

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.80232

差异化蛋白脱除对早籼米粉性质的影响

曹怡君^{1,2} 冯伟^{1,2} 王韧^{1,2} 张昊^{1,2,3} 王涛^{1,2}

(1. 江南大学粮食发酵与食品生物制造国家工程研究中心, 江苏 无锡 214122; 2. 江南大学食品学院, 江苏 无锡 214122; 3. 南京农业大学食品科技学院, 江苏 南京 210095)

摘要: [目的] 探究差异化脱蛋白对米粉理化功能性质的影响机制。[方法] 采用酶法、碱法对米粉进行差异化蛋白脱除, 并对脱蛋白米粉的破损淀粉含量、粒径分布、颗粒表观形态、溶解度、膨润力、糊化特性及质构特性进行分析。[结果] 蛋白凝胶电泳(SDS-PAGE)和激光共聚焦(CLSM)结果表明, 碱法是等比例脱除各蛋白亚基, 而酶法对淀粉颗粒表面蛋白脱除的均一性更好; 原粉粒径分布的主峰大约在 70 μm 处, 而脱蛋白米粉的主峰则向左偏移至 6 μm 处; 随着蛋白含量的降低, 脱蛋白米粉的破损淀粉含量呈下降趋势, 而弹性、硬度显著升高, 其中酶法 3% 米粉的粒径分布最为均一, D_{90} 最小 (23.58 μm), 破损淀粉含量也由原粉的 3.32% 降低至 1.48%, 而弹性和硬度相比原粉分别提高了 54.55%, 52.60%; 与原粉相比, 脱蛋白米粉具有较低的峰值黏度、崩解值和最终黏度, 其中酶法 3% 米粉的崩解值和回生值均最小, 说明其热糊稳定性最好, 且不易回生。[结论] 碱法和酶法均能有效脱除蛋白, 提升早籼米粉的粉质特性, 相比之下酶法处理条件更加温和, 蛋白和粒径分布更加均一, 抑制回生效果更明显。

关键词: 早籼米粉; 脱蛋白; 碱法; 酶法

Effects of differential protein removal on the properties of early indica rice flour

CAO Yijun^{1,2} FENG Wei^{1,2} WANG Ren^{1,2} ZHANG Hao^{1,2,3} WANG Tao^{1,2}

(1. National Engineering Research Center for Cereal Fermentation and Food Biomanufacturing, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China; 2. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China; 3. College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China)

Abstract: [Objective] To investigate the mechanism of the effect of deproteinisation on the physicochemical and functional properties of rice flour. [Methods] Enzymatic and alkaline methods were used to remove protein from early rice flour, and the damaged starch content, size distribution, morphology, solubility, swelling power, pasting characteristics and textural characteristics of the deproteinized rice flour were analyzed. [Results] Sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE) and confocal laser scanning microscope (CLSM) showed that the alkaline method equally removed the protein subunit where as the enzymatic method showed a better homogeneity of protein removal from the surface of starch. The size distribution of the control showed a major peak at ca. 70 μm and it shifted to 6 μm after protein removal. With the reduction of the protein content, and the damaged starch content of the deproteinized rice flour decreased while its elasticity and hardness increased. The deproteinized rice flour with 3.0% of protein (RFA@3.0), which was treated by alkaline method, showed a most uniform particle distribution, and a minimum D_{90} of 23.58 μm was observed. When compared to the control, its damaged starch content decreased from 3.32% to 1.48% while the elasticity and hardness increased by 54.55%, 52.60%, respectively. The deproteinized rice flour had lower peak viscosity, breakdown viscosity and final viscosity than the control, and the RFA@3.0 had minimum breakdown and setback viscosities, which indicated that it exhibited best paste stability and was difficult to retrograde. [Conclusion] The protein removal by alkaline and enzymatic methods can improve the properties of early indica rice flour. The enzymatic method has mild reaction conditions and the result and products has better protein and size distribution and are more difficult to retrograde than the rice flour that treated by alkaline method.

Keywords: early indica rice flour; deproteinization; alkaline method; enzymatic method

基金项目: 国家重点研发计划项目 (编号: 2023YFD2100803)

通信作者: 王涛 (1989—), 男, 江南大学副研究员, 博士。E-mail: twang3813@gmail.com

收稿日期: 2024-03-12 改回日期: 2024-07-01

中国籼稻产量世界第一,同时也是全球籼米消费第一大国。早籼稻因直链淀粉含量高、食用品质差,一般不用作口粮,而是用来加工成米线、米糕等米制品^[1-2]。中国米制品种类繁多,但是原料的标准化、专用化程度低,极大限制了米制品加工业的发展。蛋白作为大米的第二大组成成分,主要分布在大米胚乳中^[3]。籼米的蛋白含量一般为6%~8%^[4],虽占比不高,却对籼米及其米制品的感官质构有着重要影响。研究表明,在米粉中外源添加大米蛋白会降低米粉的硬度和咀嚼性,但是峰值时间和糊化温度升高^[5],而降低蛋白含量则会降低米粉的成糊温度、提高米粉的硬度、内聚性和咀嚼性^[6-7]。因此,相比于外源添加蛋白,对米粉进行蛋白脱除显得更有意义。

目前,脱除米粉中蛋白的方法主要有碱法、酶法和表面活性剂法。其中,表面活性剂法由于成本高、回收难,尚且停留在实验室阶段^[8-10]。工业上常用碱法和酶法脱除蛋白,碱法是通过碱液使蛋白与淀粉紧密结合的结构变得疏松,从而促进蛋白的脱除,具有效率高、操作简单等特点,但会产生碱性废液,导致设备腐蚀和环境污染^[11]。酶法是利用蛋白酶将蛋白降解为可溶的小分子肽,进而与淀粉分离,具有反应温和、对淀粉破坏程度小、营养物质不易被破坏等特点^[12]。Puchongkanarin^[13]对比了碱法、酶法对米粉的蛋白脱除率和破损淀粉的影响,发现酶法蛋白脱出率低于碱法,但是酶法米粉有着更高的总淀粉含量和更低的破损淀粉。马申嫣等^[14]比较了碱法、中性蛋白酶法、碱性蛋白酶法(pH为8,10)4种制备大米淀粉的工艺,发现碱法的脱除率高于酶法,其颗粒分布不够均匀。综上,碱法和酶法对蛋白的脱除机理不同,导致米粉中残留蛋白的组成、结构也存在差异,进而影响米粉的粉质特性,然而目前针对该方面的研究尚未见报道。研究拟选取早籼米粉为考察对象,借助碱法、酶法对其进行差异化蛋白脱除,探明差异化脱蛋白对米粉理化功能性质的影响机制,以期为米制品专用粉的标准化提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

早籼米粉:湖南聚宝金昊生物科技有限公司;

酸性蛋白酶:酶活 2×10^5 U/g,南宁庞博生物工程有限公司;

α -淀粉酶:酶活3 000 U/g,梯希爱(上海)化成工业发展有限公司;

其他试剂均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

低速大容量多管离心机:LXJ-IIB型,上海安亭科学仪器厂;

消化炉:HYP-314型,上海纤检仪器有限公司;

pH计:SevenEasy型,瑞士梅特勒—托利多公司;

电子天平:PL2002型,瑞士梅特勒—托利多公司;

搅拌机:HR 2168型,飞利浦家用电器有限公司;

数显鼓风干燥箱:GZX-9246 MBE型,上海博讯医疗设备厂;

激光粒度分布仪:BT-9300S型,丹东百特仪器有限公司;

快速黏度分析仪:RVA 4500型,澳大利亚波通公司;

紫外分光光度计:UV-3200型,上海美谱达仪器有限公司;

扫描电子显微镜:SU8100型,日本株式会社日立高新技术公司;

激光共聚焦显微镜:Carl Zeiss LSM880型,德国卡尔蔡司公司。

1.3 试验方法

1.3.1 早籼米粉的制备

(1) 酶法脱蛋白米粉制备:米粉按液比($m_{\text{米粉}}:m_{\text{水}}$)1:5浸泡于去离子水中,用盐酸调节pH值至3.5,使用酶反应器维持温度为50℃,体系pH和温度稳定后加入酸性蛋白酶反应一定时间,反应结束后离心水洗去除上层分离物,重复3次,50℃烘干,研磨,过100目筛备用。按GB 5009.5—2016测定米粉中蛋白含量。参照周建新等^[15]的方法,以早籼米粉的蛋白含量为指标,利用Origin软件对不同酶活条件下的酶解反应进程进行数学拟合,其他反应条件为反应温度50℃、pH 3.5、料液比($m_{\text{米粉}}:m_{\text{水}}$)1:5。根据上述得到的回归方程分别计算出理论反应时间,按照理论反应时间控制酶反应进程制备出不同蛋白含量(6.0%,3.0%)的早籼米粉。

(2) 碱法脱蛋白米粉制备:参照Sun等^[16]的方法,将早籼米粉以料液比($m_{\text{米粉}}:m_{\text{NaOH溶液}}$)1:5浸泡于一定浓度的NaOH溶液中,反应一定时间,4 000 r/min离心10 min,弃去上层液体,重复水洗3次,50℃烘干,研磨,过100目筛后备用。利用Origin软件对碱法反应进程进行数学拟合,其他反应条件为反应温度25℃,料液比($m_{\text{米粉}}:m_{\text{NaOH溶液}}$)1:5。按照理论反应时间制备出不同蛋白含量(6.0%,3.0%)的早籼米粉。

1.3.2 破损淀粉含量测定 按GB/T 9826—2008执行。

1.3.3 蛋白凝胶电泳分析(SDS-PAGE) 参照刘爱民等^[17]的方法。

1.3.4 粒径分布测定 取不同方法制备的米粉样品配制成5%的溶液,加入到激光粒度分布仪中,折射率为10%~15%,采用连续测试模式测定淀粉粒径。

1.3.5 颗粒形貌表征

(1) 扫描电镜(SEM):将米粉样品用导电胶固定至铝制载物台上,喷金,采用3.0 kV加速电压拍摄图像,以800倍的放大倍率观察米粉样品图像。

(2) 激光共聚焦显微镜(CLSM):将米粉样品浸泡在花菁5.5溶液中,并在黑暗环境下染色过夜,用超纯水洗涤后在激光共聚焦扫描显微镜下观察显微图像,激发波

长为 633 nm。

1.3.6 溶解度和膨润力测定 配制质量浓度为 2% 的淀粉乳,充分混匀后,于不同温度(50,70,90 °C)水浴加热 30 min。样品冷却至室温后,8 000 r/min 离心 15 min,将上层液体倒入已恒重的铝盒,称量。将装有液体的铝盘于 105 °C 烘干至恒重。分别按式(1)、式(2)计算溶解度和膨润力。

$$c = \frac{m_1}{m_2} \times 100\%, \quad (1)$$

$$s = \frac{m_3}{m_2 \times (100 - c)} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

c ——溶解度, %;

s ——膨润力, g/g;

m_1 ——烘干铝盒中固形物质量, g;

m_2 ——样品干基质量, g;

m_3 ——离心管中沉淀物质量, g。

1.3.7 糊化特性(RVA)测定 参照吴伟都等^[18]的方法并修改。以水分基质量分数 14%,准确称量淀粉样品和蒸馏水于铝罐内,混匀后使用 RVA 进行测定。选用标准 1 程序:50 °C 保持 1 min,以 12 °C/min 的速率升温至 95 °C 并保持 2.5 min,以 12 °C/min 的速率冷却至 50 °C,维持 2 min。前 10 s 搅拌桨转速设置为 960 r/min,后续转速恒

定为 160 r/min。

1.3.8 质构特性测定 使用 RVA 制备米粉糊后,将米粉糊置于 4 °C 冰箱过夜,得到米粉凝胶,并用质构仪测定其质构特性。选用 P/25 探头,测试条件:测前速度 2 mm/s,测中、测后速度 1 mm/s,测试压缩比 50%,压缩时间 5 s。

1.3.9 数据统计与分析 所有试验均重复 3 次,使用 Origin 2018 软件进行数据处理,并以“均值±标准差”表示。采用 SPSS 26.0 统计软件进行单因素方差分析, $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 早籼米粉的制备

由图 1 可知,酶法、碱法脱蛋白工艺条件对蛋白质含量影响较大。不同碱浓度下,米粉中蛋白脱除均在 30 min 时达到平衡;当酶添加量 ≤ 30 U/g 时,反应在 60 min 后达到平衡,当酶添加量 ≥ 200 U/g 时,反应在 30 min 左右达到平衡,说明碱法脱除蛋白更加迅速,而酶法反应平衡时间和加酶量相关,提高加酶量可以缩短达到反应平衡的时间。选取碱浓度 0.075%,0.200%,酶添加量 15,300 U/g 的反应进程,利用多项式模型对其进行拟合并得到回归方程,分别计算出残余蛋白含量为 6% 和 3% 的理论反应时间。由表 1 可知,实测的蛋白含量与目标值较为接近,进一步证实了其回归方程对反应进程拟合的准确性。

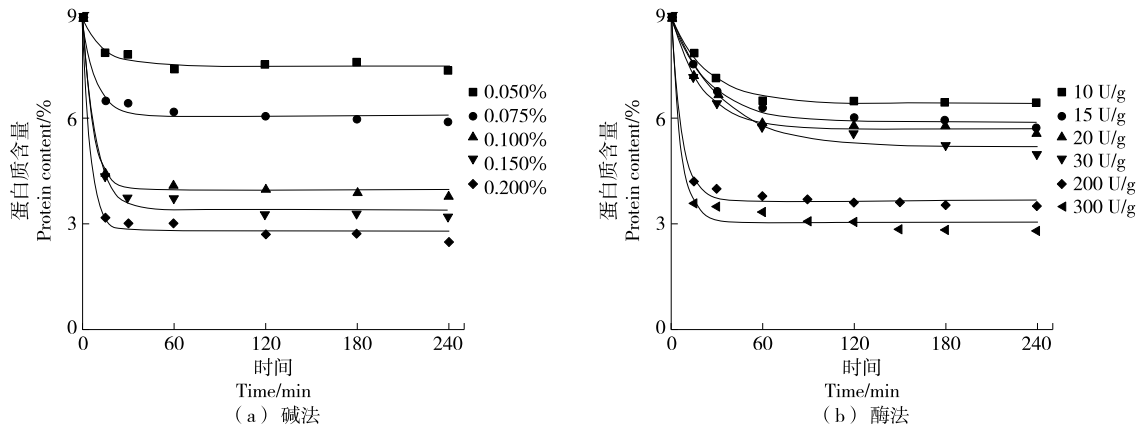


图 1 碱法、酶法脱蛋白反应进程

Figure 1 Reaction process for protein removal from rice flour by enzymatic and alkaline methods

2.2 SDS-PAGE 蛋白电泳分析

由图 2 可知,蛋白 Marker 得到了较好的分离。原粉的泳道呈现相对分子质量为 12,20,30,50 蛋白条带,其中相对分子质量 12 为醇溶蛋白,相对分子质量 20,30 条带分别对应碱性的 β 亚基、清蛋白和酸性的 α 亚基,相对分子质量为 50 对应的是谷蛋白前体^[19]。酶 3% 和酶 6% 泳道中相对分子质量较小的条带明显增多,表明蛋白酶将蛋白大分子水解,使其相对分子质量不断减小,产生多肽

小分子。随着蛋白含量的降低,碱 3% 和碱 6% 泳道中所有条带同步减少,证明碱液对米粉中的蛋白进行了整体性脱除。

2.3 米粉中破损淀粉含量

由表 1 可知,经过脱蛋白处理后,米粉中的破损淀粉明显减少,且蛋白含量越低,破损淀粉越少,碱法 3% 米粉和酶法 3% 米粉的破损淀粉含量相比于原粉分别降低了 21.98%,55.42%,说明部分破损淀粉与大米蛋白形成复

表1 制备不同蛋白含量早籼米粉的理论反应条件与实际蛋白含量及破损淀粉含量[†]

Table 1 Preparation of rice flour with different protein contents based on theoretical reaction conditions and actual protein content and damaged starch content in the prepared rice flour

样品	回归方程	反应条件	实际蛋白含量/%	破损淀粉含量/%
原粉			8.88±0.13 ^a	3.32±0.14 ^a
碱法6%	$y=5.76+2.81\times 0.89^x$ $R^2=0.97$	0.075% 21.62 min	6.01±0.03 ^b	3.22±0.07 ^a
碱法3%	$y=2.78+6.09\times 0.86^x$ $R^2=0.99$	0.20% 21.98 min	3.02±0.07 ^c	2.59±0.11 ^b
酶法6%	$y=5.83+3.68\times 0.96^x$ $R^2=0.99$	15 U/g 75.33 min	5.97±0.02 ^b	2.49±0.14 ^b
酶法3%	$y=2.92+6.46\times 0.91^x$ $R^2=0.98$	300 U/g 46.56 min	3.01±0.06 ^c	1.48±0.29 ^c

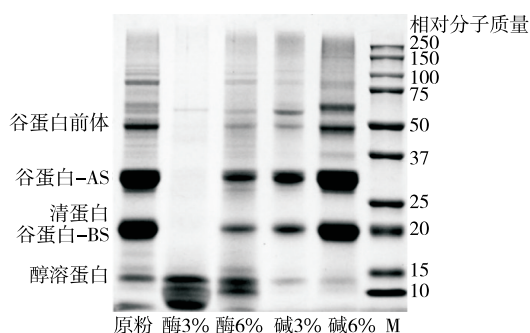
[†] 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

图2 米粉中蛋白提取物的SDS-PAGE电泳图

Figure 2 SDS-PAGE of extracted rice protein from rice flour

合物,蛋白去除后,破损淀粉也随洗涤水去除。而在相同蛋白含量下,酶法米粉的破损淀粉含量比碱法米粉分别低22.67%和42.86%(蛋白含量6%,3%),这是由于碱液使得淀粉颗粒发生轻微解聚^[20],导致碱法的破损淀粉略高于酶法米粉,与Wang等^[21]的研究结果相一致。

2.4 米粉的粒径分布

由图3和表2可知,原粉在70 μm处出现主峰,脱除蛋白后,该主峰逐渐减弱,并在1~2,6 μm处生成了两个新的特征峰,且6 μm处的特征峰强度更强。此外,蛋白含量越低,米粉的粒径越小,说明米粉中的蛋白脱除抑制了米

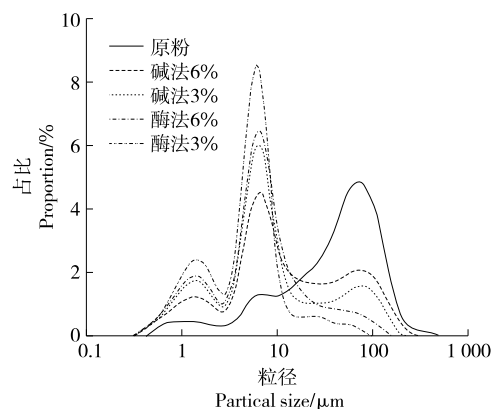


图3 米粉粒径分布图

Figure 3 Particle size distribution of rice flour

粉颗粒的团聚,并释放出米粉中的淀粉颗粒,与黎焕波^[22]的研究一致。另一方面,米粉经过脱蛋白后,中小颗粒占比升高,大颗粒占比显著减少($P<0.05$),酶法3%大颗粒仅占比10.37%,远低于原粉的80.75%。碱法、酶法两种脱蛋白米粉的粒径差异较大,酶法米粉的 D_{90} 显著小于同等蛋白含量下的碱法米粉($P<0.05$),其中碱法3%的 D_{90} 为65.99 μm,酶法3%的 D_{90} 为23.58 μm,说明相较于于碱

表2 米粉的粒径分布参数[†]

Table 2 Size distribution parameters of rice flour

样品	小颗粒占比 ($<2\ \mu\text{m}$)/%	中颗粒占比 ($2\sim 10\ \mu\text{m}$)/%	大颗粒占比 ($>10\ \mu\text{m}$)/%	$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$
原粉	5.60±0.19 ^e	13.64±0.80 ^c	80.75±0.99 ^a	5.00±0.18 ^a	46.60±0.04 ^a	130.45±0.77 ^a
碱法6%	14.09±0.18 ^d	39.61±0.60 ^d	46.30±0.79 ^b	1.43±0.01 ^b	9.08±0.32 ^b	86.81±1.49 ^b
碱法3%	18.55±0.95 ^c	53.06±0.99 ^c	30.38±1.95 ^c	1.21±0.03 ^c	6.48±0.26 ^c	65.99±1.71 ^c
酶法6%	20.13±0.52 ^b	56.19±1.18 ^b	23.68±1.71 ^d	1.15±0.01 ^c	6.07±0.20 ^d	27.11±1.42 ^d
酶法3%	23.58±0.12 ^a	66.05±0.33 ^a	10.37±0.21 ^e	1.10±0.01 ^c	5.21±0.03 ^c	23.58±0.12 ^c

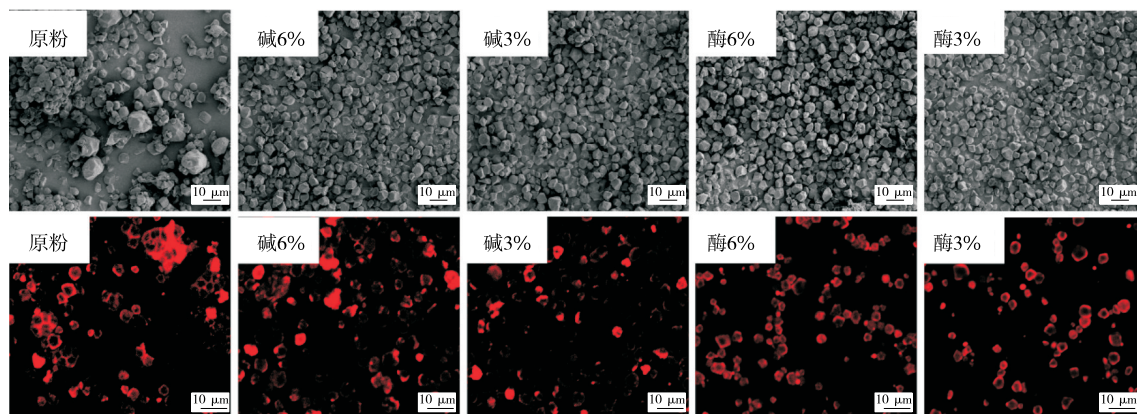
[†] 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

法,酶法制备的米粉颗粒更小、更均一。

2.5 米粉的颗粒形貌及蛋白分布

由图 4 可知,原粉中存在不同聚集程度的颗粒,其中尺寸较大的粒径可达 20 μm 左右,颗粒尺寸较小的为 3~8 μm ^[23]。米粉经脱蛋白处理后,其颗粒聚集显著减弱,形貌特征转变为典型的多边形大米淀粉颗粒,说明碱法和

酶法处理破坏了蛋白质网络,释放出淀粉颗粒。原粉的淀粉被包裹在蛋白网络中,经碱法脱蛋白后,米粉的粘连和结块减少,但仍有小部分蛋白聚集,而酶法是通过水解大分子蛋白使其成为小分子多肽的方式脱除,蛋白聚集现象基本消失,且残余的蛋白较为均匀地分布在淀粉颗粒表面。



从上至下依次为 SEM、CLSM 图

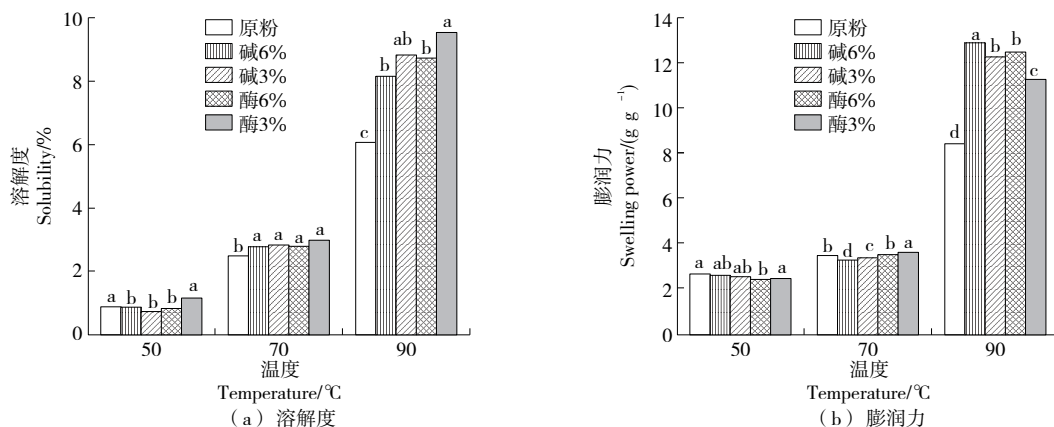
图 4 米粉的 SEM、CLSM 图

Figure 4 SEM and CLSM images of rice flour

2.6 米粉的溶解度和膨润力

由图 5 可知,不同米粉的溶解度和膨润力均随温度的升高而呈稳定增加的趋势,90 $^{\circ}\text{C}$ 时,米粉的溶解度和膨润力均达到最大,表明米粉在高温环境($\geq 90^{\circ}\text{C}$)中更容易吸水、膨胀。当温度为 90 $^{\circ}\text{C}$ 时,蛋白含量越低,溶解度越高,碱法、酶法米粉的溶解度在 3% 蛋白含量达到最大值,相比于原粉分别提高了 45.54% 和 57.26%,这是由于蛋白质网络被破坏后,淀粉颗粒内的直链淀粉更容易溶出,从而导致米粉的溶解度迅速增加^[24-25];相同蛋白

含量下,酶法米粉比碱法米粉有更大的溶解度,是因为酶在脱除淀粉颗粒表面蛋白时会留下孔洞^[25],导致水分更容易进入淀粉内部,加速淀粉溶出。90 $^{\circ}\text{C}$ 时,随着蛋白含量的降低,膨润力呈先升高后降低的趋势,与 Pang 等^[26]的研究结果相符。碱法、酶法米粉的膨润力在蛋白含量为 6% 时达到最大值,随着蛋白质含量进一步下降,膨润力略有下降,这是由于米粉中易于膨胀、崩解的破损淀粉含量降低所致,与 Tester^[27]的研究结果类似。



同一温度字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

图 5 差异化脱蛋白对米粉溶解性和膨润力的影响

Figure 5 Effects of differential protein removal on the solubility and swelling power of rice flour

2.7 米粉的糊化特性

由表3可知,与原粉相比,脱蛋白米粉拥有更低的峰值黏度和最终黏度,酶法3%米粉的峰值黏度和最终黏度最低,这是因为蛋白脱除后,淀粉更容易吸水膨胀,结构破裂的概率增大,导致体系黏度变小^[28-29]。碱法米粉的崩解值和回生值随着蛋白含量的降低先减少后升高,在6%蛋白含量时达到最低;而酶法米粉的崩解值和回生值随着蛋白含量的降低而降低,在3%蛋白含量时达到最低,比碱法3%降低了68.98%和55.63%,说明酶法能提

高米粉的热糊稳定性,且更能有效抑制米粉的回生,这是因为蛋白酶将大米蛋白水解成小分子的短肽和氨基酸,使得米粉中淀粉和多肽的静电相互作用增强,从而抑制了米粉的回生^[30]。相比于原粉的成糊温度92.55℃,酶法米粉的成糊温度略微升高($P<0.05$),这是由于在酶脱蛋白过程中,淀粉在酸热溶液中发生糊化,使得淀粉颗粒排列更加紧密,需要更多的热量才能使其崩解形成淀粉糊,导致酶法米粉糊化难度增加,与Xie等^[31]的研究结果类似。

表3 差异化脱蛋白对米粉成糊特性的影响[†]

Table 3 Effects of differential protein removal on the pasting properties of rice flour

样品	峰值黏度/ (mPa·s)	崩解值/ (mPa·s)	最终黏度/ (mPa·s)	回生值/ (mPa·s)	峰值时间/ min	成糊温度/ ℃
原粉	3 537.00±16.97 ^a	1 038.00±79.19 ^a	5 391.00±155.56 ^a	2 892.00±93.33 ^a	6.93±0.04 ^a	92.55±0.00 ^c
碱法6%	2 721.50±3.53 ^c	571.00±35.35 ^b	4 175.00±62.22 ^c	2 024.50±101.11 ^c	5.68±0.07 ^c	82.75±0.07 ^d
碱法3%	3 231.50±12.02 ^b	976.00±50.91 ^a	4 714.50±86.97 ^b	2 459.00±125.86 ^b	5.20±0.04 ^d	82.57±0.24 ^d
酶法6%	2 678.50±24.74 ^c	681.00±90.50 ^b	3 512.50±103.94 ^d	1 515.00±38.18 ^d	6.82±0.07 ^a	94.27±0.88 ^a
酶法3%	2 406.50±26.16 ^d	303.00±5.65 ^e	3 194.50±12.02 ^e	1 091.00±8.48 ^e	6.61±0.02 ^b	93.35±0.00 ^{ab}

† 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

2.8 米粉的质构特性

由表4可知,与原粉相比,酶法、碱法米粉的蛋白含量减少,弹性、咀嚼性、胶着性、内聚性、硬度均有所增加,在蛋白含量3%时达到最大。碱法3%米粉的弹性和硬度相比于原粉分别增加了52.27%和54.32%,酶法3%米粉则增加了54.55%和52.60%($P<0.05$),这是因为蛋白含量减少,淀粉

能够充分地聚集排列,分子间的缠绕程度增强,使得米粉凝胶结构更强^[32]。因此,脱蛋白程度越高,米粉凝胶的硬度、咀嚼性、回复性和内聚性越大。相同蛋白含量下,酶法3%的弹性、咀嚼性最大,相比于碱法3%分别提高了1.49%,10.16%,这是因为酶法米粉的破损淀粉含量更低,颗粒粒径更小,蛋白分布更均匀,使得米粉之间结合更加紧密。

表4 差异化脱蛋白对米粉质构特性的影响[†]

Table 4 Effects of differential protein removal on the textural properties of rice flour

样品	弹性	咀嚼性/mN	胶着性	内聚性	硬度/mN
原粉	0.44±0.01 ^c	10.21±0.12 ^b	20.34±0.11 ^c	0.47±0.06 ^c	40.72±1.02 ^b
碱法6%	0.50±0.03 ^b	11.32±0.27 ^b	22.28±0.27 ^c	0.51±0.04 ^c	43.83±0.88 ^b
碱法3%	0.67±0.01 ^a	30.52±0.22 ^a	45.57±0.35 ^a	0.72±0.05 ^{ab}	62.84±1.56 ^a
酶法6%	0.51±0.00 ^b	11.80±0.09 ^b	28.63±0.63 ^b	0.67±0.07 ^b	42.65±0.79 ^b
酶法3%	0.68±0.00 ^a	33.62±0.38 ^a	49.15±0.19 ^a	0.79±0.05 ^a	62.14±1.39 ^a

† 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

3 结论

碱法和酶法处理均能显著降低米粉中蛋白含量($P<0.05$)。蛋白脱除后,米粉颗粒粒径变小,颗粒团聚现象减少,溶解度和膨润力升高,质构特性提高。相同蛋白含量下,酶法米粉的粒径更小,破损淀粉含量更低。酶法3%抗老化性能最好、热糊稳定性最高、质构特性最佳,可以提升早籼米粉的品质。后续可选取不同脱蛋白米粉作为原料制作米线、米糕等传统米制品,并借助感官评定、电

子鼻和电子舌等技术手段研究米制品的质构特性和风味特征,以明确差异化脱除蛋白对米制品食用品质和感官特性的影响。

参考文献

- [1] 莫西亚, 易翠平, 祝红, 等. 籼稻后熟对米粉品质的影响研究进展[J]. 食品与机械, 2021, 37(6): 11-17.
MO X Y, YI C P, ZHU H, et al. Review of indica post-ripening on the qualities of rice noodle[J]. Food & Machinery, 2021, 37

- (6): 11-17.
- [2] 官斌, 刘成梅, 苏坤明. 浸泡处理对早籼米糊化特性及质构特性的影响[J]. 食品与机械, 2011, 27(3): 13-15, 115.
GUAN B, LIU C M, SU K M. Effect of soaking treatment on pasting properties and textural properties of early indica rice[J]. Food & Machinery, 2011, 27(3): 13-15, 115.
- [3] 刘桃英, 刘成梅, 付桂明, 等. 大米蛋白对大米粉糊化性质的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 34(2): 97-99, 103.
LIU T Y, LIU C M, FU G M, et al. Effect of rice protein on the pasting properties of rice flour[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(2): 97-99, 103.
- [4] SUN J, HOU C, ZHANG S. Effect of protein on the rheological properties of rice flour[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2008, 32(6): 987-1 001.
- [5] 赵一童. 蛋白质含量对水稻稻米品质及其米粉糊化回生特性影响[D]. 南宁: 广西大学, 2023: 37-41.
ZHAO Y T. Effects of protein content on rice quality and gelatinization, retrogradation of rice flour[D]. Nanning: Guangxi University, 2023: 37-41.
- [6] BAXTER G, BLANCHARD C, ZHAO J. Effects of prolamin on the textural and pasting properties of rice flour and starch[J]. Journal of Cereal Science, 2004, 40(3): 205-211.
- [7] LU D, LU W. Effects of protein removal on the physicochemical properties of waxy maize flours[J]. Starch-Stärke, 2012, 64(11): 874-881.
- [8] 芦鑫. 高纯度大米淀粉提取工艺与性质研究[D]. 无锡: 江南大学, 2007: 7.
LU X. Study on the extraction process and properties of high purity rice starch[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2007: 7.
- [9] 符琼. 大米淀粉酶法制备低聚异麦芽糖的研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2012: 2-3.
FU Q. Study on the production of isomaltooligosaccharides with rice starch by enzyme method[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2012: 2-3.
- [10] 靳宇丹, 王涛, 冯伟, 等. 提取方法对大米淀粉结构与理化性质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2024, 43(6): 31-39.
JIN Y D, WANG T, FENG W, et al. Effects of extraction methods on structural and physicochemical properties of rice starches[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2024, 43(6): 31-39.
- [11] 于泓鹏, 徐丽, 高群玉, 等. 大米淀粉的制备及其综合利用研究进展[J]. 粮食与饲料工业, 2004(4): 21-22.
YU H P, XU L, GAO Q Y, et al. Research progress on preparation and comprehensive utilization of rice starch[J]. Food and Feed Industry, 2004(4): 21-22.
- [12] PUCHONGKAVARIN H, BERGTHALLER W, SHOBSNGOB S, et al. Characterization and utilization of acid-modified rice starches for use in pharmaceutical tablet compression[J]. Starch-Stärke, 2003, 55(10): 464-475.
- [13] PUCHONGKAVARIN H, VARAVINIT S, BERGTHALLER W. Comparative study of pilot scale rice starch production by an alkaline and an enzymatic process[J]. Starch-Stärke, 2005, 57(3/4): 134-144.
- [14] 马申嫣, 范大明, 王丽云, 等. 大米淀粉制备工艺对其糊化特性和粒度分布的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2012, 31(11): 1 173-1 179.
MA S Y, FAN D M, WANG L Y, et al. Impact of isolation process on pasting properties and particle size distribution of rice starch[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2012, 31(11): 1 173-1 179.
- [15] 周建新, 张杜娟, 张瑞, 等. 温度和臭氧处理对储藏大米脂肪酸值影响的回归方程研究[J]. 粮食储藏, 2012, 41(4): 30-33.
ZHOU J X, ZHANG D J, ZHANG R, et al. Regression equation of temperature and ozonization influence on fatty acid value of stores rice[J]. Grain Storage, 2012, 41(4): 30-33.
- [16] SUN L, XU Z, SONG L, et al. Removal of starch granule associated proteins alters the physicochemical properties of annealed rice starches[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 185: 412-418.
- [17] 刘爱民, 冯定山, 张园园, 等. 不同预处理方式对碱法提取米渣蛋白得率的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(10): 103-106.
LIU A M, FENG D S, ZHANG Y Y, et al. Effect of different pretreatments on the efficiency of alkaline extraction of protein from rice residue[J]. Food Science, 2014, 35(10): 103-106.
- [18] 吴伟都, 朱慧, 王雅琼, 等. 储存对大米糊化特性的影响研究[J]. 粮食与食品工业, 2015, 22(4): 15-18, 22.
WU W D, ZHU H, WANG Y Q, et al. Study on the effects of storage on the gelatinization properties of rice[J]. Cereal & Food Industry, 2015, 22(4): 15-18, 22.
- [19] SOUZA D D, SBARDELOTTO A F, ZIEGLER D R, et al. Characterization of rice starch and protein obtained by a fast alkaline extraction method[J]. Food Chemistry, 2016, 191: 36-44.
- [20] SUN Q, CHU L, XIONG L, et al. Effects of different isolation methods on the physicochemical properties of pea starch and textural properties of vermicelli[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(1): 327-334.
- [21] WANG L, WANG Y J. Rice starch isolation by neutral protease and high-intensity ultrasound[J]. Journal of Cereal Science, 2004, 39(2): 291-296.
- [22] 黎焕波. 脱脂脱蛋白对早籼米粉结构与性质及其关系的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2022: 15-19.
LI H B. Effect of defatting and deproteinization on the structure, properties and their relationship of early indica rice flour[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2022: 15-19.
- [23] AMAGLIANI L, O' REGAN J, KELLY A L, et al. Chemistry, structure, functionality and applications of rice starch[J]. Journal of Cereal Science, 2016, 70: 291-300.

(下转第 39 页)

- one multispectral system developed by hyperspectral imaging combined with effective variable selection methods[J]. Food Chemistry, 2017, 221: 1 989-1 996.
- [11] LIU Y H, SUN Y, XIE A G, et al. Potential of hyperspectral imaging for rapid prediction of anthocyanin content of purplefleshed sweet potato slices during drying process[J]. Food Analytical Methods, 2017, 10(12): 3 836-3 846.
- [12] 赵建贵, 王国梁, 张宇, 等. 番茄苗期叶位色素含量高光谱检测及可视化研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(2): 386-391.
- ZHAO J G, WANG G L, ZHANG Y, et al. Hyperspectral detection and visualization of pigment content in tomato seedling stage[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2024, 44 (2): 386-391.
- [13] SUN M, WANG R, CHEN X H, et al. Application of hyperspectral imaging technique for cordyceps powder content and true/false identification[J]. Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy, 2017, 34(8): 1 114-1 117.
- [14] LIU Y W, PU H B, SUN D W. Hyperspectral imaging technique for evaluating food quality and safety during various processes: a review of recent applications[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 69: 25-35.
- [15] LIU Y H, SUN Y, XIE A G, et al. Potential of hyperspectral imaging for rapid prediction of anthocyanin content of purplefleshed sweet potato slices during drying process[J]. Food Analytical Methods, 2017, 10: 3 836-3 846.
- [16] YANG Y C, SUN D W, PU H, et al. Rapid detection of anthocyanin content in lychee pericarp during storage using hyperspectral imaging coupled with model fusion[J]. Postharvest Biology & Technology, 2015, 103: 55-65.
- [17] CHEN S S, ZHANG F F, NING J F, et al. Predicting the anthocyanin content of wine grapes by NIR hyperspectral imaging[J]. Food Chemistry, 2015, 172: 788-793.
- [18] 孙红梅, 李振, 彭喜春, 等. 不同产地枸杞子中多糖含量的比较研究[J]. 中国食物与营养, 2021, 27(3): 58-61.
- SUN H M, LI Z, PENG X C, et al. Comparative study on polysaccharide content in Lycium fructans of different origin [J]. Chinese Food and Nutrition, 2021, 27(3): 58-61.
- [19] CHENG J H, JIN H L, LIU Z W. Developing a NIR multispectral imaging for prediction and visualization of peanut protein content using variable selection algorithms[J]. Infrared Physics & Technology, 2018, 88: 92-96.
- [20] LIU C Y, MENG J, QIU J Y, et al. Structural characterization and prebiotic potential of an acidic polysaccharide from Imperial Chrysanthemum[J]. Natural Product Research, 2022, 36(2): 586-594.
- [21] XU D, XIAO J, JIANG D Z, et al. Inhibitory effects of a water-soluble jujube polysaccharide against biofilm-forming oral pathogenic bac-teria[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 208: 1 046-1 062.
- [22] PENG X B, LI Q, OU L N, et al. GC-MS, FT-IR analysis of black fungus polysaccharides and its inhibition against skin aging in mice[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2010, 47(2): 304-307.
- [23] JIANG H, YANG S Q, CHAKKA V P, et al. Purification and biological activities of enzymatically degraded Sargassum fusiforme polysaccharides[J]. Chemistry & Biodiversity, 2021, 18(3): e2000930.
- [24] PU H, SUN D W, MA J, et al. Hierarchical variable selection for predicting chemical constituents in lamb meats using hyperspectral imaging[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 143: 44-52.
- (上接第 22 页)
- [24] WANI A A, SINGH P, SHAH M A, et al. Rice starch diversity: effects on structural, morphological, thermal, and physicochemical properties: a review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2012, 11(5): 417-436.
- [25] ZHAN Q, YE X, ZHANG Y, et al. Starch granule-associated proteins affect the physicochemical properties of rice starch[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101: 105504.
- [26] PANG Z, BOUROUIS I, SUN M, et al. Physicochemical properties and microstructural behaviors of rice starch/soy proteins mixtures at different proportions[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 209: 2 061-2 069.
- [27] TESTER R F. Properties of damaged starch granules: composition and swelling properties of maize, rice, pea and potato starch fractions in water at various temperatures[J]. Food Hydrocolloids, 1997, 11(3): 293-301.
- [28] DING Y, CHENG J, LIN Q, et al. Effects of endogenous proteins and lipids on structural, thermal, rheological, and pasting properties and digestibility of adlay seed (*Coixlacryma-jobi* L.) starch[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 111: 106254.
- [29] BAXTER G, ZHAO J, BLANCHARD C. Albumin significantly affects pasting and textural characteristics of rice flour[J]. Cereal Chemistry Journal, 2010, 87(3): 250-255.
- [30] CHI C, LI X, ZHANG Y, et al. Understanding the mechanism of starch digestion mitigation by rice protein and its enzymatic hydrolysates[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 84: 473-480.
- [31] XIE L, CHEN N, DUAN B, et al. Impact of proteins on pasting and cooking properties of waxy and non-waxy rice[J]. Journal of Cereal Science, 2008, 47(2): 372-379.
- [32] 陈凤莲, 孙贵尧, 安然, 等. 不同品种和粒度对米粉糊化特性及米蛋糕品质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(21): 75-82.
- CHEN F L, SUN G Y, AN R, et al. Gelatinization characteristics of rice flour with different varieties and particle sizes and their effects on the quality of rice cakes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(21): 75-82.