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, 47(1): 262−269. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120314

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, 47(1): 262−269. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120314

· 工艺技术 ·

植物乳杆菌发酵紫甘薯果脯的制备工艺优化及品质评价

熊　添[1], 张梦琦[2], 蔡　芳[1], 施建斌[1], 隋　勇[1], 陈学玲[1], 范传会[1], 梅　新[1,*]

（1.农业农村部农产品冷链物流技术重点实验室/湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 湖北武汉 430064;
2.武汉设计工程学院食品与生物科技学院, 湖北武汉 430205）

摘　要: 研究利用植物乳杆菌发酵改善紫甘薯果脯品质。经单因素和正交试验获得植物乳杆菌发酵后渗糖紫甘薯脯（Fermented purple sweet potato preserved fruit, FPSF）并对比其与同等条件下未发酵直接渗糖紫甘薯脯（Unfermented purple sweet potato preserved fruit, UPSF）在色泽、总酸、可溶性糖、质构、水分分布、组织结构等方面的差异。结果表明，FPSF 的最佳制作工艺：2% 植物乳杆菌发酵 24 h，料液比 1∶8（g/g），40%（g/g）糖液浓度下 560 W 微波渗糖 25 min，常温浸糖 8 h，60 ℃ 烘干 140 min。上述工艺制备的 FPSF 色泽艳丽，滋味酸甜可口，且口感爽脆。与 UPSF 相比，其总酸含量提升了 1.13 倍，硬度、咀嚼性等质构指标提升了近一倍。FPSF 较 UPSF 水分流动性减弱，T_{22}（不易流动水）峰面积比例增大至 91.17%，表面水分聚集程度显著降低，组织结构更加完整和紧密。FPSF 整体感官综合评分较 UPSF 提升了约 16.77%。该研究发现为多元化果脯产品的开发及果蔬组织结构的改性提供理论基础。

关键词: 植物乳杆菌, 发酵, 紫甘薯, 果脯, 品质, 组织结构

中图分类号: TS255.5　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)01−0262−08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120314　　本文网刊:

Optimization of Preparation Process and Quality Evaluation of Purple Sweet Potato Preserves Fermented by *Lactobacillus plantarum*

XIONG Tian[1], ZHANG Mengqi[2], CAI Fang[1], SHI Jianbin[1], SUI Yong[1], CHEN Xueling[1], FAN Chuanhui[1], MEI Xin[1,*]

（1.Key Laboratory of Agricultural Products Cold Chain Logistics, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the P. R. China/Institute of Agro-Product Processing and Nuclear Agricultural Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China;
2.School of Food and Biotechnology, Wuhan Institute of Design and Engineering, Wuhan 430205, China）

Abstract: The present study aimed to enhance the quality of purple sweet potato preserves by fermentation with *Lactobacillus plantarum*. The optimized fermentation process for purple sweet potato preserved fruit (FPSF) was developed using single-factor and orthogonal experiments. Then, this study compared the differences in color, total acid, soluble sugar, texture, water distribution, and tissue structure between the FPSF and the unfermented purple sweet potato preserved fruit (UPSF) directly soaked in sugar under the same conditions. The results revealed the optimal production process of FPSF was as follows: fermentation with 2% *L. plantarum* for 24 h, solid-liquid ratio of 1∶8 (g/g), microwave sugar-soaking at

收稿日期: 2024−12−26

基金项目: 武汉市科技特派员“产学研”专项项目:“基于甘薯生全粉的营养健康型馒头加工预制粉研发及产业示范”（2023110201030677）;湖北省科技厅科技服务企业人才项目:“甘薯全质化利用技术创新及新产品创制”（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。

*** 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。

560 W for 25 min in a 40% (g/g) sugar solution, soaking in sugar at room temperature for 8 h, and drying at 60 ℃ for 140 min. Findings indicated FPSF had a bright color, a sweet and sour taste, and a crisp texture. Compared with UPSF, its total acid content increased by 1.13 times, and texture indexes such as hardness and chewiness nearly doubled. The water mobility of FPSF was lower than that of UPSF. The proportion of the peak area of T_{22} (immobile water) increased to 91.17%. The degree of surface water aggregation decreased significantly, and the tissue structure became more complete and compact. The overall sensory comprehensive score of FPSF was approximately 16.77% higher than that of UPSF. The findings of this study provide a theoretical basis for the development of diversified preserved fruit products and the modification of the tissue structure of fruits and vegetables.

Key words: *Lactobacillus plantarum*; fermentation; purple sweet potato; preserves; quality; tissue structure

紫甘薯营养丰富且加工利用广泛，以其为原料制成的紫甘薯果脯，现已成为一款热门的健康食品[1−3]。市场销售的果脯多以传统工艺进行制作，所使用的添加剂种类多、护色剂硫残留量高，危害人体健康，且含糖量普遍高于 50%，无法满足消费者对健康食品的减糖需求[4]。紫甘薯中淀粉含量高，加热糊化会阻碍果脯加工过程中的渗糖[5−6]。而糊化淀粉的老化回生又影响紫甘薯果脯的口感、透明度和软化度[7]。含糖量约为 40% 的紫甘薯果脯由于降低了渗糖液浓度，存在渗糖速度慢、外形不够饱满、贮藏期短等缺点，需要一些辅助措施来加速渗糖[8]。降低含糖量的紫甘薯果脯的制作工艺亟需优化和改良。

目前已有不少学者对紫甘薯果脯的制作工艺进行了改良，如潘真清[9] 通过预渗透处理缩短了果脯的干燥时间；张莹丽等[10] 以柑橘和紫甘薯为原料通过真空干燥制作了酸甜可口的橘汁紫甘薯果脯；杜连启等[11] 则以紫甘薯和山楂为原料，通过工艺参数优化，研制出含糖量低、别具风味、营养丰富的复合薯脯。但是上述研究多停留在简单工艺或配方的重组，并未尝试将微生物发酵等技术手段应用于果脯发酵，更未对果脯整体色泽、质构等方面的变化进行深入探究。发酵能抑制腐败菌和一般病原菌的生长，也能提高原有的未发酵食品的营养价值，在食品发酵后，其原来的色泽、风味都会有所改变[12]。有学者研究表明，植物乳杆菌发酵活性高、产酸强、具有抑菌防腐功能，是一株良好适用于紫甘薯发酵的乳酸菌[13]。将微生物发酵技术应用在果脯制作中有助于改善风味与口感，提高营养价值，延长保质期，提升生产效率与质量稳定性，还能满足市场多元化需求。

为在尽可能少使用添加剂且降低渗糖液浓度的前提下解决紫甘薯果脯护色和渗糖难题，本研究通过植物乳杆菌发酵产酸达到护色效果，并利用酸热条件促进淀粉转化成糖加速果脯的渗糖，进而改善紫甘薯果脯的风味、口感，缩短干燥时间，此外植物乳杆菌发酵也使食品的感官性能、营养价值进一步提高，为后续开发一种安全健康且风味多元的紫甘薯果脯提供研究方向和参考依据。研究还对比分析了植物乳杆菌发酵后渗糖果脯（Fermented purple sweet potato preserved fruit, FPSF）和未发酵直接渗糖果脯（Unfermented purple sweet potato preserved fruit, UPSF）在色泽、质构、总酸、可溶性糖等方面的差异，并利用石蜡切片、核磁共振技术等手段对比分析两种果脯在组织结构、水分分布等方面的区别，为深入研究发酵型风味果脯色泽及组织结构提供技术支撑。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

紫甘薯（日本凌紫）　湖北根聚地农业发展股份有限公司；植物乳杆菌 Lp90（1000 亿 CFU/500 g）　江苏微康生物科技有限公司；白砂糖　太古糖业有限公司；Faa 植物专用固定液　北京兰杰柯科技有限公司；柠檬酸（食品级）　郑州苍宇食品化工有限公司；氯化钙（食品级）、D-异抗坏血酸钠（食品级）　河南万邦实业有限公司；硫酸铜、酒石酸钠钾、氢氧化钠等试剂均为国产分析纯。

722N 可见分光光度计　上海仪电分析仪器有限公司；TA XTPLUS 质构仪　英国 Stable Micro Systems 公司；MZ-2070EGZ 微波炉　青岛胶南海尔微波制品有限公司；SPX-250B-Z 培养箱　上海博讯实业有限公司医疗设备厂；DHG-9123A 电热鼓风干燥箱　上海精宏实验设备有限公司；GJ-69 切片机　拜杰家具公司；HENSI-GZ-01 超净工作台　深圳市蓝思净化科技有限公司；EOS700D 数码照相机　日本佳能公司；NMI20-025V-I 核磁共振成像分析仪　苏州纽迈分析仪器股份有限公司；CR-10plus 色差计　日本柯尼卡美能达控股公司；S210-B pH 计　瑞士梅特勒托利多公司；Nikon Eclipse CI 正置光学显微镜　日本尼康公司。

1.2　实验方法

优化植物乳杆菌发酵紫甘薯果脯的制备工艺，对比最佳工艺条件制备的植物乳杆菌发酵紫甘薯果脯、未发酵紫甘薯果脯和新鲜未处理紫甘薯的水分、总酸、可溶性糖、色泽、外观、感官评分、组织结构、质构等指标。

全文中，新鲜未处理紫甘薯（Purple sweet potatoes）用 PSP 表示，未发酵紫甘薯果脯（Unfermented purple sweet potato preserved fruit）用 UPSF 表示；植物乳杆菌发酵紫甘薯果脯（Fermented purple sweet potato preserved fruit）用 FPSF 表示。

1.2.1　样品的制备和检测

1.2.1.1　PSP 的制备工艺　挑选个头适中、无虫蛀和

病斑的紫甘薯，用流动的水将其表面的污泥清洗干净；切除表皮后，将紫甘薯切片至 4 mm 厚，使用模具整型成 2.0 cm×2.0 cm 圆形形状。

1.2.1.2 UPSF 的制备工艺 参考隋勇等[4]的方法，略作调整。工艺流程：清洗切片→护色硬化→清洗→微波渗糖→浸糖→烘干。

清洗切片处理条件同 1.2.1.1。

护色硬化：室温下，将紫甘薯片放入无硫护色硬化液中浸泡 10 min，紫甘薯和护色硬化液的质量比为 1∶8(g/g)，每 1000 mL 护色硬化剂中含 4.0 g 柠檬酸、5.0 g 氯化钙及 0.5 g D-异抗坏血酸钠。

清洗：洗掉紫甘薯片表面的护色硬化液。

微波渗糖：将紫甘薯与 40%(g/g)浓度糖液按 1∶8(g/g)的比例放入微波炉中以 560 W 功率进行微波渗糖 25 min。

浸糖：将紫甘薯按 1∶8(g/g)的比例放入 40%(g/g)浓度糖液常温浸糖 8 h。

烘干：常温浸糖结束后，将紫薯果脯放入 60 ℃的烘箱中烘 140 min。

1.2.1.3 FPSF 的制备工艺 工艺流程：清洗切片→护色硬化→清洗→灭菌→接种发酵→微波渗糖→浸糖→烘干。

清洗切片、护色硬化、清洗、微波渗糖、浸糖、烘干等处理条件同 1.2.1.2。

灭菌：将紫甘薯片、无菌水及用铝箔袋包装密封的植物乳酸杆菌粉放在超净工作台上，紫外照射 30 min。

接种发酵：在洁净环境下配制 2% 植物乳杆菌发酵液（2×10^8 CFU/mL）。将紫甘薯和发酵液按 1∶8(g/g)的比例，放入 37 ℃的培养箱中发酵 24 h。

1.2.2 FPSF 工艺优化

1.2.2.1 FPSF 单因素实验 a.微波时间：将微波时间设置为 10、15、20、25、30 min，其他条件同 1.2.1 中 FPSF 的制备工艺。

b.糖液浓度：将糖液浓度设置为 20%、30%、40%、50%、60%，其他条件同 1.2.1 中 FPSF 的制备工艺。

c.浸糖时间：将浸糖时间设置为 2、4、6、8、10 h，其他条件同 1.2.1 中 FPSF 的制备工艺。

d.烘干时间：将烘干时间设置为 60、80、100、120、140 min，其他条件同 1.2.1 中 FPSF 的制备工艺。

1.2.2.2 FPSF 正交试验 在单因素实验的基础上，设计 $L_9(3^4)$四因素三水平的正交试验，因素水平见表 1。

1.2.3 紫薯果脯的感官评分 由 20 名（男女各 10 人，年龄在 20~40 岁间）经过感官评定培训的专业人员组成评定小组，评判标准见表 2，所有测定实验重复三次取平均值[14]。

表 1 正交试验设计因素水平

Table 1 Factor level of orthogonal experimental design

水平	A微波时间（min）	B糖液浓度（%）	C常温浸糖时间(h)	D烘干时间（min）
1	15	20	6	100
2	20	30	8	120
3	25	40	10	140

表 2 紫甘薯果脯的感官评分标准

Table 2 Sensory scoring standard of preserved purple sweet potato

指标	评分标准	分数	权重
色泽	色泽鲜艳、呈现诱人的红宝石色	86~100	20%
	色泽过于黯淡或鲜艳，部分丧失产品特点	60~85	
	色泽发黑或泛白，完全失去产品特征	0~59	
外观	外观平滑、无断裂、不流糖、不粘手	86~100	20%
	外观平滑、略有粘手	60~85	
	外观不平滑、粘手、有收缩现象	0~59	
风味	风味协调、酸甜适中	86~100	30%
	风味一般、略甜或略酸	60~85	
	风味一般、甜味偏重或酸味偏重	0~59	
组织形态	质地均匀一致、口感细腻、弹性、韧性适中	86~100	30%
	质地均匀、任性过大、有嚼劲	60~85	
	质地不均匀、略感粗糙	0~59	

1.2.4 水分、总酸和可溶性糖 参照 GB 5009.3-2016《食品中水分的测定》(直接干燥法)测定水分含量。参照 GB 12456-2021《食品中总酸的测定》(第一法：酸碱指示剂滴定法)、NY/T 2742-2015《水果及制品可溶性糖的测定 3, 5-二硝基水杨酸比色法》测定样品总酸和可溶性糖含量。

1.2.5 外观和色泽 样品放入小型遮光摄影棚内进行外观照片采集。全自动色差计校准后于室温下测定样品正反面的明度(L^*)、红绿度(a^*)、黄蓝度(b^*)，每组样品至少测定 6 次。

1.2.6 水分分布 参照 SHI 等[15−16]的方法，略作修改后进行 T_2 采集、反演及核磁成像。样品的测试条件：核磁共振扫描(NMR)分析，主频 SF=20 MHz，偏移频率 O1=614965.77 Hz，90°脉冲宽度 P1=9.00 μs，180°脉冲宽度，P2=18.00 μs，PRG=3，回波时间 TE=0.250 ms，采样点数 TD=1024，采样频率 SW=100.00 kHz，重复采样等待时间 TW=1600.00 ms，回波个数 NECH=6400，Peak Offset=0.000 ms，PhaseCount=1，RFD=0.080 ms，RG1=20.0 db，DRG1=3，DR=1，重复采样次数 NS=24。每个处理测试 3 个重复。核磁成像使用纽迈成像测定程序，放入标准水膜校准后再放入样品，调整参数 TR 为 500 ms，TE 为 20 ms，调整参数 Slice Width 为 5 mm，Slice gap 为 0.5 mm，点击 Test RG 使条带数刚好覆盖样品，调整参数 optimize，选择 test RG 中峰顶点最高的相应条带，修改 average 为 3，点击 3-Scan，开始测试。使用纽迈核磁共振图像处理软件进行伪彩成像。

1.2.7　组织结构　参考张莉会等[17]的方法，略作修改后进行实验。将紫甘薯组织浸泡于 Faa 植物专用固定液中 24 h 以上，取出后修剪平整，经脱水、石蜡包埋、切片、脱蜡至水等步骤后再经番红和固绿先后染色脱色、封片等系列处理后，进行白光平扫和图像采集。

1.2.8　质构　使用质地多面剖析测试模式通过二次压缩法测定其质构，采用 P/36R 平底柱形探头，触发点负载 5.0 g、测试速率 0.50 mm/s，两次压缩间停顿 5 s，受压形变 35%。每组实验重复测定 6 次以上，去除异常数据后求平均值。

1.3　数据处理

所有实验结果都重复三次以上，实验数据经 Microsoft Excel（office2019）处理后，用 SPSS 22.0 分析差异显著性，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。Origin 2021b 作图，图像分析软件采用 Caseviewer 2.0。

2　结果与分析

2.1　单因素实验结果与分析

由图 1 可以看出，随着微波时间、糖液浓度、浸糖时间、烘干时间的增加，感官评分均呈现出先增加后减小的变化趋势。由图 1a 可知最适微波时间在 20 min。微波时间过短，糖液未完全渗入，果脯饱满度不足、甜度过低；而微波时间过长，果脯颜色暗沉，质地软烂，容易出现返砂流糖，甚至焦糊化[18−19]。由图 1b 可知最适渗糖液浓度在 30%，桑田[20]研究发现黑莓果脯微波渗糖时最佳糖液浓度也是 30%。渗糖液浓度过低导致紫甘薯果脯渗糖不完全；而渗糖液浓度过大，甜味将掩盖紫甘薯原本风味，且导致整体感官滋味不协调，含糖量偏高还会出现返砂现象[11]。由图 1c 可知最适浸糖时间为 8 h。渗糖时间不足时，果脯干瘪不够饱满，风味差，难以保藏；常温浸糖时间过长，会导致果脯过度软烂甜腻，失去紫甘薯原有的风味[21]。图 1d 可看出，最适烘干时间为 120 min。烘干时果脯内部的水分朝表面逐渐移动扩散，烘干时间过短，果脯水分含量过高，嚼劲不够；烘干时间过长，紫甘薯果脯表层已经硬化，色泽暗淡、口感差[8]。

2.2　正交试验结果与分析

2.2.1　正交试验结果　由表 3 知影响 FPSF（植物乳杆菌发酵紫甘薯果脯）感官评分因素重要性顺序为：A（微波时间）>B（糖液浓度）>C（常温浸糖时间）>D（烘干时间）。直观分析可知，FPSF 的最佳因素水平组合为：$A_3B_3C_2D_3$，即微波时间为 25 min、糖液浓度为 40%、常温浸糖时间为 8 h、烘干时间为 140 min。而在 9 个实际处理中，因素水平组合 $A_3B_3C_2D_1$ 所得紫甘薯果脯感官评分 84.83±0.24 分为最高，但极差分析得到的最佳因素水平组合并未在所实施的 9 个正交试验中。为考虑优化条件的再现性，对所得最佳因素水平组合进行三次重复验证实验，此配方下制得的产品的综合评分结果为 87.00±0.50 分，获得的 FPSF 色泽鲜艳、外观完整、风味协调、酸甜适中、质地均匀。

表 3　$L_9(3^4)$正交试验设计及优化结果
Table 3　$L_9(3^4)$ Orthogonal experimental design and optimization results

试验号	A微波时间（min）	B糖液浓度（%）	C常温浸糖时间（h）	D烘干时间（min）	感官评分（分）
1	15	20	6	100	81.83±0.24
2	15	30	8	120	82.83±0.12
3	15	40	10	140	82.67±0.31
4	20	20	8	140	82.75±0.35
5	20	30	10	100	82.58±0.51
6	20	40	6	120	83.75±0.20
7	25	20	10	120	83.00±0.20
8	25	30	6	140	84.50±0.71
9	25	40	8	100	84.83±0.24
k_1	82.44	82.53	82.97	83.08	
k_2	83.03	83.31	83.47	83.19	
k_3	84.11	83.75	83.14	83.31	
R	1.67	1.22	0.50	0.22	
主次顺序	A>B>C>D				
验证实验	最佳因素水平组合$A_3B_3C_2D_3$				87.00±0.50

2.2.2　方差分析　由表 4 可看出，A（微波时间）、B（糖液浓度）、C（常温浸糖时间）和 D（烘干时间）的显著性 P<0.05，说明四因素对实验结果均有显著影响。其中 A 和 B 的显著性 P<0.01，说明因素的变化对实验结果影响极显著，因此在四个因素中，微波时间和糖液浓度为最主要的影响因素。最终确定正交试验优化得到 FPSF 最优配方组合为：$A_3B_3C_2D_3$，即

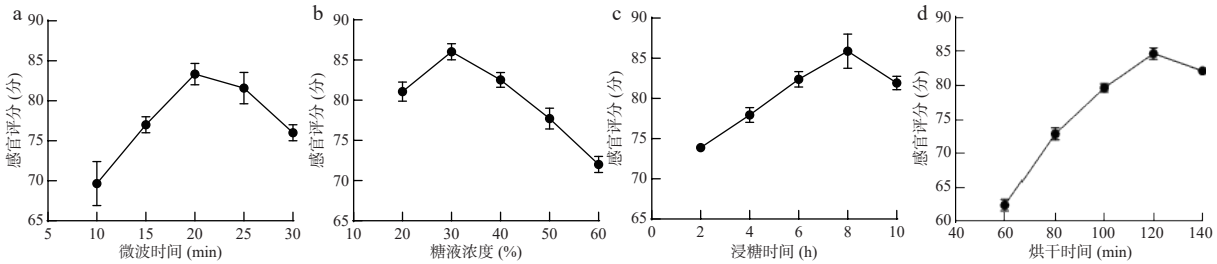


图 1　单因素实验结果
Fig.1　Results of the single factor experiment

微波时间 25 min、糖液浓度 40%、常温浸糖时间 8 h、烘干时间 140 min。

表 4 方差分析

Table 4 Analysis of variance

方差来源	离差平方和	自由度	均方	*F*值	*P*值	显著性
A	12.88	2	6.44	32.34	0.00	**
B	8.50	2	4.25	21.35	0.00	**
C	2.72	2	1.36	6.84	0.01	*
D	1.77	2	0.88	4.44	0.03	*
误差	3.58	18	0.20			

注: *表示显著(P<0.05), **表示极显著(P<0.01)。

2.3 植物乳杆菌发酵紫甘薯果脯品质评价

2.3.1 植物乳杆菌发酵对紫甘薯果脯基本成分的影响 由图 2a 可知, UPSF 和 FPSF 的水分含量显著低于 PSP(P<0.05)。FPSF 的水分含量和 UPSF 同样存在显著性差异(P<0.05), 相较于 UPSF, FPSF 水分含量由 27.80 g/100 g 提高到 30.19 g/100 g, 提升了 8.60%, FPSF 的持水性更强。图 2b 中, 总酸含量: PSP<UPSF<FPSF。由于植物乳杆菌发酵后产生了大量乳酸等有机酸[22], 使得 FPSF 总酸含量较 UPSF 由 1.19 mg/g 提高至 2.53 mg/g, 提升了 1.13 倍, 其具有明显的乳酸风味。由于水分损失造成的浓缩效应, FPSF 和 UPSF 可溶性糖含量显著高于 PSP (P<0.05), 而 FPSF 和 UPSF 可溶性糖含量虽存在显著差异(P<0.05)但差距较小。有文献报道了类似结果, 发酵初期, 乳酸菌在自身酶系作用下将多糖降解, 造成发酵液中还原糖含量的小幅上升, 随后由于乳酸菌活动增强, 乳酸菌利用还原糖进行生长代谢消耗碳源后生成乳酸及其他代谢产物, 导致还原糖持续减少, 最终趋于平衡[23]。

2.3.2 植物乳杆菌发酵对紫甘薯果脯色泽的影响 由图 3a 可知, FPSF 较 UPSF 颜色更加鲜红明亮, 外观更加饱满。图 3b 中 FPSF 亮度(L^*=28.27±1.74)、红绿度(a^*=20.44±0.95)、黄蓝度(b^*=2.86±0.21)均显著高于 UPSF(L^*=20.89±0.53、a^*=6.19±0.83、b^*=−2.73±0.35), 色泽明亮且整体颜色明显偏向于红色和黄色等颜色饱和度高的暖色调。FPSF 在加工过程中, 其所含的花色苷会随着温度和 pH 的提高, 发生降解及结构转化, 导致颜色产生变化[24]。一方面, 高温会加速酶促褐变反应和色素热降解作用, 导致果脯色泽劣化; 另一方面, 温度通过改变发酵过程中微生物菌群结构, 间接影响 FPSF 色泽[25]。植物乳杆菌发酵产生有机酸等代谢产物, 这些酸类物质改变了紫甘薯果脯生产环境的 pH, 在溶液介质中, 花色苷随 pH 的变化而发生结构上的转换, 导致果脯的色泽发生改变[26]。植物乳杆菌发酵液使 FPSF 处于酸性条件下, 紫甘薯所含的花色苷在偏酸性介质中主要以红色的黄烊盐阳离子形式存在, 颜色由紫色变为红紫色[27−28]。

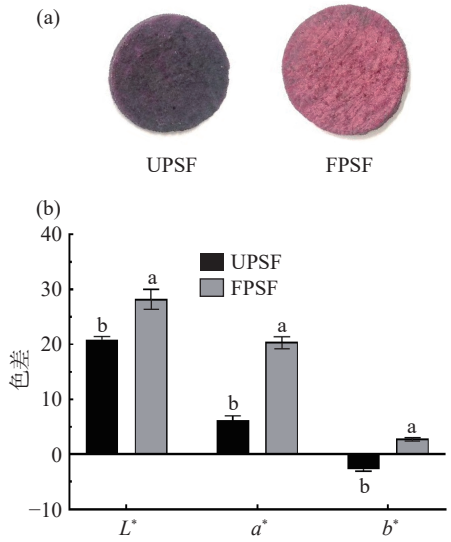


图 3 UPSF 和 FPSF 间色泽差异的比较与分析

Fig.3 Comparison and analysis of the color difference between UPSF and FPSF

注: (a)UPSF 和 FPSF 的外观, (b)UPSF 和 FPSF 的色泽。

2.3.3 植物乳杆菌发酵对紫甘薯果脯组织结构的影响 图 4a 中 PSP 横向弛豫时间 T_{23}(自由水)峰面积最大, 占整体比例为 69.98%, T_{22}(不易流动水)峰面积比例其次, 所占比例为 29.67%, T_{21}(结合水)峰面积最小, 所占比例仅为 0.35%。PSP 因细胞结构完整未遭受任何破坏, 自由水 T_{23} 大量存在于细胞的液泡、原生质和细胞间隙中。UPSF 和 FPSF 的 T_2 明显缩短, 出现了各峰向左移的现象, 说明紫甘薯在加工过程中水分的流动性逐渐减弱[29]。当 PSP 经发

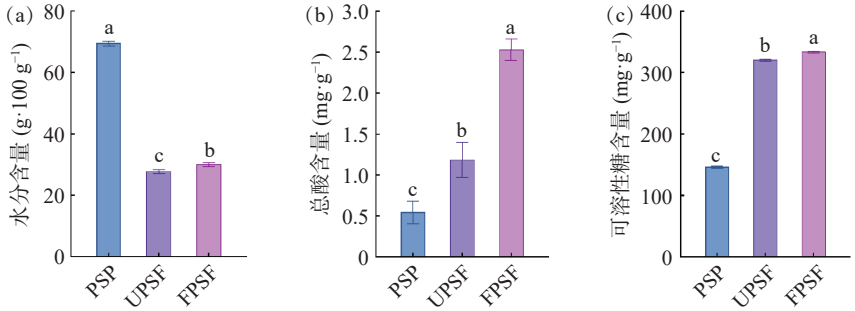


图 2 PSP、UPSF 和 FPSF 的基本成分

Fig.2 Basic components of PSP, UPSF, and FPSF

注: (a)水分含量, (b)总酸含量(以乳酸计), (c)可溶性糖含量。图上标注不同小写字母表示差异显著(P<0.05), 图 3、图 4、图 6 同。

酵、渗糖和烘干等制作步骤后，内部细胞间隙变小，自由水大量散失，组织细胞间的结合力变大，使不易流动水含量大幅上升[30−31]。在图 4b 中 UPSF 的 T_{23} 峰面积最大（$A_{总}$=2278.52），所占比例为 87.55%；FPSF 的 T_{22} 峰面积最大（$A_{总}$=5635.49），所占比例高达 91.17%；这说明 FPSF 水分流动性差，细胞完整程度和持水性能更好。图 4c 中深蓝色的信号代表低水分信号，深红色的信号代表高水分信号[32]。PSP 红色信号致密分散，说明水分分布均匀；UPSF 红色信号广泛大量分布，呈中心聚集状，说明表面水分高且多聚集分布；而 FPSF 红色信号从中间逐渐向边缘分布，说明水分由内向外流失，且表面水分呈部分聚集。水分分布情况通常与组织结构相关，组织结构越完整对水分的束缚能力越强[33]，表面水分较少无法自由聚集，由此可推断组织结构完整程度排序依次为：PSP>FPSF>UPSF。

图 5a 可以清晰观测到 PSP（未发酵）具有完整的细胞组织形态，细胞膜和细胞壁完整无缺，且呈明显紧密蜂窝状排列。图 5b 中 UPSF（渗糖后）因微波浸糖使组织细胞内部水分汽化、迁移，形成了无数微孔道，导致细胞壁结构破损严重，造成细胞内溶质大量流出，间隙变大，排列分散疏松，已无明显的排列状态[34]。图 5c 中 UPSF（烘干后）则可更加明显观测到水分流失后细胞壁破裂和糖液渗入的情况。而图 5d 中 FPSF（发酵后）组织结构保存完整，部分细胞质流出，保持蜂窝状排列。图 5e 中 FPSF（渗糖后）细胞壁组织结构依然完整，细胞质流出后，糖液渗入。图 5f 中 FPSF（烘干后）细胞质流出，细胞壁依然完整，与发酵后的组织结构保持一致。上述结果可看出烘干后 FPSF 较 UPSF 组织结构更加完整和紧密。这可能是由于发酵过程中产生的代谢产物改变了细胞内的成分和结构，使之发生了有利于保持细胞形态的改变，或代谢产物与细胞壁成分发生反应，形成一些新的复合物，增强了细胞壁的强度和稳定性[35]。

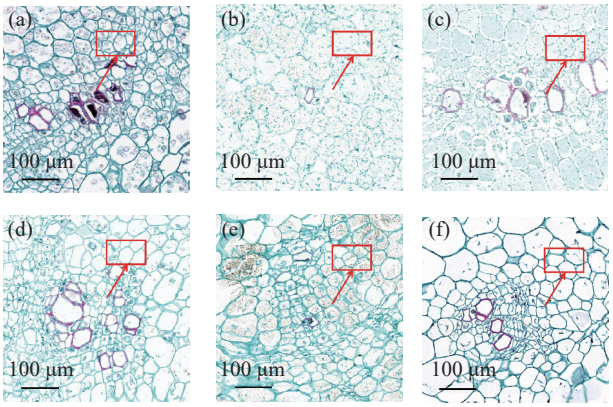


图 5　组织切片扫描图（20.0×）

Fig.5　Scanning of tissue sections (20.0×)

注：(a)PSP（未发酵），(b)UPSF（渗糖后），(c)UPSF（烘干后），(d)FPSF（发酵后），(e)FPSF（渗糖后），(f)FPSF（烘干后）。

由表 5 可知，FPSF 的硬度、回复性、内聚力、咀嚼性数值较于 UPSF 均具有显著性差异（P<0.05），而两者间粘力和弹性值无显著性差异（P>0.05）。现有研究多从不同的渗糖方式对果脯的质构影响进行研究，如胡翔等[36] 对比常压、超声、微波、真空渗糖方式，发现微波渗糖制得的蓝莓果脯的硬度、弹性、咀嚼性均高于其他三种渗糖方式制得的蓝莓果脯（P<0.05），关于发酵对紫甘薯果脯质构影响的研究鲜有报道。从本实验数据来看，经植物乳杆菌发酵后，硬度、咀嚼性数值均提升了一倍左右，发酵后的果脯组织形态更加完整、致密、有嚼劲。

2.3.4　植物乳杆菌发酵对紫甘薯果脯感官评分的影响　由图 6 可以看出，FPSF 的色泽、外观、风味、组织形态四项指标评分均高于 UPSF。FPSF 的色泽评分较 UPSF 提升约 50%，色泽更加鲜红明艳呈现诱人的红宝石色。FPSF 饱满完整，平滑、无断裂，其外

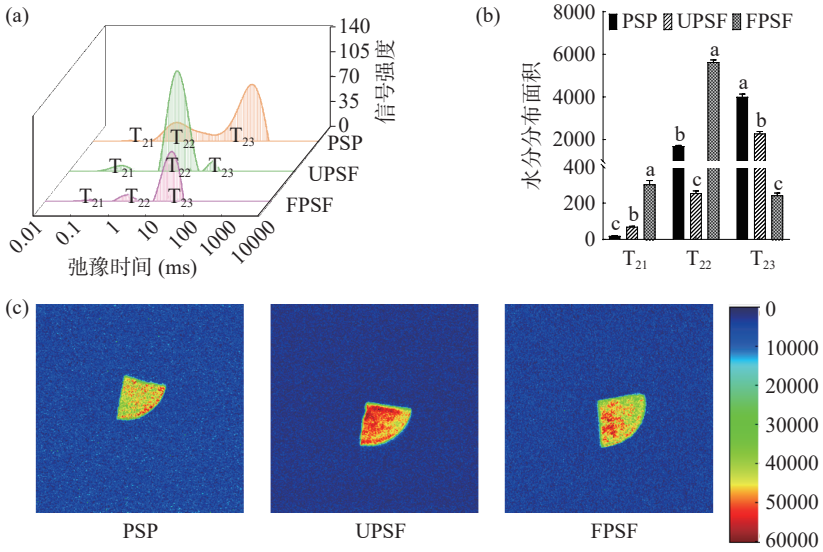


图 4　PSP、UPSF 和 FPSF 水分分布情况

Fig.4　Moisture distribution of PSP, UPSF and FPSF

注：(a)核磁共振横向弛豫时（T_2）反演谱图，(b)PSP、UPSF 和 FPSF 水分分布面积，(c)核磁共振弛豫时间和伪彩成像。

表 5 UPSF 和 FPSF 的质构

Table 5 Texture of UPSF and FPSF

质构指标	UPSF	FPSF
硬度(g)	9187.05±756.41[b]	17686.42±1659.87[a]
粘力(g)	−9.16±3.44[a]	−8.32±3.41[a]
回复性(%)	60.27±1.83[b]	73.42±2.41[a]
内聚力	0.89±0.01[b]	0.91±0.01[a]
弹性(%)	99.62±0.55[a]	98.00±1.18[a]
咀嚼性	8022.11±832.79[b]	15474.36±874.61[a]

注:同行标注不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

观评分较 UPSF 有所提升。在经发酵后产生大量的乳酸使 FPSF 带有酸味,改善了 UPSF 的风味。有研究证明,发酵能减少醛类物质带来的不良风味,同时增加醇酯类等典型香气物质的含量,赋予特有的香气,改善风味[36]。UPSF 口感软绵,没有嚼劲,而 FPSF 弹性、韧性适中,具有良好的咀嚼度。UPSF 综合评分 74.50±0.43 分,FPSF 的综合评分较其提升了约 16.77%,达 87.00±0.50 分。

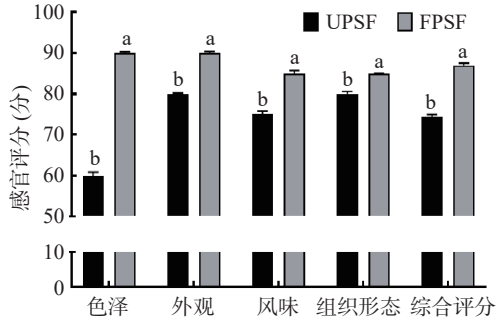


图 6 紫甘薯果脯的感官评分

Fig.6 Sensory scores of preserved purple sweet potato

3 结论

本研究利用植物乳杆菌发酵解决了传统紫甘薯果脯色泽黯淡,风味、口感单一等缺陷,经单因素实验及正交试验确定 FPSF 的最佳制作工艺:紫甘薯护色硬化灭菌后,接入 2% 植物乳杆菌发酵 24 h 后,按 1∶8(g/g)料液比用 40% 糖液浓度进行微波渗糖,微波功率 560 W、微波时间 25 min,以 40% 糖液浓度常温浸糖 8 h 后 60 ℃ 烘干 140 min。FPSF 色泽鲜艳呈偏红紫色,别具乳酸风味,口感爽脆且具有韧性。与 UPSF 相比,感官综合评分提升了约 16.77%,硬度、咀嚼性均提升了一倍左右,水分流动性降低,且细胞完整程度和持水性能更好。

目前,已有的发酵果脯研究成果多集中在功能和风味上,本研究发现植物乳杆菌发酵对紫甘薯果脯的色泽及组织结构具有显著影响,烘干后 FPSF 较 UPSF 组织结构更加完整和紧密,其作用机理仍待进一步分析挖掘。研究结果为后续开发安全健康且风味多元的新型果脯产品及果蔬组织结构的改性提供研究方向和参考依据。

© 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] ZHU Shunshun, SUN Hongnan, MU Taihua, et al. Preparation of cellulose nanocrystals from purple sweet potato peels by ultrasound-assisted maleic acid hydrolysis[J]. Food Chemistry, 2023, 403: 134496.

[2] 张婷, 陈小伟, 张琪, 等. 紫薯功能性与其食品开发研究进展[J]. 食品工业科技, 2018, 39(13): 315−319,324. [ZHANG Ting, CHEN Xiaowei, ZHANG Qi, et al. Research progress of functional and product development of purple sweet potatoes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(13): 315−319,324.]

[3] 熊添, 梅新, 蔡芳, 等. 一种紫薯果脯、发酵饮料及其联产制备的方法: 湖北省: CN202210279468.3[P]. 2023-05-12. [XIONG T, MEI X, CAI F, et al. A method for the joint production of purple sweet potato preserves and fermented beverage: Hubei Province: CN202210279468.3[P]. 2023-05-12.]

[4] 隋勇, 施建斌, 蔡沙, 等. 响应面法优化低糖甘薯果脯制作工艺[J]. 食品工业, 2021, 42(5): 83−87. [SUI Yong, SHI Jianbin, CAI Sha, et al. Optimization of processing conditions for low-sugar preserved sweet potato using response surface methodology[J]. The Food Industry, 2021, 42(5): 83−87.]

[5] WANG Honglu, YANG Qinghua, FERDINAND U, et al. Isolation and characterization of starch from light yellow, orange, and purple sweet potatoes[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 160: 660−668.

[6] SUN Hongrui, FAN Jieying, TIAN Zhigang, et al. Effects of treatment methods on the formation of resistant starch in purple sweet potato[J]. Food Chemistry, 2022, 367: 130580.

[7] 张立彦, 芮汉明, 潘柯依. 一种低糖板栗果脯及其生产方法: 广东省: CN201010524798.1[P]. 2012-09-26. [ZHANG L Y, RUI H M, PAN K Y. A low-sugar chestnut preserve and its production method: Guangdong Province: CN201010524798.1[P]. 2012-09-26.]

[8] 杨金英, 王剑平. 低糖果脯加工工艺研究现状[J]. 农机化研究, 2003, 25(4): 34−36. [YANG Jinying, WANG Jianping. Research and precessing status of low-sugar preserved fruits[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2003, 25(4): 34−36.]

[9] 潘真清. 渗透预处理对紫薯果脯品质的影响[J]. 安徽工程大学学报, 2021, 36(2): 19−25. [PAN Zhenqing. The influence of the purple potato quality on osmotic pretreatment method[J]. Journal of Anhui Polytechnic University, 2021, 36(2): 19−25.]

[10] 张莹丽, 刘媛媛, 李伟民. 橘汁紫薯果脯的加工工艺[J]. 许昌学院学报, 2018, 37(6): 50−53. [ZHANG Yingli, LIU Yuanyuan, LI Weimin. Processing technology of preserved fruit of orange juice purple potato[J]. Journal of Xuchang University, 2018, 37(6): 50−53.]

[11] 杜连启, 乔亚科, 姬秀丽. 低糖紫薯复合脯的研制[J]. 农产品加工, 2011(8): 70−73. [DU Lianqi, QIAO Yake, JI Xiuli. Development of low-sugar compound preserved purple sweet potato[J]. Farm Products Processing, 2011(8): 70−73.]

[12] ZHANG Jieyu, YANG Yujie, LÜ Rongzhen, et al. Sugar reduction process of purple sweet potato concentrated juice by microbial fermentation for improved performance of natural pigments[J]. Biochemical Engineering Journal, 2023, 191: 108781.

[13] 张鑫, 李思萌, 吴祖芳, 等. 一种植物乳杆菌发酵紫薯工艺条件优化[J]. 宁波大学学报(理工版), 2017, 30(2): 29−34. [ZHANG Xin, LI Simeng, WU Zufang, et al. Optimization of process conditions of purple sweet potato fermentation by *Lactobacillus plantarum*[J]. Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition), 2017, 30(2): 29−34.]

[14] 熊添, 吴燕燕, 林婉玲, 等. 即食调味金鲳鱼工艺技术研究[J]. 食品工业科技, 2018, 39(13): 180−186. [XIONG Tian, WU

Yanyan, LIN Wanling, et al. Study on the technology of instant seasoning *Trachinotus ovatus*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(13): 180−186.]
[15] SHI Liu, YIN Tao, HUANG Qilin, et al. Effects of filleting methods on composition, gelling properties and aroma profile of grass carp surimi[J]. Food Science and Human Wellness, 2021, 10(3): 308−315.
[16] SHI Defang, YIN Chaomin, FAN Xiuzhi, et al. Effects of ultrasound and gamma irradiation on quality maintenance of fresh *Lentinula edodes* during cold storage[J]. Food Chemistry, 2022, 373: 131478.
[17] 张莉会, 吕亭逸, 乔宇, 等. 超声结合超高压预处理对冻干草莓片品质的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(14): 15−21,28. [ZHANG Lihui, LÜ Tingyi, QIAO Yu, et al. Effect of ultrasound and ultrahigh pressure pretreatment on quality of freeze-dried strawberry slices[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(14): 15−21,28.]
[18] 徐钱艳, 曹丽萍, 李国珍, 等. 低糖地参果脯的微波渗糖工艺[J]. 粮食加工, 2022, 47(6): 35−39,53. [XU Qianyan, CAO Liping, LI Guozhen, et al. Microwave-assisted sugar permeation for production of low-sugar preserved *Lycopus lucidus* Turcz[J]. Grain Processing, 2022, 47(6): 35−39,53.]
[19] 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.]
[20] 桑田. 基于介电特性的低糖黑莓果脯的微波渗糖工艺研究[D]. 无锡: 江南大学, 2017. [SANG Tian. Study on sugar permeability technique by microwave of low-sugar blackberry preserved fruit based on dielectric properties[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.]
[21] 马菲菲, 胡昕, 王瀚墨, 等. 李子果脯制备工艺优化研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(12): 3873−3879. [MA Feifei, HU Xin, WANG Hanmo, et al. Study on the process optimization of preserved plum[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(12): 3873−3879.]
[22] ALEMNEH S T, EMIRE S A, JEKLE M, et al. Effect of refrigerated storage on some physicochemical characteristics of a teff-based fermented beverage and the viability of the fermenting *Lactiplantibacillus plantarum* and *Lacticaseibacillus rhamnosus* used[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(11): e17034.
[23] 郝惠阳. 发酵梨制品生物活性成分及产品品质的研究现状[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(22): 225−226. [HAO Huiyang. Research status of bioactive components and product quality of fermented pear products[J]. Food Research and Development, 2023, 44(22): 225−226.]
[24] 赵国瑜, 田亚萍, 巫丹, 等. 紫薯花色苷提取及稳定性研究[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(4): 104−110. [ZHAO Guoyu, TIAN Yaping, WU Dan, et al. Study on extraction and stability of anthocyanin from purple sweet potato[J]. Storage and Process, 2020, 20(4): 104−110.]
[25] 杨姗, 王卫, 赵楠, 等. 发酵蔬菜色泽形成机制及影响因素研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(23): 269−276. [YANG Shan, WANG Wei, ZHAO Nan, et al. Recent advances in understanding mechanism and influential factors of color formation in fermented vegetables[J]. Food Science, 2022, 43(23): 269−276.]
[26] 崔海鹏, 郭健龙, 王大全, 等. 花青素加工稳定性及其研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(13): 388−397. [CUI Haipeng, GUO Jianlong, WANG Daquan, et al. Stability of anthocyanins during processing and research progress[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(13): 388−397.]
[27] 杨培青, 王文欣, 王永涛, 等. 花色苷的稳定性及其与蛋白质相互作用研究进展: 基于花色苷在不同 pH 条件下的多态性[J]. 食品工业科技, 2025, 46(19): 480−491. [YANG Peiqing, WANG Wenxin, WANG Yongtao, et al. Research progress on the stability of anthocyanins and their interactions with proteins: A perspective based on the pH-dependent multistate system of anthocyanins[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(19): 480−491.]
[28] 梁璐, 隋勇, 黄师荣, 等. 花色苷结构与呈色稳定性研究进展[J]. 现代食品科技, 2024, 40(6): 336−346. [LIANG Lu, SUI Yong, HUANG Shirong, et al. Research progress on the structures and coloration stability of anthocyanins[J]. Modern Food Science & Technology, 2024, 40(6): 336−346.]
[29] 余政毫, 朱文学, 白喜婷, 等. 基于低场核磁共振及成像技术的油莎豆远红外干燥过程中水分变化规律[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(16): 131−137. [YU Zhenghao, ZHU Wenxue, BAI Xiting, et al. Rule of water changes in the far-infrared drying of tiger nut based on low-field NMR and imaging technology[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(16): 131−137.]
[30] 孙炳新, 赵宏侠, 冯叙桥, 等. 基于低场核磁和成像技术的鲜枣贮藏过程水分状态的变化研究[J]. 中国食品学报, 2016, 16(5): 252−257. [SUN Bingxin, ZHAO Hongxia, FENG Xuqiao, et al. Studies on the change of moisture state of fresh jujube during storage base on LF-NMR and MRI[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(5): 252−257.]
[31] 王雪媛, 陈芹芹, 毕金峰, 等. 热风-脉动压差闪蒸干燥对苹果片水分及微观结构的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 287−293. [WANG Xueyuan, CHEN Qinqin, BI Jinfeng, et al. Effect of hot air-pulsed sudden decompression flashing drying on moisture and microstructure in apple slices[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(20): 287−293.]
[32] 陈明, 李金龙, 李伟, 等. 利用低场核磁共振进行活体玉米籽粒水分动态测试与成像[J]. 农业工程学报, 2020, 36(23): 285−292. [CHEN Ming, LI Jinlong, LI Wei, et al. Dynamic testing and imaging of living maize kernel moisture using low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR)[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(23): 285−292.]
[33] 赵波, 应晓国, 张美超, 等. 贮运过程中刺身鱼水分的变化[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(22): 184−190. [ZHAO Bo, YING Xiaoguo, ZHANG Meichao, et al. Study on water change of sashimi during storage and transportation[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(22): 184−190.]
[34] 沈雪玉, 陈日辉, 林钰婷, 等. 渗糖方式对加应子果脯营养、香气及果肉结构的影响[J]. 热带作物学报, 2022, 43(5): 1085−1093. [SHEN Xueyu, CHEN Rihui, LIN Yuting, et al. Effects of sugar permeability methods on nutrition, aroma and structure of candied prunes[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2022, 43(5): 1085−1093.]
[35] 李佳伟, 虞宁馨, 于连升, 等. 乳酸菌胞外多糖在食品工业中的应用研究[J]. 中国酿造, 2023, 42(6): 17−21. [LI Jiawei, YU Ningxin, YU Liansheng, et al. Application of exopolysaccharides of lactic acid bacteria in food industry[J]. China Brewing, 2023, 42(6): 17−21.]
[36] 胡翔, 李洛欣, 冯建国, 等. 不同渗糖工艺对蓝莓果脯品质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(10): 254−260. [HU X, LI L X, FENG J G, et al. Effect of different sugar infiltration processes on quality of candied blueberry fruit[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(10): 254−260.]