

入磨水分调控下大米粉与鲜湿米线的品质特征

肖倩, 吴淼源, 廖卢艳, 张喻*, 吴卫国*
(湖南农业大学食品科学技术学院, 湖南长沙 410128)

摘要: 为探究入磨水分对大米粉质特性及鲜湿米线品质的影响, 该研究采用半干法制粉, 通过多维度分析, 系统表征了入磨水分 10%、12%、16%、20%、28% 时大米硬度、粉质特性 (破损淀粉含量、粒度分布、水合、冲调、糊化、流变特性、微观结构) 及鲜湿米线品质 (蒸煮特性、质构品质、感官评分)。结果表明, 随入磨水分降低, 大米硬度由 17.46 N 显著增加至 53.92 N; 破损淀粉含量由 5.56% 提升至 6.49%, 粒径增幅达 21.43%; 水合特性总体呈上升趋势; 结块率先降后升且在 16% 水分时最低 (10.88%); 峰值、谷值、最终黏度先升后降且均在 16% 水分时达峰值; 扫描电镜结果显示入磨水分 16% 时, 大米粉颗粒表面光滑、淀粉颗粒暴露较少, 较好地保留了原始淀粉颗粒形貌。此外, 16% 水分时, 鲜湿米线的硬度、咀嚼性、吐浆值最低, 弹性最好, 感官评分最高。综上, 入磨水分 16% 时, 大米粉质特性与鲜湿米线品质最优。该研究为工业半干法制粉入磨水分的选择提供了理论依据。

关键词: 半干法; 入磨水分; 大米粉; 鲜湿米线

文章编号: 1673-9078(2026)5-213-222

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.5.0304

Quality Characteristics of Rice Flour and Fresh Rice Noodles under Moisture Control before Milling

XIAO Qian, WU Miaoyuan, LIAO Luyan, ZHANG Yu*, WU Weiguo*

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

Abstract: To investigate the effects of moisture content before milling on the quality characteristics of rice flour and fresh rice noodles, a semi-dry milling process was applied. Rice hardness, rice flour quality characteristics (including damaged starch content, particle size distribution, hydration properties, reconstitution properties, gelatinization behavior, rheological properties, and microstructure), and quality attributes of fresh rice noodles (including cooking characteristics, textural properties, and sensory scores) were systematically evaluated at milling moisture contents of 10%, 12%, 16%, 20%, and 28%. The results showed that decreasing moisture content before milling significantly increased rice hardness from 17.46 N to 53.92 N. Damaged starch content increased from 5.56% to 6.49%, and particle size increased by 21.43%. Hydration properties exhibited an overall increasing trend. The aggregation rate initially decreased and then increased, reaching a minimum value of 10.88% at 16% moisture content. Peak viscosity, trough viscosity, and final viscosity first increased and then decreased, with maximum values observed at 16% moisture content. Scanning electron microscopy revealed that rice flour produced at 16% moisture content had smoother particle surfaces, fewer mechanical scratches, reduced starch granule exposure, and better preservation of native starch granule morphology. For fresh

引文格式:

肖倩, 吴淼源, 廖卢艳, 等. 入磨水分调控下大米粉与鲜湿米线的品质特征[J]. 现代食品科技, 2026, 42(5): 213-222.

XIAO Qian, WU Miaoyuan, LIAO Luyan, et al. Quality characteristics of rice flour and fresh rice noodles under moisture control before milling [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(5): 213-222.

收稿日期: 2025-03-04; 修回日期: 2025-05-15; 接受日期: 2025-05-22

基金项目: 湖南省重点领域研发计划项目 (2019NK2131); 湖南省粮油科技攻关“揭榜挂帅”项目

作者简介: 肖倩 (2000-), 女, 硕士, 研究方向: 粮食深加工, E-mail: 2844485229@qq.com

通讯作者: 吴卫国 (1968-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 粮食深加工及开发利用, E-mail: 1061051403@qq.com; 共同通讯作者: 张喻 (1972-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: skxzhangyu@163.com

rice noodles, hardness, chewiness, and paste viscosity were minimized at 16% moisture content, whereas elasticity and sensory scores were maximized. Overall, optimal quality characteristics of both rice flour and fresh rice noodles were achieved when the moisture content before milling was controlled at 16%. These findings provide a theoretical basis for moisture selection in industrial semi-dry rice milling processes.

Key words: semi-dry milling; moisture content before milling; rice flour; fresh rice noodles

大米是人类生存与发展不可或缺的粮食, 因其口味清淡、产量高、易于储存且富含碳水化合物, 全球约有 60% 的人口将其作为主食^[1]。通过磨制工艺制备的大米粉可进一步加工为多种米制品, 如米饺、米粥、米发糕和鲜湿米线等^[2]。其中, 鲜湿米线因其食用便捷、口感爽滑细腻且质地柔软, 深受消费者青睐。

目前, 大米磨制成粉的方法主要有湿磨、干磨与半干磨三类^[3], 不同磨制方法所制备的大米粉在品质特性上存在显著差异, 且对鲜湿米线的生产应用亦产生不同影响。具体表现为: 湿磨法制备的大米粉具有粒度分布范围窄、破损淀粉含量低以及颗粒细腻等优点, 且能显著提升鲜湿米线的品质; 但生产过程易受微生物污染且产生大量污染环境的废水^[4]。干磨法制备大米粉, 能克服湿磨法的不足, 但由于缺少水分, 机械能和热能会导致大米破损淀粉增多, 进而对鲜湿米线的质量产生不利影响^[5]。相比之下, 半干法产生废水较少, 还能有效减轻淀粉损伤, 同时制得的鲜湿米线品质可与湿磨法相媲美^[6]。因此, 综合考虑环保与品质两个维度, 大米半干磨法展现出良好的产业发展前景。

大米半干法制粉工艺中, 大米的入磨水分是影响大米粉及其制品质量的关键因素之一^[6], 但与此相关的研究报道较少。该研究通过多维度分析方法, 重点探究了大米半干法制粉过程中不同入磨水分(10%、12%、16%、20%、28%)对入磨大米硬度、大米粉质特性(破损淀粉含量、粒度分布、水合、冲调、糊化、流变特性、微观结构)及鲜湿米线品质(蒸煮特性、质构品质、感官评分)的影响, 旨在为工业半干法制粉水分的选择提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

桂朝米(2021年早籼米, 生长周期约110 d, 植株高度约90 cm, 直链淀粉含量22.4%, 蛋白质含量8.1%, 脂肪含量0.4%), 益阳市新强米业有限公司。

1.2 仪器与设备

XTP-500A 高速多功能粉碎机, 永康市太阳红机

电有限公司; GFL-230 恒温干燥箱, 天津莱玻特瑞仪器设备有限公司; TA-XT2i Plus 食品物性测试仪, 英国 Stable Micro Systems 公司; MASTERSIZER 3000 马尔文激光粒度仪, 英国马尔文帕纳科仪器有限责任公司; RVA-3D 快速粘度分析仪, 澳大利亚 Newport 科学仪器公司; AR-2000 动态流变仪, 上海曲晨机电技术有限公司; MZ-SYS28-2B 美的电蒸锅, 广东美的生活电器制造有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 大米磨粉工艺及鲜湿米线制作工艺

1.3.1.1 磨粉工艺流程

参照吴淼源等^[7]的方法。

大米除杂→调质润米(25℃, 5h)→磨粉(转速25 000 r·min⁻¹)→干燥(40℃热风干燥)→过筛→密封保藏

基于预实验结果, 设置大米目标水分分别为10%、12%、16%、20%和28%, 称取适量大米, 按公式(1)加入相应水量, 充分混匀于室温下润米5 h后磨粉, 40℃烘至水分含量10.0%±1.0%并过0.15 mm孔径筛网, 密封保存备用。

$$X = \frac{M \times (W_1 - W_2)}{1 - W_1} \quad (1)$$

式中:

X——加水量, mL;

M——大米质量, g;

W_1 ——目标水分质量分数(湿基), %;

W_2 ——原始水分质量分数(湿基), %。

1.3.1.2 鲜湿米线制作工艺

参照吴淼源等^[8]的方法。

大米粉→加水混匀(粉水质量比为1:1.6)→蒸粉(101.3 kPa, 100℃, 90 s)→冷却(25℃, 10 min)→老化(4℃, 1 h)→切条→成品

1.3.2 大米硬度测定

参照黎秋云等^[9]的方法测定大米硬度。选择TPA模式, 将浸透的米粒置于载物台中心, 选用P35探头, 试验参数为: 测前速度为2 mm·s⁻¹, 测试速度为1 mm·s⁻¹, 测后速度为1 mm·s⁻¹, 压缩形变为75%。

1.3.3 大米粉品质测定

1.3.3.1 粒径及破损淀粉含量测定

使用马尔文激光粒度分析仪测量干粉的粒度分布,选择 D_{50} 表示粒度大小;采用 Megazyme 公司的破损淀粉测定试剂盒(K-SDAM,检测限:0.5 g/100 g)进行破损淀粉含量测定。

1.3.3.2 水合特性测定

参照 Wang 等^[10]的方法测定大米粉的吸水性、水溶性和溶胀性。取 0.1 g 样品,加 20 mL 蒸馏水混匀,在 90 °C 下水浴振荡 30 min,然后 5 000 r/min 离心 20 min。取上清液,105 °C 烘干至恒质量,同时称量湿沉淀物质量。按下式(2)~(4)计算吸水性、水溶性和溶胀性指数。

$$WAI = \frac{m_2}{m_0} \quad (2)$$

$$WSI = \frac{m_1}{m_0} \times 100\% \quad (3)$$

$$SPI = \frac{m_2}{m_0 \times (1 - WSI)} \quad (4)$$

式中:

WAI——吸水性指数, $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$;

WSI——水溶性指数, %;

SPI——溶胀性指数, $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$;

m_0 ——大米粉试样质量, g;

m_1 ——上清液干燥至恒重的质量, g;

m_2 ——湿沉淀质量, g。

1.3.3.3 冲调润湿性

参考张珍林等^[11]的方法,略作修改。准确称取 1.0 g 试样,均匀分布在室温下 100 mL 的纯净水面上,测定样品完全润湿的时间。

1.3.3.4 冲调结块率

参照王乜田等^[12]的方法,略作改动。称取 10 g 样品于烧杯,加 50 mL 蒸馏水搅拌 5 min,用已恒重的 0.85 mm 孔径的标准筛网过滤,将筛上物烘干至恒重。结块率计算见式(5),其数值越大,代表越易结块。

$$R = \frac{m}{M} \times 100\% \quad (5)$$

式中:

R——结块率, %;

m——筛上物烘干至恒重的质量, g;

M——试样质量, g。

1.3.3.5 糊化特性测定

采用快速粘度分析仪(RVA)测定米粉的糊化特性,方法参照《GB/T 24852-2010:大米和米粉糊化特性测定—快速粘度分析法》,固定加水量为 25.0 mL。首先,称取已知水分含量的试样 3.0 g(输入含水量,

程序自动进行质量换算)左右于样品筒中,准确量取 25.0 mL 蒸馏水与样品充分混匀后放入 RVA 仪进行测试。

1.3.3.6 流变特性测定

参考 Zhang 等^[13]的方法,略作修改。取 1.3.3.5 糊化后样品,平板直径选用 40 mm,间隙 1 mm,扫描应变 5%,温度 25 °C,频率 0.1~10 Hz。

1.3.3.7 微观结构测定

参照周葵等^[14]的方法,略有修改。取适量样品经设备喷金,于扫描电镜 5 kV 电子束下分别放大 500 倍和 3 000 倍拍照观察。

1.3.4 鲜湿米线品质测定

1.3.4.1 断条率

参照 Gao 等^[15]的方法,略作改动。取 20 根 15 cm 长的米粉条于 500 mL 沸水中加热 2 min 后捞出沥干,记录长度超过 10 cm 和低于 10 cm 的米粉质量,按下式计算断条率。

$$D = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \times 100\% \quad (6)$$

式中:

D——断条率, %;

m_1 ——长度小于 10 cm 的鲜湿米线质量, g;

m_2 ——长度大于 10 cm 的鲜湿米线质量, g。

1.3.4.2 吐浆值

参考 Gao 等^[16]的方法,稍作修改。首先测定样品水分含量,然后取 15 g 鲜湿米线,放入 500 mL 沸水中煮 2 min,冷却后定容至 500 mL,移取 50 mL 至已恒重的器皿中,再放置于 105 °C 烘箱中烘干至恒重。按下式计算吐浆值。

$$T = \frac{10 \times (m_2 - m_1)}{m_0 \times (1 - W)} \times 100\% \quad (7)$$

式中:

T——吐浆值, %;

W——样品水分含量, %;

m_0 ——样品质量, g;

m_1 ——器皿干燥至恒重的质量, g;

m_2 ——上清液与器皿干燥至恒重的质量, g。

1.3.4.3 质构特性测定

参考 Feng 等^[17]的方法,使用 TTA-XT2i Plus 食品物性测试仪测定鲜湿米线的质构特性。选择 TPA 模式,使用 P/36R 探针针对样品进行全质构分析。试验参数为:测前速度 $2.0 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,测试速度 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,测后速度 $2.0 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,压缩比 50%,两次压缩时间间隔 5 s,触发力 5.0 g。

1.3.4.4 感官评价

参考文献^[18,19]的方法建立鲜湿米线评价标准见表 1,

由 10 名经过专门训练的食品专业研究生或教师（5 男 5 女，年龄在 20~60 岁之间）组成品评小组对米粉进行感官评价，根据表 1 进行打分，结果去除最高分和最低分后取平均值。开始评定前 60 min 内不沾烟酒等刺激性食品，两样品间用清水漱口。

表 1 鲜湿米线感官评价表

Table 1 Sensory evaluation form for fresh rice noodles		
项目/分值	评分标准	得分
结构/25 分	粉条结构紧密，无并条、断条	18~25
	少许并条、断条	10~17
	并条、断条较多	1~9
色泽/25 分	颜色洁白，有光泽，无杂质	18~25
	颜色正常，稍有光泽，略有杂质	10~17
	颜色发黄，无光泽，有明显杂质	1~9
气味/25 分	米香味浓郁，无异味	18~25
	米香味较淡，无异味	10~17
	无米香味，且有异味	1~9
口感/25 分	口感爽滑，不黏牙，硬度适中有嚼劲	18~25
	口感柔软，不黏牙，偏硬或偏软，稍有嚼劲	10~17
	黏牙，口感很硬或很软，无嚼劲	1~9

1.4 数据处理

每组实验至少重复测试三次以上取平均值，结果以“平均值 ± 标准差”表示。使用 SPSS 26.0 进行数据处理，Origin 2024 进行绘图。

2 结果与讨论

2.1 入磨水分对大米硬度的影响

在大米磨粉过程中，受多种机械作用力和热损伤的影响，这些因素与大米的入磨水分及硬度密切相关^[20]。由图 1 可知：随着入磨水分的减少，大米硬度显著增加（ $P<0.05$ ）。28% 水分时，大米硬度最低，为 17.46 N，10% 水分则拥有最高的硬度 53.92 N。这一现象可能归因于水分在淀粉颗粒间充当润滑剂的作用。然而，随着水分的下降，这种润滑效应减弱，导致淀粉颗粒之间摩擦增大，相互挤压并紧密结合，进而使得米粒结构变得更加致密和坚硬^[21]。Ji 等^[22]也发现，较高水分含量可使淀粉颗粒在米粒内部自由移动，从而降低大米硬度。因此，选择合适的入磨水分对大米加工至关重要。

2.2 入磨水分对大米粉破损淀粉和粒径 D_{50} 的影响

破损淀粉是大米加工过程中，因剪切、撞击、碰撞、摩擦等多种机械作用下所产生的淀粉颗粒，通

常破损淀粉含量越多，制备的鲜湿米线品质越差^[23]。从图 2 可知：随着入磨水分的减少，大米粉的破损淀粉含量先平稳后上升。这是由于低水分环境下大米颗粒间摩擦力增强，迫使磨粉设备需要施加更大的作用力以克服阻力，进而增加了机械能和热能，导致淀粉颗粒内部应力增加、脆性增强，更容易在外力作用下发生破裂^[24]。Ngamnikom 等^[25]也报道了类似结果，在半干制粉工艺中实施预湿处理，能显著降低破损淀粉含量。这主要归因于两方面：一是大米吸水充足后变得易于碾碎，从而减轻了淀粉损伤；二是水分吸收了研磨热，减轻了对淀粉的热损伤。 D_{50} 被称为平均粒径，通常用于衡量粉体的粒径大小，与大米磨粉程度和强度密切相关^[26]。由图 2 可知：粒径 D_{50} 与破损淀粉含量的趋势一致。宋昕等^[27]也发现，大米粉的粒径 D_{50} 随调质水分的增加而降低。这一现象可能归因于低水分条件下，粉末颗粒表面的水分减少，导致表面张力和毛细管作用减弱，从而增强了粉末的流动性，使颗粒更容易分散，保持细小的粒度和均匀的分布^[28]。相反，较高的入磨水分会增加粉末的黏性，导致其在磨粉设备中的流动性变差，发生团聚现象^[29]。10% 水分时，大米粉的破损淀粉含量最高（6.49%），粒径最大（121.95 μm ），且入磨水分为 16%~28% 时破损淀粉含量和粒径 D_{50} 无显著差异，表明该范围的入磨水分对大米粉的淀粉损伤和颗粒分布影响较小。

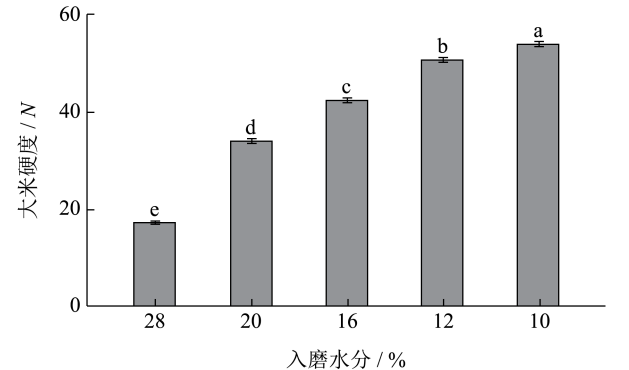


图 1 入磨水分对大米硬度的影响

Fig.1 Influence of moisture content before milling on rice hardness

注：图中不同小写字母表示不同处理间具有显著差异（ $P<0.05$ ），下同。

2.3 入磨水分对大米粉水合特性的影响

水合特性反映了大米淀粉与水 and 蛋白质的结合能力^[30]。如图 3 可知：随着入磨水分的减少，大米粉的吸水性、水溶性、溶胀性呈上升趋势，与吴娜娜等^[31]的研究结果相近。这可能是由于预干燥处理增强了淀粉的糊化和蛋白质的变性，导致淀粉颗粒更容易吸水膨胀，并暴露出更多亲水性基团，从而提高了

大米粉的整体水合能力^[32]。相较于 28% 的入磨水分, 10%~20% 水分范围内制备的大米粉表现出更高的水溶性和溶胀性, 这有利于大米淀粉的充分糊化。

2.4 入磨水分对大米粉冲调特性的影响

冲调特性是评价粉体冲调性能的重要指标, 通常使用润湿性、结块率进行评估。润湿性反映了大米粉与水接触后的润湿速度和下沉性能, 结块率则衡量了大米粉在水中溶解后的分散性能^[33]。如图 4 可知: 随着入磨水分的减少, 大米粉的润湿性显著下降 ($P<0.05$), 即冲调时间缩短。这可能是由于水分减少导致大米粉在磨粉过程中比表面积增加, 粉体表面分子间的范德华力和静电力增强, 进而增强了粉体颗粒间的吸附力和表面聚合力, 缩短了冲调时间^[34]。然而, 随着入磨水分的减少, 大米粉的结块率先下降后上升, 入磨水分为 16% 时大米粉的结块率最低。这可能是由于较大的比表面积促进了水分的快速渗透, 从而减少了结块现象。然而, 较少的入磨水分也会影响大米粉的粒径分布, 导致大米粉与水接触后易形成难溶解的表面薄层, 进而形成不易下沉的块状物, 增加了结块率^[34]。因此, 在大米加工过程中, 建议选择 16% 的入磨水分, 有利于改善大米粉黏附于设备的问题, 提高粉末的流动性和分散性。

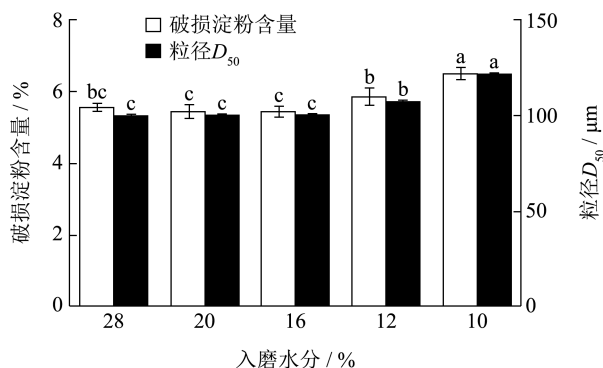


图 2 入磨水分对大米粉破损淀粉及粒径 D_{50} 的影响

Fig.2 Impact of moisture content before milling on damaged starch and particle size D_{50} of rice flour

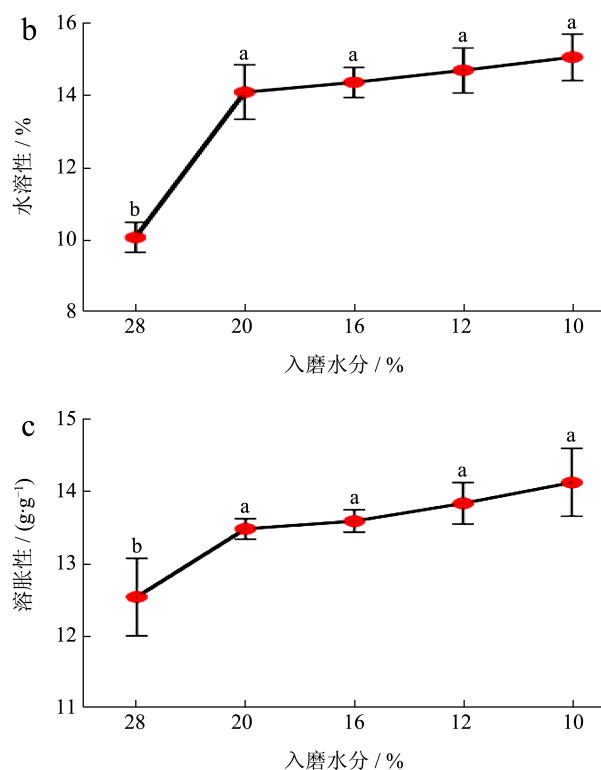
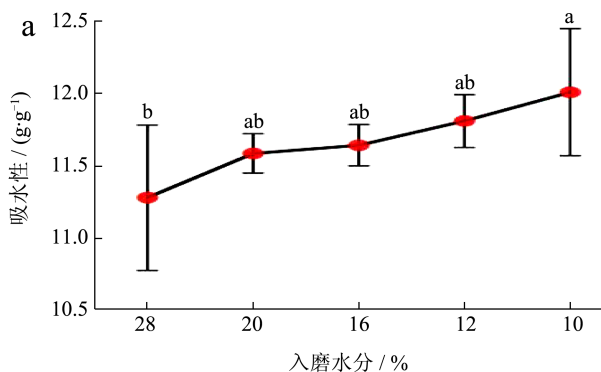


图 3 入磨水分对大米粉水合特性的影响

Fig.3 Impact of moisture content before milling on the hydration properties of rice flour

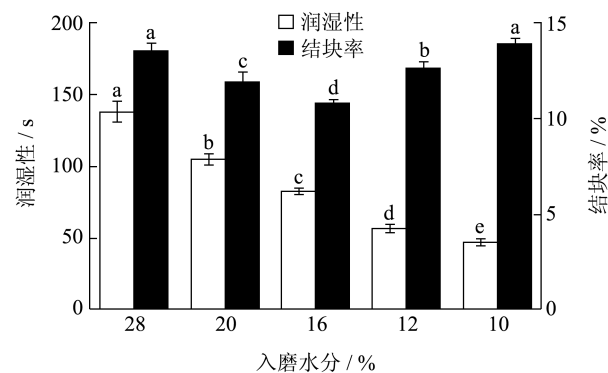


图 4 入磨水分对大米粉冲调特性的影响

Fig.4 Impact of moisture content before milling on the reconstitution properties of rice flour

2.5 入磨水分对大米粉糊化特性的影响

糊化特性反映了大米淀粉在水和热共同作用下淀粉微晶束熔解的过程^[35]。其中, 峰值黏度、谷值黏度、最终黏度分别反映了淀粉与水的结合能力^[36]、抗剪切能力^[37]及凝胶形成能力^[38]。根据表 2 可知: 随着入磨水分的减少, 大米粉的峰值黏度、谷值黏度、最终黏度先上升后下降, 入磨水分为 16% 时, 3 种黏度均达到最大值, 分别为 3 654.33、2 804.00 和 4 827.67 cP。这可能是由于较高的水分在磨粉过程中保护了淀粉颗

粒的完整性,进而提升了大米粉的抗剪切能力,保持了较高的糊化黏度。然而,随着水分含量的减少,破损淀粉含量逐渐增加,导致大米粉不易形成凝胶结构,进而使糊化黏度降低。此外,不同入磨水分制备的大米粉回生值无显著差异,表明入磨水分对大米粉糊化冷却后的回生性能影响不大^[39]。综上所述,采用入磨水分 16% 的大米有利于大米粉的糊化和鲜湿米线的制备。

2.6 入磨水分对大米粉流变特性的影响

流变特性反映大米粉在不同水分和温度下的流变行为,通常弹性模量 G' 较小、粘性模量 G'' 较大的米粉糊在加工过程中质地较硬,食用口感较差^[40]。如图 5 可知:在相同频率下,不同入磨水分制备的大米粉糊在粘弹性上存在较大差异,表现为 G' 大于 G'' ,说明这些米粉糊仍保持原有的凝胶特性,属于软凝胶^[41]。入磨水分在 12%~28% 范围内制备的米粉糊表现出较高弹性和较低黏性,而在 10% 时则表现出相反现象。这可能是由于淀粉分子间氢键的重新排列增强了分子间的相互作用,使淀粉颗粒在应力作用下能够更好地储存能量,进而表现出更高的弹性^[42]。然而,较小的粒度也会导致破损淀粉含量的增加,破损淀粉通过吸水膨胀使得支链淀粉部分溶解,进而增加了米粉糊的黏度^[43]。此外,入磨水分在 10% 制备的大米粉 $\tan\delta$ 较大,说明米粉糊具有较高的粘性,可能是由于米粉糊化过程中自由水较多,从而表现出较强的流动性^[44]。而在 16%~20% 范围制备的米粉糊 $\tan\delta$ 较小,表明米粉糊的弹性较大,凝胶状网络结构更稳定,更有利于鲜湿米线的生产。

2.7 入磨水分对大米粉微观结构的影响

如图 6 所示,不同入磨水分对大米粉的微观结构影响较大。在 500 倍放大倍数下,随着入磨水分的减少,大米粉的颗粒逐渐减小,大块的聚集体被破碎成小块状和细小颗粒。其中,入磨水分为 10% 制备的大米粉颗粒分布较为稀疏,边缘有较多角部和尖端;而入磨水分 28% 的颗粒则排列更密集,且颗粒边缘完整。这是因为水分对大米粉颗粒具有软化和塑形作用。高水分使颗粒更容易塑形,边缘完整;低水分使颗粒更易破碎,边缘有角部和尖端^[45]。在 3 000 倍放大倍数下观察发现,入磨水分减少会导致大米粉颗粒外层的小碎片增多,淀粉颗粒逐渐暴露于颗粒表面,表面刮

痕、凹痕更为明显。这表明入磨水分的减少会导致磨粉过程中机械作用力增加,颗粒损伤加剧。其中,当入磨水分为 10% 时制备大米粉的表面颗粒暴露最多,入磨水分为 20% 则相反;相比之下,入磨水分为 16% 时,大米粉颗粒表面光滑、刮痕及淀粉颗粒暴露较少,较好地保留了原始淀粉颗粒形貌特征。Wang 等^[46]的研究揭示了类似的结果,随调质水分的增加,大米粉颗粒的外观更光滑圆润,可见大米粉颗粒的表面粗糙程度与水分含量呈负相关,即水分越少,表面越显粗糙。

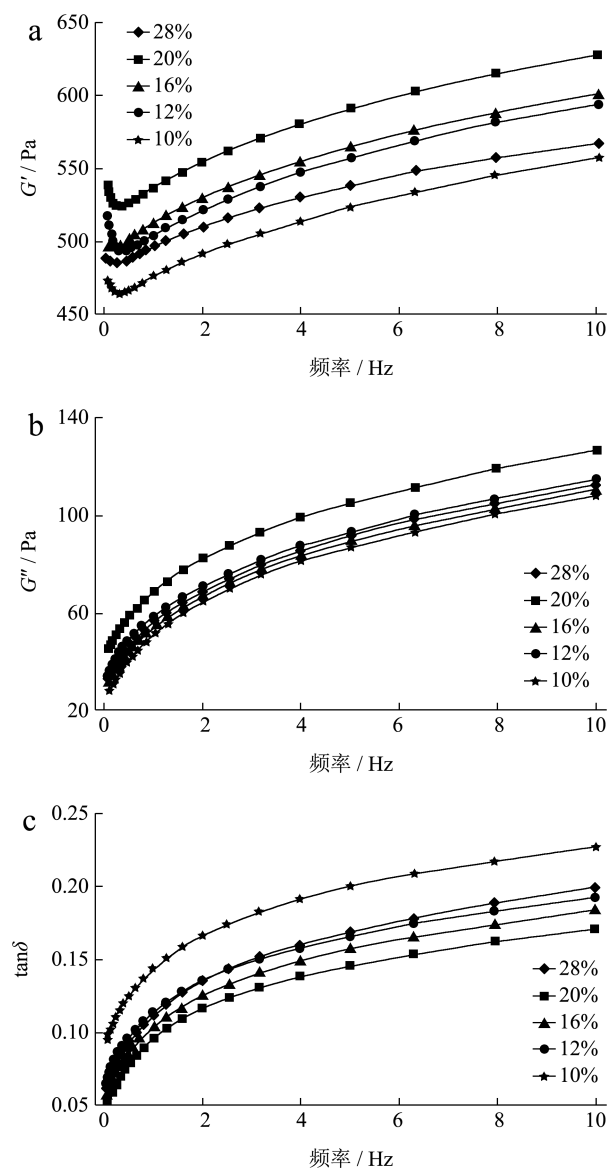


图 5 入磨水分对大米粉流变特性的影响

Fig.5 Impact of moisture content before milling on the rheological properties of rice flour

表 2 入磨水分对大米粉糊化特性的影响

Table 2 Impact of moisture content before milling on the gelatinization properties of rice flour						
入磨水分/%	峰值黏度/cP	谷值黏度/cP	衰减值/cP	最终黏度/cP	回生值/cP	糊化温度/℃
28	3 488.33 ± 66.53 ^{bc}	2 734.33 ± 95.45 ^a	754.00 ± 70.77 ^{ab}	4 744.33 ± 100.06 ^{ab}	2 010.00 ± 43.51 ^a	80.23 ± 0.08 ^b
20	3 521.67 ± 34.15 ^{bc}	2 800.00 ± 57.51 ^a	675.67 ± 71.28 ^b	4 821.67 ± 58.11 ^a	2 095.67 ± 35.84 ^a	81.12 ± 0.51 ^a
16	3 654.33 ± 24.91 ^a	2 804.00 ± 37.24 ^a	850.33 ± 49.24 ^a	4 827.67 ± 61.60 ^a	2 023.67 ± 65.58 ^a	81.55 ± 0.23 ^a
12	3 587.00 ± 72.38 ^{ab}	2 729.00 ± 70.70 ^a	848.00 ± 41.68 ^a	4 817.00 ± 41.94 ^a	2 128.00 ± 96.91 ^a	81.43 ± 0.46 ^a
10	3 432.67 ± 53.58 ^c	2 564.00 ± 69.46 ^b	868.67 ± 100.20 ^a	4 693.67 ± 30.89 ^b	2 129.67 ± 40.86 ^a	81.47 ± 0.45 ^a

注：数据采用 Duncan 法进行显著性差异分析，同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异（ $P<0.05$ ），表 3 同。

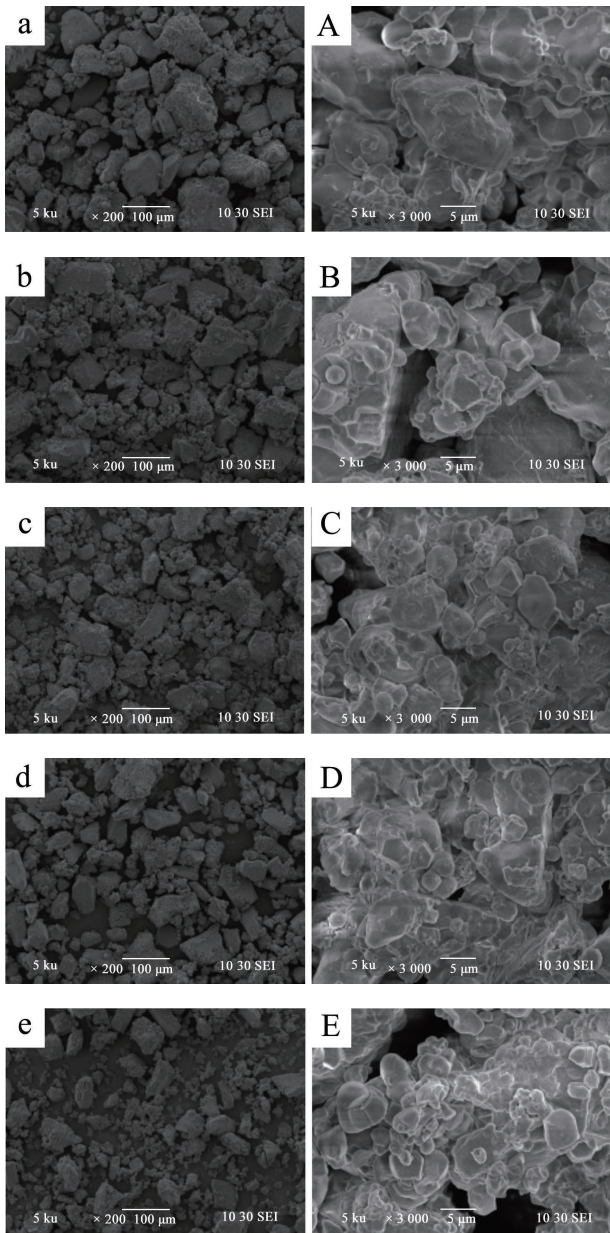


图 6 大米粉扫描电镜图

Fig.6 Scanning electron microscope image of rice flour

注：a~e 依次为入磨水分分别为 28%、20%、16%、12%、10% 制备的大米粉放大 500 倍观察图；A~E 依次为大米粉放大 3 000 倍观察图。

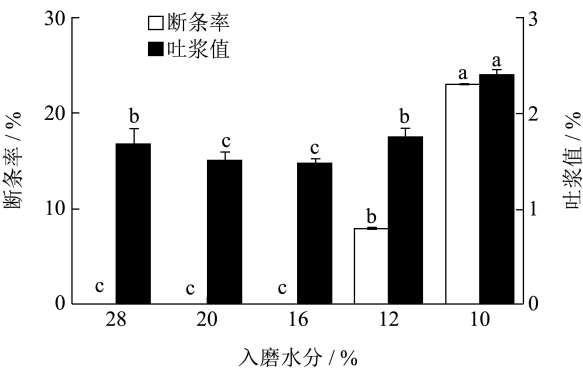


图 7 入磨水分对鲜湿米线蒸煮特性的影响

Fig.7 Impact of moisture content before milling on the cooking properties of fresh rice noodles

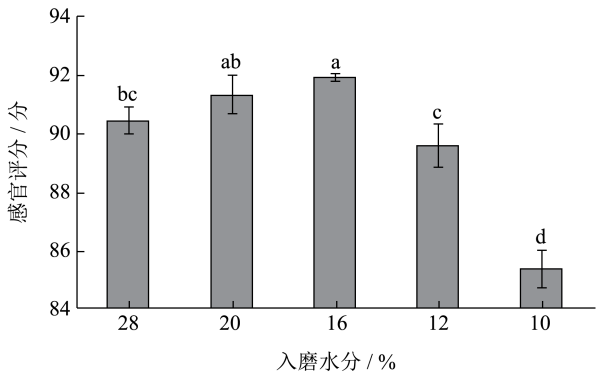


图 8 入磨水分对鲜湿米线感官评分的影响

Fig.8 Impact of moisture content before milling on the sensory scores of fresh rice noodles

2.8 入磨水分对鲜湿米线品质的影响

断条率和吐浆值是评估鲜湿米线蒸煮品质的重要指标，通常鲜湿米线的断条率和吐浆值越低，其感官品质和食用口感越佳^[47]。如图 7 所示，随着入磨水分的减少，鲜湿米线的断条率先平稳后上升。在入磨水分为 16%~28% 时，未出现断条现象，而低于 16% 后，鲜湿米线的断条率显著上升（ $P<0.05$ ），且在 10% 水分时断条率达到最大值 23.33%。这可能与较低入磨水分所产生的破损淀粉有关，较多的破损淀粉影响了糊化过程中淀粉分子间的网络结构，导致其凝胶强度降

低，进而容易发生断条^[48]。破损淀粉分子发生降解，产生可溶性的小分子片段并扩展了无定形区域，在鲜湿米粉煮制过程中，更多的淀粉颗粒及降解产物溶出，最终导致鲜湿米粉的断条率增加^[49]。然而，随着入磨水分的减少，鲜湿米线的吐浆值先降后升，入磨水分16%时鲜湿米线的吐浆值最低（1.47%）。这可能是因为较多的破损淀粉会导致其糊化不完全，从而在蒸煮过程中渗出较多淀粉，吐浆值增加^[47]。此外，鲜湿米线的感官评分先上升后下降，入磨水分16%时鲜湿米线的食用品质和感官品质最佳（见图7及图8）。综上所述，入磨水分为16%的大米制备的鲜湿米线具有较好的蒸煮品质和感官品质。吴娜娜等^[50]也指出，破损淀粉含量高不利于米线内部连续且致密结构的形成，因此破损淀粉含量越高，米线的蒸煮断条率也越高。

质构仪是模拟人体口腔咀嚼过程的仪器，通过质构特性可以评估鲜湿米线的食用口感^[51]。通常优质的鲜湿米线具有较低的硬度和黏性，结构紧密，富有弹性^[19]。如表3可知，随着入磨水分的减少，鲜湿米线

的硬度、咀嚼性呈先降后升的趋势，入磨水分为16%时鲜湿米线的硬度和咀嚼性最低。这一现象可能与大米粉的冲调性能有关，入磨水分的减少导致大米粉的润湿性和结块率降低，加快了大米粉的降沉和分散，促进了淀粉颗粒的糊化，进而降低了鲜湿米线的硬度和咀嚼性^[34]。然而，当入磨水分进一步减少时，大米粉的结块率增加，这阻碍了淀粉的糊化，导致冷却回生后鲜湿米线的硬度和咀嚼性上升。相反，随着入磨水分的减少，鲜湿米线的弹性先上升后下降，入磨水分为16%时鲜湿米线的弹性最优。这可能是由于入磨水分的减少提高了大米粉的冲调性能，增强了淀粉颗粒的糊化过程，使得鲜湿米线的凝胶网络结构更加紧密，进而提高了弹性^[52]。然而，结块率增加也会导致淀粉糊化不完全，形成的凝胶结构较为松散，进而降低了弹性。此外，随着入磨水分的减少，鲜湿米线的黏附性呈上升趋势，且10%水分较28%水分增加了60.56%，这可能与不同入磨水分产生的破损淀粉含量有关^[53]。综上，在实际生产过程中，建议采用入磨水分16%的大米生产鲜湿米线较为合理。

表 3 入磨水分对鲜湿米线质构特性的影响

Table 3 Impact of moisture content before milling on the textural properties of fresh rice noodles					
入磨水分/%	硬度/g	黏附性/(g·s)	弹性	内聚性	咀嚼性/g
28	7 687.20 ± 57.06 ^{ab}	106.72 ± 12.47 ^b	0.90 ± 0.03 ^{ab}	0.69 ± 0.02 ^a	4 509.65 ± 59.17 ^{ab}
20	6 805.93 ± 259.22 ^b	124.10 ± 9.77 ^b	0.91 ± 0.01 ^a	0.57 ± 0.01 ^{bc}	4 229.26 ± 82.78 ^d
16	6 786.75 ± 184.47 ^c	138.09 ± 15.75 ^{ab}	0.92 ± 0.02 ^a	0.60 ± 0.02 ^b	4 160.10 ± 218.33 ^{cd}
12	7 531.73 ± 115.09 ^c	167.28 ± 21.43 ^a	0.88 ± 0.01 ^{bc}	0.57 ± 0.02 ^c	4 377.87 ± 63.25 ^{bc}
10	7 952.59 ± 115.24 ^a	171.35 ± 27.25 ^a	0.87 ± 0.01 ^c	0.55 ± 0.01 ^c	4 680.22 ± 148.14 ^a

3 结论

该研究以早籼米为原料，采用半干法制粉，系统探究了入磨水分对大米粉质特性及鲜湿米线品质的影响。结果表明，入磨水分显著影响大米粉及其鲜湿米线的品质，并且以16%水分为调控品质的关键临界点。在鲜湿米线品质方面，当入磨水分为16%时，米线的吐浆值、硬度和咀嚼性最低，感官评分最高，整体品质最优。聚焦于大米粉特性，此水分条件下，其水合特性表现优异，即冲调时间缩短，同时结块率最低。此外，大米粉的糊化特性（峰值、谷值及最终黏度）在16%水分时达到峰值，此时糊化体系tanδ值较低，弹性模量显著提升，凝胶网络结构稳定性也得以增强，这赋予大米粉更优的加工特性，进而提高了鲜湿米线的品质。与此同时，扫描电镜观察显示16%水分下，大米粉颗粒表面光滑，较好地保持了原始淀粉

的颗粒形貌，从微观层面佐证了上述结论。该研究首次从宏观及微观两个层面探究并明确16%入磨水分对大米粉及其鲜湿米线品质形成的作用机制，但仅针对特定产地早籼米，后续可结合不同品种原料及磨粉温度、时间等工艺参数，进一步验证结论普适性。综上，该研究为工业半干法磨粉入磨水分参数的选择提供了重要的理论依据。

参考文献

[1] TIAN Y, DING L, LIU Y, et al. The effect of different milling methods on the physicochemical and *in vitro* digestibility of rice flour [J]. Foods, 2023, 12(16): 3099.

[2] 郭翎菲.不同处理方式对鲜湿米粉品质的影响[J].粮食与油脂, 2021,34(10):19-22.

[3] 梁钦梅,程子良,王福,等.不同磨粉工艺对大米粉及鲜湿米粉品质的影响[J].食品工业,2024,45(3):30-34.

[4] WU T, WANG L, LI Y, et al. Effect of milling methods on the

- properties of rice flour and gluten-free rice bread [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 108: 137-144.
- [5] 陈洁,李琳,蔡永艳,等.磨粉工艺对大米粉品质特性影响[J].*食品工业*,2019,40(1):105-107.
- [6] TONG L T, GAO X, LIN L, et al. Effects of semidry flour milling on the quality attributes of rice flour and rice noodles in China [J]. *Journal of Cereal Science*, 2015, 62: 45-49.
- [7] 吴淼源,廖卢艳,任贤龙,等.粒度和磨粉工艺对大米粉及其鲜湿米粉品质的影响[J].*粮食与油脂*,2025,38(4):13-20.
- [8] 吴淼源,廖卢艳,任贤龙,等.基于多元统计分析方法构建鲜湿米粉专用粉评价体系[J].*食品工业科技*,2025,46(9):307-316.
- [9] 黎秋云,李森,管骁,等.真空联合超声对大米吸水性和蒸饭特性的影响[J].*食品与生物技术学报*,2020,39(12):42-48.
- [10] WANG G, YAN X, WANG B, et al. Effects of milling methods on the properties of rice flour and steamed rice cakes [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 167: 113848.
- [11] 张珍林,周子旋,王茹雪,等.铁皮石斛花食疗代餐粉的研制及其冲调性研究[J].*皖西学院学报*,2021,37(5):63-67.
- [12] 王乜田,黄婉茹,雷君,等.紫薯代餐粉的研制及其冲调性研究[J].*现代食品*, 2017,22:103-107.
- [13] ZHANG R, WANG Z, HE X, et al. Effects of sweet potato starch on the physicochemical properties and edible qualities of instant fresh rice noodles [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 286: 138553.
- [14] 周葵,洪雁,梁尚云,等.富硒大米粉预糊化及其复配代餐粉的研制[J].*食品与发酵工业*,2021,47(1):186-192.
- [15] GAO L, GUAN M, QIN Y, et al. Utilization of heat-induced curdian gel to improve the cooking qualities of thermally sterilized fresh rice noodles [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 262: 129693.
- [16] GAO L, XU Z, ZHANG R, et al. Effects of erythritol on rheological properties of rice flour and structural characteristics of extruded dried rice noodles with rapid rehydration behaviors [J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 144: 109007.
- [17] FENG H, LI T, ZHOU Y, et al. Effect of rice bran and retrograded time on the qualities of brown rice noodles: edible quality, microstructure, and moisture migration [J]. *Foods*, 2023, 12(24): 4509.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] ASMEDA R, NOORLAILA A, NORZIAH M H. Relationships of damaged starch granules and particle size distribution with pasting and thermal profiles of milled MR263 rice flour [J]. *Food Chemistry*, 2016, 191: 45-51.
- [21] WANI A A, SINGH P, SHAH M A, et al. Rice starch diversity: Effects on structural, morphological, thermal, and physicochemical properties-A review [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2012, 11(5): 417-436.
- [22] JI L, ZHANG H, CORNACCHIA L, et al. Effect of gelatinization and swelling degree on the lubrication behavior of starch suspensions [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 291: 119523.
- [23] 蔺泽雪,秦婉瑜,耿栋辉,等.半干法磨粉过程中水分变化对糯米粉品质的调控机制[J].*中国食品学报*,2021,21(7):208-215.
- [24] GAO W, CHEN F, WANG X, et al. Recent advances in processing food powders by using superfine grinding techniques: A review [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19(4): 2222-2255.
- [25] NGAMNIKOM P, SONGSERMPONG S. The effects of freeze, dry, and wet grinding processes on rice flour properties and their energy consumption [J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 104(4): 632-638.
- [26] QIN W, LIN Z, WANG A, et al. Influence of damaged starch on the properties of rice flour and quality attributes of gluten-free rice bread [J]. *Journal of Cereal Science*, 2021, 101: 103296.
- [27] 宋昕,冯伟,王涛,等.不同制粉方式对米粉粉质和鲜湿米线品质的影响[J].*粮油食品科技*,2024,32(5):42-50.
- [28] KIAN-POUR N, OZMEN D, TOKER O S. Modification of food powders [J]. *Food Powders Properties and Characterization*, 2021: 125-153.
- [29] ChIPAKWE V, SEMSARI P, KARLKVIST T, et al. A critical review on the mechanisms of chemical additives used in grinding and their effects on the downstream processes [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(4): 8148-8162.
- [30] DONMEZ D, PINHO L, PATEL B, et al. Characterization of starch-water interactions and their effects on two key functional properties: Starch gelatinization and retrogradation [J]. *Current Opinion in Food Science*, 2021, 39: 103-109.
- [31] 吴娜娜,彭国泰,谭斌,等.干法、半干法和湿法磨粉对糙米粉性质的影响[J].*中国粮油学报*,2020,35(1):137-142.
- [32] JIAMYANGYUEN S, WICHAPHON J, BOONMEEJOY J. Classification of rice cultivars by using chemical, physicochemical, thermal, hydration properties, and cooking quality [J]. *Food and Applied Bioscience Journal*, 2019, 7(2): 42-62.
- [33] 赵红霞,王应强,何佳昕,等.干燥方法对速食薏米粉干燥特性与品质的影响[J].*食品工业科技*,2020,41(13):22-26.
- [34] ANDO Y, NEI D. Comparison of potato void structures dried by air-drying, freeze-drying, and microwave-vacuum-drying, and the physical properties of powders after grinding [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2023, 16(2): 447-458.
- [35] WU C, GONG X, ZHANG J, et al. Effect of rice protein on the gelatinization and retrogradation properties of rice starch [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 242: 125061.
- [36] ZHANG W D, WANG G, WEN P W, et al. Effect of purple red rice bran anthocyanins on pasting, rheological and gelling properties of rice starch [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 247: 125689.
- [37] HUANG J H, WANG Z, FAN L, et al. A review of wheat starch analyses: Methods, techniques, structure and function [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 203: 130-142.
- [38] YANG Y, WU N, ZHANG C, et al. Effect of addition of soybean protein isolate on the retrogradation of rice starch [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2024, 59(4): 2446-2457.

- [39] WANG Y, CHEN L, YANG T Y, et al. A review of structural transformations and properties changes in starch during thermal processing of foods [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 113: 106543.
- [40] HU W X, CHEN J, XU F, et al. Study on crystalline, gelatinization and rheological properties of japonica rice flour as affected by starch fine structure [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 148: 1232-1241.
- [41] JIANG J, LI J, HAN W, et al. Effects of reheating methods on rheological and textural characteristics of rice starch with different gelatinization degrees [J]. Foods, 2022, 11(21): 3314.
- [42] CHENG Y, LIANG K X, CHEN Y F, et al. Effect of molecular structure changes during starch gelatinization on its rheological and 3D printing properties [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 137: 108364.
- [43] 樊红秀,李艳霞,刘婷婷,等.挤出处理对玉米粉流变及其成膜特性的影响[J].食品科学,2021,42(15):89-98.
- [44] BHINDER S, KAUR A, SINGH B, et al. Proximate composition, amino acid profile, pasting and process characteristics of flour from different Tartary buckwheat varieties [J]. Food Research International, 2020, 130: 108946.
- [45] RONIE M E, HASMADI M. Factors affecting the properties of rice flour: a review [J]. Food Res, 2022, 6(6): 1-12.
- [46] WANG L, GUO M, ZHANG Y, et al. Effects of soaking treatment on water distribution of rice grains, starch characteristics and eating quality of wet rice noodles [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 278: 134621.
- [47] 成林梢,梁钦梅,姚镇江,等.米粉品质评价及生产研究现状及展望[J].粮油食品科技,2022,30(6):71-79.
- [48] LI C M, YOU Y X, CHEN D, et al. A systematic review of rice noodles: Raw material, processing method and quality improvement [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 107: 389-400.
- [49] 梁钦梅.磨粉工艺对大米粉性质及米粉制品品质的影响[D].南宁:广西大学,2024.
- [50] 吴娜娜,彭国泰,谭斌,等.干法、半干法和湿法磨粉对糙米粉性质的影响[J].中国粮油学报,2020,35(1):137-142.
- [51] 靳志强,白变霞,赵晋峰,等.半干法磨制对小米粉及面条品质特性的影响[J].食品科学,2018,39(15):132-138.
- [52] ZHANG J, YOU Y, LI C, et al. The modulatory roles and regulatory strategy of starch in the textural and rehydration attributes of dried noodle products [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(16): 5551-5567.
- [53] HEO S, LEE S M, SHIM J H, et al. 2013. Effect of dry- and wet-milled rice flours on the quality attributes of gluten-free dough and noodles [J]. Journal of Food Engineering, 2013, 116(1): 213-217.