不同品种大米理化性质及其淀粉结构对米饭食用品质的影响

薛　薇[1]，　张聪男[2]，　王　莉[*1]，　陈正行[1]

（1. 江南大学 食品学院，江苏 无锡 214122；2. 江苏省农垦农业发展股份有限公司，江苏 南京 210019）

摘要：米饭食味值和质构特性是评价大米食用品质的重要指标，为了探究不同品种大米的食味值、质构特性与其理化性质及淀粉结构的关系，以12种大米为研究样本，测定其食味值、质构特性、理化性质及淀粉结构特性，并分析内在相关性。结果表明，直链淀粉含量（质量分数）与米饭的硬度呈极显著正相关（$P<0.01$），与米饭的凝聚性呈极显著负相关（$P<0.01$）；米饭食味值、质构特性与大米淀粉的糊化特性、热特性之间存在显著相关性，与结晶特性、淀粉颗粒表面有序度无显著相关性，表明淀粉的糊化特性决定了米饭的食味值、硬度、凝聚性和回复性。该研究可为后期优质稻米筛选培育以及大米适宜性加工提供理论基础。

关键词：大米；理化特性；食用品质；淀粉结构

中图分类号：TS 213.3　**文章编号：**1673-1689(2022)09-0037-09　**DOI：**10.3969/j.issn. 1673-1689.2022.09.005

Effects of Physicochemical Properties and Starch Structure of Different Rice Varieties on Rice Eating Quality

XUE Wei[1]，　*ZHANG Congnan*[2]，　*WANG Li*[*1]，　*CHEN Zhengxing*[1]

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Jiangsu Provincial Agricultural Reclamation and Development Co., Ltd., Nanjing 210019, China)

Abstract: Taste value and textural properties are important indicators to evaluate the edible qualities of cooked rice. This research aimed to explore the relationship between the taste value, texture characteristics and physicochemical properties of different rice varieties with the starch structure. Twelve rice varieties were selected to determine their taste values, textural properties, physicochemical properties and starch structural properties, and their internal correlation was analyzed. These results presented that amylose content (mass fraction) positively correlated with hardness of cooked rice ($P<0.01$), while had highly significant negative correlation with cohesiveness of cooked rice ($P<0.01$). There was a significant correlation among the taste value, textural properties, gelatinization and thermal properties of rice starch, while there was insignificant correlation with the crystallization properties and the surface order degree of rice starch granule. These results indicated that the taste value, hardness, cohesiveness and resilience of cooked rice were determined by the gelatinization properties of rice starch. This research could provide a theoretical basis for the high-quality rice cultivation and suitable processing of rice.

Keywords: rice, textural properties, edible qualities, starch structure

收稿日期：2021-03-16

基金项目：江苏水稻绿色生产及精深加工技术集成创新与示范应用项目（BE2019395）。

*** 通信作者：**王　莉（1981—），女，博士，教授，博士研究生导师，主要从事大米资源综合利用研究。E-mail：wangli0318@jiangnan.edu.cn

我国大米资源丰富、品种众多[1],是人们的日常主食之一。水稻种植适宜性强,具有稳产、高产、经济效益高的特点,在粮食产业中占据重要地位[2]。随着人民生活水平的提高,消费者的需求从“吃饱”向“吃好”转变,对大米的外观、口感、滋味、硬度、黏度、弹性等食用品质的要求越来越高,消费者期望购买到适口性佳、香味纯正、滋味回甘、低垩白、冷后不易回生等食用品质佳的大米。质构特性和食味品质是米饭食用品质的重要评价指标,采用质构仪和米饭食味计可以快速、准确地评价米饭的食用品质[3-4]。

大米由淀粉、蛋白质和脂肪等组成,这些组分对大米品质起着关键作用[5]。其中,淀粉作为大米的重要组分,是决定大米食用品质的重要因素。大米淀粉由线性的直链淀粉和多分支的支链淀粉组成[6]。通常认为,直链淀粉含量过高的米饭硬度大、黏度小、蓬松干燥无光泽,综合评分较低;直链淀粉含量过低的米饭质地软而黏,弹性差[7];直链淀粉含量适中的米饭软而不黏,口感较好。然而这一结论并不具有普适性,比如也有直链淀粉含量相近但食用品质相差甚远的大米。目前,多数研究集中在直链淀粉含量对大米食用品质的影响上,淀粉结晶特性、热特性、糊化特性等结构特性对其食用品质的影响鲜少报道。因此,作者以 12 种不同品种的大米为研究对象,将大米淀粉提取分离,采用相关性分析法比较不同品种大米淀粉的糊化特性、热特性、结晶特性和表面有序度与米饭食用品质的关系,阐释淀粉结构对米饭食用品质的影响机制,为大米适宜性加工和优质稻的育种提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料

泰国茉莉香米(籼米)和禾银丝苗(籼米):购自深圳泰香米业有限公司;越光:购自日本当地超市;稻花香 2 号:购自浙江正方米业有限公司;苏香粳 100 号、南粳 9108、南粳 46、淮稻 5 号、华粳 5 号、武育糯 481(糯米)、嘉优中科 1 号(籼米)、Ⅱ优 118 籼米(籼米):购自江苏农垦有限责任公司。未特别说明的品种均为粳米。

1.2 仪器与设备

RVA4500 型快速黏度分析仪:澳大利亚波通公司产品;DSC3 型差示扫描量热仪: 瑞士梅特勒-托利多公司产品;D2 PHASER 型 X 射线衍射仪:德国布鲁克 AXS 公司产品;IS10 型傅里叶红外光谱仪:美国 Nicolet 公司产品;TA.XTPlus 型物性分析仪:英国 SMS 公司产品。

1.3 实验方法

1.3.1 大米基本成分的测定 将大米用粉碎机粉碎(100 目筛),蛋白质、脂肪、总淀粉和直链淀粉含量的测定分别参照 GB5009.5—2010、GB5009.6—2016、GB5009.9—2008、GB/T15683—2008。

1.3.2 米饭食味值的测定 称取大米 30 g 放入不锈钢杯中,用蒸馏水淘洗 3 次,加入蒸馏水 42 g 浸泡 30 min, 浸泡结束后放入电蒸锅中蒸煮 30 min,保温 10 min,将保温好的米饭搅拌均匀,在室温下冷却 120 min,使用米饭食味计测定米饭食味值。称取米饭 8.0 g,放入半径 15 mm、高度 9 mm 的不锈钢环中,使用压片机将不锈钢环分别正压和反压 15 s,将得到的米饼放入米饭食味计中,测定米饭食味值。

1.3.3 米饭质构的测定 米饭的质构分析选用 TPA 模式,采用 P/35 探头。将测定完米饭食味值的米饼平放在测试台进行测试。测试参数设置:压缩比 50%,测定高度 1.5 cm,测前速度 1.0 mm/s,测试速度 1.0 mm/s,测后速度 1.0 mm/s,触发力 5 g。

1.3.4 大米淀粉的提取 大米淀粉的提取方法参照文献[8]并适当修改。称取大米粉 50 g,加质量分数 0.2% NaOH 溶液 400 mL, 在 25 ℃下磁力搅拌 30 min 后,室温下放置 12 h,每 4 h 更换一次 NaOH 溶液;使用 200 目筛网将淀粉悬浮液过滤,淀粉层用蒸馏水洗涤,在 4 000 *g* 下离心 10 min,除去上清液、上层黄色蛋白质和杂质层,将淀粉层再次用蒸馏水洗涤,直到完全除去黄色层;最后,将白色淀粉沉淀物重悬于 250 mL 蒸馏水中, 通过加入盐酸溶液中和至 pH 7.0,然后在 4 000 *g* 下离心 10 min;多次用蒸馏水洗涤沉淀物。将提取的大米淀粉进行冷冻干燥,粉碎过 100 目筛,即得大米淀粉。采用总淀粉试剂盒测定大米淀粉中的总淀粉,所有样品中总淀粉质量分数均高于 98.5%(以干质量计)。

1.3.5 糊化性质的测定 大米淀粉的黏度曲线测定参照 GB/T 24852—2010。

1.3.6 结晶性质的测定 通过 X-射线衍射仪获得大米淀粉的晶体结构和相对结晶度,扫描角度为2°~40°,目标电压 40 kV,电流 30 mA,扫描速度 2°/min,步

长 0.02°。测量前，将淀粉样品用饱和 NaCl 溶液在室温下恒湿一周。利用 JADE 6.5 软件计算大米淀粉的相对结晶度。

1.3.7　热性质的测定　通过差示扫描量热法测定大米淀粉的热性质。精确称量 3 mg(干质量)淀粉样品于坩埚里，加入 6.0 μL 蒸馏水。以空坩埚为参照，在室温下平衡 12 h 后进行测试。扫描温度为 25~100 ℃，扫描速率 10 ℃/min，氮气流量 50 mL/min。

1.3.8　表面有序度的测定　通过傅里叶红外光谱仪测定大米淀粉颗粒表面有序结构。将大米淀粉和 KBr 按照质量比 1:150 置于研钵中混合均匀，并用模具将细粉压制成 2 mm 透明压片进行扫描。扫描次数为 32 次，扫描波数为 4 000~400 cm^{-1}，分辨率为 4 cm^{-1}。使用 OMNIC 8.2 处理数据，通过基线自动校正分析 1 200~800 cm^{-1} 处的光谱并进行去卷积处理，半峰宽和增强因子分别设置为 19 cm^{-1} 和 1.9。

1.3.9　数据分析　所有实验均重复进行 3 次，以平均值±标准差表示。采用 SPSS 19.0 统计软件进行相关性分析和显著性分析，显著性分析采用 Ducan 多重检验。采用 Origin 9.0 绘图。

2 结果与分析

2.1　不同品种大米的理化特性、食味品质与质构特性分析

2.1.1　理化特性　从表 1 可知，12 种大米的直链淀粉和蛋白质质量分数存在显著差异(P<0.05)，大米直链淀粉主要受遗传因素和外部环境条件的影响[9]。直链淀粉质量分数为 0~21.16%，其中，武育糯 481 直链淀粉为 0，表明该淀粉仅由支链淀粉组成；江苏推广的软米品种如苏香粳 100 号、南粳 9108 和南粳 46 的直链淀粉质量分数为 8.78%~9.68%，低直链淀粉质量分数使得软米米饭软而不烂、弹性好、冷饭质地佳、回生程度小[10]，深受我国南方地域消费者的喜爱。12 种大米蛋白质质量分数为 5.33%~9.18%，武育糯 481 蛋白质质量分数最高，泰国茉莉香米的蛋白质质量分数最低。蛋白质质量分数受地域影响较大，南方地域大米的蛋白质质量分数显著高于北方地域(P<0.01)，高温条件会有利于蛋白质的累积[11]。泰国茉莉香米脂肪质量分数最高，表明该米食用品质较佳[12]。

表 1　大米的理化性质

Table 1　Physicochemical properties of rice

品种	质量分数/%				
	水分	直链淀粉	蛋白质	脂肪	总淀粉
武育糯 481	15.05±0.06^{c}	—	9.18±0.47^{a}	0.75±0.10^{e}	80.11±0.91^{i}
苏香粳 100 号	14.25±0.21^{d}	8.78±0.16^{j}	7.62±0.10^{g}	0.34±0.08^{fg}	81.55±1.30^{h}
南粳 9108	12.69±0.05^{h}	9.08±0.08^{i}	7.91±0.30^{e}	0.40±0.05^{e}	80.50±0.98^{i}
南粳 46	15.26±0.08^{b}	9.68±0.14^{h}	7.34±0.11^{h}	0.17±0.00^{j}	85.29±0.79^{c}
泰国茉莉香米	12.66±0.12^{i}	13.72±0.67^{f}	5.33±0.18^{j}	0.89±0.09^{a}	75.40±1.68^{j}
禾银丝苗	12.94±0.10^{g}	12.88±0.12^{g}	6.38±0.01^{h}	0.32±0.01^{g}	82.67±0.60^{f}
越光	13.47±0.23^{f}	14.21±0.22^{e}	5.57±0.25^{i}	0.81±0.06^{bc}	84.95±0.85^{cd}
淮稻 5 号	15.23±0.11^{b}	14.45±0.35^{e}	7.32±0.29^{e}	0.29±0.01^{h}	84.53±0.94^{cd}
华粳 5 号	14.20±0.32^{d}	14.92±0.33^{d}	8.14±0.27^{b}	0.84±0.13^{b}	81.71±1.02^{g}
嘉优中科 1 号	15.72±0.25^{a}	16.88±0.28^{c}	7.08±0.02^{f}	0.45±0.03^{cd}	89.85±1.10^{a}
稻花香 2 号	14.04±0.17^{e}	18.67±0.45^{b}	7.34±0.29^{e}	0.35±0.00^{f}	86.45±0.46^{b}
Ⅱ优 118	15.04±0.26^{c}	21.16±0.39^{a}	7.85±0.08^{d}	0.23±0.01^{i}	83.13±0.62^{e}

注：同一列中不同字母表示存在显著差异(P<0.05)。

2.1.2　食味品质　感官评价的主观性强，不同地域人群对米饭有不同的偏好度，而使用食味计测定米饭食味值周期较短、流程简单、重复性好，能够快速、准确评价大米的食用品质[13]。此外，有研究报道感官评定总分与食味计总分呈显著正相关[15]。由表 2 可知，II 优 118 的食味值最低，其次是武育糯 481 和华粳 5 号；而南粳系列软米的食味值普遍较高，仅次于越光、禾银丝苗和泰国茉莉香米。综上，泰国茉莉香米、禾银丝苗、越光、苏香粳 100 号、南粳 9108 和南粳 46 具有较高的食味值。

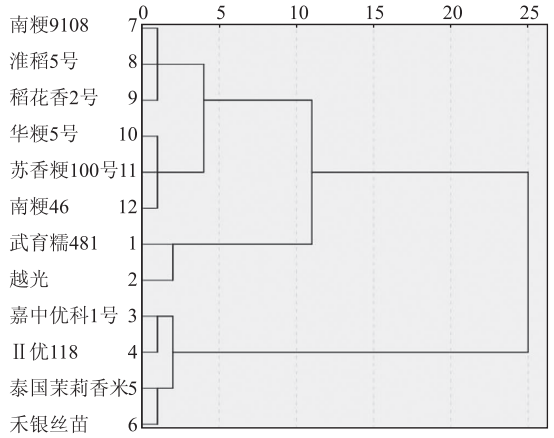
表 2 大米的食味品质与质构特性

Table 2 Taste value and textural properties of cooked rice

品种	米饭食味值/分	硬度/g	黏度/(g/s)	弹性	凝聚性	胶着性	回复性
武育糯 481	70.1^{g}	1 786.69±14.60^{j}	−809.14±20.75^{e}	0.76±0.03^{abcd}	0.42±0.01^{a}	781.30±12.42^{h}	0.12±0.01^{cd}
苏香粳 100 号	82.6^{d}	2 363.10±48.82^{h}	−755.84±24.42^{f}	0.75±0.08^{bcd}	0.39±0.01^{bcd}	916.96±32.02^{f}	0.13±0.02^{bcd}
南粳 9108	83.1^{c}	2 801.36±7.23^{e}	−873.48±0.52^{c}	0.76±0.02^{abcd}	0.37±0.02^{cd}	1 027.84±19.56^{d}	0.12±0.00^{cd}
南粳 46	83.6^{c}	2 594.15±26.15^{g}	−870.92±17.12^{c}	0.72±0.00^{cd}	0.37±0.01^{cd}	950.37±9.60^{e}	0.12±0.01^{cd}
泰国茉莉香米	85.8^{b}	3 359.16±39.84^{c}	−850.24±17.71^{cd}	0.79±0.03^{ab}	0.43±0.01^{a}	1 458.78±23.39^{a}	0.19±0.01^{a}
禾银丝苗	86.5^{b}	3 219.01±39.33^{d}	−1 066.57±17.81^{b}	0.60±0.04^{e}	0.41±0.04^{ab}	1 302.53±28.16^{b}	0.11±0.01^{cde}
越光	88.7^{a}	2 090.62±48.32^{i}	−842.98±35.27^{d}	0.75±0.01^{bcd}	0.41±0.02^{ab}	858.53±12.74^{g}	0.14±0.01^{bcd}
淮稻 5 号	72.5^{f}	2 789.88±45.36^{e}	−579.19±24.78^{h}	0.73±0.01^{bcd}	0.32±0.01^{d}	901.86±17.71^{f}	0.15±0.00^{b}
华粳 5 号	70.5^{g}	2 349.15±6.70^{h}	−512.04±21.64^{i}	0.71±0.02^{d}	0.30±0.01^{e}	709.61±10.58^{ij}	0.14±0.00^{bcd}
嘉优中科 1 号	73.1^{f}	3 738.45±28.47^{a}	−1 463.60±36.97^{a}	0.82±0.01^{a}	0.28±0.00^{f}	1 034.30±14.90^{d}	0.08±0.00^{de}
稻花香 2 号	79.5^{e}	2 655.61±55.18^{f}	−582.67±27.52^{h}	0.77±0.01^{abcd}	0.40±0.00^{abc}	1 074.15±25.00^{c}	0.18±0.00^{a}
Ⅱ优 118	64.8^{h}	3 454.63±40.82^{b}	−1 417.87±8.25^{g}	0.78±0.01^{abc}	0.20±0.01^{g}	689.59±6.68^{ij}	0.07±0.00^{de}

注:同一列中不同字母表示存在显著差异(P<0.05)。

2.1.3 质构特性 质构是一种多参数感官特性,硬度是米饭最常用的感官参数[14]。从表 2 可知,不同品种的米饭在硬度、黏度、胶着性方面差异较大,在弹性、凝聚性和回复性方面差异较小。嘉优中科 1 号的硬度、弹性均最高,分别为 3 748.45 g、0.82。泰国茉莉香米的凝聚性、胶着性和回复性最高,分别为 0.43、1 458.78、0.19。不同品种大米之间质构参数差异较大,表明不同地域和不同基因型的大米制备的米饭间差异显著。综合比较,嘉优中科 1 号和Ⅱ优 118 的硬度、弹性较高,黏度、凝聚性和回复性较小,过高的硬度和过低的黏度导致其米饭质地较差,食味值较低。南粳 46 和南粳 9108 表现出与越光相似的质构特性,因为二者的父本都为关东 194,是日本选育的粳型常规水稻。二者食味值稍低于越光,硬度高于越光,黏度与越光接近,均表现出合适的硬度与黏度,同时也具有较高的食味值。将不同品种米饭的硬度进行聚类分析,结果见图 1。聚类距离为 5~10 时,根据米饭硬度分为 2 个亚类,武育糯 481、苏香粳 100 号、南粳 9108、南粳 46、越光、淮稻 5 号、华粳 5 号、稻花香 2 号为一类,泰国茉莉香米、禾银丝苗、嘉优中科 1 号、Ⅱ优 118 为另一类,说明米饭硬度的差异性归因于品种差异。在同一亚类中,稻米类型对米饭硬度有着相似的影响。



使用平均联接（组间）的谱系图重新标度的距离聚类组合。

图 1 米饭硬度聚类分析图

Fig. 1 Cluster analysis chart for the hardness of cooked rice

2.1.4 大米的理化特性、食味品质与质构特性相关性分析 从表 3 可知,米饭食味值与蛋白质质量分数呈极显著负相关(P<0.01)。当蛋白质质量分数高于 9%时,米饭松散、颜色暗、感官评分低[19]。然而,米饭食味值与直链淀粉质量分数无显著相关性,这可能是因为选取的 12 种原料中包括一些特殊培育的品种,如南粳系列、泰国茉莉香米、禾银丝苗,均是经过改良培育的低直链淀粉质量分数优质大米品种,这与前人的研究结果基本一致[15-16]。对于苏香粳 100、南粳 9108、南粳 46 而言,食味值随着直链淀粉质量分数的增加而增加。直链淀粉质量分数与米饭

硬度呈极显著正相关，与米饭凝聚性呈极显著负相关（$P<0.01$），直链淀粉质量分数越高，蒸煮时加水量越多，米饭越松散，不易成型，冷后易老化，硬度增大，凝聚性减小。蛋白质质量分数与米饭的胶着性呈极显著负相关（$P<0.01$），蛋白质质量分数升高，米粒的吸水性降低，米饭的硬度升高，破碎米饭所需要的能量越大。因此，不能仅仅通过直链淀粉质量分数判断大米食用品质的优劣，还需研究淀粉结构与米饭食味值和质构特性的关系。

表 3　大米理化特性、食味品质与质构特性的相关性分析

Table 3　Correlation analysis between the physicochemical properties, taste value and textural properties of rice

指标	硬度	黏度	弹性	凝聚性	胶着性	回复性	蛋白质	脂肪	直链淀粉	食味值
硬度	1									
黏度	−0.464*	1								
弹性	0.122	−0.084	1							
凝聚性	−0.493*	−0.034	−0.202	1						
胶着性	0.470*	−0.409*	−0.147	0.522**	1					
回复性	−0.309	0.447*	0.002	0.650**	0.426*	1				
蛋白质	−0.276	0.267	0.069	−0.305	−0.609**	−0.311	1			
脂肪	−0.460*	0.049	0.161	0.425*	−0.050	0.287	0.178	1		
直链淀粉	0.580**	0.092	0.065	−0.641**	−0.052	−0.112	−0.205	−0.497*	1	
食味值	−0.097	−0.254	−0.217	0.690**	0.635**	0.426*	−0.768**	−0.067	−0.210	1

注：* 代表显著相关（$P<0.05$）；** 代表极显著相关（$P<0.01$）。

2.2　不同品种的大米淀粉结构特性

2.2.1　糊化特性　不同品种大米的糊化参数见表 4。大米淀粉的糊化特性与品种、直链淀粉质量分数、支链淀粉的链长分布和结晶度等因素相关[17]。不同品种大米淀粉糊化参数之间存在显著差异。结果显示，苏香粳 100 峰值黏度最高（3 962.5 mPa·s），禾银丝苗崩解值最高（2 554.0 mPa·s），Ⅱ优 118 终值黏度最高（3 591.0 mPa·s），华粳 5 号回生值最高（1 468.0 mPa·s），Ⅱ优 118 糊化温度最高（79.17 ℃）。一般来说，峰值黏度的高低与淀粉颗粒的膨胀能力有关，体现了淀粉颗粒的膨胀程度和结合水的能力，并与体系最终质量有关。南粳 9108、南粳46 和苏香粳 100 号的峰值黏度均高于 3 600 mPa·s，表明此 3 种大米淀粉糊黏性较强。崩解值反映了淀粉糊抗热和抗剪切能力，崩解值越大，淀粉糊体系稳定性越差，体系抗热和抗剪切能力越弱。苏香粳 100 号、南粳 9108、南粳 46、泰国茉莉香米、禾银丝苗和越光大米淀粉的热稳定性差。回生值体现淀粉短期老化的差异，回生值越大，淀粉糊冷却后稳定性越差，凝胶能力越强，容易发生短期老化。武育糯 481 淀粉回生值较低，冷却后不易短期老化，仍能保持较好的品质；而华粳 5 号和Ⅱ优 118 的回生值最大，最易老化，老化后硬度快速增加，大米品质较差。与嘉优中科 1 号、Ⅱ优 118 相比，苏香粳 100、南粳 9108、南粳 46、泰国茉莉香米、禾银丝苗和越光大米淀粉的糊化温度较低，这类米制品在蒸煮时需严格控制加水量。

2.2.2　热特性、结晶特性和有序度　淀粉主要以颗粒的形式存在，淀粉颗粒由无定形区和半结晶生长环组成，结晶结构和非结晶结构可以采用 XRD 图谱表征，结晶区呈现尖峰特征，非结晶区呈现弥散特征[18]。从图 2(a)可知，大米淀粉表现了典型的 A 型衍射图谱，衍射峰主要集中在15°~23°，在 15°、17°、18°和 23°处有高强度的衍射峰，其中 17°和 18°处是双峰且衍射强度最强[19-20]。虽然不同品种的大米淀粉在图谱上出峰位置大致相同，但相对结晶度具有显著差异。12 种大米淀粉的相对结晶度为 22.05%~31.15%（见表 5），其中，武育糯 481 的相对结晶度最高，其次是苏香粳 100 号、南粳 9108、南粳 46，稻花香 2 号淀粉的相对结晶度最低。软米的直链淀粉质量分数相对较低，可以推测大米淀粉的相对结晶度与直链淀粉质量分数有一定关系[21]。支链淀粉的外链可以形成双螺旋结构，从而相互结合形成晶体结构域，在支链淀粉质量分数高的淀粉中，结晶度的高低与支链淀粉外链间的双螺旋结构紧密相关[22]。除此之外，相对结晶度也与糊化温度、支

表 4 不同品种大米淀粉糊化过程中的特征值

Table 4 Characteristic values of rice starch from different varieties during gelatinization

品种	峰值黏度/(mPa·s)	谷值黏度/(mPa·s)	崩解值/(mPa·s)	终值黏度/(mPa·s)	回生值/(mPa·s)	糊化温度/℃
武育糯 481	2 185.00±9.70^{i}	1 054.50±8.51^{i}	1 130.50±9.19^{g}	1 433.50±4.55^{j}	379.00±6.04^{i}	68.60±0.07^{a}
苏香粳 100	3 962.50±12.02^{a}	1 697.50±4.95^{de}	2 265.00±6.97^{b}	2 424.00±4.24^{g}	726.50±9.19^{h}	69.85±0.64^{ef}
南粳 9108	3 614.50±14.85^{c}	1 543.50±3.44^{f}	2 071.00±1.41^{cd}	2 361.50±4.75^{h}	818.00±11.31^{g}	70.20±0.14^{e}
南粳 46	3 741.50±24.45^{b}	2 006.00±6.87^{b}	1 735.50±7.58^{e}	2 818.50±16.16^{e}	812.50±0.71^{g}	70.22±0.04^{e}
泰国茉莉香米	3 729.00±22.63^{b}	1 625.00±7.38^{e}	2 104.00±8.75^{c}	2 692.00±17.38^{g}	1 067.00±0.00^{f}	74.25±0.04^{cd}
禾银丝苗	3 777.00±5.66^{b}	1 223.00±6.81^{h}	2 554.00±6.47^{a}	2 265.50±8.69^{i}	1 042.50±2.12^{f}	74.70±0.57^{cd}
越光	3 426.50±28.99^{d}	1 485.00±11.31^{g}	1 941.50±7.68^{d}	2 659.50±5.45^{g}	1 174.50±7.13^{e}	73.90±0.49^{cd}
淮稻 5 号	2 863.50±8.79^{g}	1 565.00±4.73^{f}	1 298.50±6.52^{f}	2 819.50±11.92^{e}	1 254.50±4.65^{d}	72.60±0.00^{d}
华粳 5 号	2 733.50±10.53^{h}	1 777.00±5.46^{c}	975.00±7.78^{h}	3 245.00±13.64^{c}	1 468.00±8.18^{a}	72.22±0.60^{de}
嘉优中科 1 号	2 933.00±8.38^{f}	1 721.50±6.26^{d}	1 211.50±2.12^{fg}	2 901.50±8.56^{d}	1 180.00±9.30^{e}	78.25±0.00^{b}
稻花香 2 号	2 759.50±12.02^{h}	2 139.50±6.96^{ab}	620.00±5.94^{i}	3 438.50±7.78^{b}	1 299.00±5.74^{c}	71.77±0.17^{de}
Ⅱ优 118	3 131.50±10.61^{e}	2 190.50±12.33^{a}	941.00±9.73^{h}	3 591.00±13.11^{a}	1 400.50±7.78^{b}	79.17±0.04^{a}

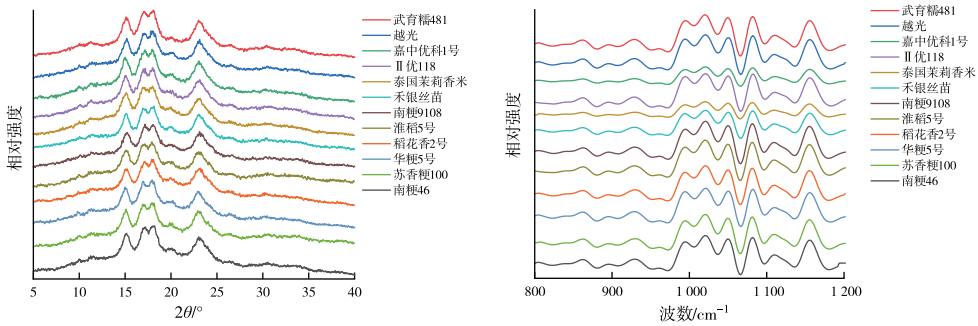
注:同一列中不同字母表示存在显著差异(P<0.05)。

链淀粉链长分布关系密切[23]。

将 FTIR 技术和波谱去卷积处理方法联合运用可研究淀粉粒外部区域的结构，虽然 FTIR 光谱无法区分淀粉晶体类型,但是相同晶体类型具有相似的红外光谱。1 047 cm^{-1}/1 022 cm^{-1} 表示淀粉结晶区与非结晶区的比值,可以反映淀粉粒的有序度[24]。图 2(b)显示 12 种大米淀粉在去卷积处理后的谱图相同,说明 12 种淀粉的晶型相似,与 XRD 结果一致。但是颗粒表面有序度(1 047 cm^{-1}/1 022 cm^{-1})结果差异显著,从表 5 可知,南粳 9108、南粳 46 和淮稻 5 号的淀粉颗粒表面有序度均低于0.850,而禾银丝苗、越光和Ⅱ优 118 淀粉颗粒表面有序度均高于 0.900,这可能是直链淀粉质量分数与支链淀粉的精细化结构有关[25]。

大米淀粉的热特性可能受大米的生长环境和基因型的影响。根据糊化温度可以将淀粉分为以下 3 类:低糊化温度淀粉、中等糊化温度淀粉和高糊化温度淀粉，分别对应 66.6~70.5 ℃、73.5~77.6 ℃、79.7~82.5 ℃。从表 5 可知,12 种大米淀粉的糊化起始温度、峰值温度和终值温度差异显著,糊化起始温度为 55.10~66.54 ℃,峰值温度为 61.75~72.53 ℃,终值温度为 69.75~81.80 ℃。其中,南粳 46 和稻花香 2 号具有较低的糊化起始温度和峰值温度,嘉优中科 1 号和Ⅱ优 118 具有较高的糊化起始温度、峰值温度和终值温度。随着直链淀粉质量分数的增加,淀粉的糊化温度也逐渐增加,与前人的研究结果相一致[26-27]。热焓值反映了淀粉在糊化过程中所需要吸收的能量。热焓值为 8.44~11.83 J/g,其中,淮稻 5 号淀粉的热焓值最低,武育糯 481 淀粉的热焓值最高,说明其双螺旋结构较多,淀粉糊化过程需要更多的能量破坏淀粉的晶体结构[28]。

2.2.3 大米淀粉的结构与米饭特性的相关性 米饭的食味品质和质构特性与淀粉的糊化特性密切相关。由表 6 可知,淀粉的峰值黏度和崩解值与米饭食味值呈极显著正相关(P<0.01);淀粉的终值黏度和回生值与米饭的硬度呈显著正相关 (P<0.05),淀粉的糊化温度与米饭的硬度呈极显著正相关(P<0.01);米饭的凝聚性和淀粉的谷值黏度、终值黏度、回生值、糊化温度呈极显著负相关(P<0.01);米饭的胶着性和淀粉的崩解值呈极显著正相关 (P<0.01);米饭的回复性和淀粉的糊化温度呈显著负相关(P<0.05)。淀粉终值黏度越高、回生值越大,冷却后老化速度越快,米饭硬度越高,同时,淀粉糊化温度越高,米饭的回复性越差,米饭很难恢复到原来的形状,导致口感变差。因此,华粳 5 号、嘉优中科 1 号、Ⅱ优 118 表现出较差的食用品质,越光、南粳 46、南粳 9108、泰国茉莉香米、禾银丝苗表现出较优的食用品质。相关性分析表明,淀粉的相对结晶度、表面有序度和热焓值与米饭的食味品质和质构特性关系不显著;而淀粉糊化的起始温度和峰值温度与米饭的硬度呈极显著正相关(P<0.01);淀粉糊化的峰值温度与米饭的黏度呈显著负相关(P<0.05),与回



（a）XRD图谱　　（b）红外光谱

图 2　不同品种大米淀粉的 XRD 图谱及红外光谱

Fig. 2　XRD patterns and infrared patterns of rice starch from different varieties

表 5　不同品种大米淀粉的结晶特性、热特性和颗粒表面有序度

Table 5　Crystallization properties, thermal properties and granule surface order degree of rice starch from different varieties

品种	相对结晶度/%	起始温度/℃	峰值温度/℃	终值温度/℃	热焓值/(J/g)	颗粒表面有序度
武育糯 481	31.15^{a}	56.88±0.52^{de}	65.10±0.37^{e}	79.53±0.07^{c}	11.83±0.42^{a}	0.892±0.013^{c}
苏香粳 100 号	27.55^{b}	56.00±0.04^{e}	62.91±0.13^{e}	73.55±0.02^{f}	11.57±0.12^{ab}	0.862±0.002^{de}
南粳 9108	26.50^{c}	57.55±0.08^{d}	64.37±0.04^{d}	72.80±0.19^{g}	10.91±0.41^{abc}	0.849±0.000^{e}
南粳 46	26.15^{c}	55.10±0.22^{f}	61.75±0.16^{f}	73.71±0.37^{f}	10.00±0.69^{cde}	0.842±0.041^{ef}
泰国茉莉香米	24.45^{e}	61.94±0.13^{b}	67.65±0.00^{bc}	75.51±0.40^{e}	10.11±0.70^{bcde}	0.864±0.004^{de}
禾银丝苗	25.68^{d}	62.12±0.25^{b}	68.18±0.25^{b}	76.13±0.48^{d}	10.22±0.23^{bcd}	0.908±0.013^{a}
越光	24.64^{e}	61.46±0.03^{bc}	67.48±0.03^{bc}	75.49±0.23^{e}	10.63±0.07^{bc}	0.900±0.003^{b}
淮稻 5 号	25.09^{de}	57.63±0.03^{d}	63.91±0.11^{de}	70.78±0.16^{h}	8.44±0.03^{f}	0.844±0.007^{ef}
华粳 5 号	24.22^{e}	58.98±0.36^{c}	65.00±0.01^{c}	73.53±0.12^{f}	11.32±0.18^{b}	0.892±0.006^{c}
稻花香 2 号	22.05^{g}	56.05±0.34^{e}	62.51±0.26^{e}	69.75±0.45^{i}	8.88±0.04^{f}	0.863±0.006^{de}
Ⅱ优 118	23.65^{f}	66.54±0.47^{a}	72.34±0.01^{a}	81.80±0.00^{a}	10.27±0.10^{bcd}	0.901±0.004^{b}
嘉优中科 1 号	25.58^{d}	61.54±0.59^{bc}	72.53±0.18^{a}	80.50±0.13^{b}	10.58±0.30^{bc}	0.867±0.000^{d}

注：同一列中不同字母表示存在显著差异（P<0.05）。

表 6　大米淀粉的结构与米饭特性的相关性

Table 6　Correlation analysis between the starch structure and cooked rice properties

指标	硬度	黏度	凝聚性	胶着性	回复性	食味值	相对结晶度	起始温度	峰值温度	终值温度	热焓值	有序度	峰值黏度	谷值黏度	崩解值	终值黏度	回生值	糊化温度
硬度	1																	
黏度	−0.464*	1																
弹性	−0.493*	−0.034	1															
凝聚性	0.470*	−0.409*	0.522**	1														
回复性	−0.309	0.447*	0.650**	0.426*	1													
食味值	−0.097	−0.254	0.690**	0.635**	0.426*	1												
相对结晶度	−0.443	−0.260	0.328	−0.168	−0.282	−0.063	1											

续表 6

指标	硬度	黏度	凝聚性	胶着性	回复性	食味值	相对结晶度	起始温度	峰值温度	终值温度	热焓值	有序度	峰值黏度	谷值黏度	崩解值	终值黏度	回生值	糊化温度
起始温度	0.603**	−0.205	−0.476*	0.068	−0.415*	−0.210	−0.339	1										
峰值温度	0.655**	−0.497*	−0.518*	0.039	−0.580**	−0.311	−0.160	0.909**	1									
终值温度	0.273	−0.457*	−0.338	−0.197	−0.720**	−0.429*	0.355	0.632**	0.784**	1								
热焓值	−0.343	−0.173	0.119	−0.253	−0.332	−0.048	0.615**	−0.005	0.102	0.455*	1							
有序度	−0.046	0.007	−0.068	−0.158	−0.261	−0.141	0.006	0.575**	0.492*	0.493*	0.382	1						
峰值黏度	0.265	−0.220	0.176	0.485*	0.014	0.736**	−0.119	0.070	−0.071	−0.215	0.012	−0.180	1					
谷值黏度	0.324	0.301	−0.550**	−0.206	−0.047	−0.230	−0.688**	0.067	0.000	−0.177	−0.378	−0.260	0.084	1				
崩解值	0.057	−0.359	0.457*	0.542**	0.038	0.776**	0.272	0.025	−0.063	−0.093	0.218	−0.016	0.838**	−0.474*	1			
终值黏度	0.432*	0.308	−0.634**	−0.162	0.008	−0.264	−0.890**	0.310	0.199	−0.187	−0.484*	−0.059	−0.002	0.891**	−0.491*	1		
回生值	0.443*	0.241	−0.571**	−0.075	0.065	−0.237	−0.890**	0.495*	0.365	−0.152	−0.480*	0.172	−0.094	0.559**	−0.389	0.874**	1	
糊化温度	0.784**	−0.334	−0.629**	0.091	−0.438*	−0.273	−0.515**	0.883**	0.897**	0.522**	−0.224	0.352	0.021	0.318	−0.156	0.543**	0.653**	1

注：* 代表显著相关（$P<0.05$）；** 代表极显著相关（$P<0.01$）。

复性呈极显著负相关（$P<0.01$），说明淀粉糊化的起始温度和峰值温度越高，蒸煮米饭时所要的能量越高，米饭的硬度越大，黏度和回复性越低，米饭的食用品质不佳。

3 结 语

作者对 12 种大米的理化组成、食味品质和质构特性进行了测定和差异性分析，继而分别考察了食味品质和质构特性与大米淀粉糊化性质、结晶特性、热特性和颗粒表面有序度之间的相关性。结果表明，泰国茉莉香米、禾银丝苗、越光、苏香粳 100 号、南粳 9108 和南粳 46 具有较高的食味值。不同品种大米直链淀粉质量分数与米饭的食味品质关系不显著，不能仅用直链淀粉质量分数作为评判米饭食用品质的唯一指标。米饭食味值主要与淀粉的糊化参数存在显著相关性，与峰值黏度和崩解值呈极显著正相关关系。米饭的质构和淀粉的糊化特性有一定的相关性，尤其是米饭的硬度、凝聚性和回复性，其他质构参数均与淀粉特性无显著相关性，说明淀粉的糊化特性极大程度上决定了米饭的硬度、凝聚性和回复性。该研究阐释了大米理化性质及淀粉结构对米饭食用品质的影响机制，为大米适宜性加工和优质稻的培育提供了理论基础。

参考文献：

[1] 张群. 稻米营养制品加工关键技术[J]. 食品与生物技术学报，2015，34(3)：336.

[2] 刘敏，谭书明，张洪礼，等. 不同品种大米口感品质分析[J]. 食品科学，2018，39(15)：88-92.

[3] 常俊楠，焦桂爱，惠索祯. 稻米质构特性影响因素的研究进展[J]. 分子植物育种，2021，19(7)：2419-2426.

[4] 王静，毛慧佳，李洪岩. 大米淀粉结构与质构品质的研究进展[J]. 中国食品学报，2020，20(1)：1-9.

[5] BALINDONG J L，WARD R M，LIU L，et al. Rice grain protein composition influences instrumental measures of rice cooking and eating quality[J]. **Journal of Cereal Science**，2018，79：35-42.
[6] LI H，WEN Y，WANG J，et al. Relations between chain-length distribution，molecular size，and amylose content of rice starches [J]. **International Journal of Biological Macromolecules**，2018，120：2017-2025.
[7] 张贵凤. 稻米支链淀粉链长分布和分支化度的测定及其与理化特性的关系[D]. 南昌：江西农业大学，2017.
[8] 朱平. 稻米淀粉功能特征研究及相关性分析[D]. 杭州：浙江大学，2015.
[9] 余飞，邓丹雯，董婧，等. 直链淀粉含量的影响因素及其应用研究进展[J]. 食品科学，2007(10)：604-608.
[10] 于梅梅，陶权丹，华杰，等. 香软米水稻的研究进展[J]. 江苏农业科学，2019，47(10)：11-15.
[11] SINGH N，KAUR L，SANDHU K S，et al. Relationships between physicochemical，morphological，thermal，rheological properties of rice starches[J]. **Food Hydrocolloids**，2006，20(4)：532-542.
[12] 吴焱，袁嘉琦，张超，等. 稻米脂肪与品质的关系及其调控[J]. 江苏农业学报，2020，36(3)：769-776.
[13] 张玉荣，周显青，杨兰兰. 大米食味品质评价方法的研究现状与展望[J]. 中国粮油学报，2009，24(8)：155-160.
[14] LI H，PRAKASH S，NICHOLSON T M，et al. The importance of amylose and amylopectin fine structure for textural properties of cooked rice grains[J]. **Food Chemistry**，2016，196：702-711.
[15] 李刚，邓其明，李双成，等. 稻米淀粉 RVA谱特征与品质性状的相关性[J]. 中国水稻科学. 2009，23(1)：99-102.
[16] 闫影，张丽霞，万常照，等. 稻米淀粉 RVA 谱特征值及理化指标与食味值的相关性[J].植物生理学报，2016，52(12)：1884-1890.
[17] LI Y，DUAN R，SHI F，et al. Effects of high-temperature air fluidization （HTAF） on the structural，functional，and *in vitro* digestive properties of corn[J]. **Starch–Stärke**，2017，69(5)：1-8.
[18] 韩文芳，熊善柏，李江涛，等. 糯米淀粉的晶体性质和糊化特性[J]. 中国粮油学报，2015，30(8)：48-53.
[19] CHEETHAM N W H，TAO L P. Variation in crystalline type with amylose content in maize starch granules：an X-ray powder diffraction study[J]. **Carbohydrate Polymers**，1998，36(4)：277-284.
[20] MORALES-MARTÍNEZ L E，BELLO-PÉREZ L A，SÁNCHEZ-RIVERA M M，et al. Morphometric，physicochemical，thermal，and rheological properties of rice（*Oryza sativa* L.） cultivars *Indica* × *Japonica*[J]. **Food and Nutrition Sciences**，2016，5(3)：271-279.
[21] LOPEZ-RUBIO A，FLANAGAN B M，GILBERT E P，et al. A novel approach for calculating starch crystallinity and its correlation with double helix content：a combined XRD and NMR study[J]. **Biopolymers**，2008，89(9)：761-768.
[22] 杨梦恬. 糯米淀粉结构与功能特性及其超声改性研究[D]. 杭州：浙江大学，2019.
[23] SINGH N，KAUR L，SODHI N S，et al. Physicochemical，cooking and textural properties of milled rice from different Indian rice cultivars[J]. **Food Chemistry**，2005，89(2)：253-259.
[24] SEVENOU O，HILL S E，FARHAT I A，et al. Organisation of the external region of the starch granule as determined by infrared spectroscopy[J]. **International Journal of Biological Macromolecules,** 2002，31(1)：80-85.
[25] 满建民，蔡灿辉，严秋香，等. 红外光谱技术在淀粉粒有序结构分析中的应用[J]. 作物学报，2012，38(3)：505-513.
[26] 蔡金文. 普通水稻淀粉结构和功能特性研究[D]. 扬州：扬州大学，2015.
[27] HYUN-JUNG C，HYESOOK S L，SEUNG-TAIK L. Effect of partial gelatinization and retrogradation on the enzymatic digestion of waxy rice starch[J]. **Journal of Cereal Science**，2006，43(3)：353-359.
[28] WANG S，LI P，YU J，et al. Multi-scale structures and functional properties of starches from *Indica* hybrid，*Japonica* and waxy rice[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**，2017，102：136-143.