

脱除不同溶解性内源蛋白质对早籼米粉理化性质的影响

李欣倩, 刘锦华, 王若伊, 封琴, 冯慕心, 陆春苗, 赵渠加, 杨英

Effects of Removing Endogenous Proteins with Different Solubility on the Physicochemical Properties of Early Indica Rice Flour

LI Xinqian, LIU Jinhua, WANG Ruoyi, FENG Qin, FENG Muxin, LU Chunmiao, ZHAO Qujia, and YANG Ying

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023020087>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

微波处理对高粱理化性质及蛋白质结构特性的影响研究

Effects of Microwave Treatment on Physicochemical Properties and Protein Structure Characteristics of Sorghum

食品工业科技. 2021, 42(23): 27-33 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021010203>

白灵菇蛋白质的理化及功能特性

Physicochemical and Functional Properties of Protein from *Pleurotus nebrodensis*

食品工业科技. 2018, 39(16): 37-41 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.16.007>

Osborne分级法提取藜麦糠清蛋白及功能性质研究

Extract of albumin from quinoa chaff by Osborne classification method and functional properties

食品工业科技. 2017(12): 264-269 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.12.048>

豌豆蛋白对猪肉盐溶蛋白理化性质的影响

Effect of Pea Protein on Physicochemical Properties of Salt-soluble Protein of Pork

食品工业科技. 2019, 40(8): 31-36 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.08.006>

冷冻南极磷虾(*Euphausia superba*)肌肉的理化性质及蛋白的加工特性

Physicochemical properties and processing characteristics of Antarctic krill (*Euphausia superba*) muscle

食品工业科技. 2017(21): 56-64 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.21.012>

富硒大米中不同溶解性硒蛋白理化特性和抗氧化活性

Physicochemical Properties and Antioxidant Activities of Different Se-proteins from Selenium-enriched Rice

食品工业科技. 2021, 42(9): 44-50 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020070183>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023020087

LI Xinqian, LIU Jinhua, WANG Ruoyi, 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. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023020087

· 研究与探讨 ·

脱除不同溶解性内源蛋白质对早籼米粉理化性质的影响

李欣倩, 刘锦华, 王若伊, 封 琴, 冯慕心, 陆春苗, 赵渠加, 杨 英*
(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
工程学院, 湖南长沙 410004)

摘要:为通过利用内源蛋白质调控早籼米粉理化性质提高其制品品质, 本文研究脱除不同溶解性内源蛋白质(清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白)对早籼米粉溶解度、膨胀度、成糊特性及其糊化后水分结合状态、流变学特性和冻融稳定性的影响。结果表明, 脱除球蛋白和谷蛋白可提高早籼米粉的溶解度, 而脱除醇溶蛋白和谷蛋白均可在高温下提高其膨胀度。脱除清蛋白使早籼米粉成糊的峰值粘度、终值粘度、崩解值和回生值分别降低 16%、21%、50% 和 43%; 脱除球蛋白可提高其糊化温度并降低其峰值粘度, 脱除醇溶蛋白则相反; 脱除谷蛋白使其峰值粘度和终值粘度分别降低 22% 和 12%, 并使其崩解值和回生值分别提高 49% 和 53%。脱除谷蛋白使早籼米粉糊化后的弱结合水含量降低 14%; 脱除球蛋白和谷蛋白均可提高其糊化后与水结合的程度, 脱除醇溶蛋白则相反。脱除醇溶蛋白使早籼米粉糊化后的似固状态增强 20%; 脱除球蛋白和谷蛋白均可降低其糊化后的弹性, 脱除醇溶蛋白则相反。脱除球蛋白和谷蛋白使早籼米粉糊化后的冻融稳定性分别降低 121% 和 56%。该研究工作为利用不同溶解性内源蛋白质提高早籼米粉制品品质提供了重要的参考依据。

关键词:早籼米粉, 内源蛋白质, 清蛋白, 球蛋白, 醇溶蛋白, 谷蛋白, 理化性质

中图分类号: TS234

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)22-0061-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023020087



本文网刊:

Effects of Removing Endogenous Proteins with Different Solubility on the Physicochemical Properties of Early Indica Rice Flour

LI Xinqian, LIU Jinhua, WANG Ruoyi, FENG Qin, FENG Muxin, LU Chunmiao, ZHAO Qujia, YANG Ying*

(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)

Abstract: In order to improve the quality of early indica rice flour products by using endogenous proteins to regulate its physicochemical properties, this paper studied the effects of removing endogenous proteins with different solubility (albumin, globulin, prolamin and oryzenin) on the solubility, swelling capacity, and pasting properties of the early indica rice flour, as well as on its water binding state, rheological properties and freeze-thaw stability after pasting. The results showed that the removal of globulin and oryzenin could improve the solubility of the early indica rice flour, while the removal of prolamin and oryzenin could improve its swelling capacity under high temperature. The removal of albumin made the peak viscosity, final viscosity, breakdown value and setback value of the early indica rice flour decrease by 16%, 21%, 50% and 43%, respectively. The removal of globulin could increased its gelatinization temperature and decreased its peak viscosity, while the removal of prolamin was the opposite. The removal of oryzenin made its peak viscosity, and final viscosity decrease by 22% and 12%, respectively, as well as made its breakdown value and setback value increase by 49% and 53%, respectively. The removal of oryzenin made the weak bound water content of the early indica rice flour decrease

收稿日期: 2023-02-10

基金项目: 湖南省自然科学基金(2021JJ30043); 湖南省教育厅科学研究青年项目(21B0269); 长沙市科技计划项目(kq2004089)。

作者简介: 李欣倩(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 淀粉与粮食深加工, E-mail: lixinqian09@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: cherry_yy2006@126.com。

by 14% after pasting. The removal of both globulin and oryzenin could increase its water binding strength after pasting, while the removal of prolamin was the opposite. The removal of prolamin made the solid-like state of the early indica rice flour enhance by 20% after pasting. The removal of both globulin and oryzenin could decrease its elasticity after pasting, while the removal of prolamin was the opposite. The removal of globulin and oryzenin made the freeze-thaw stability of the early indica rice flour decrease by 121% and 56%, respectively, after pasting. This study would provide an important reference for improving the quality of early indica rice flour products by using endogenous proteins with different solubility.

Key words: early indica rice flour; endogenous proteins; albumin; globulin; prolamin; oryzenin; physicochemical properties

大米粉是一种重要的谷物食品原料,其理化性质对米糊、米饼等米制品的品质具有重要的影响^[1-2]。在大米粉中,淀粉含量高达80%,是大米粉具有糊化性能的基础,但蛋白质作为第二大组分(含量6%~7%),对大米粉的糊化特性具有显著影响^[3-6]。大米蛋白质由水溶性清蛋白、盐溶性球蛋白、醇溶蛋白和碱溶性谷蛋白组成,目前已有研究发现这些溶解性不同的内源蛋白质对大米粉的成糊特性具有不同的影响:脱除清蛋白能显著降低非糯性大米粉的糊化温度和糊化粘度^[7],但对糯米粉的成糊特性没有显著性影响^[8];脱除球蛋白能提高糯米粉的成糊温度,但会降低成糊粘度、崩解值和回生值^[9];脱除醇溶蛋白能降低非糯性大米粉的成糊粘度和崩解值^[10];脱除谷蛋白能降低不同品种大米粉的成糊温度、粘度、崩解值和回生值^[11]。但是,关于不同溶解性内源蛋白质对大米粉成糊后水分结合状态、流变学特性、冻融稳定性等其他理化性质影响的研究还不够充分,尤其少见涉及早籼米粉的报道。

早籼米粉是生产米粉(米线)等消费量庞大的米制品的优质原料^[12-13],研究溶解性不同内源蛋白质对早籼米粉理化性质的影响对提高相关米制品品质具有重要的意义,也有利于充分高值化利用产量大、耐储藏但碎米率高^[14]的早籼米。能够依次脱除清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白的Osborne法^[15]是一种成熟、简单且安全的脱除大米粉不同溶解性内源蛋白质的方法,在工业化生产中具有良好的应用前景。因此,本文采用Osborne法依次脱除早籼米粉的清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白,对比研究不同溶解性内源蛋白质对早籼米粉溶解度、膨胀度、成糊特性及其糊化后与水结合情况、流变学特性和冻融稳定性的影响规律,以期利用不同溶解性内源蛋白质调控早籼米粉理化性质以提高相关米制品品质提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

早籼米粉(RF)由产自安徽南陵县新塘米厂的珍珠三号早籼米经干磨过100目筛制成;氯化钠、无水乙醇、氢氧化钠分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

HH-2数显恒温水浴锅 上海力辰科技有限公司;101-1电热干燥鼓风箱 北京中兴伟业仪器有限公司;F-3L玻璃反应釜 巩义市科华仪器设备有限

公司;L530离心机 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;KDN-08C数显控温消化炉 上海力辰仪器科技有限公司;K9840自动凯氏定氮仪 济南市海能仪器股份有限公司;SpectraMax i3X酶标仪 美谷分子仪器有限公司;RVA-4快速粘度分析仪 瑞典波通公司;DHR-2流变仪 美国TA公司;NM120型低场核磁共振 上海纽迈电子科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 脱除不同类型蛋白质大米粉样品的制备 参考张敏等^[16]、孙媛等^[17]描述的Osborne方法,首先依次用蒸馏水、5% NaCl、70%乙醇和0.2% NaOH按料液比1:10 g/mL在40℃下浸泡早籼米粉脱除其中的清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白,脱除后离心并用蒸馏水洗脱2次,然后在40℃下干燥样品,最后将样品磨粉过100目筛,获得依次标记为RF-Alb、RF-AGlo、RF-AGPro和RF-AGPGlu的早籼米粉样品。采用二奎啉甲酸(Bicinchoninic acid, BCA)蛋白浓度测定试剂盒^[18]测定样品脱除液中的蛋白质含量,以同种脱除液中的蛋白质含量不再变化的时间作为该脱除处理的结束时间。BCA测试操作如下:取牛血清蛋白标准品,用PBS溶液稀释至浓度为1.0 mg/mL,按梯度稀释配制成标准测定液,加入200 μL BCA工作液,37℃放置30 min,于562 nm处测定吸光度,绘制标准曲线,其中横坐标为蛋白质标准浓度,纵坐标为吸光度;取20 μL待测液,加入200 μL BCA工作液,充分混匀后,37℃静置30 min后562 nm处测定吸光度,根据标准曲线计算脱除液中蛋白质的含量。

1.2.2 早籼米粉样品中总蛋白质含量的测定 按照GB 5009.5-2016中凯氏定氮法^[19]测定早籼米粉样品的总蛋白含量。

1.2.3 早籼米粉溶解度与膨胀度的测定 取1.2.1中的样品,配制成2%的米粉浆,分别在40、75和90℃恒温水浴中加热搅拌30 min,冷却后4000 r/min离心15 min,将上清液倒入铝盒中于105℃干燥至恒重,称重得到水溶大米粉重量,沉淀为膨胀大米粉。计算公式如下:

$$\text{溶解度}(\%) = \frac{\text{水溶大米粉重量}}{\text{大米粉干基重量}} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

$$\text{膨胀度}(\%) = \frac{\text{膨胀大米粉重量}}{\text{样品干基重量} \times (1 - \text{溶解度})} \times 100 \quad \text{式(2)}$$

1.2.4 早籼米粉成糊特性的测定 采用快速粘度分析仪 Standard 1 程序测定早籼米粉样品的成糊特性,测定参数为 960 r/min 运行 10 s 后,保持 160 r/min,50 ℃ 恒温 1 min,再以 12 ℃/min 升温至 95 ℃,持续时间为 2.5 min,然后以 12 ℃/min 降温至 50 ℃,持续时间为 2 min,得到糊化曲线、糊化温度、峰值粘度、终值粘度、崩解值和回生值。

1.2.5 早籼米粉糊水分结合状态的测定 采用低场核磁共振仪测试经 1.2.4 形成的早籼米粉糊的水分结合状态,具体测试条件为 SW=200 kHz、TW=2500 ms、NS=8、NECH=4000,数据经单组分反演拟合得到样品的横向弛豫时间 T_2 ^[20]。

1.2.6 籼米粉糊流变学特性的测定 采用流变仪测试经 1.2.4 形成的早籼米粉糊的黏弹性,选用 40 mm 平板,设置 0.1 cm 间隙。参考 Yang 等^[21]描述的方法,具体测试条件如下:先在 25 ℃、1 Hz 下对样品进行 0.1%~100% 应变扫描确定线性应变区间,后在该区间内进行 0.1~1 Hz 的频率扫描,获得样品的储能模量(G')、损耗模量(G'')和损耗角正切值 $\tan\delta$ 。

1.2.7 籼米粉糊冻融稳定性的测定 参考唐双^[22]描述的方法,取经 1.2.1 处理获得的早籼米粉样品加蒸馏水配制成 5%(w/w,以干基计)的粉浆样品,沸水浴糊化 30 min 形成早籼米粉糊样品。记 50 mL 离心管的重量为 m_1 ,转移 20 g 样品至离心管中并称重,记 m_2 ,-18 ℃ 冷冻 22 h 后放置在 30 ℃ 水浴下解冻 2 h,作为一个冻融循环。经过 1、3、5 次循环后,4000 r/min 离心 20 min,去掉上清液,称取离心管和沉淀重,记为 m_3 ,按以下公式计算:

$$\text{析水率}(\%) = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100 \quad \text{式(3)}$$

1.3 数据处理

试验数据采用 SPSS22 进行显著性分析($P < 0.05$),Origin 2018 作图,所有试验均有 2~3 次平行,测试结果用“平均值±标准偏差”表示。

2 结果与分析

2.1 早籼米粉样品的总蛋白质含量

早籼米粉及其依次脱除清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白样品的总蛋白质含量分别为 8.66%、7.78%、7.47%、7.14% 和 0.71%。由此可算出,依次脱除的清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白含量分别为 0.88%、0.31%、0.33% 和 6.43%,分别占脱除总蛋白质含量的 11.07%、3.90%、4.15% 和 80.88%。脱除 4 种蛋白质后,残留的 0.71% 蛋白质很可能是淀粉颗粒相关蛋白^[23]。

2.2 脱除不同溶解性内源蛋白质对早籼米粉溶解度和膨胀度的影响

大米粉在糊化过程中,淀粉颗粒会吸水膨胀直至崩解。已有研究表明,淀粉颗粒的结晶结构在 55 ℃ 下开始减少并在 75 ℃ 下被完全破坏^[24],而早

籼米粉的糊化温度范围是 60~75 ℃^[25]。因此,本文根据温度对淀粉颗粒结构的影响程度,选择在 40、75 和 90 ℃ 下研究脱除不同溶解性内源蛋白质对早籼米粉溶解度和膨胀度的影响。

不同溶解性内源蛋白质对早籼米粉在 40、75 和 90 ℃ 下的溶解度和膨胀度的影响分别如图 1 和图 2 所示。所有早籼米粉样品的溶解度和膨胀度均随温度的升高而提高,到达 90 ℃ 时提高幅度都最大。具体而言,从 40 ℃ 到 90 ℃,原早籼米粉样品 RF 及其依次脱除清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白的样品 RF-Alb、RF-AGlo、RF-AGPro 和 RF-AGPGlu 的溶解度分别增大了 3.1%、2.75%、3.51%、3.87% 和 18.6%,对应的膨胀度分别提高了 4.72%、4.64%、4.69%、6.32% 和 14.22%。显然,不同溶解性内源蛋白质对早籼米粉的溶解度和膨胀度具有显著性影响($P < 0.05$)。

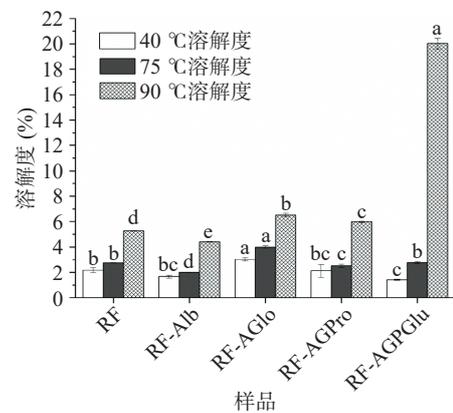


图 1 脱除不同溶解性内源蛋白质对早籼米粉溶解度的影响

Fig.1 Effects of removing different soluble endogenous proteins on the solubility of rice flour

注:柱顶字母不同表示同一条件下不同样品数据显著性差异, $P < 0.05$;图 2、图 4~图 6 同。

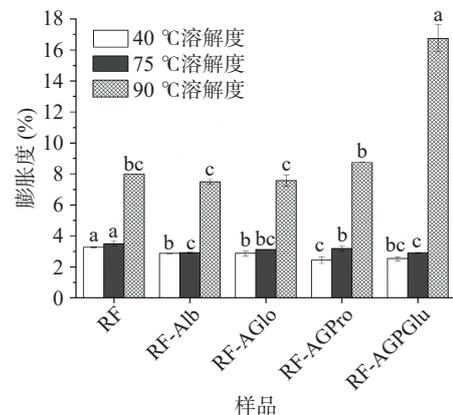


图 2 脱除不同溶解性内源蛋白质对早籼米粉膨胀度的影响

Fig.2 Effects of removing different soluble endogenous proteins on the swelling capacity of rice flour

与 RF 相比,RF-Alb 的溶解度在 75 和 90 ℃ 下显著减小($P < 0.05$),而膨胀度在 40 和 75 ℃ 下显著降低($P < 0.05$),但在 90 ℃ 下无显著变化($P > 0.05$)。该结果表明,脱除清蛋白会抑制早籼米粉溶解,并在

中低温下抑制其膨胀。与 RF 相比, RF-AGlo 的溶解度在不同温度下均显著增大($P<0.05$), 而膨胀度在 40 和 75 °C 下显著降低($P<0.05$), 但在 90 °C 下无显著变化($P>0.05$); 与 RF-Alb 相比, RF-AGlo 的溶解度在不同温度下均显著增大($P<0.05$), 但膨胀度无显著变化($P>0.05$)。该结果表明, 脱除球蛋白会促进早籼米粉溶解, 但对其膨胀影响有限。与 RF 相比, RF-AGPro 的溶解度在 75 °C 下显著减小($P<0.05$), 但在 90 °C 下显著增大($P<0.05$), 而膨胀度在 40 和 75 °C 下显著降低($P<0.05$); 与 RF-AGlo 相比, RF-AGPro 的溶解度在不同温度下均显著减小($P<0.05$), 而膨胀度在 40 °C 下显著降低($P<0.05$), 但在 90 °C 下显著提高($P<0.05$)。该结果表明, 脱除醇溶蛋白会抑制早籼米粉溶解, 但在高温下促进其膨胀。与 RF 相比, RF-AGPGlu 的溶解度在 40 °C 下显著减小($P<0.05$), 但在 90 °C 下大幅增加, 而膨胀度在 40 和 75 °C 下均显著降低($P<0.05$), 但在 90 °C 下大幅提高; 与 RF-AGPro 相比, RF-AGPGlu 的溶解度在 75 °C 下显著增加($P<0.05$)并在 90 °C 下大幅提高, 而膨胀度在 75 °C 下显著降低($P<0.05$), 但在 90 °C 下大幅提高。该结果表明, 脱除谷蛋白会在中温下促进早籼米粉溶解, 并在高温下大幅促进其溶解和膨胀。因此, 脱除球蛋白和谷蛋白可促进早籼米粉溶解, 而脱除醇溶蛋白和谷蛋白可在高温下促进早籼米粉膨胀。

2.3 脱除不同溶解性内源蛋白质对早籼米粉成糊特性的影响

经 RVA 测定, 依次脱除清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白对早籼米粉的成糊曲线具有不同的影响(如图 3 所示), 对具体成糊特性参数的影响见表 1。与 RF 相比, RF-Alb 的糊化温度没有显著性差异, 峰值粘度、终值粘度、崩解值和回生值分别降低 16%、21%、50% 和 43%, 说明脱除清蛋白会降低早籼米粉成糊的峰值粘度、终值粘度、崩解值和回生值。RF-AGlo 与 RF 相比, 糊化温度提高 1.4%, 峰值粘度、终值粘度、崩解值和回生值分别降低 25%、26%、54% 和 40%; 与 RF-Alb 相比, 糊化温度提高 1.9%, 峰值粘度降低 11%, 终值粘度、崩解值和回生值均无显著性差异($P>0.05$)。该结果表明, 脱除球蛋白会提高早籼米粉的糊化温度并降低其峰值粘度。RF-AGPro 与 RF 相比, 糊化温度无显著性差异($P>0.05$), 峰值粘度、终值粘度、崩解值和回生值分别降

低 18%、30%、44% 和 56%; 与 RF-AGlo 相比, 糊化温度降低 2.3%, 峰值粘度提高 10%, 终值粘度、崩解值和回生值均无显著性差异($P>0.05$)。该结果表明, 脱除醇溶蛋白会降低早籼米粉的糊化温度并提高其峰值粘度。RF-AGPGlu 与 RF 相比, 糊化温度、峰值粘度、终值粘度、崩解值和回生值分别降低 1.9%、36%、39%、17% 和 33%; 与 RF-AGPro 相比, 糊化温度没有显著性差异($P>0.05$), 峰值粘度和终值粘度分别降低 22% 和 12%, 崩解值和回生值分别提高 49% 和 53%。该结果表明, 脱除谷蛋白会降低早籼米粉的糊化温度、峰值粘度和终值粘度并提高其崩解值和回生值。

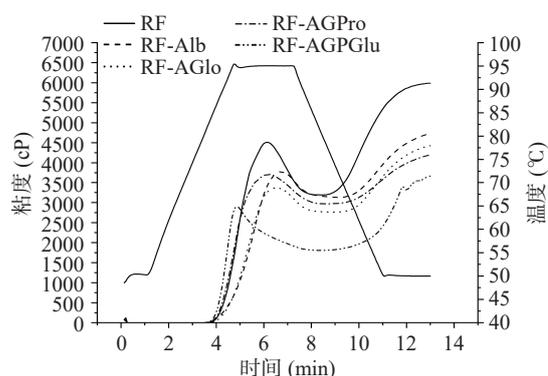


图 3 脱除不同溶解性内源蛋白质对早籼米粉成糊曲线的影响
Fig.3 Effects of removing different soluble endogenous proteins on the pasting curve of rice flour

由于早籼米粉成糊的糊化温度、峰值粘度、终值粘度、崩解值和回生值分别代表其糊化所需温度、与水结合能力、糊化后形成凝胶的能力、颗粒结构破裂程度和回生速度^[26], 根据上述分析结果, 脱除球蛋白可提高早籼米粉的糊化温度, 而脱除醇溶蛋白和谷蛋白则相反; 脱除清蛋白、球蛋白和谷蛋白可抑制早籼米粉与水结合, 而脱除醇溶蛋白则相反; 脱除清蛋白和谷蛋白可抑制早籼米粉糊化后形成凝胶; 脱除清蛋白可抑制早籼米粉颗粒结构破裂和回生, 而脱除谷蛋白则相反。

2.4 脱除不同溶解性内源蛋白质对早籼米粉糊水分结合状态的影响

低场核磁共振参数横向弛豫时间 T_2 以 1 和 40 ms 为界可将水分状态区分为强结合水、弱结合水和自由水^[20]。早籼米粉糊化后的弱结合水含量和峰值时间可以反映其与水结合的情况。含量越高, 结合

表 1 脱除不同溶解性内源蛋白质对早籼米粉成糊特征参数的影响

Table 1 Effects of removing endogenous proteins with different solubility on the pasting characteristic parameters of rice flour

样品	糊化温度(°C)	峰值粘度(cP)	终值粘度(cP)	崩解值(cP)	回生值(cP)
RF	84.9±0.1 ^b	4512.0±90.5 ^a	5987.0±93.3 ^a	1320.5±36.1 ^a	2795.5±38.9 ^a
RF-Alb	84.5±0.6 ^b	3788.0±43.8 ^b	4722.5±29.0 ^b	662.5±65.8 ^c	1597±138.6 ^{bc}
RF-AGlo	86.1±0.6 ^a	3361.5±31.8 ^c	4424.5±91.2 ^{bc}	602±24.0 ^c	1665±83.4 ^{bc}
RF-AGPro	84.1±0.0 ^{bc}	3710.5±3.53 ^b	4190.0±1.4 ^c	740.5±16.26 ^c	1220±11.3 ^c
RF-AGPGlu	83.3±0.0 ^c	2902.5±9.19 ^d	3666.5±382.5 ^d	1101.0±124.4 ^b	1865±497.8 ^b

注: 同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

水越多; 峰值时间越短, 与水结合的程度越大^[27]。依次脱除清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白对早籼米粉糊化后弱结合水含量和峰值时间的影响如图 4 所示。与 RF 相比, RF-Alb 的弱结合水含量和峰值时间无显著性差异($P>0.05$), 说明脱除清蛋白不影响早籼米粉糊化后与水结合的情况。与 RF 和 RF-Alb 相比, RF-AGlo 的弱结合水含量均无显著性差异($P>0.05$), 但弱结合水峰值时间分别缩短 16% 和 19%, 说明脱除球蛋白会提高早籼米粉糊化后与水结合的程度。与 RF 和 RF-AGlo 相比, RF-AGPro 的弱结合水含量分别降低 7% 和无显著性差异($P>0.05$), 弱结合水峰值时间分别缩短 10% 和延长 7%, 说明脱除醇溶蛋白会降低早籼米粉糊化后与水结合的程度。与 RF 和 RF-AGPro 相比, RF-AGPGlu 的弱结合水含量分别降低 21% 和 14%, 弱结合水峰值时间分别缩短 45% 和 38%, 说明脱除谷蛋白会显著降低早籼米粉糊化后的弱结合水含量并提高其与水结合的程度。因此, 脱除谷蛋白可降低早籼米粉糊化后的弱结合水含量, 而脱除球蛋白和谷蛋白均可提高其糊化后与水结合的程度, 但脱除醇溶蛋白则相反。

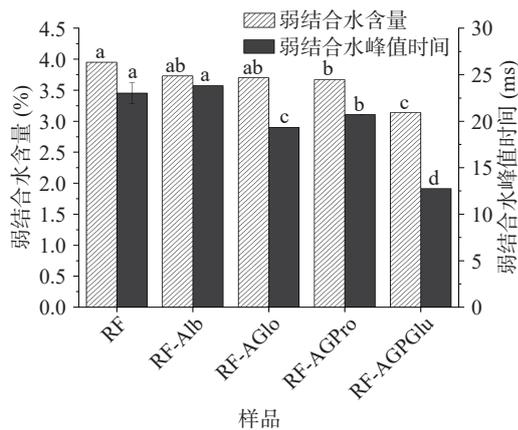


图 4 脱除不同溶解性内源蛋白质对早籼米粉糊化后弱结合水含量和峰值时间的影响

Fig.4 Effects of removing different soluble endogenous proteins on the content and peak time of weakly bound water of gelatinized rice flour

2.5 脱除不同溶解性内源蛋白质对早籼米粉糊流变学特性的影响

流变学参数损耗角正切值 $\tan\delta$ 和储存模量 G' 与损耗模量 G'' 之差($G'-G''$)可用于表征早籼米粉糊的流变学特性^[28]。 $\tan\delta$ 小于 1 时体系呈现似固状态, 反之则呈现似液状态^[29]。 $G'-G''$ 数值越大说明弹性越大, 反之则黏性越大^[20]。依次脱除清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白对早籼米粉糊化后流变学特性的影响如图 5 所示, 所有样品的 $\tan\delta$ 都小于 1, $G'-G''$ 都大于 0, 说明早籼米粉糊化后呈现似固状态并表现出弹性。与 RF 相比, RF-Alb 的 $\tan\delta$ 和 $G'-G''$ 均无显著性差异($P>0.05$), 说明脱除清蛋白不影响早籼米粉糊化后的流变学特性。与 RF 和 RF-Alb 相比,

RF-AGlo 的 $\tan\delta$ 均无显著性差异($P>0.05$), 但 $G'-G''$ 都降低 9%, 说明脱除球蛋白不影响早籼米粉糊化后的状态, 但会降低其弹性。与 RF 和 RF-AGlo 相比, RF-AGPro 的 $\tan\delta$ 分别降低 26% 和 20%, $G'-G''$ 分别提高 26% 和 38%, 说明脱除醇溶蛋白会增强早籼米粉糊化后的似固状态并提高其弹性。与 RF 和 RF-AGPro 相比, RF-AGPGlu 的 $\tan\delta$ 分别降低 28% 和无显著性差异($P>0.05$), $G'-G''$ 分别降低 23% 和 39%, 说明脱除谷蛋白不影响早籼米粉糊化后的状态, 但会降低其弹性。因此, 脱除醇溶蛋白可增强早籼米粉糊化后的似固状态, 而脱除球蛋白和谷蛋白可降低其弹性, 但脱除醇溶蛋白则相反。

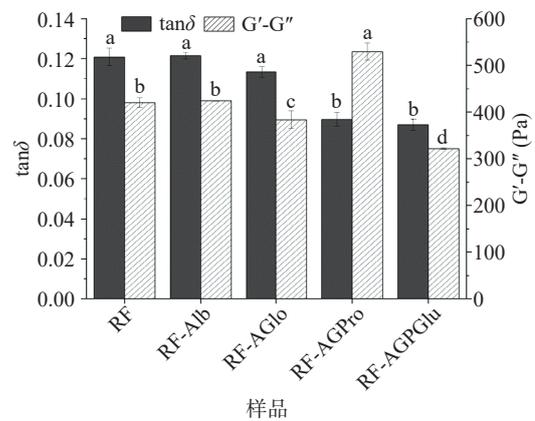


图 5 脱除不同溶解性内源蛋白质对早籼米粉糊化后流变学特性的影响

Fig.5 Effects of removing different soluble endogenous proteins on rheological properties of gelatinized rice flour

2.6 脱除不同溶解性内源蛋白质对早籼米粉糊冻融稳定性的影响

早籼米粉及其依次脱除清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白样品糊化后的冻融稳定性如图 6 所示。经过 1、3、5 次冻融后, 同一样品的析水率变化很小, 但不同样品间的析水率具有显著性差异($P<0.05$)。以首次冻融后的数据进行对比分析: 与 RF 相比, RF-Alb 的析水率无显著性差异($P>0.05$), 说明脱除清蛋白不影响早籼米粉糊化后的冻融稳定性; 与 RF 和

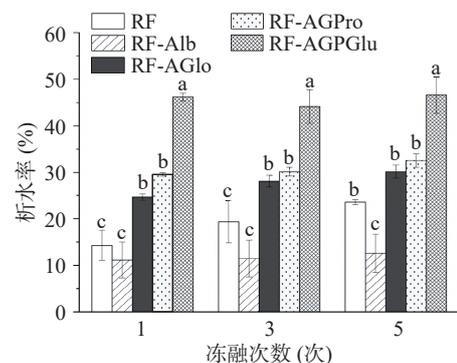


图 6 脱除不同溶解性内源蛋白质对早籼米粉糊化后冻融稳定性的影响

Fig.6 Effects of removing different soluble endogenous proteins on freeze-thaw stability of gelatinized rice flour

RF-Alb相比, RF-AGlo的析水率分别提高72%和121%,说明脱除球蛋白会降低早籼米粉糊化后的冻融稳定性;与RF和RF-AGlo相比, RF-AGPro的析水率分别提高107%和无显著性差异($P>0.05$),说明脱除醇溶蛋白不影响早籼米粉糊化后的冻融稳定性;与RF和RF-AGPro相比, RF-AGPGlu的析水率分别提高223%和56%,说明脱除谷蛋白会降低早籼米粉糊化后的冻融稳定性。因此,脱除球蛋白和谷蛋白可降低早籼米粉糊化后的冻融稳定性。

3 讨论与结论

根据上述研究结果,脱除不同溶解性内源蛋白质对早籼米粉理化性质的影响表现为:脱除清蛋白会抑制早籼米粉颗粒结构破裂并与水结合形成凝胶,也会抑制其糊化后回生;脱除球蛋白会促进早籼米粉溶解,提高其糊化温度,抑制其与水结合,提高其糊化后与水结合强度,降低其糊化后的弹性和冻融稳定性;脱除醇溶蛋白会在高温下促进早籼米粉膨胀,降低其糊化温度,促进其与水结合,降低其糊化后与水结合强度,提高其糊化后的弹性;脱除谷蛋白会促进早籼米粉溶解和在高温下膨胀,降低其糊化温度,促进其颗粒结构破裂但抑制其与水结合形成凝胶,促进其糊化后回生,降低其糊化后的弱结合水含量,提高其糊化后与水结合强度,降低其糊化后的弹性和冻融稳定性。

脱除不同溶解性内源蛋白质对早籼米粉理化性质的不同影响不能简单依据这些内源蛋白质的溶解特性解释。已有研究表明,大米淀粉的糊化特性受其直链淀粉结晶状态的影响^[30],而大米粉内源蛋白质会影响淀粉分子之间及直链淀粉与脂质的相互作用^[31-32],但不同溶解性大米粉内源蛋白质对淀粉分子结构及其与其他组分相互作用的影响尚未清楚。大米粉内源蛋白质可以形成可抑制大米粉颗粒吸水膨胀、使大米粉糊抗剪切的网络结构^[33-36],该作用很可能主要由含量最高的谷蛋白发挥,但本研究结果显示球蛋白和醇溶蛋白对早籼米粉糊的黏弹性具有不同的显著性影响。此外,已有研究发现,难溶于水的醇溶蛋白和谷蛋白经高温变性后,多肽链会舒展开,能提高其水溶性^[37]。因此,不同溶解性内源蛋白质对早籼米粉理化性质的不同影响还需从其与早籼米粉其他内源组分在水热处理过程中的相互作用变化层面进行深入研究。本研究作为今后深入研究提供了线索。

本文得到的研究结论是,脱除不同溶解性内源蛋白质对早籼米粉的溶解度、膨胀度、成糊特性及其糊化后的水分结合状态、流变学特性和冻融稳定性具有差异化显著性影响。该研究作为利用不同溶解性内源蛋白质调控早籼米粉理化性质进而提高早籼米粉制品品质提供了依据。

参考文献

- [1] WANG Q F, LI L M, ZHENG X L. A review of milling damaged starch: Generation, measurement, functionality and its effect on starch-based food systems[J]. *Food Chemistry*, 2020, 315(C): 1-42.
- [2] SREYAJIT S, ANUPAM R. Puffed rice: A materialistic understanding of rice puffing and its associated changes in physicochemical and nutritional characteristics[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2020, 43(9): 1-14.
- [3] LU X, MA R, ZHAN J, et al. The role of protein and its hydrolysates in regulating the digestive properties of starch: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 125: 54-65.
- [4] MENGTING M, HE M, XU Y, et al. Thermal processing of rice grains affects the physical properties of their pregelatinized rice flours[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2020, 55(3): 1375-1385.
- [5] 高文明. 籼米蛋白质对其糊化特性的影响[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2015. [GAO W M. The effect of non-waxy rice proteins on its pasting properties[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2015.]
- [6] 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, 2021. [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, 2021.]
- [7] BAXTER G, ZHAO J, BLANCHARD C. Albumin significantly affects pasting and textural characteristics of rice flour[J]. *Cereal Chemistry*, 2010, 87(3): 250-255.
- [8] 于子越. 糯米淀粉、蛋白组分对其糊化特性影响[D]. 郑州: 河南工业大学, 2021. [YU Z Y. Effects of starch and protein components in glutinous rice flour on its gelatinization properties[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2021.]
- [9] 周显青, 于子越. 籼糯米的蛋白组分对其糊化特性的影响及机制研究[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(6): 1-9. [ZHOU X Q, YU Z Y. Study on the effect and mechanism of the protein of indica glutinous rice on its pasting properties[J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 42(6): 1-9.]
- [10] BAXTER G, BLANCHARD C, ZHAO J. Effects of prolamins on the textural and pasting properties of rice flour and starch[J]. *Journal of Cereal Science*, 2004, 40(3): 205-211.
- [11] 肖满凤, 徐晓辉, 李宏升. 大米蛋白对大米淀粉糊化特性及鲜湿米粉品质影响的研究[J]. *食品科技*, 2016, 41(4): 168-172. [XIAO M F, XU X H, LI H S. Effect of rice protein content on rice starch gelatinization property and wet rice noodle quality[J]. *Food Science and Technology*, 2016, 41(4): 168-172.]
- [12] 黄冬梅, 李卓颖, 潘珍懿, 等. 复合营养方便米粉配方的研制[J]. *现代食品*, 2022, 28(3): 68-70, 81. [HUANG D M, LI Z Y, PAN Z Y, et al. Development of compound nutrition instant rice noodle formula[J]. *Modern Food*, 2022, 28(3): 68-70, 81.]
- [13] 张璐, 段卓, 梅小弟, 等. 早籼米米线专用粉的工艺配方研究[J]. *粮食科技与经济*, 2017, 42(4): 61-64. [ZHANG J, DUAN Z, MEI X D, et al. Research on the process formula of early indica rice noodle special powder[J]. *Food Science and Technology and Economy*, 2017, 42(4): 61-64.]
- [14] 李云波, 许金东, 涂丽华, 等. 不同品种籼米的特性研究[J]. *粮食与饲料工业*, 2007(11): 4-6. [LI Y B, XU J D, XU L H, et al. A study on properties of milled long-grain nonglutinous rice from different varieties[J]. *Cereal & Feed Industry*, 2007(11): 4-6.]
- [15] 李清泉, 李德海. 大米蛋白的提取、特性及其应用的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(19): 347-351. [LI Q Q, LI D H. Research progress in extraction, properties and application status of

- rice protein[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(19): 347–351.]
- [16] 张敏, 周梅, 王长远. 米糠 4 种蛋白质的提取与功能性性质[J]. *食品科学*, 2013, 34(1): 18–21. [ZHANG M, ZHOU M, WANG C Y. Extraction and functional properties of four proteins from rice bran[J]. *Food Science*, 2013, 34(1): 18–21.]
- [17] 孙媛, 蔡迪, 向琴, 等. 麦麸中四种蛋白的 Osborne 法提取分离及性能研究[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(9): 136–139, 203. [SUN Y, CAI D, XIANG Q, et al. Extraction and characterization of four proteins from wheat bran by Osborne[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(9): 136–139, 203.]
- [18] 冯志明, 沈娟, 谭思权. BCA 法测定大米中的蛋白质[J]. *内江科技*, 2017, 38(6): 43, 87. [FENG Z M, SHENG J, TAN S Q. BCA method determines proteins in rice[J]. *Nei Jiang Technology*, 2017, 38(6): 43, 87.]
- [19] 国家食品药品监督管理总局, 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.5-2016 食品中蛋白质的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [State Food and Drug Administration, National Health and Family Planning Commission. GB 5009.5-2016 Determination of Protein in food [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
- [20] 赵文静. 面粉竞争水分式浓缩诱导型海藻酸钠凝胶对面制品品质的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019. [ZHAO W J. Effect of flour competing water type concentration induced sodium alginate gel on the quality of flour products[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2019.]
- [21] YANG Y, CAMPANELLA O H, HAMAKER B R, et al. Rheological investigation of alginate chain interactions induced by concentrating calcium cations[J]. *Food Hydrocolloids*, 2012, 30(1): 26–32.
- [22] 唐双. 复热可提高抗性淀粉含量型大米粉的制备及抗性淀粉形成机理研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2022. [TANG S. Study on the preparation of rice flour with higher content of resistant starch after reheating and the formation mechanism of resistant starch[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2022.]
- [23] LUO Z, WANG Z Z. The role of starch granule-associated proteins in enhancing the strength of indica rice starch gels[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 131: 107826.
- [24] RATNAYAKE W S, JACKSON D S. Starch gelatinization[J]. *Advances in Food and Nutrition Research*, 2009, 55: 221–268.
- [25] ZHONG Y J, XIANG X Y, ZHAO J C, et al. Microwave pre-treatment promotes the annealing modification of rice starch[J]. *Food Chemistry*, 2020, 304(C): 125432.
- [26] 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 & Oils*, 2018, 31(12): 64–67.]
- [27] 高艺书, 范大明, 王丽云, 等. 基于¹H NMR 的大米淀粉与马铃薯淀粉水合过程的水状态及分布差异研究[J]. *食品与发酵工业*, 2017, 43(5): 93–98. [GAO Y S, FAN D M, WANG L Y, et al. ¹H NMR study on the difference in water status and distribution between rice starch and potato starch during hydration process[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2017, 43(5): 93–98.]
- [28] 况海锐, 严奉伟, 汪乐川, 等. 蛋白去除和亲水胶体添加对东北大米粉糊流变特性的影响[J]. *食品科技*, 2019, 44(12): 170–177. [KUANG H R, YAN F W, WANG L C, et al. Effect of protein removal and Hydrocolloid addition on rheological properties of rice flour paste[J]. *Food Science and Technology*, 2019, 44(12): 170–177.]
- [29] TANGSRIANUGUL N, WONGSAGONSUP R, SUPHANTHARIKA M. Physicochemical and rheological properties of flour and starch from Thai pigmented rice cultivars[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 137: 666–675.
- [30] DING, ZHANG B, TAN C P, et al. Effects of limited moisture content and storing temperature on retrogradation of rice starch[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 137: 1068–1075.
- [31] CHAO C, HUANG S, YU J, et al. Molecular mechanisms underlying the formation of starch-lipid complexes during simulated food processing: A dynamic structural analysis[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 244: 116464.
- [32] DING Y Y, CHENG J J, LIN Q Y, et al. Effects of endogenous proteins and lipids on structural, thermal, rheological, and pasting properties and digestibility of adlay seed (*Coix lacryma-jobi* L.) starch[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 111(10): 16254.
- [33] YANG Y, JIAO A, ZHAO S, et al. Effect of removal of endogenous non-starch components on the structural, physicochemical properties, and *in vitro* digestibility of highland barley starch[J]. *Food hydrocolloids*, 2021, 117(2): 106698.
- [34] LI Z N, WANG L, CHEN Z X, et al. Impact of protein content on processing and texture properties of waxy rice flour and glutinous dumpling[J]. *Journal of Cereal Science*, 2018, 81: 30–36.
- [35] SALEH M I. Protein-starch matrix microstructure during rice flour pastes formation[J]. *Journal of Cereal Science*, 2017, 74: 183–186.
- [36] SALEH M I, ABU-WAAR Z Y, AKASH M W, et al. Effect of stabilized rice bran fractions on the formation of rice flour pasting properties[J]. *Cereal Chemistry*, 2014, 91(6): 603–609.
- [37] NA-NAKORN K, HAMAKER B, TONGTA S. Physicochemical and rheological properties of cooked extruded reformed rice with added protein or fiber[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 151(1): 112196.