

## 常压蒸煮米糠对籼米粉性质及米发糕品质的影响

李 佳<sup>1,2</sup>, 吴娜娜<sup>1</sup>, 刘 春<sup>2</sup>, 乔聪聪<sup>1</sup>, 田晓红<sup>1</sup>, 谭 斌<sup>1\*</sup>

(<sup>1</sup> 国家粮食和物资储备局科学研究院 北京 100037

<sup>2</sup> 中南林业科技大学食品科学与工程学院 长沙 410004)

**摘要** 分别向籼米粉中添加 0%, 3%, 6%, 9%, 12%, 15% 的常压蒸煮处理米糠, 探讨添加米糠对籼米粉的粉质特性以及对米发糕品质的影响。结果表明, 常压蒸煮米糠能够增加重组粉的溶解度, 且溶解度随着米糠添加量的增加而增加, 当米糠添加量为 15% 时重组粉的溶解度相对对照组提高了 70.7%。常压蒸煮米糠降低了重组粉的膨胀势。此外, 重组粉糊的流动性减弱, 耐剪切性能提升, 凝胶性增强; 重组粉凝胶体系的弹性和黏性增强, 冻融析水率降低, 表明常压蒸煮米糠能够有效调控大米淀粉基食品的凝胶特性。对米糕的指标测试结果也表明, 常压蒸煮米糠的加入显著增加米发糕的比容, 米发糕的比容随着米糠添加量的增加而增加。与白米发糕相比, 米糠添加量为 15% 的米发糕比容增加了 26.5%。常压蒸煮米糠的加入也显著改善了米发糕的质地特征和孔隙结构。米糠添加量在 9% 以内, 米发糕感官能被消费者接受。常压蒸煮米糠能改善米发糕的品质, 是一种很有潜力的食品原料。

**关键词** 常压蒸煮米糠; 重组米粉性质; 米发糕; 品质特性

**文章编号** 1009-7848(2024)11-0221-12 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.11.021

米糠是糙米加工到精米碾磨过程中铣削掉落的部分<sup>[1]</sup>, 其富集 60%~70% 的营养元素, 包括脂质、蛋白质、膳食纤维以及  $\gamma$ -谷维素、生育酚、植物甾醇等天然生物活性物质<sup>[2]</sup>。米糠中的某些活性成分具有降血糖、血脂, 预防 2 型糖尿病和心血管等疾病的功效<sup>[3]</sup>。米糠作为大米精加工过程中产生的副产物, 是一种具有很大开发潜力的食品原料<sup>[4]</sup>。在我国, 米糠的深加工及综合利用程度较低, 加工量仅占 10%~20%, 常被作为饲料或者提炼米糠油等。米糠的附加值得不到很大的提升, 造成了资源的浪费<sup>[5]</sup>。米糠中膳食纤维含量很高, 被认为是很好的膳食纤维来源, 可作为配料添加到食品中改善食品的营养特性。

米糠中脂肪含量在 15%~20%, 因内源性脂肪酶和脂肪氧化酶的存在, 故导致米糠在碾米过程中发生水解和氧化酸败<sup>[6]</sup>。通过米糠的稳定化处理, 能够抑制其品质劣变, 如热稳定化技术(干热、湿热)能够有效钝化酶的活性, 保留必需脂肪酸等有益成分, 有效抑制微生物生长, 提高米糠的货架期, 为其深加工处理提供了基础保障<sup>[7]</sup>。Wang 等<sup>[8]</sup>

将稳定化的米糠加入大米粉中挤压成米粉, 提高了米粉的吸水率, 降低了米粉的水溶性, 抗性淀粉含量较高, 通过将米粉与稳定的米糠混合并挤压蒸煮, 可以制备出具有健康效应的米粉基挤压制品。Mendes 等<sup>[9]</sup>的研究发现用 30% 脱脂米糠替换小麦粉制作的蛋糕感官品质良好, 蛋糕的能量降低, 纤维含量、酚类化合物含量和抗氧化能力提高。Cao 等<sup>[10]</sup>的研究发现挤压联合微细化处理米糠可改善糙米发糕的品质。

米发糕是我国一种传统发酵米制品, 具有独特的发酵风味, 口感松软有弹性, 易于人体的吸收<sup>[11-12]</sup>, 适合作为早餐食用, 深受消费者喜爱。常压蒸煮是一种常见的米糠稳定化方法, 具有操作简单, 成本低, 稳定化效果好的特点, 发掘其潜在的加工特性, 有利于稳定化米糠的深加工利用及产业化发展。目前常压蒸煮米糠应用于产品的报道较少。将常压蒸煮稳定化的米糠加入米粉中制成发糕, 能够改善米粉中的营养结构, 也可改变米发糕的品质, 是一种科学的膳食搭配。

本研究将不同质量分数 (0%, 3%, 6%, 9%, 12%, 15%, 以籼米粉干基质量计) 的常压蒸煮预处理米糠与籼米粉混合制成重组米粉, 测定其粉质特性, 探究不同米糠添加比例对重组米粉性质的影响。将重组米粉用于制作米发糕, 测定其比容、

收稿日期: 2023-11-12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32072266)

第一作者: 李佳, 男, 硕士

通信作者: 谭斌 E-mail: tb@ags.ac.cn

质构、孔隙结构并进行感官评价。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

市售早籼米、早籼米米糠,江西省抚州市永兴米业有限公司;PMX-200 二甲基硅油,美国道康宁公司;白砂糖、发糕模具,市售;高活性干酵母、两菌型酸奶发酵剂,安琪酵母股份有限公司;油菜籽,市售。

### 1.2 设备与仪器

HEGON III 电磁炉,美的集团股份有限公司;HV-110 高压灭菌器,日本 HIRAYAMA 公司;XH-2KW 智能微波脉冲设备试验仪,山东济南鑫弘微波设备有限公司;SYSLG30-IV 双螺杆挤压机,山东赛百诺机械有限公司;SHJ-6ABS 磁力搅拌水浴锅,常州金坛良友仪器有限公司;L580 卢湘仪离心机,上海卢湘仪离心机仪器有限公司;FW80、FW100 高速万能粉碎机,天津市泰斯特仪器有限公司;DGG-9140BD 电热恒温鼓风干燥箱,上海森信实验仪器有限公司;CTC-1 热风循环干燥灭菌烘箱,南京鑫长江制药设备有限公司;SHZ-B 水浴恒温振荡器,上海博讯医疗生物仪器股份有限公司;MS3basic 漩涡混匀器,德国 IKA 公司;BSC-150 恒温恒湿箱,上海博讯医疗生物仪器股份有限公司;PL3002-IC、ML204、ME155DU 电子分析天平,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;DSC 214 Polyma 差示扫描量热仪,德国耐驰仪器制造有限公司;RVA 4500 快速粘度分析仪,波通瑞华科学仪器(北京)有限公司;AR-2000 动态流变仪,美国 TA 仪器公司;TA.XT plus 质构仪,英国 Stable Micro Systems 公司;cc.200.06 C-Cell 图像分析仪,英国 Clibre Control International Ltd 公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 重组米粉的制备

1.3.1.1 常压蒸煮米糠的制备 原料米糠平铺在铺有纱布的蒸笼屉上,水沸腾后放入蒸笼 10 min。取出后分散开并放置在 45 °C 恒温烘箱中平衡水分到 10% 左右,冷却至室温,然后粉碎过 100 目标标准筛,得到所需粉末。

1.3.1.2 籼米粉的制备 早籼米在水中浸泡 12 h,

沥干表面水分后用高速粉碎机粉碎,过 100 目筛网,取出后放置在 45 °C 干燥灭菌烘箱中平衡水分到 15% 左右,冷却至室温得到所需籼米粉。

1.3.1.3 重组米粉的混合 将不同质量分数(3%, 6%, 9%, 12%, 15%, 以籼米粉干基质量计)的处理米糠与籼米粉充分混合均匀并过 100 目筛网,以添加 0% 米糠的籼米粉作为对照。

1.3.2 米发糕的制备 糙米发糕的制作参考曹亚文<sup>[13]</sup>的方法并稍作修改,基本配方为:称取 150 g 重组糙米粉(以干基计),2.25 g 酵母粉,0.75 g 乳酸菌粉以及 22.5 g 白砂糖,额外添加水分将最终水分含量补至 48%。

制作工艺如下:分别称取基本配料并混合均匀,混合均匀后置于恒温恒湿箱中发酵 40 min,发酵温度为 37 °C,相对湿度为 70%,然后按每份 40 g 左右分装倒入发糕模具(7 cm×4.5 cm×3.5 cm)中,继续第 2 次发酵,时间为 20 min。2 次醒发完成后置于煮沸的蒸锅中蒸煮 20 min,在室温下冷却放置 30 min 后再测定米发糕各项指标。

#### 1.3.3 重组米粉性质测定

1.3.3.1 溶解度(S)和膨胀势(B)的测定 参考许柠<sup>[14]</sup>的测定方法并加以修改,具体如下:准确称量 0.4 g 重组粉样品于 50 mL 离心管中,加入 20 mL 蒸馏水。将待测样品置于 80 °C 的水浴锅中,在回旋振荡模式下(150 r/min)加热 30 min,每隔 5 min 取出用漩涡混匀器振荡离心管。加热完后离心(4 000 r/min)20 min,将上清液倒入预称重的玻璃表面皿中,后置于 105 °C 烘箱中烘干至恒重,上清液烘干后的质量即为水溶性成分的质量。离心后沉淀的质量即为溶胀米粉的质量。平行试验测定 3 次。具体计算方法见式(1)和(2)。

$$S(\%) = (m_2/m_1) \times 100 \quad (1)$$

$$B(\text{g/g}) = m_3/(m_1 \times (1 - S/100)) \quad (2)$$

式中: $m_1$  为样品质量,g; $m_2$  为水溶性成分的质量,g; $m_3$  为溶胀米粉质量,g。

1.3.3.2 热力学特性测定 参考 Wu 等<sup>[15]</sup>的方法并稍加修改。准确称取 2 mg 样品至铝制 DSC 坩埚中,用微管吸取 4 mL 蒸馏水加入坩埚中。样品盘密封并在 4 °C 冰箱下平衡 24 h 后分析。在 20~100 °C 的温度范围内,以 10 °C/min 的速度加热样

品,使用空平底锅作为参考。平行试验测定 3 次。

1.3.3.3 糊化特性测定 参考《米粉糊化特性的测定-快速粘度仪法》(AACCC61-02)中的方法进行测定。平行测定 3 次。

1.3.3.4 温度扫描测定 参考文献[14,16]中的方法并稍作修改,具体如下:选择直径( $\varphi$ )为 40 mm 的不锈钢平板,平板间距设置为 1 mm,应变设置为 1%(应变在线性黏弹性范围内),振荡频率设置为 1 Hz。将重组粉样品分别配置成质量分数为 10%的悬浮液,用 2 mL 注射器大约取 1.5 mL 悬浮液滴在控温下板的中心位置,待不锈钢平板下降平稳后,清除掉多余的样品,并用二甲基硅油对平板周围进行密封。测试程序主要参数:以 2 °C/min 的速率从 50 °C 升温到 95 °C,平衡 10 s 后,再以相同的速率完成降温过程。

1.3.3.5 频率扫描测定 将 1.3.3.3 节糊化后的样品放至室温冷却,参考文献[17]中的测定方法并稍作修改,具体如下:选择直径( $\varphi$ )为 40 mm 的不锈钢平板,平板间距设置为 1 mm,应变设置为 1%(应变在线性黏弹性范围内),振荡频率设置为 0.1~10 Hz,测试温度为 25 °C。取大约 1.5 mL 糊状样品置于控温下板的中心位置,待不锈钢平板下降平稳后,清除掉平板周围多余的样品,并用二甲基硅油进行密封。记录储存模量( $G'$ )、损耗模量( $G''$ )和损耗角正切( $\tan \delta$ ),平行测定 3 次。

1.3.3.6 冻融稳定性测定 参考文献[18-19]中的方法并稍作修改进行以冻融稳定性的测定,简易装置如图 1 所示,具体操作如下:称取一定量样品配置成 10%的悬浮液(以干基计),在沸水浴中持续搅拌 30 min 使其完全糊化。待样品冷却至室温

后均匀混合,转移约 5 g 样品至 12 mL 注射器管内。冻融循环定义为:先将样品放入-18 °C 冰箱储藏 22 h,再于 30 °C 水浴中解冻 2 h。制备的样品经过 1,2,3,4 次冻融循环后,在 4 000×g 条件下离心 20 min,平行测定 3 次。析水率计算方法见式(3)。

$$\text{析水率}(\%) = (m_b - m_c) / (m_b - m_a) \times 100 \quad (3)$$

式中: $m_a$  为注射器质量,g; $m_b$  为含样品注射器质量,g; $m_c$  离心后含样品注射器的质量,g。

### 1.3.4 米发糕品质测定

1.3.4.1 比容的测定 采用油菜籽替换法测量米发糕的体积,具体参考《体积的测量-油菜籽替代法》(AACCC10-05)中的方法进行测量。

1.3.4.2 质构特性的测定 采用质构分析仪测定发糕的质构性质。将冷却好的发糕切成 2 cm×2 cm×2 cm 的小块,仪器选择全质构分析(TPA)模式,测定参数设置如下:探头为 P36R,触及压力为 5.0 g,测试前速度为 1.0 mm/s,测试速度为 2.0 mm/s,测试后速度为 1.0 mm/s,压缩程度为 40%,2 次压缩的时间间隔为 5 s,平行测定 6 次。

1.3.4.3 纹理特性的测定 参考孙辉等<sup>[20]</sup>的方法,先将米发糕切片,厚度为 1 cm 左右,取最中间的切片放入 C-Cell 图像分析仪中扫描,通过软件分析得到发糕切片的亮度、气孔数、汽孔数量、粗细气孔比等孔隙结构参数。

1.3.4.4 感官评价 参考《食品安全国家标准 糕点、面包》(GB 7099-2015)里对糕点的要求,对曹亚文<sup>[13]</sup>的方法稍作修改。

邀请 12 名接受过感官评定培训的专业人员对不同种类发糕进行感官评价,具体要求如表 1 所示。

1.3.5 数据统计与分析 所有结果均表示为平均值±标准差。采用 SPSS 22.0 软件进行数据分析,并通过单因素方差分析(ANOVA)和 Duncan's 检验进行显著性分析。采用 Origin 2018 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 重组粉溶解度、膨胀势

溶解度能够体现出重组粉中的淀粉和水相互作用的强弱情况<sup>[21]</sup>。由图 2a 可知,米糠添加量为 0%时溶解度为(3.38±0.05)%。随着米糠添加量的



图 1 冻融循环简易装置图

Fig.1 The simple device for freeze-thaw cycles



表1 米发糕感官评定标准表

Table 1 The sensory evaluation standard scale of rice cakes

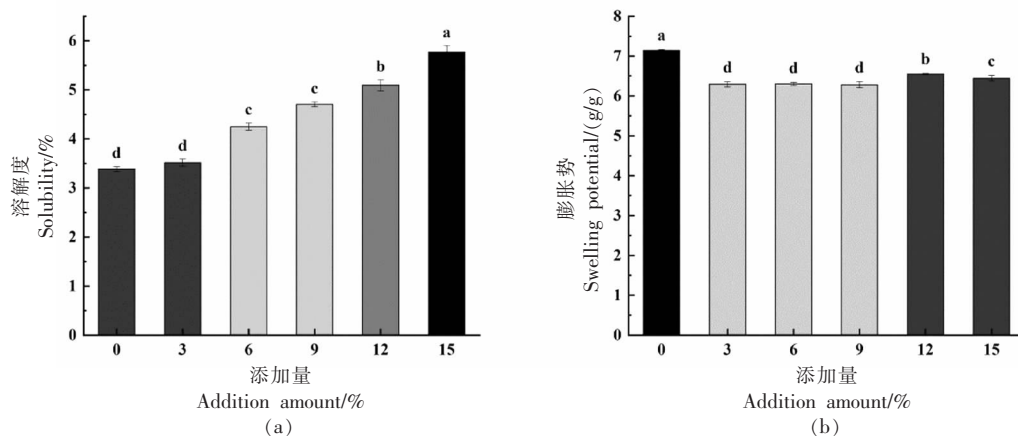
评价指标	较好(7~10分)	一般(4~6分)	差(1~3分)
色泽	颜色明亮,富有均匀光泽	颜色有光泽,稍微发暗	色泽暗,无光泽
形态	形态饱满、表面无凹陷,气孔分布均匀	表面轻微开裂或凹陷,气孔分布较为均匀	表面开裂严重或严重塌陷,气孔大而且不均匀
气味	香味浓郁,有发酵后的香味,无异味	香味较为浓郁,无其它异味	香味淡或有异味
滋味	发酵后的特殊滋味,酸甜度适中,无苦味和其它不良风味口味	滋味较纯正,略有苦味或其它口味	味道淡,过酸或过甜,或有苦味及其它不良风味
口感	口感细腻有弹性,松软适中,不黏牙不掉渣	口感略粗糙,较有弹性,较松软、轻微黏牙或轻微掉渣	口感粗糙,弹性弱,黏牙或掉渣严重

增加,重组粉的溶解度呈现上升趋势,米糠添加量为15%时重组粉的溶解度为(5.77±0.13)%,与未加入米糠的重组粉溶解度相比增加了70.7%,表明常压蒸煮处理米糠的加入能够增强重组粉与水的相互作用,且与米糠的添加量呈正相关关系。研究表明米糠经常压蒸煮处理后,会暴露大量水的结合位点,导致米糠对水的吸收量增多,结合力增强<sup>[22]</sup>。

膨胀势则反映了重组粉的水合能力,其特性主要由支链淀粉决定,直链淀粉由于其特殊的结

构特性对重组粉的膨胀具有抑制作用<sup>[23]</sup>,由图2b可知,米糠添加量为0%时膨胀势为(7.14±0.02)g/g,添加常压蒸煮米糠后的重组粉膨胀势显著降低,不同米糠添加比例的重组粉膨胀势在(6.28±0.07)g/g到(6.55±0.02)g/g之间,变化差异较小,这可能是由于重组粉溶胀过程中米糠中的膳食纤维与淀粉分子竞争水分子造成的。

综上所述,溶解度和膨胀势的变化差异表明稳定化米糠在一定程度上改善了重组米粉的水合作用。



注:不同小写字母表示组间差异显著( $P < 0.05$ )。

图2 不同米糠添加量重组米粉的溶解度(a)和膨胀势(b)

Fig.2 The solubility (a) and swelling potential (b) of recombinant rice flour with different rice bran additions

## 2.2 热力学特性

差式扫描量热仪 DSC 分析结果如表 2 所示,所有样品均只有一个热吸收峰,且吸收峰的范围在 60~90 °C 之间。与 0% 米糠添加量相比,添加米糠的重组粉的  $T_0$  和  $T_p$  显著升高, $T_c$  无显著变化,

而  $\Delta H$  虽然随着米糠添加量的增加先升高后降低,但无显著性差异。 $T_0$  和  $T_p$  的升高可能是由于米糠中的膳食纤维与淀粉分子竞争水分,限制了淀粉的吸水膨胀及延缓糊化过程<sup>[24]</sup>。较低米糠添加量(3%,6%,9%)引起  $\Delta H$  升高的原因可能是由

于米糠中的油脂与淀粉形成了淀粉-脂质复合物导致的,随着米糠添加量的增加体系中淀粉的质

量分数降低,这种稀释作用降低了重组粉的焓值<sup>[25]</sup>。

表 2 重组米粉的热特性

Table 2 The thermal properties of recombinant rice flour

米糠添加量/%	起始温度( $T_0$ )/°C	峰值温度( $T_p$ )/°C	终止温度( $T_c$ )/°C	焓值( $\Delta H$ )/(J/g)
0	66.10 ± 0.14 <sup>a</sup>	80.95 ± 0.21 <sup>b</sup>	86.25 ± 0.35 <sup>a</sup>	9.19 ± 0.61 <sup>a</sup>
3	66.85 ± 0.21 <sup>b</sup>	81.40 ± 0.28 <sup>a</sup>	86.15 ± 0.07 <sup>a</sup>	9.78 ± 0.70 <sup>a</sup>
6	66.85 ± 0.07 <sup>b</sup>	81.50 ± 0.42 <sup>a</sup>	86.25 ± 0.49 <sup>a</sup>	9.33 ± 0.00 <sup>a</sup>
9	67.00 ± 0.00 <sup>b</sup>	81.25 ± 0.07 <sup>a</sup>	86.50 ± 0.20 <sup>a</sup>	9.25 ± 0.41 <sup>a</sup>
12	67.35 ± 0.07 <sup>ab</sup>	81.70 ± 0.14 <sup>a</sup>	86.20 ± 0.44 <sup>a</sup>	9.10 ± 0.05 <sup>a</sup>
15	67.70 ± 0.28 <sup>a</sup>	81.43 ± 0.21 <sup>a</sup>	86.43 ± 0.31 <sup>a</sup>	8.98 ± 0.07 <sup>a</sup>

注:表中数据表示为平均值±标准差,每列中不同字母表示组间具有显著性差异( $P < 0.05$ ),下同。

### 2.3 糊化特性

RVA 糊化特征曲线反映样品在糊化过程中淀粉因加热和冷却而发生的黏度变化情况,由表 3 可知,与 0%米糠添加量相比,添加了常压蒸煮米糠的重组粉峰值黏度(PV)、低谷黏度(TV)、崩解值(BV)值均显著降低,表明米糠的添加抑制了糊化过程中重组粉淀粉颗粒自由膨胀的能力,同时限制了米粉糊的流动性,耐剪切性能提升<sup>[26-27]</sup>。回生值(SV)和糊化温度(PT)值显著升高( $P < 0.05$ ),这可能与重组粉糊体系中淀粉及膳食纤维

等大分子之间的结合与分布有关,促进了米粉糊的回生,此外淀粉与米糠中的油脂形成的淀粉-脂质复合物能使糊化温度升高。随着米糠添加量的增加,重组粉淀粉含量相对降低导致重组粉糊的 PV 值和 BV 值逐渐降低<sup>[28]</sup>,而 SV 值呈现出先升高后降低趋势,表明米糠的添加会促进米粉糊在冷却过程中黏度的增加,回生值增大。当米糠添加量为 15%时,SV 值反而有所下降,可能是由于增大了米粉体系中淀粉结构的紊乱程度,淀粉在冷却过程需要更多的能量聚合与重排<sup>[29]</sup>。

表 3 重组米粉的糊化性质

Table 3 The gelatinization properties of recombinant rice flour

米糠添加量/%	峰值黏度(PV)	低谷黏度(TV)	崩解值(BV)	终值黏度(FV)	回生值(SV)	糊化温度(PT)
0	3 814.50 ± 17.69 <sup>a</sup>	1 999.25 ± 50.64 <sup>a</sup>	1 815.25 ± 50.31 <sup>a</sup>	3 471.00 ± 67.44 <sup>bc</sup>	1 471.75 ± 24.72 <sup>e</sup>	83.80 ± 0.43 <sup>b</sup>
3	3 355.50 ± 81.22 <sup>b</sup>	1 871.00 ± 63.48 <sup>b</sup>	1 484.50 ± 27.01 <sup>b</sup>	3 448.75 ± 54.14 <sup>cd</sup>	1 577.75 ± 14.03 <sup>d</sup>	85.18 ± 0.85 <sup>a</sup>
6	3 155.25 ± 42.58 <sup>c</sup>	1 711.75 ± 38.71 <sup>e</sup>	1 443.50 ± 57.91 <sup>b</sup>	3 376.75 ± 36.32 <sup>e</sup>	1 665.00 ± 5.48 <sup>c</sup>	85.60 ± 0.09 <sup>a</sup>
9	3 098.75 ± 28.46 <sup>cd</sup>	1 786.50 ± 28.17 <sup>cd</sup>	1 312.25 ± 52.54 <sup>c</sup>	3 521.25 ± 20.93 <sup>b</sup>	1 734.75 ± 21.50 <sup>b</sup>	85.58 ± 0.05 <sup>a</sup>
12	3 047.50 ± 9.33 <sup>d</sup>	1 802.50 ± 46.72 <sup>bc</sup>	1 245.00 ± 51.28 <sup>d</sup>	3 608.75 ± 19.19 <sup>a</sup>	1 806.25 ± 41.29 <sup>a</sup>	85.59 ± 0.10 <sup>a</sup>
15	2 767.25 ± 29.42 <sup>e</sup>	1 724.25 ± 46.44 <sup>de</sup>	1 043.00 ± 18.40 <sup>e</sup>	3 392.00 ± 20.99 <sup>de</sup>	1 667.75 ± 49.18 <sup>c</sup>	85.58 ± 0.05 <sup>a</sup>

### 2.4 流变特性

温度扫描包括升温阶段和降温阶段 2 个部分,升温阶段的储能模量( $G'$ )和损耗模量( $G''$ )曲线的变化趋势主要反映了米粉糊化过程体系黏弹性的变化情况;而降温阶段的  $G'$  和  $G''$  曲线的变化趋势是反映了米粉凝胶形成过程体系黏弹性的变化情况。

由图 3a 和 3b 可知,在升温开始阶段,体系的  $G'$  曲线随温度的升高而缓慢增加,当加热到达某一个温度时  $G'$  曲线突然增加并迅速上升,随着温度的升高, $G'$  继续增加达到峰值后又开始快速下降。在降温过程中, $G'$  随着温度的降低又逐渐升高。样品的  $G''$  曲线变化趋势大致与  $G'$  曲线相似,略有不同的是在降温过程中  $G''$  曲线增长趋势更

为平缓。此外,不同米糠添加比例的重组粉  $G'$  和  $G''$  峰值存在较大差异,且峰值出现时间也有所后移,其中 12% 米糠添加量的重组粉  $G'$  和  $G''$  峰值最大,而 6% 米糠添加量的重组粉  $G'$  和  $G''$  峰值最小。

由图 3c、3d 和 3e 可知,所有样品的  $G'$ 、 $G''$  和损耗角正切 ( $\tan\delta, G''/G'$ ) 随着扫描频率的增大而

增大。添加常压蒸煮米糠后,重组粉的  $G'$  显著增加,且随着米糠添加量的增加而增加,表明常压蒸煮米糠的添加能够增强体系的弹性,且与米糠添加量有关; $G''$  的变化趋势与  $G'$  相似,表明常压蒸煮米糠也能在一定程度上增加重组粉体系的黏性;所有样品的  $\tan\delta$  均小于 0.35 (0.1~10 Hz 内),

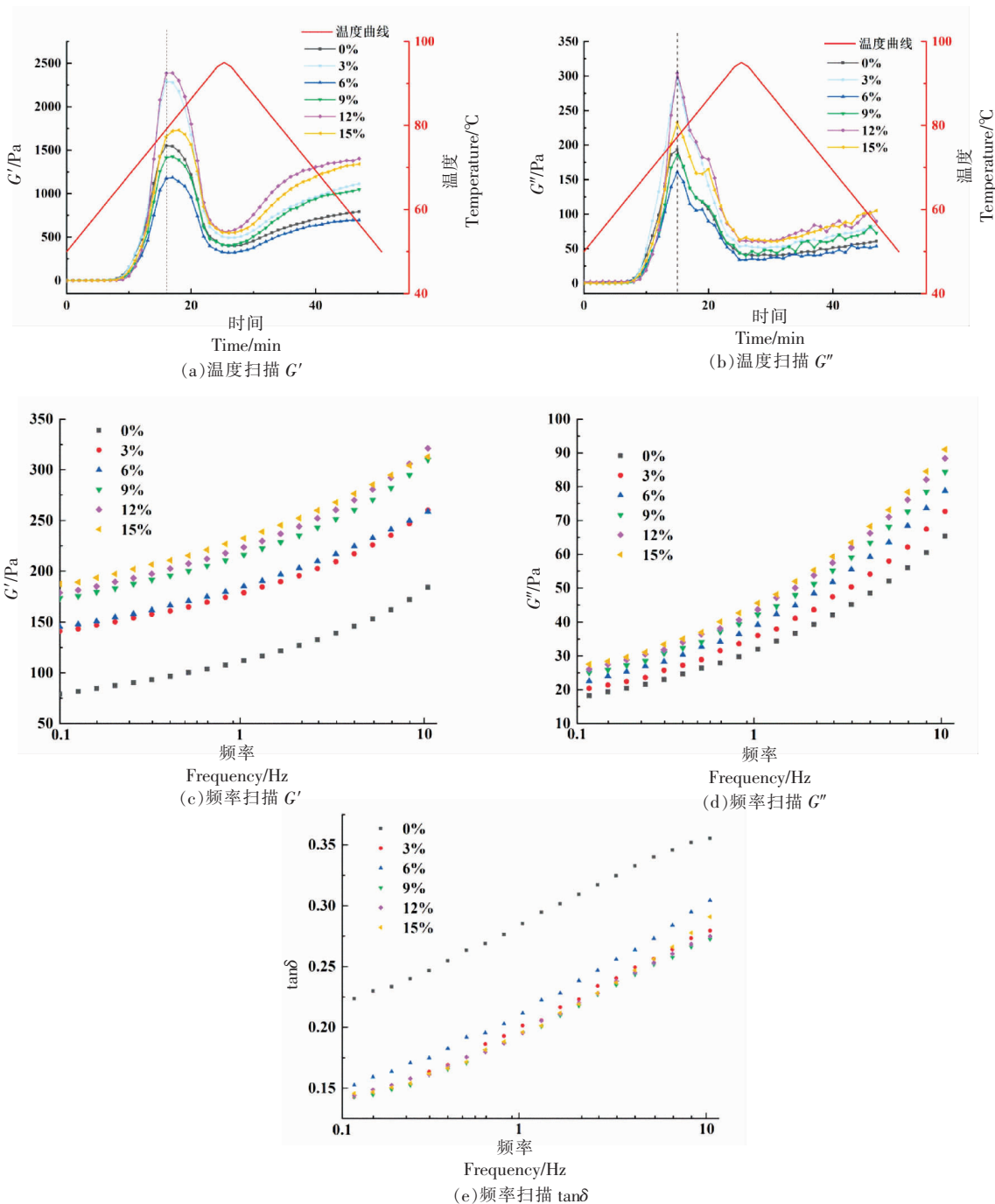


图 3 重组米粉的流变特性

Fig.3 Rheological properties of recombinant rice flour

添加了常压蒸煮米糠的重组粉体系的  $\tan\delta$  更小,表明体系的流动性减弱,显示出更多的固态属性。

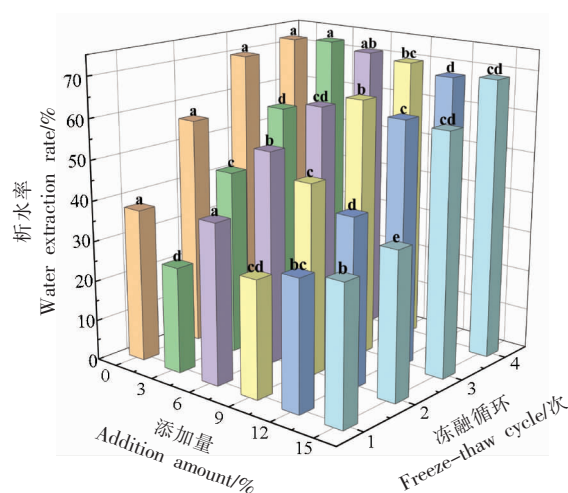
常压蒸煮处理的米糠能够降低米粉体系的黏弹性,体系形变所需能量降低,说明体系内部分子链结构产生了变化使得外界应力能够更好地在分子间传递,分子链规整度下降自由体积增加,减少了分子运动时彼此之间的摩擦<sup>[23]</sup>,这也可能是随着米糠添加量的增加重组粉糊的回生值会增大的原因。换言之,常压蒸煮处理的米糠与籼米粉的结合作用增强,使得整个体系形变能量降低,从而降低了体系的黏弹性。随着米糠添加量的增加,重组粉凝胶体系的弹性增强、黏性增强、流动性减弱,使得凝胶网络结构强度增大。

## 2.5 冻融稳定性

冻融循环会导致米粉凝胶发生脱水收缩,淀粉分子链之间的分子缔合作用在冻融中有所减弱。此外,直链淀粉分子发生逆向降解,导致水分析出<sup>[30-31]</sup>。由图 4 可知,所有样品的析水率随着冻融次数的增加而增加,经 4 次冻融循环后样品的析水率达到 70% 左右。在第 1 次冻融循环后,6% 米糠添加比例的重组粉凝胶与 0% 米糠添加的籼米粉凝胶的析水率无显著性差异,这可能是在该添加量下的重组粉内存在热力学不相容的体系,在糊化过程中形成相对独立的微相<sup>[32]</sup>,从而影响重组粉凝胶冻融后的析水率。其它米糠添加比例的重组粉在第 1 次冻融后析水率显著降低,表明常压蒸煮米糠对重组粉的水合作用具有一定的增强效果。

## 2.6 常压蒸煮米糠添加量对米发糕感官比容的影响

比容可以反映米发糕的体积膨胀程度以及膨



注:同一次冻融样品的不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

图 4 重组米粉凝胶的冻融稳定性

Fig.4 The freeze-thaw stability of recombinant rice powder gel

胀后的持气能力,直接影响产品的外观、组织和口感<sup>[33]</sup>。未添加常压蒸煮米糠的米发糕比容为 $(1.81 \pm 0.06)$  mL/g,添加常压蒸煮米糠后,米发糕的比容显著增加,且随着米糠添加比例的增大而增加,表明米糠的添加能够有效增加米糊发酵时的持气能力,这可能是由于米糠中的纤维与大米淀粉形成网络结构,刚性作用增强,起到一定支撑作用<sup>[13]</sup>。米糠添加比例为 15% 的米发糕的比容为 $(2.29 \pm 0.01)$  mL/g,而米糠添加比例从 3% 到 15%,米发糕的比容仅增长了 10.6%,增长较为缓慢,表明米糠添加到达一定量后对米发糕的比容影响将会减弱。

感官是对食品品质最直观的评价指标。表 4 显示了不同米糠添加比例的米发糕在色泽、形态、气味、滋味、口感及总分的差异性,可以看 12% 和

表 4 常压蒸煮米糠添加对米发糕品质的影响

Table 4 Effects of rice bran additions on the quality of rice cake

米糠添加量/ %	感官评分						比容/(mL/g)
	色泽/分	形态/分	气味/分	滋味/分	口感/分	总分/分	
0	$7.5 \pm 0.3^a$	$6.5 \pm 0.4^b$	$6.2 \pm 0.2^{ab}$	$7.5 \pm 0.4^a$	$8.0 \pm 0.2^a$	$35.7 \pm 0.3^a$	$1.81 \pm 0.06^d$
3	$7.1 \pm 0.2^{ab}$	$7.4 \pm 0.2^a$	$6.2 \pm 0.2^{ab}$	$7.5 \pm 0.4^a$	$7.3 \pm 0.1^b$	$35.5 \pm 0.2^a$	$2.07 \pm 0.01^e$
6	$6.7 \pm 0.1^b$	$7.5 \pm 0.1^a$	$6.4 \pm 0.3^a$	$7.3 \pm 0.2^a$	$7.1 \pm 0.1^b$	$35.0 \pm 0.2^a$	$2.10 \pm 0.03^e$
9	$6.5 \pm 0.2^b$	$7.6 \pm 0.2^a$	$6.2 \pm 0.1^{ab}$	$6.7 \pm 0.2^a$	$5.5 \pm 0.1^c$	$32.5 \pm 0.1^b$	$2.14 \pm 0.03^{bc}$
12	$5.5 \pm 0.1^c$	$7.7 \pm 0.2^a$	$5.7 \pm 0.2^{ab}$	—	—	$20.9 \pm 0.2^e$	$2.19 \pm 0.04^b$
15	$5.4 \pm 0.2^c$	$7.6 \pm 0.2^a$	$5.6 \pm 0.2^b$	—	—	$20.6 \pm 0.3^e$	$2.29 \pm 0.01^a$

注:“—”表示没有相应分数;同列不同字母表示差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。



15%米糠添加比例的米发糕无滋味和口感分数,是由于在该米糠添加比例下的米发糕口感粗糙,适口性极差,已不适合食用。3%和6%添加比例的米发糕感官总分数与白米发糕的感官评分无显著差异,说明在该添加比例下米发糕的感官整体较优。9%常压蒸煮米糠添加比例的米发糕虽然感官评分上与白米发糕存在显著性差异,但其感官还在消费者可接受范围之内,可作为高膳食纤维食品的选择。

## 2.7 米发糕质构特性

质构特性是评价发糕品质的一个重要指标。有研究表明优良的米发糕应该具有较小的硬度和较大的弹性,且容易咀嚼<sup>[34]</sup>。由表5可知,与未添加米糠的米发糕相比,添加了常压蒸煮米糠后的米发糕硬度、黏性、弹性、黏聚性、胶黏性、咀嚼度、

恢复性均不同程度地降低,说明米糠的常压蒸煮处理有助于米发糕质构品质的改善。这可能与体系内部大分子间的结合作用,限制了米淀粉的聚集,从而减弱了淀粉分子间的相互作用力有关<sup>[35]</sup>,其中黏性是极显著地降低,这与流变特性的结果相符,添加米糠后重组粉凝胶的黏弹性降低。硬度、胶黏性、咀嚼度显著降低,这是品质优良的发糕该具备的性质,随着米糠添加比例的增大,胶黏性和咀嚼度逐渐降低,表明米发糕结构会随着米糠添加比例的增加变得更松软容易咀嚼。米糠添加比例低于9%时的米发糕具有与白米发糕相近的弹性,表明在该米糠添加量下,发糕依旧能够保持一定的凝胶网络结构强度。整体而言,常压蒸煮米糠的添加对于米发糕的质构品质具有较为显著的改善。

表5 不同发糕的质构特性

Table 5 The texture properties of different rice cakes

米糠添加量/%	硬度/g	黏性/g·s	弹性	黏聚性	胶黏性	咀嚼度	恢复性/g
0	441.01 ± 15.79 <sup>a</sup>	32.27 ± 2.14 <sup>a</sup>	0.90 ± 0.04 <sup>a</sup>	0.80 ± 0.02 <sup>a</sup>	352.26 ± 3.03 <sup>a</sup>	317.21 ± 12.70 <sup>a</sup>	0.43 ± 0.03 <sup>a</sup>
3	309.44 ± 16.60 <sup>b</sup>	1.23 ± 0.46 <sup>b</sup>	0.88 ± 0.04 <sup>a</sup>	0.77 ± 0.01 <sup>a</sup>	240.34 ± 14.05 <sup>b</sup>	213.03 ± 19.17 <sup>b</sup>	0.41 ± 0.01 <sup>a</sup>
6	290.40 ± 10.50 <sup>b</sup>	0.29 ± 0.24 <sup>c</sup>	0.86 ± 0.03 <sup>a</sup>	0.77 ± 0.01 <sup>a</sup>	220.28 ± 6.12 <sup>bc</sup>	190.56 ± 5.05 <sup>bc</sup>	0.39 ± 0.01 <sup>b</sup>
9	315.83 ± 15.94 <sup>b</sup>	0.57 ± 0.21 <sup>c</sup>	0.81 ± 0.03 <sup>b</sup>	0.75 ± 0.00 <sup>b</sup>	218.64 ± 30.56 <sup>bc</sup>	176.66 ± 29.30 <sup>c</sup>	0.38 ± 0.00 <sup>c</sup>
12	302.38 ± 27.30 <sup>b</sup>	0.14 ± 0.16 <sup>c</sup>	0.64 ± 0.03 <sup>d</sup>	0.65 ± 0.02 <sup>d</sup>	197.54 ± 14.85 <sup>cd</sup>	132.20 ± 13.45 <sup>d</sup>	0.30 ± 0.01 <sup>c</sup>
15	238.06 ± 16.76 <sup>c</sup>	0.44 ± 0.31 <sup>c</sup>	0.76 ± 0.04 <sup>c</sup>	0.70 ± 0.01 <sup>c</sup>	167.49 ± 12.24 <sup>d</sup>	128.73 ± 7.63 <sup>d</sup>	0.34 ± 0.01 <sup>d</sup>

## 2.8 米发糕纹理特性

产品的内部结构与产品品质存在很大的相关性,因此发糕内部结构也可作为评判发糕品质好、坏的重要因素。所有制作的发糕表面均未发生龟裂现象,图5为不同米糠添加比例的米发糕的侧面图,由图可看出未添加米糠的白米发糕孔隙大且不均匀,顶部还有轻微塌陷,表明白米粉糊在发酵过程中形成的凝胶网络强度较弱,发酵产生的气体聚集形成大的孔隙结构。添加米糠后的米发糕气孔显著增多且更小更均匀,说明米糠的添加增强了凝胶网络结构的强度,使发酵产生的气体无法大量聚集,进而形成均匀的小孔隙。研究表明添加米糠能增强无麸质面包的持气能力,这可能与米糠中的蛋白质和膳食纤维有关<sup>[36]</sup>。

表6为常压蒸煮米糠添加比例的米发糕纹理

特性指标参数,通过C-Cell图像分析仪将发糕的侧面结构进行数字化表示,准确直观地体现不同发糕切面结构间的差异性。从表中数据可知,添加了米糠的米发糕颜色变暗,且颜色随着米糠添加量而加深。0%米糠添加的白米发糕气孔数量为(331.33±19.04),添加常压蒸煮米糠的米发糕的气孔数量显著增加,气孔数量达到(428.75±53.91)到(515.00±30.89)范围,壁厚显著降低,粗/细气孔比降低,孔面积比例增加。随着常压蒸煮米糠添加量的增加,米发糕的气孔数量先增加后减少,粗/细气孔比呈现上升趋势,尤其是12%和15%米糠添加比例的米发糕,出现较多的粗气孔,顶部弧度也有所降低。从米发糕的纹理特性变化可知常压蒸煮米糠添加一定比例对于米发糕的外观品质具有显著的改善作用。



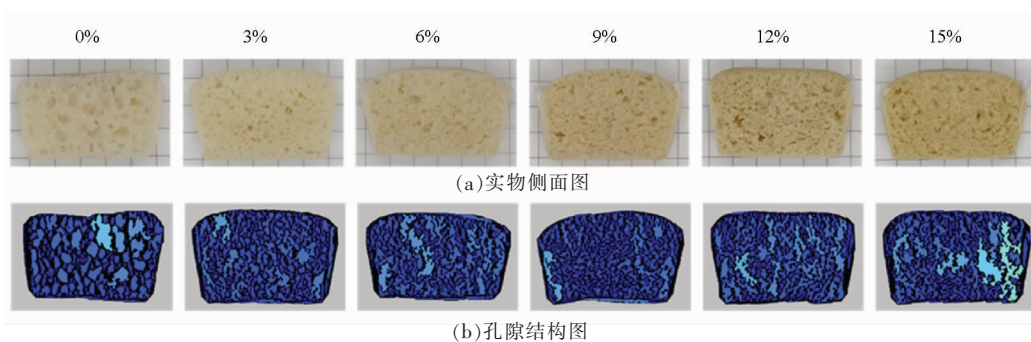


图5 不同米发糕的切面照片

Fig.5 The slices images of different rice cakes

表6 常压蒸煮米糠添加的米发糕纹理特性

Table 6 The texture characteristics of rice cake added to rice bran by atmospheric pressure cooking

米糠添加量/%	亮度	气孔数量	孔面积/%	壁厚/mm	孔直径/mm	粗/细气孔比	粗孔体积	面积/mm <sup>2</sup>	周长/mm
0	166.30 ± 5.09 <sup>a</sup>	331.33 ± 19.04 <sup>c</sup>	49.00 ± 1.34 <sup>a</sup>	4.77 ± 0.18 <sup>a</sup>	20.71 ± 2.50 <sup>ab</sup>	0.44 ± 0.20 <sup>a</sup>	16.15 ± 2.61 <sup>c</sup>	53 288.17 ± 1 388.70 <sup>b</sup>	921.33 ± 18.27 <sup>ab</sup>
	161.95 ± 3.73 <sup>a</sup>	428.75 ± 53.91 <sup>b</sup>	49.48 ± 0.47 <sup>a</sup>	3.98 ± 0.16 <sup>b</sup>	16.91 ± 1.42 <sup>b</sup>	0.26 ± 0.10 <sup>a</sup>	14.70 ± 1.55 <sup>c</sup>	54 671.50 ± 1 747.16 <sup>b</sup>	914.25 ± 13.65 <sup>b</sup>
3	156.25 ± 3.01 <sup>a</sup>	449.25 ± 33.35 <sup>b</sup>	49.80 ± 0.65 <sup>a</sup>	3.98 ± 0.05 <sup>b</sup>	18.68 ± 1.07 <sup>ab</sup>	0.35 ± 0.04 <sup>a</sup>	17.37 ± 3.86 <sup>bc</sup>	57 039.75 ± 3 870.99 <sup>ab</sup>	927.00 ± 29.02 <sup>ab</sup>
	144.98 ± 5.01 <sup>b</sup>	482.33 ± 6.43 <sup>ab</sup>	49.45 ± 0.83 <sup>a</sup>	3.75 ± 0.26 <sup>b</sup>	16.50 ± 2.81 <sup>b</sup>	0.34 ± 0.15 <sup>a</sup>	16.48 ± 3.06 <sup>c</sup>	58 852.50 ± 1 062.04 <sup>a</sup>	935.00 ± 10.80 <sup>ab</sup>
6	144.10 ± 3.62 <sup>b</sup>	515.00 ± 30.89 <sup>a</sup>	50.35 ± 0.53 <sup>a</sup>	3.86 ± 0.07 <sup>b</sup>	21.77 ± 3.11 <sup>a</sup>	0.42 ± 0.19 <sup>a</sup>	21.82 ± 4.87 <sup>ab</sup>	58 144.00 ± 1 999.89 <sup>ab</sup>	946.25 ± 16.68 <sup>a</sup>
	135.28 ± 4.04 <sup>c</sup>	485.50 ± 41.65 <sup>ab</sup>	50.45 ± 1.01 <sup>a</sup>	3.87 ± 0.12 <sup>b</sup>	20.00 ± 2.72 <sup>ab</sup>	0.44 ± 0.05 <sup>a</sup>	22.66 ± 1.53 <sup>a</sup>	55 426.00 ± 1 510.18 <sup>ab</sup>	919.25 ± 16.76 <sup>ab</sup>

### 3 结论

不同添加比例(0%,3%,6%,9%,12%,15%)的常压蒸煮预处理米糠显著改变了重组米粉的粉质特性,对米发糕的品质也有积极影响。以未添加米糠的米粉为对照,发现添加常压蒸煮米糠的重组粉在溶解度、膨胀势、热特性、糊化特性、流变特性及冻融稳定性上发生显著改变,尤其是水合作用的加强,重组粉凝胶体系的弹性和黏性增强,流动性减弱,显示更多的固态属性,冻融析水率降低,表明加入常压蒸煮米糠能有效调控大米淀粉基食品的凝胶特性。

添加常压蒸煮米糠的重组米粉制备的米发糕在外观形态、质构特性、孔隙结构等方面具有积极的影响,米糠添加量在9%以内,感官上能被消费者接受,表明重组米粉应用于制备发糕产品是可

行的,同时常压蒸煮处理的米糠具有较大的食品工业应用潜力。

### 参 考 文 献

- [1] REN H B, QI S M, ZHANG L H, et al. Variations in the appearance quality of brown rice during the four stages of milling[J]. Journal of Cereal Science, 2021, 102: 103344.
- [2] 高琨, 姜平, 谭斌, 等. 稻米及其加工副产物米糠中 $\gamma$ -谷维素研究现状[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(5): 91-98.
- GAO K, JIANG P, TAN B, et al. Research progress on  $\gamma$ -oryzanol in rice and its processed by-product rice bran[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(5): 91-98.

- [3] 李向菲, 沈丹, 黄俊凯, 等. 米糠功能活性成分及其功效的研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(13): 466-474.  
LI X F, SHEN D, HUANG J K, et al. Research progress on functional active components and its efficacy in rice bran[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(13): 466-474.
- [4] 马宗会, 殷宝茹, 张海, 等. 食品级米糠的研究进展及前景展望[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(5): 11-20, 11.  
MA Z H, YIN B R, ZHANG H, et al. Research progress and outlook of food grade rice bran[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(5): 11-20, 11.
- [5] 李长乐, 方冬冬, 师园园, 等. 稻谷加工副产品米糠的综合利用现状分析[J]. 粮食加工, 2017, 42(3): 27-30.  
LI C L, FANG D D, SHI Y Y, et al. Comprehensive utilization of rice bran as a by-product of rice processing[J]. Food Processing, 2017, 42(3): 27-30.
- [6] WU X J, LI F, WU W. Effects of rice bran acidity on the oxidation and structural characteristics of rice bran protein[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 120(C): 108943.
- [7] 郭轩宇, 侯恒亮, 路建强, 等. 米糠热稳定化技术的研究进展[J]. 现代面粉工业, 2020, 34(3): 26-29.  
GUO X Y, HOU H L, LU J Q, et al. Research progress of heat stabilization technology of rice bran[J]. Modern flour industry, 2020, 34(3): 26-29.
- [8] WANG P, YANG Q Y, ZHENG D M, et al. Physicochemical and antioxidant properties of rice flour based extrudates enriched with stabilized rice bran[J]. Starch-Stärke, 2018, 70(9/10): 1800050.
- [9] MENDES L R D G, RODRIGUES S P, SALAS-MELLADO M L D M, et al. Defatted rice bran as a potential raw material to improve the nutritional and functional quality of cakes[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2021, 76(1): 46-52.
- [10] CAO Y W, ZHAO J W, JIN Z Y, et al. Improvement of rice bran modified by extrusion combined with ball milling on the quality of steamed brown rice cake[J]. Journal of Cereal Science, 2021, 99: 103229.
- [11] 梁言. 乳杆菌与酵母发酵籼米粉浆及制备米发糕的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.  
LIANG Y. Study on the fermentation of indica rice flour slurry by *Lactobacillus* and yeast and the preparation of fermented rice cake[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [12] FENG W, ZHANG H, WANG R, et al. Modifying the internal structures of steamed rice cakes by emulsifiers for promoted textural and sensory properties[J]. Food Chemistry, 2021, 354: 129469.
- [13] 曹亚文. 米糠的微细化、性质及其在糙米发糕中的应用[D]. 无锡: 江南大学, 2021.  
CAO Y W. The micronization and properties of rice bran and its application in steamed brown rice cake[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.
- [14] 许柠. 米糠膳食纤维和阿魏酸协同对籼米淀粉性质的影响研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2021.  
XU N. Study on the synergistic effect of rice bran dietary fiber and ferulic acid on the properties of indica rice starch[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2021.
- [15] WU Y, CHEN Z X, LI X J, et al. Retrogradation properties of high amylose rice flour and rice starch by physical modification[J]. LWT-Food Science and Technology, 2010, 43(3): 492-497.
- [16] 郭瑾. 不完全糊化淀粉的流变特性及凝胶特性的研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2019.  
GUO J. Study on rheological properties and gel properties of incomplete gelatinized starch[D]. Xi'an: Shanxi University of Science and Technology, 2019.
- [17] GENG D H, LIN Z X, LIU L, et al. Effects of ultrasound-assisted cellulase enzymatic treatment on the textural properties and *in vitro* starch digestibility of brown rice noodles[J]. LWT, 2021, 146: 111543.
- [18] 叶江平. 挤压改性影响大米淀粉冻融稳定性和体外消化性的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2019.  
YE J P. Effects of extrusion modification on freeze-thaw stability and *in vitro* digestibility of rice starch[D]. Nanchang: Nanchang University, 2019.
- [19] KATEKHONG W, CHAROENREIN S. The effect of rice aging on the freeze-thaw stability of rice flour gels[J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 89(3): 777-782.
- [20] 孙辉, MACRITCHIE F. 利用图像分析技术评价发酵面食品品质的研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2011, 32(4): 59-62, 67.

- SUN H, MACRITCHIE F. Study on evaluation of fermented noodle food quality by image analysis technology[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2011, 32(4): 59-62, 67.
- [21] 张亭亭, 邢贝贝, 赵强, 等. 挤压膨化处理对婴幼儿米粉理化和体外消化特性的影响[J]. 中国食品学报, 2020, 20(1): 158-165.
- ZHANG T T, XING B B, ZHAO Q, et al. Effects of extrusion treatment on physicochemical and *in vitro* digestibility of infant rice powder[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(1): 158-165.
- [22] 高晨. 不同稳定化处理的米糠在贮藏过程中风味物质的组成分析[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
- GAO C. Analysis of flavor components of rice bran under different stabilization treatments during storage [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.
- [23] 尚加英. 小麦淀粉颗粒大小对挂面品质影响及机理研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2022.
- SHANG J Y. Effect of grain size of wheat starch on noodle quality and its mechanism [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2022.
- [24] 王日思, 万婕, 刘成梅, 等. 不同分子量大豆可溶性膳食纤维对大米淀粉糊化及流变性质的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(6): 124-127, 132.
- WANG R S, WAN J, LIU C M, et al. Effects of soybean soluble dietary fiber with different molecular weight on gelatinization and rheological properties of rice starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(6): 124-127, 132.
- [25] 廖卢艳, 吴卫国. 不同淀粉糊化及凝胶特性与粉条品质的关系[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 332-338.
- LIAO L Y, WU W G. Relationship between gelatinization and gelatinization of different starch and vermicelli quality[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(15): 332-338.
- [26] YE L X, WANG C S, WANG S J, et al. Thermal and rheological properties of brown flour from indica rice[J]. Journal of Cereal Science, 2016, 70: 270-274.
- [27] 潘治利, 张垚, 艾志录, 等. 马铃薯淀粉糊化和凝胶特性与马铃薯粉品质的关系[J]. 食品科学, 2017, 38(5): 197-201.
- PAN Z L, ZHANG Y, AI Z L, et al. Relationship between gelatinization and gelation characteristics of potato starch and quality of potato meal[J]. Food Science, 2017, 38(5): 197-201.
- [28] 周艳青, 杨英, 周娇娇, 等. 米糠膳食纤维对大米粉糊化特性的影响[J]. 粮食与油脂, 2018, 31(12): 64-67.
- ZHOU Y Q, YANG Y, ZHOU J J, et al. Effect of dietary fiber from rice bran on the pasting properties of rice flour[J]. Cereals and Oil, 2018, 31(12): 64-67.
- [29] 任国宝, 任晨刚, 郇美丽, 等. 膳食纤维对小麦粉品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(2): 6-11, 55.
- REN G B, REN C G, HUAN M L, et al. Effects of dietary fiber on wheat flour quality[J]. Journal of Grain and Oils of China, 2020, 35(2): 6-11, 55.
- [30] 赵安琪, 于雷, 杨未, 等. 冻融处理对淀粉颗粒结构和性质影响的研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2017(7): 203-208.
- ZHAO A Q, YU L, YANG M, et al. Research progress in the effect of freeze-thawing treatment on starch granules[J]. China Food Additives, 2017(7): 203-208.
- [31] YE J P, HU X T, ZHANG F, et al. Freeze-thaw stability of rice starch modified by improved extrusion cooking technology[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 151: 113-118.
- [32] 顾龙飞, 景宜. 马来酸酐接枝聚乳酸与淀粉共混物的研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2013, 37(6): 111-115.
- GU L F, JING Y. Study on Starch blend grafted with Maleic anhydride[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2013, 37(6): 111-115.
- [33] HONDA Y J, INOUE N, KURITA M, et al. Alpha-glutelin degradation and its hydrolysate by protease enhance the specific volume of gluten-free rice starch bread[J]. Journal of Cereal Science, 2021, 102: 103338.
- [34] 沈伊亮. 米发糕品质评价与加工工艺的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009.
- SHEN Y L. Study on quality evaluation and processing technology of rice cake[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009.
- [35] ZHANG B, BAI B, PAN Y, et al. Effects of

pectin with different molecular weight on gelatinization behavior, textural properties, retrogradation and *in vitro* digestibility of corn starch[J]. Food Chemistry, 2018, 264: 58–63.

[36] PHIMOLSIRIPOL Y, MUKPRASIRT A, REGINE S,

et al. Quality improvement of rice-based gluten-free bread using different dietary fibre fractions of rice bran[J]. Journal of Cereal Science, 2012, 56(2): 389–395.

### Effects of Rice Bran Treated by Atmospheric Pressure Cooking on the Properties of Indica Rice Flour and the Quality of Rice Cake

Li Jia<sup>1,2</sup>, Wu Nana<sup>1</sup>, Liu Chun<sup>2</sup>, Qiao Congcong<sup>1</sup>, Tian Xiaohong<sup>1</sup>, Tan Bin<sup>1\*</sup>

(<sup>1</sup>Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037)

(<sup>2</sup>College of Food Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004)

**Abstract** The rice bran (0%, 3%, 6%, 9%, 12% and 15%) treated by atmospheric pressure cooking were added into indica rice flour, and the effects of rice bran addition on the properties of indica rice flour and the quality of rice cake was investigated. The results showed that atmospheric pressure cooking of rice bran could increase the solubility of reconstituted powder, and the solubility increased with the increase of rice bran addition amount. When the rice bran addition was 15%, the solubility of reconstituted powder increased by 70.7% compared with the control group. The swelling potential of reconstituted powder was reduced by atmospheric pressure cooked rice bran. In addition, the fluidity of the reconstituted paste was weakened, the shear resistance was improved, and the gelling property was enhanced. The elasticity and viscosity of the recombinant powder gel system were enhanced, and the freeze-thaw water extraction rate was reduced, which indicated that rice bran with atmospheric pressure cooking treatment could effectively regulate the gel properties of rice starch based food. The index test results of rice cake also showed that the specific volume of rice cake was significantly increased by the addition of atmospheric pressure cooked rice bran, and the specific volume of rice cake increased with the increase of rice bran addition amount. The specific volume of rice cake containing 15% rice bran increased by 26.5% compared with white rice cake. The texture characteristics and pore structure of rice cake were also significantly improved by the addition of atmospheric pressure cooked rice bran. When the addition amount of rice bran was less than 9%, the sense of rice cake could be accepted by consumers. The results indicated that rice bran prepared from atmospheric pressure cooking treatment could improve the quality of rice cake and was a potential food raw material.

**Keywords** rice bran treated by atmospheric pressure cooking; properties of reconstituted rice flour; rice cake; quality characteristics