

小麦水溶性阿拉伯木聚糖对大米粉加工特性及鲜湿米粉食用品质的影响

李佳洋, 王馨远, 殷丽君, 刘志刚, 贾鑫

Effects of Wheat Water-extractable Arabinoxylan on the Processing Properties of Rice Flour and Eating Quality of Fresh Rice Noodles

LI Jiayang, WANG Xinyuan, YIN Lijun, LIU Zhigang, and JIA Xin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024030133>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

保鲜方式对鲜湿米粉品质的影响

Effect of Preservation Methods on the Quality of Instant Fresh Rice Noodles

食品工业科技. 2021, 42(11): 44-49 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020070357>

不同品种和粒度对米粉糊化特性及米蛋糕品质的影响

Gelatinization Characteristics of Rice Flour with Different Varieties and Particle Sizes and Their Effects on the Quality of Rice Cakes

食品工业科技. 2022, 43(21): 75-82 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022010023>

米糠蛋白-阿拉伯木聚糖接枝复合物制备及其功能性质研究

Process Optimization and Functional Properties of Rice Bran Protein-Arabinoxylan Conjugate

食品工业科技. 2020, 41(17): 193-198 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.17.032>

耐热小麦阿拉伯木聚糖酶Xyn11A在全麦面包品质改良中的应用

Application of Thermostable Wheat Arabinoxylanase Xyn11A for Quality Improvement of Wholewheat Bread

食品工业科技. 2024, 45(24): 82-89 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024010111>

木糖醇对糯米粉理化性质及汤圆品质的影响

Effects of Xylitol on Physicochemical Properties of Glutinous Rice Flour and Quality of Glutinous Rice Dumplings

食品工业科技. 2024, 45(7): 51-58 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023040253>

醋糟阿拉伯木聚糖的提取工艺优化及其对馒头品质的影响

Optimization of Process for Preparation of Arabinoxylan from Vinegar Residue and Its Effect on the Quality of Steamed Bread

食品工业科技. 2023, 44(10): 211-218 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022080051>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李佳洋,王馨远,殷丽君,等.小麦水溶性阿拉伯木聚糖对大米粉加工特性及鲜湿米粉食用品质的影响[J].食品工业科技,2025,46(5):56-62. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024030133

LI Jiayang, WANG Xinyuan, YIN Lijun, et al. Effects of Wheat Water-extractable Arabinoxylan on the Processing Properties of Rice Flour and Eating Quality of Fresh Rice Noodles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(5): 56-62. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024030133

· 研究与探讨 ·

小麦水溶性阿拉伯木聚糖对大米粉加工特性及鲜湿米粉食用品质的影响

李佳洋¹,王馨远¹,殷丽君¹,刘志刚²,贾鑫^{1,*}

(1.中国农业大学食品科学与营养工程学院,北京 100083;

2.丰益(上海)生物技术研发中心有限公司,上海 200137)

摘要:为改善鲜湿米粉在储藏过程中易老化、食用品质下降等问题,本文系统研究了不同添加量(0%~1.0%, w/w)的小麦水溶性阿拉伯木聚糖(water-extractable arabinoxylan, WEAX)对大米粉的糊化和热力学特性,以及鲜湿米粉色泽、蒸煮品质、质构特性和老化特性的影响。结果表明:与空白对照组相比,加入 WEAX 后大米粉的糊化黏度从 3454.00 cP 升高至 3773.65 cP,糊化焓值从 4.02 J/g 降低至 3.18 J/g,但不同添加量的 WEAX 对大米粉-WEAX 复合体系的糊化温度影响不显著($P>0.05$)。在 WEAX 的添加量为 0.6% 时,鲜湿米粉的断条率和蒸煮损失最低,分别为 11.46% 和 8.48%。鲜湿米粉的色泽和质构品质随着 WEAX 添加量的增加而得到显著提升($P<0.05$)。与原味米粉相比,添加 1%WEAX 的鲜湿米粉经过老化 7 d 处理后,其老化度、相对结晶度以及红外峰强度比值 $R_{1047/1022}$ 分别下降了 67.3%、71.4% 和 30.9%。综上,添加 1%WEAX 能够改善鲜湿米粉的色泽及质构品质,延缓米粉的长期老化进程。本研究为拓展 WEAX 在淀粉类食品工业中的应用,以及提升淀粉类食品品质提供了理论依据。

关键词:大米粉,鲜湿米粉,小麦水溶性阿拉伯木聚糖,糊化,老化

中图分类号:TS213.3

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2025)05-0056-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024030133

本文网刊:



Effects of Wheat Water-extractable Arabinoxylan on the Processing Properties of Rice Flour and Eating Quality of Fresh Rice Noodles

LI Jiayang¹, WANG Xinyuan¹, YIN Lijun¹, LIU Zhigang², JIA Xin^{1,*}

(1.College of Food Science and Nutrition Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2.Wilmar (Shanghai) Biotechnology Research & Development Center Co., Ltd., Shanghai 200137, China)

Abstract: To improve the problems of fresh rice noodles such as being prone to aging and eating quality declined during storage, the effects of wheat water-extractable arabinoxylan (WEAX) addition (0%~1.0%, w/w) on the gelatinization and thermodynamic properties of rice flour, as well as the color, cooking, texture and aging properties of fresh rice noodles were systematically studied. The results showed that compared with the blank control group, the gelatinization viscosity of rice flour with WEAX increased from 3454.00 cP to 3773.65 cP, and the gelatinization enthalpy value decreased from 4.02 J/g to 3.18 J/g. WEAX with different additive amounts had no significantly effect on gelatinization temperature of rice flour-WEAX mixed systems ($P>0.05$). The breakage rate and the cooking loss of fresh rice noodles with 0.6% WEAX reached the minimum of 11.46% and 8.48%, respectively. As the increase of WEAX addition, the color and texture quality of fresh rice noodles were significantly improved ($P<0.05$). Compared with the original rice noodles, the aging degree, relative crystallinity and infrared peak intensity ratio $R_{1047/1022}$ of fresh rice noodles with 1% WEAX after aging for 7 days

收稿日期: 2024-03-11

基金项目: 金龙鱼奖教金资助项目(1061-2220001)。

作者简介: 李佳洋(2000-),女,硕士研究生,研究方向:食品科学,E-mail: LijiaYangSCNE@cau.edu.cn。

* 通信作者: 贾鑫(1987-),女,博士,副教授,研究方向:食品科学,E-mail: xinjia@cau.edu.cn。

decreased by 67.3%, 71.4% and 30.9%, respectively. In summary, the addition of 1% WEAX could improve the color and texture quality of fresh rice noodles and delay the long-term aging process of rice noodles. This study will provide a theoretical basis for expanding the application of WEAX in the starch food industry and improving the quality of starch food.

Key words: rice flour; fresh rice noodles; wheat water-extractable arabinoxylan (WEAX); gelatinization; retrogradation

鲜湿米粉通常含水量较高, 是以大米作为主要原料加工制得的淀粉基食品。经过糊化后的大米淀粉在长期储存过程中容易出现老化和腐败变质等问题, 使得鲜湿米粉的货架期严重缩短, 并制约了鲜湿米粉在方便主食市场中的竞争力^[1]。除不断改进米粉的生产工艺之外, 研究人员也在不断探究可以改良米粉品质的方法, 以延缓米粉在储藏过程中的老化进程。其中在米粉中添加食品添加剂, 如亲水胶体、乳化剂和变性淀粉等^[2], 是目前研究普遍采用的有效手段。有研究表明, 通过添加适宜比例的亲水胶体到大米粉中, 如可然得胶^[3]、普鲁兰多糖^[4]等可有效延缓米粉的老化回生, 一定程度上能够起到延长米粉保质期的作用。除此之外, 有研究发现将水溶性阿拉伯木聚糖应用于意大利面中, 可以提高面条的持水性并且降低面条的硬度^[5]。

小麦阿拉伯木聚糖(wheat bran arabinoxylan, WBAX)是麦麸中主要的半纤维素成分, 由阿拉伯糖(arabinose, Ara)和木糖(xylose, Xyl)两种戊糖组成^[6], 根据溶解性的差异可分为水溶性(water-extractable arabinoxylan, WEAX)和水不溶性(water-unextracted arabinoxylan, WUAX)两大类^[7]。近年来 WBAX 在改善淀粉基食品质量方面表现出巨大潜力^[8], 课题组前期研究发现 WBAX 对小麦淀粉的糊化和长期回生特性有着显著影响, 凝胶的回生程度随着 WBAX 浓度的增加而降低^[9]。另外具有不同结构特征的 WBAX, 如分子量(molecular weight, M_w)、阿拉伯糖与木糖的比例(Ara/Xyl, A/X)不同, 也会对淀粉的糊化和老化回生特性产生差异化影响^[10]。Hou 等^[11]发现低 M_w 的 WEAX 对淀粉糊化和短期回生表现出更显著的抑制作用, 而高 M_w 的 WEAX 则能够有效抑制淀粉的长期老化回生。鲜湿米粉在储藏期间难以避免发生老化行为, 研究鲜湿米粉的老化特性以及合理调控米粉的老化程度, 对于改良鲜湿米粉的加工特性和食用品质具有重要意义。然而, 目前关于 WBAX 的研究主要集中在对淀粉本身特性的影响上, 对于淀粉基食品的研究则以面包和馒头为主, 缺少对鲜湿米粉加工及食用品质影响的探究。因此本实验选取对长期老化回生影响显著的高分子量 WEAX 和桂朝米作为实验对象, 将 WEAX 加入到大米粉中, 研究不同 WEAX 添加量对大米淀粉糊化行为以及鲜湿米粉色泽、蒸煮、质构和老化特性的影响, 以其为扩大 WEAX 在淀粉基食品中的应用及相关研究提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

桂朝米 西乡县寻农人生态农业有限公司; 小麦水溶性阿拉伯木聚糖 A/X=38/62, $M_w=37 \times 10^4$ g/mol, $[\eta]>40$ cSt, 纯度 95%, 爱尔兰 Megazyme 公司。

RVA-4 快速粘度分析仪 澳大利亚悉尼 Newport Scientific 公司; AR2000 流变仪 美国 TA 公司; Synergy H1 酶标仪 美国 BioTek 公司; NR60C 色差仪 深圳市三恩驰科技有限公司; CT3 1000 质构仪 美国 BROOKFIELD 公司; Spectrum100 傅里叶变换红外光谱仪 美国 Perkin Elmer 公司; Ultima IVX-射线衍射仪 日本 Rigaku 公司; Q2000 差示扫描量热仪 美国 TA 公司; SU3500 扫描电子显微镜 日本 HITACHI 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 大米粉的制备 将桂朝米去杂清洗后浸泡 4 h, 直至大米能被轻易碾碎。将浸泡好的大米和水按照 1:1 的料液比加入到胶体磨中进行磨浆, 收集浆液并置于 60 ℃ 烘箱中干燥 2 d, 烘干后进行粉碎, 并过 80 目筛, 得到质地均匀的大米粉原料(含水量为 3.54 ± 0.05 g/100 g)。

1.2.2 大米粉糊化特性的测定 依次称量 0wt%、0.2wt%、0.4wt%、0.6wt%、0.8wt%、1.0wt% 的 WEAX (以大米粉干基计)加入到蒸馏水中, 配制成 25.00 g 相应浓度的 WEAX 溶液, 利用磁力搅拌器将溶液在室温下搅拌 12 h, 直至 WEAX 完全溶解。参照 Yan 等^[12]的方法, 准确称取 3.00 g 的大米粉加入到不同浓度的 WEAX 溶液中, 再转移到 RVA 专用铝盒中, 用配套的塑料桨叶充分搅匀, 选择 RVA 加热程序中的“Standard method 2”程序完成糊化过程, 进行黏度测定, 黏度单位表示为 cP。

1.2.3 大米粉热学特性的测定 分别添加 0wt%、0.2wt%、0.4wt%、0.6wt%、0.8wt%、1.0wt% 的 WEAX (以大米粉干基计)到大米粉中, 在研钵内充分研磨均匀。参照 Ahmad 等^[13]的方法并适当修改, 称取 10 mg 研磨样品置于铝盘中作密封处理, 测定之前保证样品在 4 ℃ 条件下平衡 24 h。在 DSC 加热扫描过程中, 样品处于流动干燥氮气氛围, 以 10 ℃/min 的加热速率从 25 ℃ 加热到 130 ℃, 采用空白铝盒作为参照。使用 Q Series Explorer Q2000 软件记录大米粉起始糊化温度 T_o 、峰值糊化温度 T_p 、终止糊化温度 T_c 并计算糊化焓值 ΔH_{gel} 。

1.2.4 鲜湿米粉的制备 准确称量大米粉, 按料液比

(m(大米粉):V(WEAX 溶液)=1 g:0.6 mL)分别加入质量浓度为 0%、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0% 的 WEAX 溶液(以大米粉干基计),混合均匀后以约 5 mm 的厚度摊平蒸 2 min,冷却后放入压片机反复压制 6 次,挤丝,沸水煮 3 min,流水淋洗 1 min 后沥干水分,制备得到直径为 0.3 cm 左右的鲜湿米粉,装入自封袋备用,部分样品置于 4 ℃ 条件下进行老化处理。

1.2.5 鲜湿米粉色泽测定 使用色差仪对制备的鲜湿米粉进行测定,记录鲜湿米粉的 L^* 、 a^* 、 b^* 值。

1.2.6 鲜湿米粉蒸煮品质测定

1.2.6.1 断条率测定 参照张玉荣等^[14]的方法并适当修改,任取长度均为 15 cm 左右的米粉样品共 50 g,将米粉放入 500 mL 的沸水中煮沸 2 min,捞出米粉后沥干水分,米粉的断条率计算公式如下:

$$\text{断条率}(\%) = \frac{M_1}{M_1 + M_2} \times 100$$

式中: M_1 表示短于 10 cm 的米粉重量, g; M_2 表示长于 10 cm 的米粉重量, g。

1.2.6.2 蒸煮损失测定 取部分米粉样品置于 105 ℃ 烘箱中烘干 2 h,之后放入干燥皿内静置 0.5 h。锅中盛有 500 mL 沸水,将米粉煮 5 min 后流水淋洗 1 min,捞出后沥干水分,再次放进烘箱内 105 ℃ 干燥 4 h,米粉的蒸煮损失计算公式如下:

$$\text{蒸煮损失}(\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100$$

式中: M_1 表示第一次干燥静置后的米粉重量, g; M_2 表示第二次干燥静置后的米粉重量, g。

1.2.7 鲜湿米粉质构分析测试 参照刘瑾瑾等^[15]的方法,取 3 根长度为 5 cm 左右的米粉样品,并排放置于测试台平面。设置实验参数为:测量长度 3 mm、形变 75.0%、负载 5.0 g、测试速度 1 mm/s、探头 TA5、夹具 TA-RT、循环次数 2.0、可恢复时间 5 s。分别对 4 ℃ 储存 0、1、2、7 d 的米粉进行质构分析测试,每个样品重复测试 6 次,保留平行性较好的数据。

1.2.8 老化鲜湿米粉热学特性的测定 将在 4 ℃ 条件下老化 7 d 后的米粉取出,切分成长宽为 1~2 mm,高度低于 1 mm 的柱状样品,放置到 DSC 专用铝盘

中,加热速率为 10 ℃/min,从 20 ℃ 加热到 130 ℃,以相同速率冷却至 20 ℃,根据 Q Series Explorer Q2000 软件计算米粉的老化焓值 ΔH_{ret} ,根据老化焓值与糊化焓值之比($\Delta H_{\text{ret}}/\Delta H_{\text{gel}}$)得到米粉的老化度。

1.2.9 老化鲜湿米粉 X-射线衍射测定 将老化 7 d 的米粉进行真空冷冻干燥处理,粉碎后过 200 目筛。设置测试条件为:电压 40 kV、电流 15 mA、Cu 靶、入射狭缝 0.625°、防散射狭缝 8 mm、接收狭缝 13 mm、扫描范围 4°~40°、扫描速度 4°/min。采用 MDI Jade 6.0 软件分析衍射图谱并计算老化米粉的相对结晶度。

1.2.10 老化鲜湿米粉傅里叶红外光谱测定 根据适当修改 Chi 等^[16]的方法,称量 2 mg 冻干的老化米粉粉末与 200 mg 干燥的溴化钾混合,研磨均匀后使用压片机制成薄片。样品以 4 cm^{-1} 的分辨率在室温下扫描 32 次,分析光谱范围设定在 4000~400 cm^{-1} ,在 1200~800 cm^{-1} 范围内进行相互作用基线校正,利用 OMINC 软件去卷积,并计算去卷积后 1047 cm^{-1} 和 1022 cm^{-1} 两处波数的峰强度之比。

1.3 数据处理

将上述实验至少重复三次,实验结果表示为均值±标准差。使用 SPSS 25.0 软件对实验所得数据进行 ANOVA 单因素方差分析($P < 0.05$),使用 Origin 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 小麦水溶性阿拉伯木聚糖对大米粉糊化特性的影响

糊化后的淀粉可分为连续相和非连续相,连续相包括直链淀粉以及分子量较低的支链淀粉,而非连续相为吸水膨胀后的淀粉^[17]。如表 1 所示,与原来大米粉样品相比,添加 WEAX 后大米粉的峰值、谷值和终值黏度均显著增加,同时糊化温度显著下降($P < 0.05$),以上结果表明 WEAX 具有促进大米淀粉糊化的作用,但是不同 WEAX 添加量样品之间无显著规律性变化($P > 0.05$)。其中大米粉黏度增加可能是因为 WEAX 的加入使得连续相的浓度增加,所引起的增稠效应降低了淀粉颗粒的流动性,促进了凝胶网络结构的形成,从而使得体系黏度升高。另一方面,随着温度的升高,淀粉分子间的氢键遭到破坏,因

表 1 WEAX 与大米粉复配体系的 RVA 特征值

Table 1 RVA characteristic values of WEAX/rice flour mixtures

WEAX添加量(% , w/w)	峰值黏度(cP)	谷值黏度(cP)	崩解值(cP)	终值黏度(cP)	回生值(cP)	糊化温度(℃)
0	3454.00±15.70 ^b	1622.45±18.34 ^b	1832.45±29.55 ^a	3543.00±38.53 ^b	1922.35±23.67 ^a	82.37±0.23 ^a
0.2	3729.50±98.23 ^a	1807.10±46.31 ^a	1922.15±51.94 ^a	3771.25±89.03 ^a	1964.00±44.40 ^a	81.18±0.25 ^b
0.4	3731.35±99.11 ^a	1800.00±58.03 ^a	1931.20±67.51 ^a	3728.45±90.41 ^a	1928.65±32.51 ^a	81.17±0.51 ^b
0.6	3769.00±64.73 ^a	1830.50±47.72 ^a	1942.00±27.43 ^a	3780.50±72.46 ^a	1950.45±25.94 ^a	81.10±0.20 ^b
0.8	3710.50±28.67 ^a	1803.30±66.20 ^a	1907.65±37.63 ^a	3739.10±78.50 ^a	1936.25±13.65 ^a	81.30±0.00 ^b
1.0	3773.65±83.43 ^a	1817.35±56.57 ^a	1956.50±26.87 ^a	3774.60±70.71 ^a	1957.50±14.14 ^a	81.30±0.00 ^b

注:同一列中字母不同表示数据之间存在显著性差异($P < 0.05$),表2~表6同。

此, WEAX 有机会与大米淀粉颗粒中的浸出直链淀粉和低分子量支链淀粉产生相互作用^[18]。回生值则代表着直链淀粉分子从无序转变为有序排列状态的能力, 可反映淀粉的短期老化程度^[19]。在米粉的生产过程中, 淀粉的短期老化行为有利于米粉快速成型, 因此回生值是米粉加工关注的重点指标。本实验结果表明, WEAX 的加入对大米粉的崩解值和回生值并没有显著影响($P>0.05$), 表明 WEAX 不会促进大米粉凝胶的短期老化回生及影响其热稳定性。

2.2 小麦水溶性阿拉伯木聚糖对大米粉热学特性的影响

大米粉的热特性可通过其主要成分大米淀粉的热特性来反映^[20], 糊化温度与淀粉晶体结构的热稳定性密切相关^[21]。如表 2 所示, 大米粉表现出典型的糊化吸热峰, 热转变温度范围为 43~65 ℃, 糊化焓值为 4.02 J/g, WEAX 与大米粉复合物的糊化吸热峰与空白对照组表现类似。大米淀粉的终止温度 T_c 随着 WEAX 浓度的增加而显著降低($P<0.05$), 表明 WEAX 能够促进多糖-淀粉复合体系的糊化。而糊化焓值 ΔH_{gel} 则代表着淀粉糊化需要的能量, 主要用于表征相转变过程中双螺旋的丢失以及晶体结构的熔化^[21]。WEAX 可以显著降低大米淀粉的 ΔH_{gel} 值, 并且随着 WEAX 浓度的不断增加, ΔH_{gel} 值下降程度更加显著($P<0.05$), 说明 WEAX 对大米淀粉的糊化的确起到促进作用, 与上述 RVA 的结果相印证。

表 2 WEAX 与大米粉混合物的热学特性
Table 2 Thermal properties of WEAX/rice flour mixtures

WEAX添加量(% w/w)	T_o (℃)	T_p (℃)	T_c (℃)	ΔH_{gel} (J/g)
0	43.33±0.20 ^b	50.55±0.08 ^c	64.67±0.18 ^a	4.0170±0.0046 ^a
0.2	42.31±0.16 ^c	53.32±0.28 ^{cd}	63.59±0.16 ^{bc}	3.8753±0.0065 ^b
0.4	46.85±0.76 ^a	53.72±0.16 ^b	62.40±0.09 ^d	3.7130±0.0046 ^c
0.6	43.63±0.30 ^b	55.45±0.20 ^a	63.64±0.06 ^b	3.5050±0.0082 ^d
0.8	40.57±0.38 ^d	52.97±0.21 ^d	62.07±0.27 ^c	3.3907±0.0201 ^e
1.0	39.89±0.29 ^d	53.61±0.10 ^{bc}	63.27±0.15 ^c	3.1757±0.0071 ^f

注: T_o 糊化起始温度; T_p 糊化峰值温度; T_c 糊化终止温度; ΔH_{gel} 糊化焓值。

2.3 小麦水溶性阿拉伯木聚糖对鲜湿米粉色泽的影响

色泽是米粉感官特性的重要指标, 通常影响消费者对于产品的第一印象, 从而影响人们对米粉品质的评价^[22]。 L^* 数值越大, 代表所测定的样品颜色越白

表 3 WEAX 添加量对鲜湿米粉色泽的影响

Table 3 Effects of different additions of WEAX on the chromatic aberration of fresh rice noodles

WEAX添加量(% w/w)	L^*	a^*	b^*
0	58.15±0.31 ^d	-1.08±0.04 ^a	8.19±0.40 ^a
0.2	58.66±0.59 ^{cd}	-1.02±0.06 ^{ab}	8.02±0.67 ^a
0.4	60.08±1.49 ^{bc}	-0.96±0.06 ^b	8.10±0.71 ^a
0.6	60.57±1.00 ^b	-0.50±0.08 ^c	6.95±0.21 ^b
0.8	60.90±0.58 ^b	-0.51±0.02 ^c	6.65±0.27 ^b
1.0	66.65±0.52 ^a	-0.40±0.05 ^d	5.65±0.21 ^c

越明亮, 产品越容易获得消费者的青睐; a^* 数值越大, 代表所测定的样品颜色发红; b^* 数值越大, 代表所测定的样品颜色越发黄。如表 3 所示, WEAX 对于鲜湿米粉的色泽有着显著的影响。随着 WEAX 添加量的增大, 米粉的 L^* 值和 a^* 值相应上升, b^* 值逐渐下降($P<0.05$), 以上结果表明添加 WEAX 后的米粉颜色更白, 更符合消费者对于鲜湿米粉的外观要求。这是由于从精加工小麦粉中提取的 WEAX 整体颜色偏白, 因此添加 WEAX 后影响了鲜湿米粉的外观色泽。

2.4 小麦水溶性阿拉伯木聚糖对鲜湿米粉蒸煮品质的影响

断条率与蒸煮损失一般用于反映米粉在煮制过程中碎条与糊汤程度, 代表着米粉的蒸煮品质。米粉断条率高、蒸煮损失大与米粉经历长期老化过程紧密相关。如表 4 所示, 随着 WEAX 添加量的增加, 米粉的断条率和蒸煮损失显著降低($P<0.05$)。其中添加量为 0.6% 的米粉是蒸煮品质改善效果最佳的组别, 断条率和蒸煮损失相比对照组分别降低 72.61% 和 24.69%。上述结果表明 WEAX 在米粉蒸煮的过程中能有效抑制淀粉的析出, 使米粉表面不易粘连及形成糊汤。有研究人员发现亲水胶体的添加统一表现出降低米粉断条率和蒸煮损失的特点^[23]。以上结果表明 WEAX 能够提高米粉筋力、降低米粉断条现象, 从而起到优化产品蒸煮品质、提升米粉食用品质的作用。

表 4 不同 WEAX 添加量对鲜湿米粉蒸煮品质的影响
Table 4 Effects of different additions of WEAX on the cooking quality of fresh rice noodles

WEAX添加量(% w/w)	断条率(%)	蒸煮损失(%)
0	41.84±1.82 ^a	11.26±0.67 ^a
0.2	31.15±1.15 ^b	10.23±1.12 ^{ab}
0.4	20.30±1.34 ^c	9.50±0.95 ^{bc}
0.6	11.46±1.09 ^c	8.48±0.85 ^c
0.8	12.83±1.36 ^{de}	8.97±0.89 ^{bc}
1.0	14.80±0.57 ^d	9.53±1.10 ^{bc}

2.5 小麦水溶性阿拉伯木聚糖对鲜湿米粉质构品质的影响

硬度值可反映鲜湿米粉在储藏期间的老化程度, 硬度值越大, 代表米粉的老化程度越高, 咀嚼性则代表着米粉在食用过程中的嚼劲和韧性。如图 1 所示, 在同一储藏时间内, 米粉的硬度和咀嚼性在添加 WEAX 后显著下降($P<0.05$)。随着 WEAX 在米粉中的比例不断增大, 其硬度和咀嚼性始终呈显著递减趋势($P<0.05$), WEAX 添加量与两个特征参数之间呈负相关关系。其中米粉硬度的降低可能与 WEAX 在米粉老化过程中延缓了淀粉老化有关^[24]。在米粉中添加 WEAX 可以阻碍浸出直链淀粉分子的聚集和重排, 削弱了淀粉内的分子间作用, 因此淀粉分子转变为与水分子结合, 从而使得米粉的硬度降低。弹

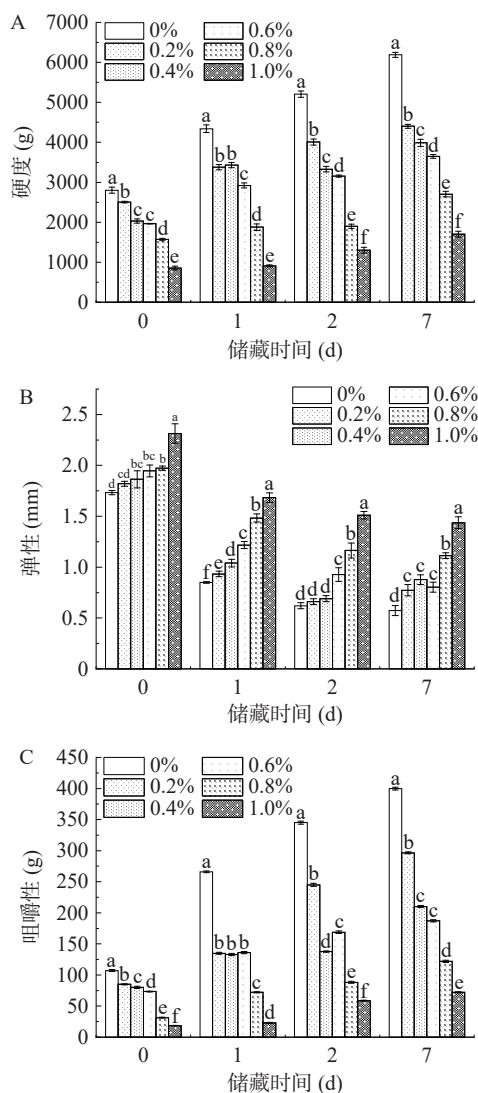


图1 添加不同 WEAX 含量的鲜湿米粉在 4 °C 老化过程中硬度(A)、弹性(B)、咀嚼性(C)变化

Fig.1 Changes in hardness (A), elasticity (B) and chewiness (C) of fresh rice noodles with different WEAX contents during aging at 4 °C

注: 图中小写字母不同是指不同处理组在同一时间点具有显著性差异($P<0.05$)。

性则反映第一次压缩后凝胶结构的损坏程度, 弹性越大, 表明凝胶结构越完整, 抗变形能力越强^[25]。结果显示, 添加 WEAX 的米粉与原料米粉样品相比弹性显著增加($P<0.05$), 表明 WEAX 的加入能有效延缓米粉的老化, 使米粉保持爽滑的口感。除此之外, 在储藏过程中, 米粉的硬度和咀嚼性均增大, 而弹性降低, 表现出米粉整体的质构品质不断下降。综上所述, 米粉的各项质构参数在储存过程中均呈现出一定的变化趋势, 表明 WEAX 的加入能够显著改变鲜湿米粉的质构特性。

2.6 小麦水溶性阿拉伯木聚糖对老化鲜湿米粉热学特性的影响

热焓值通常可反映米粉中淀粉链之间糖苷键的吸热断裂情况, 热焓值越大, 表明淀粉间的糖苷键越多, 淀粉的老化程度越高^[26]。如表 5 所示, 随着

WEAX 添加量的提高, 米粉在相同储存时间内的老化焓值及老化度显著降低($P<0.05$), 充分说明米粉的老化进程得到了有效抑制。其可能的原因是 WEAX 上的羟基与淀粉分子间发生了相互作用, WEAX 与大米淀粉中支链淀粉的侧链相结合形成复合物, 削弱了淀粉分子的再结合, 减少了淀粉分子之间双螺旋的形成, 从而抑制了淀粉分子的结晶, 在一定程度上表现出延缓米粉长期老化的作用^[27]。

表 5 WEAX 对储存 7 d 后鲜湿米粉老化焓值和老化度的影响

Table 5 Effect of WEAX on the enthalpy and degree of retrogradation of fresh rice noodles stored for 7 days

WEAX添加量(%, w/w)	老化焓值 ΔH_{ret} (J/g)	老化度(%)
0	1.2072 $\pm$ 0.0092 ^a	30.05 $\pm$ 0.20 ^a
0.2	0.9589 $\pm$ 0.0165 ^b	24.74 $\pm$ 0.40 ^b
0.4	0.7991 $\pm$ 0.0099 ^c	21.53 $\pm$ 0.24 ^c
0.6	0.6633 $\pm$ 0.0062 ^d	19.93 $\pm$ 0.17 ^d
0.8	0.4797 $\pm$ 0.0071 ^e	14.15 $\pm$ 0.15 ^e
1.0	0.3124 $\pm$ 0.0030 ^f	9.84 $\pm$ 0.08 ^f

2.7 老化鲜湿米粉的 X-射线衍射图谱分析

X-射线衍射技术常用于分析物质的晶体含量。在淀粉老化过程中, 由支链淀粉所形成的重结晶含量会不断增加, 反映在图谱中便显现出更大的结晶区域, 峰强度更高的衍射峰^[28]。淀粉常见所形成的 B 型结晶峰, 位置通常出现在 17°和 22°附近, 其中 17°左右的衍射峰主要由支链淀粉的长期回生引起^[29]。如图 2 所示, 添加不同含量 WEAX 的老化米粉在 17°均出现了衍射峰, 不同样品衍射峰所出现位置并没有明显变化。以上结果表明米粉在老化过程中均形成了结晶, 但 WEAX 的加入并不会改变淀粉的晶型。另外相对结晶度一般指衍射峰所代表的结晶区域占全部区域的比例。如表 6 所示, 随着 WEAX 添加量的增加, 老化 7 d 后的米粉的相对结晶度显著下降($P<0.05$)。添加 1%WEAX 的米粉老化后相对结晶度为 7.11% $\pm$ 0.69%, 与对照组相比下降了 71.4%, 抑制米粉老化的效果最佳。以上结果表明 WEAX 可以抑制大米淀粉的脱水缩合和支链淀粉的重结晶, 从而延缓米粉在储存过程中发生的长期老化行为^[30]。

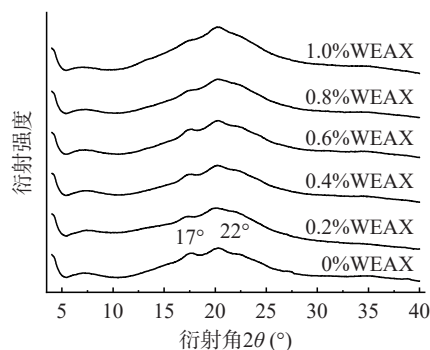


图2 老化 7 d 后鲜湿米粉的 X-射线衍射图谱

Fig.2 X-ray diffraction patterns of retrograded fresh rice noodles stored for 7 days

表 6 WEAX 对储存 7 d 后鲜湿米粉相对结晶度、 $R_{1047/1022}$ 的影响

Table 6 Effect of WEAX on the relative crystallinity and $R_{1047/1022}$ of fresh rice noodles stored for 7 days

WEAX添加量(% , w/w)	相对结晶度(%)	$R_{1047/1022}$
0	24.84±0.84 ^a	0.921±0.005 ^a
0.2	19.35±0.65 ^b	0.871±0.006 ^b
0.4	16.49±0.72 ^c	0.833±0.004 ^c
0.6	15.09±0.34 ^d	0.792±0.006 ^d
0.8	11.76±0.48 ^e	0.726±0.001 ^e
1.0	7.11±0.69 ^f	0.636±0.003 ^f

2.8 老化鲜湿米粉的傅里叶红外光谱分析

傅里叶红外光谱通常可用于分析淀粉的短程有序结构,即直链淀粉和支链淀粉中的短链组分所形成的双螺旋结构^[31]。在 1200~800 cm⁻¹ 的波数范围内,主要反映了由 C-C 键和 C-O 键拉伸所产生的吸收峰,一般代表淀粉的短程有序性^[32]。如图 3 所示,红外图谱显示出不同的处理组并没有产生新的吸收峰,表明在米粉回生期间,WEAX 的添加不会引起大米淀粉分子中新的化学键或官能团的形成。其中波数在 1022 cm⁻¹ 和 1047 cm⁻¹ 两处的峰强度值分别代表的是淀粉颗粒中无定形区和有序结晶区的比例,因而常用这两处的峰强度之比来反映淀粉的短程有序度^[33]。如表 6 所示,与 WEAX 复配后的大米淀粉,其 $R_{1047/1022}$ 的比值显著低于原大米淀粉($P<0.05$),可能原因是 WEAX 分子具有高亲水性,对参与大米淀粉重结晶作用的水分子起到了一定程度的限制,阻碍了淀粉分子间的交联,最终表现为 $R_{1047/1022}$ 值的下降,抑制了大米淀粉的长期回生。并且随着 WEAX 添加量不断增大,样品的 $R_{1047/1022}$ 从 0.921 不断下降至 0.636,其变化趋势与 XRD 的分析结果一致。

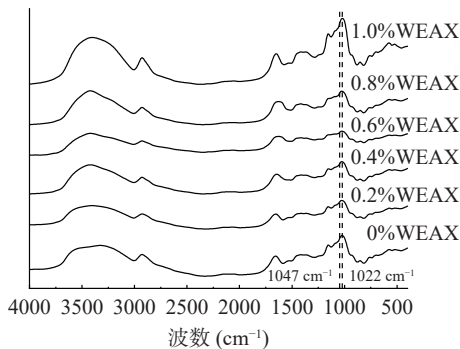


图 3 添加不同 WEAX 含量鲜湿米粉储藏 7 d 后的红外光谱
Fig.3 FT-IR spectra of fresh rice noodles with different contents of WEAX stored for 7 days

3 结论

综上所述,小麦水溶性阿拉伯木聚糖的添加对大米粉的糊化及鲜湿米粉的蒸煮品质和老化特性具有显著影响。RVA 数据表明 WEAX 能够增加大米粉的糊化黏度,降低糊化焓值,促进大米粉的糊化。另外,WBAX 的加入可以有效改善米粉色泽,降低米粉断条率和蒸煮损失,其中添加 0.6% 的 WEAX 对

米粉蒸煮品质的改善效果最优。TPA 结果表明随着 WEAX 添加量的上升,鲜湿米粉在储藏期间的质构特性得到了明显改善,米粉的硬度和咀嚼性逐渐降低,弹性增加。相对结晶度结果表明 WEAX 对米粉在 4 ℃ 储存条件下的老化回生进程起到延缓作用,且作用与 WEAX 的添加量呈正相关。其中添加 1%WEAX 的鲜湿米粉在老化 7 d 后,其老化度、相对结晶度以及红外峰强度比值 $R_{1047/1022}$ 最低,由此得出添加 1% 的 WEAX 到大米粉中制备得到鲜湿米粉,可以有效提升米粉的质构和食用品质,减少大米淀粉长期老化对鲜湿米粉产生的不良影响,可为进一步将 WEAX 作为优良的添加剂应用于鲜湿米粉等淀粉基食品的实际加工中提供参考。但本文仅研究了高 Mw 的 WEAX 对鲜湿米粉的影响,后续可选择不同 Mw 但 A/X 相同的 WEAX,以揭示不同 Mw 的 WEAX 对鲜湿米粉品质的影响。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

[1] 董宏浩, 徐丽, 全珂, 等. 鲜湿米粉品质劣变机理及保鲜技术研究进展[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(3): 161-168. [DONG Honghao, XU Li, QUAN Ke, et al. Research progress in quality deterioration mechanism and preservation technology of fresh rice noodles [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(3): 161-168.]

[2] 罗舜菁, 占柳菁, 刘成梅. 食品添加剂抗鲜湿方便米粉老化的研究进展[J]. 食品工业科技, 2016, 37(6): 392-395, 399. [LUO Shunjing, ZHAN Liujing, LIU Chengmei. Research progress in food additives on instant fresh rice noodle retrogradation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(6): 392-395, 399.]

[3] 李才明, 陈荻, 陆瑞琪, 等. 可得然胶对米粉加工及食用品质的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(16): 23-28. [LI Caiming, CHEN Di, LU Ruiqi, et al. Effect of curdilan on processing and eating quality of rice noodles[J]. Food Science, 2021, 42(16): 23-28.]

[4] 周剑敏, 卞旭, 孙佳, 等. 普鲁兰多糖对籼米粉凝胶及老化特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(5): 1-5. [ZHOU Jianmin, BIAN Xu, SUN Jia, et al. Effects of pullulan on gel and retrogradation properties of Indica rice flour[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(5): 1-5.]

[5] TURNER M A, SOH C H N, GANGULI N K, et al. A survey of water-extractable arabinopolymers in bread and durum wheat and the effect of water-extractable arabinoxylan on durum dough rheology and spaghetti cooking quality[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2008, 88(14): 2551-2555.

[6] SAEED F, PASHA I, ANJUM F M, et al. Arabinoxylans and arabinogalactans: A comprehensive treatise[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2011, 51(5): 467-476.

[7] SUN J, ZHOU R X, QIAN H F, et al. Investigation the influences of water-extractable and water-unextractable arabinoxylan on the quality of whole wheat you-tiao and its mechanism[J]. Food Chemistry, 2022, 386: 132809.

[8] 张明皓, 贾鑫, 闫文佳, 等. 小麦阿拉伯木聚糖对鲜湿面条品质的影响[J]. 中国食品学报, 2022, 22(2): 233-240. [ZHANG

- Minghao, JIA Xin, YAN Wenjia, et al. Effects of wheat bran arabinoxylan on the properties of fresh wet noodles[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2022, 22(2): 233–240.]
- [9] YAN W J, YIN L J, ZHANG M H, et al. Gelatinization, retrogradation and gel properties of wheat starch-wheat bran arabinoxylan complexes[J]. *Gels*, 2021, 7(4): 200.
- [10] QIU S, YADAV M P, LIU Y, et al. Effects of corn fiber gum with different molecular weights on the gelatinization behaviors of corn and wheat starch[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 53: 180–186.
- [11] HOU C D, ZHAO X H, TIAN M Q, et al. Impact of water extractable arabinoxylan with different molecular weight on the gelatinization and retrogradation behavior of wheat starch[J]. *Food Chemistry*, 2020, 318: 126477.
- [12] YAN W J, ZHANG M H, ZHANG M, et al. Effect of wheat bran arabinoxylan on the gelatinization and long-term retrogradation behavior of wheat starch[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 291: 119581.
- [13] AHMAD M, GANI A, MASOODI F A, et al. Influence of ball milling on the production of starch nanoparticles and its effect on structural, thermal and functional properties[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 151: 85–91.
- [14] 张玉荣, 周显青, 彭超, 等. 不同储藏年限稻谷的品质及鲜湿米粉加工适应性分析[J]. *食品科学*, 2020, 41(23): 42–48. [ZHANG Yurong, ZHOU Xianqing, PENG Chao, et al. Analysis of the quality and suitability for fresh rice noodle processing of rice at different storage times[J]. *Food Science*, 2020, 41(23): 42–48.]
- [15] 刘瑾瑾, 朱思明. 复合保鲜剂对鲜湿米粉防腐保鲜效果研究[J]. *粮食与油脂*, 2022, 35(10): 79–83. [LIU Jinjin, ZHU Siming. Study on the preservative and fresh-keeping effect of compound preservatives on fresh rice noodles[J]. *Cereals & Oils*, 2022, 35(10): 79–83.]
- [16] CHI C D, LI X X, LU P, et al. Dry heating and annealing treatment synergistically modulate starch structure and digestibility[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 137: 554–561.
- [17] GUO J Y, WANG C Y, LIU C Y, et al. Effect of konjac glucomannan on gelatinization, retrogradation, and gelling properties of frozen wheat starch[J]. *Starch-Starke*, 2021, 73: 2000025.
- [18] MA S P, ZHU P L, WANG M C. Effects of konjac glucomannan on pasting and rheological properties of corn starch[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 89: 234–240.
- [19] 杨岩, 张艳荣, 刘婷婷, 等. 大米回生抗性淀粉对大米粉加工特性及微观结构的影响[J/OL]. *吉林农业大学学报*, 2022, 1–10. DOI:10.13327/j.jjlau.2021.1493. [YANG Yan, ZHANG Yanrong, LIU Tingting, et al. Effects of rice retrogrowing resistant starch on processing characteristics and microstructure of rice flour[J/OL]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2022, 1–10. DOI:10.13327/j.jjlau.2021.1493.]
- [20] 魏强, 刘雨欣, 曹少攀, 等. 沙米粉对大米粉及其粉条品质的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(20): 86–94. [WEI Qiang, LIU Yuxin, CAO Shaopan, et al. Effect of *Agriophyllum squarrosum* flour on the quality of rice flour and rice noodles[J]. *Food Science*, 2022, 43(20): 86–94.]
- [21] SHI L, LI W H, SUN J J, et al. Grinding of maize: The effects of fine grinding on compositional, functional and physicochemical properties of maize flour[J]. *Journal of Cereal Science*, 2016, 68: 25–30.
- [22] 郝宗国, 余振宇, 胡尧, 等. 冷冻球磨处理对糯米淀粉结构、特性及消化性的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(11): 39–47. [HAO Zongwei, YU Zhenyu, HU Yao, et al. Effect of freezing ball milling treatment on the structure, properties and digestibility of waxy rice starch[J]. *Food Science*, 2023, 44(11): 39–47.]
- [23] SRIKAEK K, ARRANZ-MARTINEZ P. Formulating low glycaemic index rice flour to be used as a functional ingredient[J]. *Journal of Cereal Science*, 2015, 61: 33–40.
- [24] LIU J X, XU B J. A comparative study on texture, gelatinisation, retrogradation and potential food application of binary gels made from selected starches and edible gums[J]. *Food Chemistry*, 2019, 296: 100–108.
- [25] HUANG M, KENNEDY J F, LI B, et al. Characters of rice starch gel modified by gellan, carrageenan, and glucomannan: A texture profile analysis study[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2007, 69(3): 411–418.
- [26] 刘微, 杜秉健, 孙京超, 等. 海藻糖对大米淀粉回生特性的影响[J]. *食品科学技术学报*, 2023, 41(5): 136–143. [LIU Wei, DU Bingjian, SUN Jingchao, et al. Effect of trehalose on retrogradation properties of rice starch[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2023, 41(5): 136–143.]
- [27] NIU H L, ZHANG M C, XIA X F, et al. Effect of porcine plasma protein hydrolysates on long-term retrogradation of corn starch[J]. *Food Chemistry*, 2018, 239: 172–179.
- [28] 唐敏敏, 洪雁, 顾正彪, 等. 黄原胶对大米淀粉长期回生的影响[J]. *食品与生物技术学报*, 2013, 32(7): 692–697. [TANG Minmin, HONG Yan, GU Zhengbiao, et al. Effect of xanthan on long-term retrogradation of rice starch[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2013, 32(7): 692–697.]
- [29] TAKAHASHI T, FUJITA N. Thermal and rheological characteristics of mutant rice starches with widespread variation of amylose content and amylopectin structure[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 62: 83–93.
- [30] TANG M M, HONG Y, GU Z B, et al. The effect of xanthan on short and long-term retrogradation of rice starch[J]. *Starch-Starke*, 2013, 65(7-8): 702–708.
- [31] LU H, MA R R, CHANG R R, et al. Evaluation of starch retrogradation by infrared spectroscopy[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 120: 106975.
- [32] HU Y, HE C X, ZHANG M Y, et al. Inhibition from whey protein hydrolysate on the retrogradation of gelatinized rice starch[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 108: 105840.
- [33] ZHOU D T, MA Z, YIN X X, et al. Structural characteristics and physicochemical properties of field pea starch modified by physical, enzymatic, and acid treatments[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 93: 386–394.