

鲜湿米粉微波前的预热温度对杀菌效果及品质保持的影响

王婧^{1a,1b,2}, 张锶苑^{1a,1b,2}, 龚诗琪^{1a,1b,2}, 何飘^{1a,1b,2}, 张敏^{1a,1b,2*}

(1.西南大学 a.食品科学学院 b.食品贮藏与物流研究中心, 重庆 400715;

2.农业农村部农产品贮藏保鲜质量安全风险评估实验室(重庆), 重庆 400715)

摘要: 目的 食品微波杀菌时,提高功率和延长时间虽能提高杀菌效果,却会破坏食品品质,这一直是微波杀菌的痛点。利用其他路径(如提高食品的初始温度)处理后再进行微波杀菌,则可在提升微波杀菌效果的同时通过缩短微波时间减少对食品品质的破坏。**方法** 通过水浴将鲜湿米粉加热至30、40、50℃,再立即用500 W的微波处理20 s,测定其贮藏期间的各项指标。**结果** 当鲜湿米粉初始温度为30℃时,再用微波处理的菌落总数减少率仅为2.9%,而当初始温度提高至40和50℃时,可分别达到9.5%及12.5%,说明初始温度升高能显著增强杀菌效果;微生物减少后其代谢产酸量也相应减少,到贮藏末期鲜湿米粉酸度增加速度显著降低($P < 0.01$);初始温度越高,蒸煮损失率、吸光度和碘蓝值越低($P < 0.05$),鲜湿米粉品质更佳;红外光谱和电子鼻分析表明,不同初始温度对鲜湿米粉短程有序结构及风味没有显著影响。**结论** 提高微波杀菌前初始温度能有效提高鲜湿米粉的贮藏质量,但会降低鲜湿米粉的水分含量,硬度随之增高,可能会影响消费者的咀嚼体验,所以要在微波杀菌前为鲜湿米粉选择好合适的初始温度,以平衡杀菌效果及品质之间的关系。

关键词: 鲜湿米粉;微波;水浴;初始温度;贮藏品质

中图分类号: S609+.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2025)09-0105-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.09.012

Effect of Preheating Temperature of Fresh Wet Rice Noodles on Sterilization Efficiency and Quality Retention in Microwave Processing

WANG Jing^{1a,1b,2}, ZHANG Siyuan^{1a,1b,2}, GONG Shiqi^{1a,1b,2}, HE Piao^{1a,1b,2}, ZHANG Min^{1a,1b,2*}

(1. a. College of Food Science, b. Center for Research on Food Storage and Logistics, Southwest University,

Chongqing 400715, China; 2. Laboratory for Risk Assessment of Quality and Safety of Agricultural Products

Storage and Preservation (Chongqing), Ministry of Agriculture and Rural Affairs of China, Chongqing 400715, China)

ABSTRACT: When food is subject to microwave sterilization, increasing the microwave power and extending the microwave time can improve the sterilization effect but will destroy the food quality, which has been the pain point of microwave sterilization. The use of other paths such as increasing the initial temperature of the food and then microwave sterilization can improve the microwave sterilization effect and reduce the damage to food quality by shortening the microwave time. The fresh wet rice noodles were heated to three different temperatures of 30, 40 and 50 °C in a water bath, and then immediately treated with 500 W microwave for 20 s. Finally, the indexes during storage were determined. When the initial temperature of fresh wet rice noodles was 30 °C, the reduction rate of total colony count after microwave treatment was only 2.9%, but when the initial temperature increased to 40 °C and 50 °C, the reduction rate could reach 9.5% and 12.5% respectively, which indicated that the increase of initial temperature could significantly

收稿日期: 2024-11-25

基金项目: 鲜湿米粉微波前的预热温度对杀菌效果及品质保持的影响

*通信作者

enhance the sterilization effect. After the reduction of microorganisms, their metabolic acid production was also reduced, and the rate of increase of acidity of fresh wet rice noodles was significantly reduced at the end of storage ($P<0.01$). At the same time, the higher the initial temperature, the lower the cooking loss rate and the lower the absorbance and the iodine blue value ($P<0.05$), and the better the fresh wet rice noodle quality. Infrared spectroscopy and electronic nose analysis showed that the different initial temperatures did not have any significant effect on the short-range ordered structure and flavor of the fresh wet rice noodles. However, increasing the initial temperature before microwave sterilization can reduce the moisture content of fresh wet rice noodles and increase the hardness, which may affect the chewing experience of consumers, so it is necessary to choose a suitable initial temperature for fresh wet rice noodles before microwave sterilization to balance the relationship between sterilization and quality.

KEY WORDS: fresh wet rice noodles; microwave; water bath; initial temperature; storage quality

鲜湿米粉是我国传统的淀粉凝胶食品,以籼米为主要原料,经粉碎、发酵、糊化、陈化等工艺制作而成^[1]。与干米粉相比,鲜湿米粉具有爽滑、弹性好、食用方便、易入味等特点,深受消费者喜爱^[2]。但鲜湿米粉的含水量高($>50\%$),正好处于米粉极易老化的含水范围,经过一段时间存放后就会逐渐老化,出现口感变硬、韧性变差、断条率增加、复水性变差等问题。其保质期多为 1~3 d,难以满足长途运输及工业化生产需求^[3]。因此,在保障鲜湿米粉食用品质的前提下,延长其保质期的研究至关重要。

目前,鲜湿米粉的保鲜方式主要包括湿热处理、微波处理、酸浸处理以及包装处理等^[4],其中微波处理是一种集热效应和非热效应共同作用的新型物理杀菌技术,具有时间短、升温快、穿透性强、杀菌效果显著等特点,能最大程度保持食品营养和风味^[5-6]。黄永平等^[7]研究发现,微波处理能有效延缓鲜湿米粉贮藏品质劣变,但处理时间过长(如 >50 s),米粉可能受热过度,导致硬度、咀嚼性和黏附性增大,弹性减小,米粉质构特征显著下降。罗永丹等^[8]研究结果表明,在 600 W 的微波处理条件下,处理时间 >40 s 会明显提高米粉的断条率、破坏凝胶体系,出现碎粉、硬度大、口感粗糙等情况,但微波时间不够又会造成杀菌能力不足,达不到保鲜效果。

如果在微波杀菌前提升食品的初始温度,可使极性分子在高频交变电场下运动加剧,分子间碰撞和摩擦更剧烈,从而增强热效应和非热效应,不仅提高了杀菌效果,还可缩短杀菌时间,减少对食品品质的影响。Guo 等^[9]将鲑鱼置于 3 种不同温度的水浴中获得不同初始温度后进行微波杀菌,结果表明初始温度的升高会增强微波对微生物的非热灭活效应,证实了微波场中热效应和非热效应之间的协同作用。类似的研究结果也表明,高温可显著增强微波的非热效应^[10]。

本试验选择不同初始温度的鲜湿米粉进行微波杀菌,在最大限度发挥微波杀菌作用的同时,通过缩短微波时间减少对鲜湿米粉品质的破坏。通过水浴的方式使鲜湿米粉达到 30、40、50 °C 3 个不同初始温

度(这 3 个温度较低,尽可能排除了水浴杀菌作用对后续微波杀菌效果评价的干扰),再进行微波处理,研究初始温度对鲜湿米粉微波杀菌效果及贮藏品质的影响,进而初步探索其作用机制。现有关于微波处理鲜湿米粉的研究大多集中在达到良好杀菌效果时的最佳处理功率及时间上^[4,8],而对微波前食品初始温度的研究鲜有提及,本研究旨在为微波杀菌技术更好地应用于鲜湿米粉等食品的保质贮藏提供理论依据。

1 实验

1.1 材料

主要材料:鲜湿米粉,不添加任何防腐剂,购于重庆市北碚区手工作坊,早晨 8 点送至实验室,挑选同批次、当天制作且粗细均一的样品进行试验;高温蒸煮袋,材质为 PA15/PP70,透氧率为 $46.95 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h} \cdot 0.1 \text{ MPa})$,透湿率为 $6 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h})$,尺寸为 $17 \text{ cm} \times 23 \text{ cm}$,购于石家庄喜龙包装有限公司;所有试剂等级为分析纯。

1.2 仪器与设备

主要仪器与设备:HH-2 数显恒温水浴锅,上海力辰邦西仪器科技有限公司;KD23B-DA 微波炉,广州美的电器制造有限公司;TA.Plus 质构仪,英国 Stable Micro System 公司;UltraScan® PRO 色差仪,上海一恒科学仪器有限公司;320 真空包装机,泉州市安尔盛机械有限公司;L5S 紫外可见分光光度计,上海仪电分析仪器有限公司;Nicolet 6700 傅里叶红外光谱仪,美国 Thermo Scientific 公司;c-Nose 电子鼻,上海圣保科技有限公司。

1.3 方法

1.3.1 鲜湿米粉样品制作工艺

将稻米浸泡 2~4 h 粉碎后与淀粉以 4:1 的质量比混合均匀,加水调质(控制进料水分质量分数为 $36\% \sim 40\%$),在 140~160 °C 高温下熟化、30~60 °C 成型后,再经过冷却至 40 °C 以下、切分成 120 g/块、

0~4℃下老化 8~10 h、包装、95℃灭菌 20 min、冷却至 40℃以下、外包等工序制备鲜湿米粉样品。

工艺流程: 籼米→浸泡→粉碎→加水 and 料→熟化→成型→定量切分→老化→包装→灭菌→冷却→外包→成品。

1.3.2 样品准备

将米粉按每袋 100 g 的标准称量并装进高温蒸煮袋中进行真空包装, 然后将米粉随机分成 3 组, 置于不同温度的水浴锅中, 所有温度数据均通过红外测温仪获得。其中, MW30 组: 通过水浴使米粉表面温度达到 30℃后, 立即以 500 W 功率微波处理 20 s; MW40 组: 通过水浴使米粉表面温度达到 40℃后, 立即以 500 W 功率微波处理 20 s; MW50 组: 通过水浴使米粉表面温度达到 50℃后, 立即以 500 W 功率微波处理 20 s。在菌落总数测定中, 分别以水浴将米粉表面温度加热至 30、40、50℃为对照组, 记为 SY30、SY40、SY50。

1.4 指标测定

1.4.1 菌落总数测定

菌落总数按照《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》(GB 4789.2—2016) 进行测定。

1.4.2 酸度测定

酸度根据《食品安全国家标准 食品酸度的测定》(GB 5009.239—2016) 进行测定。

1.4.3 蒸煮吸水率和蒸煮损失率测定

蒸煮吸水率和蒸煮损失率的测定参照孟亚萍^[1]的方法并略作修改。称取长 5 cm 左右的试样约 5.00 g, 称其质量 m_0 , 加入 100 mL 沸水蒸煮 2 min 后, 用滤网捞出、滤水 5 min, 称其质量 m_1 , 按 (1) 式计算蒸煮吸水率; 再将煮过的米粉移入已恒重的坩埚中 (称其质量 m_2), 于 (105±2)℃干燥箱内烘干至恒质量, 称其质量 m_3 , 按 (2) 式计算蒸煮损失率。

$$R_{吸} = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100\% \tag{1}$$

$$R_{蒸} = \frac{m_3 - m_2}{m_0 \times (1 - W)} \times 100\% \tag{2}$$

式中: m_0 为米粉样品质量; m_1 为沥干后米粉质量; m_3 为取出的蒸煮水中固形物恒重后的质量; m_2 为坩埚恒重; W 为米粉水分含量, %。

1.4.4 蒸煮液吸光度测定

蒸煮液吸光度测定参考罗文波等^[12]的方法并加以修改。准确称量 5.00 g 鲜湿米粉于 250 mL 烧杯中, 加入 100 mL 沸水蒸煮 2 min 取上清液于 620 nm 波长下测定吸光度, 以蒸馏水作为空白对照。

1.4.5 蒸煮液碘蓝值测定

蒸煮液碘蓝值测定参考李新华等^[13]的方法并

加以修改。准确称量 5.00 g 湿米粉于 250 mL 烧杯中, 加入 100 mL 沸水蒸煮 2 min, 将上清液经滤纸过滤后, 取 10 mL 滤液于 100 mL 容量瓶中, 加入 1 mL 0.1 mol/L HCl 溶液及 1 mL 碘液, 定容后于 620 nm 波长下测定吸光度, 读取吸光值, 即为提取液碘蓝值。

1.4.6 水分含量测定

水分含量根据《食品安全国家标准 食品中水分的测定》(GB 5009.3—2016) 中直接干燥法进行测定。

1.4.7 质构分析

质构分析参照雷婉莹等^[14]的方法并略作修改。选取无裂纹且粗细均匀的米线, 截取长度为 5 cm, 在测试平台上放置 4 根, 采用 P/36R 探头进行 TPA (Texture Profile Analysis) 模式测定, 程序参数为: 测前、测后速度 2 mm/s, 测中速度 1 mm/s, 触发力 10g, 压缩比 50%, 2 次压缩间隔 3 s, 数据采集频率 200 Hz。平行测定 9 次, 剔除最大值和最小值后, 取剩余 7 次测定结果的平均值。

1.4.8 红外光谱分析

红外光谱分析参照王娇^[15]的方法并加以修改。将米粉样品在 30℃条件下干燥 12 h, 粉碎后过 200 目筛, 密封保存备用。准确称取 1.00 mg 样品, 加入 100 mg 干燥无水 KBr, 混合压制成 1 mm 厚的圆形薄片后置于样品台进行扫描, 检测其吸光度。扫描范围为 400~4 000 cm^{-1} , 分辨率为 4 cm^{-1} 。

1.4.9 电子鼻分析

电子鼻分析参照祝红等^[16]的方法并加以修改。取 2 g 米粉样品置于 20 mL 顶空进样瓶中, 加入 4 mL 饱和 NaCl 溶液, 4℃密封 1 h 后在 25℃平衡 30 min 后进行电子鼻测定。参数设置: 传感器清洗时间为 60 s, 传感器采样时间为 90 s, 气体流量为 1 L/min。电子鼻传感器名称及其响应物质见表 1。

表 1 电子鼻传感器名称及其响应物质
Tab.1 Name of electronic nose sensor and its response substance

传感器 序号	传感器 名称	响应物质	代表 成分
S1	W1C	芳香族化合物、苯类	C ₇ H ₈
S2	W5S	氮氧化合物	NO ₂
S3	W3C	芳香成分、氨类	C ₆ H ₆
S4	W6S	氢化物	H ₂
S5	W5C	芳香族化合物、短链烷烃	C ₃ H ₈
S6	W1S	甲基类	CH ₄
S7	W1W	无机硫化物、吡嗪和许多萜烯类	H ₂ S
S8	W2S	醇类、醛酮类	CH ₃ CHO
S9	W2W	芳香成分、有机硫化物	C ₂ H ₅ SH
S10	W3S	长链烷烃和一些高浓度化合物	CH ₄

1.5 数据分析

使用 Microsoft Excel 2018 对实验数据进行计算与分析;使用 IBM SPSS Statistics 26 单因素方差分析 (One-way ANOVA) 和 Duncan 多重比较分析对指标进行显著性分析,显著性水平设定为 $\alpha=0.05$ ($P<0.05$ 表示差异显著, $P<0.01$ 表示差异极显著);使用 Origin 2018 对数据进行绘图分析。

2 结果与分析

2.1 菌落总数

李芸^[17]研究指出,微生物的增殖以及代谢活动是导致鲜湿米粉腐败变质的关键因素之一。不同初始温度下微波处理前后菌落总数的变化情况如表 2 所示。当微波处理前的初始温度处于较低水平 (30 °C) 时,微波几乎不具备杀菌功效;而当初始温度提升至 40 和 50 °C 时,菌落总数减少率分别达到 9.5% 与 12.5%。这一结果表明,微波杀菌前的初始温度越高,微波的杀菌效果越显著。其内在机制可能是在特定温度条件下,细胞和细胞器中的蛋白质、核酸等生物大分子结构更易受到损伤,进而对微波辐射的破坏作用更敏感。如图 1 所示,随着贮藏时间的延长,菌落总数呈现逐渐增大的趋势。在此过程中,初始温度越高,对抑制米粉贮藏期间微生物的生长繁殖越有利。在前期杀菌过程中, MW50 组的杀菌效果最为突出,因而在整个贮藏期间,该组的菌落总数始终维持在最低水平。自贮藏第 6 天起, MW50 组与 MW40 组和 MW30 组相比,菌落总数无显著差异 ($P>0.05$);而 MW40 组的杀菌效果相对较弱,自第 2 天起,其与 MW30 组在菌落总数上已无显著差异 ($P>0.05$)。

表 2 不同初始温度微波处理前后菌落总数的变化
Tab.2 Change of total bacterial count at different initial temperatures before and after microwave treatment

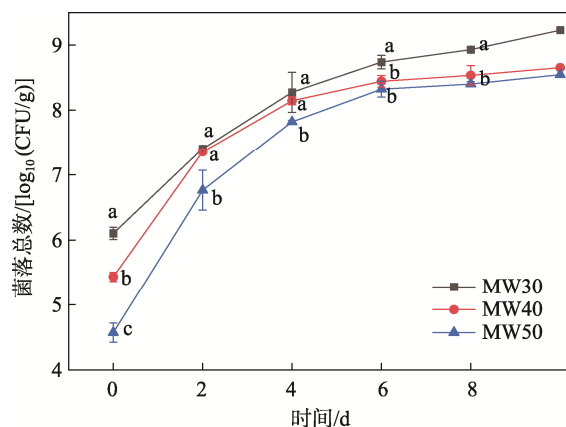
组别	菌落总数/lg(CFU/g)	菌落总数减少率/%
SY30	6.28±0.14	2.9±2.6
MW30	6.10±0.09	
SY40	5.57±0.10	9.5±2.0
MW40	5.04±0.07	
SY50	5.22±0.13	12.5±3.8
MW50	4.57±0.15	

本次研究选用 30、40 和 50 °C 作为初始温度,主要是考虑到这 3 个温度相对较低,能够有效避免水浴杀菌作用对后续微波杀菌效果评价的干扰,以便更准确地研究不同初始温度下微波处理对米粉杀菌效果及品质特征的影响规律。然而,从实际杀菌效果分析,依据《食品安全地方标准 鲜湿米粉》(DBS

45/050—2021) 的规定,鲜湿米粉中微生物指标的最高安全限量值为 10^5 CFU/g,而 30、40 和 50 °C 这 3 个温度条件下,在保存期间均无法满足该标准要求。基于此,在后续实际应用中,可考虑先采用更高的温度(如巴氏杀菌温度)进行预处理,之后再行微波处理。这种处理方式不仅能够利用巴氏杀菌的杀菌作用及其对米粉口感的保护功能,还能通过其升温效应为后续微波处理提供适宜的初始温度。综合各项研究结果可以得出,初始温度越高,微波杀菌效果越佳。

2.2 酸度

各处理组米粉在贮藏过程中的酸度变化情况如图 2 所示。在贮藏初始阶段(第 0 天),各处理组米粉的酸度值一致,微波处理对米粉初始酸度的影响无显著差异 ($P>0.05$)。在整个贮藏期间,各处理组米粉的酸度均随贮藏时间的延长呈上升趋势。其中,



注:图中同一列数值上标小写字母表示组间的差异显著 ($P<0.05$),下同。

图 1 不同初始温度微波杀菌对米粉贮藏期间菌落总数的影响

Fig.1 Effect of microwave sterilization at different initial temperatures on the total bacterial count of rice noodles during storage

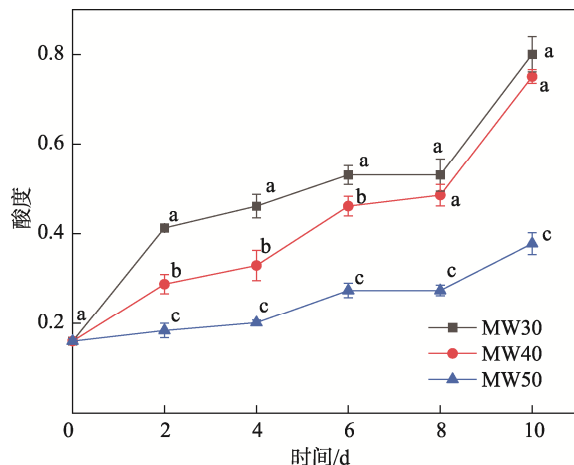


图 2 不同初始温度微波杀菌对米粉酸度的影响
Fig.2 Effect of microwave sterilization at different initial temperatures on the acidity of rice noodles

MW30 组的酸度上升速率最快, MW40 组次之; MW50 组的酸度在贮藏的前 4 天无明显变化, 直至第 6 天才出现明显上升。贮藏末期, MW30 组、MW40 组和 MW50 组的酸度分别达到 0.80、0.75 和 0.37, MW50 组与 MW30 组、MW40 组之间的酸度差异达到极显著水平 ($P < 0.01$)。这一结果表明, MW50 组的微波处理能够有效杀灭米粉中的微生物, 显著抑制微生物代谢产酸过程, 进而降低了酸度的上升速率。综上所述, 较高的微波处理初始温度 (MW50 组) 在维持米粉贮藏期间酸度稳定性方面具有明显优势。

2.3 蒸煮品质

蒸煮品质是衡量米粉质量的关键指标之一。其中, 蒸煮吸水率与米粉口感呈正相关, 即蒸煮吸水率越高, 米粉口感越佳; 蒸煮损失率则反映了米粉在蒸煮过程中淀粉的溶出程度, 蒸煮损失率越高, 表明米粉中淀粉溶出量越大, 其品质越差。由图 3 可知, 随着贮藏时间的延长, 各处理组米粉的蒸煮吸水率呈下降趋势, 表明米粉的口感逐渐变差; 与此同时, 蒸煮损失率随贮藏时间的延长而逐渐上升。在贮藏第 0 天, MW30 组的蒸煮吸水率和蒸煮损失率均显著高于 MW40 组和 MW50 组 ($P < 0.05$)。这一现象可能归因于较高初始温度下微波产生了更多的热量, 促使米粉形成更为致密的结构。该致密结构阻碍了水分的进入, 进而导致米粉吸水率降低; 同时减少淀粉颗粒溶出, 从而使蒸煮损失率降低^[18]。在贮藏第 6 天, MW30 组的吸水率降至与 MW40 组和 MW50 组无显著差异 ($P > 0.05$)。这可能是由于生长的微生物破坏了米粉中的淀粉结构, 使大分子物质转变为小分子, 从而削弱了米粉的吸水能力。对比 MW40 组与 MW50 组, 在贮藏过程中, 2 组的蒸煮吸水率基本保持一致。然而, 从第 4 天起, MW40 组的蒸煮损失率显著高于 MW50 组 ($P < 0.05$)。这可能是因为 MW40 组微生物

增殖速度更快, 致使其超过鲜湿米粉微生物指标的时间更短, 进而加速了蒸煮损失率的升高。综上所述, 提高初始温度对于保障米粉在贮藏期间的蒸煮品质具有显著的作用。

2.4 蒸煮液吸光度

米粉蒸煮液的透射特性与蒸煮损失率所表征的内容具有一致性, 二者均可反映米粉中淀粉颗粒的溶出程度以及糊汤现象的严重程度。然而在贮藏前期, 米粉蒸煮损失量较少, 蒸煮损失率受称量误差的影响较大, 通过测定吸光度能够更有效地反映米粉蒸煮品质的变化情况。如图 4 所示, 在贮藏期间, 各处理组米粉蒸煮液的吸光度均随贮藏时间的延长而上升, 并在整个贮藏期间内差异显著 ($P < 0.05$)。吸光度上升速率在贮藏的前 2 天最为迅速, 这表明各处理组米粉在第 2 天均出现了较为明显的品质下降现象。同时, 初始温度越低, 吸光度的上升幅度越大。这一现象可能是由于微生物的生长繁殖破坏了米粉的内部结构, 进而导致淀粉颗粒溶出量增加, 使得米粉汤液更为浑浊。在贮藏第 0 天, 各处理组米粉蒸煮液的吸光度已呈现出显著差异 ($P < 0.05$)。初始温度越低, 米粉的吸光度值越大, MW30 组、MW40 组和 MW50 组的吸光度分别为 0.104、0.064 和 0.025。这可能是因为较高的初始温度下, 微波产生的热量更高, 促使分子间和分子内氢键作用增强, 从而抑制了水分子与直链淀粉和支链淀粉游离羟基的结合, 降低了淀粉的溶胀力^[19]。

2.5 蒸煮液碘蓝值

在淀粉颗粒糊化过程中, 长直链淀粉分子会降解为较短链长的直链淀粉, 这一过程会对淀粉分子与碘的结合产生影响。通常, 米粉的碘蓝值越高, 意味着米粉的淀粉溶出率越高。由图 5 可知, 在贮藏第 0 天,

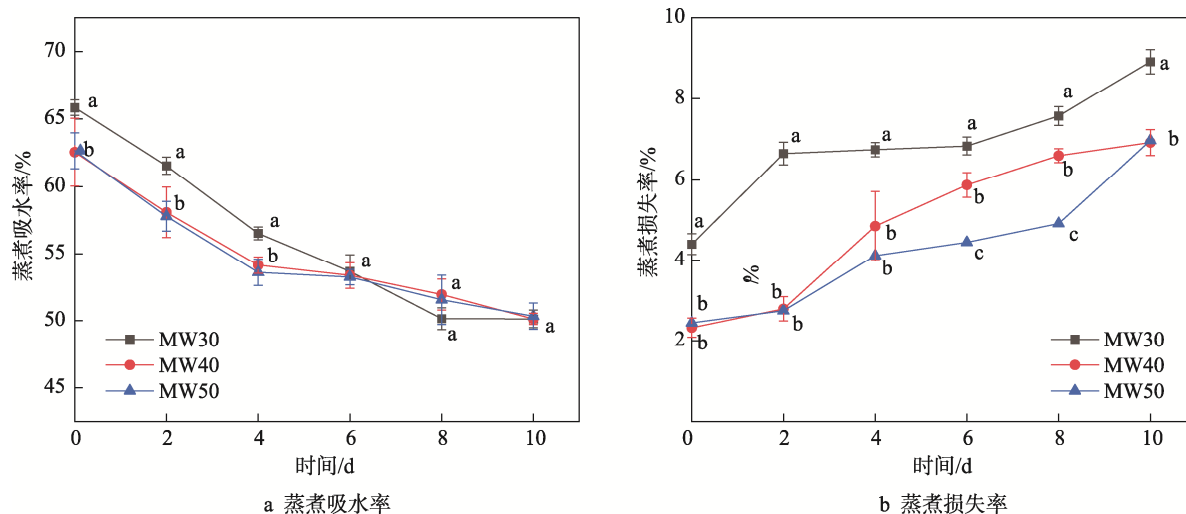


图 3 不同初始温度微波杀菌对米粉蒸煮品质的影响

Fig.3 Effect of microwave sterilization at different initial temperatures on cooking quality of rice noodles

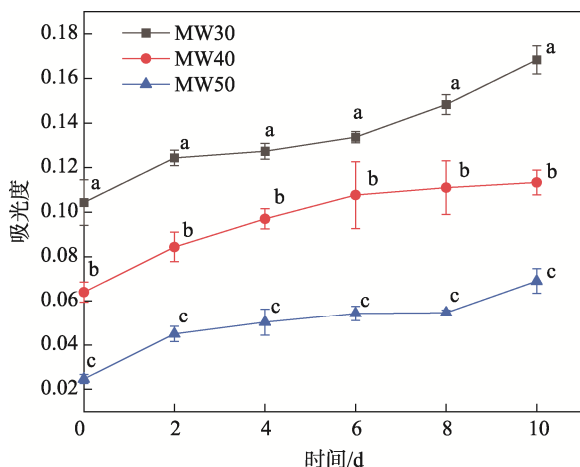


图4 不同初始温度微波杀菌对米粉蒸煮液吸光度的影响

Fig.4 Effect of microwave sterilization at different initial temperatures on the absorbance of rice noodles cooking liquid

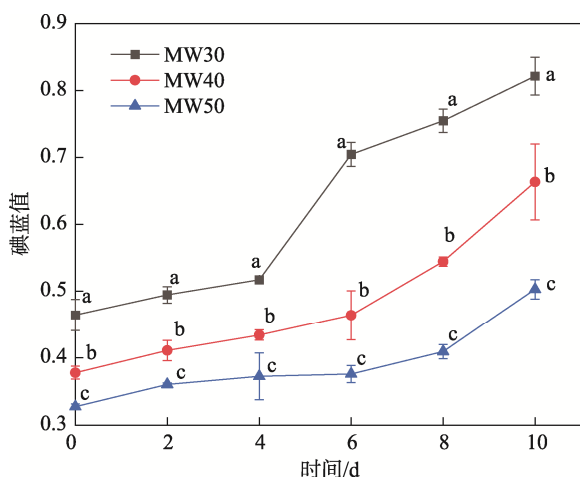


图5 不同初始温度微波杀菌对米粉蒸煮液碘蓝值的影响

Fig.5 Effect of microwave sterilization at different initial temperatures on iodine blue value of rice noodles cooking liquid

各处理组米粉的碘蓝值呈现出显著差异 ($P<0.05$), 这一结果与吸光度的变化趋势一致, 充分表明不同初始温度的微波杀菌处理对米粉的结构和蒸煮品质具有直接影响。初始温度越高, 微波杀菌效果越显著, 米粉品质保持状况越好, 淀粉颗粒溶出量越少, 碘蓝值上升也更为缓慢。Jiang 等^[20]的研究结果表明, 微波后再加热样品的碘蓝值有所增加, 这可能归因于支链淀粉侧链的部分断裂, 增加了碘可结合的直链淀粉分子含量。而在本研究中, 由于所采用的微波杀菌初始温度相对较低, 对淀粉颗粒的破坏程度较小, 因此并未出现碘蓝值随微波杀菌初始温度升高而增大的现象。具体来看, MW30 组、MW40 组和 MW50 组的碘蓝值分别在贮藏第 6、8、10 天急剧上升, 这一变化表明微生物对淀粉结构的破坏程度逐渐加深, 从侧面反映出不同初始温度的微波杀菌处理对米粉杀

菌效果的显著影响。综上所述, 初始温度在微波杀菌处理米粉过程中, 对米粉的淀粉结构、品质以及碘蓝值变化具有关键作用。

2.6 水分含量

鲜湿米粉属高水分食品, 含水量通常为 60%~80%, 因此含水量也是影响鲜湿米粉品质的关键因素之一^[1]。水分含量影响着米粉的组织结构、微生物生长以及口感风味等多方面品质。水分的存在可促进凝胶形成和淀粉分子聚合, 但也会使大米凝胶中淀粉老化, 并为微生物繁殖创造条件。不同水分含量的鲜湿米粉储藏品质差异显著, 水分含量越高, 储藏期感官品质变差越快, 其微生物指标超标的时间也越早^[21]。米粉在贮藏期间水分含量变化如图 6 所示, 由于鲜湿米粉水分含量较高, 其在贮藏过程中水分向表面迁移, 导致水分含量随贮藏时间的延长呈下降趋势, 但因包装材料具有阻隔性, 米粉水分含量的下降程度不大, 维持在 37%~42%。同时, 微生物生长繁殖会破坏米粉内部结构, 导致米粉持水性能下降。从图 6 可以看出, 随初始温度的升高, 微波杀菌后的水分含量逐渐降低, 其中 MW30 组与其他 2 组差异显著 ($P<0.05$), 说明初始温度升高会降低鲜湿米粉的水分含量, 由于本试验用耐高温蒸煮袋对鲜湿米粉进行真空包装, 微波杀菌对鲜湿米粉的水分含量影响不大^[8], 故其原因可能是水浴温度的提高, 加快了鲜湿米粉中水分的蒸发速度, 有效降低了水分含量, 更有利于鲜湿米粉的贮藏保鲜。

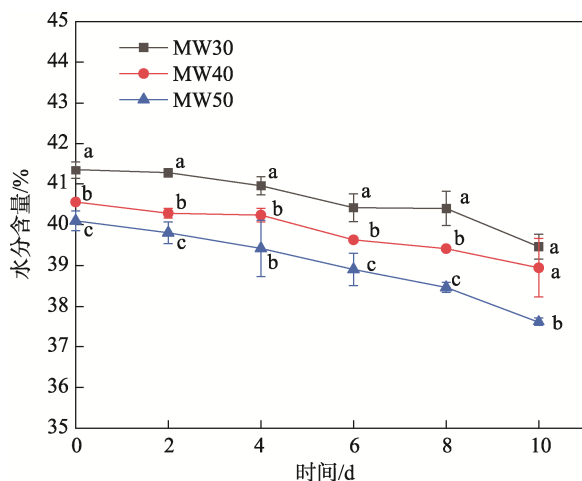


图6 不同初始温度微波杀菌对米粉水分含量的影响

Fig.6 Effect of microwave sterilization at different initial temperatures on the moisture content of rice noodles

2.7 硬度

在鲜湿米粉的保质期内, 微生物活动、温度变化、产品内部水分迁移和淀粉结构改变等多种因素的综

合影响, 导致产品的质构特性发生显著变化, 具体表现为硬度增加和弹性下降^[7]。米粉的硬度与咀嚼性呈正相关, 能够有效反映米粉的口感和结构特性。如图 7 所示, 各处理组米粉的硬度随贮藏时间的延长呈现出先上升后下降的趋势; 同时, 初始温度越高, 米粉硬度的增加幅度越大, 这表明不同初始温度的微波杀菌处理对米粉的初始硬度产生了直接影响。其作用机制可能是在较高的初始温度下, 微波杀菌过程中产生了更多的热量, 加速了米粉内部水分的迁移, 增强了淀粉链之间的相互作用, 进而导致米粉硬度增加。此外, 微波杀菌初始温度较高的米粉在贮藏过程中达到的硬度峰值也更高。具体而言, MW30 组的硬度峰值为 2 147.52, MW40 组的硬度峰值为 2 807.29, MW50 组的硬度峰值为 3 671.90。这一现象可能是微波处理促进了米粉的老化回生, 使得贮藏过程中未折叠的淀粉链逐渐转变为有序的结晶状态, 从而显著提高了米粉的硬度峰值^[22]。

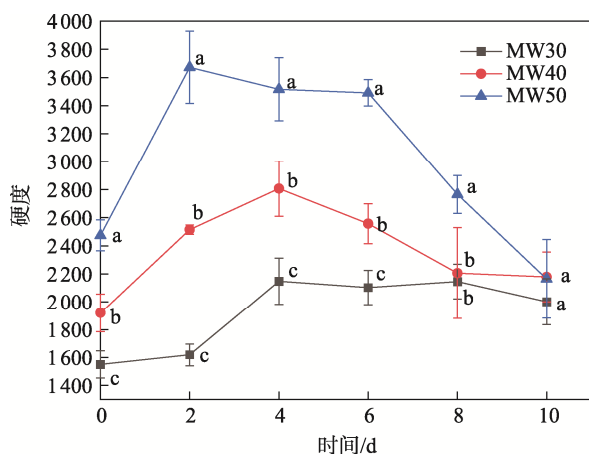


图 7 不同初始温度微波杀菌对米粉硬度的影响

Fig.7 Effect of microwave sterilization at different initial temperatures on the hardness of rice noodles

2.8 红外光谱分析

微波对淀粉结构的影响主要有微波辐射(非热效应)和介电加热(热效应)。一方面, 微波能作用于化学键和化学基团, 从而影响基团的振动强度、键能和分布; 另一方面, 极性分子(如水分子和淀粉颗粒)之间的相互摩擦可以迅速产生热能, 从而导致分子构象的变化。这 2 种效应都可以改变吸收峰的键能和振动强度, 导致红外吸收峰强度发生变化^[19]。从图 8 中的各红外曲线可以看出, 不同样品红外吸收峰的位置几乎重叠, 没有新的化学键或基团出现, 原有的基团也没有消失, 说明微波处理没有改变淀粉分子的化学键, 这与 Shah 等^[23]的研究结果一致。由图 8 可知, $3\,425\text{ cm}^{-1}$ 处出现的强而宽的峰是羟基($\text{O}-\text{H}$)

的拉伸振动产生的, 可以看出 MW40 和 MW50 组在 $3\,425\text{ cm}^{-1}$ 的吸收强度要强于 MW30 组, 说明提高初始温度会使淀粉颗粒内氢键增强和化学键能量水平提高, 从而加强淀粉分子链之间的相互作用, 减少淀粉颗粒的溶出, 提高米粉的热稳定性。在 $900\sim 1\,300\text{ cm}^{-1}$ 波段内的变化可用于分析淀粉的短程有序结构特征, $1\,047\text{ cm}^{-1}/1\,022\text{ cm}^{-1}$ 的比值 ($R_{1047/1020}$) 可反映淀粉颗粒中有序结晶结构的数量与无定形结构数量的比值^[24]。图中各处理组 $R_{1047/1020}$ 没有明显区别, 表明不同初始温度微波杀菌对米粉的短程有序结构没有显著影响, 这与 Xu 等^[25]的研究结果一致。

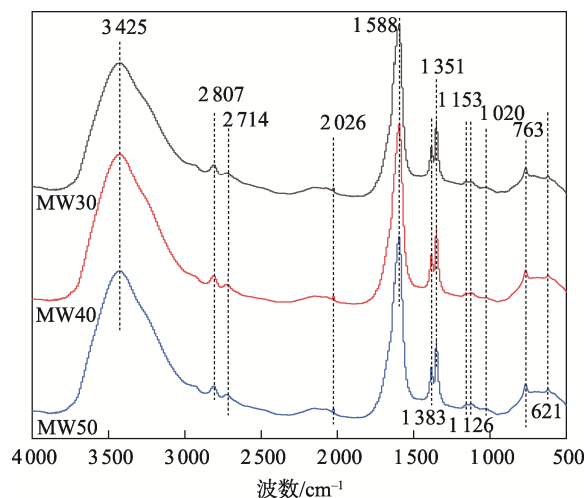


图 8 不同初始温度微波杀菌处理后米粉的红外光谱图

Fig.8 Infrared spectrum of rice noodles after microwave sterilization at different initial temperatures

2.9 电子鼻分析

采用电子鼻分别对贮藏 0、2、4、6 d 的鲜湿米粉进行测定, 结果如图 9 所示, 图中每条线表示不同初始温度微波处理的鲜湿米粉在各传感器上的特征值。第 0 天时, 不同初始温度微波杀菌米粉在各传感器上的响应值没有显著区别 ($P>0.05$), 说明提高初始温度后微波杀菌不会对鲜湿米粉的风味造成影响。在贮藏期间, W1C、W5S、W5C、W1S、W1W、W2S、W2W 传感器的响应值随贮藏时间的延长显著增大 ($P<0.05$), W3C、W6S、W3S 传感器随着贮藏时间的延长而略微增加或基本保持不变。说明米粉在贮藏期间产生了 NO_2 等氮氧化物、无机硫化物、含硫有机化合物、醛酮类化合物以及芳香族化合物^[16, 26]。醛类是大米产品中的主要风味化合物, 在低浓度下可以提供草香或水果香味, 但在高浓度下风味会较差^[27]。W2S 传感器对醇类(乙醇等)、醛酮类物质敏感, 在贮藏过程中该传感器的响应值不断增大, 可能是微生物将脂质分解成脂肪酸, 脂肪酸变成挥发性醛和酯等

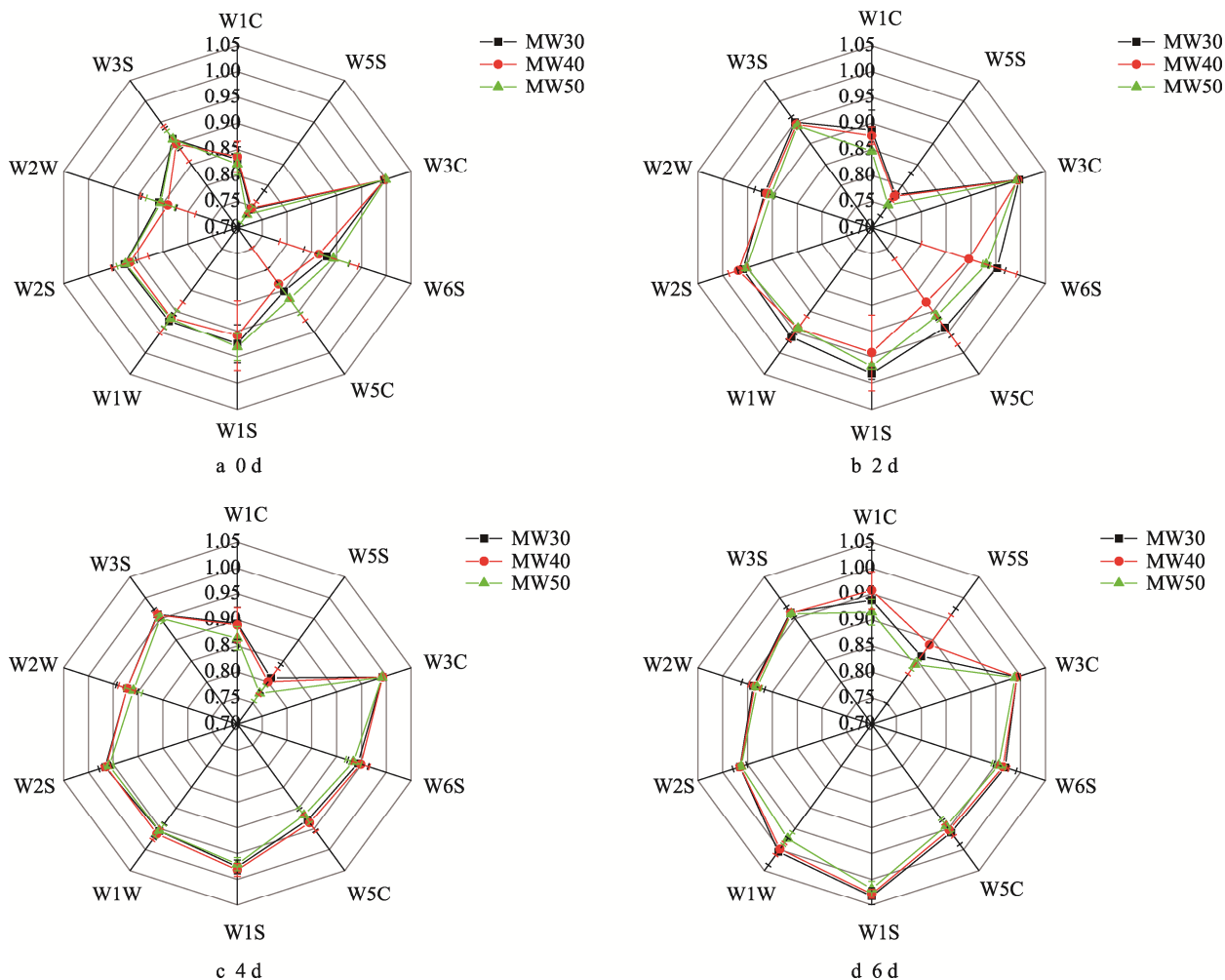


图9 不同初始温度微波杀菌处理后米粉的电子鼻特征雷达图

Fig.9 Radar map of electronic nose characteristics of rice noodles after microwave sterilization at different initial temperatures

成分,导致米粉风味变差。Shen 等^[28]认为,米粉结构的变化以及淀粉分子与香精分子间相互作用是风味品质变化的原因,淀粉的短程有序结构、晶体结构以及有序分子和聚集体结构可以协同调节米粉的风味品质。综上所述,随贮藏时间的延长,各处理组之间响应值并无显著性差异 ($P>0.05$)。

3 结语

在食品加工领域,微波处理前米粉的初始温度对杀菌效果及产品品质具有显著影响。以本试验为基础,研究发现初始温度与米粉微波处理后的菌落总数减少率呈正相关,即初始温度越高,菌落总数减少率越高,微波杀菌效果越好。吸光度与碘蓝值作为衡量米粉淀粉溶出率的重要指标,其数值越低,表明米粉的淀粉溶出率越低,米粉品质越优,同时蒸煮损失率也越低。在贮藏初期,30℃初始温度条件下的米粉蒸煮损失率显著高于40和50℃初始温度条件下的米粉蒸煮损失率 ($P<0.05$)。在整个贮藏过程中,米粉

蒸煮液的吸光度普遍呈上升趋势,且初始温度越低,吸光度值越高 ($P<0.05$);碘蓝值的变化趋势与吸光度一致。通过红外光谱分析可知,初始温度对米粉的短程有序结构影响并不显著。不同初始温度对微波杀菌后米粉的风味影响差异不显著 ($P>0.05$),然而在贮藏期间,米粉中的风味物质会发生变化,产生多种化合物。综合各项试验结果,较高的初始温度有利于维持米粉的品质,降低蒸煮损失率,提升贮藏质量。然而,随着初始温度的升高,米粉的水分含量降低、硬度增加,这可能导致消费者在食用过程中咀嚼体验下降。因此,选择适宜的温度以平衡杀菌效果与产品品质之间的关系至关重要。

本研究选取30、40、50℃作为微波处理前的初始温度,并非因其是实际加工中的最佳温度,而是考虑到这3个温度相对较低,对单独评估微波杀菌作用的干扰较小。若选择过高温,将难以明确杀菌效果是源于水浴加热还是微波处理。这种试验设计在保证一定可行性的同时也具备合理性,其研究结果能够为实际生产应用提供理论参考。在实际应用中,可根据

产品保质期和品质的具体要求,综合权衡确定最佳的初始温度。此外,获得不同初始温度的方式多样,需依据不同食品的特性,选择合适的加热方式,以实现更为理想的杀菌效果。

参考文献:

- [1] 肖正午,黄敏.鲜湿米粉品质及其影响因素[J].中国稻米,2022,28(3):34-41.
XIAO Z W, HUANG M. Fresh Rice Noodle Quality and Influencing Factors[J]. China Rice, 2022, 28(3): 34-41.
- [2] MURRAY J C, KISZONAS A M, WILSON J, et al. Effect of Soft Kernel Texture on the Milling Properties of Soft Durum Wheat[J]. Cereal Chemistry, 2016, 93(5): 513-517.
- [3] 卫攀杰,陈洁,许飞,等.保鲜方式对鲜湿米粉品质的影响[J].食品工业科技,2021,42(11):44-49.
WEI P J, CHEN J, XU F, et al. Effect of Preservation Methods on the Quality of Instant Fresh Rice Noodles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(11): 44-49.
- [4] 袁蕾蕾.鲜湿米粉保鲜储藏的研究[D].南昌:南昌大学,2014.
YUAN L L. Study on Preservation and Storage of Fresh Wet Rice Flour[D]. Nanchang: Nanchang University, 2014.
- [5] 胡蕾琪,郭长凯,潘志海,等.微波场对食品的非热效应研究进展[J].食品与发酵工业,2020,46(16):270-275.
HU L Q, GUO C K, PAN Z H, et al. Research Progress of Non-Thermal Effects of Microwave Fields on Food[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(16): 270-275.
- [6] 曹芸榕,吴任之,饶钧玥,等.微波及其联合杀菌技术在食品中的应用研究进展[J].微生物学杂志,2023,43(3):113-120.
CAO Y R, WU R Z, RAO J Y, et al. Advances in the Application of Microwave and Combined Sterilization Technology in Foods[J]. Journal of Microbiology, 2023, 43(3): 113-120.
- [7] 黄永平,黄占旺,张敏,等.鲜湿米粉微波处理后的储藏品质变化规律[J].中国粮油学报,2018,33(6):77-83.
HUANG Y P, HUANG Z W, ZHANG M, et al. Storage Quality Changes of Fresh Wet Rice Noodles After the Microwave Treatment[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2018, 33(6): 77-83.
- [8] 罗永丹,尹秀华,朱韧,等.微波处理对鲜湿米粉保鲜品质的影响[J].粮食与油脂,2020,33(5):64-68.
LUO Y D, YIN X H, ZHU R, et al. Effects of Microwave Treatment on the Preservation Quality of Fresh Wet Rice Noodles[J]. Cereals & Oils, 2020, 33(5): 64-68.
- [9] GUO C K, WANG Y F, LUAN D L. Study the Synergism of Microwave Thermal and Non-Thermal Effects on Microbial Inactivation and Fatty Acid Quality of Salmon Fillet during Pasteurization Process[J]. LWT, 2021, 152: 112280.
- [10] ROUGIER C, PROROT A, CHAZAL P, et al. Thermal and Nonthermal Effects of Discontinuous Microwave Exposure (2.45 Gigahertz) on the Cell Membrane of Escherichia Coli[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2014, 80(16): 4832-4841.
- [11] 孟亚萍.挤压米粉加工及品质改良技术研究[D].无锡:江南大学,2015.
MENG Y P. Study on Processing and Quality Improvement Technology of Extruded Rice Vermicelli[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015.
- [12] 罗文波,林亲录,黄亮,等.不同品种籼米生产的鲜湿米粉理化特性与感官品质[J].食品与机械,2011,27(3):7-12.
LUO W B, LIN Q L, HUANG L, et al. Study on Physicochemical and Sensory Properties of Fresh Rice Noodles Produced by Different Varieties of Indica Rice[J]. Food & Machinery, 2011, 27(3): 7-12.
- [13] 李新华,洪玲,吕文彦.不同软米品系对方便米饭品质的影响[J].食品与发酵工业,2011,37(4):145-148.
LI X H, HONG L, LYU W Y. Effect of Different Soft Rice on the Quality of Instant Rice[J]. Food and Fermentation Industries, 2011, 37(4): 145-148.
- [14] 雷婉莹,吴卫国,廖卢艳,等.鲜湿米粉品质评价及原料选择[J].食品科学,2020,41(1):74-79.
LEI W Y, WU W G, LIAO L Y, et al. Quality Evaluation of and Raw Material Selection for Wet Rice Noodles[J]. Food Science, 2020, 41(1): 74-79.
- [15] 王娇.不同制粉工艺对大米粉品质的影响[D].长沙:中南林业科技大学,2016.
WANG J. Effects of Different Milling Processes on the Quality of Rice Flour[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2016.
- [16] 祝红,郭宇波,易翠平,等.基于电子鼻的鲜湿米粉新鲜度检测[J].食品与机械,2018,34(7):65-68.
ZHU H, GUO Y B, YI C P, et al. Freshness Detection of Fresh Rice Noodles Based on Electronic Nose[J]. Food & Machinery, 2018, 34(7): 65-68.
- [17] 李芸.发酵米粉生产过程中的菌相变化及发酵对米粉

- 品质的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- LI Y. Changes of Bacterial Phase in the Production of Fermented Rice Noodles and the Effect of Fermentation on the Quality of Rice Noodles[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015.
- [18] 王洁, 代养勇, 董海洲, 等. 微波韧化辅助制备马铃薯抗性淀粉性质的研究[J]. 食品科技, 2016, 41(4): 249-254.
- WANG J, DAI Y Y, DONG H Z, et al. Characteristics and Formation Mechanism of Potato Resistant Starch under Microwave and Annealing Treatment[J]. Food Science and Technology, 2016, 41(4): 249-254.
- [19] LI Y, HU A J, WANG X Y, et al. Physicochemical and in Vitro Digestion of Millet Starch: Effect of Moisture Content in Microwave[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 134: 308-315.
- [20] JIANG J N, LI J T, HAN W F, et al. Effects of Reheating Methods on Rheological and Textural Characteristics of Rice Starch with Different Gelatinization Degrees[J]. Foods, 2022, 11(21): 3314.
- [21] 陈志瑜. 鲜湿米粉保质保藏技术的研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2013.
- CHEN Z Y. Study on Quality Preservation Technology of Fresh Wet Rice Flour[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2013.
- [22] ABHILASHA A, KAUR L, MONRO J, et al. Effects of Hydrothermal Treatment and Low-Temperature Storage of Whole Wheat Grains on in Vitro Starch Hydrolysis and Flour Properties[J]. Food Chemistry, 2022, 395: 133516.
- [23] SHAH U, GANI A, AHMAD ASHWAR B, et al. Effect of Infrared and Microwave Radiations on Properties of Indian Horse Chestnut Starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 84: 166-173.
- [24] 郑洋洋. 过热蒸汽处理对大米粉及方便米线品质的影响研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2021.
- ZHENG Y Y. Study on the Influence of Superheated Steam Treatment on the Quality of Rice Noodles and Instant Rice Noodles[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2021.
- [25] XU F, LIU W, ZHANG L, et al. Retrogradation and Gelling Behaviours of Partially Gelatinised Potato Starch as Affected by the Degree of Pre-Gelatinisation[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(1): 426-435.
- [26] ZHAO Q Y, YOUSAF L, XUE Y, et al. Changes in Flavor of Fragrant Rice During Storage Under Different Conditions[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(8): 3435-3444.
- [27] WANG A X, XIAO T Z, XI H H, et al. Edible Qualities, Microbial Compositions and Volatile Compounds in Fresh Fermented Rice Noodles Fermented with Different Starter Cultures[J]. Food Research International, 2022, 156: 111184.
- [28] SHEN S D, CHI C D, ZHANG Y P, et al. New Insights into How Starch Structure Synergistically Affects the Starch Digestibility, Texture, and Flavor Quality of Rice Noodles[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 184: 731-738.