $SSIIa^1PUL^1$	1.83	0.01	-8.80	-0.43	-60	-42	-18	33	93	74	0.05
$SSIIa^2PUL^2$ - $SSIIa^2PUL^1$	0.16	0.79	4.92	0.39	69	140	-72	155	86	14	0.11
$SSIIa^2PUL^2$ - $SSIIa^1PUL^2$	0.10	0.44	2.35	0.60	52	77	-25	72	20	-5	0.08
$SSIIa^2PUL^2$ - $SSIIa^1PUL^1$	2.00	0.80	-3.88	-0.04	9	99	-90	187	178	89	0.15

1: 该基因来源于宁 0145; 2: 该基因来源于武运梗 21。

且能够检测 *Badh2* 基因的 5'UTR 区是否存在 1 个 8 bp 的缺失; 功能标记 FME2-7、FME7、FME12-3、FME13 和 FME14 分别用于鉴定香味基因 *Badh2* 在第 2、7、12、13 和 14 外显子处的变异类型^[33]; 标记 FMbadh2-E4-5 用于检测 *Badh2* 基因在第 4 和 5 外显子之间是否存在 803 bp 的缺失^[40], YY5-YY8 用于检测 *Badh2* 基因在第 7 外显子的 8 bp 缺失和 3 个单核苷酸多态性变异^[42]。这些水稻香味基因功能标记的开发, 为香稻分子育种提供了一种准确、快速且有效的手段。

2 食味品质与产量和抗性的分子标记聚合育种

采用分子生物学和信息学方法, 分析发现 Wx^{mp} 基因与 *Wx* 位点上的其他复等位基因间在第 4 外显子区域存在单碱基的替换, 获得与目的基因共分离的分子标记^[43]。进一步根据 Wx^{mp} 基因存在的单核苷酸变异, 利用四引物扩增受阻突变体系 PCR 技术进行等位基因变异扩增, 实现了 Wx^{mp} 基因型的快捷、准确鉴定^[44]。利用半糯基因 Wx^{mp} 的四引物标记与条纹叶枯病抗性基因 *Stv-bⁱ* 共分离的 SCAR 标记以及香味基因 *Badh2*、稻瘟病抗性基因 *Pi-ta*、*Pi-b* 与粒型基因 *GS3* 的分子标记, 进行辅助选择和聚合育种, 将优良食味基因、香味基因、条纹叶枯病抗性基因和稻瘟病抗性基因与高产性状聚合到一起, 建立了优质、抗病、高产水稻新品种选育的高效育种技术体系^[45~47], 选择效率提高 3 倍以上, 缩短育种年限 2~3 年。

围绕优良食味、抗病、高产育种目标, 通过地理远缘杂交, 以食味品质优良、抗条纹叶枯病的日本半糯梗稻“关东 194”为核心亲本(父本), 与江苏省高产梗稻“武香梗 14”和“武梗 13”杂交, 构建综合性状优良、遗传基础丰富的育种群体, 通过南繁北育加速世代进程、低世代外观品种筛选和高世代食味品质筛选、结合分子标记辅助选择, 将日本优质梗稻关东 194 的半糯基因 Wx^{mp} 和条纹叶枯病抗性基因 *Stv-bⁱ* 同时导入江苏省高产梗稻品种武香梗 14 和武梗 13 中, 育成了分别适合江苏省太湖稻区、沿江沿海和苏南稻区、苏中稻区种植的优良食味梗

稻新品种南梗 46^[48]、南梗 5055^[49]和南梗 9108^[50], 此后, 又育成适合淮北稻区及黄淮海地区种植的优良食味梗稻新品种南梗南梗 505^[51]、南梗 2728^[52]、南梗 5718^[53]、南梗 58、南梗 9308、南梗 66、南梗 518 以及适合苏南、苏中地区种植的南梗 3908^[54]、南梗晶谷^[55]、南梗 56、南梗 9036 等, 分别通过江苏省、上海市、山东省、安徽省审定与认定, 形成了覆盖江苏省不同稻区的优良食味梗稻品种布局, 有效解决了江苏省缺乏食味品质优良的高产梗稻品种等突出问题, 实现了优质与抗病、高产的统一, 是江苏省优良食味梗稻新品种选育的重大突破。

3 代表性品种

3.1 南梗 46

南梗 46 是以日本优质梗稻关东 194 为父本, 与江苏优质高产梗稻武香梗 14 杂交, 经数代外观与食味品质筛选和条纹叶枯病抗性分子标记辅助选择育成, 2008 年通过江苏省审定(苏审稻 200814), 2009 年通过上海市审定(沪农品审水稻(2009)第 003 号)。全生育期 165 d, 属中熟晚梗稻类型, 适合在江苏省太湖地区东南部和上海中上等肥力条件下种植^[48]。该品种植株生长清秀, 叶色淡绿, 灌浆速度快, 熟相较好, 株型紧凑, 分蘖力中等偏强, 穗型较大, 直立穗型。2006–2007 年参加江苏省区试, 平均亩产 608.3 kg, 比对照增产 5.6%, 每亩有效穗 19.8 万穗, 每穗实粒数 129 粒, 结实率 90%。根据农业农村部食品质量检测中心 2007 年检测, 整精米率 66.8%, 垩白粒率 20.0%, 垩白度 2.4%, 达到国标二级优质稻谷标准。

南梗 46 一直被江苏省农业农村厅列为主导品种, 其优异的食味品质和良好的丰产性深受老百姓的喜爱, 已成为长三角地区高档优质米打造的首选品种, 累计推广种植 66.7 万公顷。众多稻米生产企业以南梗 46 为原粮进行优质稻米订单生产, 每公斤至少加价 0.2 元收购。不仅是江苏“苏米”省域公用品牌的核心品种, 也是南京市“金陵味道”地产优质稻米、江南味道“苏州大米”、“无锡大米”等区域公用品牌订单种植首选的原粮品种, 打造了“苏垦”、“道好”、“晶润”等一批南梗 46 大米品牌在南

京、苏州、上海等多地超市销售。为江苏省优质稻米产业发展和农业供给侧结构性改革作出了重要贡献。

3.2 南粳 5055

南粳 5055 是以关东 194 为父本,与江苏优质高产粳稻武粳 13 杂交,于 2005 年育成的优良食味早熟晚粳稻品种,2011 年通过江苏省审定(苏审稻 201114),2017 年通过上海市引种备案(沪引种 2016 第 3 号),2018 年通过安徽省引种备案(皖引稻 2018107),适宜江苏省沿江及苏南地区、上海市和安徽省沿江江南单季晚粳稻地区种植^[49]。该品种株型紧凑,长势较旺,分蘖力较强,叶色较深,群体整齐度较好,穗型中等,偏直立,着粒较密,抗倒性强。每亩有效穗 20 万左右,每穗总粒 130~140 粒,结实率 90%以上,千粒重 24~25 g,株高 95~100 cm,全生育期 160 d 左右,比对照武运 7 号早熟 2~3 d。2009~2010 年参加江苏省区试,两年平均亩产 614.5 kg,较对照宁粳 1 号增产 4.8%,两年增产均达极显著水平;2010 年生产试验平均亩产 637.7 kg,较对照增产 6.0%。接种鉴定:感穗颈瘟,中感白叶枯病、纹枯病、条纹叶枯病。根据农业农村部食品质量检测中心 2009 年检测:整精米率 71.4%,垩白粒率 10.0%,垩白度 0.8%。

南粳 5055 不仅稻米食味品质优,而且产量潜力高,2012 年和 2013 年连续两年通过了农业农村组织的超级稻测产验收,平均亩产都超过 800 kg,2014 年被农业农村部认定为超级稻。南粳 5055 审定以后一直是江苏省主推品种,年种植面积一直保持在 10 万公顷以上,近几年的年种植面积超过 16.7 万公顷,累计种植面积超过 133.3 万公顷。为我省稻米产业提质增效提供了有力支撑。

3.3 南粳 9108

南粳 9108 是以关东 194 为父本,与江苏优质高产粳稻武香粳 14 杂交,应用系谱法和分子标记辅助选择,于 2009 年育成的优良食味迟熟中粳稻品种,2013 年通过江苏省审定(苏审稻 201306),2017 年通过上海市引种认定(沪引种 2016 第 4 号),适宜在江苏省苏中及宁镇扬丘陵地区和上海市种植^[50]。该品种株型紧凑,长势较旺,分蘖力较强,叶色淡绿,

叶姿较挺,抗倒性较强,后期熟相好。每亩有效穗 21.2 万,穗实粒数 125.5 粒,结实率 94.2%,千粒重 26.4 g,株高 96.4 cm,全生育期 153 d,比淮稻 9 号早熟 1 d;接种鉴定:感穗颈瘟,中感白叶枯病、高感纹枯病,抗条纹叶枯病。2011~2012 年参加江苏省区试,两年区试平均亩产 644.2 kg,2011 年比淮稻 9 号增产 5.2%,增产达极显著水平,2012 年比淮稻 9 号增产 3.2%,比镇稻 14 增产 0.1%;2012 年生产试验平均亩产 652.1 kg,比对照淮稻 9 号增产 7.3%。根据农业农村部食品质量检测中心 2012 年检测:整精米率 71.4%,垩白粒率 10.0%,垩白度 3.1%。

南粳 9108 也是一个既优质又高产的品种,2015 年被农业农村部确认为超级稻。审定以来一直被列入江苏省主推品种,2016 年被农业农村部列为长江中下游主导品种,种植面积不断扩大,2016 年超过 33.3 万公顷,2020 年超过 46.7 万公顷,成为我省单一品种年种植面积最大的水稻品种,累计种植面积超过 266.7 万公顷。因其优异的食味品质和丰产性,南粳 9108 深受广大种植户和米业企业的喜爱,兴化大米、射阳大米、淮安大米、建湖大米、海安大米、姜堰大米、阜宁大米等地产大米品牌均以南粳 9108 作为原粮品种,为助推乡村振兴,带动农业增效、农民增收,提升“苏米”产业升级奠定了良好的基础。

3.4 南粳 2728

南粳 2728 是以武粳 15 为母本,南粳 5055 为父本杂交,经稻瘟病和条纹叶枯病抗性基因及半糯基因分子标记辅助选择,结合田间多代选育、抗性鉴定和食味品质鉴定,于 2013 年育成的食味品质优、稻瘟病抗性好、丰产性好的中熟中粳稻新品种,2018 年通过江苏省审定(审定编号:苏审稻 20180005),2019 年通过安徽省引种备案(备案号:皖引稻 2019066),适宜江苏省和安徽省淮北地区种植^[52]。该品种株型紧凑,长势较旺,分蘖力强,成穗率高,群体整齐度好,抗倒性较强,穗型中等,半直立穗,叶色绿,叶姿较挺,后期熟相好。每亩有效穗 23.8 万,每穗实粒数 111.8 粒,结实率 93.0%,千粒重 27.2 g,株高 101.4 cm,全生育期 150 d,与对照徐稻 3 号相当。该品种对白叶枯病、稻瘟病、条纹叶枯病和纹枯病均具有较好的抗性。根据农业农村部食品质量监督

检测测试中心 2016 年检测: 糙米率 84.2%, 精米率 74.2%, 整精米率 69.7%, 垩白率 20.0%, 垩白度 4.9%。2017 年在“连天下”第二届连云港优质稻米品鉴会中荣获金奖; 2018 年在第二届江苏优质稻米博览会“江苏好大米”评选中荣获金奖。2019 年在寻找江苏最好吃的大米暨第五届江苏百姓品米节优质大米评比中, 南粳 2728 获得特等奖。2020 年 1 月, 在江苏省优质稻品种食味品质评鉴会上荣获金奖。

南粳 2728 丰产稳产性好, 适应性强, 适宜多种轻简栽培方式。一般亩产 650 kg 左右, 高产田块可达 700 kg 以上。2016–2017 年在泗洪、泗阳、宿迁、睢宁、丰县、邳州、铜山、东海、连云港、灌南、大丰、建湖等地示范种植, 表现出食味品质优良, 丰产稳产性好, 熟期早, 广适性好等优点, 平均亩产达 681.2 kg, 其中 2017 年在东海县平明镇的百亩示范方经江苏省农委组织的专家组验收, 平均亩产达到 709.7 kg, 表现出较高的产量潜力。南粳 2728 的成功选育填补了江苏淮北地区缺乏优良食味粳稻品种的空白, 具有广阔的推广应用前景。

3.5 南粳 5718

南粳 5718 是以自主选育的优良食味抗病粳稻中间品系宁 7022 为母本, 与盐都地区农科所选育的优质高产粳稻中间品系盐粳 608 杂交, 经系谱法和分子标记辅助选择, 于 2015 年育成的食味品质优、丰产性好的中熟中粳稻新品种。2019 年通过江苏省审定(审定编号: 苏审稻 20190004), 2021 年通过安徽省引种备案(备案号: 皖引稻 2021044), 2020 年已完成江苏省迟熟中粳组生产试验, 适合江苏省和安徽省淮北地区、江苏省苏中地区及宁镇扬丘陵地区种植。该品种苗期叶色深绿, 叶姿略披, 苗体矮壮, 抽穗后叶片挺立、株型紧凑, 植株生长清秀, 后期转色快, 熟相好。全生育期 147.9 d, 与对照徐稻 3 号相当。株高 102.6 cm, 分蘖力中等, 成穗率高。每亩有效穗 21.2 万, 穗型较大, 每穗总粒数 131.5, 结实率 88.9%, 千粒重 28.8 g。2017–2018 年江苏省农科院植保所接种鉴定, 中抗白叶枯病、中感穗颈瘟、中抗条纹叶枯病、抗纹枯病。根据农业农村部食品质量监督检测测试中心 2018 年检测: 糙米率 84%, 精米率 72.2%, 整精米率 68.8%, 垩白率 31.0%,

垩白度 6.8%^[53]。2018 年在宿迁市和阜宁县优质米评鉴中, 南粳 5718 均获得第一名; 2019 年和 2020 年, 在寻找江苏最好吃的大米暨第五届和第六届江苏百姓品米节优质大米评比中, 南粳 5718 均获得特等奖; 2020 年 1 月, 在第四届“华西村杯”江苏好大米评鉴推介会上, 南粳 5718 获得金奖; 在江苏省优质稻品种食味品质评鉴会上, 南粳 5718 获得特等奖; 在首届和第二届中国好米榜评选活动中, 南粳 5718 均获得“超级好吃”五星大奖。

南粳 5718 除了食味品质好以外, 最突出的优点是其茎秆粗壮、抗倒性极强、特别适宜稻虾共作等综合种养模式, 而且穗型大、千粒重高、产量潜力大。一般亩产 650 kg 左右, 高产田块可达 700 kg 以上。2017 年和 2018 年两年平均亩产 672.1 kg, 比对照增产 5.6%; 2018 年生产试验平均亩产 689.1 kg, 比对照徐稻 3 号增产 5.1%。2017–2020 年在江苏淮北和苏中地区示范种植, 品质、抗性和丰产性表现都十分突出。2019 年和 2020 年, 农业农村部超级稻验收专家组对南粳 5718 百亩示范方进行现场测产验收, 平均亩产分别达到 887.7 kg 和 792.5 kg, 达到了长江中下游地区一季粳稻的“超级稻”产量指标。南粳 5718 的成功选育丰富了江苏省淮北地区优良食味粳稻种植的品种需求, 尤其是为我省稻虾共作等综合种养提供了食味品质优、抗倒性强、产量高的优良食味粳稻品种, 具有广阔的应用前景。

3.6 南粳 58

南粳 58 是以自主选育的优良食味抗病粳稻中间品系宁 7020 为母本, 与江苏高产粳稻扬粳 9538 杂交, 经稻瘟病抗性和半糯基因分子标记辅助选择, 结合田间多代选育、抗性鉴定和食味品质筛选, 于 2016 年育成的食味品质优、丰产性好的中熟中粳稻新品种。2019 年通过江苏省审定(审定编号: 苏审稻 20190007), 适合江苏省淮北地区种植。该品种综合性状好。据 2017–2018 年区试平均结果, 全生育期 142.2 d, 比对照苏秀 867 早 0.7 d, 属于中熟中粳早熟类型。株高 100.6 cm, 株型较紧凑, 分蘖力中等偏上, 每穗实粒数 115.1 粒, 分蘖力较强, 生长势较旺, 亩有效穗 22.6 万; 叶色中绿, 叶姿较挺, 成熟期转色好, 灌浆速度快。结实率 89.5%, 千粒重 26.2 g。

据江苏省农科院植物保护研究所抗性鉴定,南粳 58 中感穗颈瘟、白叶枯病和条纹叶枯病,抗纹枯病。据 2018 年江苏省区域试验统一取样送农业农村部食品质量检测中心检测,南粳 58 糙米率 84.4%,精米率 72.6%,整精米率 68.6%。2019 年获得连云港市赣榆区首届优质稻米品鉴“海州湾好大米”水稻品种称号,在宿迁市第二届“宿有千香”优质稻米品鉴中被评为“宿迁水稻好品种”,在“2019 寻找江苏最好吃的大米”暨第五届江苏百姓品米节优质大米评比中获得“特等奖”,在 2020 年首届中国“好米榜”评比活动中获得“非常好吃”四星大奖。

南粳 58 丰产性较好,2017 年和 2018 年两年区试平均亩产 647.3 kg,较对照苏秀 867 增产 5.3%。2018 年参加生产试验,平均亩产 656.1 kg,比对照苏秀 867 增产 3.6%。2018 年在山东郯城、江苏阜宁、东海、丰县、灌云等 10 个适宜地区进行试验示范,南粳 58 表现丰产性稳产性好,平均亩产 656.7 kg,其中郯城点产量最高,亩产达 683.5 kg。南粳 58 不仅食味品质佳,有香味,而且具备早熟、丰产稳产性好的特性,由于同时含有稻瘟病抗性基因 *Pi-ta* 和 *Pi-b*,稻瘟病抗性较好。

表 3 列出了南粳系列代表性品种及其亲本的食味品质、抗病、粒型相关性状的基因型,供育种者参考。

表 3 南粳系列代表性品种及其亲本的食味品质、抗病、粒型相关性状的基因型

Table 3 Genotypes of Nanjing series representative *japonica* rice varieties and their parents for good taste, disease resistance and high yield

品种	基因型									
	<i>Wx^{mp}</i>	<i>SSIIa</i>	<i>SSIIla</i>	<i>PUL</i>	<i>Badh2</i>	<i>Stv-bⁱ</i>	<i>Pi-ta</i>	<i>Pi-b</i>	<i>Pi-km</i>	<i>GW5</i>
南粳 46	+	-	+	-	+	+	-	+	-	+
南粳 5055	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+
南粳 9108	+	-	+	-	+	+	-	+	-	+
南粳 2728	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+
南粳 5718	+	-	+	+	-	+	-	-	+	+
南粳 58	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+
武粳 13 (亲本)	-	+	+	-	-	-	-	+	-	+
武粳 15 (亲本)	-	+	+	+	-	-	+	+	+	+
武香粳 14 (亲本)	-	-	+	-	+	-	-	+	-	-
关东 194 (亲本)	+	-	+	-	-	+	-	-	+	+

Wx^{mp}: 半糯基因; *SSIIa* 和 *SSIIla*: 淀粉合成酶基因; *PUL*: 去分支酶基因; *Badh2*: 香味基因; *Stv-bⁱ*: 抗条纹叶枯病基因; *Pi-ta*、*Pi-b* 和 *Pi-km*: 抗稻瘟病基因, *GW5*: 粒型基因。“+”和“-”: 含有和不含有该基因。

4 江苏省优良食味粳稻的食味品质特性

4.1 稻米理化特性

为了明确江苏省优良食味粳稻的理化品质特性,分别以 9 个已审定的南粳系列半糯粳稻和 10 个食味品质较好的江苏和北方粳稻为材料进行比较,并以南粳系列品种的亲本关东 194、武香粳 14 和武粳 13 及日本品种越光作对比。测定结果表明,南粳系列半糯粳稻的 AC (10.7%)显著低于非半糯粳稻(18.6%),PC (7.1%)和 GC (86.5 mm)则显著高于非半糯粳稻(6.8%和 74.0 mm),GT 半糯粳稻略高,但两者间差异不显著。在 RVA 值上,半糯粳稻的峰值黏度(2887.1 cP)和崩解值(1369.3 cP)显著和极显著高于非半糯粳稻的对应值(2660.3 cP 和 951.4 cP),而最终黏度(2080.4 cP)、消减值(-781.6 cP)和峰值时间(6.0 min)显著或极显著低于非半糯粳稻的对应值(2717.4 cP, 57.0 cP 和 6.4 min),热浆黏度两者间差异不显著^[56](表 4)。表明南粳系列半糯粳稻的 AC 低,GC 高,崩解值大,消减值小,且均为负值,因而淀粉的黏性大,米饭柔软,口感较好。

4.2 食味品质特性

选用 6 个南粳系列半糯粳稻品种与 5 个北方优

表 4 江苏省半糯粳稻与非半糯粳稻的稻米理化特性比较

Table 4 Comparison of physicochemical properties between semi waxy japonica rice and non-waxy japonica rice in Jiangsu Province											
类型	品种名称	直链淀粉含量 AC (%)	蛋白质含量 PC (%)	胶稠度 GC (mm)	峰值黏度 PKV (cP)	热浆黏度 HPV (cP)	崩解值 BDV (cP)	冷胶黏度 CPV (cP)	消减值 SBV (cP)	峰值时间 PeT (min)	糊化温度 GT (°C)
半糯粳稻	南粳 46	10.5	6.2	92.5	3128.0	1757.0	1371.0	2341.0	-787.0	6.2	72.0
	南粳 5055	9.5	6.8	86.7	3077.0	1705.0	1372.0	2199.0	-878.0	6.3	72.0
	南粳 9108	12.7	6.3	93.5	2740.0	1412.0	1328.0	2095.0	-645.0	6.2	68.9
	南粳 3908	11.7	8.2	81.5	2884.0	1683.0	1201.0	2360.0	-524.0	6.3	72.0
	南粳晶谷	11.1	7.5	90.0	2639.0	1565.0	1074.0	2259.0	-380.0	6.3	71.2
	南粳 5718	12.3	7.4	84.5	3071.0	1880.0	1191.0	2481.0	-590.0	6.3	72.8
	南粳 58	10.6	6.5	83.0	2810.0	1087.0	1723.0	1601.0	-1209.0	5.3	71.5
	南粳 505	10.7	6.8	82.5	2695.0	1241.0	1454.0	1859.0	-836.0	5.8	79.9
	南粳 2728	9.2	7.8	87.0	2923.0	1466.0	1457.0	2069.0	-854.0	5.9	81.6
	关东 194	8.4	7.5	83.7	2904.0	1131.0	1522.0	1540.0	-1113.0	5.2	76
	平均值±标准差	10.7±1.4	7.1±0.7*	86.5±4.3*	2887.1±168.5*	1492.7±273.3	1369.3±186.3**	2080.4±320.4	-781.6±256.7	6.0±0.4	73.8±4.1
	变幅	8.4~12.7	6.2~8.2	81.5~93.5	2639~3128	1087~1880	1074~1723	1540~2481	-1209~-380	5.2~6.3	68.9~81.6
	变异系数 CV (%)	12.8	9.5	4.9	5.8	18.3	13.6	15.4	-32.8	7.1	5.5
非半糯粳稻	武育粳 39	19.1	7.7	69.5	2720.0	1847.0	873.0	2918.0	198.0	6.6	73.6
	泗稻 16	22.5	8.0	63.5	2255.0	1318.0	937.0	2278.0	23.0	6.2	72.0
	武育粳 3 号	20.0	7.1	87.5	2727.0	1591.0	1136.0	2482.0	-245.0	6.2	72.8
	南粳 5758	19.5	6.6	79.5	2524.0	1722.0	802.0	2772.0	248.0	6.5	71.3
	金稻 919	20.2	5.6	68.8	2673.0	1687.5	985.5	2677.5	4.5	6.3	71.3
	吉粳 830	17.4	5.9	79.8	2904.0	1551.0	1353.0	2644.5	-259.5	6.3	69.6
	宁系 791	18.2	6.3	77.3	2690.5	1821.5	869.0	2841.0	150.5	6.5	71.2
	垦稻 97	17.7	6.5	61.5	2778.5	1652.5	1126.0	2702.5	-76.0	6.3	70.4
	通系 919	18.9	6.1	69.3	2233.5	1486.5	747.0	2481.5	248.0	6.5	69.7
	越光	15.6	5.6	84.8	2946.2	1763.7	1182.5	2756.2	-190.0	6.3	72.0
	武粳 13	16.5	8.0	72.0	2835.0	2110.0	575.0	3108.0	273.0	6.5	72.5
	武香粳 14	18.0	7.9	74.7	2637.0	1855.0	831.0	2947.0	310.0	6.5	72.1
	平均值±标准差	18.6±1.8**	6.8±0.9	74.0±8.1	2660.3±225.7	1700.5±204.7	951.4±216.1	2717.4±228.9**	57.0±210.2**	6.4±0.1*	71.5±1.2
变幅	15.6~22.5	5.6~8.0	61.5~87.5	2233.5~2946.2	1318.0~2110.0	575.0~1353.0	2278.0~3108.0	-259.5~310	6.2~6.6	69.6~73.6	
变异系数 CV (%)	9.9	13.7	10.9	8.5	12	22.7	8.4	368.6	2.2	1.7	

*; P<0.05; **; P<0.05。

质粳稻进行米饭食味及质构特性(反映米饭硬度黏度的特性)分析,结果表明,所有品种的综合食味值均在 80 分以上,其中南粳 46、南粳 5718、南粳 9108、南粳 58、金稻 919、吉粳 830 与日本越光的食味值相当,而南粳 505、南粳 2728、宁系 791、垦稻 97、通系 919 稍低,各品种在米饭外观、口感上与综合食味值表现一致。在米饭质构特性上,南粳系列品种的弹性整体上高于北方粳稻;硬度和黏度值因品种而异,南粳品种和北方品种间无显著差异;在平衡度上,食味值较高的品种往往具有更高的平衡度值。此外,6 个南粳品种的食味特性和质构特性明显优于亲本武香粳 14 和武粳 13;除了南粳 2728 以外,综合食味值也比关东 194 明显提高(表 5)。

4.3 支链淀粉链长分布

近年来的研究表明,支链淀粉的含量及其链长分布也是影响稻米食味品质的重要因素。支链淀粉的短分支链比例较高,而长分支链比例较低,食味品质较好^[57,58]。用荧光糖电泳法对支链淀粉 DP6~50 链长分布检测结果表明,DP6~12 的超短链(A 链)比

例最高的是南粳 3908 和南粳晶谷,其次为稻花香、南粳 46、越光、南粳 9108、南粳 58 和南粳 5055,A 链比例均在 50%以上,南粳 2728、武粳 13、武香粳 14 和关东 194 的 A 链比例较低,南粳 2728 仅为 44.38%。而 B1 (DP13~24)、B2 (DP25~36)、B3 (DP≥37)链的比例与 A 链呈相反趋势(表 6)。表明食味品质优异的品种,往往具有较高的 A 链比例和较低的 B 链比例。A 链比例高、B 链比例低,说明淀粉的短链多,中长链少,淀粉的糊化特性好,米饭比较柔软,口感较好。

5 结语与展望

江苏省位于北亚热带湿润季风气候区,水稻抽穗以后气温较高,日平均气温一般都在 25℃以上,昼夜温差小;江苏水稻土有机质含量低;江苏省又是水稻高产省份,氮肥施用量大,水稻每亩施纯氮一般在 20 kg 以上,多的甚至高达 30 kg。因此,江苏生产的大米往往外观品质较差、蛋白质含量较高。而我国东北地区则相反,水稻抽穗以后气温较低,

表 5 南粳系列半糯粳稻品种与其他粳稻品种食味品质及米饭质构特性比较
Table 5 Comparison of eating quality and texture characteristics between Nanjing and other japonica rice varieties

品种类型	品种	食味特性			质构特性			
		外观	口感	综合食味值	硬度	黏性	弹性	平衡度
南粳粳稻	南粳 46	8.40±0.14ab	8.50±0.14a	87.5±0.7a	5.39±0.15e	1.04±0.03ab	0.78±0.02a	0.19±0.01a
	南粳 5718	8.50±0.00ab	8.55±0.07a	87.0±0.0a	5.12±0.08f	0.69±0.06e	0.78±0.01a	0.14±0.00d
	南粳 9108	7.65±0.07d	7.95±0.07c	84.5±0.7bc	7.62±0.06ab	1.01±0.04ab	0.68±0.01b	0.13±0.00de
	南粳 58	7.90±0.14c	8.00±0.14c	84.5±0.7bc	4.60±0.09g	0.69±0.05e	0.78±0.01a	0.15±0.01c
	南粳 505	7.50±0.14d	7.75±0.07d	83.5±0.7c	5.14±0.11f	0.68±0.08e	0.79±0.01a	0.13±0.02de
	南粳 2728	7.25±0.07e	7.55±0.07e	81.0±0.0d	5.54±0.02e	0.60±0.11f	0.76±0.00ab	0.11±0.02e
北方粳稻	金稻 919	8.55±0.07a	8.50±0.14a	86.0±0.0ab	5.16±0.04f	0.77±0.04d	0.65±0.04bc	0.15±0.01c
	吉粳 830	8.20±0.00b	8.25±0.07c	84.0±0.0bc	5.49±0.06e	1.00±0.03ab	0.66±0.02b	0.18±0.01ab
	宁系 791	8.25±0.07b	8.15±0.07c	83.5±0.7c	7.03±0.12c	0.94±0.01bc	0.67±0.01b	0.13±0.00de
	垦稻 97	8.40±0.00ab	8.30±0.00bc	83.0±1.4cd	6.11±0.15d	1.01±0.08ab	0.66±0.01b	0.16±0.01b
	通系 919	8.20±0.14b	8.10±0.14c	82.5±0.7cd	7.77±0.03a	1.12±0.11a	0.65±0.08bc	0.14±0.02d
日本粳稻	越光	8.35±0.07ab	8.35±0.07ab	84.5±0.7bc	7.31±0.04bc	0.89±0.12c	0.60±0.04c	0.12±0.02e
亲本	武香粳 14	7.80±.06c	7.90±0.04c	78.0±0.5e	7.60±0.11ab	0.85±0.04c	0.62±0.01c	0.11±0.01e
	武粳 13	7.81±0.05c	7.72±0.05d	75.1±0.3f	7.32±0.07bc	0.68±0.03e	0.61±0.00c	0.09±0.00f
	关东 194	8.00±0.02c	8.40±0.07ab	81.4±0.0d	7.32±0.02bc	1.10±0.05a	0.75±0.02ab	0.15±0.03

表中数据表示“平均值±标准差”,同一列不同字母表示差异显著(P<0.05)。

表 6 南粳系列品种与其他粳稻品种的支链淀粉分支链比例的比较

Table 6 Comparison of branched chain ratio of amylopectin between Nanjing series and other japonica Rice Varieties

品种	A 链(DP6~12)	B1 链(DP13~24)	B2 链(DP25~36)	B3 链(DP≥37)
南粳 46	51.50±0.06b	45.07±0.07f	2.89±0.02ef	0.54±0.02c
南粳 5055	50.08±0.01d	46.45±0.01d	2.87±0.02ef	0.60±0.01bc
南粳 9108	50.45±0.08cd	45.83±0.07e	3.23±0.03c	0.53±0.00c
南粳 2728	44.38±0.13f	51.75±0.14a	3.06±0.01d	0.77±0.00a
南粳 58	50.17±0.80d	45.65±0.80e	3.30±0.01bc	0.82±0.01a
南粳 3908	52.39±0.29a	44.29±0.12g	2.79±0.16f	0.62±0.13b
南粳晶谷	52.27±0.24a	44.13±0.30g	2.95±0.02de	0.62±0.04b
越光	50.94±0.06bc	44.78±0.16f	3.35±0.02b	0.80±0.02a
关东 194	49.36±0.07e	46.61±0.06d	3.37±0.02b	0.64±0.01b
武粳 13	45.77±0.06f	49.83±0.07b	3.64±0.02a	0.76±0.02a
武香粳 14	48.81±0.09e	47.29±0.04c	3.05±0.01d	0.63±0.02b
稻花香	51.74±0.03b	44.48±0.10f	3.02±0.06d	0.74±0.05a

表中数据表示“平均值±标准差”，不同字母数据表示差异显著($P<0.05$)。

日平均气温一般都在 22℃左右，昼夜温差大；东北黑土地有机质含量高；氮肥施用量至少比江苏少 1/3。因此，东北生产的大米外观品质好，蛋白质含量低。所以，江苏要选育象东北那样外观品质好、直链淀粉含量较高的优质米品种难度较大。为了培育适合江苏居民口感的优质米品种，本研究团队通过对稻米食味品质性状的遗传研究，采取降低直链淀粉含量的策略，筛选出直链淀粉含量在 10%左右的日本半糯粳稻品种“关东 194”作为食味品质改良的核心种质，与江苏高产粳稻品种杂交，通过分子标记辅助选择，结合产量、抗性、食味等性状的表型鉴定，育成南粳 46、南粳 5055、南粳 9108、南粳 5718 等系列品种，不仅食味品质优，而且产量高、抗性好，种植面积不断扩大。用南粳系列品种开发的优质大米深受长江中下游地区消费市场和广大居民的喜爱，为抽穗灌浆期间气温较高的长江中下游粳稻区培育食味品质较好的粳稻品种闯出了一条新路。近年来，上海、浙江、安徽等周边省、市利用南粳 46 等的低直链淀粉含量基因 Wx^{mp} 育成了一批新的半糯粳稻品种在生产上推广应用。今后几年，半糯粳稻品种在长江中下游粳稻区的种植面积将进一步扩大。不仅如此，南方籼稻区同样是采用了降低直链淀粉含量的技术途径，将籼稻的 Wx^a 基因替换成 Wx^b 基因，使籼稻的食味品质得到了大幅度提升。

由此可见，通过降低直链淀粉含量来提高稻米的食味品质是籼粳稻普遍适用的技术途径，也证明直链淀粉含量是影响稻米食味品质最主要的因素。

利用低直链淀粉含量基因 Wx^{mp} 培育的半糯粳稻品种虽然食味品质较好，但也带来外观品质较差的弊端。此外，目前在生产上大面积推广种植的南粳 46、南粳 9108 等品种的稻瘟病抗性较差。进一步提高江苏粳稻的稻米品质，培育既好看又好吃的粳稻品种，需要合理利用 Wx^{mp} 基因以外的淀粉合成相关基因(如 $SSIIa$ 、 $SSIIIa$ 、 PUL 等^[24,59])和 Wx 位点的其他突变基因(如 Wx^{hpl} ^[60]、 Wx^{mw} ^[61]、 Wx^{lv} ^[62]、 Wx^{la} ^[63]等)；随着生物技术的发展，通过基因编辑创造新的等位变异^[64-66]也为未来的研究提供了更加广阔的途径。同时，目前江苏粳稻育种利用的稻瘟病抗性基因主要是 $Pi-b$ 和 $Pi-ta$ ，稻瘟病抗性的进一步改良，需要拓宽抗性基因的利用。据报道， $Pi-gm$ ^[67]和 $Pi-km$ ^[68]对江苏稻瘟病生理小种的抗性较好， $Pi-gm$ 已经成功应用于江苏粳稻稻瘟病抗性的改良^[69]，可以扩大利用。此外，理想株型基因^[70]、绿色革命伴侣基因^[71]、直立穗基因^[72]、粒型基因^[73]等的利用也为江苏粳稻产量潜力的提高提供了广阔的前景。值得指出的是，蛋白质含量也是影响食味品质的主要因素。虽然降低直链淀粉含量是气温较高的南方稻区提升稻米食味品质的有效技术途径，但随着稻

米食味品质遗传调控机制的进一步明晰, 稻米食味品质遗传改良的路径必将进一步完善。

参考文献(References):

- [1] Wang CL, Zhang YD, Zhu Z, Chen T, Zhao QY, Zhou LH, Yao S, Zhao L, Li YS. Studies and practices on the development of *japonica* rice varieties with good quality, disease resistance and high yield. *Jiangsu J Agric Sci*, 2012, 28 (5): 921–927.
王才林, 张亚东, 朱镇, 陈涛, 赵庆勇, 周丽慧, 姚姝, 赵凌, 李余生. 水稻优质抗病高产育种的研究与实践. *江苏农业学报*, 2012, 28(5): 921–927. [DOI]
- [2] Zhao L, Zhao CF, Zhou LH, Wang CL. Current situation and development trend of rice production in China. *Jiangsu Agric Sci*, 2015, 43(10): 105–107.
赵凌, 赵春芳, 周丽慧, 王才林. 中国水稻生产现状与发展趋势. *江苏农业科学*, 2015, 43(10): 105–107. [DOI]
- [3] Wang CL, Zhu Z, Zhang YD, Zhao L. Breeding efficiency on appearance quality of rice grains (*Oryza sativa* L. ssp. *japonica*). *Jiangsu J Agric Sci*, 2007, 23(2): 81–86.
王才林, 朱镇, 张亚东, 赵凌. 粳稻外观品质的选择效果. *江苏农业学报*, 2007, 23(2): 81–86. [DOI]
- [4] Wang CL, Zhu Z, Zhang YD, Zhao L. Achievement and consideration on improving of grain quality for *japonica* rice in Jiangsu, China. *Jiangsu J Agric Sci*, 2008, 24(2): 199–203.
王才林, 朱镇, 张亚东, 赵凌. 江苏省粳稻品质改良的成就、问题与对策. *江苏农业学报*, 2008, 24(2): 199–203. [DOI]
- [5] Zhao CF, Zhao L, Zhao QY, Chen T, Yao S, Zhu Z, Zhou LH, Nadaf AB, Liang WH, Lu K, Zhang YD, Wang CL. Genetic dissection of eating and cooking qualities in different subpopulations of cultivated rice (*Oryza sativa* L.) through association mapping. *BMC Genetics*, 2020, 21(1): 119–131. [DOI]
- [6] Zhang CQ, Zhao DS, Li QF, Gu MH, Liu QQ. Progresses in research on cloning and functional analysis of key genes involving in rice grain quality. *J Integr Agric*, 2016, 49(22): 4267–4283.
张昌泉, 赵冬生, 李钱峰, 顾铭洪, 刘巧泉. 稻米品质性状基因的克隆与功能研究进展. *中国农业科学*, 2016, 49(22): 4267–4283. [DOI]
- [7] Zhang QF, Ji JA, Zhang YD, Zhao L, Zhu Z, Wang CL. Correlation analysis between tsted value and comprehensive taste evaluation of *japonica* rice. *Jiangsu J Agric Sci*, 2007, 23(3): 161–165.
张巧凤, 吉健安, 张亚东, 赵凌, 朱镇, 王才林. 粳稻食味仪测定值与食味品尝综合值的相关性分析. *江苏农业学报*, 2007, 23(3): 161–165. [DOI]
- [8] Zhang CH, Zhang QF, Li JZ, Wang CL. Correlation analysis of appearance quality and agronomic traits in Wuyujing 3/Aichi 106 F₂ population. *J Anhui Agric Sci*, 2010, 38(3): 1179–1181.
张春红, 张巧凤, 李金州, 王才林. 武育梗 3 号/爱知 106 F₂ 群体稻米外观品质与农艺性状的相关分析. *安徽农业科学*, 2010, 38(3): 1179–1181. [DOI]
- [9] Zhang CH, Li JZ, Tian MX, Wang CL. Relationship between protein-related traits and palatabilities of *japonica* rice (*Oryza sativa* L.) with distinct taste. *Jiangsu J Agric Sci*, 2010, 26(6): 1126–1132.
张春红, 李金州, 田孟祥, 王才林. 不同食味粳稻品种稻米蛋白质相关性状与食味的关系. *江苏农业学报*, 2010, 26(6): 1126–1132. [DOI]
- [10] Wang CL, Zhang YD, Zhu Z, Chen T, Zhao L, Lin J, Zhou LH. Development of a new *japonica* rice variety Nanjing 46 with good eating quality by marker assisted selection. *Plant Molecular Breeding*, 2009, 7(6): 1070–1076. [DOI]
- [11] Zhu CL, Shen WB, Zhai HQ, WAN JM. Advances in researches of the application of low-amylose content rice gene for breeding. *J Integr Agric*, 2004, 37(2): 157–162.
朱昌兰, 沈文飏, 翟虎渠, 等. 水稻低直链淀粉含量基因育种利用的研究进展. *中国农业科学*, 2004, 37(2): 157–162. [DOI]
- [12] Mikami I, Uwatoko N, Ikeda Y, Yamaguchi J, Hirano HY, Suzuki Y, Sano Y. Allelic diversification at the *wx* locus in landraces of Asian rice. *Theor Appl Genet*, 2008, 116(7): 979–989. [DOI]
- [13] Biselli C, Cavalluzzo D, Perrini R, Gianinetti A, Bagnaresi P, Urso S, Orasen G, Desiderio F, Lupotto E, Cattivelli L, Valè G. Improvement of marker-based predictability of apparent amylose content in *japonica* rice through *GBSSI* allele mining. *Rice*, 2014, 7(1): 1. [DOI]
- [14] Zhang ZJ, Li M, Fang YW, Liu FC, Lu Y, Meng QC, Peng JC, Yi XH, Gu MH, Yan CJ. Diversification of the waxy gene is closely related to variations in rice eating and cooking quality. *Plant Mol Biol Rep*, 2012, 30(2): 462–469. [DOI]
- [15] Wang CL, Zhang YD, Zhu Z, Chen T, Zhao QY, Zhong WG, Yang J, Yao S, Zhou LH, Zhao L, Li YS. Research progress on the breeding of *japonica* super rice varieties in Jiangsu Province. China. *J Integr Agric*, 2017, 16(5): 992–999. [DOI]

- [16] Yu X, Zhao QY, Zhao CF, Zhang YD, Zhu Z, Zhao L, Chen T, Zhou LH, Yao S, Wang CL. Analysis of amylose content in different types of new rice varieties (lines) carrying *Wx-mq* gene. *Jiangsu J Agric Sci*, 2012, 28(6): 1218–1222.
于新, 赵庆勇, 赵春芳, 张亚东, 朱镇, 赵凌, 陈涛, 周丽慧, 姚姝, 王才林. 携带 *Wx-mq* 基因的不同类型水稻新品种(系)直链淀粉含量分析. *江苏农业学报*, 2012, 28(6): 1218–1222. [DOI]
- [17] Zhao QY, Zhu Z, Zhang YD, Chen T, Yao S, Zhou LH, Yu X, Zhao L, Wang CL. Effects of sowing date and site on grain quality of rice cultivars planted in different ecological types. *Chin J Rice Sci*, 2013, 27(3): 297–304.
赵庆勇, 朱镇, 张亚东, 陈涛, 姚姝, 周丽慧, 于新, 赵凌, 王才林. 播期和地点对不同生态类型粳稻品质性状的影响. *中国水稻科学*, 2013, 27(3): 297–304. [DOI]
- [18] Zhu Z, Zhao QY, Zhang YD, Chen T, Yao S, Zhou LH, Yu X, Wang CL. Effect of different sowing date and site on grain quality and RVA profile of Nanjing 46. *Jiangsu J Agric Sci*, 2013, 29(5): 921–927.
朱镇, 赵庆勇, 张亚东, 陈涛, 姚姝, 周丽慧, 于新, 王才林. 播期和种植地点对南粳 46 稻米品质及 RVA 谱的影响. *江苏农业学报*, 2013, 29(5): 921–927. [DOI]
- [19] Yao S, Yu X, Zhou LH, Chen T, Zhao QY, Zhu Z, Zhang YD, Zhao CF, Zhao L, Wang CL. Effects of nitrogen and sowing date on amylose content in good eating quality rice (*Oryza sativa*, L. *japonica*). *Chin J Rice Sci*, 2016, 30(5): 535–549.
姚姝, 于新, 周丽慧, 陈涛, 赵庆勇, 朱镇, 张亚东, 赵春芳, 赵凌, 王才林. 氮肥用量和播期对优良食味粳稻直链淀粉含量的影响. *中国水稻科学*, 2016, 30(5): 535–549. [DOI]
- [20] Hannah LC, James M. The complexities of starch biosynthesis in cereal endosperms. *Curr Opin Biotech*, 2008, 19: 160–165. [DOI]
- [21] Nakamura Y. Towards a better understanding of the metabolic system for amylopectin biosynthesis in plants: rice endosperm as a model tissue. *Plant Cell Physiol*, 2002, 43(7): 718–725. [DOI]
- [22] James MG, Denyer K, Myers AM. Starch synthesis in the cereal endosperm. *Curr Opin Plant Biol*, 2003, 6(3): 215–222. [DOI]
- [23] Yao S, Zhang YD, Liu YQ, Zhao CF, Zhou LH, Chen T, Zhao QY, Zhu Z, Pillay B, Wang CL. Effects of *SS IIa* and *SS IIIa* alleles and their interaction on eating and cooking quality under *Wx^{mp}* background of rice. *Acta Agron Sin*, 2020, 46(11): 1690–1702.
姚姝, 张亚东, 刘燕清, 赵春芳, 周丽慧, 陈涛, 赵庆勇, 朱镇, Balakrishna Pillay, 王才林. 水稻 *Wx^{mp}* 背景下 *SS IIa* 和 *SS IIIa* 等位变异及其互作对蒸煮食味品质的影响. *作物学报*, 2020, 46(11): 1690–1702. [DOI]
- [24] Yao S, Zhang YD, Liu YQ, Zhao CF, Zhou LH, Chen T, Zhao QY, Zhu Z, Pillay B, Wang CL. Allelic effects on eating and cooking quality of *SS IIa* and *PUL* genes under *Wx^{mp}* Background in rice. *Chin J Rice Sci*, 2020, 34(3): 217–227.
姚姝, 张亚东, 刘燕清, 赵春芳, 周丽慧, 陈涛, 赵庆勇, 朱镇, Balakrishna Pillay, 王才林. *Wx^{mp}* 基因背景下可溶性淀粉合成酶基因 *SS IIa* 和去分支酶基因 *PUL* 对水稻蒸煮食味品质的影响. *中国水稻科学*, 2020, 34(3): 217–227. [DOI]
- [25] Verma DK, Srivastav PP. Extraction Technology for Rice Volatile Aroma Compounds. In: Meghwal M & Goyal MR (Eds.), *Food Engineering: Emerging Issues, Modeling, and Applications* (Vol. 2). As part of book series on *Innovations in Agricultural and Biological Engineering*, USA: Apple Academic Press. 2016, 246–284. [DOI]
- [26] Verma DK, Srivastav PP. Introduction to Rice Aroma, Flavor, and Fragrance. In: Verma DK, Srivastav PP (Eds.), *Science and Technology of Aroma, Flavour and Fragrance in Rice*. USA: Apple Academic Press. 2018, 3–34. [DOI]
- [27] Routray W, Rayaguru K. 2-Acetyl-1-pyrroline: A key aroma component of aromatic rice and other food products. *Food Rev Int*, 2018, 34(6): 539–565. [DOI]
- [28] Lee YS, Oh Y, Kim TH, Cho YH. Quantitation of 2-acetyl-1-pyrroline in aseptic-packaged cooked fragrant rice by HS-SPME/GC-MS. *Food Sci Nutr*, 2019, 7(1): 266–272. [DOI]
- [29] He Q, Park YJ. Discovery of a novel fragrant allele and development of functional markers for fragrance in rice. *Mol Breed*, 2015: 35, 217. [DOI]
- [30] Shan QW, Zhang Y, Chen KL, Zhang K, Gao CX. Creation of fragrant rice by targeted knockout of the *OsBADH2* gene using TALEN technology. *Plant Biotechnol J*, 2015, 13(6): 791–800. [DOI]
- [31] Kovach MJ, Calingacion MN, Fitzgerald MA, McCouch SR. The origin and evolution of fragrance in rice (*Oryza sativa* L.). *Proc Natl Acad Sci USA*, 2009, 106(34): 14444–14449. [DOI]
- [32] Shao GN, Tang SQ, Chen ML, Wei XJ, He JW, Luo J, Jiao GA, Hu YC, Xie LH, Hu PS. Haplotype variation at *Badh2*, the gene determining fragrance in rice. *Genomics*, 2013, 101(2): 157–162. [DOI]
- [33] He Q, Park YJ. Discovery of a novel fragrant allele and

- development of functional markers for fragrance in rice. *Mol Breeding*, 2015, 35(11): 217. [DOI]
- [34] Chen SH, Wu J, Yang Y, Shi WW, Xu ML. The *fgr* gene responsible for rice fragrance was restricted within 69 kb. *Plant Sci*, 2006, 171(4): 505–514. [DOI]
- [35] Chen SH, Yang Y, Shi WW, Ji Q, He F, Zhang ZD, Cheng ZK, Liu XN, Xu ML. *Badh2*, encoding betaine aldehyde dehydrogenase, inhibits the biosynthesis of 2-acetyl-1-pyrroline, a major component in rice fragrance. *Plant Cell*, 2008, 20(7): 1850–1861. [DOI]
- [36] Chen ML, Wei XJ, Shao GN, Tang SQ, Luo J, Hu PS. Fragrance of the rice grain achieved via artificial microRNA-induced down-regulation of *OsBADH2*. *Plant Breeding*, 2012, 131(5): 584–590. [DOI]
- [37] Niu XL, Tang W, Huang WZ, Ren GJ, Wang QL, Luo D, Xiao YY, Yang SM, Wang F, Lu BR, Gao FY, Lu TG, Liu YS. RNAi-directed downregulation of *OsBADH2* results in aroma (2-acetyl-1-pyrroline) production in rice (*Oryza sativa* L.). *BMC Plant Biol*, 2008, 8: 100. [DOI]
- [38] Bradbury LMT, Fitzgerald TL, Henry RJ, Jin QS, Waters DLE. The gene for fragrance in rice. *Plant Biotechnol J*, 2005, 3(3): 363–370. [DOI]
- [39] Shi WW, Yang Y, Chen SH, Xu ML. Discovery of a new fragrance allele and the development of functional markers for the breeding of fragrant rice varieties. *Mol Breeding*, 2008, 22(2): 185–192. [DOI]
- [40] Shao GN, Tang A, Tang SQ, Luo J, Jiao GA, Wu JL, Hu PS. A new deletion mutation of fragrant gene and the development of three molecular markers for fragrance in rice. *Plant Breeding*, 2011, 130(2): 172–176. [DOI]
- [41] Amarawathi Y, Singh R, Singh AK, Singh VP, Mohapatra T, Sharma TR, Singh NK. Mapping of quantitative trait loci for basmati quality traits in rice (*Oryza sativa* L.). *Mol Breeding*, 2008, 21(9): 49–65. [DOI]
- [42] Yan Y, Zhu GM, Zhang LX, Wan CZ, Cao LM, Zhao ZP, Wu SJ. Development of molecular markers for fragment gene and its application. *Acta Bot Boreali-Occident Sin*, 2015, 35(2): 269–274.
闫影, 诸光明, 张丽霞, 万常照, 曹黎明, 赵志鹏, 吴书俊. 水稻香味基因分子标记的开发及应用. 西北植物学报, 2015, 35(2): 269–274. [DOI]
- [43] Chen T, Zhang YD, Zhao L, Zhu Z, Lin J, Zhang SB, Wang CL. A cleaved amplified polymorphic sequence marker to detect variation in *Wx* locus conditioning translucent endosperm in rice. *Rice Sci*, 2009, 16(2): 106–110. [DOI]
- [44] Chen T, Luo MR, Zhang YD, Zhu Z, Zhao QY, Zhao L, Zhou LH, Yao S, Wang CL. Detection of *Wx-mp* Gene for low amylose content by tatre-amplification refractory mutation system PCR in-rice. *Chin J Rice Sci*, 2013, 27(5): 529–534.
陈涛, 骆名瑞, 张亚东, 朱镇, 赵庆勇, 赵凌, 周丽慧, 姚姝, 王才林. 利用四引物扩增受阻突变体系 PCR 技术检测水稻低直链淀粉含量基因 *Wx-mp*. 中国水稻科学, 2013, 27(5): 529–534. [DOI]
- [45] Wang C L, Chen T, Zhang Y D, Zhu Z, Zhao L, Lin J. Breeding of a new rice variety with good eating quality by marker assisted selection. *Chin J Rice Sci*, 2009, 23(1): 25–30.
王才林, 陈涛, 张亚东, 朱镇, 赵凌, 林静. 通过分子标记辅助选择培育优良食味水稻新品种. 中国水稻科学, 2009, 23(1): 25–30. [DOI]
- [46] Yao S, Liu YQ, Zhang YD, Zhu Z, Chen T, Zhao QY, Zhou LH, Zhao CF, Yu X, Wang CL. Establishment and application of multiplex PCR system for blast resistance genes *Pi-ta* and *Pi-b* in rice. *Acta Agron Sin*, 2014, 40(9): 1565–1571.
姚姝, 刘燕清, 张亚东, 朱镇, 陈涛, 赵庆勇, 周丽慧, 赵春芳, 于新, 王才林. 水稻抗稻瘟病基因 *Pi-ta* 和 *Pi-b* 多重 PCR 体系的构建与应用. 作物学报, 2014, 40(9): 1565–1571. [DOI]
- [47] Yao S, Chen T, Zhang YD, Zhu Z, Zhao L, Zhao QY, Zhou LH and Wang CL. Pyramiding of translucent endosperm mutant gene *Wx-mq* and rice stripe disease resistance gene *Stv-bⁱ* by marker-assisted selection in rice (*Oryza sativa*). *Rice Sci*, 2011, 18(2): 102–109.
姚姝, 陈涛, 张亚东, 朱镇, 赵凌, 赵庆勇, 周丽慧, 王才林. 分子标记辅助选择聚合水稻暗胚乳突变基因 *Wx-mq* 和抗条纹叶枯病基因 *Stv-bⁱ*. 中国水稻科学, 2011, 18(2): 102–109. [DOI]
- [48] Wang CL, Zhang YD, Zhu Z, Zhao L, Chen T, Lin J. Breeding and utilization of new rice variety Nanjing 46 with good eating quality. *Chin Rice*, 2008, (3): 38–40.
王才林, 张亚东, 朱镇, 赵凌, 陈涛, 林静. 优质水稻新品种南粳 46 的选育与应用. 中国稻米, 2008, (3): 38–40. [DOI]
- [49] Wang CL, Zhang YD, Zhu Z, Chen T, Zhao QY, Zhao L, Zhou LH, Yao S. Breeding and application of new good eating quality rice variety Nanjing 5055. *Bull Agric Sci Technol*, 2012, (2): 84–87.
王才林, 张亚东, 朱镇, 陈涛, 赵庆勇, 赵凌, 周丽慧, 姚姝. 优良食味粳稻新品种南粳 5055 的选育及利用. 农业科技通讯, 2012, (2): 84–87. [DOI]
- [50] Wang CL, Zhang YD, Zhu Z, Yao S, Zhao QY, Chen T,

- Zhou LH, Zhao L. Breeding and application of new good eating quality rice variety Nanjing 9108. *Jiangsu Agric Sci*, 2013, 41(9): 86–88.
- 王才林, 张亚东, 朱镇, 姚姝, 赵庆勇, 陈涛, 周丽慧, 赵凌. 优良食味梗稻新品种南梗 9108 的选育与利用. *江苏农业科学*, 2013, 41(9): 86–88. [DOI]
- [51] Zhao QY, Zhang YD, Zhu Z, Chen T, Zhu WY, Chen F, Zhou LH, Yao S, Zhao L, Zhao CF, Liang WH, Lu K, Wang CL. Breeding and application of new Medium japonica rice variety Nanjing 505. *Jiangsu Agric Sci*, 2020, 48(13): 103–106.
- 赵庆勇, 张亚东, 朱镇, 陈涛, 朱文银, 陈峰, 周丽慧, 姚姝, 赵凌, 赵春芳, 梁文化, 路凯, 王才林. 优良食味中梗稻新品种南梗 505 的选育与应用. *江苏农业科学*, 2020, 48(13): 103–106. [DOI]
- [52] Yao S, Wang CL, Zhang YD, Zhu Z, Chen T, Zhao QY, Zhou LH, Zhao L, Zhao CF, Lu K, Liang WH, Wu JS, Cai F. Breeding and utilization of a new medium maturing medium japonica rice variety Nangeng 2728 with good eating quality. *Chin Rice*, 2020, 26(03): 88–90.
- 姚姝, 王才林, 张亚东, 朱镇, 陈涛, 赵庆勇, 周丽慧, 赵凌, 赵春芳, 路凯, 梁文化, 吴俊生, 蔡锋. 优良食味中熟中梗稻新品种南梗 2728 的选育与应用. *中国稻米*, 2020, 26(03): 88–90. [DOI]
- [53] Zhang YD, Zhu Z, Chen T, Zhao QY, Feng KH, Yao S, Zhou LH, Zhao L, Zhao CF, Liang WH, Lu K, Wang CL. Breeding and characteristics of a new japonica rice variety Nangeng 5718 with good eating quality. *Chin Rice*, 2020, 26(04): 100–102.
- 张亚东, 朱镇, 陈涛, 赵庆勇, 冯凯华, 姚姝, 周丽慧, 赵凌, 赵春芳, 梁文化, 路凯, 王才林. 优良食味梗稻南梗 5718 的选育及主要特征特性. *中国稻米*, 2020, 26(04): 100–102. [DOI]
- [54] Chen T, Zhang YD, Zhao QY, Zhu Z, Yao S, Zhou LH, Zhao L, Zhao CF, Wang B, Wang CL. Breeding and cultivation techniques of a new late maturing japonica rice variety Nangeng 3908 with good taste, disease resistance and high yield. *Jiangsu Agric Sci*, 2019, 47(19): 72–74.
- 陈涛, 张亚东, 赵庆勇, 朱镇, 姚姝, 周丽慧, 赵凌, 赵春芳, 王波, 王才林. 优良食味抗病高产晚梗稻新品种南梗 3908 的选育和栽培技术. *江苏农业科学*, 2019, 47(19): 72–74. [DOI]
- [55] Zhu Z, Zhang YD, Chen T, Zhao QY, Feng KH, Zhou LH, Yao S, Zhao L, Zhao CF, Liang WH, Lu K, Wang CL. Breeding and application of a new japonica rice variety Nangeng Jinggu with good eating quality. *Jiangsu Agric Sci*, 2020, 48(19): 79–82.
- 朱镇, 张亚东, 陈涛, 赵庆勇, 冯凯华, 周丽慧, 姚姝, 赵凌, 赵春芳, 梁文化, 路凯, 王才林. 优良食味梗稻新品种南梗晶谷的选育与应用. *江苏农业科学*, 2020, 48(19): 79–82. [DOI]
- [56] Zhao CF, Yue HL, Huang SJ, Zhou LH, Zhao L, Zhang YD, Chen T, Zhu Z, Zhao QY, Yao S, Liang WH, Lu K, Wang CL. Study on eating quality and physicochemical properties in Nanjing rice varieties. *J Integr Agric*, 2019, 52(5): 909–920.
- 赵春芳, 岳红亮, 黄双杰, 周丽慧, 赵凌, 张亚东, 陈涛, 朱镇, 赵庆勇, 姚姝, 梁文化, 路凯, 王才林. 南梗系列水稻品种的食味品质与稻米理化特性. *中国农业科学*, 2019, 52(5): 909–920. [DOI]
- [57] Mar NN, Umemoto T, Abdulah SNA, Maziah M. Chain length distribution of amylopectin and physicochemical properties of starch in Myanmar rice cultivars. *Int J Food Prop* 2015, 18(8): 1719–1730. [DOI]
- [58] Zhang CQ, Chen SJ, Ren XY, Lu Y, Liu DR, Cai XL, Li QF, Gao JP, Liu QQ. Molecular structure and physicochemical properties of starches from rice with different amylose contents resulting from modification of *OsGBSSI* activity. *J Agric Food Chem*, 2017, 65(10): 2222–2232. [DOI]
- [59] Yao S, Zhang YD, Liu YQ, Zhao CF, Zhou LH, Chen T, Zhao QY, Pillay B, Wang CL. Effects of soluble starch synthase genes on eating and cooking quality in semi waxy japonica rice with Wx^{mp} . *Food Production, Processing and Nutrition*, 2020, 2: 22. [DOI]
- [60] Liu LL, Ma XD, Liu SJ, Zhu CL, Jiang L, Wang YH, Shen Y, Ren YL, Dong H, Chen LM, Xi Liu, Zhao ZG, Zhai HQ & Wan JM. Identification and characterization of a novel Waxy allele from a Yunnan rice landrace. *Plant Mol Biol*, 2009, 71(6): 609–626. [DOI]
- [61] Zhang CQ, Yang Y, Chen SJ, Liu XJ, Zhu JH, Zhou LH, Lu Y, Li QF, Fan XL, Tang SZ, Gu MH, Liu QQ. A rare Waxy allele coordinately improves rice eating and cooking quality and grain transparency. *J Integr Plant Biol*, 2020, doi: 10.1111/jipb.13010. [DOI]
- [62] Zhang, CQ, Zhu, JH, Chen, SJ, Fan, XL, Li, QF, Lu, Y, Wang, M Yu HX, Yi CD, Tang SZ, Gu MH, Liu QQ. Wx^{lv} , the ancestral allele of rice Waxy gene. *Mol Plant*, 2019, 12(8): 1157–1166. [DOI]
- [63] Zhou H, Xia D, Zhao D, Li YH, Li PB, Wu B, Gao GJ, Zhang QL, Wang GW, Xiao JH, Li XH, Yu SB, Lian XM, He YQ. The origin of Wx^{la} provides new insights into the improvement of grain quality in rice. *J Integr Plant Biol*, 2020, DOI: 10.1111/jipb.13011. [DOI]

- [64] Huang LC, Li QF, Zhang CQ, Chu R, Gu ZW, Tan HY, Zhao DS, Fan XL, Liu QQ. Creating novel *Wx* alleles with fine-tuned amylose levels and improved grain quality in rice by promoter editing using CRISPR/Cas9 system. *Plant Biotechnol J*, 2020, 18(11): 2164–2166. [DOI]
- [65] Xu Y, Lin QP, Li XF, Wang FQ, Chen ZH, Wang J, Li WQ, Fan FJ, Tao YJ, Jiang YJ, Wei XD, Zhang R, Zhu QH, Bu QY, Yang J, Gao CX. Fine-tuning the amylose content of rice by precise base editing of the *Wx* gene. *Plant Biotechnol J*, 2021, 19(1): 11–13. [DOI]
- [66] Zeng DC, Liu TL, Ma XL, Wang B, Zheng ZY, Zhang YL, Xie XR, Yang BW, Zhao Z, Zhu QL, Liu YG. Quantitative regulation of Waxy expression by CRISPR/Cas9-based promoter and 5'UTR-intron editing improves grain quality in rice. *Plant Biotechnol J*, 2020, 18(12): 2385–2387. [DOI]
- [67] Yu MM, Dai ZY, Pan CH, Chen XJ, Yu L, Zhang XX, Li YH, Xiao N, Gong HB, Sheng SL, Pan XB, Zhang, HX, Li AH. Resistance spectrum difference between two broad-spectrum blast resistance genes, *Pigm* and *Pi2*, and their interaction effect on *Pi1*. *Acta Agron Sin*, 2013, 39(11): 1927–1934.
于苗苗, 戴正元, 潘存红, 陈夕军, 余玲, 张晓祥, 李育红, 肖宁, 龚红兵, 盛生兰, 潘学彪, 张洪熙, 李爱宏. 广谱稻瘟病抗性基因 *Pigm* 和 *Pi2* 的抗谱差异及与 *Pi1* 的互作效应. 作物学报, 2013, 39(11): 1927–1934. [DOI]
- [68] Zhang SL, Sun XC, Chen T, Zhao CF, Zhu Z, Zhao QY, Zhou LH, Zhao L, Yao S, Wang CL. Distribution of *Pi-ta*, *Pi-5*, *Pi-km* and *Pi-b* genes in japonica rice varieties (lines) and their relationship with neck blast resistance. *Jiangsu J Agric Sci*, 2018, 34(5): 961–971.
张善磊, 孙旭超, 陈涛, 赵春芳, 朱镇, 赵庆勇, 周丽慧, 赵凌, 姚姝, 王才林. *Pi-ta*, *Pi-5*, *Pi-km* 和 *Pi-b* 基因在粳稻品种(系) 中的分布及对穗颈瘟的抗性. 江苏农业学报, 2018, 34(5): 961–971. [DOI]
- [69] Chen T, Sun XC, Zhang SL, Liang WH, Zhou LH, Zhao QY, Yao S, Zhao L, Zhao CF, Zhu Z, Zhang YD, Wang CL. Development and verification of specific molecular markers for *Pigm* gene associated with broad-spectrum resistance to rice blast. *Chin J Rice Sci*, 2020, 34(1): 28–36.
陈涛, 孙旭超, 张善磊, 梁文化, 周丽慧, 赵庆勇, 姚姝, 赵凌, 赵春芳, 朱镇, 张亚东, 王才林. 稻瘟病广谱抗性基因 *Pigm* 特异性分子标记的开发和应用. 中国水稻科学, 2020, 34(1): 28–36. [DOI]
- [70] Zhang L, Yu H, Ma B, Liu GF, Wang JJ, Wang JM, Gao RC, Li JJ, Liu JY, Xu J, Zhang YY, Li Q, Huang XH, Xu JL, Li JM, Qian Q, Han B, He ZH, Li JY. A natural tandem array alleviates epigenetic repression of *IPA1* and leads to superior yielding rice. *Nat Commun*, 2017, 8: 14789. [DOI]
- [71] Wang YX, Shang LG, Yu H, Zeng LJ, Hu J, Ni S, Rao YC, Li SF, Chu JF, Meng XB, Wang L, Hu P, Yan JJ, Kang SJ, Qu MH, Lin H, Wang T, Wang Q, Hu XM, Chen HQ, Wang B, Gao ZY, Guo LB, Zeng DL, Zhu XD, Xiong GS, Li JY, Qian Q. A strigolactone biosynthesis gene contributed to the green revolution in rice. *Mol Plant*. 2020, 13(6): 923–932. [DOI]
- [72] Zhang DP, Zhang MY, Zhou Y, Wang YZ, Shen JY, Chen HYX, Zhang L, Lu B, Liang GH, Liang JS. The rice G protein gamma subunit *DEP1/qPE9-1* positively regulates grain-filling process by increasing auxin and cytokinin content in rice grains. *Rice(NY)*, 2019, 12(1): 91. [DOI]
- [73] Zhang YD, Zhu Z, Zhao QY, Chen T, Yao S, Zhou LH, Zhao L, Zhao CF, Wang CL. Haplotypes of *qGL3* and their roles in grain size regulation with *GS3* alleles in rice. *Genet Mol Res*, 15(1): 15017587. [DOI]

(责任编辑: 王秀娥)