DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260316009
引用格式: 钟立煌, 朱利昀, 朱荣业, 等. 黑米粉丝新型制备工艺及其品质分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(16): 111–118.
Zhong Lihuang, Zhu Liyun, Zhu Rongye, et al. Novel processing technology and quality analysis of black rice vermicelli [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(16): 111–118. (in Chinese with English abstract).

黑米粉丝新型制备工艺及其品质分析

钟立煌[1], 朱利昀[2], 朱荣业[2], 唐小俊[1], 叶飞然[2], 李 萍[1], 赵志浩[1], 刘 光[1*]

(1. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所/农业农村部功能食品重点实验室/广东省农产品加工重点实验室, 广州 510610; 2. 河源市米粉产业技术研究院, 河源 517000)

摘 要: 目的 探讨并优化一种黑米粉丝新型制备工艺, 分析工艺优化前后黑米粉丝蒸煮品质、糊化特性和体外消化特性的变化。**方法** 以花色苷溶出值和断条率为评价指标, 采用单因素实验优化黑米粉丝制备工艺。通过测定黑米粉丝的断条率、蒸煮损失率、花色苷溶出值、淀粉体外消化特性、糊化特性以及微观结构, 评价该优化工艺对黑米粉丝品质的影响。**结果** 黑米粉丝最优制备工艺为: 磨粉机结合胶体磨粉碎、水分含量 40%、挤丝温度 95 ℃、螺杆转速 8 r/s、老化时间 12 h、干燥温度 25 ℃。最适工艺条件下的黑米粉丝蒸煮损失率、断条率和花色苷溶出值分别下降了 39.36%、95.17%和 52.94%, 黑米粉丝蒸煮品质显著提高。同时, 优化工艺提高了黑米粉丝峰值黏度(965.67 mPa•s)、最低黏度(830.33 mPa•s)和最终黏度(1468.67 mPa•s), 降低了崩解值(135.67 mPa•s)和回生值(631.67 mPa•s)。除此之外, 优化后黑米粉丝破损淀粉含量增加, 但快消化、慢消化和抗性淀粉含量无显著性变化(P>0.05), 估算血糖生成指数(estimated glycemic index, eGI)值为 79.09; 黑米粉丝微观结构表面的小孔显著减少。**结论** 基于本研究建立的新型制备工艺, 黑米粉丝的蒸煮品质得到改善, 花色苷溶出程度降低, 淀粉糊化特性发生调控, 但其体外消化特性无明显变化。研究结果为黑米粉丝的实际生产提供了技术指导。

关键词: 黑米粉丝; 磨粉机结合胶体磨; 花色苷; 蒸煮品质; 糊化特性; 淀粉体外消化特性
中图分类号: TS213.3 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)16–0111–08

Novel processing technology and quality analysis of black rice vermicelli

ZHONG Li-Huang[1], ZHU Li-Yun[2], ZHU Rong-Ye[2], TANG Xiao-Jun[1], YE Fei-Ran[2], LI Ping[1], ZHAO Zhi-Hao[1], LIU Guang[1*]

(1. *Sericultural & Agri-food Research Institute*, *Guangdong Academy of Agricultural Sciences*/*Key Laboratory of Functional Foods*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*/*Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing*, *Guangzhou* 510610, *China*; 2. *Heyuan Rice Noodle Industry Technology Research Institute*, *Heyuan* 517000, *China*)

收稿日期: 2026-03-16
基金项目: 粤东粤西粤北地区人才发展帮扶计划项目[河财行(2025)52 号, 2026(17)号]; 广东省现代农业产业共性关键技术研发创新团队建设项目(2026CXTD16, 2026CXTD05); 广东省农业科学院高水平农科院建设项目(NYQS202604, R2023PY-JX018)); 广东省农业科学院创新基金产业专项([2023]390-202312); 2025—2026 年度广东省科协青年科技人才培育计划项目(SKXRC2025480)
第一作者: 钟立煌(1993—), 女, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为农产品加工。E-mail: zhonglihuang1993@163.com
***通信作者:** 刘光(1988—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为粮食加工与功能食品。E-mail: liuguang@gdaas.cn

ABSTRACT: Objective To explore and optimize a novel preparation process of black rice vermicelli and to systematically analyze the changes in cooking quality, texture characteristics and *in vitro* starch digestion characteristics of the vermicelli before and after process optimization. **Methods** Preparation parameters were optimized via single-factor experiments, using anthocyanin leaching value and breakage rate as evaluation indicators. The breakage rate, cooking loss rate, anthocyanin leaching value, *in vitro* starch digestion characteristics, texture properties and microstructure of black rice vermicelli were measured to evaluate the impact of the optimized process on product quality. **Results** The optimal preparation conditions were determined as follows: grinding using a combination of a pulverizer and a colloid mill, moisture content of 40%, extrusion temperature of 95 ℃, screw speed of 8 r/s, aging time of 12 h and drying temperature of 25 ℃. Under these conditions, the cooking loss rate, breakage rate and anthocyanin leaching value decreased by 39.36%, 95.17% and 52.94%, respectively, and the cooking quality was significantly improved. Moreover, the optimized vermicelli exhibited increased peak viscosity (965.67 mPa•s), trough viscosity (830.33 mPa•s) and final viscosity (1468.67 mPa•s), while breakdown (135.67 mPa•s) and setback (631.67 mPa•s) were reduced. Furthermore, the content of damaged starch in the optimized black rice vermicelli increased, but there were no significant changes in the content of rapidly digestible starch, slowly digestible starch and resistant starch (P>0.05). The estimated glycemic index (eGI) was 79.09. Microstructural analysis revealed a significant reduction in surface pores of the optimized vermicelli. **Conclusion** Based on the novel preparation process established in this study, the cooking quality of black rice vermicelli has been improved, the anthocyanin dissolution rate has decreased, and the texture properties have been regulated, but there is no significant change in its *in vitro* starch digestion characteristics. The research results provide technical guidance for the actual production of black rice vermicelli.

KEY WORDS: black rice vermicelli; pulverizer combined with colloid mill; anthocyanin; cooking qualities; texture properties; *in vitro* starch digestion characteristics

0 引 言

米粉丝是我国南方地区主要主食之一，传统的米粉丝加工方法是将大米浸泡磨浆后，经蒸粉、压榨等工序制成[1]。传统方法制得米粉丝品质较好，但加工过程耗水耗能较大，且易引发与水相关的污染问题[2]，因此近几年业内开始对米粉丝加工过程中磨粉方法进行研究。目前常用的磨粉方法包括干法、半干法和湿法，Tong 等[3]对比了这 3 种方法对鲜湿米粉的品质影响，发现半干法大米粉破损淀粉含量以及制得的米粉丝品质与湿磨法相当；杨艾迪等[4]发现，水磨结合干磨制粉的方法较单一的磨粉能提高米粉丝蒸煮品质，同时还减少了耗能。

黑米富含花色苷[5]、膳食纤维及米糠等多种活性成分[6]，具有抗氧化[7]、降血脂[8−9]、抗炎、抑制肿瘤生成[10]等生理功能，已广泛作为功能性食品原料应用于各类产品中。然而，以黑米为主要原料加工成的黑米粉丝在市场上比较少见，主要归因于黑米米皮花色苷类物质易溶于汤中而流失，且米皮中粗纤维含量较高，普通粉碎工艺难以将其充分细化，导致制备的粉丝易断条、口感粗糙。因此，探寻降低黑米粉丝花色苷类物质流失的工艺和技术条件，对提高黑米粉丝的保健功能和食用品质，促进黑米资源的开发利用具有重要意义。

目前，针对黑米粉丝断条率高、花色苷类物质易流失等问题，研究多聚焦在工艺优化[11]或添加辅料，如各类淀粉[12]、食用胶[13]等方面，但针对黑米米皮分离粉碎的研究鲜有报道。该研究将黑米米皮分离，采用磨粉机结合胶体磨进行粉碎，以花色苷溶出程度和断条率为评价指标，采用单因素实验优化黑米粉丝制备工艺。通过考察优化后黑米粉丝的断条率、蒸煮损失率、花色苷溶出、淀粉体外消化特性、糊化特性以及微观结构，评价该优化工艺对黑米粉丝蒸煮品质和体外消化特性影响，为黑米粉丝加工提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料和试剂

市售黑米，产地：辽宁；市售黑米粉丝，产地：江西。

淀粉葡萄糖苷酶(≥260 U/mL)、胰脂肪酶(≥8×USP)(美国 Sigma Aldrich 公司)；破损淀粉检测试剂盒(K-SDAM-220A)、*D*-葡萄糖检测试剂盒(K-GLUC-660A)(氧化酶试剂法，爱尔兰 Megazyme 公司)；硫酸、乙酸钠、冰醋酸、氯化钙、氢氧化钠、无水乙醇(分析纯，国药集团化学试剂有限公司)。

1.2 仪器与设备

JD500A 多用途鲜米机(山东卡琪诺机械科技有限公

司); JMS-50 胶体磨[嘉德益海机械制造(天津)有限公司]; MF-60 多功能米粉机(广东穗华机械设备有限公司); Tecan GENios 酶标仪(瑞士 Tecan 有限公司); Starch Master2 型 RVA 快速黏度仪(瑞典 Perten 公司); S-3400N-II 扫描电子显微镜(日本日立公司); UV-5100 紫外-可见分光光度计(上海元析仪器有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 样品粉碎

直接粉碎(directly pulverize, DP): 将黑米加入磨粉机进行粉碎, 根据实验需要分别粉碎 1、3、5 次, 然后过 100 目筛后得到直接粉碎的黑米, 分别命名为 DP-1、DP-2、DP-3。

磨粉机结合胶体磨进行粉碎(pulverize and colloid mill, PACM): 将黑米用多用途鲜米机按研磨率 10%碾白, 分别收集白米和黑米米皮用磨粉机粉碎后过 100 目, 备用。取过筛后的黑米米皮添加适量的水后用胶体磨碾磨 1、2、3 次。过筛后的白米粉和米皮碾磨液混匀, 得到磨粉机结合胶体磨粉碎的黑米粉, 分别命名为 PACM-1、PACM-2、PACM-3。

1.3.2 黑米粉丝制备工艺

将黑米粉与适量的水混合均匀, 倒入提前预热的 MF-60 多功能米粉机, 设定好螺杆转速后挤出黑米粉丝, 并按 30 cm 的长度切割, 室温老化后进行干燥, 即可得到黑米粉丝。取部分黑米粉丝粉碎后过 100 目筛, 于 4 ℃贮藏备用。

1.3.3 单因素实验

结合前期预实验结果, 将 PACM、水分含量 40%、挤丝温度 95 ℃、螺杆速度 8 r/s、老化时间 12 h、干燥温度 25 ℃作为基本反应条件, 以黑米粉丝断条率和花色苷溶出吸光值为评价指标, 选择水分含量(36%、38%、40%、42%、44%)、挤丝温度(85、90、95、100、105 ℃)、螺杆转速(4、6、8、10、12 r/s)、老化时间(3、6、9、12、15 h)、干燥温度(20、60、70、80、90 ℃)进行单因素实验。

1.3.4 蒸煮品质分析

(1)断条率测定

参考杨艾迪等[4]方法并稍作修改。取 10 g 长度约为 20 cm 的黑米粉丝, 加入装有 600 g 的沸水中, 小火煮 8 min 后关火加盖静置 5 min, 将粉丝与汤汁分开, 分别称取大于 10 cm 和小于 10 cm 的粉丝质量, 按公式(1)计算断条率。

$$X=\frac{m_1}{m}\times 100 \tag{1}$$

式中: X 为断条率, %; m_1 为长度小于 10 cm 的米粉丝质量, g; m 为大于 10 cm 和小于 10 cm 粉丝的总质量, g。

(2)蒸煮损失率测定

称取上述汤汁总量的 1/10 的粉丝汤, 转入已称重的铝盒中, 在 105 ℃下烘干至恒重, 记录烘干后干物质与铝盒的总重量, 并测定干粉丝的水分含量, 按公式(2)计算蒸煮损失率。

$$Y=\frac{M_1-M_2}{M\times(1-Z)}\times 10\times 100 \tag{2}$$

式中: Y 为蒸煮损失率, %; Z 为干粉丝中的水分含量, %; M_1 为干燥后干物质与铝盒的总重量, g; M_2 为干燥前空铝盒质量, g; M 为称取的粉丝样品质量, g。

(3)花色苷溶出测定

参考吴素萍[14]的方法并稍作修改。称取 10 g 黑米粉丝投入 375 mL 沸水中, 微沸条件下加盖保温 5 min, 倒出汤汁, 滤布过滤后滤液在 8000 r/min 下离心 5 min, 于 535 nm 处测定上清液的吸光值, 以其作为指标衡量花色苷溶出程度。

(4)感官评价

选取 10 名食品专业的学生作为感官评定小组成员, 根据感官评分表标准进行评分。黑米米粉感官评分标准如表 1 所示。

表 1 黑米粉丝感官评分标准

Table 1 Sensory evaluation standard of black rice vermicelli

项目	评分标准	分值
组织形态	米粉表面平滑, 形态完整均匀, 无明显裂痕和杂质	8~10
	米粉表面较平滑, 形态较完整均匀, 有裂痕, 有杂质	5~<8
	米粉表面粗糙, 形态不完整、不均匀, 有明显裂痕和杂质	0~<5
颜色	均匀黑色, 透明性好, 有光泽	8~10
	整体黑色, 少有杂色, 透明性较好, 略有光泽色泽	5~<8
	不均匀, 多杂色, 透明性差, 无光泽	0~<5
气味	米香味浓, 气味浓, 无异味	8~10
	米香味较浓, 气味较浓, 少异味	5~<8
	米香味淡, 气味淡, 有异味	0~<5
硬度	软硬适中	8~10
	硬度较硬或较软	5~<8
	硬度夹生过硬或软烂	0~<5
弹性	有嚼劲, 弹性好	8~10
	嚼劲一般, 弹性中等	5~<8
	嚼劲差, 无弹性	0~<5
爽滑性	咀嚼爽口不黏牙, 柔软顺滑	8~10
	黏性中等, 较顺滑	5~<8
	咀嚼不爽口, 发黏, 不顺滑	0~<5

1.3.5 糊化特性分析

参照 GB/T 24852—2010《大米及米粉糊化特性测定快速粘度仪法》进行黑米粉丝糊化特性测定。

1.3.6 淀粉破损率分析

使用 Megazyme 破损淀粉检测试剂盒对样品中淀粉破损率进行测定, 具体步骤为: 准确称取样品 100 mg 于离心

管中并置于 40 ℃水浴锅中平衡 5 min, 加入 1 mL 真菌 α-淀粉酶溶液, 涡旋混匀, 40 ℃水浴锅中精确孵育 10 min。加入 8.0 mL 稀硫酸溶液(0.2%, *V*:*V*)终止反应, 3000 r/min 离心 5 min, 取上清液 0.1 mL 与等体积粉葡萄糖苷酶溶液(2U)混合, 40 ℃孵育 10 min, 后加入 4 mL 葡萄糖氧化酶/过氧化物酶(glucose oxidase-peroxidase, GOPOD)试剂, 40 ℃孵育 20 min, 于 510 nm 处测定溶液吸光度值。按公式(3)计算样品淀粉破损率(starch damage, SD)。

$$SD=E\times F/w\times 8.1 \quad (3)$$

式中: SD 为淀粉破损率, %; *E* 为扣空白后吸光值; *F* 为 150(葡萄糖标准品浓度)/葡萄糖标准品吸光度; *w* 为称取样品质量, mg; 8.1 为校正系数。

1.3.7 体外消化动力学分析

参考 Wang 等[15]的方法并稍作修改。称取样品 600 mg(以淀粉湿基计算)于 100 mL 圆底离心管, 加入 20 mL 乙酸钠缓冲液(pH 为 5.2, 0.1 mol/L), 置于 95 ℃磁力搅拌水浴锅中糊化 20 min, 后于 37 ℃冷却 15 min。冷却后加入含有猪胰酶和淀粉葡萄糖苷酶的混合酶 5 mL, 加盖置于 37 ℃水浴锅中磁力搅拌反应并准确计时。于 0、10、20、40、60、80、100、120 min 分别吸取 0.1 mL 酶解液, 置于 2.9 mL 的无水乙醇溶液终止酶解, 8000 r/min 离心 5 min, 吸取上清液, 用 GOPOD 葡萄糖检测试剂盒测定葡萄糖含量, 分别记为 G_0、G_{10}、G_{20} 等(以此类推)。根据公式(4)~(6)计算快消化淀粉(rapidly digestible starch, RDS)、慢消化淀粉(slowly digestible starch, SDS)和抗性淀粉(resistant starch, RS)的含量。测定每个时间点消化上清液中的葡萄糖浓度, 绘制消化曲线, 根据公式(7)计算样品估算血糖生成指数(estimated glycemic index, eGI)值。

$$RDS/\%=(G_{20}-G_0)\times 0.9/TS \quad (4)$$

$$SDS/\%=(G_{120}-G_{20})\times 0.9/TS \quad (5)$$

$$RS/\%=100-(RDS+SDS) \quad (6)$$

$$eGI=39.71+0.549\times HI \quad (7)$$

式中: G_0 为酶解前淀粉中游离的葡萄糖含量, mg; G_{20} 为淀粉水解 20 min 酶解液的葡萄糖含量, mg; G_{120} 为淀粉水解 120 min 酶解液葡萄糖含量, mg; TS 样品中总淀粉含量, mg; 0.9 为转换因子; HI 为样品体外消化拟合曲线面积/白面包体外消化拟合曲线面积×100。

1.3.8 微观结构观察

参考严建刚等[16]方法并稍作修改。用牙签挑取适量样品, 均匀铺在覆盖有双面黏性碳带的圆形金属片上, 进行离子溅射喷金, 置于扫描电子显微镜观察, 使用 5 kV 电压和 1000×的条件进行拍照。

1.4 数据处理

所有实验均重复 3 次, 采用 Origin 2024 b 软件作图, 采用 SPSS Statistics 31.0 软件进行不同处理组间的显著性分析, $P<0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 单因素实验分析

不同粉碎方法及工艺参数对黑米粉丝花色苷溶出吸光值和断条率的影响结果见图 1。图 1(A)可知, PACM 组花色苷溶出吸光值和断条率显著低于 DP ($P<0.05$), 且随着粉碎次数的增加, 花色苷溶出吸光值和断条率呈下降趋势, PACM-3 处吸光值和断条率最低, 说明 PACM 粉碎方法有利于黑米粉丝花色苷的保留以及提升粉丝蒸煮品质。推测是脱离黑米皮后的白米更容易被粉碎, 其颗粒度更细, 破损淀粉含量比直接粉碎高, 具有更好的吸水能力, 从而有利于米粉丝的制备[17]; 同时在米粉丝制备过程中, 淀粉经糊化回生后, 形成更为致密且有序的网络结构, 阻碍了花色苷的溶出。

图 1(B)可知, 随着水分含量的提升米, 粉丝断条率呈先下降后上升趋势, 水分含量为 40%时断条率最低; 花色苷溶出吸光值则呈上升趋势。推测是随着制备的黑米粉丝的水分含量增加, 当黑米粉丝进行干燥时, 更多的水蒸气会被排出而使干燥后的黑米粉丝中形成更多不能愈合的通路残痕, 产生了更多蜂窝状不均匀孔隙[18], 从而增加了黑米粉丝加水烹调时黑米花色苷的溶出程度, 导致黑米粉丝汤吸光值上升。

图 1(C)~(D)可知, 随着挤丝温度和螺杆转速增加, 米粉丝断条率先呈下降趋势, 当挤丝温度达 95 ℃后断条率趋于平缓, 螺杆转速为 8 r/s 时断条率最低, 随后开始增加; 花色苷溶出吸光值则呈上升趋势。随着挤丝温度和螺杆转速上升, 物料在挤丝时出现的膨化程度就越大, 这会导致制备的黑米粉丝形成更多疏松的多孔结构, 进而使得物料的吸水指数增大, 引起黑米粉丝汤中黑米花色苷溶出程度增加。此外, 黑米粉丝的挤丝过程具有一定程度的高温、高压和高剪切, 有可能将部分不溶性长链淀粉切成水溶性短链淀粉、糊精和糖, 从而使淀粉含量降低[19–20]。淀粉含量的降低不利于淀粉凝胶结构的形成, 使凝胶网络中的黑米花色苷束缚力降低, 从而增加了黑米粉丝汤中黑米花色苷的溶出程度。

图 1(E)可知, 随着老化时间增加, 米粉丝断条率呈下降趋势, 12 h 以后趋于平缓; 花色苷溶出吸光值则呈上升趋势。淀粉老化过程其实质是糊化淀粉分子自动排列成序, 形成高度致密结构的过程, 这种致密结构随着老化时间延长而更加紧密, 这就导致干燥时老化时间长的黑米粉丝因为水蒸气更难排出反而在排出过程形成更多的蜂窝状不均匀孔隙, 从而使汤中花色苷溶出程度增加。此外, 随着淀粉的老化, 淀粉吸水能力下降, 导致其中的水分析出[21], 溶于其中的黑米花色苷也随水被排出, 淀粉老化程度越深, 水分析出就越多, 因此黑米花色苷被排出的量也就越多。

图 1(F)可知, 随着干燥温度增加米粉丝断条率和花色苷溶出吸光值呈上升趋势, 推测是由于温度越高, 粉丝表层水分扩散速度也越快, 这会导致粉丝表层壳化而使内部水蒸气压力加大, 最终导致粉丝表层龟裂或断裂[22–24], 这

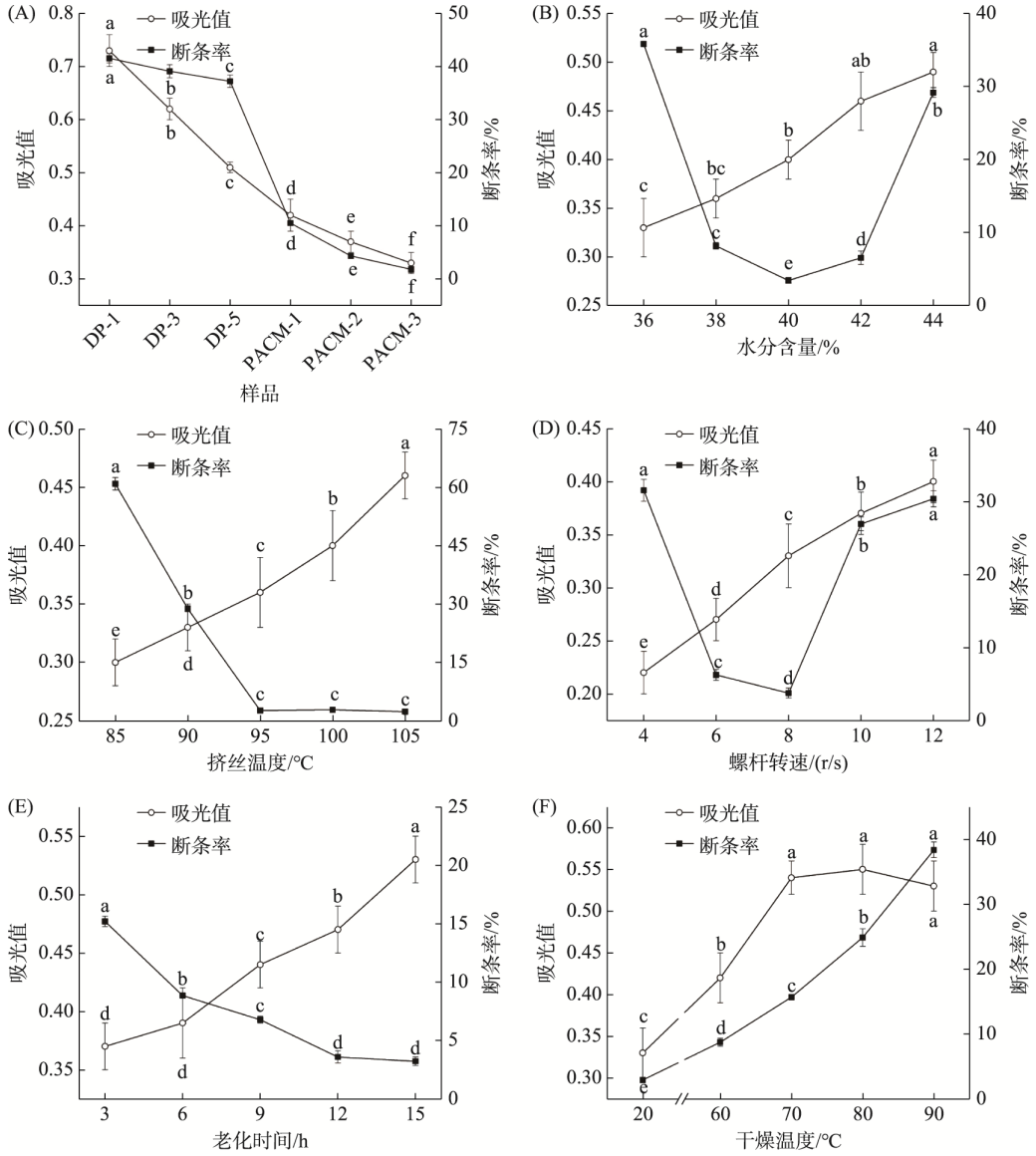
促进了黑米粉丝花色苷的溶出。

综上所述, 黑米粉丝最优工艺条件: 采用 PACM(碾磨 3 次)方法进行粉碎, 物料水分含量 40%、挤丝温度 95 ℃、螺杆速度 8 r/s、老化时间 12 h、干燥温度 25 ℃。

2.2　蒸煮品质

断条率和蒸煮损失率是反映米粉丝品质的重要指标[25], 与米粉的结构完整性和食用体验等密切相关, 主要反映淀粉链、可溶性物质的溶解和渗漏情况, 较高的断条率和蒸煮损失率会影响产品的食用品质[26]。不同条件制备所得黑米粉丝蒸煮特性结果见表 2。与对照组相比, PACM 法制备所得的黑米粉丝(PACM-3)蒸煮损失率、断条率和花色苷溶出吸光值有显著差异(P<0.05), 分别下降了 39.36%、95.17%和 52.94%。与市售黑米粉丝相比, PACM-3 的断条率无显著差异(P>0.05), 蒸煮损失率显著性下降(P<0.05), 花色苷溶出吸光值显著性升高(P<0.05)。市售黑米粉丝虽然花色苷溶出吸光值低, 但其原料大部分为大米(黑米添加量仅为标注的大于等于 20%), 且蒸煮损失率比 PACM-3 高, 说明 PACM 方法比传统粉碎方法更适用于黑米粉丝的制备。

感官评价能直观地判断黑米粉丝的品质, 故对组织形态、颜色、气味、硬度、弹性、爽滑性进行感官评定。感官评价的测定结果见图 2。由图 2 可知, PACM-3 整体感官评分比对照组高, 特别是弹性和爽滑性, 升幅分别达 21.42%和 13.33%, 这说明 PACM 工艺能改善黑米粉丝的品质。同时, PACM-3 与市售黑米粉丝的组织形态、颜色、硬度和弹性评分基本一致, 其米香味比市售黑米粉丝浓, 但爽滑性不如市售黑米粉丝。整体来看, PACM-3 的综合感官评分最高。



注: 不同字母表示差异具有显著性(P<0.05)。

图 1　粉碎方法及工艺参数对黑米粉丝花色苷溶出吸光值和断条率的影响

Fig.1　Effects of pulverization methods and processing parameters on anthocyanin leaching absorbance and breakage rate of black rice vermicelli

表 2 不同条件所得的黑米粉丝蒸煮特性

Table 2 Cooking characteristics of black rice vermicelli under different conditions

样品	水分含量/%	蒸煮损失率/%	断条率%	吸光值
对照组	9.34±0.02^{b}	24.29±0.02^{a}	37.24±1.17^{a}	0.51±0.01^{a}
PACM-3	8.83±0.11^{c}	14.73±0.09^{c}	1.80±0.58^{b}	0.24±0.01^{b}
市售黑米粉丝	12.76±0.05^{a}	19.84±0.27^{b}	1.66±0.47^{b}	0.18±0.01^{c}

注：同一列数值右上方不同字母表示差异显著(P<0.05)，对照组为实验室普通干法粉碎制备所得黑米粉丝，下同。

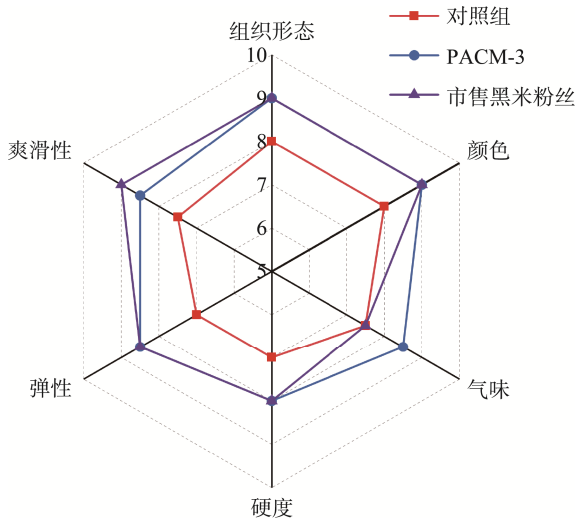


图 2 不同黑米粉丝样品的感官评价雷达图

Fig.2 Radar chart for sensory evaluation of different black rice vermicelli sample

2.3 糊化特性

淀粉体系的糊化特性是影响米粉丝品质的重要特性之一[27]。由表 3 可知，对照组、PACM-3 和市售黑米粉丝的糊化特性差异较大，三者的峰值黏度、最低黏度、最终黏度、崩解值、回生值和峰值时间均有显著性差异(P<0.05)。最低黏度和峰值黏度反映了物料在加工过程中耐剪切能力，在一定范围内，较高的最低黏度和峰值黏度其米粉丝蒸煮品质较佳，蒸煮损失率较小[28]。与其他样品相比，PACM-3 具有较高的最低黏度(830.33 mPa•s)、峰值黏度(965.67 mPa•s)和最终黏度(1468.67 mPa•s)，侧面反映其米粉丝蒸煮品质较好，蒸煮损失率较低，这与上述黑米粉丝蒸煮特性结果(表 2)相符。崩解值和回生值分别代表了淀粉糊的热糊稳定性和冷糊稳定性，其越小说明体系的热糊和冷糊稳定性越好[29−30]。与对照组相比，PACM-3 崩解值(135.67 mPa•s)和回生值(631.67 mPa•s)分别下降了 9.75%和 10.01%(P<0.05)，表明 PACM 粉碎方法提高了黑米粉丝淀粉糊稳定性，减少了黑米粉丝回生的情况。

表 3 不同条件所得的黑米粉丝糊化特性

Table 3 Pasting properties of black rice vermicelli under different conditions

样品	峰值黏度 /(mPa•s)	最低黏度 /(mPa•s)	崩解值 /(mPa•s)	最终黏度 /(mPa•s)	回生值 /(mPa•s)	峰值时间 /min	糊化温度 /℃
对照组	832.67±10.50^{c}	682.00±1.00^{b}	150.33±11.02^{b}	1386.00±21.07^{b}	702.00±21.52^{a}	6.20±0.07^{b}	94.19±0.33^{a}
PACM-3	965.67±16.01^{b}	830.33±7.51^{a}	135.67±8.50^{c}	1468.67±44.50^{a}	631.67±27.74^{b}	6.44±0.10^{a}	94.72±0.10^{a}
市售黑米粉丝	1122.33±10.69^{a}	527.67±7.23^{c}	594.67±4.93^{a}	738.00±8.89^{c}	210.33±2.08^{c}	4.28±0.04^{c}	70.67±0.55^{b}

2.4 淀粉体外消化特性

不同条件制备所得黑米粉丝破损淀粉含量及淀粉体外消化特性结果见表 4。与对照组相比，PACM-3 破损淀粉含量显著性提高了 10.38% (P<0.05)；与市售黑米粉丝相比，破损淀粉含量显著性提高了 1.05 倍(P<0.05)，说明 PACM 粉碎方法会提高黑米粉丝的破损淀粉含量。

淀粉消化特性是指淀粉在人体消化系统中消化率和消化速度，可分为 RDS、SDS 和 RS[31]。由表 4 可知，与对照组相比，PACM-3 的 RDS、SDS、RS 和 eGI 无显著性差异(P>0.05)，说明 PACM 粉碎方法不会改变黑米粉丝的消化特性，这与丁岚[32]研究结果一致(不同制粉方式对最终产品米线的消化性则无显著影响)。PACM-3 的 RDS 和 eGI 值显著性低于市售黑米粉丝(P<0.05)，SDS 和 RS 显著性高于市售黑米粉丝(P<0.05)。这可能是因为其为纯黑米粉制备所得，膳食纤维和花色苷含量比市售黑米粉丝高，而膳食纤维和直链淀粉通过氢键相互作用，淀粉颗粒表面被氢键包围，起到物理屏蔽作用减缓了淀粉水解速度[33]；同时，花色苷对 α-淀粉酶的抑制作用也可导致淀粉消化速度下降[34]。张伟东[35]发现，大米淀粉的水解程度和 eGI 值随紫红米米糠花色苷添加量增加而下降。

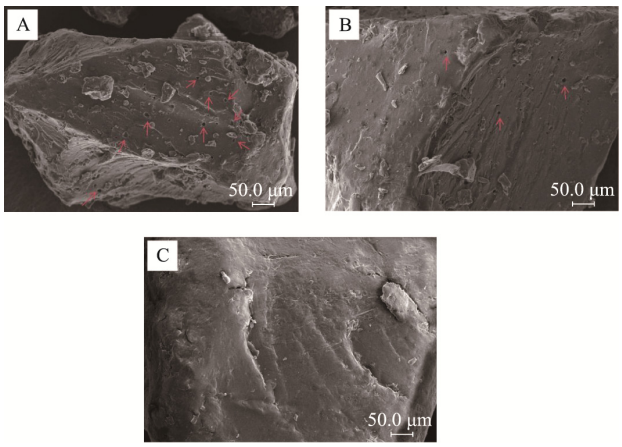
表 4　不同条件所得的黑米粉丝破损淀粉含量及淀粉体外消化特性

Table 4　Damaged starch content and *in vitro* digestion characteristics of starch in black rice vermicelli under different conditions

样品	总淀粉含量/%	SD/%	RDS/%	SDS/%	RS/%	eGI
对照组	72.04±1.23^{b}	26.00±0.18^{b}	52.57±0.09^{b}	17.73±1.41^{a}	29.70±1.32^{a}	78.08±0.86^{b}
PACM-3	73.26±0.13^{b}	28.70±0.30^{a}	54.50±0.57^{b}	17.37±1.60^{a}	28.13±1.04^{a}	79.09±0.77^{b}
市售黑米粉丝	76.54±0.74^{a}	14.01±0.14^{c}	62.83±1.75^{a}	15.47±0.56^{b}	21.70±2.31^{b}	82.87±1.12^{a}

2.5　微观结构

黑米粉丝颗粒形态如图 3 所示。对照组能观察到数量较多的小孔, 用红色箭头表示; PACM-3 小孔数量明显减少; 市售黑米粉丝颗粒则是表面光滑平整, 无小孔。推测是硬度较大的黑米皮不能通过普通粉碎形成较小的颗粒, 阻碍了黑米粉丝挤压成型过程中紧密结构的形成, 在干燥时水分扩散形成了小孔, 导致了黑米粉丝复水蒸煮时花色苷的大量溶出及蒸煮品质的下降(表 2)。这种小孔随着采用 PACM 粉碎方法得到明显减少, 黑米粉丝蒸煮品质也得到了改善(表 2)。



注: A. 对照组; B. PACM-3; C. 市售黑米粉丝。

图 3　不同条件所得黑米粉丝的微观形貌图(1000×)

Fig.3　Microscopic images of black rice vermicelli under different conditions (1000×)

3　结　论

本研究建立并优化了一种基于 PACM 粉碎方法的黑米粉丝新型制备工艺, 确定最佳工艺参数为: 物料水分含量 40%、挤丝温度 95 ℃、螺杆转速 8 r/s、老化时间 12 h、干燥温度 25 ℃。与对照组相比, 优化工艺制备的黑米粉丝断条率、蒸煮损失率及花色苷溶出程度均显著降低(P<0.05), 蒸煮品质得到明显改善; 同时, 淀粉糊化特性发生显著变化, 破损淀粉含量增加, 但未对淀粉体外消化特性产生显著影响。与市售黑米粉丝相比, 采用优化工艺制备的黑米粉丝具有更优的蒸煮品质, 并表现出较低的 eGI 值和 RS 含量。综上, PACM 粉碎技术适用于黑米粉丝的制备, 可有效改善产品品质并降低加工过程中花色苷损失。本研究为黑米粉丝的工业化开发与高值化利用提供了理论依据和技术参考。

参考文献

[1] 马春敏, 王鑫钰, 徐悦, 等. 挤压型米线的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(2): 99–109.
Ma Chunmin, Wang Xinyu, Xu Yue, et al. Research progress of extruded rice noodles [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(2): 99–109.

[2] 蔡永艳. 米粉干法生产工艺及品质改良的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2011: 1–2.
Cai Yongyan. Studies on drying technology and quality improving of rice noodles [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2011: 1–2.

[3] Tong Litao, Gao Xiaoxu, Lin Lizhong, 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.

[4] 杨艾迪, 魏振承, 张雁, 等. 水磨结合干磨制粉对米粉丝品质的影响及工艺优化[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(8): 111–117.
Yang Aidi, Wei Zhencheng, Zhang Yan, et al. Effect of water milling combined with dry milling on quality of rice noodles and process optimization [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2017, 32(8): 111–117.

[5] 韩磊, 吴先军, 张红宇, 等. 黑米果皮花色素沉积过程的研究[J]. 中国水稻科学, 2006, 20(4): 384–388.
Han Lei, Wu Xianjun, Zhang Hongyu, et al. Study on the pigmentation of anthocyanidin in pericarp of black rice [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2006, 20(4): 384–388.

[6] 黄奕玮, 杨周昊, 陈海燕, 等. 黑米粉、金雀花粉对面包品质特征及挥发性风味物质的影响[J/OL]. 食品工业科技, 2026-02-06. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025100009.
Huang Yiwei, Yang Zhouhao, Chen Haiyan, et al. Effects of black rice flour and broom flour on bread quality characteristics and volatile flavor substances [J/OL]. China Industrial Economics, 2026-02-06. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025100009.

[7] 张名位, 张瑞芬, 郭宝江, 等. 黑米皮花色苷的抗氧化与降血脂作用[J]. 营养学报, 2006, 28(5): 404–408.
Zhang Mingwei, Zhang Ruifen, Guo Baojiang, et al. The hypolipidemic and antioxidative effects of black rice pericarp anthocyanin in rats [J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2006, 28(5): 404–408.

[8] Ling Wenhua, Wang L L, Ma Jing. Supplementation of the black rice outer layer fraction to rabbits decreases atherosclerotic plaque formation and increases antioxidant status [J]. The Journal of Nutrition, 2002, 132(1): 20–26.

[9] Ling Wenhua, Cheng Qixuan, Ma Jing, et al. Red and black rice decrease atherosclerotic plaque formation and increase antioxidant status in rabbits [J]. The Journal of Nutrition, 2001, 131(5): 1421–1426.

[10] Nam S H, Choi S P, Kang M Y, et al. Antioxidative, antimutagenic, and anticarcinogenic activities of rice bran extracts in chemical and cell assays [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(3): 816–822.

[11] 胡玉芬. 杂粮复合米粉的研制及其体外消化特性研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2025: 1–2.
Hu Yufen. Study on preparation and in vitro digestion characteristics of miscellaneous grains compound rice flour [D]. Guiyang: Guizhou

University, 2025: 1–2.

[12] 靳凤芳. 不同淀粉对黑米粉丝及黑米冲调粉品质的影响研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2022: 4–6.
Jin Fengfang. Effect of different starch on the quality of black rice vermicelli and black rice instant powder [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2022: 4–6.

[13] 董越. 黑木耳全粉性质研究及其与 κ-卡拉胶对黑米凝胶特性的影响[D]. 南昌: 江西农业大学, 2021: 2–4.
Dong Yue. The properties of *Auricularia* auricular-judae and effect of it supplemented with kappa-carrageenan on the gel properties of black rice [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2021: 2–4.

[14] 吴素萍. 黑米色素的提取及稳定性研究[J]. 中国调味品, 2011, 36(12): 106–110.
Wu Suping. Black rice pigment soaking mention a stability studying [J]. China Condiment, 2011, 36(12): 106–110.

[15] Wang Yi, Zeng Jiarui, He Yuying, et al. Impact of boiling-drying regimes on milling properties, digestion characteristics, and multi-scale starch structure of parboiled rice [J]. Food Research International, 2026, 227: 118143.

[16] 严建刚, 马永轩, 李翠华, 等. 过热和湿热蒸汽对青稞粉的理化特性和贮藏稳定性的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(24): 255–263.
Yan Jiangang, Ma Yongxuan, Li Cuihua, et al. Effects of superheated steam and auto-claving steam on physicochemical properties and storage stability of *Hordeum vulgare* L. flour [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2024, 15(24): 255–263.

[17] Nishita K D, Bean M M. Grinding methods: their impact on rice flour properties [J]. Cereal Chemistry, 1982, 59(1): 46–49.

[18] 冯凤琴, 刘东红, 叶立扬. 甘薯全粉加工及其挤压膨化食品特性的分析研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(3): 99–102.
Feng Fengqin, Liu Donghong, Ye Liyang. Processing of sweet potato powder and analysis of the characteristics of extruded sweet potato foods [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2001, 17(3): 99–102.

[19] 汤坚, 丁霄霖. 玉米淀粉的挤压研究——淀粉在挤压过程中降解机理的研究(II _ b)[J]. 无锡轻工业学院学报, 1994, 13(1): 1–9.
Tang Jian, Ding Xiaolin. Studies on the extrusion of corn starches: -the degradation mechanism of corn starches during extrusion(II _ b) [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 1994, 13(1): 1–9.

[20] 战汪涛. 黑米挤压膨化工艺及膨化黑米粉应用研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2010: 27–28.
Zhan Wangtao. Study on extrusion technology of black rice and application of the extrusive black rice flour [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2010: 27–28.

[21] 张雨, 张康逸, 张国治. 淀粉老化过程机理及淀粉抗老化剂应用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(13): 316–321.
Zhang Yu, Zhang Kangyi, Zhang Guozhi. Research progress on starch retrogradation process mechanism and application of starch anti-retrogradation agent [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(13): 316–321.

[22] 周洁. 甘薯粉丝干燥机理和干燥技术的研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2010: 10–16.
Zhou Jie. Research on drying mechanism and drying technology of sweet potato vermicelli [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2010: 10–16.

[23] 熊柳, 孙庆杰. 干燥方式对方便米线复水性影响的研究[J]. 食品工业科技, 2009, 30(7): 157–158, 197.
Xiong Liu, Sun Qingjie. Study on effect of drying method on rehydration of instant rice noodle [J]. Science and Technology of Food Industry, 2009, 30(7): 157–158, 197.

[24] 江思佳, 刘启觉. 米粉微波-热风联合干燥工艺研究[J]. 粮油加工, 2009(4): 102–105.
Jiang Sijia, Liu Qijue. Study on the microwave and heated-air dying technology of rice noodles [J]. Cereals and Oils Processing, 2009(4): 102–105.

[25] 刘容, 王丹, 李月, 等. 复蒸-二次老化对柳州螺蛳粉米粉品质的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(9): 257–262.
Liu Rong, Wang Dan, Li Yue, et al. Effect of re-steaming treatment and secondary retrogradation on the quality of Liuzhou luosifen rice noodles [J]. Food Science, 2025, 46(9): 257–262.

[26] Yu Kun, Huang Xiaoxiu, He Wei, et al. Kinetics of polyphenol losses during cooking of dried green tea noodles as influenced by microwave treatment of dough [J]. LWT, 2023, 180: 114675.

[27] 于新, 刘丽. 传统米制品加工技术[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2014: 7–14.
Yu Xin, Liu Li. Processing technology of traditional rice products [M]. Beijing: China Textile Press, 2014: 7–14.

[28] 范代超. 几种粉丝淀粉特性及其对食用品质的影响研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013: 25–27.
Fan Daichao. Effect of starch properties on eating quality of several starch noodles [D]. Chongqing: Southwest University, 2013: 25–27.

[29] 许立益, 余宏达, 江冬怡, 等. 紫米与籼米复配比对复配粉性质及紫米粉丝品质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(17): 114–121.
Xu Liyi, Yu Hongda, Jiang Dongyi, et al. Effects of the mixing ratio of purple rice and indica rice on the properties of mixed powder and the quality of purple rice noodles [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(17): 114–121.

[30] 孟亚萍. 挤压米粉丝加工及品质改良技术研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015: 13–14.
Meng Yaping. Study on the processing technologies and quality improvement of extruded rice noodles [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015: 13–14.

[31] 乔凡. 不同杂豆全粉与 TG 对籼米粉粉质特性和半干米粉品质的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2024: 43–44.
Qiao Fan. Effect of different pulse whole flour and transglutaminase on the flour properties of indica rice flour and quality in semi-dry rice noodles [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2024: 43–44.

[32] 丁岚. 不同加工工艺对米线品质及消化性的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020: 51–52.
Ding Lan. Effects of different processing techniques on the quality and digestibility of rice noodles [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020: 51–52.

[33] Zhang Lifan, Chen Jie, Xu Fei, et al. Effect of *Tremella fuciformis* and different hydrocolloids on the quality characteristics of wheat noodles [J]. Foods, 2022, 11(17): 2617.

[34] Barik S K, Russell W R, Moar K M, et al. The anthocyanins in black currants regulate postprandial hyperglycaemia primarily by inhibiting α-glucosidase while other phenolics modulate salivary α-amylase, glucose uptake and sugar transporters [J]. The Journal of Nutritional Biochemistry, 2020, 78: 108325.

[35] 张伟东. 紫红米米糠花色苷对大米淀粉消化和益生特性的影响及吞咽障碍食团的制备与质地评估[D]. 南昌: 南昌大学, 2024: 90–91.
Zhang Weidong. Effect of purple red rice bran anthocyanins on the digestive and probiotic properties of rice starch and the preparation and texture assessment of dysphagia food masses [D]. Nanchang: Nanchang University, 2024: 90–91.

(责任编辑: 蔡世佳 安香玉)