张执, 吴海虹, 戴竹青, 等. 植物乳植杆菌杏脆制备工艺优化与品质分析 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(10): 1−10. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050229

ZHANG Zhi, WU Haihong, DAI Zhuqing, et al. Optimization of Preparation Process and Quality Analysis of Apricot Crisps as a Carrier for Viable *Lactiplantibacillus plantarum*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(10): 1−10. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050229

·特邀主编专栏—地方特色食品: 加工技术、感官品质、风味特性和营养健康（客座主编: 易俊洁、和劲松、郭超凡）·

植物乳植杆菌杏脆制备工艺优化与品质分析

张　执[1], 吴海虹[2,*], 戴竹青[2], 马艳弘[2], 李大婧[2], 包怡红[1,*]
（1.东北林业大学食品与健康学院, 黑龙江哈尔滨 150040;
2.江苏省农业科学院农产品加工研究所, 江苏南京 210014）

摘　要: 本研究旨在建立高植物乳植杆菌富集的益生菌杏脆工艺。采用常压浸渍（Normal Pressure Impregnation, NPI）、超声浸渍（Ultrasonic Impregnation, UP）和真空浸渍（Vacuum Impregnation, VI）三种预处理方式与发酵工艺相结合方法, 通过测定冻干杏脆中植物乳植杆菌活菌数比较不同浸渍效果, 经单因素实验优化工艺参数后, 进一步采用正交试验对超声功率、超声时间和发酵时间进行多因素优化; 同时通过扫描电镜观察杏子细胞组织变化, 并测定发酵后杏脆的总糖、总酸、总酚含量等指标。结果显示, UP 处理后活菌数达 1.0~2.0×10^7 CFU/g, 显著优于真空、常压处理组（P<0.05）。实验确定最佳工艺条件为: 超声功率 125 W、浸渍时间 12 min、发酵时间 20 h, 终产品活菌数提升至 1.0~2.0×10^8 CFU/g。通过扫描电镜观察, 超声浸渍处理后杏子细胞组织孔隙率、孔径显著增大, 可有效促进菌体渗透。发酵后杏脆总糖、总酸、总酚含量指标与对照组存在显著差异（P<0.05）。本研究构建了超声-发酵协同增效的植物乳植杆菌杏脆制备技术, 为开发高活性益生菌果脆提供了创新工艺方案, 对提升杏子附加值和推动功能性休闲食品发展具有重要应用价值。

关键词: 杏子, 植物乳植杆菌, 超声浸渍, 发酵工艺, 杏脆
中图分类号: TS255.36　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)10−0001−10
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050229
本文网刊:

Optimization of Preparation Process and Quality Analysis of Apricot Crisps as a Carrier for Viable *Lactiplantibacillus plantarum*

ZHANG Zhi[1], WU Haihong[2,*], DAI Zhuqing[2], MA Yanhong[2], LI Dajing[2], BAO Yihong[1,*]
（1.College of Food and Health, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;
2.Institute of Agricultural Products Processing, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China）

Abstract: This study aimed to establish a process for preparing probiotic apricot crisps enriched with a high level of *Lactiplantibacillus plantarum* (*L. plantarum*). Three pretreatment methods, normal pressure impregnation (NPI), ultrasonic impregnation (UI), and vacuum impregnation (VI), were combined with fermentation technology. The viable count of *L. plantarum* in freeze-dried apricot crisps was determined to evaluate the impregnation efficiency of the different methods. Following the optimization of individual process parameters through single-factor experiments, orthogonal experiments were conducted to further optimize multiple factors, including ultrasonic power, ultrasonic time, and fermentation time. In parallel, changes in the apricot cell tissue structure were examined using scanning electron microscopy, and the total sugar, total acid, and total phenolic contents of the fermented apricot crisps were analyzed. The results indicated that UI treatment yielded a viable count of 1.0~2.0×10^7 CFU/g, which was significantly higher than that of the vacuum and normal pressure

收稿日期: 2025−05−26
基金项目: 新疆自治区重点研发项目帕米尔高原优质果品生产关键技术集成与示范（2023B02028）; 国家自然科学基金面上项目（32572618）。
作者简介: 张执（2001−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: zz2522490443@163.com。
*** 通信作者:** 吴海虹（1976−）, 女, 硕士, 副研究员, 研究方向: 畜禽、水产、果蔬保鲜及休闲健康食品创制, E-mail: Wuhaihong169@163.com。
包怡红（1970−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 林下资源精深加工、功能性食品, E-mail: baoyihong@163.com。

treatment groups (P<0.05). The optimal process conditions were determined as follows: Ultrasonic power of 125 W, impregnation time of 12 min, and fermentation time of 20 h, under which the viable count of the final product was increased to 1.0~2.0×10^8 CFU/g. Scanning electron microscopy observations revealed that ultrasonic impregnation significantly increased the porosity and pore size of apricot cell tissues, effectively promoting bacterial penetration. After fermentation, the total sugar, total acid, and total phenol contents of the apricot crisps showed significant differences compared with the control group (P<0.05). This study developed an ultrasonic-fermentation synergistic technology for preparing *L. plantarum*-enriched apricot crisps, providing an innovative process for developing high-activity probiotic fruit crisps. It holds important application value for enhancing the added value of apricots and promoting the development of functional snack foods.

Key words: apricot; *Lactobacillus plantarum*; ultrasonic impregnation; fermentation process; apricot crisps

杏子(*Prunus armeniaca* var. *vulgaris*)为蔷薇科李属作物,已有 3000 多年栽培历史。中国作为全球杏产业的核心产区,每年鲜杏产量在全球范围保持高占比,主产区集中于新疆、河北、山东、甘肃、宁夏等地区[1]。然而,杏子作为典型呼吸跃变型果实,采后生理代谢活跃导致贮藏期短(常温下仅 5~7 d),采后损耗率高达 25% 以上[2]。加工是解决鲜杏损耗的有效途径,传统杏子通常加工成杏干、杏脆等休闲食品,可将原料利用率提升至 20%,具有良好便捷性[3],但现有产品普遍存在功能单一、附加值低等问题,难以满足大健康时代消费者对功能性食品的需求[4]。

近年来,益生菌食品市场呈现爆发式增长,2017 年以来我国益生菌食品市场规模以 12%~18% 高速增长[5]。消费者也逐渐意识到益生菌对肠道健康[6]、免疫系统及整体健康的潜在益处[7],研究表明,植物乳植杆菌(*Lactiplantibacillus plantarum*)等益生菌株可通过调节肠道菌群平衡、增强免疫应答等机制发挥多重健康效应[8]。而杏子富含多酚类物质与膳食纤维,其基质特性可为益生菌提供天然保护屏障[9]。

然而,益生菌杏脆制备技术研究较少,现有研究多聚焦于液态基质中的菌体活性维持,针对多孔性果蔬组织内益生菌的富集机制仍缺乏系统研究,不仅难以保证益生菌的活性与稳定性,而且在产品的口感、品质及贮藏期等方面也存在一定的挑战[10]。通过加工技术将益生菌高效富集于杏子组织内部,有望开发出营养协同效应与肠道调节功能的益生菌杏脆食品[11]。该益生菌产品不仅可提高杏子附加值,同时还可满足消费者对功能性食品需求[12]。

目前,市面上现有益生菌果蔬脆采用的富集方法,无法保证产品有效活菌数。益生菌富集主要依赖真空浸渍(Vacuum Impregnation, VI)和常压浸渍(Normal Pressure Impregnation, NPI)等传统方法。Rodrigues 等[13] 采用常压浸渍方式将干酪乳杆菌与苹果结合,生产出活菌数含量达 10^6 CFU/g 量级的益生菌产品。与之相比,崔莉等[14] 研究发现,通过真空富集使植物乳植杆菌渗入到胡萝卜片内部,对植物乳植杆菌有保护作用。与此同时,超声浸渍(Ultrasonic Impregnation, UI)技术因其独特的空化效应不断展现出显著优势[15]。Betoret 等[16] 研究表明,超声浸渍不仅能够有效加快益生菌在水果中的渗透,提高其在果蔬中的富集水平,还能减少加工过程中的果蔬变质风险。因此,本研究以杏子为功能载体、植物乳植杆菌为益生菌株,系统探究不同浸渍工艺对菌体渗透效率、存活率及产品理化特性的影响。通过建立超声-发酵协同增效工艺增强杏脆与植物乳植杆菌结合,旨在为开发高活性益生菌果蔬产品提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

成熟期胡安娜杏 购于南京孝陵卫菜市场;植物乳植杆菌 S2-4(*Lactipiantibacillus plantarum* S2-4)由江苏省农业科学院农产品加工所菌种库取得(保藏号 MG2-2);MRS 肉汤培养基 北京陆桥公司;猪胃蛋白酶(3000 U/g)、胰蛋白酶(4000 U/g) 亿发食品科技有限公司;氢氧化钠、氯化氢 天津新技术产业园区科茂有限公司;KH_2PO_4 天津市致远化学试剂有限公司;苯酚试剂、硫酸溶液 天津科密欧化学试剂有限公司;无水乙醇 天津大茂化学试剂厂;福林酚试剂 上海源叶生物科技有限公司;以上试剂均为分析纯。

SPT-160C 培养箱 南京立思高仪器公司;TGL-16 离心机 山东百欧公司;JY-FD04X 真空冷冻干燥机 江苏广越公司;TMS-PRO 质构仪 美国 TechnologyCorporation 公司;PEN3 电子鼻 德国 Airsense Analytics 公司;Cr10-Plus 全自动色差计 深圳柯尼卡美能达公司;EVO LS10 扫描电子显微镜 德国蔡司公司;HZQ-F100 摇床 南京赛普科学仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 植物乳植杆菌培养 取 2 mL 植物乳植杆菌冻存液接种于 50 mL MRS 液体培养基中,于 37 ℃ 恒温培养箱中静置培养 24 h,进行一代活化。取一代活化菌液按 2%(v/v)接种量转接至 50 mL MRS 液体培养基中,于 37 ℃ 恒温培养箱中静置培养至对数生长后期(约 24 h),测定 OD_{600} 值同时平板计数,获得适宜浓度植物乳植杆菌菌液(OD_{600}≈1.6~1.8,菌液浓度 2.0~5.0×10^9 CFU/mL)。

1.2.2 浸渍液制备 将上述植物乳植杆菌菌液离心

（5500 r/min、12 min），弃上清液，收集菌泥。用无菌水对菌泥进行洗涤后离心（5500 r/min、12 min），重复洗涤两次以去除培养基残留。后将菌泥重悬于无菌水中，调节菌悬液浓度至 1.0~1.5×10^9 CFU/mL，即为实验所用菌浸渍液，置于 4 ℃ 避光保存待用（使用前再次混匀）。

1.2.3　植物乳植杆菌杏脆制备工艺　选取外观良好、无机械损伤的新鲜杏子，清洗后切成大小匀匀的块状厚度 7 mm（不去皮，4 cm×2 cm），将杏块置于无菌烧杯中，按料液比 1∶1 加入浸渍菌液（液面需没过原料表面）浸渍 12 min，分别设置常压浸渍处理组（NPI），超声浸渍处理组（UP）和真空浸渍处理组（VI），其中 NPI 组在常温常压下浸渍处理，UP 组采用 100 W 超声功率浸渍处理，VI 组在真空度 0.098 MPa 环境下浸渍。设置不含植物乳植杆菌 S2-4 的无菌水常温常压浸渍 12 min 作为无菌浸渍对照处理组（Sterile Impregnation Control，SI），为进一步提高植物乳植杆菌杏脆活菌数含量，对比出最佳浸渍方式为超声浸渍，本研究将于该浸渍处理后结合发酵工艺进行处理，作为发酵处理组（Fermentation，FER）。

将浸渍处理后的杏块置于−20 ℃ 预冻 24 h，随后真空冷冻干燥获得植物乳植杆菌杏脆，真空冷冻干燥参数为真空度 40 Pa、冷阱温度−20 ℃；以不经过浸渍处理直接冻干的杏脆作为空白对照（Blank Control，BC）。

1.2.4　脆度、硬度测定　采用质构仪（配备圆柱形探头 TA44，直径 36 mm）测定样品硬度脆度，测试模式设置为压力-应变模式，参数如下：预测试速度、测试速度及返回速度均为 1 mm/s；触发力 10 g，穿刺距离为样品厚度的 50%。为消除个体差异，所有测试样品均取自杏块中心区域，并在相同环境温湿度条件下（25±1 ℃，RH 50%±5%）完成测试。

1.2.5　色泽测定　采用全自动色差计对样品表面色泽进行定量分析，沿样品外围区域等距选取 5 个测量点，记录杏脆亮度值（L^*）、红绿值（a^*）和黄蓝值（b^*）。

$$\Delta E = [(L-L^*)^2+(a-a^*)^2+(b-b^*)^2]^{\frac{1}{2}}$$

式中：L、a、b 为新鲜杏子对照组的色度基准值，L^*、a^*、b^*为处理样品的测定值。

1.2.6　香气成分分析　采用电子鼻系统测定样品挥发性风味物质，称取杏脆 10.0 g 于 20 mL 顶空瓶，60 ℃ 水浴 30 min。检测参数设置为：进样流量 400 mL/min（载气为高纯氮气），传感器阵列预热 100 s，基线归零 10 s，样品平衡 5 s，数据采集 60 s（间隔 1 s）。每个样品平行测定 3 次，检测前经标准气体校准传感器。基于特征传感器响应值（W1W、W5S）构建风味图谱，进行挥发性成分分析。

1.2.7　植物乳植杆菌杏脆活菌计数　依据 GB 4789.2-2022《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》[17]，称取 5.00 g 样品，加入 45 mL 无菌水，拍击均质（10000 r/min，2 min）制备 10 倍系列稀释液。选取适宜稀释度进行平板倾注培养（MRS 琼脂，36±1 ℃，48 h），通过菌落计数法定量分析。

1.2.8　植物乳植杆菌杏脆消化稳定性　模拟胃肠液配制：胃液以 2 g/L NaCl 溶液为基液，调节 pH 至 2.0 并添加 0.3 g/L KCl、0.2 g/L $NaHCO_3$，灭菌后加入 3 g/L 胃蛋白酶；肠液以磷酸盐缓冲液为基液，调节 pH 至 7.5 并添加 8.5 g/L NaCl、5 g/L 猪胆盐，灭菌后加入 10 g/L 胰酶。

杏脆与胃肠液混合后于 37 ℃ 厌氧培养（200 r/min，2 h），测定菌落数[18]。

1.2.9　微观结构变化　使用扫描电镜观察杏脆微观结构，取 10 g 冻干样品，液氮脆断制备纵截面样本，真空干燥后经铂金喷镀（60 s）处理以增强导电性。观察参数设置为加速电压 5 kV、工作距离 10 mm，低真空模式（50 Pa）下采集表面及纵截面图像。每组选取 5 个代表性视野，利用 SMileView 软件（v2.0）进行图像分析[19]。

1.2.10　浸渍工艺优化

1.2.10.1　单因素实验　为系统探究超声功率、超声时间、发酵时间对植物乳植杆菌富集效果的影响，本研究通过单因素实验对浸渍、发酵工艺进行优化。超声功率：超声时间 12 min、发酵时间 16 h，分别测定超声功率为 100、125、150、175、200 W 时杏脆活菌数；超声时间：超声功率 125 W、发酵时间 16 h，分别测定超声时间为 8、10、12、14、16 min 时杏脆活菌数；发酵时间：超声功率 125 W、超声时间 12 min，分别测定发酵时间为 8、12、16、20、24 h 时杏脆活菌数，所有实验均采用料液比 1∶1（g/mL）、发酵温度 20 ℃、浸渍温度 30±1 ℃，先超声浸渍处理杏子块，随后进行发酵，最终冻干测定活菌数。

1.2.10.2　正交试验　基于单因素实验的结果，本研究进行了三因素三水平正交试验设计 $L_9(3^3)$。采用超声功率（A）、超声时间（B）及发酵时间（C）为考察因素，三因素三水平设置：A（100、125、150 W），B（10、12、14 min），C（16、20、24 h）。以活菌数（lg CFU/g）和感官评分（100 分制）为双响应指标，每组试验重复三次。

1.2.11　感官评价　组建由 10 名经过专业培训的食品感官评价员（男女比例 1∶1，年龄 25~45 岁）组成的评估小组。样品采用三位随机编码，在标准感官实验室（温度 22±1 ℃，湿度 50%±5%）进行盲评。评估前用无味饼干和纯净水清洁口腔，样品呈递间隔≥5 min。依据表 1 评价体系，从外观、质地、色泽、气味四个维度进行综合评分，数据经 Kendall 协调系数检验（W=0.82，P<0.05）确认评估一致性后取算术平均值[20]。

表 1 植物乳植杆菌杏脆感官评价

Table 1 *Lactobacillus plantarum*-fermented apricot crisps sensory evaluation

标准/分数(100分)	外观(25分)	质地(25分)	色泽(25分)	气味(25分)
低	表面塌陷、边缘卷曲、严重收缩	硬度过大或过小	深褐色	无果香有异味
中	表面较规整、略有收缩	局部较硬	橙黄稍带褐色	无果香异味,有果香异味
高	表面规整、边缘微卷饱满、收缩少	硬度适中	橙黄或浅黄色	有果香无异味

1.2.12 植物乳植杆菌杏脆营养变化 根据 1.2.2 步骤制备植物乳植杆菌浸渍液,按照 1.2.3 步骤制备 UP 组样品并冻干,按照 1.2.10.1 步骤制备 FER 组样品并冻干,以不经过浸渍处理直接冻干杏脆作为 BC 组。

1.2.12.1 总糖含量 称取 3.0 g 杏脆粉,加 30 mL 无菌水,50 ℃ 超声提取(500 W, 90 min),离心(4000 r/min, 30 min)后保留上清液。复提两次合并上清液,随后定容至 50 mL。取 1.0 mL 待测液,加 1.0 mL 6% 苯酚溶液和 6.0 mL 浓硫酸,混匀后室温静置 40 min,于 490 nm 测定吸光度值(以 1 mg/mL 葡萄糖标准溶液绘制标准曲线)[21],计算公式如下:

$$TS(g/100\ g)=\frac{c\times N\times V\times 10}{m\times(100-\omega)}$$

式中:TS 为总糖含量(g/100 g);c 为标准曲线计算得样品葡萄糖含量(mg/mL);m 为样品质量(g);V 为定容体积(mL);N 为稀释倍数;ω 为湿基含水率(%)。

1.2.12.2 总酸含量 称取 1.00 g 杏脆粉,加 10 mL 75% 乙醇,50 ℃ 水浴磁力搅拌(400 r/min, 30 min)后离心(5000 r/min, 20 min),取下层液备用。按 GB 12456-2021《食品中有机酸的测定》配制 0.01 mol/L 氢氧化钠标准溶液[22],取 10 mL 样品液,加入 2~4 滴 10 g/L 酚酞指示剂,以 0.01 mol/L 氢氧化钠滴定至微红色 30 s 不褪色,记录消耗体积(V_1),以同体积无 CO_2 水作空白试验(V_2)。公式如下:

$$X(g/kg)=\frac{[c\times(V_1-V_2)\times k\times F]}{m}\times 1000$$

式中:X:总酸含量(g/kg);c:氢氧化钠标准滴定液浓度(mol/L);V_1:滴定消耗氢氧化钠溶液体积(mL);V_2:空白试验消耗氢氧化钠溶液体积(mL);k:酸换算系数:乳酸,0.090;F:稀释倍数;m:样品质量(g);1000:换算系数。

1.2.12.3 总酚含量 称取 1.00 g 杏脆粉,加 25 mL 80% 乙醇,45 ℃ 超声提取 60 min,4500 r/min 离心 30 min 后,上清液为总酚提取液。取 50 μL 提取液,加入 250 μL 50% 福林酚试剂、4 mL 水及 750 μL 20% Na_2CO_3 溶液,混匀后 25 ℃ 避光反应 2 h,于 765 nm 测定吸光度。以没食子酸标准溶液(50~100 mg/L)绘制标准曲线[23]。公式如下:

$$X(mg/g)=\frac{\rho\times V}{m\times(100-X_w)}\times 100$$

式中:X:总多酚含量(mg/g);ρ:标准曲线算得样品总多酚含量(mg/mL);m:样品质量(g);V:定容体积(mL);X_W:水分含量(g/100 g)。

1.3 数据处理

采用 Excel 2022 整理数据、Orign 2022 绘图,采用 SPSS 2022 方差分析,邓肯多重比较方法进行样品间显著性差异分析,不同字母表示存在差异(P<0.05),实验重复 3 次(取平均值、计算标准差)。

2 结果与分析

2.1 植物乳植杆菌杏脆质构特性分析

本研究通过质构分析评估了不同浸渍处理对杏脆硬度和脆度的影响(图 1)。实验结果表明,与 BC 组、SI 组相比,NPI 组硬度未有显著变化(P>0.05),UP 组、VI 组硬度值显著下降(P<0.05),且 UP 组硬度值显著低于其他各组(P<0.05)。在脆度指标方面,UP 组脆度值高出 VI 组 9.43%、NPI 组 20.5%,并显著高于 BC 组、SI 组(P<0.05),VI 组脆度值显著高出 NPI 组 13.5%(P<0.05),这与徐欣[24]的研究结果相吻合。

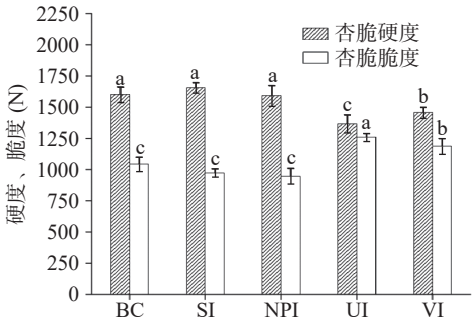


图 1 植物乳植杆菌杏脆的脆度及硬度

Fig.1 Crispness and hardness of *Lactobacillus plantarum*-fermented apricot crisps

注:不同小写字母表示不同处理组间差异显著(P<0.05),图 3、图 6 同。

出现上述现象的原因,可能是超声诱导的空穴效应可有效改善杏子表面微结构,促进菌液渗透的同时增强了细胞壁的机械强度。张馨月[25]研究表明,超声处理通过优化冻干过程中的水分分布状态,减少了因相变应力导致的组织塌陷,与本研究结果一致。与之相比,真空浸渍虽能通过压力梯度促进渗透,但是对果蔬组织结构的作用有限[26],这可能是导致其硬度、脆度值介于超声和常压处理之间的关键因素。

2.2 植物乳植杆菌杏脆产品色泽特征分析

如表 2 所示,经不同处理工艺制备的杏脆样品与未干燥杏子相比,其亮度值(L^*)、红绿值(a^*)和黄

蓝值（b^*）显著升高（P<0.05）。其中 BC 组的 L^*值（54.13±0.669）较未干燥组（33.51±2.877）提高 61.5%，表明冻干过程有效改善了杏子的表面光反射特性[27]。各处理组间比较显示，UP 组具有最高的 L^*值（55.81±1.392）和 b^*值（37.19±2.463），但其与 VI 组和 NPI 组的差异未达统计学显著性（P>0.05）。

表 2　植物乳植杆菌杏脆色泽指标

Table 2　Color indices of *Lactobacillus plantarum*-fermented apricot crisps

样品	L^*	a^*	b^*	ΔE
鲜杏	33.51±2.877^b	5.47±1.471^b	11.05±1.320^b	–
BC	54.13±0.669^a	9.03±0.357^a	35.35±0.632^a	22.66±0.982^a
SI	52.98±1.709^a	10.35±1.809^a	35.13±1.886^a	22.17±1.598^a
NPI	55.39±2.911^a	8.67±0.299^a	33.4±2.757^a	22.23±2.122^a
UP	55.81±1.392^a	10.39±2.608^a	37.19±2.463^a	24.54±1.034^a
VI	51.44±3.412^a	12.41±3.811^a	34.21±2.13^a	21.28±1.752^a

注：同列不同小写字母表示不同处理组间差异显著（P<0.05）。

色差计算结果显示（表 2），处理组 ΔE 值均分布于 21.28±1.752 至 24.54±1.034 间，与未干燥组（ΔE=0）相比差异显著（P<0.05），但处理组间色差变化幅度不超过 15%。这表明不同浸渍工艺对杏脆整体色泽的影响具有一致性，主要色泽变化源于冻干过程本身引起的水分脱除和细胞结构改变，而非浸渍处理差异所致，这与 Demir 等[28] 研究结果相一致。

2.3　植物乳植杆菌杏脆产品风味物质分析

电子鼻分析结果（图 2）显示，各处理组 W1W 传感器处信号强度较 BC 组及 SI 组有所提升差异显著（P<0.05），其中 UP 组在 W1W 传感器处的响应值最高。该传感器主要对短链羧酸类物质敏感，推测此现象可能源于植物乳植杆菌风干后带来的酸味，这与 Wang 等[29] 研究结果一致。各处理组在芳香烃类（W5S）和氮氧化物（W1C）传感器上的响应值未呈现显著差异（P>0.05），表明可能因处理时间较短，浸渍工艺未显著改变杏脆主体香气成分，后续进行相关实验以初步验证该推测。

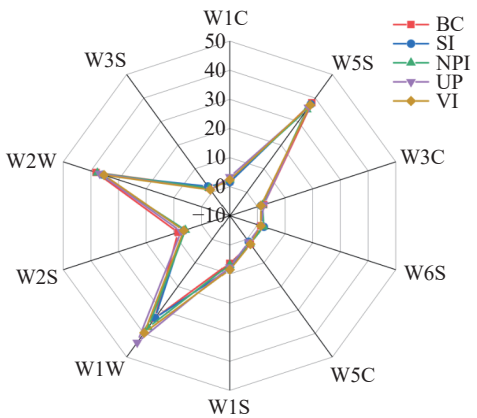


图 2　植物乳植杆菌杏脆的风味成分

Fig.2　Flavor components of *Lactobacillus plantarum*-fermented apricot crisps

2.4　植物乳植杆菌杏脆的植物乳植杆菌存活率及消化稳定性

如图 3A~图 3B 所示，各处理组杏脆消化后植物乳植杆菌含量变化趋势与杏子干燥后保持一致，经冷冻干燥处理后，各组样品的活菌数均显著低于预处理阶段（P<0.05）。在不同浸渍工艺中，UP 组展现出最优的植物乳植杆菌富集效果，其活菌数 2.57×10^8 CFU/g，显著高于 VI 组和 NPI 组（P<0.05），冷冻干燥后，UP 组活菌数含量是 VI 组 1.4 倍、NPI 组的 2.4 倍（P<0.05）。由图 3B 可看出，消化后 UP 组仍具备高植物乳植杆菌含量，表明该产品食用消化后仍可稳定发挥效用。

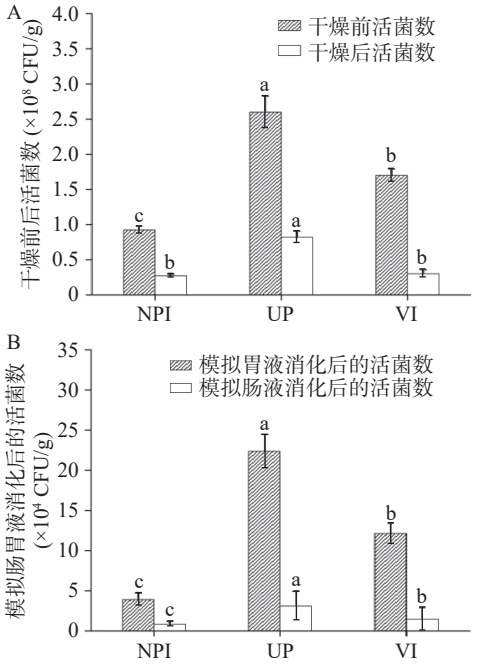


图 3　植物乳植杆菌杏脆不同阶段活菌数分析

Fig.3　Analysis of viable counts of *Lactobacillus plantarum*-fermented apricot crisps at different stages

注：A：各浸渍组干燥前后活菌计数；B：各浸渍组杏脆模拟肠胃消化活菌计数。

Gonçalves 等[30] 采用 450 W、25 kHz 超声辅助植物乳植杆菌菌液浸渍番石榴，结果显示，该超声条件未破坏益生菌，在干燥前植物乳植杆菌计数达到 9.08 log CFU/g，显著高于非超声处理的对照组，其研究发现，超声下产生空穴作用能在瞬间形成局部高压环境，为植物乳植杆菌进入创造更多通道，从而促进益生菌在番石榴内的富集。本研究的结果与之相一致，且本研究采用更低超声频率、功率，而真空浸渍主要依靠压力差促进菌液渗透，因此菌液渗透效果不如超声浸渍。

2.5　植物乳植杆菌杏脆样品微观结构分析

本实验结果从微观尺度揭示了超声辅助浸渍的技术优势，为优化植物乳植杆菌富集工艺提供了重要的结构依据。通过扫描电子显微镜（SEM）对杏脆表面及纵截面进行微观形貌表征（图 4）。观察结果显

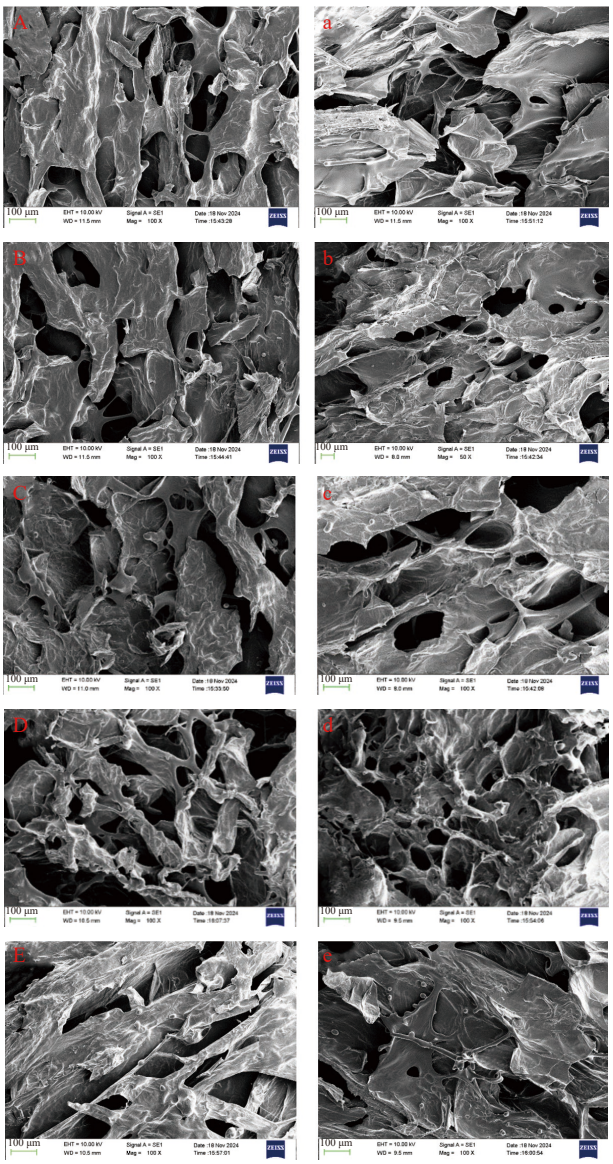


图 4　植物乳植杆菌杏脆样品微观结构(100×)

Fig.4　Microstructure of *Lactobacillus plantarum*-fermented apricot crisps (100×)

注: A 和 a 为空白对照组; B 和 b 为无菌浸渍组; C 和 c 为常压浸渍组; D 和 d 为超声浸渍组; E 和 e 为真空浸渍组; 左图为表面结构图, 右图为纵截面结构图。

示, 不同浸渍处理对样品表面孔隙结构产生显著影响。UP 组样品表面呈现多孔网络结构, 孔隙分布均匀且平均孔径较大, 孔隙通道延伸至样品内部较深, 这与 Nazarewicz 等[31] 研究结果相吻合。上述结构特征有助于植物乳植杆菌更多的渗入杏子内部, 表明超声诱导产生空化效应可有效增强杏子组织通透性, 为植物乳植杆菌渗透提供理想通道[32]。

VI 组样品表面孔隙数量较 UP 组减少, 平均孔径均呈现缩小趋势, 且孔隙分布呈现局部聚集特征。NPI 组与 SI 组、BC 组微观结构相似, 表面粗糙度指数显著高于 UP 组, 其孔径分布呈现明显多分散性, 这可能导致菌液渗透效率降低[33]。

纵截面分析显示, UP 组纵截面可观察到许多细胞壁断裂现象, 且超声处理会使杏子细胞壁发生部分解构, 形成连续的渗透通道, 形成的通道数量显著多于 VI 组和 NPI 组(P<0.05), 而这种结构改变可能与冻干过程中水分迁移路径优化有关[34]。

2.6　植物乳植杆菌杏脆超声浸渍条件优化

2.6.1　植物乳植杆菌杏脆超声浸渍单因素实验　单因素实验结果表明(图 5), 不同工艺参数对杏脆中植物乳植杆菌富集效果具有显著影响(P<0.05)。控制单一参数变化时, 发酵时间、超声功率和浸渍时间均呈现先升高后降低的剂量效应曲线。

由图 5A 可知, 超声处理功率对植物乳植杆菌在杏子中的富集效率呈现非线性响应特征, 在实验功率范围内(100~200 W), 菌体浓度随超声功率呈现先增后降趋势: 当超声强度达到 125 W 时, 杏子组织内部载菌量达到最大值, 较 100 W 处理组提高约 14%(P<0.05); 而当功率达到 150 W 阈值后, 菌体存活数量出现显著衰减, 活菌数显著下降约 26%(P<0.05)。可能是因空化效应随着超声功率增强而加剧, 从而引

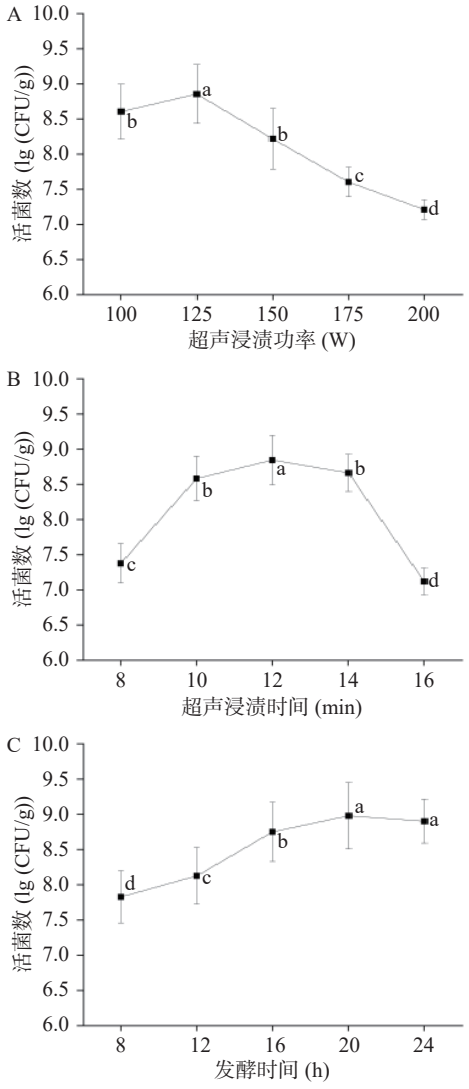


图 5　植物乳植杆菌杏脆超声浸渍单因素实验

Fig.5　Single-factor optimization of ultrasonic impregnation of *Lactobacillus plantarum*-fermented apricot crisps

注: 不同小写字母表示不同浸渍组间差异显著(P<0.05)。

发菌体更严重的机械损伤。这与刘莹萍[35]研究结果相一致。Santos 等[36]研究表明，在 4870 W/m^2 超声强度条件下，超声空化效应引发的微射流冲击能够一定程度破坏鳄梨细胞壁结构并形成微通道和孔隙，增加表面积和渗透路径，因而加速了菌液渗透过程、提高菌液在基质中富集效率，使得更多菌液浸渍到鳄梨切片内。而 Zhang 等[37]研究发现，超声功率大于 400 W 时，过度的空化作用导致处理体系温度异常升高，引发菌体蛋白变性及细胞膜结构不可逆损伤，造成活菌菌落数明显下降。本实验结果与该研究结论相吻合。基于上述剂量效应关系，125 W 可作为兼顾处理效率与菌体活性的最优功率参数。

超声时间对富集效率的影响如图 5B 所示。当处理时间延长至 12 min 时，活菌浓度达到最大值，较 8 min 处理组提高约 9%（P<0.05）。延长处理至 16 min 导致活菌数下降约 15%（P<0.05），可能是长时间持续超声导致菌体被破坏程度不断加大。通过 SEM 观察发现（图 4），12 min 处理组样品表面形成均匀微孔（孔径 5~8 μm），有利于植物乳植杆菌渗透而不破坏菌体组织结构。

发酵时间对菌体增殖的影响如图 5C 所示。在 20 h 时活菌浓度达到峰值，较 16 h 处理组提高约 6%（P<0.05）。但达到 24 h 后，杏子内的活菌浓度降低。可能是因为，植物乳植杆菌增殖受到了繁殖环境内碳源含量的限制。Dimitrovski 等[38]研究发现，乳酸菌在一定量的苹果汁中，发酵约 24 h 时达到菌落峰值，随着主要碳源（葡萄糖、果糖）消耗殆尽，在后续的 10 h 内乳酸菌增殖受限，且部分菌体因营养不足或代谢产物积累等原因死亡，活菌数不断下降，本研究结论与之相一致。

2.6.2　植物乳植杆菌杏脆样品超声浸渍正交试验

探究超声浸渍工艺对杏脆品质的协同影响，如表 3~表 5 所示，方差分析结果表明，A、B、C 三因素均对杏脆活菌数影响显著，A、B 因素对杏脆感官评分影响不显著，C 因素对杏脆感官评分影响显著。根据极差分析，各因素对杏脆活菌数和感官评分影响主次均为：发酵时间>超声功率>超声时间。综合考虑杏脆活菌数、感官评分因素，最佳工艺参数为 $A_2B_2C_2$，即超声功率 125 W、超声时间 12 min、发酵时间 20 h。

在此工艺下，对正交试验筛选的最佳工艺参数进行三次验证实验，杏脆活菌数均值达到 8.877（lg（CFU/g）），感官评分均值达到 98，高于正交试验测定结果，验证该工艺组合为最佳组合，工艺稳定性较好。

2.6.3　植物乳植杆菌杏脆营养变化　如图 6A 所示，FER 组总糖含量显著低于 UP 组、BC 组（P<0.05），可能是发酵处理改变了杏子的代谢特性[39]，植物乳植杆菌在发酵过程中可能通过糖代谢途径消耗了部分糖分[40]，这可能与乳酸菌利用糖类作为碳源进行同型发酵的机制相关[41]。

表 3　植物乳植杆菌杏脆超声浸渍正交试验结果

Table 3　Results of orthogonal experiment on ultrasonic impregnation of *Lactobacillus plantarum*-fermented apricot crisps

实验号	A超声功率（W）	B超声时间（min）	C发酵时间（h）	活菌数（lg(CFU/g)）	感官评分（分）
1	100	10	16	8.367	97
2	100	12	20	8.522	96
3	100	14	24	8.791	87
4	125	10	20	8.529	95
5	125	12	24	8.852	92
6	125	14	16	8.434	93
7	150	10	24	8.677	91
8	150	12	16	8.416	93
9	150	14	20	8.443	92
k1	8.56	8.524	8.405		
k2	8.605	8.596	8.498		
k3	8.512	8.556	8.773		
R	0.093	0.072	0.368		
K1	93.3	94.3	94.34		
K2	93.34	94.67	94.34		
K3	92	90.67	90		
R	1.34	0.37	4.34		

注：K为杏脆感官评分均值、k为杏脆活菌数均值。

表 4　植物乳植杆菌杏脆超声浸渍正交试验设计方差分析（活菌数）

Table 4　Analysis of variance of orthogonal experimental design for ultrasonic impregnation of *Lactobacillus plantarum*-fermented apricot crisps (viable count)

变异来源	自由度	平方和	均方	F值	P值
A超声功率（W）	2	0.013	0.006	6.901	0.027
B超声时间（min）	2	0.008	0.004	4.195	0.032
C发酵时间（h）	2	0.22	0.11	11.672	0.008

表 5　植物乳植杆菌杏脆超声浸渍正交试验设计方差分析（感官评价）

Table 5　Analysis of variance of orthogonal experimental design for ultrasonic impregnation of *Lactobacillus plantarum*-fermented apricot crisps (sensory evaluation)

变异来源	自由度	平方和	均方	F值	P值
A超声功率（W）	2	3.556	1.778	3.323	0.231
B超声时间（min）	2	22.889	11.444	2.147	0.661
C发酵时间（h）	2	37.556	0.11	5.52	0.035

图 6B 可看出，FER 组总酸含量显著高于其他组别，可能与植物乳植杆菌代谢产生有机酸（如乳酸、乙酸）及部分游离酸的释放有关[42]。这与 Gao 等[43]研究中，乳酸菌发酵可促进果实中结合态酸的转化，并通过糖酸代谢路径调控酸度的结果相吻合。

图 6C 可知，FER 组总酚含量显著高于 UP 组、BC 组（P<0.05），可能是由于植物乳植杆菌在发酵过程中通过酶解作用释放了结合态酚类物质[44]，并促进了多酚氧化酶及过氧化物酶的活性，从而加速了酚类化合物的转化。Huang 等[45]研究显示，乳酸菌发酵可通过降解细胞壁果胶结构释放结合态多酚，同时激活内源性酶促反应，增强酚类物质的生物可及性，本研究的结果与之相一致。

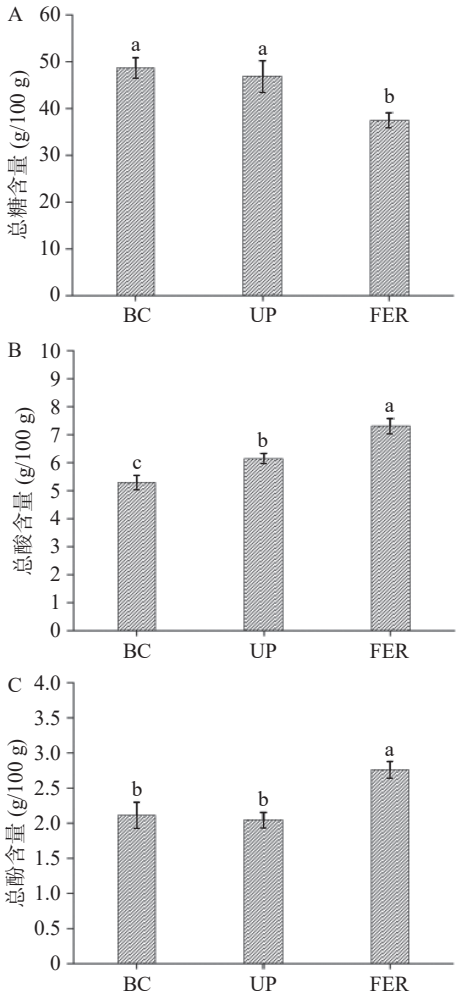


图 6　植物乳植杆菌杏脆总糖(A)、总酸(B)、总酚(C)含量变化

Fig.6　Changes in total sugar (A), total acid (B), and total phenol (C) contents of *Lactobacillus plantarum*-fermented apricot crisps

3　结论

本研究通过对比常压浸渍、超声浸渍和真空浸渍三种处理方式对杏脆中植物乳植杆菌富集效果的影响，发现超声浸渍可显著提升杏脆内植物乳植杆菌含量(P<0.05)，效果优于常压浸渍与真空浸渍。超声浸渍一定程度改善杏子结构，处理产生空化效应使杏子组织孔隙率增加 30%，形成连续渗透通道，促进菌体高效渗透，使得富集植物乳植杆菌浓度较高。

对超声浸渍工艺进行优化，鉴于提高菌浓度目标，后续添加发酵时间为单因素指标，并结合超声浸渍功率、超声浸渍时间进行单因素实验，采用活菌数与杏脆感官评分双指标进行正交试验，最佳工艺参数：超声功率 125 W、超声时间 12 min、发酵时间 20 h。经工艺优化后杏脆活菌数达 10^8 CFU/g 量级，同时结合方差分析，各因素对杏脆内活菌数、感官评分的影响主次均为：发酵时间>超声功率>超声时间。

且发酵杏脆总糖含量显著下降，总酸和总酚含量显著上升，表明本富集工艺相对比于一般植物乳植杆菌富集工艺，不仅菌富集效率得到较大提升，杏脆营养品质得到较大提升，形成营养强化效应。

本研究将超声辅助浸渍与发酵技术相结合，成功开发出活菌数达 10^8 CFU/g 量级植物乳植杆菌杏脆产品。研究结果为果蔬基质中植物乳植杆菌的高效富集提供了理论依据和技术参考，该技术对开发新型功能性休闲食品具有重要实践价值。未来研究需关注长期贮藏稳定性、探索复合菌株适配性，并评估工业化生产的能耗成本与设备适配性。该技术对开发新型功能性休闲食品具有重要实践价值。

© 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] HONG J X, LI J, WANG S L. Discussions on the development and countermeasures of plum and apricot industry in liaoning province[C]//International society for horticultural science. abstracts of XVI international symposium on apricot breeding and culture and XV Chinese national symposium on plum and apricot. Fruit and Silkworm Administrative General Station of Liaoning Province: Liaoning Institute of Pomology, 2015: 54.

[2] XIN Qi, ZHOU Xinqun, JIANG Weibo, et al. Effects of reactive oxygen levels on chilling injury and storability in 21 apricot varieties from different production areas in China[J]. Foods, 2023, 12(12): 2378.

[3] 李志雅, 李清明, 苏小军, 等. 果蔬脆片真空加工技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2015, 36(17): 384−387. [LI Zhiya, LI Qingming, SU Xiaojun, et al. Research progress in vacuum processing technology of fruit and vegetable chips[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(17): 384−387.]

[4] KARABULUT I, BILENLER T, SISLIOGLU K, et al. Chemical composition of apricots affected by fruit size and drying methods[J]. Drying Technology, 2018, 36(16): 1937−1948.

[5] SZLUFMAN C, SHEMESH M. Role of probiotic bacilli in developing synbiotic food: Challenges and opportunities[J]. Frontiers in Microbiology, 2021, 12: 638830.

[6] 王晓春, 张建峰, 薛永春, 等. 益生菌食品的研究进展[J]. 中国食品, 2024(18): 126−129. [WANG Xiaochun, ZHANG Jianfeng, XUE Yongchun, et al. Research progress of probiotic food[J]. China Food, 2024(18): 126−129.]

[7] GÓMEZ P L, WELTI-CHANES J, ALZAMORA S M. Hurdle technology in fruit processing[J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2011, 2: 447−465.

[8] LIU June, ZHANG Yan, ZHANG Jing, et al. Probiotic yogurt effects on intestinal flora of patients with chronic liver disease[J]. Nursing Research, 2010, 59(6): 426−432.

[9] LEFKOVITZ A L, ZAROWITZ B J. It's a microscopic world after all: Prebiotics, probiotics, and synbiotics[J]. Geriatric Nursing, 2013, 34(4): 323−325.

[10] de OLIVEIRA P M, RAMOS A M, MARTINS E M F, et al. Comparison of vacuum impregnation and soaking techniques for addition of the probiotic *Lactobacillus acidophilus* to minimally processed melon[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2017, 52(12): 2547−2554.

[11] ANWER M, WEI M Q. Harnessing the power of probiotic strains in functional foods: Nutritive, therapeutic, and next-genera-

tion challenges[J]. Food Science and Biotechnology, 2024, 33(9): 2081−2095.
[12] 陈子民, 莫江婷, 陈广生, 等. 现代水果干制工艺技术研究进展[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(2): 80−90,96. [CHEN Zimin, MO Jiangting, CHEN Guangsheng, et al. Research progress of modern fruit drying process technology[J]. Storage and Process, 2024, 24(2): 80−90,96.]
[13] RODRIGUES S, SILVA L C A, MULET A, et al. Development of dried probiotic apple cubes incorporated with *Lactobacillus casei* NRRL B-442[J]. Journal of Functional Foods, 2018, 41: 48−54.
[14] 崔莉, 牛丽影, 黄家鹏, 等. 胡萝卜片中富集植物乳杆菌的工艺优化[J]. 食品科学, 2017, 38(16): 183−189. [CUI Li, NIU Liying, HUANG Jiapeng, et al. Optimization of processing parameters for probiotics enrichment in impregnated carrot slices[J]. Food Science, 2017, 38(16): 183−189.]
[15] TARRAH A. Probiotics, prebiotics, and their application in the production of functional foods[J]. Fermentation, 2022, 8(4): 154.
[16] BETORET N, PUENTE L, DíAZ M J, et al. Development of probiotic-enriched dried fruits by vacuum impregnation[J]. Journal of Food Engineering, 2003, 56(2-3): 273−277.
[17] 国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定: GB 4789.2-2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022. [National Health Commission, State Administration for Market Regulation. National food safety standard food microbiological inspection Determination of total bacterial colony: GB 4789.2-2022[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.]
[18] 陈卫, 杭锋, 赵建新, 等. 微波杀菌过程中大肠杆菌与金黄色葡萄球菌细胞膜通透性的改变[J]. 微生物学报, 2007, 47(4): 697−701. [CHEN Wei, HANG Feng, ZHAO Jianxin, et al. Alterations of membrane permeability in *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* under microwave[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2007, 47(4): 697−701.]
[19] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 微束分析 扫描电子显微术 生物试样扫描电子显微镜分析方法: GB/T 33834-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Microbeam analysis —Scanning electron microscopy—Scanning electron microscope analysis of biological specimens: GB/T 33834-2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.]
[20] 廉苗苗. 猕猴桃冻干-真空微波联合干燥及其益生菌浸渍干制品工艺优化[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2020. [LIAN Miaomiao. Kiwi fruit freeze drying-vacuum microwave combined drying and probiotic dipping process optimization[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2020.]
[21] MECOZZI M. Estimation of total carbohydrate amount in environmental samples by the phenol–sulphuric acid method assisted by multivariate calibration[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2005, 79(1−2): 84−90.
[22] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中有机酸的测定: GB 5009.157-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standards Determination of food organic acids: GB 5009.157-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.]
[23] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 蜂花粉总多酚的检测 福林酚试剂比色法: GB/T 44349-2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024. [State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Detection of total polyphenols in bee pollen—Colorimetric method using Folin-Ciocalteu reagent: GB/T 44349-2024[S]. Beijing: Standards Press of China, 2024.]
[24] 徐欣. 基于干燥效率及品质控制的黄秋葵扫频超声联合冻融预处理研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021. [XU Xin. Study on pretreatments of okra by flat sweep frequency pulsed ultrasound and freeze-thaw based on drying efficiency and quality control[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021.]
[25] 张馨月. 超声预处理对冻干草莓品质及贮藏特性的影响[D]. 锦州: 渤海大学, 2024. [ZHANG Xinyue. Effect of ultrasonic pretreatment on quality and storage characteristics of freeze-dried strawberries[D]. Jinzhou: Bohai University, 2024.]
[26] DANG L T K, THERDTHAI N, RATPHITAGSANTI W. Effects of ultrasonic and enzymatic treatment on physical and chemical properties of brown rice[J]. Journal of Food Process Engineering, 2019, 42(3): e13016.
[27] 贾洪锋, 陈杨, 亢小勤, 等. 巨峰葡萄叶主要成分分析及干燥方式对主要活性成分和色泽的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(21): 10−14. [JIA Hongfeng, CHEN Yang, KANG Xiaoqin, et al. Analysis of main nutritional components and effects of drying methods on main functional components content and color of kyoho grape leaves[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(21): 10−14.]
[28] DEMIR H, ÇELIK S, SEZER Y Ç. Effect of ultrasonication and vacuum impregnation pretreatments on the quality of beef marinated in onion juice a natural meat tenderizer[J]. Food Science and Technology International, 2022, 28(4): 340−352.
[29] WANG Jun, WEI Bocheng, ZHAI Yanrong, et al. Non-volatile and volatile compound changes in blueberry juice inoculated with different lactic acid bacteria strains[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2024, 104(5): 2587−2596.
[30] GONÇALVES D J R, de ALMEIDA C, DO AMARAL E PAIVA M J, et al. Ultrasonic pre-treatment to enhance drying of potentially probiotic guava (*Psidium guajava*): Impact on drying kinetics, *Lacticaseibacillus rhamnosus* GG viability, and functional quality[J]. Food Research International, 2023, 173(Pt 2): 113374.
[31] NAZAREWICZ S, KOZŁOWICZ K, GŁADYSZEWSKA B, et al. Effects of ultrasound treatment on the physical and chemical properties of ice cream with a strawberry seed oil oleogel[J]. Sustainability, 2023, 15(11): 8975.
[32] ZHOU Y H, STANISZEWSKA I, LIU Z L, et al. Microwave-vacuum-assisted drying of pretreated cranberries: Drying kinetics, bioactive compounds and antioxidant activity[J]. LWT, 2021, 146: 111464.
[33] SZADZIŃSKA J, KOWALSKI S J, STASIAK M. Microwave and ultrasound enhancement of convective drying of strawberries: Experimental and modeling efficiency[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 103: 1065−1074.
[34] 靳力为, 任广跃, 段续, 等. 超声预处理对杏片微波冻干过程中水分迁移的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(8): 15−21,81. [JIN Liwei, REN Guangyue, DUAN Xu, et al. Effect of ultrasonic pretreatment on water migration of apricot slices during microwave freeze-drying[J]. Food & Machinery, 2020, 36(8): 15−21,81.]
[35] 刘莹萍. 富益生菌胡萝卜脆片的制备及其贮藏稳定性研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2017. [LIU Yingping. Preparation and stor-

age stability of probiotic-enriched carrot crisps[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2017.]

[36] SANTOS N C, ALMEIDA R L J, SANTOS MONTEIRO S, et al. Ultrasound and microwaves reduce stress in probiotics during avocado drying: Impact on mass transfer and cell viability[J]. Food Bioscience, 2024, 61: 104655.

[37] ZHANG Manjun, ZHOU Chunli, MA Long, et al. Influence of ultrasound on the microbiological, physicochemical properties, and sensory quality of different varieties of pumpkin juice[J]. Heliyon, 2024, 10(6): e27927.

[38] DIMITROVSKI D, VELICKOVA E, LANGERHOLC T, et al. Apple juice as a medium for fermentation by the probiotic *Lactobacillus plantarum* PCS 26 strain[J]. Annals of Microbiology, 2015, 65(4): 2161−2170.

[39] YUE Mingzhe, FENG Zhen, ZHOU Junping, et al. Improving functionality and metabolite profiles of black sapote juice through lactic acid bacteria fermentation[J]. LWT, 2024, 213: 117048.

[40] WANG Huixian, HE Xingqiao, LI Juanni, et al. Lactic acid bacteria fermentation improves physicochemical properties, bioactivity, and metabolic profiles of *Opuntia ficus*-indica fruit juice[J]. Food Chemistry, 2024, 453: 139646.

[41] 吴江娜, 魏冠棉, 毛娜, 等. 不同乳酸菌发酵对雪花梨汁营养成分、抗氧化活性及挥发性风味物质的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(9): 310−321. [WU Jiangna, WEI Guanmian, MAO Na, et al. Effects of different lactic acid bacteria fermentation on nutrient composition, antioxidant activity and volatile flavor substances of snow pear juice[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(9): 310−321.]

[42] NAGARAJAN D, CHEN C Y, ARIYADASA T U, et al. Macroalgal biomass as a potential resource for lactic acid fermentation[J]. Chemosphere, 2022, 309: 136694.

[43] GAO Hang, ZHANG Jian, LIU Li, et al. Metagenomic analysis revealing the metabolic role of microbial communities in the free amino acid biosynthesis of *Monascus* rice vinegar during fermentation[J]. Food Science and Human Wellness, 2024, 13(4): 2317−2326.

[44] LIU Shuai, HE Yuxin, HE Weiwei, et al. Exploring the biogenic transformation mechanism of polyphenols by *Lactobacillus plantarum* NCU137 fermentation and its enhancement of antioxidant properties in wolfberry juice[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2024, 72(22): 12752−12761.

[45] HUANG Guitao, ZHANG Mingwei, ZHANG Shuai, et al. Unveiling biotransformation of free flavonoids into phenolic acids and Chromones alongside dynamic migration of bound Phenolics in *Lactobacillus*-fermented lychee pulp[J]. Food Chemistry, 2024, 457: 140115.