

韧化处理对大米淀粉性质的影响

刘惠惠, 廖卢艳*

(湖南农业大学 食品科学技术学院, 湖南 长沙 410128)

摘要: 为韧化处理在大米淀粉改性中的应用提供理论依据, 作者以余赤早籼米为原料, 在不同温度(50~70 ℃)和水分质量分数(45%~65%)条件下对大米进行韧化处理, 然后提取韧化处理后大米中的淀粉, 以未经韧化处理提取的大米淀粉为对照, 研究韧化处理对大米淀粉溶解度、膨润力、糊化特性、消化特性和冻融稳定性的影响。研究表明: 与对照组相比, 经韧化处理的大米淀粉溶解度和膨润力降低; 峰值黏度、最终黏度、谷值黏度、回生值和衰减值均有所降低, 糊化温度升高, 不同韧化处理温度对衰减值的影响差异显著; 淀粉中 RDS(快消化淀粉)质量分数升高, RS(抗性淀粉)质量分数减少, SDS(慢消化淀粉)质量分数随着韧化处理条件的不同而不同, 说明韧化处理提高了大米淀粉的消化性, 也使大米淀粉冻融稳定性下降。

关键词: 韧化处理; 大米淀粉; 理化特性

中图分类号: TS 213.3 文章编号: 1673-1689(2023)03-0074-09 DOI: 10.3969/j.issn. 1673-1689.2023.03.009

Effect of Annealing on Physicochemical Properties of Rice Starch

LIU Huihui, LIAO Luyan*

(School of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: In order to provide a theoretical basis for the application of annealing treatment in the modification of rice starch, Yuchi early indica rice was used as a raw material and annealed at different temperature (50~70 ℃) and moisture content (45% ~ 65%). Then the starch in the annealed rice was extracted, and the unannealed rice starch was used as the control. The effects of annealing treatment on the solubility, swelling power, gelatinization, digestion and freeze-thaw stability of rice starch were studied. The results showed that compared with the control, the solubility and swelling power of annealed rice starch decreased. The peak viscosity, final viscosity, valley viscosity, retrogradation value and attenuation value decreased, while the gelatinization temperature increased. The effect of annealing temperature on attenuation value was significant. The content of RDS (fast digestible starch) in starch increased, the content of RS(resistant starch) decreased, and the content of SDS (slowly digestible starch) varied with different annealing conditions, indicating that annealing treatment improved the digestibility of rice starch. However, the annealing treatment decreased the freeze-thaw stability of rice starch.

Keywords: annealing treatment, rice starch, physicochemical property

收稿日期: 2021-07-16

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2019JJ50262)。

* 通信作者: 廖卢艳(1982—), 女, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事粮食深加工及碳水化合物资源开发利用方面的研究。

E-mail: 120425073@qq.com

初化处理是一种在水与热作用下的淀粉物理改性方式,通常是指淀粉在过量水分或平衡水分下,以及温和的温度条件下处理一段时间的过程,在此过程中淀粉结构及性质发生改变^[1-2]。初化处理因其温度低于糊化温度,所以在处理过程中,淀粉结构并不会被破坏,淀粉链也不会从淀粉颗粒中溶出。已有相关研究表明,初化处理可以诱导淀粉中直链淀粉和支链淀粉交替排列形成层状结构,使淀粉的有序化和无序化结构相互转化,从而达到调控淀粉功能特性的目的^[3]。目前由于我国对食品安全问题高度重视,初化处理过程仅涉及水与热的作用,没有任何化学试剂参与,且初化处理对淀粉的改性作用明显^[4]。因此初化处理作为一种安全有效的淀粉改性方法,具有重要的研究价值。

国外学者对初化处理进行研究时,主要选择的是小麦、玉米、马铃薯等淀粉。Genkina 等研究发现红薯淀粉的溶解度、膨润力在初化温度升高后有所降低,糊化温度升高^[5]。国内关于初化处理研究则主要集中在玉米、马铃薯、甘薯及大米等淀粉上。刘畅等研究了初化处理对板栗淀粉特性的影响,发现初化处理使板栗淀粉糊化温度升高,体外消化性变化明显^[6]。杜双奎等以玉米淀粉为研究对象,发现初化处理能降低玉米淀粉黏度,随着初化温度的提高,其糊化温度逐渐升高,而峰值黏度、最终黏度则相反^[7]。孙新涛等对不同来源淀粉进行了初化处理,研究发现鹰嘴豆、绿豆和玉米淀粉在经过初化处理后,冻融稳定性增强,淀粉峰值黏度呈现下降趋势,而糊化温度呈现升高趋势,淀粉溶解度均有不同程度的降低^[8]。由此可见,初化处理能够改变淀粉的理化性质和结构。

大米淀粉作为一种主要的谷物淀粉,在食品工业生产中有着非常重要的地位。与其他淀粉相比,大米淀粉颗粒体积较小,并且颗粒大小较均匀,具备一些其他淀粉所没有的特性,如糊化的大米淀粉吸水能力较强。此外,大米淀粉还具有一些特定的功能特性,如大米淀粉经过一定处理可得到抗性淀粉并广泛应用于食品加工中,也可制备多孔淀粉用于食品、医药等行业^[9]。大米淀粉的性质是淀粉颗粒的结构决定的,虽然天然淀粉由于受本身性质的限制,并不能完全满足食品加工的需要,但各种变性淀粉能广泛用于食品、造纸、纺织等行业^[10-11]。因此大米淀粉具有广阔的市场前景。

目前,关于大米淀粉进行初化处理的研究,主要集中在初化处理对淀粉性质、结构的作用,以及对米粉等产品品质影响等。目前作者所在课题组对初化处理大米粉方面研究较多,廖卢艳等研究了初化处理改善米粉品质的工艺条件,结果表明初化处理是一种改善米粉品质的有效方法^[3]。邹杰研究了不同初化处理条件对米粉品质的影响^[12]。因此作者在前期研究基础上以余赤早籼米为原料,首先在不同温度和水分质量分数条件下对大米进行初化处理,然后提取初化处理后大米中的淀粉,以未经初化处理的大米淀粉为参照,研究初化处理对大米淀粉溶解度、膨润力、糊化特性、消化特性和冻融稳定性的影响。以期初化处理在大米淀粉改性的应用中进一步提供理论依据^[13]。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与amp;仪器

1.1.1 材料与amp;试剂 早籼米(余赤):湖南金健米业股份有限公司提供;3,5-二硝基水杨酸、葡萄糖(分析纯)等:国药集团化学试剂有限公司产品。

1.1.2 主要仪器 RVA-Techmaster 快速黏度分析仪:北京波通瑞华科学仪器有限公司产品;101-2AB 电热鼓风干燥箱:天津市泰斯特仪器有限公司产品;AE 2400 电子分析天平:湘仪天平仪器设备有限公司产品;TDZ5 台式低速离心机:湖南赫西仪器装备有限公司产品;SHZ-B 水浴恒温振荡器:常州华普达教学仪器有限公司产品;TQ-1000Y 高速多功能粉碎机:永康市天祺盛世工贸有限公司产品。

1.2 实验方法

1.2.1 大米初化处理 参照邹杰等的方法对大米进行初化处理^[12]。选取余赤大米作为原料,根据 GB50093—2010 中的直接干燥法测定样品的水分质量分数,称取 500 g 大米于铝箔自封袋中,用蒸馏水调节水分,充分混匀后封口并置于已经设置好温度的烘箱进行初化处理,最后将处理好的大米均匀摊开在干净的纱布上,置于 40 ℃ 的烘箱中烘至大米水分质量分数低于 13%,并使用粉碎机将大米进行粉碎,将处理好的大米粉末过 100 目筛,用自封袋保存好备用。具体处理条件为:固定初化处理温度为 60 ℃,初化时间为 18 h,设置水分质量分数分别为 45%、50%、55%、60%、65%;固定初化处理水分质量分数为 55%,初化时间为 18 h,调节初化处理温

度分别为 50、55、60、65、70 ℃。

1.2.2 提取大米淀粉 以未处理和经钝化处理的余赤大米为原料,参照唐玮泽等的方法制备大米淀粉^[14]。将已粉碎过筛的大米粉按照固液比 1 g:4 mL 加水,再加入一定量的 NaOH 溶液(质量分数 0.3%),搅拌均匀,4 h 后将其放在恒温水浴振荡器中振荡至反应充分,最后将乳液过 200 目筛,以 3 000 r/min 离心 20 min,倒弃上清液,用蒸馏水将离心后的沉淀物清洗 3 遍,最后置于 40 ℃烘箱中干燥,最终得到大米淀粉。

1.2.3 总淀粉质量分数的测定 根据 GB5009.9—2016 中酸水解法,测定样品的总淀粉质量分数。

1.2.4 大米淀粉溶解度和膨润力的测定 参照王晓培等的方法并加以改进^[15],测定大米淀粉溶解度和膨润力。准确称取 800 mg 大米淀粉(以干基质量计)放入已预先称重的 100 mL 离心管中,往其中加入 25 mL 蒸馏水,振荡混匀制备成淀粉悬浮液后,分别于 65、75、85、95 ℃下的水浴锅中振荡 30 min,再在 25 ℃下平衡 5 min,最后调整离心机转速为 5 000 r/min,离心 20 min 后,将上清液倒入已预先干燥至恒重且已称好质量的干净铝盒内,将装有上清液的铝盒用坩埚钳夹到烘箱进行干燥,烘箱温度为 105 ℃。按公式(1)~(2)计算溶解度和膨润力。

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

$$P = \frac{m_2}{m_0 \times (1-S)} \times 100\% \quad (2)$$

式中: m_1 表示干燥至恒重的铝盒质量,g; m_2 表示湿沉淀物质量,g; m_0 表示大米淀粉干基质量,g; S 表示溶解度,%; P 表示膨润力,%。

1.2.5 大米淀粉糊化特性的测定 参照任剑豪等的方法和仪器设定条件使用快速黏度分析仪(RVA)测定样品的糊化特性^[16]。将样品的水分质量分数输入电脑中的 TCW 程序软件,计算出应称取的样品量,将称好的样品和 25 mL 蒸馏水加到糊化专用铝筒中,使用配套塑料搅拌桨混匀后放入 RVA 仪器中进行测定。

1.2.6 大米淀粉体外消化特性的测定 参照前人的方法并改进^[17-18],测定大米淀粉的体外消化特性。准确称取 50 mg 样品于 50 mL 离心管中,加入 5 mL pH 为 5.2 的醋酸钠缓冲液后,轻微振荡至均匀,然后将离心管置于 100 ℃水浴锅中,加热 15 min 至大

米淀粉糊化完全,取出后用冷水将离心管冷却至室温,再加入 2 mL 缓冲液,离心管盖好盖后放入 37 ℃恒温水浴锅中以 120 r/min 振荡 10 min 平衡温度,之后加入已预先平衡温度的 1 mL 胃蛋白酶液(250 U/mL),孵育 10 min,加入已预先平衡温度的 1 mL α -淀粉酶(50 U/mL)和 α -淀粉葡萄糖苷酶(70 U/mL)的混合酶液,并用缓冲液定容到 10 mL,置于 37 ℃恒温水浴锅中以 120 r/min 振荡,并准确计时。当反应 20 min 和 120 min 时,分别取 1 mL 水解液,放入装有 4 mL 的 0.4 mol/L NaOH 溶液的 25 mL 比色管中进行灭酶处理,取 DNS 试剂 2 mL 加入比色管,用橡皮筋将几根比色管固定在一起后,放入沸水浴中进行显色反应 5 min,然后以流水迅速冷却,最后定容到 25 mL 摇匀,以空白调零,分光光度计预热 30 min,使用前设置波长为 540 nm,最后测定溶液吸光度。同时取 1 mL 蒸馏水代替 1 mL 水解液,进行相同的处理作为空白。测得的葡萄糖标准曲线方程式为 $Y=0.543 6X-0.048 1$, $R^2=0.999 6$ 。按公式(3)~(5)计算。

$$w_{RDS} = \frac{m_{20} - m_{FG}}{m_{TS}} \times 0.9 \times 100\% \quad (3)$$

$$w_{SDS} = \frac{m_{120} - m_{20}}{m_{TS}} \times 0.9 \times 100\% \quad (4)$$

$$w_{RS} = \frac{m_{TS} - w_{RDS} - w_{SDS}}{m_{TS}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: w_{RDS} 为 RDS 质量分数,%; w_{SDS} 为 SDS 质量分数,%; w_{RS} 为 RS 质量分数,%; m_{20} 为淀粉 20 min 内产生的葡萄糖质量,mg; m_{FG} 为水解前大米淀粉中葡萄糖质量,mg; m_{120} 为淀粉 120 min 内产生的葡萄糖质量,mg; m_{TS} 为大米淀粉样品中总淀粉质量,mg。

1.2.7 大米淀粉冻融稳定性的测定 参考前人的方法并稍加改动^[19],称取一定量(精确到 0.01 g)的大米淀粉样品,用蒸馏水配成质量分数 6%的淀粉乳。90 ℃水浴中搅拌加热 20 min 至淀粉乳完全糊化,自然冷却至室温后倒入已知质量的离心管中。放入 -18 ℃冰箱中密封冷冻保存 24 h 后取出,自然解冻至室温后称量,4 000 r/min 离心 20 min 后倒掉离心管中的上清液,称量,用析水率表示冻融稳定性,按公式(6)计算。

$$R = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \times 100\% \quad (6)$$

式中: m_0 为离心管质量,g; m_1 为解冻至室温后样品和离心管质量,g; m_2 为除去上清液后样品与离心管

总质量, g; R 为析水率, %。

1.2.8 数据分析 所有数据采用 EXCEL 2010 软件进行整理。采用 SPSS 20.0 软件进行数据的显著性分析, 使用 Duncan 多重检验方法, $P < 0.05$ 表示差异显著。每个样品至少平行测 2 次, 数值表示为平均值 \pm 标准差。

2 结果与分析

2.1 糊化处理对大米淀粉糊化特性的影响

由表 1 可知, 不同水分质量分数下所制备的糊化大米淀粉糊化特性指标变异系数均较小, 其中最高的变异系数也只有 9.27%, 说明改变糊化处理水分质量分数对大米淀粉糊化特性指标的影响不大。水分质量分数增加时, 峰值黏度和谷值黏度随着水分质量分数的升高也呈现增大的趋势, 但在水分质量分数较高后, 谷值黏度开始下降, 在水分质量分数为 60% 时, 谷值黏度达到最大; 最终黏度、衰减、回生值随着水分质量分数的增加先逐渐降低后逐渐升高, 最终黏度、回生值在水分质量分数为 50% 时最低, 衰减在水分质量分数 55% 时最低; 糊化温度刚开始则呈现逐渐降低趋势, 在水分质量分数比较高后, 糊化温度升高。

由表 2 可知, 改变糊化处理温度条件时, 大米淀粉的峰值黏度、衰减随着温度的升高而逐渐降低, 衰减的变异系数为 23.55%, 高于其他糊化特性指标, 说明改变糊化处理温度对淀粉糊化的衰减影响最大; 最终黏度呈现先升后降的变化规律, 在 60 °C 时达到最大; 回生值出现先减少再增加后又减少的波动现象, 在 55 °C 时回生值最小, 在 65 °C 时回生值最大, 且与其他样品差异显著 ($P < 0.05$); 糊化温度则一直升高, 在 50、55 °C 时, 糊化温度略低于原样, 在 60 °C 时, 糊化温度开始高于原样, 糊化温度的变异系数只有 1.43%, 说明糊化处理温度的改变对糊化温度的影响不大。

表 1、表 2 中数据显示, 与未处理的淀粉相比, 峰值黏度、谷值黏度及最终黏度有所降低, 这与人研究结论^[12]一致。糊化处理后的淀粉峰值黏度下降, 说明糊化处理降低了淀粉吸水膨胀能力, 原因在于糊化处理致使淀粉链之间相互作用, 淀粉颗粒结构发生变化, 淀粉结晶度增加, 淀粉分子结合水分子的能力下降。糊化处理后的淀粉最终黏度下降, 说明糊化处理降低了淀粉糊冷却后形成的凝胶强度, 使淀粉凝胶网络结构变得更疏松。结果显示, 糊化处理对淀粉糊的热稳定性有所提升^[20]。糊化处

表 1 糊化处理中水分质量分数对大米淀粉糊化特性的影响

Table 1 Effect of moisture mass fraction on the pasting properties of rice starch under annealing treatment

处理条件	峰值黏度/(Pa·s)	谷值黏度/(Pa·s)	最终黏度/(Pa·s)	衰减/(Pa·s)	回生值/(Pa·s)	糊化温度/°C
未处理	2 937.68±63.44 ^a	2 254.00±79.50 ^a	4 155.30±127.40 ^a	683.68±29.10 ^{bc}	1 901.33±57.33 ^b	86.20±0.36 ^c
水分质量分数 45%	2 615.10±110.83 ^b	1 815.60±132.90 ^c	3 607.50±142.24 ^c	799.50±46.53 ^a	1 791.83±62.42 ^c	88.31±1.20 ^a
水分质量分数 50%	2 610.84±88.00 ^b	1 928.60±95.93 ^{bc}	3 507.00±219.73 ^c	682.18±17.75 ^{bc}	1 578.30±131.29 ^d	87.01±0.42 ^{bc}
水分质量分数 55%	2 615.68±50.64 ^b	1 983.16±26.29 ^b	3 841.16±56.62 ^b	632.50±51.23 ^c	1 858.00±32.79 ^{bc}	86.94±0.29 ^{bc}
水分质量分数 60%	2 688.40±114.31 ^b	2 032.50±156.27 ^b	3 914.80±192.33 ^b	650.66±47.04 ^c	1 882.34±37.01 ^b	86.51±0.97 ^{bc}
水分质量分数 65%	2 690.83±56.71 ^b	1 977.00±103.41 ^b	4 085.50±115.23 ^a	713.83±63.32 ^b	2 108.50±42.45 ^a	87.31±0.63 ^b

注: 同一列中不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

表 2 糊化处理中温度对大米淀粉糊化特性的影响

Table 2 Effect of temperature on the pasting properties of rice starch under annealing treatment

处理条件	峰值黏度/(Pa·s)	谷值黏度/(Pa·s)	最终黏度/(Pa·s)	衰减/(Pa·s)	回生值/(Pa·s)	糊化温度/°C
未处理	3 497.00±143.00 ^a	2 851.00±100.97 ^a	4 561.33±79.57 ^a	646.00±46.27 ^a	1 710.33±52.22 ^{ab}	84.28±0.05 ^c
50 °C	3 282.66±72.11 ^b	2 644.66±49.91 ^c	4 325.83±79.97 ^b	638.00±50.71 ^a	1 681.10±74.48 ^{abc}	83.40±0.45 ^d
55 °C	3 292.50±76.28 ^b	2 763.34±50.85 ^b	4 334.00±82.74 ^b	529.18±81.07 ^b	1 570.68±63.10 ^c	83.59±0.34 ^d
60 °C	3 211.84±82.47 ^b	2 781.50±47.93 ^{ab}	4 405.50±176.32 ^b	430.34±58.93 ^c	1 624.00±156.09 ^b	84.83±0.39 ^b
65 °C	2 940.00±96.93 ^c	2 545.18±87.03 ^d	4 301.00±132.64 ^b	394.84±24.13 ^c	1 755.84±51.33 ^a	85.24±0.57 ^b
70 °C	2 420.50±41.57 ^d	2 036.00±51.22 ^e	3 624.00±164.34 ^c	384.50±38.78 ^c	1 588.00±131.93 ^c	86.68±0.34 ^a

注: 同一列中不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

理后出现淀粉回生值降低的现象,回生值越大,表示淀粉糊越易老化,结果表明经初化处理的淀粉更不易老化。初化处理能使淀粉回生值降低的原因可能是支链淀粉含量有一定的升高,从而使淀粉不易回生^[21]。初化温度低于 60 °C 时,糊化温度降低,初化温度达到 60 °C 后,糊化温度升高,其原因可能是在初化温度高于 60 °C 的环境下,由于水和热共同作用,淀粉颗粒结构发生改变,非结晶区的淀粉链有机会重新组合排列,已熔融的微结晶再次取向,淀粉间缔结程度进一步增大,分子间距缩短、作用力增强,致使结晶度增加,从而导致糊化温度升高。

2.2 初化处理对大米淀粉溶解度和膨润力的影响

淀粉的溶解度和膨润力反映了淀粉颗粒内部结晶区与非结晶区之间的相互联系,溶解度能在一定程度上反映淀粉颗粒内部结构,淀粉之间结合紧密程度的大小^[19]。

从表 3 可以看出,未处理的原样膨润力均高于其他样品,在水分质量分数为 50%、55%、60%、65%

条件下初化处理的淀粉,相较于原样溶解度均降低,且淀粉溶解度随着水分质量分数的增加基本呈现减少趋势,原因可能是剧烈热能和水分共同作用,迫使淀粉内部部分支链结构发生断裂,造成溶解度下降^[22]。而随着环境温度的升高,淀粉溶解度和膨润力逐渐增加。在 65 °C 下不同水分质量分数的大米淀粉溶解度的变异系数最大,为 20.36%,在 95 °C 下不同水分质量分数的大米淀粉膨润力的变异系数最大,为 10.47%。但不同环境温度下各样品溶解度变异系数均大于膨润力变异系数,说明不同水分质量分数对大米淀粉溶解度影响较膨润力大,淀粉颗粒的溶解度与膨润力存在差异的主要原因是淀粉中直链淀粉与支链淀粉的比例不同,以及淀粉结构上的不同^[23]。环境温度升高后,样品的溶解度差异开始缩小,说明环境温度越高,水分质量分数对大米淀粉的溶解度影响越小,王诗雁等发现淀粉溶解度与结构松散的非结晶区在淀粉颗粒中所占的比例呈正比^[24]。

由表 4 可知,在环境温度为 65 °C 时,不同处理

表 3 初化处理中水分质量分数对大米淀粉溶解度和膨润力的影响

Table 3 Effect of moisture mass fraction on the solubility and swelling degree of rice starch under annealing treatment

处理条件	65 °C		75 °C		85 °C		95 °C	
	溶解度	膨润力	溶解度	膨润力	溶解度	膨润力	溶解度	膨润力
未处理	1.34±0.07 ^b	3.74±0.09 ^a	2.30±0.06 ^a	7.61±0.18 ^a	4.09±0.24 ^b	11.03±0.23 ^a	11.27±1.08 ^a	19.82±0.57 ^a
水分质量分数 45%	1.93±0.14 ^a	3.45±0.08 ^{ab}	2.63±0.16 ^a	6.93±0.24 ^b	4.48±0.15 ^a	9.78±0.15 ^b	8.56±0.23 ^b	15.84±0.58 ^b
水分质量分数 50%	1.23±0.02 ^b	3.67±0.18 ^a	1.66±0.03 ^c	6.30±0.09 ^d	3.59±0.34 ^c	9.70±0.15 ^b	8.38±0.19 ^b	15.32±0.65 ^b
水分质量分数 55%	1.23±0.11 ^b	3.57±0.39 ^a	1.83±0.15 ^c	6.67±0.14 ^{bc}	3.19±0.10 ^d	9.80±0.10 ^b	8.53±0.41 ^b	15.66±0.30 ^b
水分质量分数 60%	1.33±0.13 ^b	3.20±0.03 ^b	1.81±0.13 ^c	6.48±0.15 ^{cd}	2.79±0.26 ^c	8.64±0.36 ^c	8.46±0.27 ^b	15.59±0.61 ^b
水分质量分数 65%	1.19±0.06 ^b	2.81±0.06 ^c	1.77±0.17 ^c	6.24±0.14 ^d	3.10±0.02 ^{bc}	8.56±0.23 ^c	8.81±0.55 ^b	15.82±0.55 ^b

注:同一列中不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

组的大米淀粉溶解度和膨润力变异系数均最大,为 20.36% 和 11.39%,说明不同初化处理温度对 65 °C 下的大米淀粉溶解度和膨润力影响较大。随着环境温度增加,不同初化处理温度下淀粉溶解度和膨润力均增大,在 95 °C 时,样品的溶解度与膨润力达到最大。其原因可能是大米淀粉在水中加热的过程中,水分进入到淀粉中,因淀粉与淀粉之间通过氢键结合排列很紧密,分子之间只有很小的间隙,所以只有少量的水分能进入淀粉中使淀粉体积稍有膨胀,此时少量直链淀粉分子从淀粉颗粒中溶出,分散在水中,淀粉稍微溶解,所以在环境温度为 65 °C 时,样品的溶解度与膨润力较小。环境温度升

高,更多的水分子进入淀粉中,淀粉体积膨胀更明显,所以在 75、85 °C 时,淀粉的溶解度与膨润力增加较显著。环境温度继续升高到 95 °C 达到淀粉糊化温度(淀粉的糊化温度在 85 °C 左右),结晶区的胶束全部被破坏,淀粉颗粒溶解膨胀,内部结构被破坏,淀粉溶解度与膨润力进一步增大^[25]。

综合表 3 和表 4 结果可知,与未处理的淀粉相比,在环境温度为 95 °C 时,经初化处理的淀粉溶解度和膨润力有所降低,其原因可能是在一定水分和热的共同作用下,直链淀粉与支链淀粉形成了稳定结构会导致溶解度与膨润力下降^[21,26]。部分经初化处理的淀粉溶解度与膨润力高于原样,可能是因为

表 4 韧化处理中温度对大米淀粉溶解度和膨润力的影响

Table 4 Effect of temperature on the solubility and swelling degree of rice starch under annealing treatment

%

处理条件	65 °C		75 °C		85 °C		95 °C	
	溶解度	膨润力	溶解度	膨润力	溶解度	膨润力	溶解度	膨润力
未处理	1.34±0.07 ^b	3.74±0.09 ^{bc}	2.30±0.06 ^a	7.61±0.18 ^a	4.09±0.24 ^b	11.03±0.23 ^a	11.27±1.08 ^a	19.82±0.57 ^a
50 °C	1.93±0.14 ^a	4.09±0.12 ^a	2.63±0.16 ^a	7.69±0.27 ^a	4.48±0.15 ^a	10.98±0.08 ^a	8.56±0.23 ^b	18.93±0.23 ^a
55 °C	1.23±0.02 ^b	3.91±0.10 ^b	1.66±0.03 ^c	7.64±0.29 ^a	3.59±0.34 ^c	10.42±0.27 ^b	8.38±0.19 ^b	19.34±1.03 ^a
60 °C	1.23±0.11 ^b	3.61±0.06 ^c	1.83±0.15 ^c	7.10±0.18 ^b	3.19±0.10 ^d	9.61±0.01 ^{cd}	8.53±0.41 ^b	17.63±0.67 ^b
65 °C	1.33±0.13 ^b	3.08±0.09 ^d	1.81±0.13 ^c	7.31±0.17 ^{ab}	2.79±0.26 ^c	9.69±0.15 ^c	8.46±0.27 ^b	16.50±0.24 ^c
70 °C	1.19±0.06 ^b	3.15±0.11 ^d	1.77±0.17 ^c	6.61±0.06 ^c	3.10±0.02 ^{de}	9.34±0.14 ^d	8.81±0.55 ^b	16.15±0.29 ^c

注:同一列中不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

在一定的条件下,淀粉分子发生断裂,暴露出更多的还原性羟基,淀粉与水联结的机会因此增多,最终使大米淀粉的溶解度与膨润力升高^[15]。

2.3 韧化处理对大米淀粉消化特性的影响

由表 5 可知,随着韧化处理的水分质量分数增加,RDS 质量分数逐渐增加,在韧化水分质量分数为 65%时,RDS 质量分数相较于原样增加了 9.12%,而淀粉酶解速率受淀粉的颗粒形貌、粒径大小、结晶类型和结晶度等因素的影响,说明韧化处理条件的不同对大米淀粉酶解速率有较大影响。SDS 质量分数先降低后升高,韧化水分质量分数为 55%时,SDS 质量分数由 9.47%降低到了 4.60%;水分质量分数为 45%时,SDS 质量分数比原样略有上升,SDS 质量分数的变异系数远超过 RDS 和 RS 的变异系数,说明韧化处理水分质量分数的改变对 SDS 质量分数有较大影响。RS 质量分数表现出先增加后降低的趋势,在水分质量分数为 55%时,RS 质量分数最高,但低于原样。

由表 6 可知,改变韧化处理温度时,RDS 质量分数随着温度的升高呈现先增加后减少最后又增

加的波动变化趋势。韧化温度为 70 °C时,RDS 质量分数显著高于其他样品($P<0.05$),达到 58.75%。在 55 °C时,SDS 质量分数降低到了 5.67%,在 60 °C时,升高到 11.88%,SDS 的变异系数高达 23.59%,说明韧化温度的改变对 SDS 质量分数影响显著。RS 质量分数随着韧化温度升高呈现先增加后减少的趋势,在 50 °C时 RS 质量分数显著低于其他样品($P<0.05$),为 32.82%,比原样低 7.40%。由表 5、表 6 结果可知,与未经韧化处理的淀粉相比,韧化处理的淀粉 RDS 质量分数升高,RS 质量分数降低。原因可能是韧化处理使大米淀粉颗粒疏松,酶解时酶液可以轻易地进入到淀粉结构中,从而更快地水解淀粉^[27]。因此大米淀粉经韧化处理后,消化性有所提高,这与刘成梅等研究结论一致^[20]。

2.4 韧化处理对大米淀粉冻融稳定性的影响

淀粉糊被放入冰箱进行冷冻过程中,淀粉凝胶中固形物含量高的部分因所含的淀粉链较多,所以在这部分区域中,淀粉链间更易于互相联结,最终形成厚丝状,淀粉间的水分子则会在低温下冻结成冰晶。当将冷冻后的淀粉糊解冻时,由于温度升高,

表 5 韧化处理中水分质量分数对大米淀粉消化特性的影响

Table 5 Effect of moisture mass fraction on the digestion characteristics of rice starch under annealing treatment

处理条件	质量分数/%		
	RDS	SDS	RS
未处理	50.35±5.53 ^b	9.43±0.57 ^a	40.22±5.84 ^a
水分质量分数 45%	56.98±2.38 ^a	9.47±1.78 ^a	33.55±1.36 ^b
水分质量分数 50%	57.32±0.43 ^a	8.21±0.57 ^{ab}	34.47±0.32 ^{ab}
水分质量分数 55%	57.96±3.48 ^a	4.60±0.51 ^b	37.44±3.57 ^{ab}
水分质量分数 60%	58.79±2.18 ^a	6.50±2.26 ^{ab}	34.71±0.14 ^{ab}
水分质量分数 65%	59.47±2.12 ^a	7.42±4.48 ^{ab}	33.11±3.97 ^b

注:同一列中不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

表 6 韧化处理中温度对大米淀粉消化特性的影响

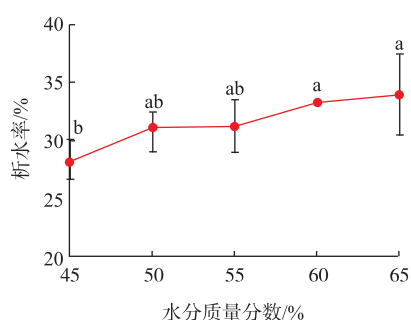
Table 6 Effect of temperature on the digestibility of rice starch under annealing treatment

处理条件	质量分数/%		
	RDS	SDS	RS
未处理	50.35±5.53 ^b	9.43±0.57 ^{ab}	40.22±5.84 ^a
50 °C	57.62±0.23 ^a	9.56±2.62 ^b	32.82±2.82 ^b
55 °C	58.08±2.58 ^a	5.67±4.29 ^b	36.25±3.03 ^a
60 °C	54.22±1.96 ^{ab}	11.88±2.24 ^a	33.90±4.19 ^{ab}
65 °C	55.54±2.67 ^{ab}	10.00±2.66 ^{ab}	34.46±0.26 ^{ab}
70 °C	58.75±3.81 ^a	7.64±1.02 ^{ab}	33.61±4.23 ^{ab}

注:同一列中不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

淀粉间隙中的冰晶便融化成水,水从淀粉分子所形成的网络结构中析出。淀粉糊最终表现出海绵状^[28]。

从图 1 可以看出,随着韧化处理水分质量分数的增加,淀粉糊在冻融过程中析水率逐渐增大,淀粉的析水率从 28.24% 上升到 34.04%,在水分质量分数为 65% 时,析水率达到最大,相较于原样析水率上升了 10.42%,当水分质量分数达到 50% 后,随着水分质量分数增加,析水率变化趋于稳定,说明韧化处理时,达到一定的水分质量分数后,大米淀粉冻融稳定性趋于稳定。



不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

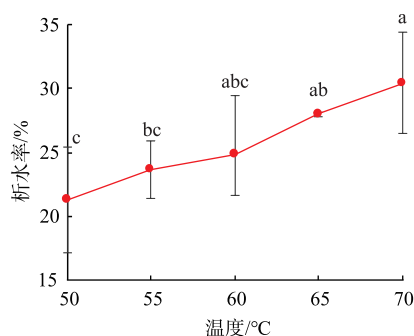
图 1 韧化处理中水分质量分数对大米淀粉冻融稳定性的影响

Fig. 1 Effect of moisture mass fraction on freeze-thaw stability of rice starch under annealing treatment

由图 2 可知,在韧化温度逐渐升高后,淀粉的析水率也不断增加,随着温度的升高,析水率从 21.27% 上升到 30.25%,在 70 °C 时,韧化处理淀粉的析水率比原样高出 6.73%,而在韧化温度为 50 °C 时,样品析水率低于原样的析水率,说明 50 °C 韧化温度下的大米淀粉冻融稳定性相比于原样有所提高,可能是因为此时温度较低,韧化处理对淀粉分子间作用力造成的破坏程度较低。

图 1、图 2 结果显示,经韧化处理的大米淀粉的

析水率高于未处理的淀粉析水率,即韧化处理使大米淀粉的析水率上升,降低了大米淀粉的冻融稳定性。其原因可能是在韧化处理过程中,淀粉内部结构发生了变化,淀粉颗粒与水的结合能力被削弱,淀粉保持胶状结构的能力降低,水分子更容易从凝胶结构中析出^[19]。综合图 1、图 2 结果可知,韧化处理温度条件与水分条件的改变对淀粉结构的影响不同,两者相比较,水分质量分数对淀粉的冻融稳定性影响比温度更显著。



不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

图 2 韧化处理中温度对大米淀粉冻融稳定性的影响

Fig. 2 Effect of temperature on the freeze-thaw stability of rice starch under annealing treatment

3 结语

改变韧化处理水分质量分数时,大米淀粉的溶解度与膨润力没有明显的变化规律;峰值黏度增大,谷值黏度先增大后下降,其余糊化指标为先降低后升高的趋势;RDS 升高,SDS 先降低后升高,RS 则与 SDS 规律相反;大米淀粉的冻融稳定性随着水分质量分数的增加而下降。

改变韧化处理温度时,大米淀粉的溶解度与膨

润力变化规律不明显;大米淀粉的峰值黏度、谷值黏度、最终黏度随着糊化温度的改变呈现不同程度的降低,70℃时黏度最低,回生值出现先减少再增加后又减少的现象,糊化温度则一直升高;RDS质量分数呈现先增后减再增加的趋势,70℃时质量分数最高,SDS变化趋势与RDS相反,RS先增后减少;从总体趋势看,大米淀粉的冻融稳定性随着温度的升高而下降。

与原样相比,经糊化处理的大米淀粉,溶解度

和膨润力有所下降;糊化特性中大米淀粉糊化温度高于原样(50、55℃下样品除外),糊化处理对大米淀粉的峰值黏度、谷值黏度、衰减值影响较大;糊化处理使大米淀粉的消化性得到提高,冻融稳定性下降。从整体趋势来看,糊化处理条件的改变对大米淀粉性质的影响并不显著,也证实了前期研究发现糊化处理改善米粉品质时并不只是作用于大米淀粉,而是大米所有成分共同作用的影响。研究为糊化处理对大米淀粉的作用机制提供了更多的理论依据。

参考文献:

- [1] JAYAKODY L, HOOVER R. Effect of annealing on the molecular structure and physicochemical properties of starches from different botanical origins-a review[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2008, 74(3): 691-703.
- [2] 伍婧, 李宗军, 李珂, 等. 糊化处理对淀粉品质特性的影响及应用研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2015, 30(9): 139-146.
- [3] 廖卢艳, 刘惠惠, 甘增鹏, 等. 糊化处理改善米粉品质的工艺条件优化研究[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(5): 167-173.
- [4] 李光磊, 陈梦雪, 曾洁, 等. 糊化处理对甘薯淀粉分子结构的影响[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(17): 106-110.
- [5] GENKINA N K, WASSERMAN L A, NODA T, et al. Effects of annealing on the polymorphic structure of starches from sweet potatoes (*Ayamurasaki* and *Sunnyred* cultivars) grown at various soil temperatures[J]. *Carbohydrate Research*, 2004, 339(9): 1093-1098.
- [6] 刘畅, 阎贺静, 常学东. 糊化处理对板栗淀粉特性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2018, 33(5): 24-29.
- [7] 杜双奎, 王华, 赵佳, 等. 糊化处理对不同玉米淀粉理化特性的影响[J]. *食品科学*, 2012, 33(17): 78-81.
- [8] 孙新涛. 糊化与湿热处理对鹰嘴豆淀粉特性的影响[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2013.
- [9] 盛志佳. 大米淀粉的研发现状与前景[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2010, 36(1): 11-14.
- [10] 付田田, 靳凤芳, 牛丽亚, 等. 大豆肽和豌豆肽对大米淀粉理化性质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2019, 34(6): 53-58.
- [11] 王雨生, 尚梦珊, 陈海华. 糊化温度和时间对不同直链淀粉质量分数玉米淀粉物化性质的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(13): 74-80.
- [12] 邹杰. 糊化处理对大米淀粉理化性质与米粉品质影响研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2019.
- [13] 杨凤, 姚天鸣, 叶晓汀, 等. 湿热处理技术对淀粉理化特性影响的研究进展[J]. *粮油食品科技*, 2015, 23(1): 21-24.
- [14] 唐玮泽, 肖华西, 唐倩, 等. 多次湿热处理对大米淀粉结构和性质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(10): 77-83.
- [15] 王晓培, 陈正行, 李娟, 等. 湿热处理对大米淀粉理化性质及其米线品质的影响[J]. *食品与机械*, 2017, 33(5): 182-187.
- [16] 任剑豪, 甘增鹏, 廖卢艳. 应用 RVA 仪分析荸荠淀粉的糊化特性[J]. *食品科技*, 2020, 45(2): 290-295.
- [17] ENGLYST H N, KINGMAN S M, CUMMINGS J H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions [J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 1992, 46(2): 33-50.
- [18] 付田田, 靳凤芳, 牛丽亚, 等. 大豆肽和豌豆肽对大米淀粉理化性质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2019(6): 53-58.
- [19] 甘增鹏, 谭金萍, 任剑豪, 等. 含水量对湿热处理荸荠淀粉性质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2019, 34(12): 13-18.
- [20] 刘成梅, 杨晓会, 钟业俊, 等. 糊化及湿热处理对大米淀粉理化特性和微观结构的影响[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(5): 49-53.
- [21] 张百汝, 贾淑玉, 李杰, 等. 糊化处理对山药粉理化性质及结构的影响[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(23): 20-24.
- [22] 刘成梅, 杨晓会, 钟业俊, 等. 糊化及湿热处理对大米淀粉理化特性和微观结构的影响[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(5): 49-53.
- [23] SINGH J, SINGH N. Studies on the morphological, thermal and rheological properties of starch separated from some Indian

- potato cultivars[J]. *Food Chemistry*, 2001, 75(1):67-77.
- [24] 王诗雁, 韩忠, 刘忠义, 等. 电场处理对大米淀粉理化性质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2019, 34(3):31-37.
- [25] 罗思, 黄立新. 水对淀粉结构的影响及其作用的研究[J]. *农产品加工(学刊)*, 2009(10):68-70.
- [26] 姚映西. 湿热改性处理对大米理化性质及米粉品质影响的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2016.
- [27] 许诗尧, 李芳, 胡忠泽, 等. 水热处理对大米粉及抗性淀粉性质影响[J]. *中国粮油学报*, 2017, 32(6):1-7.
- [28] 陈金玉, 张坤生, 王轻, 等. 马铃薯淀粉与食用胶共混体系流变特性与冻融稳定性研究[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(11):17-22.

科技信息

新型生物酸化技术可降低畜禽养殖粪污氨排放

近日, 农业农村部成都沼气科学研究所厌氧微生物创新团队与国内外科研机构合作, 首次开发了一种基于合成微生物组降低畜禽养殖业废弃物氨排放的关键技术, 揭示了粪污酸化和抑制尿素分解菌的协同作用机制。相关研究成果发表在 *Environment International* 上。

氨排放是造成大气温室效应、PM2.5 颗粒浓度增加、水体富营养化、土壤酸化等的重要因素, 危害人类和动物健康。目前全球农业系统是氨排放的最大来源, 其中畜禽养殖业占 50%。

该团队首创了一种基于合成乳酸菌群的畜禽粪污酸化氨减排策略, 该合成乳酸菌群具有宽泛的碳源利用和酸碱适应性范围、强大的粪污环境适应性和优良的产乳酸能力。通过调整接种比和碳源添加频率优化该技术, 在猪粪储存过程中实现了 95.5% 的氨减排。焦磷酸测序结果表明, 该策略重塑了粪便微生物群落结构, 对 22 种尿素分解菌具有抑制作用, 在氨-铵转化的氨减排过程中发挥了协同作用。这一发现为农业绿色可持续发展提供了理论和技术支撑。

[信息来源] 农业农村部成都沼气科学研究所. 新型生物酸化技术可降低畜禽养殖粪污氨排放[EB/OL]. (2023-2-24). <https://www.caas.cn/xwzx/kyjz/326224.html>.