熊添, 陈文洁, 钱虹羽, 等. 不同工艺制备的甘薯全粉品质特性评价 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(17): 395−402. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080203

XIONG Tian, CHEN Wenjie, QIAN Hongyu, et al. Evaluation in Quality Characteristics of Sweet Potato Powder by Different Preparation Processes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(17): 395−402. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080203

· 分析检测 ·

不同工艺制备的甘薯全粉品质特性评价

熊　添[1], 陈文洁[1,2,+], 钱虹羽[1,3], 蔡　芳[1], 施建斌[1], 隋　勇[1], 陈学玲[1], 范传会[1], 梅　新[1,*]

（1.湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 农业农村部农产品冷链物流技术重点实验室, 特色农产品资源挖掘与高质利用湖北省重点实验室, 湖北武汉 430064;
2.湘潭大学化工学院, 湖南湘潭 411105;
3.天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300457）

摘　要: 为筛选适配各类工业化生产的甘薯全粉，本研究以具有代表性的凌紫、红安红品种甘薯为原料，对比了不同工艺制备的甘薯生全粉、熟全粉、冻干粉以及发酵生全粉之间的理化、功能、感官等品质特性方面的差异。结果表明：甘薯生全粉、熟全粉、冻干粉 pH 在 6.31~6.52 之间，发酵处理使生全粉 pH 下降至 4.42~5.90。植物乳植杆菌单菌发酵产酸能力最强，TTA 约为未发酵生全粉的 3 倍。甘薯熟全粉因完全糊化观察不到吸热峰，持水性和吸水膨胀性均显著高于同品种其他全粉（$P<0.05$），但冻融稳定性差。甘薯生全粉持油性最差，发酵处理可以提升生全粉持油性至原来 2 倍以上。植物乳植杆菌单菌发酵甘薯生全粉可溶性糖含量最高。冻干粉感官性能最优，其感官评分总分高出其他全粉 7.56%~22.54%，且紫心甘薯冻干粉花青素含量约为紫薯生全粉的 5.32 倍。本研究为甘薯全粉工业化生产、品质控制及应用拓展提供了参考依据。

关键词: 甘薯, 甘薯全粉, 发酵, 植物乳植杆菌, 品质特性

中图分类号: TS215　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)17−0395−08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080203　　本文网刊:

Evaluation in Quality Characteristics of Sweet Potato Powder by Different Preparation Processes

XIONG Tian[1], CHEN Wenjie[1,2,+], QIAN Hongyu[1,3], CAI Fang[1], SHI Jianbin[1], SUI Yong[1], CHEN Xueling[1], FAN Chuanhui[1], MEI Xin[1,*]

（1.Institute of Agro−product Processing and Nuclear Agricultural Technology, Hubei Academy of Agricultural, Key Laboratory of Cold Chain Logistics Technology for Agro−product, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hubei Key Laboratory of Characteristic Resources and Utilization Sciences, Wuhan 430064, China;
2.College of Chemical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China;
3.College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China）

Abstract: To screen for whole sweet potato powder (WSP) suitable for various industrial production processes, this study employed two representative sweet potato cultivars (Lingzi and Hong'anhong) as raw materials. It compared the variations in physicochemical properties, functional characteristics, sensory quality, and other related traits among four types of WSP produced by distinct processing methods: raw WSP, cooked WSP, freeze-dried WSP, and fermented raw WSP. The results showed that the pH of raw, cooked, and freeze-dried WSP ranged from 6.31 to 6.52, whereas fermentation decreased the pH of raw WSP to 4.42~5.90. Notably, single-strain fermentation using *Lactiplantibacillus plantarum* exhibited the strongest acid-producing capacity, with a total titratable acidity (TTA) value approximately three fold higher than that of unfer-

收稿日期: 2025−08−20　　+并列第一作者

基金项目: 武汉市科技特派员“产学研”专项项目（2023110201030677）; 湖北省科技服务企业人才项目（KJRQ2023000147）。

作者简介: 熊添（1995−）, 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 农产品加工及副产物综合利用, E-mail: xiongtian1995@126.com。
陈文洁（2000−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: wjchen3155@163.com。

*** 通信作者:** 梅新（1978−）, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 粮食加工与副产物综合利用, E-mail: meixin0898@163.com。

mented raw WSP. Cooked WSP exhibited no endothermic peak, attributed to complete gelatinization. Among WSP samples of the same cultivar, cooked WSP had significantly higher water-holding capacity and water absorption-swelling capacity but poor freeze-thaw stability. Regarding oil-holding capacity, raw WSP was the lowest, whereas fermentation increased this capacity to more than twice its initial level. Furthermore, raw WSP fermented with single-strain *L. plantarum* had the highest soluble sugar content. Freeze-dried WSP performed best in sensory evaluation, with a total sensory score 7.56%~22.54% higher than those of the other types. For purple WSP, the anthocyanin content in freeze-dried purple WSP was approximately 5.32 times that in raw purple WSP. This study provides a valuable reference for the quality control, industrial-scale production, and application expansion of WSP.

Key words: sweet potato; whole sweet potato powder (WSP); fermentation; *Lactiplantibacillus plantarum*; quality characteristics

甘薯(*Ipomoea batatas* (L.) Lam)作为我国第五大粮食作物,又称番薯、地瓜、甜薯等,富含淀粉、膳食纤维、维生素、*β*-胡萝卜素及花青素等营养物质,其抗氧化和抗癌功能已获得广泛验证[1]。新鲜甘薯水分高达 60%~75%,在加工和贮存过程中易腐烂,造成大量资源浪费。而制备甘薯全粉因其工艺简便、营养物质保留率高、保质期长等优点,被视为减少损耗、提升附加值的高效加工途径[2]。

目前市场上常见的甘薯全粉主要分为生全粉、熟全粉和冻干粉,但因各自特性限制了应用范围。生全粉由新鲜甘薯热风干燥制成,细胞完整性、冻融稳定性、乳化性和乳化稳定性较好,但不含面筋蛋白,复水性与面团拉伸性和延展性不足[3−4]。熟全粉由熟制甘薯干燥而成,糊化度高、冲调性好,却伴随热敏营养损失和质地粗糙的问题,不适用于面条、馒头等主食加工[5]。冻干粉是新鲜甘薯经冷冻干燥工艺制成,营养物质损失少、品质高,但过程高能耗、不连续,限制了其大规模推广普及[6]。相较而言,生全粉最具工业化前景,但仍需通过各种手段改善其加工及功能特性。

发酵可同步提升食品营养与加工适应性,兼具安全性和经济效益[7]。Chang 等[8] 研究发现,植物乳植杆菌发酵使小米淀粉的短支链比例、结晶度和短程有序度增加,改善了小米淀粉的溶解度、吸附能力和糊化黏度。Isa 等[9] 的研究表明,保加利亚乳杆菌可显著提高木薯粉蛋白质含量。乳酸菌代谢生成的胞外多糖还能改善面团因缺少面筋蛋白所带来的缺陷[10]。将发酵技术应用到甘薯生全粉改性或能提升其性能并扩大应用范围具有良好的应用前景,但目前相关研究还鲜有报道,且有关甘薯全粉品质的研究多集中于单一肉色品种。

我国甘薯种类丰富,依据块根肉色可划分为紫心、红心、白心与黄心四大类型,其中紫心甘薯富含花青素、膳食纤维,口感粉糯;红心甘薯水分高、类胡萝卜素丰富,口感香甜[11]。紫心甘薯和红心甘薯消费市场最广、加工潜力最大,却缺乏系统比较。本研究以具有代表性的紫心、红心甘薯为原料,采用热风干燥、高温蒸制、冷冻干燥等手段制备生全粉、熟全粉以及冻干粉,并利用植物乳植杆菌(*Lactiplantibacillus plantarum*, *L*)、酵母菌(*Saccharomyces cerevisiae*, *S*)以及双菌共发酵(*L*+*S*)制备发酵生全粉。在理化特性、活性物质以及感官鉴定三个方面,比较上述全粉之间的品质差异,探究不同工艺制备的甘薯全粉的品质特征,为筛选低成本、高营养且适配工业化生产的甘薯全粉工艺提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

凌紫品种紫心甘薯(以下简称紫薯)、红安红品种红心甘薯(以下简称红薯) 湖北根聚地农业发展股份有限公司;植物乳植杆菌(JYLP-002) 山东中科嘉亿生物工程有限公司;酿酒酵母 安琪酵母股份有限公司;1,1-二苯基-2-苦肼基(DPPH)、蒽酮、氯化钾、福林酚 国药集团化学试剂有限公司;没食子酸 上海源叶生物科技有限公司。

QJ-08 粉碎机 上海兆申科技有限公司;泸制 01040080 分光光度计 上海仪电分析仪器有限公司;LXJ-IIB 低速离心机 上海安亭科学仪器厂;Pyrisl 差示扫描量热分析仪 美国 PE 公司;LGJ-25C 冷冻干燥机 北京四环科学仪器厂有限公司制造;XH-C 旋涡混合器 金坛市医疗仪器厂;L18-P161 破壁机 杭州九阳生活电器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品的制备

1.2.1.1 未发酵甘薯全粉的制备 以紫薯和红薯为原料,制备生全粉、熟全粉和冻干粉。生全粉:甘薯块根→清洗去皮→切片→护色→热风干燥→冷却至室温→粉碎过筛;熟全粉:甘薯块根→清洗去皮→蒸熟→捣泥→热风干燥→冷却至室温→粉碎过筛;冻干粉:甘薯块根→清洗去皮→切片→护色→预冻→真空冷冻干燥→粉碎过筛。

操作要点:

切片:切为 1.50 mm 的薄片。护色:浸泡于无硫护色液(0.25% 柠檬酸+0.15% 植酸+0.20% $CaCl_2$ 溶液)中 30 min。蒸熟:100 ℃ 蒸制 30 min。热风干燥:60 ℃ 干燥 5 h。预冻:−40 ℃ 预冻 12 h。真空冷冻干燥:设定温度为−50 ℃,真空度为 90 Pa,干燥 24 h。粉碎过筛:破壁机粉碎均匀,过 80 目筛。

1.2.1.2 发酵甘薯生全粉的制备 以紫薯、红薯生全

粉为原料，制备发酵生全粉。工艺流程：生全粉→发酵→预冻→真空冷冻干燥→粉碎过筛。

操作要点：

植物乳植杆菌活化：涂布培养后挑取单菌接入 MRS 液体培养基，37 ℃ 培养 24 h。传代两次，至活菌数达到 10^9 CFU/mL[12]。

酵母菌活化：将酵母干粉接种于 YPD 液体培养基，32 ℃、30 r/min 摇床培养 24 h，传代两次，至活菌数达到 10^9 CFU/mL。

发酵：取培养液 4000 r/min 离心 10 min，称 1 g 菌泥（双菌共发酵则各取 0.5 g），用无菌水洗涤菌泥 2 次，按 1∶10（w/v）的比例混合菌泥与无菌水，按甘薯生全粉质量的 8% 接种，再加入 71%（w/v）的无菌水，30 ℃ 发酵 12 h。

预冻、真空冷冻干燥、粉碎过筛的处理方法与 1.2.1.1 方法一致。

根据国标 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》（直接干燥法）测定上述所有样品水分含量，检测数值均低于 1.50%。

1.2.2　理化特性的测定　参考王宏兹等[13] 的方法略作修改测样品的 pH 和总滴定酸（TTA）。取 1.0 g 甘薯全粉，加入 9.0 mL 蒸馏水混匀，静置 15 min 后测 pH；用 0.1 mol/L 的 NaOH 溶液滴定至 pH8.5，消耗的 NaOH 溶液的体积记为 TTA。

按照熊添等[14] 的方法测定样品的持水性、持油性、吸水膨胀性。

参考方东方等[15] 的方法略作修改后测定冻融稳定性。取 1.0 g 甘薯全粉于离心管，管重记为 M_1。加入 15 mL 蒸馏水，90 ℃ 水浴搅拌 30 min 后 8000 r/min 离心，倾去上清液称重记为 M_2，再于 −18 ℃ 冷冻 24 h，室温解冻后 8000 r/min 离心，再倾去上清液称重记为 M_3，以析水率表示。

$$析水率(\%)=\frac{M_2-M_3}{M_2-M_1}\times 100 \qquad 式（1）$$

参考卢紫君等[16] 的方法略作修改后测定样品凝沉性。取样品配成浓度为 1%（W/V）的溶液，沸水浴加热搅拌至完全糊化（保持体积不变），冷却至室温静置 24 h，记录上清液体积及淀粉糊总体积（mL），凝沉性（%）按以下公式计算：

$$凝沉性(\%)=\frac{上清液体积}{淀粉糊总体积}\times 100 \qquad 式（2）$$

按照邹浩峰等[17] 的方法测定样品的热力学特性。取 5.0 mg 样品至铝坩埚，加入 10 μL 去离子水并加盖密封，于室温下平衡 2 h 使用 DSC 分析，根据吸热曲线计算糊化起始温度（To）、峰值温度（Tp）、终止温度（Tc）及糊化焓（ΔH）。

1.2.3　活性成分的测定　可溶性糖参考王佩芬等[18] 的方法稍作修改测定。取 1.0 g 样品，加入 80% 乙醇 10 mL，60 ℃ 水浴搅拌 30 min，冷却后定容至 50 mL。取 0.1 mL 滤液用蒽酮-硫酸比色法测定，根据葡萄糖标准曲线（y=0.5190x−0.1842，R^2=0.9910，式中：y 为吸光度；x 为葡萄糖质量浓度，mg/mL）计算可溶性糖含量。

参照陈蓬凤等[19] 的方法略作修改后测定总酚含量。取 0.5 g 样品，加入 70% 乙醇 10 mL，50 ℃ 水浴浸提 1 h 后过滤。取 0.1 mL 滤液与 0.5 mL 10% 福林酚试剂反应 15 min，再加 1.5 mL 15% Na_2CO_3 溶液并定容至 5 mL，室温避光 1.5 h，765 nm 处测定吸光度，代入没食子酸标准曲线（y=0.6140x+0.0574，R^2=0.9994。式中：y 为吸光度，x 为没食子酸当量）计算总酚含量。

按照王宏兹等[13] 的方法稍作修改，测定样品的 DPPH 自由基清除率。分别将 2.0 mL 样品滤液和乙醇与 2.0 mL DPPH 溶液混匀，避光放置 30 min，517 nm 处测定吸光度，分别记为 A_X 和 A_0，按公式计算 DPPH 自由基清除率。

$$DPPH自由基清除率(\%)=\left(1-\frac{Ax}{A_0}\right)\times 100 \qquad 式（3）$$

按照赵时珊等[3] 的方法测定甘薯全粉的花青素含量。

1.2.4　外观色泽及感官评价　取等量样品铺于黑色或白色干净桌面拍照。取样品放入色度仪测量板，记录其 L^*值、a^*值、b^*值，重复 6 次。参照熊添等[20] 的方法修改后进行感官评价，评分小组为 20 名经培训的专业人员，根据 NY/T 3611《甘薯全粉》标准略作修改设置评分标准见表 1。

表 1　甘薯全粉感官评价标准

Table 1　Sensory evaluation standard of WSP

指标	分数（分）	描述
气味（30%）	80~100	富有浓郁甘薯香气，无焦糊难闻气味
	50~79	甘薯香气清淡，几乎没有难闻气味
	0~49	无甘薯香气，异味较重
色泽（40%）	80~100	色泽明亮鲜艳
	50~79	颜色较浅、失去光泽
	0~49	颜色黯淡，呈现褐变色
组织形态（30%）	80~100	粉末均匀细腻
	50~79	大部分粉末均匀细腻，少数质地粗糙、粘连或结块
	0~49	粉末粗糙，不均匀或大量粘连结块

1.3　数据处理

所有实验重复 3 次，实验数据经 Microsoft office Excel 2016 处理后，用 SPSS 27.0 分析显著差异性，通过一元方差分析（One-Way ANOVA）进行多个组间平均数的比较，若组间存在显著性差异（$P<0.05$），则采用 Duncan 检验进行组间多重比较。使用 GraphPad Prism 8.0.2 作图。

2　结果与分析

2.1　理化特性

2.1.1　pH 和总滴定酸（TTA）　由图 1A、图 1B 可知，两种甘薯熟全粉、冻干粉 pH 在 6.31~6.49 之间，

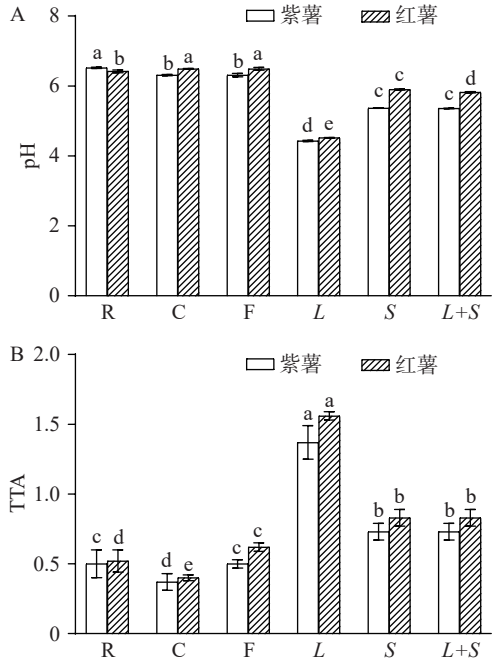


图 1 不同工艺制备甘薯全粉的 pH 和 TTA

Fig.1 pH and TTA of WSP prepared by different processes

注: 不同英文字母表示同品种不同制备工艺的甘薯全粉间的显著性差异(P<0.05); R-生全粉; C-熟全粉; F-冻干粉; *L*-植物乳植杆菌发酵生全粉; *S*-酵母菌发酵生全粉; *L*+*S*-双菌共发酵生全粉; 图 2~图 7 同。

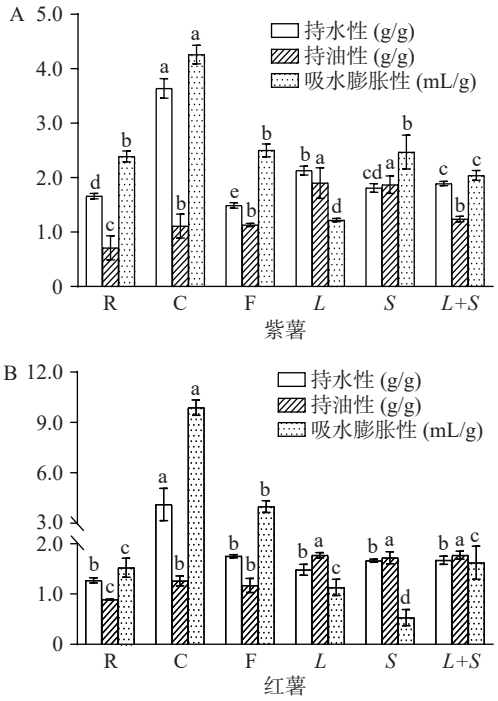


图 2 不同工艺制备甘薯全粉的持水性、持油性、吸水膨胀性

Fig.2 Water holding capacity, oil holding capacity and water swelling capacity of WSP prepared by different processes

与同品种的紫薯生全粉(pH6.52)、红薯生全粉(pH6.42)差异不明显, TTA 变化也与之相似, 这表明生制、熟制、冻干工艺对甘薯全粉的酸碱性影响较小, 且甘薯自身酸碱特性未发生明显改变。但发酵处理使两种甘薯生全粉 pH 分别显著下降(P<0.05)、TTA 也显著增加(P<0.05), 这与植物乳植杆菌和酵母菌代谢产生了大量有机酸有关。发酵甘薯生全粉 pH 在 4.42~5.90 之间, 比较同品种各菌种发酵样品, 发现植物乳植杆菌单菌发酵甘薯生全粉的 pH 降幅最大, 较其发酵前降幅均超 30%。且植物乳植杆菌单菌发酵的 TTA 最高, 约为未发酵生全粉的 3 倍, 这说明植物乳植杆菌单菌发酵产酸能力最强。刘超等[21] 同样发现了乳酸菌和酵母菌共发酵芦笋汁的总酸含量低于仅乳酸菌发酵样品的现象。共发酵过程中, 两个菌种的代谢产物相互抑制减弱了双菌共发酵效果[22]。

2.1.2 持水性、持油性和吸水膨胀性 由图 2A、图 2B 可知, 两种甘薯熟全粉持水性和吸水膨胀性均显著高于同品种其他全粉(P<0.05)。其中紫薯熟全粉持水性、吸水膨胀性为 3.64 g/g、4.26 mL/g, 较紫薯生全粉分别提高 1.19 倍、0.78 倍; 而红薯熟全粉分别为 4.12 g/g、9.88 mL/g, 较红薯生全粉提高了 2.24 倍、5.50 倍。熟制过程中高温使淀粉糊化, 分子链展开, 导致羟基等亲水基团暴露, 与水的结合能力大幅度增强[23]。而生全粉、冻干粉中的淀粉未经糊化, 结构紧密, 亲水位点暴露有限, 与水结合能力则较弱。高雪丽等[24] 研究红薯淀粉颗粒也发现经湿热处理后暴露了更多的羟基, 持水力较处理前有所提高。

两种甘薯的发酵生全粉、熟全粉和冻干粉持油性均显著高于同品种生全粉(P<0.05)。其中植物乳植杆菌发酵紫薯生全粉由 0.71 g/g 增至 1.90 g/g; 双菌共发酵红薯生全粉则由 0.89 g/g 增至 1.77 g/g, 增幅均超 2 倍。邹浩峰等[17] 研究紫薯生全粉发酵时曾指出, 持油率可能与可溶性膳食纤维含量有关。发酵过程中, 微生物分泌的淀粉酶可将淀粉部分水解为可溶性膳食纤维, 形成疏松多孔网络, 扩大了油脂物理截留空间从而增强持油性[25]。

2.1.3 冻融稳定性和凝沉性 析水率越低, 冻融稳定性越好, 样品在冷加工和贮藏过程中越稳定[23]。由图 3 可知, 两种甘薯冻干粉析水率较同品种生全粉无显著差异, 熟全粉析水率显著最高(P<0.05), 紫薯熟全粉的析水率为紫薯生全粉的 2.52 倍, 红薯熟全粉为红薯生全粉的 1.42 倍, 发酵生全粉的析水率较同品种生全粉普遍降低。综上所述, 熟全粉的冻融稳定性最弱, 而发酵生全粉冻融稳定性较生全粉增强。两种甘薯熟全粉的凝沉性较同品种生全粉显著增大(P<0.05), 其中紫薯熟全粉的凝沉性增加了 5.2%, 红薯熟全粉则增加了 23.1%。熟全粉经过高温糊化, 游离的直链淀粉在后续干燥过程中更易互相靠近、聚集, 形成网络结构, 易于凝沉[26]。而生全粉、冻干粉淀粉颗粒保持较完整, 淀粉分子间运动减弱, 则不易凝沉。发酵紫薯生全粉凝沉性较紫薯生全粉显著下降(P<0.05), 约降低 18.5%~22.4%。微生物发酵导致 pH 下降, 促进水分子与直链淀粉的亲水基团之间的氢键作用, 抑制了淀粉分子间的定向运动和聚集,

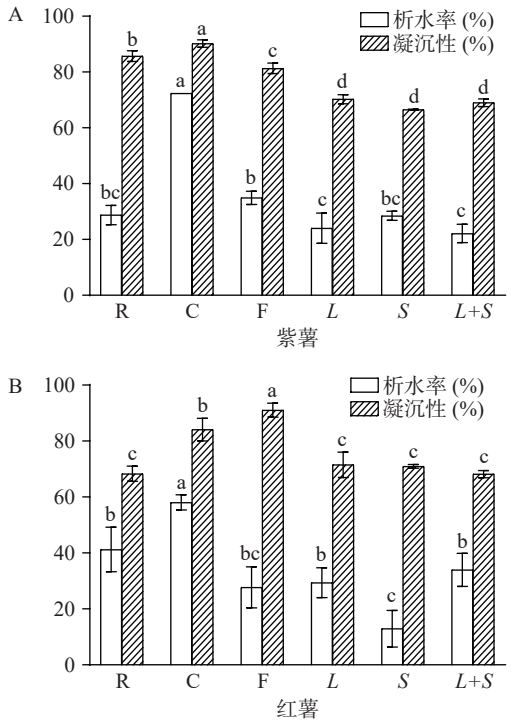


图 3　不同工艺制备甘薯全粉的析水率和凝沉性

Fig.3　Water separation rate and sinking properties of WSP prepared by different processes

降低了凝沉速率[27]。综上所述，熟全粉凝沉性、持水性强，冻融稳定性差，解冻后易吸水凝沉导致品质下降，不宜冷加工和贮藏；发酵生全粉凝沉性下降、冻融稳定性改善，可用于加工冷藏食品。

2.1.4　热力学特性　热力学特性反映了各甘薯全粉糊化的难易程度。表 2 中，相比紫薯生全粉，紫薯冻干粉 To、Tp、Tc 均升高，ΔH 增大。真空冷冻干燥对甘薯全粉晶体结构破坏较少，糊化需要的温度增大，结晶区解聚过程吸收的热量更多[28]。除了植物乳植杆菌发酵紫薯生全粉 To 较同品种的生全粉略微升高，其余发酵生全粉 To 下降，表明酵母菌、双菌共发酵使生全粉更容易糊化，而植物乳植杆菌发酵紫薯生全粉糊化需要更高的温度。发酵生全粉的 Tp、Tc 和 ΔH 均升高，表明发酵使甘薯生全粉糊化时间延长，糊化过程中结晶区解聚所需要的热量增多[29]。微生物发酵可破坏生全粉的无定形区，增加结晶区相对比例[17]。紫薯、红薯熟全粉均观察不到吸热峰，因其在加热和干燥过程中已完全糊化，晶体结构已被破坏。红薯全粉和紫薯全粉在相同工艺处理下，热特性变化不一致。相比红薯生全粉，红薯冻干粉 To、Tp、Tc 均减小，ΔH 减小。红薯生全粉发酵前后 To、Tp、Tc 和 ΔH 变化不大，其原因还需进一步探究。

表 2　不同工艺制备甘薯全粉的热特性

Table 2　Thermodynamic characteristics of WSP prepared by different processes

品种		To(℃)	Tp(℃)	Tc(℃)	ΔH(J/g)
紫薯	R	77.05±0.07^{bc}	81.55±0.07^{c}	87.30±0.14^{d}	2.69±0.03^{d}
	C	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	F	77.30±0.14^{b}	82.35±0.35^{b}	88.55±0.07^{c}	3.02±0.01^{c}
	L	77.85±0.35^{a}	83.75±0.07^{a}	89.70±0.00^{a}	3.01±0.00^{c}
	S	76.75±0.07^{c}	84.05±0.07^{a}	89.30±0.14^{b}	3.09±0.01^{b}
	L+S	76.25±0.07^{d}	83.95±0.07^{a}	89.95±0.21^{a}	3.21±0.05^{a}
红薯	R	76.90±0.00^{a}	81.55±0.07^{a}	85.60±0.14^{a}	2.71±0.12^{a}
	C	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	F	64.25±0.21^{c}	77.55±0.07^{d}	84.20±0.14^{a}	1.60±0.04^{b}
	L	76.60±0.42^{a}	81.20±0.00^{b}	86.50±0.00^{a}	2.75±0.52^{a}
	S	75.40±0.14^{b}	80.35±0.21^{c}	86.65±1.34^{a}	2.69±0.59^{a}
	L+S	75.10±0.14^{b}	80.15±0.07^{c}	86.50±0.28^{a}	3.07±0.06^{a}

注：N.D.表示未检出；不同小写字母表示同列间同品种甘薯全粉的显著性差异(P<0.05)，表3同。

2.2　功能成分与抗氧化活性评价

2.2.1　可溶性糖含量　如图 4 所示，两种甘薯的植物乳植杆菌发酵生全粉、熟全粉的可溶性糖含量显著高于同品种生全粉(P<0.05)。其中，植物乳植杆菌发酵紫薯、红薯生全粉分别提高了 1.66 倍、6.70 倍。发酵过程中，植物乳植杆菌产生了糖化酶和淀粉酶，上述酶将生全粉中的多糖类物质降解成葡萄糖、果糖和阿拉伯糖等可溶性单糖，一部分单糖用于满足植物乳植杆菌的生长代谢，另一部分在发酵体系中积累使得可溶性糖含量增加[30]。紫薯熟全粉的可溶性糖含量较紫薯生全粉提高了 99.6%，红薯熟全粉则提高了 42.0%。蒸熟过程中，熟全粉中的部分淀粉因高温转化为还原糖，使其可溶性糖含量升高。

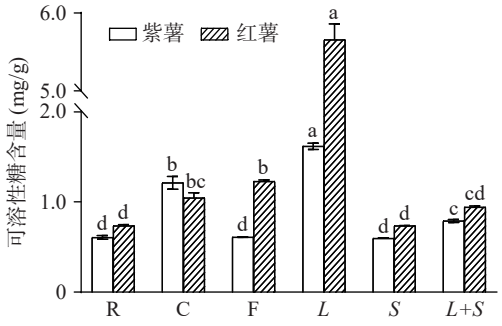


图 4　不同工艺制备甘薯全粉的可溶性糖含量

Fig.4　Soluble sugar content of WSP prepared by different processes

2.2.2　总酚含量和 DPPH 自由基清除率　由图 5A 可知，相同工艺制备的紫薯全粉总酚含量约为红薯全粉总酚含量的 2.13~6.05 倍，这与紫薯块根本身的酚类物质含量高于红薯块根有关[31]。从加工工艺差异来看，两种甘薯熟全粉、冻干粉总酚含量较同品种生全粉均有提升。紫薯熟全粉、冻干粉分别为紫薯生全粉的 1.09 倍、1.06 倍；红薯熟全粉、冻干粉分别为红薯生全粉的 1.58 倍、1.47 倍。这是因为高温破坏了甘薯细胞壁与淀粉颗粒，导致结合态酚被释放为易检测的游离态酚，而冻干避免了热敏性酚类被破坏。部分发酵方式可提高两种甘薯生全粉的总酚含量，双菌共发酵紫薯生全粉提升了 16.6%，酵母菌发酵紫薯生全粉提升了 10.7%；植物乳植杆菌发酵红薯生全粉提升了 116.8%，酵母菌发酵红薯生全粉提升

了 46.9%。曹晶晶等[30] 也发现植物乳植杆菌发酵红薯淀粉浆液的总酚含量提高了 17.8%。发酵过程中微生物合成了羧化酶、单宁酶和糖苷酶，这些酶促进了甘薯细胞壁中的酚类物质的释放[32]。

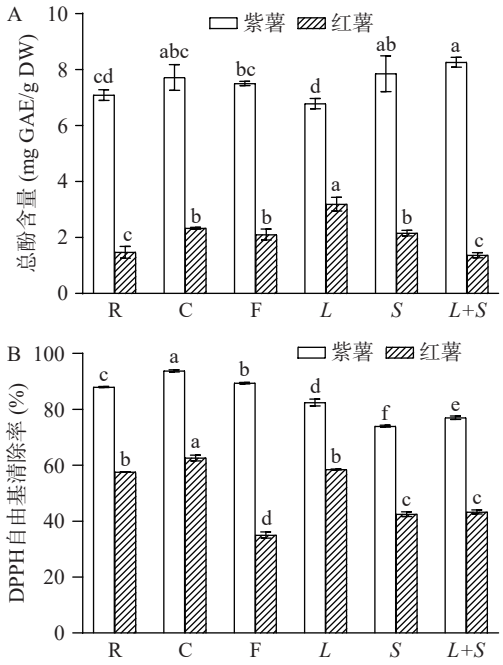


图 5 不同工艺制备甘薯全粉总酚含量和 DPPH 自由基清除率

Fig.5 Total polyphenol content and DPPH radical scavenging rate of WSP prepared by different processes

由图 5B 可知，相同工艺制备的紫薯全粉 DPPH 自由基清除率约为红薯全粉的 1.41~2.55 倍。两种甘薯熟全粉的 DPPH 自由基清除率较同品种生全粉普遍升高，紫薯熟全粉由 88.0% 增至 93.8%，红薯熟全粉由 57.6% 增至 62.6%。这是因为游离态酚与 DPPH 自由基的反应能力更强，且熟制能先灭活鲜薯中的多酚氧化酶，减少酚类的氧化损失，保留了更多高活性酚类。除了植物乳植杆菌发酵红薯生全粉较红薯生全粉 DPPH 自由基清除率无显著差异（$P>0.05$），其余两种发酵生全粉较红薯生全粉的均显著降低（$P<0.05$）。

2.2.3 紫薯全粉花青素含量 由图 6 可知，紫薯冻干粉、熟全粉的花青素含量显著高于紫薯生全粉（$P<0.05$），紫薯冻干粉花青素含量为 1.17 mg/g，是紫薯生全粉（0.22 mg/g）的 5.32 倍。这是因为低温真空环境避免了高温与氧气对花青素的分解。樊小静等[6] 也证实了真空冷冻干燥紫薯全粉的花青素含量比其他干燥方式更高。紫薯熟全粉的花青素含量为 0.84 mg/g，是紫薯生全粉的 3.82 倍。紫薯花青素多为酰基化花青素，这类花青素本身热稳定性较强，不易被高温大量破坏，且多酚氧化酶被灭活，避免了后续热风干燥环节将其分解。发酵紫薯生全粉花青素含量则较生全粉无显著差异（$P>0.05$），介于 0.24~0.26 mg/g。

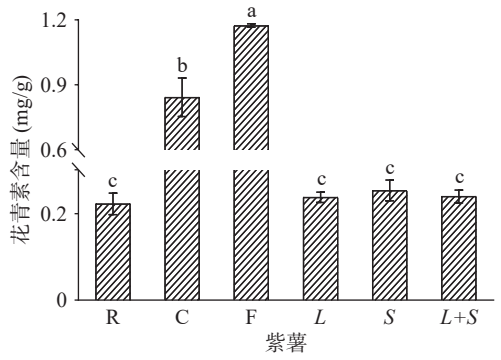


图 6 不同工艺制备紫薯全粉的花青素含量

Fig.6 Anthocyanin content of purple sweet potato powder prepared by different processes

2.3 感官鉴定

2.3.1 甘薯全粉色泽 如图 7A 所示，紫薯全粉整体呈紫红色调，红薯全粉呈橘黄色调。相比同品种生全粉，熟全粉颜色普遍加深，冻干粉颜色更接近鲜薯本色，发酵粉颜色略浅。图 7B、图 7C 中不同工艺处理的紫薯、红薯全粉色度与图 7A 相对应，熟全粉、冻干粉的 L^*值较生全粉均下降，而发酵生全粉的 L^*值均升高，这说明发酵处理提高了生全粉的亮度。紫薯熟全粉、冻干粉、发酵生全粉与生全粉相比 a^*值增大，红色调更明显。这与 pH 变化有关，紫薯花色苷在酸性介质中以红色的黄烊盐阳离子形式存在，颜色

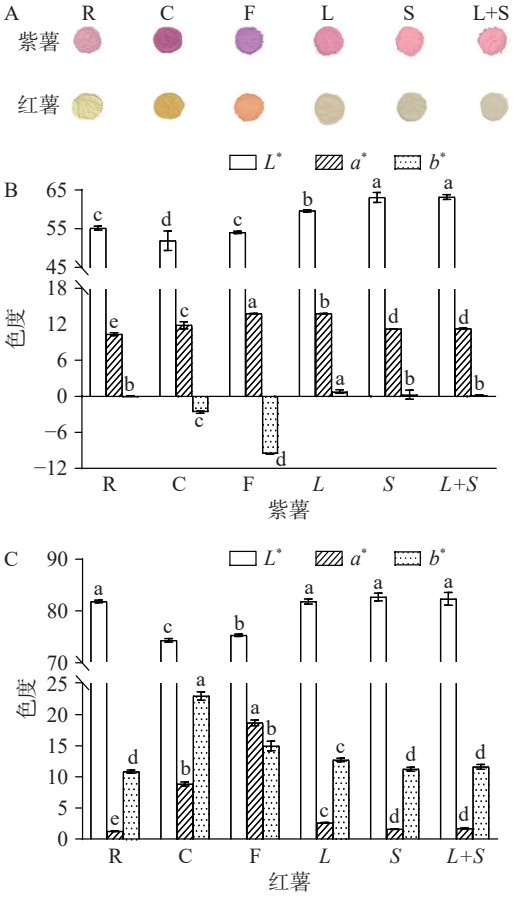


图 7 不同工艺制备甘薯全粉的色泽

Fig.7 Colors of WSP prepared by different processes

由紫色变为红紫色[33]。发酵生全粉的 pH 下降趋势更大(图 1)，故红色更明显。相比红薯生全粉，其熟全粉、冻干粉、发酵生全粉 b^*值增大，黄色调更突出。红薯颜色深浅主要由其 β-胡萝卜素含量决定，红薯熟全粉加热过程中大量 β-胡萝卜素从细胞中被释放，其色泽由浅黄色变成橙黄色。

2.3.2　感官评分　如表 3 所示，不同工艺制备的甘薯全粉感官综合评分主要受气味、色泽评分影响。两种甘薯冻干粉在气味、色泽、组织形态及综合评分上均为同品种的最高水平，总高出其余全粉 7.56%~22.54%。低温真空环境极大减少了色素的热降解，避免了香气成分的热流失，且不存在热风干燥使淀粉糊化导致的粘连或结块现象，易碾磨且粉质细腻。两种甘薯熟全粉的色泽评分均高于同品种生全粉，色泽更鲜艳。紫薯熟全粉的气味评分也高于紫薯生全粉，因其发生了温和美拉德反应或焦糖化反应，生成带“香甜”“焦香”风味的吡嗪类、醛类化合物，香气更浓郁且具层次感[34]。发酵生全粉的气味、色泽及综合评分较同品种生全粉无显著差异($P>0.05$)，表明其没有产生不良气味破坏整体品质，感官可接受程度高，有潜力成为一种能广泛应用并适于工业化生产的新型甘薯全粉。

表 3　不同工艺制备的甘薯全粉感官评分

Table 3　Sensory evaluation of WSP prepared by different processes

品种		总分(分)	气味(分)	色泽(分)	组织形态(分)
紫薯	R	79.47±3.92^{b}	64.85±2.78^{b}	80.25±5.18^{bc}	89.17±3.18^{bc}
	C	81.60±3.38^{ab}	71.67±4.49^{b}	87.50±2.23^{ab}	87.16±3.39^{bc}
	F	89.18±3.58^{a}	84.83±5.22^{a}	93.50±3.54^{a}	91.83±1.88^{a}
	L	82.02±2.64^{ab}	72.25±3.00^{b}	84.38±4.47^{b}	89.83±4.64^{bc}
	S	77.41±2.54^{b}	68.33±4.36^{b}	75.83±4.15^{c}	84.66±2.18^{b}
	L+*S*	82.91±3.71^{ab}	71.25±4.87^{b}	85.00±4.63^{b}	91.17±2.10^{a}
红薯	R	80.04±4.28^{b}	80.00±2.49^{b}	70.83±2.62^{bc}	90.37±4.05^{a}
	C	72.16±2.90^{c}	71.25±4.87^{c}	76.50±4.89^{b}	71.25±2.98^{c}
	F	88.43±1.87^{a}	87.83±4.08^{a}	90.67±4.26^{a}	91.63±3.99^{a}
	L	75.03±3.58^{bc}	75.0±4.47^{bc}	68.50±3.12^{c}	83.50±3.33^{b}
	S	74.03±3.18^{bc}	68.67±4.83^{c}	73.75±3.71^{bc}	78.25±3.81^{b}
	L+*S*	74.9±3.35^{bc}	73.75±4.87^{bc}	75.5±4.96^{bc}	81.33±1.66^{b}

3　结论

本研究系统分析了甘薯生全粉、熟全粉、冻干粉以及发酵生全粉的品质特征。结果表明，不同制粉工艺显著影响甘薯全粉的理化特性、功能特性及感官品质。熟全粉在持水性、吸水膨胀性和抗氧化活性方面表现优异，但凝沉性强、冻融稳定性相对较差，限制了其在冷冻食品中应用。冻干粉感官评分最优，花青素含量保留最好，但可溶性糖相对较低，生产成本高。甘薯生全粉生产效率高、废弃产物少，但持油性差且可溶性糖含量低，限制了其在烘焙食品中使用。与生全粉相比，*L*、*S*、*L*+*S* 三种发酵方式获得的发酵生全粉酸度增加、持油性增强、糊化焓增大、糊化时间延长，凝沉性改善，整体加工性能有所提升。其中，植物乳植杆菌发酵的产酸能力、可溶性糖含量显著升高，双菌共发酵紫薯生全粉总酚含量和感官评价显著升高。综上，各工艺制备的甘薯全粉品质各有优劣，实际应用中需结合产品功能需求精准选择。

© The Author(s) 2026. 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] 王礼群, 刘硕, 杨春贤, 等. 鲜切甘薯不同部位褐变机理差异[J]. 食品科学, 2018, 39(1): 285−290. [WANG Liqun, LIU Shuo, YANG Chunxian, et al. Mechanism of browning in different parts of fresh-cut sweet potato[J]. Food Science, 2018, 39(1): 285−290.]

[2] 钟雪婷, 张星灿, 刘建, 等. 前处理和干燥对甘薯全粉品质影响的研究进展[J]. 粮食与食品工业, 2021, 28(1): 37−41. [ZHONG Xueting, ZHANG Xingcan, LIU Jian, et al. The research progress on the influence of pretreatment and drying on the quality of whole sweet potato flour[J]. Cereal & Food Industry, 2021, 28(1): 37−41.]

[3] 赵时珊, 蔡芳, 隋勇, 等. 不同品种甘薯全粉品质特性比较[J]. 现代食品科技, 2022, 38(8): 218−228. [ZHAO Shishan, CAI Fang, SUI Yong, et al. Comparison of the quality characteristics of powder from different sweet potato varieties[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(8): 218−228.]

[4] 张凤婕, 张天语, 曹燕飞, 等. 甘薯全粉对小麦面团及馒头品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(15): 11−16,39. [ZHANG Fengjie, ZHANG Tianyu, CAO Yanfei, et al. Effect of sweet potato powder on quality of wheat dough and steamed bread[J]. Food Research and Development, 2020, 41(15): 11−16,39.]

[5] 李云龙, 董桂梅, 董吉林, 等. 不同糊化度苦荞粉理化性质和体外消化性的研究[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(3): 21−27. [LI Yunlong, DONG Guimei, DONG Jilin, et al. Physicochemical properties and *in vitro* digestibility of Tartary buckwheat flour with different degrees of gelatinization[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(3): 21−27.]

[6] 樊小静, 任广跃, 段续, 等. 不同干燥方式下紫薯全粉的物性品质及花青素含量[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(21): 160−166. [FAN Xiaojing, REN Guangyue, DUAN Xu, et al. Effects of different drying methods on physical properties, quality and anthocyanin content of purple potato powder[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(21): 160−166.]

[7] di CAGNO R, CODA R, de ANGELIS M, et al. Exploitation of vegetables and fruits through lactic acid fermentation[J]. Food Microbiology, 2013, 33(1): 1−10.

[8] CHANG Lei, DANG Yueyi, YANG Min, et al. Effects of *Lactobacillus plantarum* fermentation on the structure, physicochemical properties, and digestibility of foxtail millet starches[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 270: 132496.

[9] ISA N M, KORMIN F, IWANSYAH A C, et al. Physicochemical properties and characterization of fermented cassava flour by lactic acid bacteria[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 736(1): 012023.

[10] GALLE S, SCHWAB C, dal BELLO F, et al. Influence of *in-situ* synthesized exopolysaccharides on the quality of gluten-free sorghum sourdough bread[J]. International Journal of Food Microbiology, 2012, 155(3): 105−112.

[11] ZHANG Lin, GAO Yan, DENG Bowen, et al. Physicochemical, nutritional, and antioxidant properties in seven sweet potato flours[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 923257.

[12] 李斌斌, 李宇辉, 刘战霞, 等. 植物乳杆菌与酿酒酵母混合发

酵对红枣酒挥发性风味物质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(8): 170−179. [LI Binbin, LI Yuhui, LIU Zhanxia, et al. Effects of mixed fermentation of *Lactobacillus plantarum* and *Saccharomyces cerevisiae* on volatile flavor compounds of jujube wine[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(8): 170−179.]
[13] 王宏兹, 王凤, 黄卫宁, 等. 植物乳杆菌发酵紫薯粉对酸面团面包的抗氧化特性及品质影响[J]. 食品科学, 2012, 33(13): 40−44. [WANG Hongzi, WANG Feng, HUANG Weining, et al. Antioxidant properties of bread made from purple sweet potato powder (PSP) sourdough fermented by *Lactobacillus plantarum*[J]. Food Science, 2012, 33(13): 40−44.]
[14] 熊添, 何建军, 蔡芳, 等. 不同处理条件下麦麸化学成分及物化特性比较[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(12): 37−44. [XIONG T, HE J J, CAI F, et al. Comparison of chemical components and physicochemical properties of wheat brain treated at different conditions[J]. Food Research and Development, 2022, 43(12): 37−44.]
[15] 方东方, 蔡芳, 李少斌, 等. 野葛淀粉与木薯淀粉混粉理化特性分析[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(2): 86−94. [FANG D F, CAI F, LI S B, et al. Physicochemical properties of mixed powder of pueraria starch and cassava starch[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(2): 86−94.]
[16] 卢紫君, 蔡芳, 王少华, 等. 野葛与粉葛淀粉的结构及物化特性比较[J]. 现代食品科技, 2021, 37(8): 109−118. [LU Zijun, CAI Fang, WANG Shaohua, et al. Comparison of structures and physicochemical properties of *Pueraria lobata* (Willd.) Ohwi and *Pueraria lobata* var. *thomsonii* starches[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(8): 109−118.]
[17] 邹浩峰, 廖雨华, 黄师荣, 等. 不同生物酶协同植物乳杆菌发酵对 紫甘薯生全粉理化特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(8): 213−220. [ZOU Haofeng, LIAO Yuhua, HUANG Shirong, et al. Effects of different biological enzymes and *Lactobacillus plantarum* fermentation on physical and chemical properties of purple sweet potato raw powder[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(8): 213−220.]
[18] 王佩芬, 池源, 王丽波. 蒽酮-硫酸比色法测定南瓜籽多糖含量[J]. 食品研究与开发, 2014, 35(24): 121−125. [WANG Peifen, CHI Yuan, WANG Libo. Determination of polysaccharides in pumpkin seeds by anthrone-sulfuric acid method[J]. Food Research and Development, 2014, 35(24): 121−125.]
[19] 陈蓬凤, 梅新, 黄师荣, 等. 不同品种薯尖的总酚、总黄酮含量及抗氧化活性比较[J]. 现代食品科技, 2021, 37(3): 132−138, 15. [CHEN Pengfeng, MEI Xin, HUANG Shirong, et al. Comparison of the total phenolics, total flavonoids and antioxidant activities in potato tips of different varieties[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(3): 132−138,15.]
[20] 熊添, 蔡芳, 何建军, 等. 不同干燥工艺下紫薯全粉品质分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(6): 49−57. [XIONG Tian, CAI Fang, HE Jianjun, et al. Quality analysis of purple sweet potato flour under different drying processes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(6): 49−57.]
[21] 刘超, 毕玉平, 马德源, 等. 乳酸菌与酵母菌共发酵芦笋汁工艺优化及其风味成分分析[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(9): 128−134. [LIU Chao, BI Yuping, MA Deyuan, et al. Optimization of *Asparagus* juice co-fermented with lactic acid bacteria and yeast, and the flavor components analysis of the products[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(9): 128−134.]
[22] 廖一漠, 敖晓琳, 康海燕, 等. 传统发酵食品中乳酸菌与酵母菌互作机制研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(3): 340−346. [LIAO Yimo, AO Xiaolin, KANG Haiyan, et al. Research progress on the interaction mechanism between lactic acid bacteria and yeast in traditional fermented foods[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(3): 340−346.]
[23] 杨世雄, 张玲, 张雪梅, 等. 甘薯全粉的制备及特性研究进展[J]. 农产品加工, 2023(23): 79−83. [YANG Shixiong, ZHANG Ling, ZHANG Xuemei, et al. Research progress on the preparation and characteristics of sweet potato whole flour[J]. Farm Products Processing, 2023(23): 79−83.]
[24] 高雪丽, 张梦迪, 王梦赟, 等. 湿热处理对红薯淀粉特性的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(5): 30−36. [GAO Xueli, ZHANG Mengdi, WANG Mengyun, et al. Effect of heat-moisture treatment on the properties of sweet potato starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(5): 30−36.]
[25] LI Yinxia, NIU Li, GUO Qianqian, et al. Effects of fermentation with lactic bacteria on the structural characteristics and physicochemical and functional properties of soluble dietary fiber from prosomillet bran[J]. LWT, 2022, 154: 112609.
[26] CHANG Qing, ZHENG Baodong, ZHANG Yi, et al. A comprehensive review of the factors influencing the formation of retrograded starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 186: 163−173.
[27] 李鑫, 赵燕, 廖斌, 等. 甘薯淀粉糊透明度及凝沉性初探[J]. 食品研究与开发, 2011, 32(3): 34−37. [LI Xin, ZHAO Yan, LIAO Bin, et al. Preliminary research on clarity and retrogradation of sweet potato starch paste[J]. Food Research and Development, 2011, 32(3): 34−37.]
[28] 闫晨苗, 王玺, 段盛林, 等. 不同干燥方式对马铃薯全粉糊化特性、风味及薯粉面包品质的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(9): 34−41. [YAN Chenmiao, WANG Xi, DUAN Shenglin, et al. Effects of different drying methods on gelatinization, flavor of potato powder and quality of potato bread[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(9): 34−41.]
[29] 衣宁, 宋斌, 王一然, 等. 酵母菌与乳酸菌协同发酵对玉米面糊理化性质及其发糕品质的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(15): 77−84. [YI Ning, SONG Bin, WANG Yiran, et al. Effect of co-fermentation with yeast and lactic acid bacteria on physicochemical properties of cornmeal batter and steamed sponge cake quality[J]. Food Science, 2024, 45(15): 77−84.]
[30] 曹晶晶, 木泰华, 马梦梅. 不同乳酸菌发酵对甘薯淀粉加工浆液营养功能成分及感官特性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(18): 134−142. [CAO Jingjing, MU Taihua, MA Mengmei. Effect of fermentation with different lactic acid bacteria starter cultures on nutritional and functional components and sensory characteristics of sweet potato slurry for starch production[J]. Food Science, 2022, 43(18): 134−142.]
[31] 徐柯, 曾凡坤, 袁美, 等. 红薯叶、紫薯块根及不同时期紫薯叶中主要 活性成分含量比较[J]. 食品与机械, 2018, 34(6): 30−34. [XU Ke, ZENG Fankun, YUAN Mei, et al. Comparison of the content of main active components in sweet potato leaves, purple potato tuber and purple potato leaves of different development stages[J]. Food & Machinery, 2018, 34(6): 30−34.]
[32] PAN Long, ZHANG Cunjin, BAI Zhe, et al. Effects of different strains fermentation on nutritional functional components and flavor compounds of sweet potato slurry[J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 10: 1241580.
[33] 熊添, 张梦琦, 蔡芳, 等. 植物乳杆菌发酵紫甘薯果脯的制备工艺优化及品质评价[J]. 食品工业科技, 2026(1): 262−269. [XIONG Tian, ZHANG Mengqi, CAI Fang, et al. Optimization of preparation process and quality evaluation of purple sweet potato preserves fermented by *Lactobacillus plantarum*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026(1): 262−269.]
[34] 庞建凯, 纪执立, 沈汪洋, 等. 马铃薯煮制过程中物化特性及挥发性成分的变化[J]. 食品工业科技, 2026, 47(8): 77−87. [PANG Jiankai, JI Zhili, SHEN Wangyang, et al. Evolution of physicochemical properties and volatile compounds in potatoes during boiling[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(8): 77−87.]