

沙棘叶益生菌发酵工艺优化及干燥方式对品质的影响

董潇越¹ 云雪艳^{1,2} 张璐¹ 董同力嘎^{1,2} 赵晨曦¹ 特金微³
王秀宽³ 郝倩⁴ 苗美树⁴ 苏科⁴

(1. 内蒙古农业大学食品科学与工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2. 中蒙生物大分子应用“一带一路”联合实验室, 内蒙古 呼和浩特 010018; 3. 鄂尔多斯市高原圣果生态建设开发有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000; 4. 鄂尔多斯市市场监督管理局, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘要: [目的] 探讨沙棘叶益生菌发酵工艺与干燥方式对发酵产品品质的影响。[方法] 以植物乳植杆菌为发酵菌株, 通过单因素试验结合响应面法优化沙棘叶发酵工艺条件; 在最优发酵工艺下制备发酵液, 采用直接冷冻干燥和喷雾冷冻干燥两种方式并结合低压静电场辅助制备冻干粉, 比较不同处理对活菌数、黄酮、多酚保留率、水分活度及体外消化特性的影响。[结果] 最优发酵工艺条件为沙棘叶粉添加量 8%、植物乳植杆菌接种量 2%、初始 pH 值 5、发酵温度 36℃、发酵时间 72 h, 该条件下黄酮和多酚含量显著提高。不同干燥方式对产品品质影响显著, 其中喷雾冷冻干燥样品水分活度最低, 黄酮和多酚保留率较高, 但其活菌存活率显著低于直接冷冻干燥组 ($P < 0.05$)。体外模拟消化过程中, 活菌数持续下降, 黄酮呈动态变化, 多酚总体呈下降趋势。[结论] 喷雾冷冻干燥更适合制备富含活性物质的产品, 而直接冷冻干燥更利于益生菌存活。

关键词: 沙棘叶; 植物乳植杆菌; 响应面优化; 静电场; 喷雾冷冻干燥

Optimization of probiotic fermentation process and effects of drying methods on the quality of sea buckthorn leaves

DONG Xiaoyue¹ YUN Xueyan^{1,2} ZHANG Lu¹ DONG Tongliga^{1,2} ZHAO Chenxi¹ TE Jinwei³
WANG Xiukuan³ HAO Qian⁴ MIAO Meishu⁴ SU Ke⁴

(1. College of Food Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. China-Mongolia Biomacromolecule Application "Belt and Road" Joint Laboratory, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 3. Ordos Plateau Shengguo Ecological Construction and Development Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia 017000, China; 4. Ordos Market Supervision Administration, Ordos, Inner Mongolia 017000, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effects of probiotic fermentation conditions and drying methods on the quality of fermented sea buckthorn leaf products. [Methods] *Lactiplantibacillus plantarum* is used for fermentation. The fermentation process of sea buckthorn leaves is optimized through single-factor experiments combined with response surface methodology. Fermented sea buckthorn leaf extract is prepared under the optimal fermentation conditions and subsequently processed into freeze-dried powder by direct freeze-drying and spray freeze-drying, with or without low-voltage electrostatic field assistance. The effects of different treatments on viable cell counts, flavonoid and polyphenol retention rates, water activity, and *in vitro* digestion characteristics are evaluated. [Results] The optimal fermentation conditions are determined as follows: 8% sea buckthorn leaf powder, 2% *L. plantarum* inoculum, initial pH 5, fermentation temperature of

基金项目: 内蒙古自治区科技计划项目 (编号: 2023YFHH0079); 内蒙古自治区青年科技人才发展项目 (编号: NMGIRT2310)

通信作者: 云雪艳 (1990—), 女, 内蒙古农业大学教授, 博士。E-mail: yun_imau@163.com

收稿日期: 2025-12-03 改回日期: 2026-05-18

引用格式: 董潇越, 云雪艳, 张璐, 等. 沙棘叶益生菌发酵工艺优化及干燥方式对品质的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(6): 150-162.

Citation: DONG Xiaoyue, YUN Xueyan, ZHANG Lu, et al. Optimization of probiotic fermentation process and effects of drying methods on the quality of sea buckthorn leaves[J]. Food & Machinery, 2026, 42(6): 150-162.

36 °C, and fermentation time of 72 h. Under these conditions, flavonoid and polyphenol content is significantly increased. Drying methods have significant effects on product quality. The spray freeze-dried samples exhibit the lowest water activity and higher retention rates of flavonoids and polyphenols. However, their viable cell survival rate is significantly lower than that of the direct freeze-dried samples ($P < 0.05$). During simulated *in vitro* digestion, the product shows continuously decreasing viable cell counts, dynamic changes in flavonoid content, and an overall declining trend of polyphenol content. [Conclusion] Spray freeze-drying is more suitable for producing products rich in bioactive compounds, whereas direct freeze-drying is more favorable for maintaining probiotic viability.

Keywords: sea buckthorn leaf; *Lactiplantibacillus plantarum*; response surface optimization; electrostatic field; spray freeze-drying

沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.),属于胡颓子科落叶灌木或乔木,广泛分布于欧亚大陆温带及寒带地区^[1],兼具固氮改良土壤、耐寒抗旱等生态适应性,是中国北方重要的生态防护林^[2]。沙棘叶作为沙棘植株中产量最高的部分,其潜在价值及相应产品的研发仍显不足^[3]。沙棘叶富含多酚类、黄酮类化合物、三萜及5-羟色胺等独特的生物活性物质,具有优异的抗氧化、抗炎、降脂、调节血糖等健康功效^[4-5]。尽管沙棘叶具有较高的开发潜力,但其实际应用仍受多重因素限制:其显著的涩味降低了产品风味及消费者接受度^[6];致密的细胞壁结构阻碍了活性物质的释放与吸收^[7]。因此,在保持沙棘叶营养活性的同时改善其感官品质、提高活性成分的生物利用度,成为其深度开发与利用的关键问题。

益生菌发酵技术不仅能改善果蔬产品的风味与贮藏特性,还能促进活性成分释放,从而增强其抗氧化、降血糖等功能特性^[8-10]。植物乳植杆菌(*Lactiplantibacillus plantarum*)作为一种同型发酵乳酸菌,具备高效产酸和抑菌能力,在果蔬、谷物及中药材等多种基质中被广泛应用。陈芯怡等^[11]研究发现,联合添加植物乳植杆菌与纤维素酶协同发酵可显著提高桑枝叶中干物质、粗蛋白和乳酸含量,降低pH及霉菌数量,从而显著改善青贮品质;袁义杰等^[12]确定了植物乳植杆菌发酵槐米药渣的最佳工艺为发酵温度30 °C、发酵时间5 d、接种量4 mL,此条件下槲皮素含量较未发酵样提高365.10%,证明了植物乳植杆菌能有效促进黄酮类物质的释放与转化,提高药渣的资源化利用价值;王婧^[13]以苹果汁为底物发酵,最佳发酵工艺为发酵时间23 h、接种量1%,pH 7.0,此条件下的植物乳植杆菌不仅可提高果汁中多酚与有机酸含量,还能显著改善抗生素诱导小鼠的肠道菌群失调,有着良好的益生特性与健康调节功能。

目前,有关果蔬粉的加工方法主要有干法制粉和湿法制粉两大类,其中干燥过程始终是决定果蔬粉品质的关键环节^[14-15]。由于果蔬原料种类丰富、理化性质差异显著,其干燥特性及加工适应性各不相同,已有热风干燥、对流干燥、真空干燥、喷雾干燥及真空冷冻干燥等多种技术^[16-18]。其中真空冷冻干燥技术能够最大程度保持物料原有的色泽、组织结构及热敏性营养成分,同时形成多孔疏松结构,使产品具有优良的复水性能^[19]。高青青

等^[20]对比了不同干燥方法对雪胆湿法改性膳食纤维品质的影响,其中真空冷冻干燥处理后的雪胆膳食纤维色泽较白,吸湿率为60.1%;持水力和持油力分别为3.31, 4.51 g/g,均显著优于其他干燥方式。房战祥等^[21]研究发现,真空冷冻干燥能最大程度保留青麦仁的营养品质与加工特性,水分含量相比于热风干燥和真空干燥最低,而灰分、蛋白质、脂肪、淀粉、膳食纤维、叶绿素及维生素C等关键营养成分均显著高于其他两种干燥方式,此外色泽保留最佳,亮度值 L 为86.50,绿色值 a 为-5.78,氧化褐变最轻。静电场技术作为一种新兴的非热物理加工手段,根据施加电压的不同,可分为高压静电场(HVEF)和低压静电场(LVEF)^[22]。白亚乡等^[23]研究表明,施加电场与真空冷冻干燥联合使用时,用时更少,能耗更低,联合干燥分别节能19.5%和32.6%。与单纯高压电场干燥相比,联合干燥的海参质量显著提高,海参收缩率和硬度更小,复水率和蛋白质含量更高,感官品质更好。此外,静电场还可促进水蒸气在冷凝界面的沉积行为,提高冷凝效率,进一步强化干燥过程。

试验拟以沙棘叶为主要原料,接种植物乳植杆菌进行发酵,以活菌数、感官评分、活性成分为评价指标,利用单因素筛选沙棘叶发酵的关键因素,采用响应面试验优化沙棘叶最佳发酵工艺,制成冻干粉后,考察不同干燥方式处理对益生菌粉品质的影响,为沙棘叶资源的高值化利用提供新途径。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

沙棘叶粉:内蒙古鄂尔多斯市生态建设开发有限公司;

植物乳植杆菌 HH-LP56:100 亿 CFU/g,瑞茂生物有限公司;

蜂蜜:广州慕优生物科技有限公司;

MRS 固体培养基、亚硝酸钠、福林酚:分析纯,麦克林生化科技有限公司;

硝酸铝、柠檬酸、氯化钠:分析纯,天津市福晨化学试剂厂;

碳酸氢钠:分析纯,天津市北联精细化学品开发有限公司;

无水乙醇:分析纯,天津科贸化学试剂有限公司;

盐酸、氢氧化钠:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

高压蒸汽灭菌锅:TONY-SX-500 型,日本 TONY 公司;

超净工作台:SW-CJIFD 型,苏州净化设备有限公司;

pH 计:PHS-2C 型,上海三信仪表厂;

紫外分光光度计:SP-756P 型,上海光谱仪器有限公司;

恒温振荡器:SHA-B 型,中国常州金坛宏华仪器厂;

高速冷冻离心机:HC-2518R 型,安徽中科中佳科学仪器有限公司;

酶标仪:SYNERGY-H1 型,美国伯腾仪器有限公司;

单机空间电场:FresH-2.0 型,鲜康科技(青岛)有限公司;

冷冻喷雾干燥机:SFD-1100 型,东京理化器械株式会社;

冷冻干燥机:FDM-2010 型,东京理化器械株式会社。

1.2 试验方法

1.2.1 沙棘叶发酵液制备 将沙棘叶粉加入 100 mL 蒸馏水中,添加蜂蜜调节糖度为 15 °Brix、调整至适宜 pH 值,高温高压灭菌,冷却至室温后接入植物乳植杆菌粉进行发酵。

1.2.2 单因素试验 固定沙棘叶粉添加量 10%、植物乳植杆菌粉接种量 1%、初始 pH 值 6.0、接种量 1%、发酵温度 36 °C。分别考察沙棘叶粉添加量(6%, 8%, 10%, 12%, 14%)、植物乳植杆菌粉接种量(0.5%, 1.0%, 2.0%, 3.0%, 4.0%)、发酵时间(48, 60, 72, 84, 96 h)、发酵温度(30, 33, 36, 39, 42 °C)、初始 pH 值(3, 4, 5, 6, 7)对发酵液品质的影响。

1.2.3 响应面试验 在单因素试验基础上,以沙棘叶粉添加量、植物乳植杆菌接种量和初始 pH 值为自变量,根据沙棘叶发酵液的活菌数、感官评分、活性物质变化率对沙棘叶进行打分,得出的综合评分为响应值,通过 Design-Expert 8.0.6 软件设计三因素三水平中心组合试验,优化沙棘叶发酵液的最佳工艺条件。

1.2.4 沙棘叶益生菌冻干粉制备 在最优发酵条件下制备沙棘叶发酵液,加入体积分数为 6% 的低聚果糖作为冻干保护剂^[24],于 -80 °C 进行预冻,冷冻干燥。分别采用直接预冻—冷冻干燥和液氮喷雾冷冻—冷冻干燥两种方式制备冻干粉,并设置是否施加静电场辅助处理,共分为 4 组进行后续贮藏期试验,直接冻干加静电场组 Y+, 直接冻干不加静电场组 Y-, 液氮喷雾干燥加静电场组 PY+, 喷雾干燥不加静电场组 PY-。

1.2.5 菌落数测定 按 GB 4789.2—2022 执行。

1.2.6 pH 值测定 采用 pH 计进行测定。

1.2.7 可溶性固形物含量测定 采用手持式糖度仪进行

测定。

1.2.8 黄酮含量测定 采用硝酸铝比色法,参照 Ma 等^[25-26]的方法绘制标准曲线。

1.2.9 多酚含量测定 参照 Gou 等^[27]的方法并略微修改。移取 1 mL 滤液至比色管,依次加入 2 mL 福林酚试剂、2 mL 15% Na₂CO₃ 溶液,用水定容,振荡混匀。40 °C 水浴 45 min,冷却,测定 778 nm 处吸光度值。按式(1)计算总多酚含量。

$$X = C \times 10 \times n, \quad (1)$$

式中:

X——样品中总多酚含量,mg/100 mL;

C——标准曲线计算得出的待测液中总多酚含量,mg/100 mL;

n——稀释倍数。

1.2.10 体外模拟消化

(1) 体外模拟消化胃液制备:参照徐洪宇等^[28]的方法略作修改。称取 1 g 沙棘叶益生菌冻干粉,加入 25 mL 氯化钠、6 mL 盐酸与 4 mL 胃蛋白酶溶液,调 pH 值至 2.0~2.5,37 °C 水浴振荡 2 h。

(2) 体外模拟消化肠液制备:参照陈英威等^[29]的方法略作修改。将 0.32 g 胰蛋白酶与 0.96 g 猪胆盐溶于 0.1 mol/L 碳酸氢钠溶液中。体外模拟胃消化后,将胃液与肠液按体积比 1:1 混匀,调 pH 值至 7.5,37 °C 水浴振荡 2 h,分别于不同时间点(0, 1, 2, 3, 4 h)取样,用于后续测定。

1.2.11 感官评定 感官评定小组由 10 名按照 GB/T 46555—2025 标准培训的人员组成,按表 1 对沙棘叶益生菌冻干粉的色泽、口感、气味滋味和质地进行评价。

1.2.12 综合评分打分标准 根据沙棘叶发酵液的感官评分、活菌数、活性物质变化率对沙棘叶发酵液进行打分,以得出的综合评分为响应值,综合评分标准见表 2,其中,感官评分、活菌数、活性成分变化率得分占比分别为 0.50, 0.25, 0.25。

1.3 数据处理与分析

各试验重复 3 次,使用 IBM SPSS Statistics 27.0.1、Office 软件进行数据统计分析,并利用 Origin 2021、Design-Expert 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 发酵时间、发酵温度对沙棘叶发酵液品质的影响

在沙棘叶发酵过程中,发酵时间与发酵温度是影响微生物生长代谢及发酵产品品质的关键参数^[30]。由图 1 可知,发酵时间、发酵温度对活菌数、感官评分及黄酮、多酚含量均具有显著影响($P < 0.05$)。随着发酵时间和发酵温度的变化,沙棘叶发酵液的各项指标呈现出明显的规

表1 沙棘叶益生菌冻干粉感官评定标准
Table 1 Sensory evaluation criteria for freeze-dried probiotic powder prepared with sea buckthorn leaves

指标	标准	分值
色泽 (20分)	粉末呈沙棘叶的绿色,色泽均匀且无杂色	11~20
	粉末呈沙棘叶的浅绿色,色泽较均匀且无杂色	4~10
	粉末颜色太浅或太深,且不均匀	0~3
口感 (20分)	口感均匀细腻,黏度较低且无颗粒感	11~20
	口感均匀细腻,黏度较高,有轻微颗粒感	4~10
	口感粗糙,黏度较高,有颗粒感	0~3
气味滋味 (30分)	具有沙棘叶的特色香味且酸甜适宜,风味协调	20~30
	具有沙棘叶的香味,微甜或微酸或微苦	10~19
	沙棘叶气味不明显,过甜或过酸,回味有明显苦味,涩感较明显	0~9
质地 (30分)	粉末细腻、质地软硬合适不粘手、无潮解或团聚	20~30
	粉末较细腻、质地软硬合适稍粘手、轻微潮解或团聚	10~19
	粉末粗糙、质地软硬不均且粘手、有明显潮解或团聚	0~9

表2 综合评分打分标准
Table 2 Comprehensive scoring criteria

指标	单位	标准	分数
活菌数	CFU/mL	$\geq 1 \times 10^9$	81~100
		$[5 \times 10^8, 1 \times 10^9)$	61~80
		$[1 \times 10^8, 5 \times 10^8)$	41~60
		$[5 \times 10^7, 1 \times 10^8)$	21~40
		$< 5 \times 10^7$	0~20
活性成分变化率	%	≥ 90	81~100
		$[80, 90)$	61~80
		$[70, 80)$	41~60
		$[60, 70)$	21~40
		< 60	0~20

律性。当发酵时间从48 h延长至72 h时,感官评分、活菌数、黄酮与多酚含量均呈先升高后下降的趋势。当发酵时间为72 h时,感官评分达到89;黄酮和多酚含量分别提升了48%和53%。同时,发酵液的pH值随着发酵时间的延长逐渐下降,并在72 h后趋于稳定。发酵时间<72 h时感官评分降低,可能是菌体增殖不足、风味物质生成量有限,导致感官品质较低;而发酵时间>72 h后感官评分降低,是因为基质营养物质逐渐耗竭,乳酸等代谢产物持续积累,从而抑制了菌体的进一步生长并使酸味增强^[31]。

当发酵温度为30 ℃时,感官评分最低,随着发酵温度从30 ℃升高至36 ℃,活菌数、感官评分以及黄酮、多酚含量显著增加($P<0.05$)。当发酵温度为36 ℃时,感官评分达到了88.3,黄酮和多酚的增长率分别为57.63%和66.21%。当发酵温度为42 ℃时,所有指标又呈下降趋势。这可能与发酵温度对植物乳植杆菌生理活性的关键调控作用有关^[32]。在植物乳植杆菌适宜的温度区间内,升高发酵温度能增强菌体内多种生长繁殖相关酶的活性,加快代谢速率,促进菌体增殖并生成风味物质,从而提升感官品质和活性成分含量^[33]。当发酵温度超过植物乳植杆菌耐受范围时,高温可能破坏菌体酶蛋白的空间结构,导致酶失活并造成细胞膜损伤,抑制生长甚至引起细胞死亡,进而导致活菌数和发酵品质下降^[34-35]。综上,确定发酵时间72 h、发酵温度36 ℃为沙棘叶发酵的最适条件。

2.1.2 沙棘叶粉添加量对沙棘叶发酵液品质的影响 由图2可知,随着沙棘叶粉添加量由6%提高至12%,活菌数呈逐渐增加趋势,在添加量12%时达到最大值。感官评分表现为先升高后降低,在添加量8%时达到最高值。黄酮和多酚含量总体上随着沙棘叶粉添加量的增加呈上升趋势,黄酮含量在添加量8%时达最高,多酚含量在添加量6%,8%,10%下提升幅度较大。因此,适量添加沙棘叶粉可为植物乳植杆菌提供蛋白质、碳水化合物与维生素等生长所需营养,促进菌体繁殖,从而提高活菌数^[36]。当沙棘叶粉添加量为14%时,活菌数反而降低,可能是多酚类物质浓度过高、产生抑菌效应^[37]。感官评价的变化规律说明适量添加沙棘叶粉有助于改善色泽与风味,但添加量>8%后,体系中单宁及酚类物质含量升高,易导致苦涩味增强,同时粉感加重、沉淀增加,影响整体感官品质。综上,确定沙棘叶粉添加量6%,8%,10%作为后续响应面试验因素水平。

2.1.3 植物乳植杆菌接种量对沙棘叶发酵液品质的影响 由图3可知,植物乳植杆菌接种量对发酵液的感官评分、活菌数及活性物质含量均具有显著影响($P<0.05$)。随着植物乳植杆菌接种量由0.5%增至4.0%,活菌数和感官评分均呈先升高后降低的趋势。当植物乳植杆菌接种量为2%时,感官评分为87.67,黄酮和多酚含量的增长率分别为75.86%和43.81%。此时发酵液的组织状态、风味协调性及酸甜平衡表现最佳,黄酮、多酚含量达到较高水平。当植物乳植杆菌接种量<2%时,活菌数增长相对缓慢,主要原因在于起始菌体浓度偏低,使得发酵前期延滞期较长,菌体未能及时进入对数生长期^[38]。当植物乳植杆菌接种量>2%时,活菌数和感官评分均下降,可能是菌体数量过多引起基质中营养物质过快消耗,或乳酸等代谢产物迅速积累,进而对菌体生长形成抑制。这与班世栋等^[39]的研究结果一致。不同植物乳植杆菌接种量下,发酵液的pH和糖度变化均不显著。综上,确定植物乳植杆菌接种

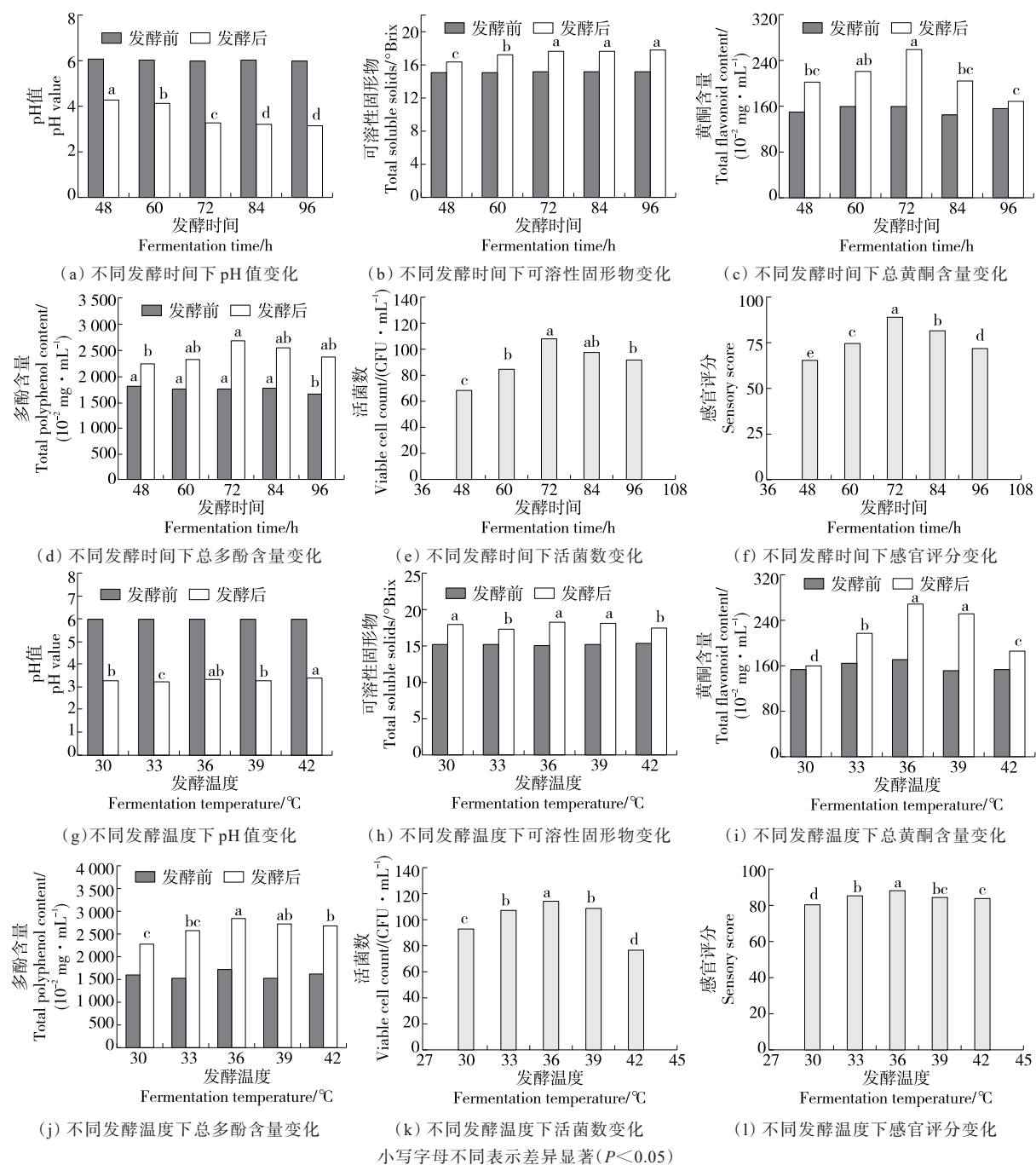


图1 发酵时间、发酵温度对沙棘叶发酵液品质的影响

Figure 1 Effects of fermentation time and temperature on the quality of fermented sea buckthorn leaf liquid

量 1%, 2%, 3% 作为后续响应面试验因数水平。

2.1.4 初始 pH 值对沙棘叶发酵液品质的影响 由图 4 可知, 初始 pH 值对活菌数、感官品质及活性成分含量均具有显著影响 ($P < 0.05$)。当初始 pH 值为 3 时, 活菌数最低, 发酵液酸涩味明显, 过低的初始 pH 值会形成高酸胁迫环境, 从而抑制植物乳植杆菌的生长代谢, 导致风味过酸^[40]。随着初始 pH 值升高至 4 和 5, 活菌数显著增加, 发

酵液的酸甜比例更协调, 并呈现沙棘叶特有的清香风味, 其中 pH 5 下的综合品质最佳。适宜的初始 pH 值能促进菌体快速增殖并提高底物利用率, 有利于风味物质生成和黄酮、多酚等活性成分的释放与转化, 此时两者的增长率最高。当初始 pH 值升至 7 时, 感官评分及活性成分含量均有所下降, 发酵液酸度不足、风味偏淡, 沙棘叶本身的草本风味突出, 同时乳酸菌产生有机酸的能力受限, 降

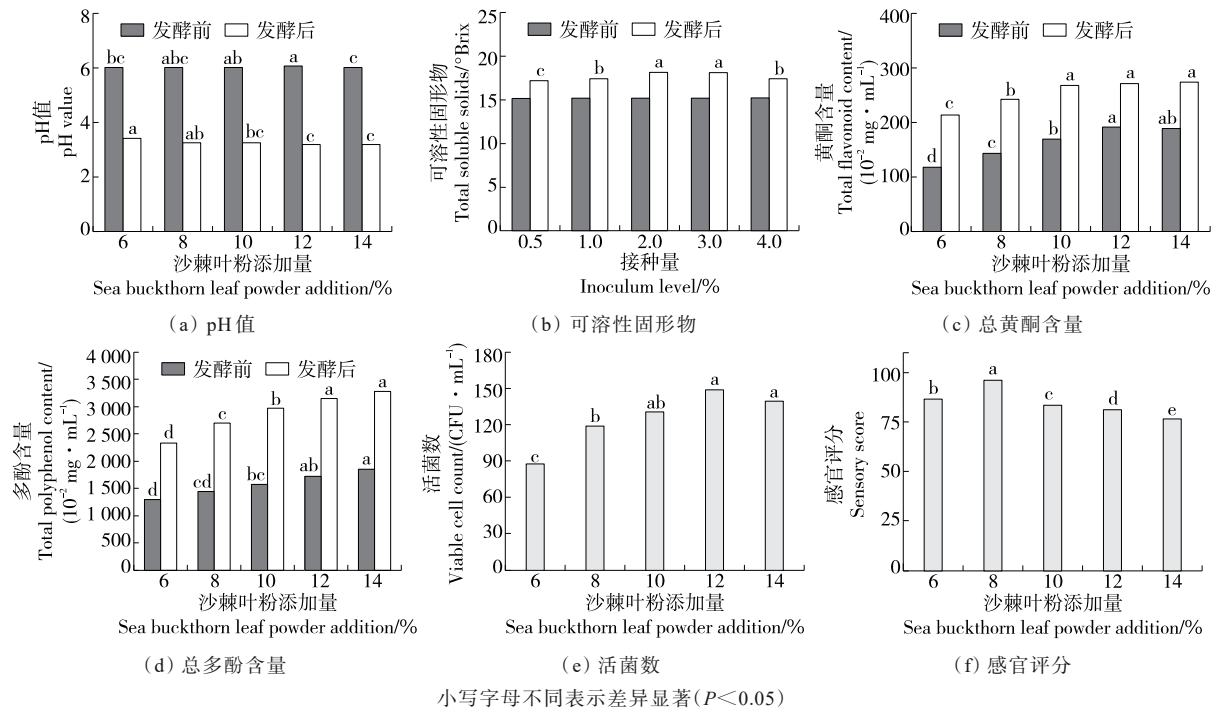


图2 沙棘叶粉添加量对沙棘叶发酵液品质的影响

Figure 2 Effects of sea buckthorn leaf powder dosage on the quality of fermented sea buckthorn leaf liquid

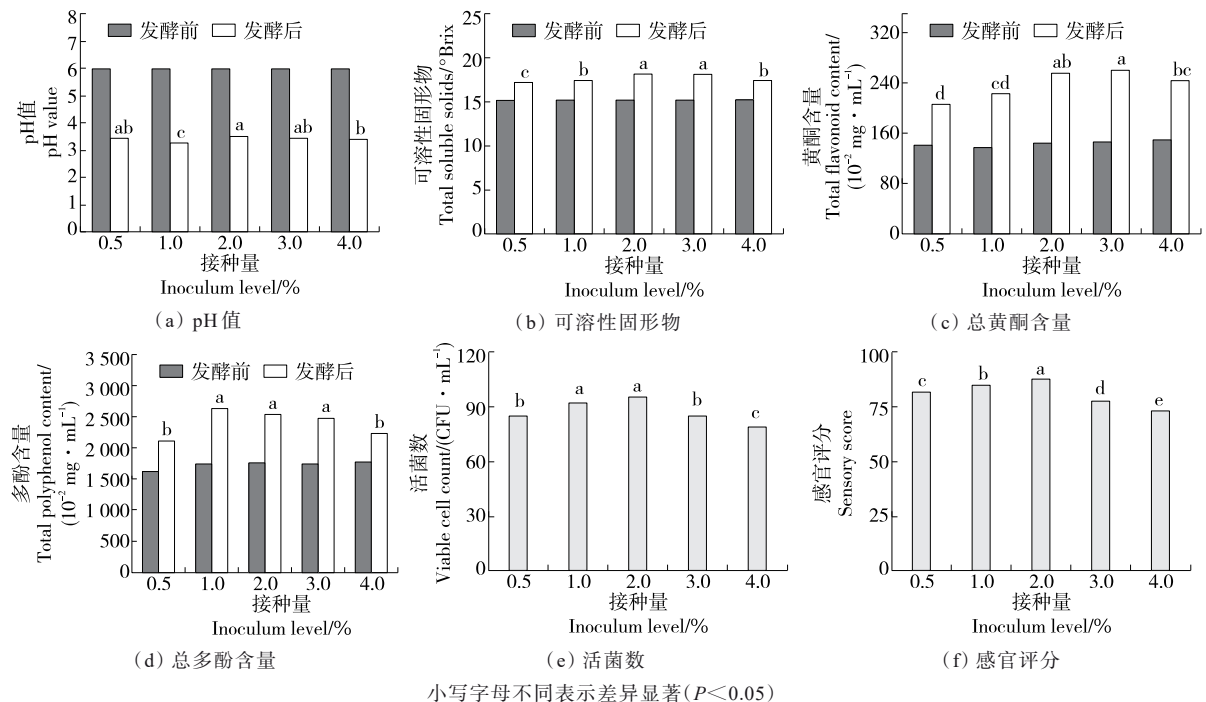


图3 植物乳植杆菌接种量对沙棘叶发酵液品质的影响

Figure 3 Effects of inoculum dosage on the quality of fermented sea buckthorn leaf liquid

低了活性物质的转化率^[41]。此外,不同初始pH值下发酵液的糖度变化不显著,表明初始pH值主要通过影响菌体生长和代谢活性而改变产品品质。综上,选取初始pH值

为4,5,6作为后续响应面试验因素水平。

2.2 响应面试验

在单因素试验基础上,选择沙棘叶粉添加量、植物乳

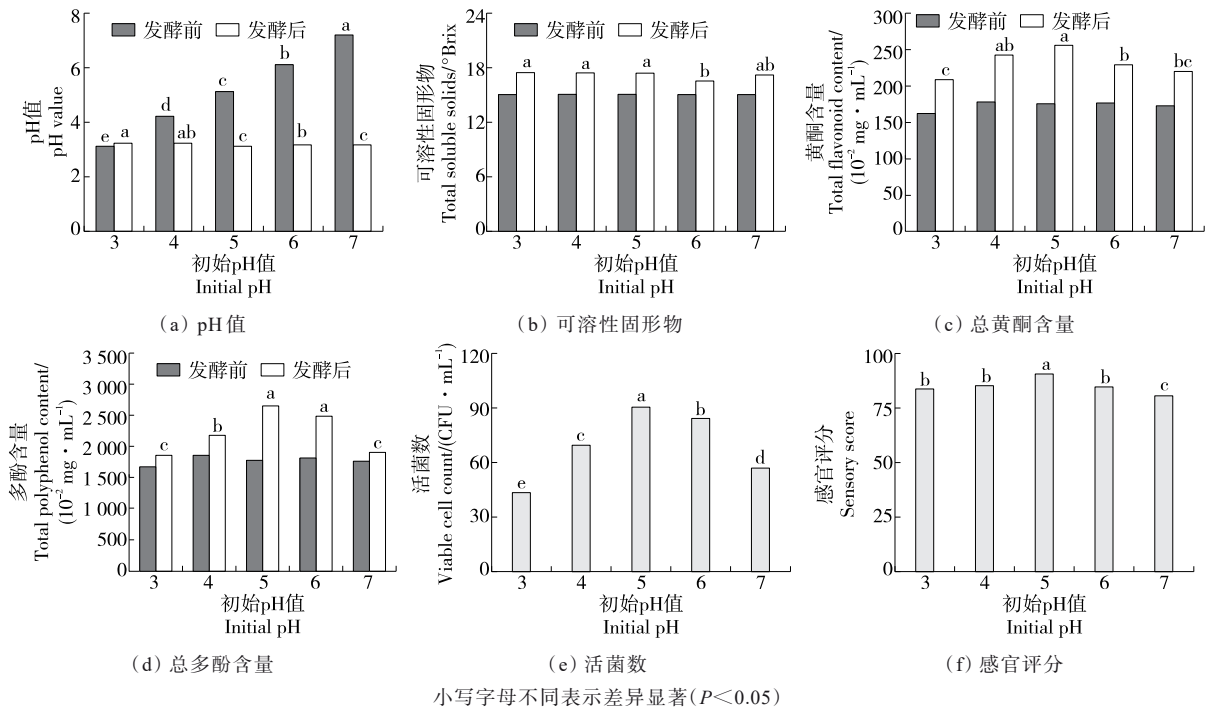


图 4 初始 pH 值对沙棘叶发酵液品质的影响

Figure 4 Effects of initial pH on the quality of fermented sea buckthorn leaf liquid

植杆菌接种量和初始 pH 值 3 个因素进行响应面分析。利用 Box-Behnken 试验设计方法,根据沙棘叶发酵液的活菌数、感官评分、活性成分变化率对沙棘叶发酵液进行打分,得出的综合评分为响应值。响应面试验因素水平见表 3,响应面试验设计及结果见表 4。

表 3 响应面试验因素水平设计

Table 3 Response surface design			
水平	A 沙棘叶粉 添加量/%	B 植物乳植杆菌 接种量/%	C 初始 pH 值
-1	6	1	4
0	8	2	5
1	10	3	6

2.2.1 方差分析 采用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验数据进行回归分析,以综合评分为响应值,建立回归方程

$$Y=71.72+0.262\ 5A+1.53B+6.46C-0.321\ 5AB+2.3AC+2.2BC-4.73A^2-5.84B^2-7.71C^2。(2)$$

由表 5 可知,模型 $P < 0.000\ 1$,极显著;失拟项 $P > 0.05$,不显著,说明该模型拟合良好。模型决定系数 $R^2 = 0.983\ 3$,表明回归方程具有较高的拟合度与相关性,模型预测值与实测值之间的吻合程度较好。根据各因素的 F 值可知,影响综合评分的主要因素由大到小依次为初始 pH 值>植物乳植杆菌接种量>沙棘叶粉添加量。

2.2.2 响应面分析 由图 5 可知,响应面均较为陡峭,且

表 4 响应面试验设计及结果

Table 4 Response surface experimental results				
试验号	A	B	C	综合评分
1	-1	0	-1	60.469 2
2	1	0	-1	60.632 1
3	-1	0	1	62.301 4
4	1	0	1	61.178 4
5	-1	-1	0	54.943 2
6	1	-1	0	51.881 3
7	-1	1	0	62.082 6
8	1	1	0	68.204 4
9	0	-1	-1	50.846 2
10	0	-1	1	51.369 2
11	0	1	-1	60.564 2
12	0	1	1	69.896 9
13	0	0	0	70.329 6
14	0	0	0	72.203 5
15	0	0	0	71.503 4
16	0	0	0	73.058 0
17	0	0	0	71.492 1

对应的等高线呈椭圆形分布,说明各因素之间存在显著的交互作用。二次项 A^2 、 B^2 和 C^2 与综合评分呈显著相关性 ($P < 0.01$),进一步验证了模型的可靠性与适用性。

2.2.3 工艺验证 根据 Design-Expert 8.0.6 软件对回归方

表5 回归模型方差分析[†]

Table 5 Analysis of variance of regression model

来源	平方和	自由度	均方	F值	P值
模型	936.64	9	104.07	45.75	<0.000 1**
A	0.55	1	0.55	0.24	0.637 6
B	18.71	1	18.71	8.22	0.024 1*
C	334.22	1	334.22	146.91	<0.000 1**
AB	0.41	1	0.41	0.18	0.682 7
AC	21.09	1	21.09	9.27	0.018 7*
BC	19.40	1	19.40	8.53	0.022 3*
A ²	94.27	1	94.27	41.44	0.000 4**
B ²	143.62	1	143.62	63.13	<0.000 1**
C ²	250.15	1	250.15	109.96	<0.000 1**
残差	15.92	7	2.27		
失拟项	11.87	3	3.96	3.90	0.110 8
纯误差	4.06	4	1.01		
总和	952.56	16			

† *为显著($P<0.05$),**为极显著($P<0.01$); $R^2=0.983\ 3$ 。

程的预测分析,得到沙棘叶发酵液的最佳工艺为沙棘叶粉添加量8.06%、初始pH值5.18、植物乳植杆菌接种量2.34%,预测综合评分为73.28。根据实际操作,调整工艺

参数为沙棘叶粉添加量8%、初始pH值5、植物乳植杆菌接种量2%,测定沙棘叶发酵液的综合评分为 72.15 ± 1.50 ($n=3$),与模型预测值接近,证实了响应面模型在工艺优化中的可靠性和准确性。

2.3 沙棘叶益生菌冻干粉的特性

2.3.1 黄酮、多酚含量 黄酮和多酚是沙棘叶中重要的活性成分^[42]。由图6可知,发酵后样品中总黄酮、总多酚含量分别从132.34, 1 826.19 mg/100 mL增至247.10, 2 984.95 mg/100 mL。其原因在于经植物乳植杆菌发酵后,植物乳植杆菌分泌的糖苷酶、纤维素酶等水解酶破坏了细胞壁结构并水解了结合态黄酮、多酚,促进其释放导致游离型黄酮含量显著增加^[43-45]。不同干燥处理后,黄酮、多酚含量均有所下降,其中Y-组下降的最多,可能是多酚类物质大部分为水溶性物质,随着冷冻干燥过程中水分的流失而损失^[45]。此外,施加了低压静电场的黄酮、多酚含量整体高于未施加低压静电场组,可能是低压静电场处理促进了样品中水分的均匀成核和细化冰晶结构,同时降低了多酚氧化酶活性,有效抑制了酚类物质的氧化降解^[46]。

2.3.2 水分活度和感官评价 水分活度是预测食品稳定性和保质期的最关键指标之一^[47]。由表6可知,4种不同干燥方式制备的沙棘叶益生菌冻干粉在水分活度上有明

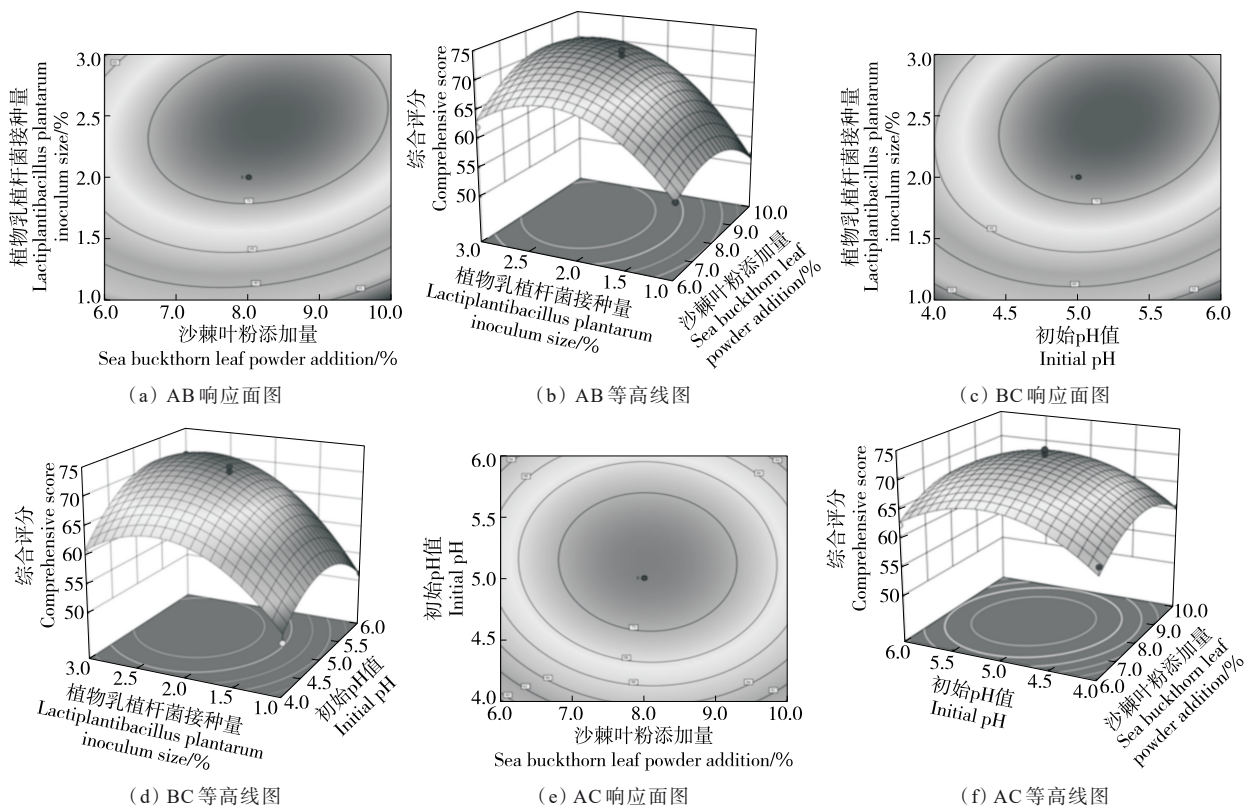


图5 各因素交互作用对综合评分的影响

Figure 5 Effects of the interactions between various factors on the comprehensive score

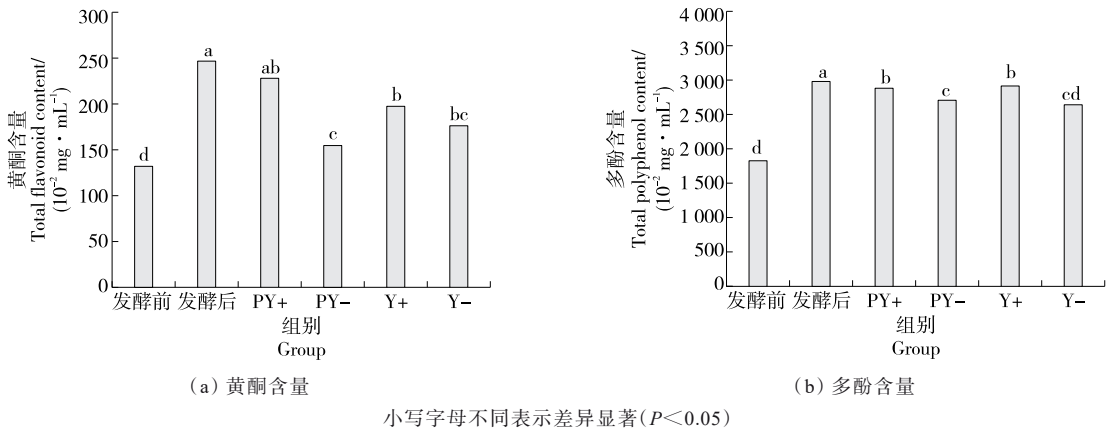


图 6 干燥方式对沙棘叶益生菌冻干粉活性物质含量的影响

Figure 6 Effects of different drying methods on the content of active substances in freeze-dried probiotic powder prepared with sea buckthorn leaves

显的不同,其中喷雾干燥法的水分活度显著低于直接冻干法的($P<0.05$),可能是液氮快速冻结的微小冰晶结构使水分升华更为充分,且喷雾形成的小颗粒显著增大了比表面积,大幅缩短了干燥时水分传质距离,最终降低残余自由水,从而显著降低水分活度^[48]。不同干燥方式所得产品在感官特征上存在明显差异,喷雾干燥样品质地细腻,颜色呈浅绿色;而直接冷冻干燥样品颗粒感较强,色泽更深,且易发生结块。从水分含量及感官评分的角度,4种干燥方式的排序依次为 $PY+>PY->Y->Y+$ 。

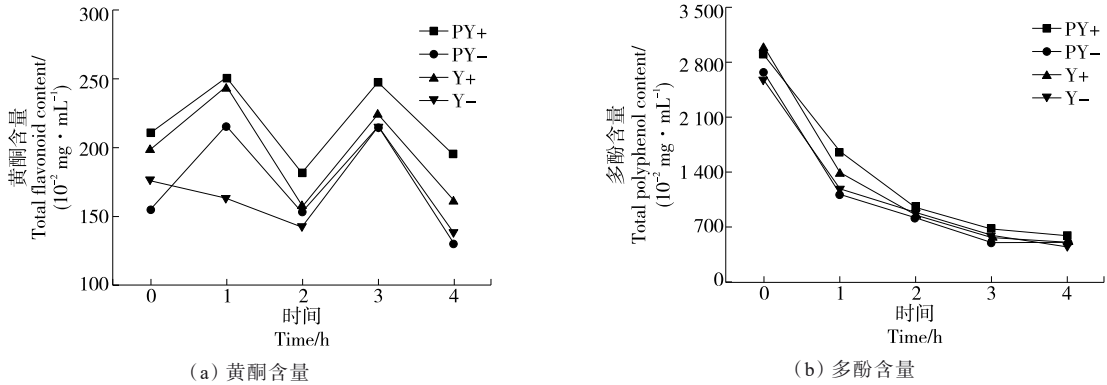
2.3.3 体外模拟消化 由图 7(a)可知,4组样品在体外消化 0~4 h 内均呈现明显的动态变化趋势。在 0~1 h 胃消化阶段,4组黄酮含量均显著提高($P<0.05$),PY+、PY-、Y+ 和 Y- 组分别提升了 19.49%、63.45%、16.88%、31.10%,可能是胃酸与胃蛋白酶能够破坏沙棘叶基质结构,释放部分结合态黄酮。在 1~2 h 时,各组黄酮含量出

表 6 沙棘叶益生菌冻干粉的水分活度与感官评价[†]
Table 6 Water activity and sensory score of freeze-dried probiotic powder prepared with sea buckthorn leaves

指标	水分活度	感官评分
PY+	0.15 ± 0.01^d	95.33 ± 1.53^a
PY-	0.16 ± 0.01^c	90.67 ± 0.58^b
Y+	0.20 ± 0.01^a	92.67 ± 1.53^a
Y-	0.18 ± 0.01^b	89.33 ± 1.15^b

[†] 同列小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

现一定幅度下降,可能是部分在胃中释放的黄酮发生了化学结构转变、聚合或与同时被消化出的蛋白质等再次形成复合物,导致其提取率或检测响应下降。在 2~3 h 时,黄酮含量又上升,可能是胆盐乳化及胰酶水解促进了结合态黄酮溶解。在 3~4 h 时,各组黄酮含量呈下降趋



小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图 7 体外模拟消化过程中黄酮、多酚含量的变化

Figure 7 Changes in flavonoid and polyphenol content during *in vitro* simulated digestion

势,但下降幅度因组别不同而有差异,其中Y—组的下降幅度最小。

由图7(b)可知,消化期间,总多酚含量呈持续下降趋势。在0~1 h时降幅最为明显,其中PY—组下降得最多,PY+组的下降程度最小,可能是较强酸性造成了结构降解或形成了不溶物导致检出量减少。之后多酚含量继续下降,但降幅逐渐减缓,体系逐步趋向平衡^[49]。

由表7可知,随着体外消化的进行,活菌数呈下降趋势,PY+组的下降趋势最显著($P<0.05$),可能是胃消化阶段,体系pH较低,强酸环境破坏了乳酸菌细胞膜通透性,导致胞内质子稳态失衡,并引起部分膜蛋白变性,从而降低了菌体活性^[50]。进入肠消化阶段后,胆盐具有类

似表面活性剂的作用,可破坏细胞膜脂质双层结构,而胰酶等消化酶则会加剧细胞外层和蛋白组分的损伤,因此活菌数进一步下降^[51]。此外,不同干燥方式下的活菌数有明显差别,喷雾干燥组的活菌数均低于直接冷冻干燥组;使用静电场辅助冷冻组的活菌数显著低于未使用组($P<0.05$),可能是电场会诱导轻微的电穿孔效应,改变膜电位,提升膜张力,并促进快速脱水,从而增加膜蛋白和磷脂结构的损伤风险^[52]。因此,从黄酮、多酚含量的角度,喷雾干燥组的保留量高于直接冷冻干燥组且加静电场辅助更优。从菌株活菌数的角度,不使用静电场辅助且直接冷冻干燥的方式更适合沙棘叶益生菌冻干粉。

表7 体外模拟消化过程中的活菌数变化[†]
Table 7 Changes in viable cell counts during *in vitro* simulated digestion

时间/h	活菌数/(CFU·g ⁻¹)			
	PY+	PY—	Y+	Y—
0	(2.53±0.22)×10 ^{8b}	(1.43±0.36)×10 ^{9a}	(3.09±0.53)×10 ^{8b}	(1.83±0.66)×10 ^{9a}
1	(5.23±0.13)×10 ^{7d}	(2.09±0.06)×10 ^{8b}	(8.35±0.13)×10 ^{7c}	(7.38±0.24)×10 ^{8a}
2	(4.22±0.13)×10 ^{6c}	(1.60±0.06)×10 ^{7b}	(3.53±0.13)×10 ^{6c}	(2.60±0.25)×10 ^{7a}
3	(9.39±0.35)×10 ^{5c}	(2.51±0.17)×10 ^{7a}	(2.54±0.11)×10 ^{5c}	(2.59±0.07)×10 ^{6b}
4	(2.57±0.11)×10 ^{5b}	(1.16±0.21)×10 ^{6a}	(3.35±0.11)×10 ^{5b}	(1.52±0.11)×10 ^{6a}

† 同行小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

3 结论

沙棘叶益生菌的最佳发酵工艺条件为沙棘叶粉添加量8%、植物乳植杆菌接种量2%、初始pH值5、发酵时间72 h、发酵温度36℃,此条件下发酵沙棘叶的活菌数与感官评分均达到最优,表明益生菌发酵可显著提高沙棘叶中总黄酮与总多酚含量($P<0.05$)。在活性成分保留方面,喷雾冷冻干燥结合静电场辅助处理的沙棘叶益生菌冻干粉品质最佳,其次为不加静电场的喷雾冷冻干燥处理。相比之下,直接冷冻干燥处理的样品活菌数显著高于喷雾干燥组($P<0.05$)。喷雾冷冻干燥组在活性成分保留、水分活度控制及粉体感官方面表现较优,更适合开发以黄酮、多酚等活性物质为核心功能的产品;而直接冷冻干燥更有利于维持较高活菌数,更适用于以益生菌活性为主的产品。对于兼顾活性成分与活菌数的复合型产品,后续可通过优化冻干保护剂体系、调控雾化粒径、降低干燥过程应激损伤及改进包装贮藏条件等措施,进一步提升喷雾冷冻干燥条件下的菌体存活率,实现产品功能与加工效率之间的平衡。后续也可结合高效液相色谱、质谱技术,对发酵及干燥过程中酚类物质的组成变化进行深入解析,并进一步考察不同干燥工艺下益生菌与活性成分在贮藏及消化过程中的稳定性。

参考文献

[1] 姚彤. 内蒙古沙棘产业发展现状及其对风沙的生态响应[J]. 中国果树, 2022(5): 104-108.
YAO T. Development status of seabuckthorn industry in Inner Mongolia and its ecological response to wind and sand[J]. China Fruits, 2022(5): 104-108.
[2] 侯霄, 卫罡, 李晓艳, 等. 山西沙棘资源及生境初步分析[J]. 国际沙棘研究与开发, 2014, 12(4): 27-29, 37.
HOU X, WEI G, LI X Y, et al. A preliminary study on seabuckthorn ecological resources of Shanxi Province[J]. International Sea Buckthorn Research and Development, 2014, 12(4): 27-29, 37.
[3] 王泉. 沙棘叶中酚类物质的提取、封装及应用研究[D]. 西安: 西北大学, 2021: 1.
WANG X. Extraction and encapsulation of phenolic compounds from seabuckthorn leaves and their application research[D]. Xi'an: Northwest University, 2021: 1.
[4] 马嘉晶, 张梅, 王媛媛, 等. 沙棘中多酚类化合物提取工艺及药理活性研究进展[J]. 中国现代中药, 2025, 27(10): 1 980-1 988.
MA J J, ZHANG M, WANG Y Y, et al. Research progress in extraction process and pharmacological activities of sea buckthorn polyphenols[J]. Modern Chinese Medicine, 2025, 27(10): 1 980-1 988.

- [5] WANG K W, XU Z Z, LIAO X J. Bioactive compounds, health benefits and functional food products of sea buckthorn: a review[J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2022, 62(24): 6 761-6 782.
- [6] 丁洁, 滕维锋, 沙芮, 等. 模糊数学感官评价法优化沙棘叶速溶颗粒冲剂的配方工艺[J]. 甘肃农业大学学报, 2023, 58(1): 235-242.
- DING J, TENG W F, SHA R, et al. Optimization of the formulation process of sea buckthorn leaf instant granules using fuzzy mathematics sensory evaluation method[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2023, 58(1): 235-242.
- [7] HOLLAND C, RYDEN P, EDWARDS C H, et al. Plant cell walls: impact on nutrient bioaccessibility and digestibility[J]. Foods, 2020, 9(2): 201.
- [8] 林美婷, 陈依凡, 郑明静, 等. 植物乳杆菌发酵对江蓠腥味及其膳食纤维功能的影响[J]. 中国食品学报, 2025, 25(9): 166-176.
- LIN M T, CHEN Y F, ZHENG M J, et al. Effect of *Lactiplantibacillus plantarum* fermentation on the fishy taste of gracilaria and its dietary fiber function[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25(9): 166-176.
- [9] 侯小艺, 王建辉, 邓娜, 等. 乳酸菌对发酵蔬菜风味影响研究进展[J]. 食品与机械, 2023, 39(4): 232-240.
- HOU X Y, WANG J H, DENG N, et al. Research progress on the effect of lactic acid bacteria on the flavor of fermented vegetables[J]. Food & Machinery, 2023, 39(4): 232-240.
- [10] 厉亚辉. 益生菌发酵番茄汁联合高强度间歇训练对糖尿病心脏病小鼠的改善作用[J]. 食品与机械, 2024, 40(11): 166-171.
- LI Y H. Improvement effects of probiotic-fermented tomato juice combined with high-intensity interval training on diabetic cardiomyopathy in mice[J]. Food & Machinery, 2024, 40(11): 166-171.
- [11] 陈芯怡, 刘国宏, 闫云峰, 等. 植物乳杆菌与纤维素酶添加对桑枝叶发酵品质的影响[J]. 草地学报, 2026, 34(1): 340-347.
- CHEN X Y, LIU G H, YAN Y F, et al. Effects of *Lactiplantibacillus plantarum* and cellulase on morus alba leaf silage fermentation quality[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(1): 340-347.
- [12] 袁义杰, 吴小菁, 黄玉云, 等. 保加利亚乳杆菌与植物乳杆菌发酵槐米药渣中槲皮素的工艺优化[J]. 饲料研究, 2025, 48(14): 102-106.
- YUAN Y J, WU X J, HUANG Y Y, et al. Optimization of process for quercetin in Sophora Japonica dregs fermented by *Lactobacillus bulgaricus* and *Lactobacillus plantarum*[J]. Feed Research, 2025, 48(14): 102-106.
- [13] 王婧. 植物乳杆菌发酵苹果汁对抗生素诱导小鼠菌群失调的影响[D]. 太谷: 山西农业大学, 2019: 44.
- WANG J. Effect of *Lactobacillus plantarum* fermented apple juice on the antibiotic-induced gut dysbacteriosis of mice[D]. Taiyu: Shanxi Agricultural University, 2019: 44.
- [14] 刘俭. 沙棘果粉的制备及其系列产品开发[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2019: 2.
- LIU J. Preparation of seabuckthorn fruit powder and development of its series products[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2019: 2.
- [15] 李兴霞, 李越, 杨菲菲, 等. 吸湿性对冻干果蔬产品及其品质特性的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(7): 159-165, 173.
- LI X X, LI Y, YANG F F, et al. The effect of hygroscopicity on quality characteristics of different freeze-drying fruit and vegetable products[J]. Food & Machinery, 2022, 38(7): 159-165, 173.
- [16] GENG Z H, ZHU L C, WANG J, et al. Drying sea buckthorn berries (*Hippophae rhamnoides* L.): effects of different drying methods on drying kinetics, physicochemical properties, and microstructure[J]. Front Nutr, 2023, 10: 1106009.
- [17] ARAYA-FARIAS M, MACAIGNE O, RATTI C. On the development of osmotically dehydrated seabuckthorn fruits: pretreatments, osmotic dehydration, postdrying techniques, and nutritional quality[J]. Drying Technology, 2014, 32(7): 813-819.
- [18] SELVAMUTHUKUMARAN M, KHANUM F. Optimization of spray drying process for developing seabuckthorn fruit juice powder using response surface methodology[J]. J Food Sci Technol, 2014, 51(12): 3 731-3 739.
- [19] 吴雨豪, 吕瑞玲, 周建伟, 等. 真空冷冻干燥技术在果蔬类食品加工中的应用现状[J]. 包装工程, 2023, 44(7): 85-95.
- WU Y H, LV R L, ZHOU J W, et al. Application status of vacuum freeze-drying technology in fruit and vegetable processing[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(7): 85-95.
- [20] 高青青, 刘娟, 李霞, 等. 不同干燥方法对雪胆湿法改性膳食纤维品质的影响[J]. 北方园艺, 2023(6): 80-86.
- GAO Q Q, LIU J, LI X, et al. Effects of different drying methods on the quality of dietary fiber modified by wet process of hemsleya chinensis[J]. Northern Horticulture, 2023(6): 80-86.
- [21] 房战祥, 孙阳阳, 秦仁炳, 等. 干燥方式对青麦仁营养成分及理化特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(8): 75-83.
- FANG Z X, SUN Y Y, QIN R B, et al. Effects of drying methods on nutritional components and physicochemical properties of green wheat kernel[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(8): 75-83.
- [22] XU C, ZHANG X Y, LIANG J, et al. Cell wall and reactive oxygen metabolism responses of strawberry fruit during storage to low voltage electrostatic field treatment[J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 192: 112017.
- [23] 白亚乡, 胡玉才. 高压电场与真空冷冻联合干燥海参方法及其效用分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(7): 2 191-2 196.
- BAI Y X, HU Y C. High voltage electric field and vacuum freeze drying technology of sea cucumber[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(7): 2 191-2 196.

- [24] OLUWATOSIN S O, TAI S L, FAGAN-ENDRES M A. Sucrose, maltodextrin and inulin efficacy as cryoprotectant, preservative and prebiotic-towards a freeze dried *Lactobacillus plantarum* topical probiotic[J]. Biotechnol Rep (Amst), 2022, 33: e00696.
- [25] MA Y J, GUO X D, LIU H, et al. Cooking, textural, sensorial, and antioxidant properties of common and tartary buckwheat noodles[J]. Food Science and Biotechnology, 2013, 22(1): 153-159.
- [26] 田建华. 沙棘叶多酚提取物及其抗氧化活性研究[J]. 食品工程, 2023(2): 48-50.
- TIAN J H. Study on the antioxidant activity of polyphenol extracts from seabuckthorn leaves[J]. Food Engineering, 2023 (2): 48-50.
- [27] GUO X D, WU C S, MA Y J, et al. Comparison of milling fractions of tartary buckwheat for their phenolics and antioxidant properties[J]. Food Research International, 2012, 49(1): 53-59.
- [28] 徐洪宇, 蒯宜蕴, 詹壮壮, 等. 果皮中酚类物质含量、抗氧化活性及在体外消化过程中成分的变化[J]. 食品科学, 2019, 40(15): 23-30.
- XU H Y, KUAI Y Y, ZHAN Z Z, et al. Phenolic contents and antioxidant activity of fruit peels and changes in phenolic composition during *in vitro* simulated digestion[J]. Food Science, 2019, 40(15): 23-30.
- [29] 陈英威, 何玲玲, 张开平, 等. 体外静态消化模型下芒果浆对植物乳植杆菌发酵乳品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(21): 45-51.
- CHEN Y W, HE L L, ZHANG K P, et al. Effect of mango pulp on quality of fermented milk with *Lactiplantibacillus plantarum* based on *in vitro* static digestion model[J]. Food Research and Development, 2025, 46(21): 45-51.
- [30] 游新侠, 田红涛, 刘梦萍, 等. 益生菌发酵复合果蔬泥的研制及品质评价[J]. 包装与食品机械, 2025, 43(5): 103-112.
- YOU X X, TIAN H T, LIU M P, et al. Development and quality evaluation of probiotic-fermented composite fruit and vegetable puree[J]. Packaging and Food Machinery, 2025, 43 (5): 103-112.
- [31] CHI Z H, FENG Y, WEI X K, et al. A co-fermentation technology based on small peptide production and protein structure modification increases the edible value of corn gluten meal[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 198: 116054.
- [32] 刘瀚东, 姜彩霞, 刘晓兰, 等. 种曲发酵对玉米浆蛋白质降解程度和抗氧化活性提升的影响[J/OL]. 食品工业科技. (2025-11-11) [2026-04-11]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025070166>.
- LIU H D, JIANG C X, LIU X L, et al. Impact of seed koji fermentation on the degree of protein degradation and the enhancement of antioxidant activity in corn steep liquor[J/OL]. Science and Technology of Food Industry. (2025-11-11) [2026-04-11]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025070166>.
- [33] 黄天, 韩之皓, 郭帅, 等. 益生菌山药饮料发酵工艺优化及其冷藏稳定性[J]. 食品工业科技, 2019, 40(15): 129-134, 142.
- HUANG T, HAN Z H, GUO S, et al. Optimization of fermentation process and cold storage stability of probiotic yam beverage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(15): 129-134, 142.
- [34] 刘涵玉, 孟卓妮, 罗林芬, 等. 响应面法优化刺梨酵素发酵工艺及其品质研究[J]. 粮食与油脂, 2025, 38(11): 79-85, 153.
- LIU H Y, MENG Z N, LUO L F, et al. Research on optimization of fermentation process of *Rosa roxburghi* Tratt. enzyme by response surface methodology and its quality[J]. Cereals & Oils, 2025, 38(11): 79-85, 153.
- [35] 胡晓婷, 陈浩, 赵聃, 等. 基于响应面法和人工神经网络优化百香果豆清饮料发酵工艺[J]. 食品与发酵工业, 2026, 52(6): 211-221.
- HU X T, CHEN H, ZHAO D, et al. Optimization of fermentation process of passion fruit soy whey beverage based on response surface methodology and artificial neural network [J]. Food and Fermentation Industries, 2026, 52(6): 211-221.
- [36] 蒋雯杰, 叶箭, 成林, 等. 乳酸菌发酵植物基饮料中营养物质及风味物质的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2026, 52(1): 376-386.
- JIANG W J, YE J, CHENG L, et al. Progress on nutrients and flavor substances in lactic acid bacteria-fermented plant-based beverages[J]. Food and Fermentation Industries, 2026, 52(1): 376-386.
- [37] 林登蕃, 郑志豪, 周映君, 等. 植物基食品中多酚的生物转化及生物活性研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(14): 319-327.
- LIN D F, ZHENG Z H, ZHOU Y J, et al. Research progress in biotransformation and biological activity of polyphenols in plant-based foods[J]. Food Science, 2024, 45(14): 319-327.
- [38] 郭楠楠, 张心茹, 张杰. 响应面法优化陈皮蜂蜜酒发酵工艺[J]. 中国酿造, 2025, 44(6): 205-211.
- GUO N N, ZHANG X R, ZHANG J. Optimization of fermentation process for tangerine peel mead by response surface methodology[J]. China Brewing, 2025, 44(6): 205-211.
- [39] 班世栋, 宗春阳, 王晓丹, 等. 植物乳植杆菌降解黄精多糖产寡糖发酵条件优化及对益生菌生长的影响[J]. 中国酿造, 2025, 44(9): 173-178.
- BAN S D, ZONG C Y, WANG X D, et al. Optimization of fermentation conditions of oligosaccharide production from degradation of *Polygonatum cyrtoneura* polysaccharides by *Lactiplantibacillus plantarum* and effect on probiotics growth [J]. China Brewing, 2025, 44(9): 173-178.
- [40] 郭乃菲, 黄硕, 刘敏娜, 等. 乳酸菌发酵五味子果汁的工艺优化[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(21): 102-109.
- GUO N F, HUANG S, LIU M N, et al. Optimization of fermentation process of schisandra chinensis fruit juice with

- lactic acid bacteria[J]. Food Research and Development, 2025, 46(21): 102-109.
- [41] WURZ D A. Wine and health: a review of its benefits to human health[J]. BIO Web of Conferences, 2019, 12: 04001.
- [42] 王媛媛, 冯勇荣, 孙青占, 等. 不同产地沙棘叶茶品质分析及综合评价[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(24): 331-338.
- WANG Y Y, FENG Y R, SUN Q Z, et al. Quality analysis and comprehensive evaluation of seabuckthorn leaf tea from different producing areas[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(24): 331-338.
- [43] MUNOZ R, RIVAS B L, RODRIGUEZ H, et al. Food phenolics and *Lactiplantibacillus plantarum*[J]. Int J Food Microbiol, 2024, 412: 110555.
- [44] WANG Z, JIN X, ZHANG X, et al. From function to metabolome: metabolomic analysis reveals the effect of probiotic fermentation on the chemical compositions and biological activities of perilla frutescens leaves[J]. Front Nutr, 2022, 9: 933193.
- [45] 张璐, 董同力嘎, 星全芳, 等. 不同温度下低压静电场辅助冷冻对沙棘果品质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(6): 120-127.
- ZHANG L, DONG T L G, XING Q F, et al. Effect of low voltage electrostatic field-assisted freezing on quality of seabuckthorn fruit[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(6): 120-127.
- [46] 刘悦兰, 王香云, 郑鄢燕, 等. 低压静电场处理对杏果实采后黑斑病的抑制作用[J]. 食品工业科技, 2026, 47(7): 386-394.
- LIU Y L, WANG Y X, ZHENG Y Y, et al. Inhibitory effect of low voltage electrostatic field treatment on postharvest alternaria rot of apricot fruit[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(7): 386-394.
- [47] 林可为, 李梓健, 李林静, 等. 不同物理场处理技术对冻干芒果粉品质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(12): 41-49.
- LIN K W, LI Z J, LI L J, et al. Effects of different physical field treatment technologies on the quality of freeze-dried Mango powder[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(12): 41-49.
- [48] 王浩宇. 喷雾冷冻干燥制备固体麦精的特性研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2023: 29.
- WANG H Y. Characteristic of dry malt extract prepared by spray-freeze drying[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2023: 29.
- [49] VELASCO-RUIZ I, DE SANTIAGO E, ORDONEZ-DIAZ J L, et al. Effect of in vitro gastrointestinal digestion and colonic fermentation on the stability of polyphenols in Pistachio (*Pistacia vera* L.) [J]. Int J Mol Sci, 2023, 24(5): 4 975.
- [50] 关小莺, 温靖, 肖更生, 等. 干酪乳杆菌发酵荔枝汁在模拟胃肠道中耐受能力及其抑菌性的研究[J]. 现代食品科技, 2019, 35(4): 96-102.
- GUAN X Y, WEN J, XIAO G S, et al. Antimicrobial activity of the litchi juice fermented by *Lactobacillus casei* and the strain's tolerance in simulated gastrointestinal tract[J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(4): 96-102.
- [51] RUIZ L, MARGOLLES A, SANCHEZ B. Bile resistance mechanisms in *Lactobacillus* and *Bifidobacterium*[J]. Front Microbiol, 2013, 4: 396.
- [52] 张祥龙, 陈雨珊, 杨雷鹏, 等. 空间电场技术在食品贮藏保鲜中的应用研究进展[J/OL]. 食品工业科技. (20254-10-20) [2026-04-11]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025060368>.
- ZHANG X L, CHEN Y S, YANG L P, et al. Research progress on the application of spatial electric field technology in food storage and preservation[J/OL]. Science and Technology of Food Industry. (2025-10-20) [2026-04-11]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025060368>.