封琴, 李静, 赵欣, 等. 添加预糊化糯米淀粉对大米粉理化性质及其方便干米粉品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(5): 147−154. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030143
FENG Qin, LI Jing, ZHAO Xin, et al. Effects of Adding Pregelatinized Glutinous Rice Starch on the Physicochemical Properties of Rice Flour and the Quality of Its Instant Dry Rice Noodles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(5): 147−154. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030143

·研究与探讨·

添加预糊化糯米淀粉对大米粉理化性质及其方便干米粉品质的影响

封　琴[1],李　静[1,+],赵　欣[1],陆春苗[1],万建华[2],张思雨[1],韩文芳[1],杨　英[1,*]
(1.稻谷及副产物深加工国家工程研究中心,中南林业科技大学食品科学与工程学院,湖南长沙 410004;
2.江苏益元泰生物技术有限公司,江苏宿迁 223800)

摘　要: 为了提高方便干米粉的复水特性，本文研究了添加预糊化糯米淀粉（Pregelatinized glutinous rice starch，PGRS）对大米粉糊化特性、成糊特性、糊流变学特性及其方便干米粉结构、食用品质和淀粉消化性的影响。结果表明，添加 2%~8% PGRS 可以使大米粉糊化起始温度降低约 2.9 ℃、热焓值增大 24% 以上，成糊黏度增大 6% 以上，糊凝胶弹性减弱或增强。当 PGRS 添加量为 4% 时，方便干米粉的复水时间缩短至 280 s，质构与感官品质保持良好。当 PGRS 添加量≤6% 时，方便干米粉的抗消化性增加，抗性淀粉（Resistant starch，RS）含量提高 33% 以上。因此，添加 PGRS 可以提高方便干米粉的复水特性并增加其 RS 含量。该研究为应用 PGRS 提高米制品品质提供了参考依据。

关键词: 方便干米粉,大米粉,预糊化糯米淀粉,理化性质,品质
中图分类号: TS213.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)05−0147−08
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030143　　本文网刊:

Effects of Adding Pregelatinized Glutinous Rice Starch on the Physicochemical Properties of Rice Flour and the Quality of Its Instant Dry Rice Noodles

FENG Qin[1], LI Jing[1,+], ZHAO Xin[1], LU Chunmiao[1], WAN Jianhua[2], ZHANG Siyu[1], HAN Wenfang[1], YANG Ying[1,*]
(1.National Engineering Research Center of Rice and Byproduct Deep Processing, College of Food Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China;
2.Jiangsu Yiyuantai Biotechnology Co., Ltd., Suqian 223800, China)

Abstract: In order to improve the rehydration characteristics of instant dry rice noodles, the effects of adding pregelatinized glutinous rice starch (PGRS) on the gelatinization, pasting and rheological properties of rice flour and the structure, food quality and starch digestibility of the instant dry rice noodles made of the rice flour were investigated. The results showed that adding 2%~8% PGRS reduced the gelatinization onset temperature of the rice flour by about 2.9 ℃, increased the enthalpy by more than 24%, increased the pasting viscosity by more than 6%, and weakened or enhanced the elasticity of the paste gel. When the addition amount of PGRS was 4%, the rehydration time was shortened to 280 s, and the texture and

收稿日期: 2025−03−13　　+并列第一作者
基金项目: 湖南省科技创新计划资助（2023ZJ1070, 2023RC3163）;湖南省自然科学基金项目（2021JJ30043）;湖南省教育厅科学研究项目（21B0269）;长沙市科技计划项目（kq2004089）。
作者简介: 封琴（2000−）,女,硕士研究生,研究方向:淀粉与粮食深加工,E-mail: fengqin1433@163.com。
李静（2003−）,女,大学本科,研究方向:淀粉与粮食深加工,E-mail: 17872399675@163.com。
*** 通信作者:** 杨英（1982−）,女,博士,副教授,研究方向:淀粉与粮食深加工,E-mail: yingy@csuft.edu.cn。

sensory quality remained good. When the addition amount of PGRS was ≤6%, the digestion resistance of instant dry rice noodles was enhanced, and the content of resistant starch (RS) increased by more than 33%. Therefore, the addition of PGRS could improve the rehydration characteristics of instant dry rice noodles and increase its RS content. This study provided a reference for applying PGRS to improve the quality of rice products.

Key words: instant dry rice noodles; rice flour; pregelatinized glutinous rice starch; physicochemical properties; quality

米粉是我国南方传统主食之一,常由大米粉经糊化、挤压成线或切分成条制成,可根据水分含量分为鲜湿米粉、半干米粉和干米粉[1]。干米粉因具有保质期长、储运方便的优点而占据较大的市场份额。方便干米粉是用热水冲泡即食的干米粉,与需要浸泡后煮制较长时间才能食用的传统干米粉相比,具有食用方便的优势,但仍需攻克复水时间过长的技术瓶颈[2]。已有研究尝试采用温和蒸汽预处理[3],蒸制形成浓缩诱导型海藻酸钠凝胶[4]、添加葡甘露聚糖[5]等方法缩短方便干米粉的复水时间。然而,采用温和蒸汽预处理需要增加生产设备,形成海藻酸钠凝胶或添加葡甘露聚糖等亲水胶体易导致米粉原有大米风味与口感的损失。因此,在不增加新设备也不减损米粉原有特色感官品质的情况下提高干米粉的复水特性更有助于利用原有生产线生产出让消费者更满意的方便干米粉产品。

预糊化淀粉是一种物理改性淀粉,通常使用滚筒干燥、挤压或喷雾干燥等方法制备,容易吸水膨胀而发挥增稠作用[6],已被作为保水剂、增稠剂等广泛应用于食品工业[7]。已有研究表明,添加预糊化淀粉可以降低糙米粉糊的黏度并提高其热稳定性[8]、增加米发糕的比容与弹韧性并延缓米发糕老化[9]和提高糯米粉凝胶结构的稳定性[10]。预糊化糯米淀粉(Pregelatinized glutinous rice starch, PGRS)作为以糯米淀粉为原料的预糊化淀粉,已被用于改变糯米粉的黏性和回生特性[11],并被用于制备无麸质面包[12]。PGRS 不仅像其它预糊化淀粉一样具有优良的膨胀性和保水性[13],而且与米粉原料大米具有同种类淀粉颗粒结构。因此,添加 PGRS 制备干米粉很可能可以在不减损米粉原有特色感官品质的基础上提高干米粉的复水特性,但鲜见相关报道。

为了确定 PGRS 对干米粉复水特性的影响,也为了给应用 PGRS 提高米制品品质提供理论依据,本文参考预糊化淀粉在米制品中的常用添加量,研究了添加 2%~8% PGRS 对大米粉理化性质及其方便干米粉品质的影响。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

珍珠三号大米　产自安徽芜湖南陵县,加工至二级精度;预糊化糯米淀粉(PGRS)　广州舒馨食品配料有限公司;α-淀粉酶(10 U/mg)、胃蛋白酶(400 U/mg)　美国 Sigma 公司;α-1,4-葡萄糖苷淀粉酶(100000 U/mg)　上海源叶生物科技有限公司;葡萄糖试剂盒　爱尔兰 Megazyme 公司;其他分析试剂为国产分析纯级别。

Q2000 差示扫描量热仪　美国 TA 公司;SUPER-4 快速粘度分析仪　瑞典波通公司;DHR-2 流变仪　美国 TA 公司;SZ-30 米粉机　广州旭众食品机械有限公司;Rigaku SmartLab SE 型 X-射线衍射仪　日本理学公司;IRTracer-100 傅里叶红外光谱仪　岛津企业管理(中国)有限公司;TA XT Plus 质构仪　英国 Stable Micro System 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 大米粉的制备及 PGRS 的添加　将大米干磨并过 100 目筛获得大米粉。参考 Wang 等[14]用预糊化淀粉替代部分原大米粉的添加比例,按大米粉干基重量计算,将 0%、2%、4%、6%、8% PGRS(w/w)添加到大米粉中并混合均匀获得 PGRS 添加量有差异的大米粉样品。

1.2.2 大米粉样品糊化特性的测定　参考 Lu 等[15]描述的方法,先将 3.0 mg 大米粉样品和 6.0 mL 蒸馏水加入铝坩埚中密封压片后放置在 4 ℃ 平衡 24 h,后以 10 ℃/min 的速率将样品从 30 ℃ 加热至 120 ℃。

1.2.3 大米粉样品成糊特性的测定　参考李欣倩等[16]的方法,使用快速粘度分析仪标准 I 设定程序测定大米粉样品的成糊特性。

1.2.4 大米粉糊流变学特性的测定　使用流变仪测定 1.2.3 制备的大米粉糊的流变学特性。参考 Yang 等[17]描述的方法,采用 40 mm、2°的椎板和 1000 μm 的间隙。在 25 ℃ 下,使用 0.1~1000 s^{-1} 的剪切程序测试大米粉糊样品的静态流变特性,并用 Herschel–bulkley 模型,如式(1)所示,通过参数 n 和 K 进行表征[18];在 25 ℃ 下和样品的线性应变范围内,使用 0.1~100 rad/s 的频率扫描程序测试大米粉糊样品的粘弹性,得到其动态流变参数储能模量 G'和损耗模量 G",根据 G'和 G"计算损耗角正切值 tan δ。

$$\sigma = \sigma_0 + K\gamma^n \quad \text{式(1)}$$

式中:σ 表示剪切应力,Pa;σ_0 表示屈服应力,Pa;K 表示稠度系数,Pa·s;γ表示剪切速率,s^{-1};n 表示流动特性指数。

1.2.5 方便干米粉的制备　将 1.2.1 制备的大米粉样品与水(60%, w/w)均匀混合,使用配 2 mm 孔径模具的米粉机将混合物挤压成米粉,将米粉在 25 ℃ 下老化 2 h 后在 60 ℃ 下干燥 90 min 获得方便干米粉样品,将其密封保存。

1.2.6　方便干米粉的 X 射线衍射分析　使用 X 射线衍射仪分析方便干米粉的结晶结构[19]。在 40 kV 和 50 mA 条件下，以 10°/min 的速率于 4°~60° 2θ 角范围扫描粉末状方便干米粉样品。

1.2.7　方便干米粉的傅里叶变换红外光谱分析　将 2.0 mg 粉末状方便干米粉样品与 200.0 mg 溴化钾充分研磨并压片，以 4 cm^{-1} 的分辨率于 4000~500 cm^{-1} 范围扫描样品[20]。采用 OMINC 软件对 1200~800 cm^{-1} 范围内图谱进行基线校正，测定去卷积后 1047、1022、995 cm^{-1} 处的峰强度，计算 1047 cm^{-1} 与 1022 cm^{-1} 的峰强度比值($R_{1047/1022}$)和 1022 cm^{-1} 与 995 cm^{-1} 的峰强度比值($R_{1022/995}$)。

1.2.8　方便干米粉复水时间和复水损失率的测定　根据舒星琦等[21]描述的方法测定方便干米粉的复水时间，并稍作修改。用 20 倍重量的沸水冲泡方便干米粉样品，4 min 后每 10 s 取出部分样品用玻璃片夹断观察米粉白芯情况，第一次观察到米粉白芯消失的时间即为方便干米粉的复水时间。将方便干米粉样品用沸水冲泡到其复水时间后，在 105 ℃ 下将米粉汤汁干燥至恒重，该重量与方便干米粉样品干基重量的百分比即为方便干米粉的复水损失率。

1.2.9　方便干米粉的质构分析　用质构仪对复水后的方便干米粉进行 TPA 测试[22]：使用 P/36 R 探头，测试前、中、后的速度为 1 mm/s，压缩比为 75%，触发力为 5 g，压缩间隔为 5 s。

1.2.10　方便干米粉的感官评价　由 10 名身体健康、感官正常并接受过感官评价培训的志愿者品尝复水后的方便干米粉样品，根据参考 T/CCOA4-2019 制定的评价标准(如表 1 所示)进行评分。

1.2.11　方便干米粉淀粉消化率的测定　根据 Lu 等[5]描述的体外模拟消化方法测定方便干米粉复水后的淀粉消化率。将复水后的方便干米粉样品加入 pH6.8 的乙酸盐缓冲溶液(0.2 mol/L)中，并在 37 ℃ 下以 150 r/min 的速度往复摇动；加入 1 mL α-淀粉酶溶液(75 U/mL)模拟口腔环境反应 2 min 后，快速加入 1 mol/L 盐酸溶液将 pH 调节至 2.0 并加入 1 mL 胃蛋白酶反应溶液(2000 U/mL)模拟胃环境反应 120 min；继续加入 0.2 mol/L 乙酸钠溶液将 pH 调节至 5.2 并加入 3 mL 含有 α-淀粉酶(35 U/mL)和 α-1,4-葡糖苷淀粉酶(35 U/mL)的酶溶液模拟小肠环境反应 5 h。当模拟小肠反应至 0、20、60、90、120 min 时，立即取出 0.1 mL 反应液进行沸水灭酶 15 min，然后用 GOPOD 试剂盒测定葡萄糖含量，并按以下公式计算消化率以及快消化淀粉(Rapidly digestible starch, RDS)、慢消化淀粉(Slowly digestible starch, SDS)和抗性淀粉(Resistant starch, RS)的含量。

$$消化率(\%) = \frac{G_{120} \times 0.9}{TS} \times 100 \qquad 式（2）$$

$$RDS(\%) = \frac{(G_{20} - G_0) \times 0.9}{TS} \times 100 \qquad 式（3）$$

$$SDS(\%) = \frac{(G_{120} - G_{20}) \times 0.9}{TS} \times 100 \qquad 式（4）$$

$$RS(\%) = \frac{TS - RDS - SDS}{TS} \times 100 \qquad 式（5）$$

式中：RDS、SDS 和 RS 分别表示快消化淀粉、慢消化淀粉和抗性淀粉的含量，%；G_0、G_{20}、G_{120} 分别表示模拟小肠消化 0、20 和 120 min 时反应物的葡萄糖含量，mg；TS 表示样品的总淀粉含量，用模拟小肠消化 5 h 后的反应液葡萄糖含量表示，mg。

1.3　数据处理

使用 SPSS 19.0 软件的单因素方差分析和 Duncan 显著性检验(P<0.05)分析数据，并用两次(糊化特性和成糊特性数据)或三次测定的“平均值±标准偏差”表示结果。用 Origin 2021 软件绘图，并用 OMNIC 8.0 软件分析红外光谱图。

2　结果与分析

2.1　添加 PGRS 对大米粉糊化特性的影响

大米粉样品在 65~85 ℃ 范围内出现了如图 1A 所示的淀粉糊化吸热峰，添加 PGRS 对大米粉糊化特性的具体影响如图 1B 所示。添加 PGRS 使大米粉的糊化吸热峰向左偏移(图 1A)，糊化起始温度(Onset temperature, T_o)显著降低而热焓值(Enthalpy, ΔH)显著增大(P<0.05)(图 1B)，但对糊化峰值温度和终止温度没有显著影响(P>0.05)。具体而言，添加 2%、4%、6%、8%PGRS 均使大米粉的 T_o 降低约 2.9 ℃；添加 2%、4%、6%PGRS 均使大米粉的 ΔH

表 1　方便干米粉的感官评价标准

Table 1　Sensory evaluation criteria for instant dry rice noodles

评价指标	分值(分)	评分标准
色泽	10	米粉的颜色和亮度：淡白色、有光泽、无明显斑点、光亮(8~10分)；亮度一般(4~7分)；颜色发暗、发灰，亮度差(1~3分)
表观	10	米粉表面的光滑与膨胀程度：厚薄均匀、组织细腻、表面光滑(8~10分)；表面较光滑、有少量杂质和轻微裂痕(5~7分)；表面粗糙、有较多杂质和裂痕(2~4分)
硬度	25	用牙咬断米粉所需力大小：软硬合适(21~25分)；稍软或稍硬(14~20分)；很软或很硬(0~13分)
弹性	20	咀嚼时米粉的筋道口感与弹性大小：弹性好(15~20分)；弹性一般(8~14分)；弹性差(3~7分)
粘性	10	咀嚼时米粉粘牙的程度：爽口、不粘牙(8~10分)；稍粘牙(5~7分)；粘牙(2~4分)
爽滑性	10	品尝时米粉口感的光滑程度：光滑爽口(8~10分)；较光滑(4~7分)；口感粗糙、不爽口(0~3分)
咀嚼性	10	米粉耐咀嚼性大小：耐咀嚼、口感好(8~10分)；较耐咀嚼、口感一般(5~7分)；不耐咀嚼、口感易烂(2~4分)
食味	5	品尝时米粉的味道：稻米清香味(5分)；基本无异味(3~4分)；有异味(1~2分)

增大约 39.5%, 而添加 8%PGRS 引起的 ΔH 增大率为 24.6%。T_o 代表破坏淀粉无定形区结构所需的最低温度, 而 ΔH 可反映破坏淀粉双螺旋结构所需热量[23]。由于 PGRS 是预糊化淀粉, 原有淀粉颗粒结构已被破坏, 没有颗粒形态束缚的淀粉分子与水分子易发生氢键作用而呈现强亲水性[24], 所以混匀在大米粉中的 PGRS 可以通过加速周围未糊化大米淀粉颗粒吸水膨胀的方式降低大米粉的 T_o。然而, 在粉水重量比受限于 1∶2 的情况下, 添加极易吸水膨胀的 PGRS 会使大米淀粉糊化所能利用到的水分减少[25], 从而增加后续糊化进程破坏淀粉双螺旋结构所需的热量, 最终导致 ΔH 显著增大。添加 8% PGRS 使大米粉 ΔH 增大率变小的原因很可能是 8% 的添加量已使测试样品中的大米淀粉含量降低到超过 PGRS 抢夺水分影响 ΔH 的程度。

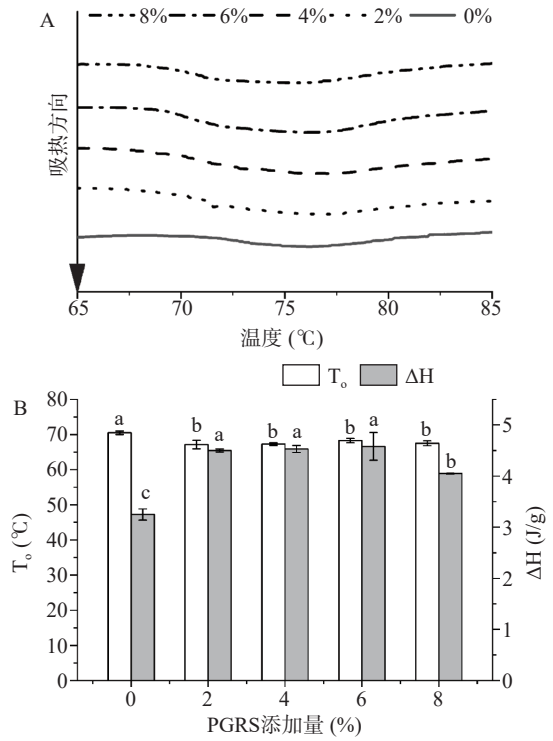


图 1 预糊化糯米淀粉添加量对大米粉糊化特性的影响

Fig.1 Effect of PGRS addition amounts on the gelatinization of rice flour

注: A 图为糊化曲线, B 图为糊化参数; T_o、ΔH 分别指大米粉糊化的起始温度和热焓值; 不同小写字母表示样品间差异显著(P<0.05), 图 2、图 5~图 8 同。

2.2 添加 PGRS 对大米粉成糊特性的影响

添加 PGRS 对大米粉成糊特性的影响如图 2 所示。添加 PGRS 使大米粉的成糊曲线发生了以向上偏移为主的变化(图 2A), 使黏度参数基本增大(图 2B), 但对崩解值和回生值没有显著性影响(P>0.05)。具体而言, 添加 2%、4%、6%、8% PGRS 均使大米粉的峰值黏度增大约 6.6%、谷值黏度增大约 10.3%; 添加 4%、6% PGRS 均使大米粉的终值黏度增大约 6.6%, 而添加 2%、8% PGRS 对大米粉的终值黏度没有显著性影响(P>0.05)。由于糯米淀粉几乎不含直链淀粉[26], PGRS 的主要成分是支链淀粉, 因而在水中具有通常高于普通大米淀粉的黏度, 因此添加 PGRS 会使大米粉成糊体系的黏度整体增大。另外, PGRS 分子很可能与糊化后的大米淀粉分子相互作用, 参与体系淀粉分子重排稳定化过程并对结果产生影响, 而该影响与其增大黏度的作用可能存在动态平衡, 因此添加量不同的 PGRS 对大米粉终值黏度的影响有差异。

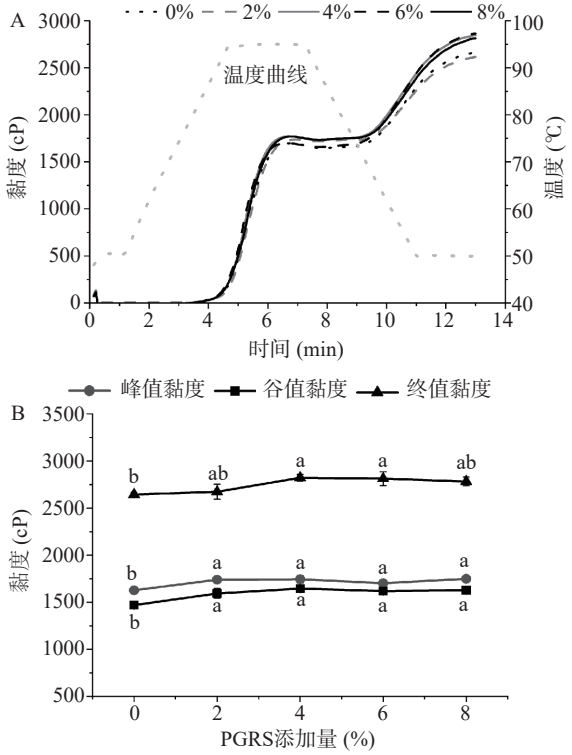


图 2 预糊化糯米淀粉添加量对大米粉成糊曲线(A)与黏度(B)的影响

Fig.2 Effect of PGRS addition amounts on the pasting curve (A) and viscosity (B) of rice flour

2.3 添加 PGRS 对大米粉糊流变学特性的影响

添加 PGRS 对大米粉糊的静态流变参数 n 和 K(Herschel-bulkley 模型的 R^2 为 0.9973~0.9991)没有显著性影响(P>0.05), 对动态流变参数 G'和 G"的影响如图 3 所示。添加 PGRS 没有改变样品 G'大

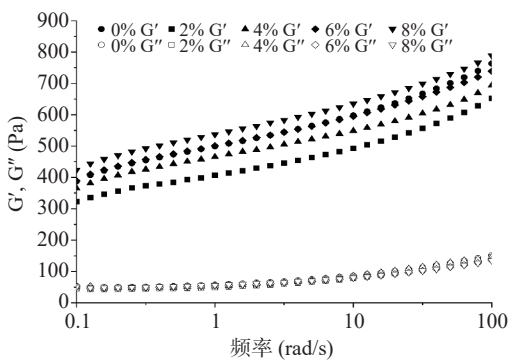


图 3 预糊化糯米淀粉添加量对大米粉糊 G'和 G"的影响

Fig.3 Effect of PGRS addition amounts on G' and G" of the rice flour paste

于 G"的整体状态，对大米粉糊的 G"没有明显影响，但使大米粉糊的 G'随 PGRS 添加量的增加先下降后升高，并且在添加量为 6% 时回到原值。当 G'>G" 时，损耗因子 tan δ<1，样品体系呈现“似固状态”，而 G'与体系的弹性呈正比[27]。因此，添加 PGRS 没有改变大米粉糊似固的凝胶状态，但使凝胶的弹性随添加量不同而发生变化。PGRS 在添加量<6% 时对大米粉糊凝胶弹性的减弱作用很可能通过分散阻碍大米淀粉分子链间交联形成凝胶而产生[28]，而在添加量>6% 时对大米淀粉糊凝胶弹性的增强作用很可能与足量的具有高冷糊粘度[29] 的 PGRS 可以增强大米淀粉的凝胶结构有关。

2.4　添加 PGRS 对大米粉所制方便干米粉结构的影响

在添加 PGRS 可以改变大米粉的糊化特性、成糊黏度和糊凝胶弹性的情况下，添加 PGRS 很可能对该大米粉所制方便干米粉的品质产生影响，因此本文进一步研究添加 PGRS 对该方便干米粉结构、食用品质和淀粉消化性的影响。

对比图 4 中的 X-射线衍射图可以看出，添加 PGRS 没有改变方便干米粉的结晶结构。对比图 5A 中的红外光谱图发现，添加 PGRS 没有产生新的吸收峰，也没有使方便干米粉的吸收峰发生明显的位移，说明添加 PGRS 没有使方便干米粉产生新的化学基团，也没有与方便干米粉的非淀粉成分形成共价键[30]。进一步分析如图 5B 所示的常用于表征淀粉短程有序结构的 $R_{1047/1022}$ 和表征淀粉双螺旋结构的 $R_{1022/995}$[31]，发现添加 PGRS 对方便干米粉的 $R_{1047/1022}$ 没有显著性影响（P>0.05），并且添加 2%、6%、8%PGRS 对方便干米粉的 $R_{1022/995}$ 也没有显著性影响（P>0.05），但添加 4% PGRS 使方便干米粉的 $R_{1022/995}$ 提高了 4.3%。因此，添加 PGRS 没有显著改变方便干米粉的短程有序结构，但添加量为 4% 时可能会增强方便干米粉中的淀粉双螺旋结构。

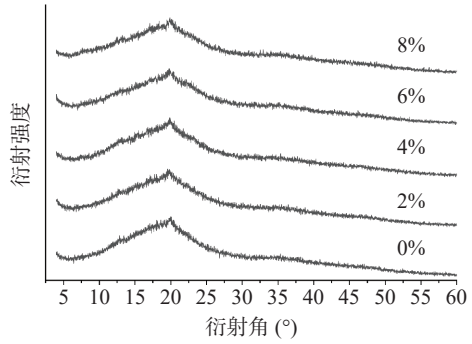


图 4　预糊化糯米淀粉添加量对大米粉所制方便干米粉 X-射线衍射图的影响

Fig.4　Effect of PGRS addition amounts on the X-ray diffraction patterns of the instant dry rice noodles made of the rice flour

2.5　添加 PGRS 对大米粉所制方便干米粉食用品质的影响

添加 PGRS 对方便干米粉复水特性的影响如图 6 所示。PGRS 添加量为 4%、6% 时使方便干米粉的复水时间从 340 s 分别显著缩短至 280、290 s（P<0.05），缩短率分别为 17.65% 和 14.71%，而添加量为 2% 时没有显著改变复水时间（P>0.05），添加量为 8% 时甚至延长了复水时间。同步测定的复水损失率表明，添加 PGRS 显著增大了方便干米粉的复水损失率（P<0.05），但添加 4%、6% PGRS 后的复水损失率很低，分别为 0.69% 和 0.55%。因此，综合而言，添加 4%、6%PGRS 可以有效提高方便干米粉的复水特性。由于添加 4%、6% PGRS 可以使大米粉的 T_o 降低、ΔH 增大（2.1），峰值黏度和终值黏度均

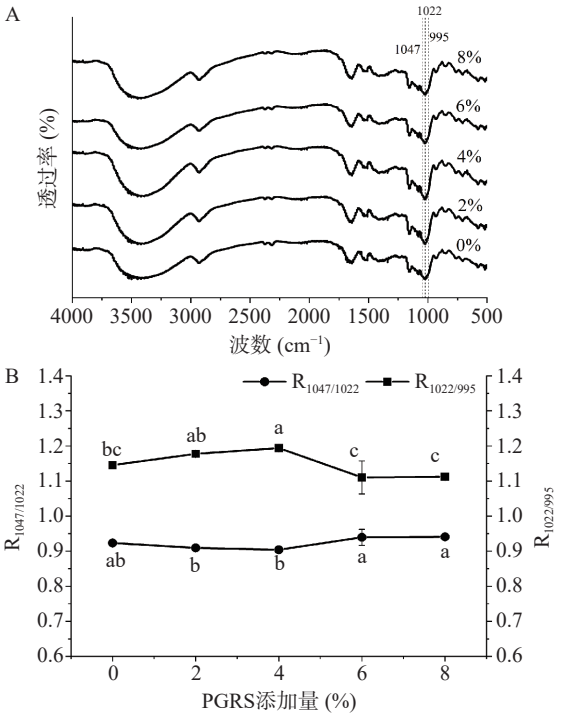


图 5　预糊化糯米淀粉添加量对大米粉所制方便干米粉淀粉傅里叶红外光谱图（A）以及短程有序结构 $R_{1047/1022}$ 和双螺旋结构 $R_{1022/995}$（B）的影响

Fig.5　Effect of PGRS addition amounts on the Fourier transform infrared spectrums (A), short-range ordered structure $R_{1047/1022}$ and double helix structure $R_{1022/995}$ (B) of starch in the instant dry rice noodles made of the rice flour

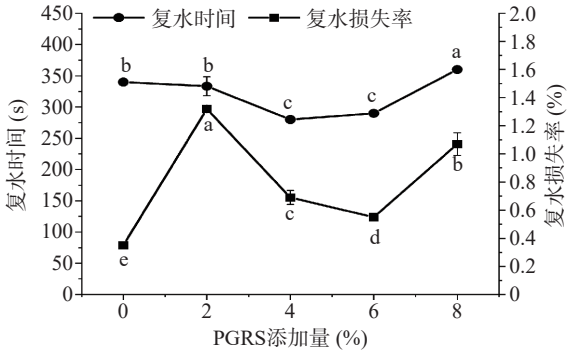


图 6　预糊化糯米淀粉添加量对大米粉所制方便干米粉复水特性的影响

Fig.6　Effect of PGRS addition amounts on the rehydration characteristics of the instant dry rice noodles made of the rice flour

增大(2.2),糊凝胶弹性变化较小(2.3),同时考虑到 PGRS 具有高亲水性及增大方便干米粉复水损失率的作用,添加量为 4%、6% 的 PGRS 很可能通过与大米粉组分适度相互作用使方便干米粉形成易被热水冲泡产生更多细微孔隙的结构,进而提高方便干米粉的复水特性。该推测与干米粉表面的多孔结构可以通过缩短水分子迁移到米粉中心所需要时间或减少复水所需水量缩短复水时间的研究结论是一致的[32]。

添加 PGRS 对方便干米粉复水后的硬度、弹性、咀嚼性和粘性产生了显著性影响(P<0.05)。与未添加 PGRS 方便干米粉相比,添加 6%、8% PGRS 使方便干米粉的硬度分别增大 23.8% 和 25.6%,添加 2%、4%PGRS 使方便干米粉的弹性分别降低 15.2% 和 15.7%(图 7A);添加 6%、8% PGRS 使方便干米粉的回复性分别提高 11.1% 和 11.4%,添加 4%、8% PGRS 使方便干米粉的粘聚性分别提高 8.7% 和 13.4%(图 7B);添加 8% PGRS 使方便干米粉的咀嚼性增大 30.4%,添加 6% PGRS 使方便干米粉的粘性增大 122.8%(图 7C)。综合比较,添加 2%、4% PGRS 对方便干米粉质构特性的影响较小,而该添加量对方便干米粉弹性的小幅降低作用与其对大米粉糊凝胶弹性的有限减弱作用(2.3)是一致的。另外,添加 PGRS 对方便干米粉复水后的感官评价指标中的弹性、硬度、咀嚼性和总分产生了显著性影响(P<0.05)。如图 7D 所示,添加 6% PGRS 使方便干米粉的弹性评分降低 23.9%,硬度评分降低 20.3%;添加 8% PGRS 使方便干米粉的咀嚼性评分降低 20.2%;添加 6%、8% PGRS 使方便干米粉感官总评分分别降低 14.1% 和 11.7%,而添加 2%、4% PGRS 对方便干米粉的感官品质没有产生显著性影响(P>0.05)。因此,综合考虑添加 PGRS 对方便干米粉复水特性以及复水后质构特性与感官品质的影响,添加 4% PGRS 可以在较好保持方便干米粉质构与感官品质的情况下提高其复水特性。

2.6 添加 PGRS 对大米粉所制方便干米粉淀粉消化性的影响

添加 PGRS 对方便干米粉复水后的淀粉消化率和消化类型的影响如图 8 所示。在体外模拟小肠消化 2 h 内,添加 2% PGRS 使方便干米粉的淀粉消化速率明显降低,添加 4%、6% PGRS 均只在消化 120 min 时使方便干米粉的淀粉消化率下降约 16.8%,而添加 8% PGRS 使方便干米粉的淀粉消化速率明显升高(图 8A)。此外,添加 PGRS 对方便干米粉的 RDS 含量没有显著性影响(P>0.05);但添加 2%、4%、6% PGRS 分别使方便干米粉的 SDS 含量降低 40.9%、23.1% 和 24.6%,RS 含量升高 66.9%、33.8% 和 33.7%(图 8B)。因此,添加 2%、4%、6% PGRS 可以提高方便干米粉的抗消化性。添加 PGRS 对大米粉淀粉消化性的影响与 PGRS 分子和大米淀粉分子之间的相互作用密切相关。尽管添加量≤6% 的 PGRS 很可能通过分散阻碍大米淀粉分子链间交联形成凝胶而减弱了大米粉糊的凝胶弹性(2.3),但是这些适量分散在大米粉中的 PGRS 分子

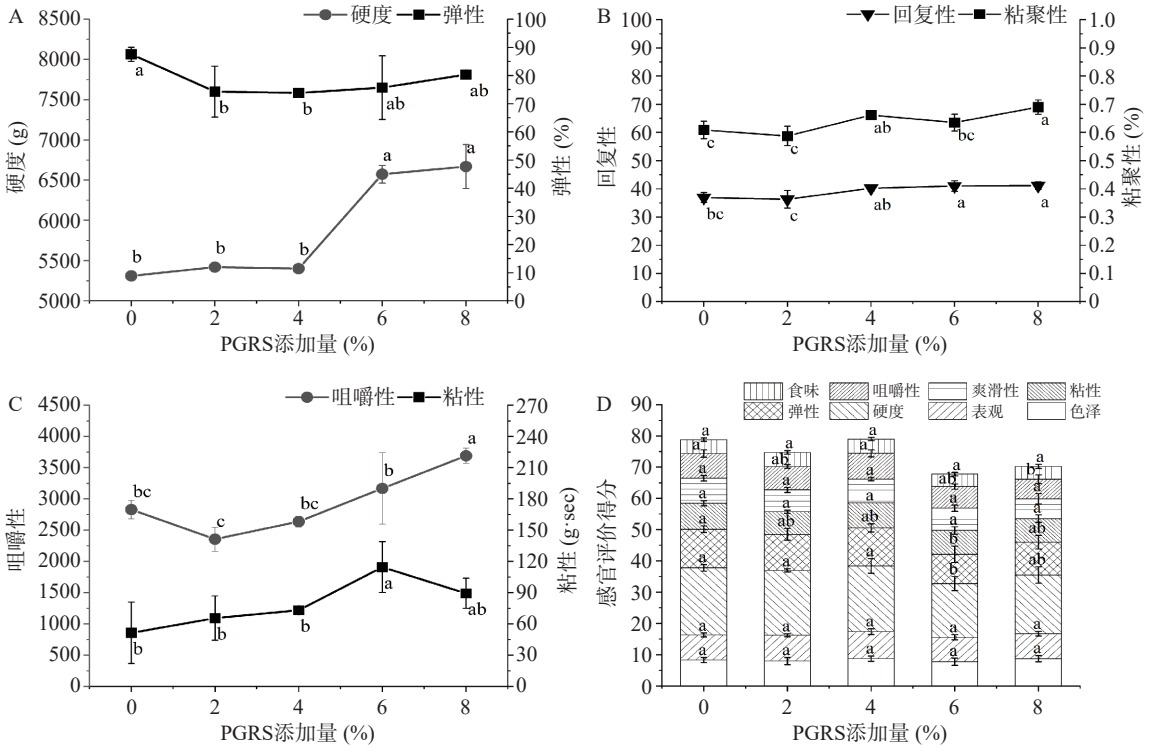


图 7 预糊化糯米淀粉添加量对大米粉所制方便干米粉复水后质构特性(A、B 和 C)与感官品质(D)的影响

Fig.7 Effect of PGRS addition amounts on the texture characteristics (A, B and C) and sensory quality (D) of the rehydrated instant dry rice noodles made of the rice flour

更可能通过与大米淀粉分子相互作用形成更多抗酶解的淀粉分子结构而提高了方便干米粉的 RS 含量。

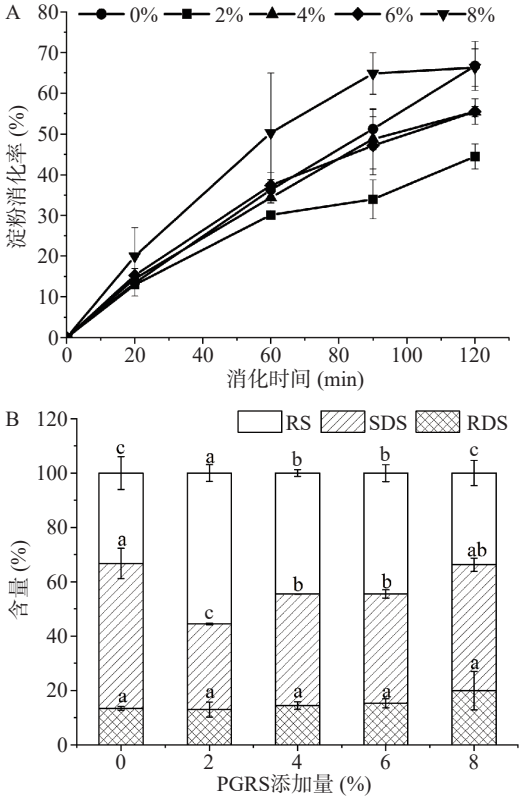


图 8　预糊化糯米淀粉添加量对大米粉所制方便干米粉复水后淀粉消化率(A)与淀粉组成(B)的影响

Fig.8　Effect of PGRS addition amounts on the starch digestion rate (A) and starch composition (B) of the rehydrated instant dry rice noodles made of the rice flour

注：RDS、SDS 和 RS 分别指快消化淀粉、慢消化淀粉和抗性淀粉。

3　结论

添加 2%~8% PGRS 可以使大米粉糊化起始温度降低、热焓值增大，成糊黏度增大，糊凝胶弹性产生变化；添加 4% PGRS 可以在不增加新设备也不减损米粉原有特色感官品质的情况下使方便干米粉的复水时间缩短至 280 s；添加不超过 6% PGRS 可以使方便干米粉的 RS 含量提高 33% 以上。该研究为提高方便干米粉复水品质提供了新方法，也为 PGRS 在米制品中的应用提供了理论依据。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] LI C M, YOU Y X, CHEN D, et al. A systematic review of rice noodles: Raw material, processing method and quality improvement[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 107: 389−400.

[2] ZHANG J Y, KONG H C, LI C M, et al. Highly branched starch accelerates the restoration of edible quality of dried rice noodles during rehydration[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 292: 119612.

[3] YUE D H, ZHANG H H, ZHANG T T, et al. Mild steam treatment: Enhancing the rehydration performance of instant rice noodles by changing the physicochemical properties and gel structure of rice starch[J]. Journal of Food Science, 2024, 89(4): 2371−2383.

[4] 刘锦华, 王圆圆, 何拉丽, 等. 蒸制形成浓缩诱导型海藻酸钠凝胶对方便干米粉品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(9): 145−151. [LIU J H, WANG Y Y, HE L L, et al. Effect of concentration-induced sodium alginate gel formed by steaming on the quality of instant dry rice noodles[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(9): 145−151.]

[5] LU C M, YANG Y, ZHAO X, et al. Effect of adding konjac glucomannan on the physicochemical properties of indica rice flour and the quality of its product of instant dry rice noodles[J]. Foods, 2024, 13(23): 3749.

[6] MA H, LIU M, LIANG Y, et al. Research progress on properties of pre-gelatinized starch and its application in wheat flour products[J]. Grain & Oil Science and Technology, 2022, 5(2): 87−97.

[7] ZHANG X Y, LIN X J, XU B J. Morphological, physicochemical, and pasting properties of pre-gelatinized starch prepared by high-pressure homogenizer: A comparative study on starches from different resources[J]. Food Research International, 2024, 197: 115294.

[8] 李小林, 李建勋, 张文娟, 等. 挤压预糊化淀粉的性能及其添加对糙米发糕品质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(15): 66−72. [LI X L, LI J X, ZHANG W J, et al. The Properties of extruded pregelatinized starch and the effect of its addition on the quality of steamed brown rice cakes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(15): 66−72.]

[9] 吴宗帅, 张淑芬, 吴磊, 等. 预糊化改性淀粉对米发糕品质的影响[J]. 中国食品添加剂, 2021, 32(3): 33−39. [WU Z S, ZHANG S F, WU L, et al. Effect of pre-gelatinized modified starch on properties of steamed rice bread[J]. China Food Additives, 2021, 32(3): 33−39.]

[10] 王宏伟, 王新天, 肖乃勇, 等. 预糊化淀粉对糯米粉糊化、流变性能及微观结构的影响[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(4): 57−62. [WANG H W, WANG X T, XIAO N Y, et al. Effect of pre-gelatinized starch on pasting, rheological properites and microstructures of glutinous rice flour[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(4): 57−62.]

[11] 彭文怡, 包杰, 陈凤香, 等. 预糊化糯米粉的添加对糯米粉 Mixolab 参数的影响研究[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(9): 57−59. [PENG W Y, BAO J, CHEN F X, et al. Study on the effect of adding pregelatinized glutinous rice flour on the parameters of Mixolab[J]. Cereals & Oils, 2021, 34(9): 57−59.]

[12] SÁNCHEZ H D, GONZÁLEZ R J, OSELLA C A, et al. Elaboración de pan sin gluten con harinas de arroz extrudidas elaboration of bread without gluten from extruded rice flours[J]. Ciencia y Tecnologia Alimentaria, 2008, 6(2): 109−116.

[13] 马春敏, 高欣茹, 吴巧艳, 等. 预糊化淀粉的制备、性质及其在淀粉基食品中的应用[J]. 食品工业科技, 2024, 45(15): 409−418. [MA C M, GAOX R, WU Q Y, et al. Preparation, properties and applications of pre-gelatinized starch on starch based foods[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(15): 409−418.]

[14] WANG H W, XIAO N Y, WANG X T, et al. Effect of pregelatinized starch on the characteristics, microstructures, and quality attributes of glutinous rice flour and dumplings[J]. Food Chem-

istry, 2019, 283: 248−256.
[15] LU H, XIONG L, LI M, et al. Separation and characterization of linear glucans debranched from normal corn, potato and sweet potato starches[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89: 196−206.
[16] 李欣倩, 刘锦华, 王若伊, 等. 脱除不同溶解性内源蛋白质对早籼米粉理化性质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(22): 61−67. [LI X Q, LIU J H, WANG R Y, et al. Effects of removing endogenous proteins with different solubility on the physicochemical properties of early indica rice flour[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(22): 61−67.]
[17] YANG Y, ZHANG G Y, HONG Y, et al. Calcium cation triggers and accelerates the gelation of high methoxy pectin[J]. Food Hydrocolloids, 2013, 32(2): 228−234.
[18] SHUPRAJHAA T, PARAMASIVAM S K, SUBRAMANIYAN P, et al. Ultrasonic assisted enzymolysis based modification of native banana starch–A comprehensive analyses of the structural, morphological, rheological and textural properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 297: 139748.
[19] 杨健, 张星灿, 华苗苗, 等. 高抗性淀粉大米对方便米粉品质及 GI 的影响[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(8): 1−8. [YANG J, ZHANG X C, HUA M M, et al. Effect of high resistant starch rice on quality and GI of instant rice flour[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(8): 1−8.]
[20] 李佳洋, 王馨远, 殷丽君, 等. 小麦水溶性阿拉伯木聚糖对大米粉加工特性及鲜湿米粉食用品质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(5): 56−62. [LI J Y, WANG X Y, YIN L J, et al. Effects of wheat water-extractable arabinoxylanon on the processing properties of rice flour and eating quality of fresh rice noodles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(5): 56−62.]
[21] 舒星琦, 李波轮, 任传顺, 等. 过热蒸汽处理大米对方便米粉品质的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2022, 43(6): 45−52. [SHU X Q, LI B L, REN C S, et al. Effect of superheated steam treatment on quality of instant rice noodles[J]. Journal of Henan University of Technology(Natural Science Edition), 2022, 43(6): 45−52.]
[22] 肖正午, 方升亮, 曹威, 等. 米粉质构特性与稻米理化性状的关系[J]. 中国水稻科学, 2024, 38(3): 316−323. [XIAO Z W, FANG S L, CAO W, et al. Relationships between texture profiles of rice noodles and physicochemical characteristics of rice grains[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2024, 38(3): 316−323.]
[23] GAO M, JIA J H, ZHANG C J, et al. Structure, properties, and resistant starch content of modified rice flour prepared using dual hydrothermal treatment[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 262: 130050.
[24] SHEN H S, YU J T, BAI J Q, et al. A new pre-gelatinized starch preparing by spray drying and electron beam irradiation of oat starch[J]. Food Chemistry, 2023, 398: 133938.
[25] DANG Y Z, OTSUBO T, IWAMOTO S, et al. Unraveling the changes of physical properties and nanostructures of rice starch incorporated with pregelatinized rice starch paste during gelatinization[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 162: 110931.
[26] 曾徐睿, 刘良忠, 齐婷, 等. 超声退火法制备抗性淀粉及其理化性质分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(18): 292−299. [ZENG X R, LIU L Z, QI T, et al. Preparation of resistant starch by ultrasonic annealing method and its physicochemical properties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(18): 292−299.]
[27] 周艳青, 向忠琪, 何璐, 等. 海藻酸钠胶凝与大米淀粉糊化共存体系的构建[J]. 食品科学, 2019, 40(4): 28−33. [ZHOU Y Q, XIANG Z Q, HE L, et al. Development of a system combining sodium alginate gelation and rice starch gelatinization[J]. Food Science, 2019, 40(4): 28−33.]
[28] DANG Y Z, IMAIZUMI T, NISHIZU T, et al. Effect of the addition of pregelatinized rice starch paste on the retrogradation of rice starch gel[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 145: 109159.
[29] ROMAN L, REGUILON M P, MARTINEZ M M, et al. The effects of starch cross-linking, stabilization and pre-gelatinization at reducing gluten-free bread staling[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 132: 109908.
[30] ZHU Z, BAO S N, DU K, et al. Controlling high amylose corn starch modulates the structural features and digestive properties of rice noodles[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 209: 116731.
[31] ZHU B H, ZHAN J L, CHEN L, et al. Amylose crystal seeds: Preparation and their effect on starch retrogradation[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 105: 105805.
[32] ZHANG J Y, ZHAO F F, LI C M, et al. Acceleration mechanism of the rehydration process of dried rice noodles by the porous structure[J]. Food Chemistry, 2024, 431: 137050.