

方志强, 陆展华, 刘维, 等. 广东省水稻主导品种‘粤禾丝苗’品质性状分析 [J]. 华南农业大学学报, 2025, 46(6): 843-850.
FANG Zhiqiang, LU Zhanhua, LIU Wei, et al. Quality characteristic analysis of leading rice variety ‘Yuehesimiao’ in Guangdong Province[J]. Journal of South China Agricultural University, 2025, 46(6): 843-850.

广东省水稻主导品种‘粤禾丝苗’品质性状分析

方志强[†], 陆展华[†], 刘 维, 王晓飞, 王石光, 巫浩翔, 潘朝阳, 张丽婷, 何秀英

(广东省农业科学院 水稻研究所/农业农村部华南优质稻遗传育种实验室(部省共建)/

广东省水稻科学技术重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要:【目的】优质是水稻育种的重要目标之一, 涵盖加工品质、外观品质、蒸煮食味品质和营养品质等多项指标。‘粤禾丝苗’是由广东省农业科学院水稻研究所育成的优质稻主栽品种, 具有抗倒伏、抗逆性强以及稻米品质优良等特性, 已得到广泛应用。本研究旨在对‘粤禾丝苗’的稻米品质及其相关基因型进行系统性分析, 进一步挖掘其优质特性并为水稻育种及品种改良提供理论支撑。【方法】以‘粤香占’和‘玉针香’为对照, 分析‘粤禾丝苗’的粒型、直链淀粉含量、胶稠度等稻米品质性状, 以及淀粉黏滞谱特征(包括峰值黏度、冷浆黏度、消减值等), 并对品质相关基因进行 PCR 扩增与基因型分析, 同时挖掘‘粤禾丝苗’在品质育种中的应用潜力。【结果】‘粤禾丝苗’粒型介于 2 个对照品种之间, 粒型基因主要为 *gs3*、*gw7*; 加工品质各性状优良, 具有低直链淀粉含量和高胶稠度等特性, 优良的蒸煮食味品质与 *Wx^b* 基因有关; 表现出高蛋白质和脂肪酸含量特点, 在早季栽培条件下尤为显著。以‘粤禾丝苗’为恢复系和骨干亲本所培育的杂交稻和常规稻均具有较好的品质特性。【结论】‘粤禾丝苗’是一个外观品质优良、加工品质优异的中长粒水稻品种, 研究结果可为培育产量、抗性和品质协同提升的水稻新品种提供理论依据。

关键词: 水稻; ‘粤禾丝苗’; 品质性状; RVA 谱

中图分类号: S511; S330

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2025)06-0843-08

Quality characteristic analysis of leading rice variety ‘Yuehesimiao’ in Guangdong Province

FANG Zhiqiang[†], LU Zhanhua[†], LIU Wei, WANG Xiaofei, WANG Shiguang, WU Haoxiang,

PAN Zhaoyang, ZHANG Liting, HE Xiuying

(Rice Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Genetics and Breeding of High Quality

Rice in Southern China (Co-construction by Ministry and Province), Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Guangdong Key

Laboratory of Rice Science and Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: 【Objective】 High quality is one of the core objectives in rice breeding, encompassing multiple aspects such as processing quality, appearance quality, cooking and eating quality, as well as nutritional quality. ‘Yuehesimiao’ is a high-quality main rice variety developed by the Rice Research Institute of Guangdong

收稿日期: 2025-03-22 网络首发时间: 2025-07-15 14:40:47

首发网址: <https://link.cnki.net/urlid/44.1110.S.20250715.1350.002>

作者简介: 方志强, E-mail: 993733231@qq.com; 陆展华, 主要从事水稻遗传育种研究, E-mail: aaslzh@163.com; [†]表示对本文贡献相同; 通信作者: 何秀英, 主要从事水稻遗传育种研究, E-mail: hexiuying@gdaas.cn

基金项目: 广东省现代农业产业技术体系水稻创新团队项目(2024CXTD05); 广东省农业科学院中青年学科带头人(金颖之星)培养项目(R2023PY-JX003); 广州市基础与应用基础研究基金(202201010586); 广州市重点研发项目(2024B03J1302); 广东省水稻育种新技术重点实验室研究项目(2023B1212060042)

Academy of Agricultural Sciences. It exhibits strong lodging resistance, high stress tolerance, and excellent grain quality, and has been widely adopted. This study was aimed to systematically analyze the grain quality and associated genotypes of ‘Yuehesimiao’, further explore its superior traits, and provide a theoretical support for rice breeding and variety improvement. 【Method】 Using high-quality varieties ‘Yuxiangzhan’ and ‘Yuzhenxiang’ as controls, the grain quality traits of ‘Yuehesimiao’ (including grain shape, amylose content, gel consistency) were measured, and its starch viscosity profile (including peak viscosity, cool paste viscosity and setback viscosity, etc.) were characterized. Simultaneously, PCR amplification and genotyping were performed for quality-related genes. Meanwhile, the application potential of ‘Yuehesimiao’ in quality breeding was explored. 【Result】 The grain shape of ‘Yuehesimiao’ was intermediate between those of the two control varieties, with its grain morphology primarily governed by *gs3* and *gw7* genes. The processing quality traits of ‘Yuehesimiao’ were excellent, featuring low amylose content and high gel consistency. Its superior cooking and eating quality was associated with *Wx^b* gene. Additionally, ‘Yuehesimiao’ was demonstrated with high protein and fatty acid contents, with these characteristics being particularly pronounced under early-season cultivation conditions. The quality characteristics of hybrid and conventional rice varieties developed using ‘Yuehesimiao’ as a restorer line or a founder parent were excellent. 【Conclusion】 ‘Yuehesimiao’ is a medium-to-long grain rice variety with excellent appearance quality and superior processing quality. These findings provide a theoretical basis for developing new rice varieties featuring synergistic improvement of yield, stress resistance, and grain quality.

Key words: *Oryza sativa* L.; ‘Yuehesimiao’; Quality trait; RVA profile

优质是水稻 *Oryza sativa* L.新品种选育的重要目标之一。稻米品质性状一般包括外观品质、加工品质、蒸煮食味品质和营养品质^[1-4]。粒型是产量形成的重要因子，另外还影响加工品质，也是重要的品质性状。水稻粒型受多基因调控。*GS3* 负调控籽粒大小^[5-6]。*GW7/GL7* 正调控籽粒长度，过表达 *GW7* 可增强籽粒的纵向分裂，同时减少横向分裂，从而导致谷粒细长，改善稻米外观品质^[7-8]；此外，*GW7* 的表达直接受粒宽调控因子 *OsSPL16/GW8* 控制^[9]。*GS9* 通过 *GS9-OF8/14-GSK2* 通路负调控粒长^[10]。

淀粉是稻米的主要成分，由直链淀粉和支链淀粉构成，也是直接影响稻米食味品质的主要因素^[11]。蜡质合成基因 *Wx* 编码颗粒淀粉合成酶 (Granule-bound starch synthase, GBSS)，是控制直链淀粉合成的主要基因，直接影响胚乳和花粉中直链淀粉含量^[12]。在非糯性水稻中，*Wx* 基因分为 *Wx^a* 和 *Wx^b*。野生稻和大多数籼稻为 *Wx^a* 基因型，具有较高的直链淀粉含量，而大多数粳稻为 *Wx^b*，直链淀粉含量相对较低^[13]。*Wx* 基因也影响稻米的胶稠度^[14]。

淀粉 RVA 谱是指将一定比例的水和精米粉混合来模拟米饭蒸煮，由米粉在加热和冷却过程中的黏度变化形成的曲线。特征值有峰值黏度 (Peak viscosity)；热浆黏度 (Hot paste viscosity)；冷浆黏度 (Cool paste viscosity)；峰值时间 (Peak time)；崩解

值 (Breakdown viscosity，峰值黏度与热浆黏度的差值)；消减值 (Setback viscosity，峰值黏度与冷浆黏度的差值) 和回复值 (Consistence viscosity)^[15-16]。研究表明，水稻淀粉 RVA 谱特征值与蒸煮食味品质密切相关，尤其是崩解值、消减值和回复值^[17]。一般情况下，直链淀粉含量越高，崩解值越低，消减值和回复值越高。因此，淀粉 RVA 特征值可以区分、表观直链淀粉含量相似的水稻品种在蒸煮食味品质上的差异^[18]。

‘粤禾丝苗’是广东省农业科学院水稻研究所以‘粤农丝苗’、‘粤银丝苗’为亲本，经系谱法选育成的高产、优质、抗病水稻新品种。该品种稻米品质优良，达到国家标准《大米》(GB/T 1354—2018)^[19] 优质 2 级，丰产性好，抗倒性强，产量、品质和抗性均达到较高水平，已连续多年成为广东省农业主导品种，并可作为两系和三系杂交稻父本使用。为了进一步揭示‘粤禾丝苗’的品质性状，本研究对其外观品质、加工品质、营养品质、淀粉含量和 RVA 谱进行比较分析，并对该品种的品质相关基因进行分析，以期为培育新的抗病、优质水稻品种提供重要理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究所用‘粤禾丝苗’为广东省农业科学

院水稻研究所育成的常规水稻品种, 对照品种 ‘粤香占’、‘玉针香’ 分别由广东省农业科学院水稻研究所、湖南省水稻研究所育成。所有材料均种植于广东省农业科学院水稻研究所白云基地, 每份材料分 3 个小区, 每个小区种植 100 株, 株行距为 15 cm×15 cm。采取常规管理措施, 水肥中等。

1.2 考种

在每个小区取样 5 株, 按平均穗数法调查穗长、穗粒数、实粒数等经济性状, 并计算结实率。使用托普云农的智能考种分析仪 (TPKZ-3) 对稻谷粒长、宽、长宽比及千粒质量进行检测。3 次重复, 取平均值。

1.3 稻米品质测定

按照 Lu 等^[20] 的方法测定稻米品质的加工品质 (糙米率、精米率、整精米率), 外观品质 (粒长、

粒宽、粒长宽比、垩白粒率、垩白度), 蒸煮食味品质 (胶稠度、直链淀粉含量、食味值和 RVA 谱) 和营养品质 (蛋白质、脂肪酸含量)。

1.4 稻米品质基因检测

1.4.1 DNA 提取及 PCR 反应 取新鲜的水稻叶片, 用 CTAB 法提取样本 DNA。根据文献资料查找与稻米品质基因相关的分子标记, 供试引物列于表 1, 引物序列由上海英骏生物技术有限公司合成。PCR 反应体系为 15 μL: 2× mix 7.5 μL, 正反向引物各 0.3 μL, DNA 1 μL, ddH₂O 补至 15 μL。反应程序: 95 °C 预变性 1 min; 95 °C 变性 30 s, 55~60 °C 退火 30 s, 72 °C 延伸 30 s, 35 个循环; 72 °C 延伸 5 min。退火温度因引物碱基含量而异。扩增之后进行 30 g/L 琼脂糖凝胶电泳, 电泳结束后在凝胶成像仪下观察并拍照储存。

表 1 引物名称及序列
Table 1 Primer name and sequence

基因(引物)	正向序列(5'→3')	反向序列(5'→3')	产物长度/bp	退火温度/ °C	参考文献
Gene (Primer)	Forward sequence	Reverse sequence	Product length	Annealing temperature	Reference
<i>Wx</i> (RA19)	TACAAATAGCCACCCACACC	TTGCAGATGTTCTTCCTGATG	157	56	[21]
<i>GS3</i> (Chr301)	TATTTATTGGCTTGATTTCTGTG	GCTGGTTTTTTACTTTCATTTGCC	511	56	[22]
<i>GS9</i> (In0919)	CGTTTAGGCTGGCTGC	CAGTTGGTGGTTTCGTAGAG	192	56	[22]
<i>GW7/GL7</i> (CHR701)	AGGGCTGGGACTGAAC TTTGT	ATGGACCCAGGCAAAACACC	138	56	[22]
<i>GW5/qSW5</i> (Chr525)	AAGAAAGCCCAAAACAACACA	CTTCCACCCTCAGTGTCGC	206	56	[22]
<i>GW8/OsSPL16</i> (GW8)	AAAGAGACAGCCACGGAATC	ATCTTGAGATCCCCTCCAT	191/181	55	[23]

1.5 数据分析

利用 Excel 2013、SPSS 16.0 进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 ‘粤禾丝苗’ 的外观品质及加工品质

‘粤禾丝苗’ 的粒型介于小型品种 ‘粤香

占’ 和细长粒型品种 ‘玉针香’ 之间。谷粒长 8.89 mm, 宽 2.53 mm, 长宽比 3.3~3.5(图 1、2)。为了明确 ‘粤禾丝苗’ 的粒型调控因子, 本研究利用已知粒型基因的功能标记进行基因型检测, 结果显示, ‘粤禾丝苗’、‘粤香占’ 和 ‘玉针香’ 均属于 *GS9*、*GW5* 和 *GW8*。对于 *GS3* 基因, ‘粤禾丝苗’

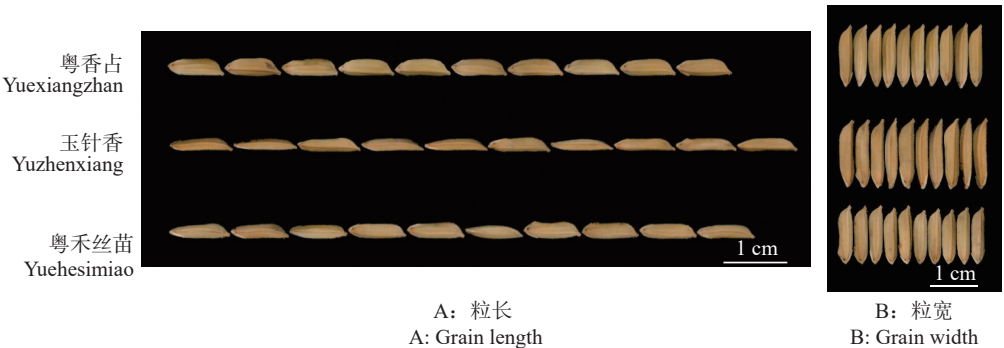
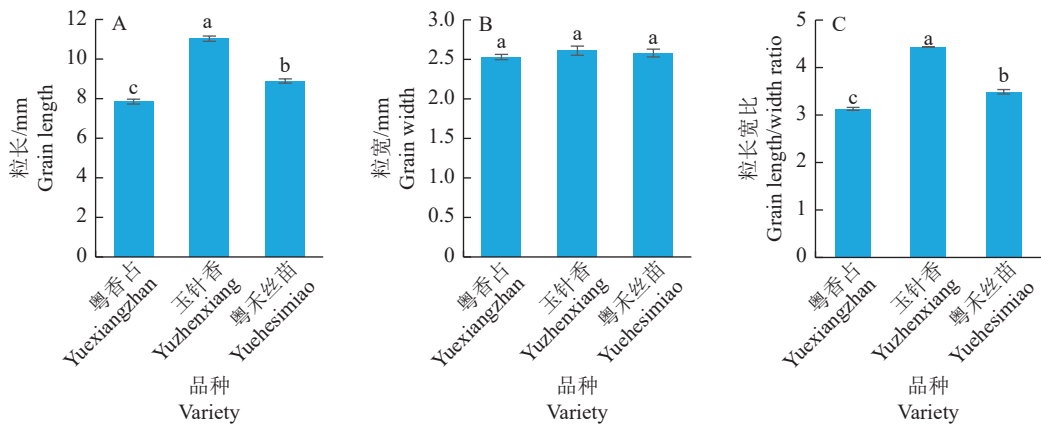


图 1 水稻粒型 (n=10)
Fig. 1 Rice grain shape (n=10)



各小图中，柱子上方的不同小写字母表示品种间差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)。
In each figure, different lowercase letters on the columns indicate significant differences among varieties ($P<0.05$, Duncan's method).

图 2 水稻粒型分析
Fig. 2 Analysis of rice grain shape

与‘玉针香’为 *gs3*, 短粒品种‘粤香占’为 *GS3*。而对于粒长调控基因 *GW7*, ‘粤禾丝苗’和‘粤香占’为 *gw7*, 即粒型相对较短(图 3)。

稻米的碾磨品质与种植季节密切相关。早季‘粤禾丝苗’的糙米率、精米率和整精米率分别为 78.42%、66.56% 和 60.49%, 高于‘粤香占’和‘玉针香’; 晚季‘粤禾丝苗’的碾磨品质明显优于‘粤香占’、‘玉针香’, 糙米率、精米率和整精米率分别为 80.80%、71.58% 和 69.59%(图 4)。

一般来讲, 精米率和垩白粒率受季节影响, 晚季优于早季。‘粤禾丝苗’的垩白粒率和垩白度在早季分别为 23.03% 和 5.45%, 在晚季则分别为 5.28%

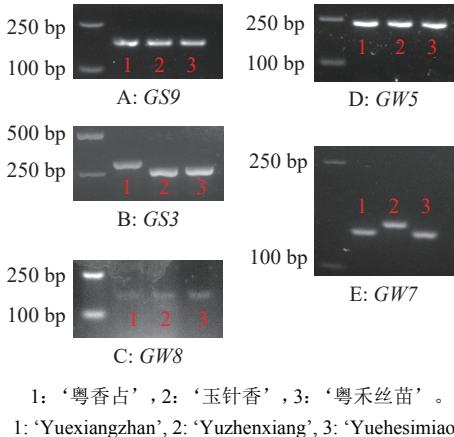
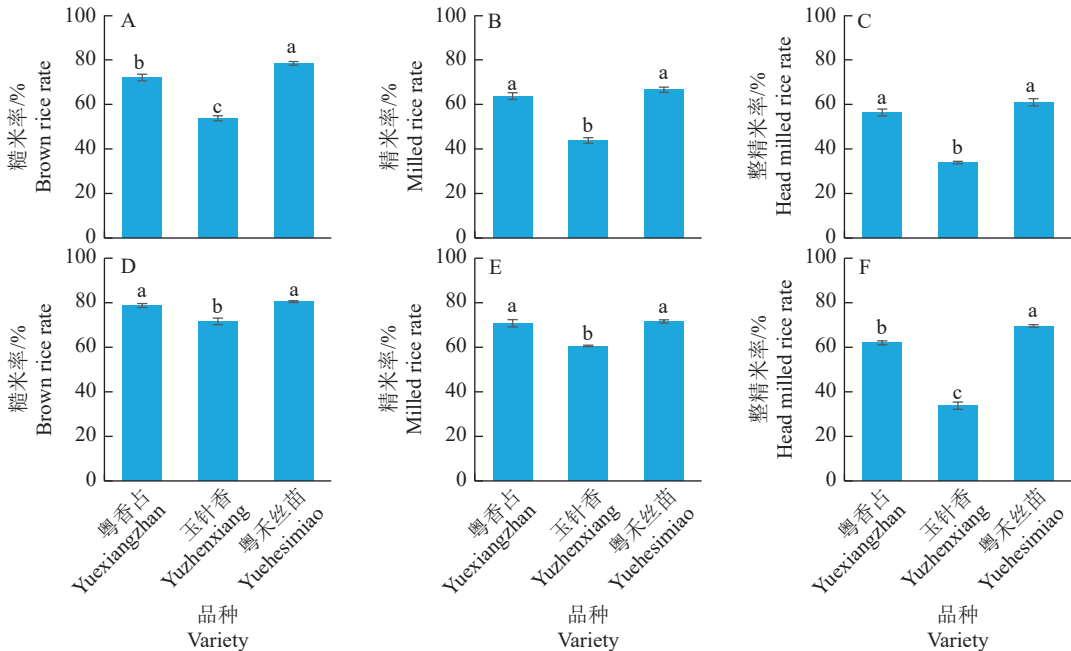


图 3 水稻粒型基因鉴定
Fig. 3 Identification of rice grain shape genes



各小图中，柱子上方的不同小写字母表示品种间差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)。
In each figure, different lowercase letters on the columns indicate significant differences among varieties ($P<0.05$, Duncan's method).

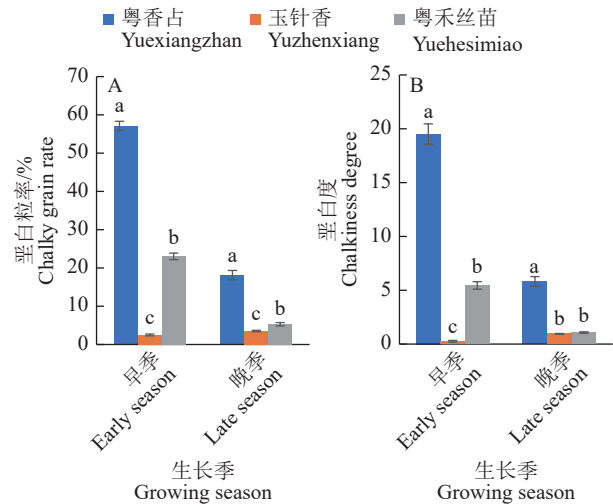
图 4 早 (A-C)、晚 (D-F) 季水稻加工品质
Fig. 4 Rice processing quality in early (A-C) and late (D-F) seasons

和 1.07%; 显著低于 ‘粤香占’, 与 ‘玉针香’ 相当。表明 ‘粤禾丝苗’ 具有优质的稻米品质 (图 5)。

2.2 ‘粤禾丝苗’ 的蒸煮食味品质分析

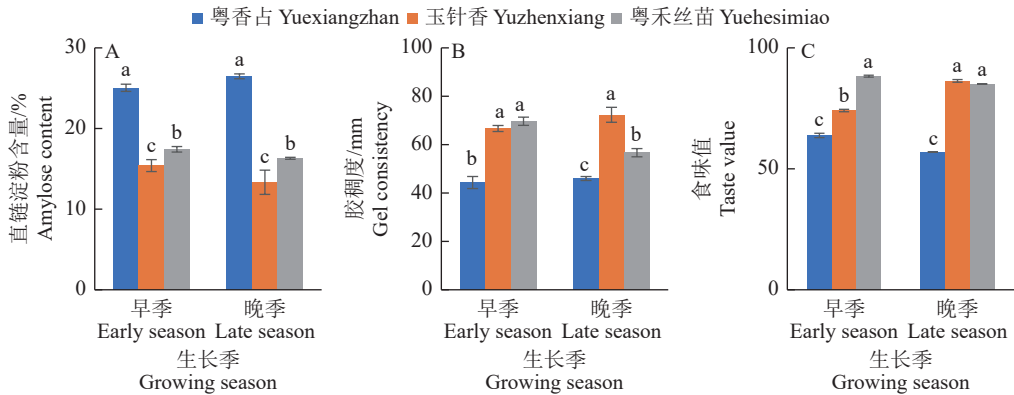
‘粤禾丝苗’ 的直链淀粉含量在早、晚季分别为 16.42%、16.03%, 显著低于 ‘粤香占’ (25.05%、26.47%), 显著高于 ‘玉针香’ (15.40%、13.33%) (图 6A); 胶稠度在早、晚季分别为 70、57 mm, 显著高于 ‘粤香占’ (44、46 mm) (图 6B)。结果表明, ‘粤禾丝苗’ 为低直链淀粉含量和高胶稠度的优质稻品种。‘粤禾丝苗’ 在早、晚季的食味值分别为 88.3 和 85.1, 显著优于 ‘粤香占’ (63.8、57.0); 但与 ‘玉针香’ 相比, 早季显著优于 ‘玉针香’, 晚季与 ‘玉针香’ 相当 (图 6C)。结果表明, ‘粤禾丝苗’ 有较好的蒸煮食味品质。

Wx 是控制直链淀粉合成的主要基因, 因此, 本研究对 ‘粤禾丝苗’ 的 *Wx* 基因型进行鉴定。通过分析发现 ‘粤禾丝苗’ 和 ‘玉针香’ 为 *Wx^b*, ‘粤香占’ 为 *Wx^a* (图 7)。



各小图中, 相同生长季柱子上方的不同小写字母表示品种间差异显著 ($P<0.05$, Duncan’s 法)。
In each figure, different lowercase letters on the columns of the same growing season indicate significant differences among varieties ($P<0.05$, Duncan’s method).

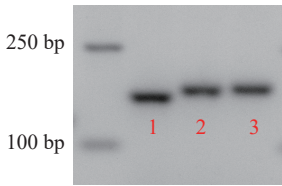
图 5 早、晚季水稻垩白性状
Fig. 5 Chalkiness traits of rice in early and late seasons



各小图中, 相同生长季柱子上方的不同小写字母表示品种间差异显著 ($P<0.05$, Duncan’s 法)。
In each figure, different lowercase letters on the columns of the same growing season indicate significant differences among varieties ($P<0.05$, Duncan’s method).

图 6 早、晚季水稻蒸煮食味品质分析

Fig. 6 Analysis of cooking and eating quality of rice in early and late seasons



1: ‘粤香占’, 2: ‘玉针香’, 3: ‘粤禾丝苗’。
1: ‘Yuexiangzhan’, 2: ‘Yuzhenxiang’, 3: ‘Yuehesimiao’.

图 7 水稻 *Wx* 基因鉴定

Fig. 7 Identification of *Wx* gene in rice

2.3 ‘粤禾丝苗’ 淀粉黏滞性

无论早、晚季, 水稻品种的淀粉黏度均呈现随测试时间增加、减少、增加的趋势 [17-18]。在早季, ‘粤禾丝苗’ 的峰值黏度为 1 413 mPa·S, 低于 ‘粤香占’, 高于 ‘玉针香’; ‘粤禾丝苗’ 的热

浆黏度为 437 mPa·S, 低于 ‘粤香占’ (3 745 mPa·S), 略高于 ‘玉针香’ (252 mPa·S); ‘粤禾丝苗’ 的冷浆黏度为 894 mPa·S, 低于 ‘粤香占’ (5355 mPa·S), 高于 ‘玉针香’ (590 mPa·S) (表 2)。RVA 谱反映水稻的蒸煮食味品质, 优质稻具有高崩解值、低消减值。‘粤禾丝苗’ 在早季的崩解值、消减值和回复值分别为 976、-519 和 457 mPa·S, 在晚季分别为 2 432、-857 和 5 093 mPa·S; 优于 ‘粤香占’, 部分与优质稻 ‘玉针香’ 相当 (表 2)。结果表明, ‘粤禾丝苗’ 表现出优质稻高崩解值、低消减值的特性, 具有良好的蒸煮食味品质。

由表 3 可知, ‘粤禾丝苗’ 早季与晚季 RVA 谱的相关系数为 0.704, ‘粤香占’ 和 ‘玉针

香’分别为 0.891 和 0.668,均已达到显著水平。在早季,‘粤禾丝苗’与‘玉针香’RVA 谱之间的相关系数为 0.967($P<0.01$),而与‘粤香占’之间的相关系数分别为 0.550,未达显著水平。在晚季,‘粤

禾丝苗’和‘玉针香’RVA 谱之间的相关系数达 0.971,远高于和‘粤香占’之间的相关系数(0.882)。结果表明‘粤禾丝苗’的品质接近优质稻‘玉针香’。

表 2 水稻 RVA 谱特征值
Table 2 RVA profile characteristic values of rice

品种 Variety	峰值黏度/ (mPa·s) Peak viscosity		热浆黏度/ (mPa·s) Hot paste viscosity		崩解值/(mPa·s) Breakdown viscosity		冷浆黏度/ (mPa·s) Cool paste viscosity		消减值/(mPa·s) Setback viscosity		峰值时间/min Peak time		回复值/(mPa·s) Consistence viscosity		起浆温度/℃ Paste temperature	
	早季	晚季	早季	晚季	早季	晚季	早季	晚季	早季	晚季	早季	晚季	早季	晚季	早季	晚季
	Early	Late	Early	Late	Early	Late	Early	Late	Early	Late	Early	Late	Early	Late	Early	Late
	season	season	season	season	season	season	season	season	season	season	season	season	season	season	season	season
粤香占	5 123	4 825	3 745	3 121	1 378	1 704	5 355	5 283	232	459	5.97	5.90	5 123	2 163	73.98	69.88
Yuexiangzhan																
玉针香	926	5 240	252	2 146	675	3 094	590	3 268	-337	-1 972	4.33	5.44	338	4 979	75.45	73.13
Yuzhenxiang																
粤禾丝苗	1 413	5 127	437	2 695	976	2 432	894	4 270	-519	-857	4.37	5.73	457	5 093	73.95	69.85
Yuehesimiao																

表 3 水稻 RVA 谱在早、晚季的相关性分析¹⁾
Table 3 Correlation among rice RVA profiles in early and late seasons

生长季 Growing season	品种 Variety	早季 Early season			晚季 Late season		
		粤香占	玉针香	粤禾丝苗	粤香占	玉针香	粤禾丝苗
		Yuexiangzhan	Yuzhenxiang	Yuehesimiao	Yuexiangzhan	Yuzhenxiang	Yuehesimiao
早季	粤香占 Yuexiangzhan	1.000					
Early season	玉针香 Yuzhenxiang	0.411	1.000				
	粤禾丝苗 Yuehesimiao	0.550	0.967**	1.000			
晚季	粤香占 Yuexiangzhan	0.891**	0.504	0.658	1.000		
Late season	玉针香 Yuzhenxiang	0.846**	0.668*	0.784*	0.718*	1.000	
	粤禾丝苗 Yuehesimiao	0.947**	0.572	0.704*	0.882*	0.971*	1.000

1) *和**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平显著相关(Pearson法)。
1) * and ** indicate significant correlations at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels respectively (Pearson method).

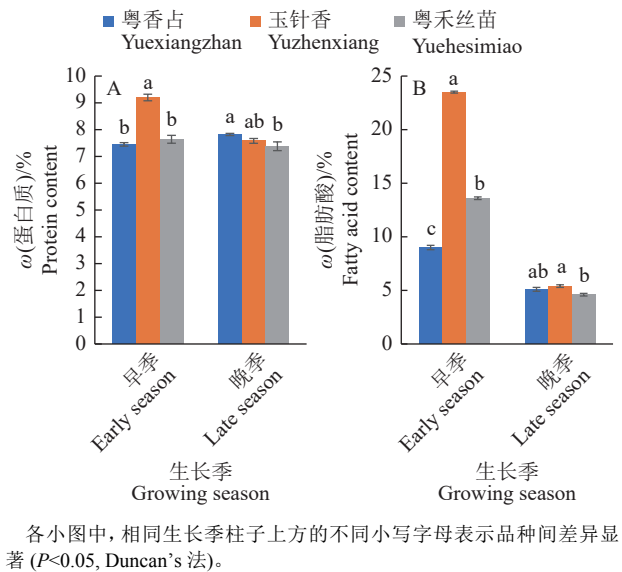
2.4 ‘粤禾丝苗’营养品质

稻米品质性状还包括储藏蛋白、脂肪酸、花青素和矿物质等营养成分的含量^[9, 24]。大米中含有一定比例的蛋白质和脂肪,这关系到米粒的营养、光泽和口感。‘粤禾丝苗’的营养品质分析如图 8 所示。‘粤禾丝苗’在早季的蛋白质含量为 7.64%,显著低于‘玉针香’;晚季为 7.38%,与‘玉针香’的差异缩小(图 8A)。在早季,‘粤禾丝苗’的脂肪酸含量显著高于‘粤香占’,显著低于‘玉针香’,但在晚季品种间差异减小;相比于早季,各品种在晚季的脂肪酸含量下降明显(图 8B)。

2.5 ‘粤禾丝苗’在品质育种中的应用

‘粤禾丝苗’株型紧凑,抗稻瘟病、白叶枯病,抗倒性强,不仅可以作为常规稻和骨干亲本使用,还可以作为两系、三系杂交稻使用。从国家水稻数据中心(<https://www.ricedata.cn/variety/>)可知,以

‘粤禾丝苗’为亲本选育并且通过审定的常规稻品种有 19 个,如‘黄粤莉占’、‘粤珠占’、‘巴禾丝苗’、‘禾油占’、‘粤南丝苗’等,选育杂交稻组合 32 个,如‘爽两优’‘粤禾丝苗’、‘福兴优’‘粤禾丝苗’、‘泰两优’‘粤禾丝苗’、‘台两优’‘粤禾丝苗’、‘沃两优’‘粤禾丝苗’等,其中达到国家标准^[19]或行业标准^[25]优质稻米级别的品种和杂交稻组合有 41 个,作为恢复系培育出的杂交稻的优质率达到 68.75%,作为优质亲本培育出的常规稻的优质率达到 100%。‘粤禾丝苗’作为骨干亲本,其所配的优质杂交稻或常规稻的整精米率达到 52% 以上;胶稠度 53 mm 以上,均为中等或软胶稠度类型;直链淀粉含量 13%~22%;粒长宽比达到 2.9 以上。上述结果充分说明以‘粤禾丝苗’为亲本可以充分改善杂交稻及常规稻的稻米品质。



各小图中, 相同生长季柱子上方的不同小写字母表示品种间差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)。
In each figure, different lowercase letters on the columns of the same growing season indicate significant differences among varieties ($P<0.05$, Duncan's method).

图 8 水稻蛋白质和脂肪酸含量分析
Fig. 8 Analysis of protein and fatty acid contents in rice

3 讨论与结论

3.1 粒型对稻米外观品质的影响

粒型是影响稻米外观品质和产量的重要因素, 受粒型基因的调控^[13-17], *GS3* 和 *GW7* 协同调控粒型^[26]。本研究中, ‘粤禾丝苗’ 粒型相关基因的基因型为 *gs3/gw7*, 小粒型 ‘粤香占’ 和细米粒型 ‘玉针香’ 分别为 *GS3/gw7* 和 *gs3/GW7*。尽管 *GW7* 显著改善水稻外观品质, 但也与水稻产量下降有关。例如, ‘玉针香’ 粒型较为细长, 在加工过程中容易损坏, 导致精米率和整精米率下降。因此在使用 ‘粤禾丝苗’ 改良水稻时, 应综合考虑水稻产量及整精米率。

3.2 淀粉含量对食味品质的影响

直链淀粉是谷物淀粉的重要组成部分。通常, 直链淀粉含量较高不利于提升水稻食味品质^[10]。*Wx* 是控制直链淀粉合成的主要基因^[7], 对于大多数水稻品种来说, *Wx* 基因变异会导致水稻直链淀粉含量变化。本研究揭示了 ‘粤禾丝苗’ 直链淀粉含量较低, 为 *Wx^b* 基因型, 这对于优质水稻的分子育种具有重要意义。

3.3 淀粉 RVA 谱与食味品质

淀粉 RVA 谱与蒸煮食味品质密切相关。RVA 图谱不仅可以反映不同品种间直链淀粉含量差异引起的口感差异, 还可以反映直链淀粉含量相似的水稻品种在口感和适口性方面的差异^[10]。一般情况下, 口感好的水稻品种崩解值较高, 消减值和回复值较低。RVA 曲线也与胶稠度有关。直链淀粉含

量低的水稻品种通常具有较高的胶稠度, 且崩解值较高, 消减值和回复值较低^[9]。在本研究中, ‘粤禾丝苗’ 和 ‘玉针香’ 具有相似的品质, 其 RVA 谱与高直链淀粉含量的水稻品种 ‘粤香占’ 的 RVA 谱有明显差异。RVA 谱分析需要的样本量较少, 并且具有良好的重复性; 因此, 可以有效地应用于育种中早期世代选择。本研究发现不同品种的起浆温度没有明显差异, 但相同品种在不同季节差异明显, 这意味着起浆温度对稻米品质很重要^[27]。尽管 ‘粤禾丝苗’ 和 ‘玉针香’ 的淀粉含量均较低, 但其口感 (如营养物质含量和 RVA 谱) 仍存在明显差异。因此, 构建 ‘粤禾丝苗’ / ‘玉针香’ 重组自交系, 可以进一步揭示食用品质的遗传网络。

3.4 品质性状的改良

产量、品质和抗性协调是育种的重要目标。品质相关基因的克隆和功能研究为稻米品质的改良提供了重要基因资源, 包括 *Wx*、*GW8*、*GL7*、*Chalk5*、*ALK* 等基因。稻米品质是育种的重要目标之一, 属于复合农艺性状, 包括外观品质、碾磨品质、蒸煮食味品质及营养品质。长期以来, 高产不优质、优质不高产及不抗病是水稻育种的一大瓶颈。本研究对优质抗病水稻品种 ‘粤禾丝苗’ 的品质性状进行比较分析, 结果显示, ‘粤禾丝苗’ 整精米率高, 透明度好, 直链淀粉含量低, 胶稠度高。本研究结果也表明粒型基因 *gs3*、*gw7* 在 ‘粤禾丝苗’ 品质形成过程中起重要作用。随着功能基因组学和生物技术的飞速发展, 分子标记辅助育种、分子设计育种和基因编辑育种等手段已应用于品种的定向改良。‘粤禾丝苗’ 作为一个抗病抗倒伏、丰产稳产、稻米综合性状优良的主栽品种, 通过传统育种手段与现代生物技术育种手段相结合, 进一步提升其稻米品质具有重要意义。以 ‘粤禾丝苗’ 为亲本以及恢复系进行品种培育不仅提高了品种的产量、品质和抗性, 还可以提高品种的优质率。

3.5 结论

优质是水稻育种的主要目标之一, 是一个涉及籽粒外观、加工、蒸煮食味和营养品质的综合性状。‘粤禾丝苗’ 具有加工品质、外观品质和蒸煮食味品质优良等特性, RVA 谱表现出高崩解值、低消减值的特性; 粒型和蒸煮食味品质与 *gs3*、*gw7* 和 *Wx^b* 有关; 以其为亲本以及恢复系培育了一系列达到优质标准的常规稻和杂交稻, 对水稻育种以及品种改良具有重要意义。

参考文献:

[1] 方志强, 陆展华, 王石光, 等. 稻米品质性状研究进展与

- 应用[J]. 广东农业科学, 2020, 47(5): 11-20.
- [2] BIRLA D S, MALIK K, SAINGER M, et al. Progress and challenges in improving the nutritional quality of rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2017, 57(11): 2455-2481.
- [3] BUTARDO V M, SREENIVASULU N, JULIANO B O. Improving rice grain quality: State-of-the-art and future prospects[M]//Methods in Molecular Biology. 2019, 1892: 19-55.
- [4] PENG B, KONG H, LI Y, et al. *OsAAP6* functions as an important regulator of grain protein content and nutritional quality in rice[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 4847. doi: 10.1038/ncomms5847.
- [5] FAN C, YU S, WANG C, et al. A causal C-A mutation in the second exon of *GS3* highly associated with rice grain length and validated as a functional marker[J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2009, 118(3): 465-472.
- [6] MAO H L, SUN S Y, YAO J L, et al. Linking differential domain functions of the *GS3* protein to natural variation of grain size in rice[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(45): 19579-19584.
- [7] WANG S, WU K, YUAN Q, et al. Control of grain size, shape and quality by *OsSPL16* in rice[J]. *Nature Genetics*, 2012, 44(8): 950-954.
- [8] WANG Y, XIONG G, HU J, et al. Copy number variation at the *GL7* locus contributes to grain size diversity in rice[J]. *Nature Genetics*, 2015, 47(8): 944-948.
- [9] WANG X, ZHOU W, LU Z, et al. A lipid transfer protein, *OsLTPL36*, is essential for seed development and seed quality in rice[J]. *Plant Science*, 2015, 239: 200-208.
- [10] LI N, XU R, DUAN P, et al. Control of grain size in rice[J]. *Plant Reproduction*, 2018, 31(3): 237-251.
- [11] LI N N, GUO Y B, ZHAO S M, et al. Amylose content and molecular-order stability synergistically affect the digestion rate of indica rice starches[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 144: 373-379.
- [12] 陈刚, 王忠, 刘巧泉, 等. 转反义 *Wx* 基因水稻颖果的发育及物质积累[J]. *中国水稻科学*, 2006, 20(3): 277-282.
- [13] ZHOU H, WANG L, LIU G, et al. Critical roles of soluble starch synthase *SSIIIa* and granule-bound starch synthase *Waxy* in synthesizing resistant starch in rice[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(45): 12844-12849.
- [14] SU Y, RAO Y C, HU S K, et al. Map-based cloning proves *qGC-6*, a major QTL for gel consistency of japonica/indica cross, responds by *Waxy* in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2011, 123(5): 859-867.
- [15] NAKAMURA S, KATSURA J, KATO K, et al. Development of formulae for estimating amylose content and resistant starch content based on the pasting properties measured by RVA of *Japonica* polished rice and starch[J]. *Bioscience Biotechnology and Biochemistry*, 2016, 80(2): 329-340.
- [16] TONG C, CHEN Y L, TANG F F, et al. Genetic diversity of amylose content and RVA pasting parameters in 20 rice accessions grown in Hainan, China[J]. *Food Chemistry*, 2014, 161: 239-245.
- [17] YAN C J, TIAN Z X, FANG Y W, et al. Genetic analysis of starch paste viscosity parameters in glutinous rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2011, 122(1): 63-76.
- [18] HORI K, SUZUKI K, IJIMA K, et al. Variation in cooking and eating quality traits in Japanese rice germplasm accessions[J]. *Breeding Science*, 2016, 66(2): 309-318.
- [19] 全国粮油标准化技术委员会. 大米: GB/T 1354—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [20] LU Z, FANG Z, LIU W, et al. Grain quality characteristics analysis and application on breeding of Yuenong-simiao, a high-yielding and disease-resistant rice variety [J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 6335. doi: 10.1038/s41598-022-21030-9.
- [21] 李治华, 曾礼华, 高方远, 等. 水稻 *Wx* 基因微卫星标记的开发与利用[J]. *西南农业学报*, 2009, 22(2): 231-235.
- [22] 张晨. 水稻 *GS9* 基因与其它粒形基因遗传互作及育种应用研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2018.
- [23] 刘李鑫哲, 何宇涵, 炎会敏, 等. 水稻粒宽基因 *GW5* 和 *GW8* 功能标记的开发与多重 PCR 检测[J]. *分子植物育种*, 2019, 17(13): 4280-4288.
- [24] DYER J M, MULLEN R T. Engineering plant oils as high-value industrial feedstocks for biorefining: The need for underpinning cell biology research[J]. *Physiologia Plantarum*, 2008, 132(1): 11-22.
- [25] 农业农村部种植业管理司. 食用稻品种品质: NY/T 593—2021[S]. 北京: 中国农业出版社, 2021.
- [26] FAN C C, XING Y Z, MAO H L, et al. *GS3*, a major QTL for grain length and weight and minor QTL for grain width and thickness in rice, encodes a putative transmembrane protein[J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2006, 112(6): 1164-1171.
- [27] CHUN A, LEE H J, HAMAKER B R, et al. Effects of ripening temperature on starch structure and gelatinization, pasting, and cooking properties in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2015, 63(12): 3085-3093.

【责任编辑 李庆玲】