苗嘉, 张紫媛, 刘文惠, 等. 醪糟发酵牛肉干工艺优化及肌原纤维蛋白变化研究 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(1): 250−261. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024110303

MIAO Jia, ZHANG Ziyuan, LIU Wenhui, et al. Optimization of the Rice Wine Fermentation Process for Beef Jerky and Changes in Myofibrillar Proteins[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(1): 250−261. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024110303

· 工艺技术 ·

醪糟发酵牛肉干工艺优化及肌原纤维蛋白变化研究

苗　嘉, 张紫媛, 刘文惠, 孔保华, 刘　骞, 孙方达*
（东北农业大学食品学院, 黑龙江哈尔滨 150030）

摘　要: 本研究旨在探究醪糟发酵对牛肉干品质特性的影响。通过测定水分含量、色差、pH、剪切力、质构、水分活度，同时以感官评分为响应值进行响应面试验，优化牛肉干发酵工艺，并借助测定溶解度、表面疏水性及 SDS-PAGE 等方法，深入探究发酵过程中肌原纤维蛋白的变化情况。结果显示，醪糟发酵牛肉干最佳加工工艺为醪糟添加量 6%、发酵时间 24 h、烘烤时间 2.5 h。在此条件下生产的牛肉干，其理化指标表现为水分含量 42.39%、pH5.61、水分活度 0.9298、剪切力 28.97 N。该工艺下研制的发酵牛肉干色泽优良，口感适中，风味独特，综合品质较高。在发酵过程中，牛肉肌原纤维蛋白的溶解度随着发酵时间的延长而逐渐降低，而其表面疏水性则不断升高。这一现象表明，发酵处理促使肌原纤维蛋白的高度聚集结构逐渐展开，导致内部疏水基团暴露。同时，SDS-PAGE 结果表明，添加醪糟后更有利于肌原纤维蛋白降解。本研究的发现为发酵牛肉干新产品的开发提供了重要的理论支持，也为相关领域的研究提供了新的思路。

关键词: 发酵牛肉干, 醪糟, 感官品质, 响应面优化, 肌原纤维蛋白
中图分类号: TS251.5　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)01−0250−12
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024110303
本文网刊:

Optimization of the Rice Wine Fermentation Process for Beef Jerky and Changes in Myofibrillar Proteins

MIAO Jia, ZHANG Ziyuan, LIU Wenhui, KONG Baohua, LIU Qian, SUN Fangda*
（College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China）

Abstract: The objective of this study was to investigate the effect of rice wine on the quality of beef jerky. The beef jerky fermentation process was optimized by determining the moisture content, color difference, pH, shear force, texture, and water activity, with sensory evaluation scores serving as the response variables in a response surface methodology experiment. Additionally, changes in myofibrillar proteins during fermentation were thoroughly examined using solubility measurement, surface hydrophobicity assessment, and sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE). The optimal processing conditions were rice wine addition 6%, fermentation time 24 h, and baking time 2.5 h. The beef jerky produced under these conditions exhibited physicochemical properties with moisture content 42.39%, pH 5.61, water activity 0.9298 and shear force 28.97 N. The fermented beef jerky prepared using this process had excellent color, moderate texture, unique flavor, and high overall quality. During the fermentation process, the solubility of myofibrillar proteins in beef gradually decreased with increasing fermentation time, whereas its surface hydrophobicity continuously increased. This phenomenon indicated that the fermentation promoted the gradual unfolding of the highly aggregated structure of myofibrillar proteins, resulting in the exposure of internal hydrophobic groups. The SDS-PAGE results demonstrated that the addition of rice wine was more conducive to the degradation of myofibrillar proteins. The findings of

收稿日期: 2024−11−25
基金项目: 黑龙江省自然科学基金（YQ2022C022）; 国家自然科学基金（32101999）。
作者简介: 苗嘉（2000−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 发酵肉制品, E-mail: 1747117271@qq.com。
*** 通信作者:** 孙方达（1987−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 畜产品加工, E-mail: sunfangda@neau.edu.cn。

this study provide important theoretical support for the development of new fermented beef jerky products, and offer new insights for research in related fields.

Key words: fermented beef jerky; rice wine; sensory quality; response surface optimization; myofibrillar protein

牛肉富含优质蛋白质，其氨基酸组成与人体需求高度匹配，是重要的营养来源[1]。然而，生鲜牛肉的高水分含量易引发微生物增殖，导致贮藏期短、品质劣变等问题[2]。传统干制肉制品通过较低的水分含量（水分含量<20%）抑制微生物活性以延长保质期[3]，但过度脱水会导致质地坚硬、适口性差，且长时间干燥工艺显著增加能耗成本[4]。相比之下，半干型肉干（水分含量 20%~50%）在硬度与贮藏性之间取得平衡，逐渐成为研究热点[5]。传统肉干生产依赖自然晾晒或热风干燥，易受环境温湿度波动和杂菌污染影响，导致产品品质不稳定[6]。为此，发酵技术被引入肉干加工：通过特定微生物代谢调控体系 pH、分解大分子物质并抑制腐败菌生长，可同步提升产品风味、安全性和功能特性[7−9]。例如，杨晓钢等[10] 通过复配肉葡萄球菌、植物乳杆菌和酵母菌开发发酵牛肉，显著提高游离氨基酸含量并改善色泽；周亚军等[11] 证实清酒乳杆菌与木糖葡萄球菌可延缓脂质氧化，促进特征风味形成。然而，现有研究多采用商业菌种定向接种，对天然复合发酵剂（如富含多菌系的传统醪糟）的挖掘不足，限制了风味多样性和工艺经济性。

醪糟是以谷物为原料经米酒曲发酵制成的低酒精食品，其菌群组成复杂（包括霉菌、酵母菌和乳酸菌等），能分泌淀粉酶、蛋白酶等功能性酶系，将底物转化为糖类、氨基酸及风味前体物质[12−14]。研究表明，醪糟中霉菌与酵母菌的协同作用可加速基质降解并形成独特香甜风味，而乳酸菌代谢产生的有机酸能赋予产品柔和酸味[15−17]。近年来，醪糟作为天然发酵剂在肉制品中的应用潜力逐渐显现：四川传统发酵香肠通过添加醪糟缩短成熟周期并提升风味层次[18]；Mikami 等[19] 发现清酒糟中的微生物与酶可改善发酵香肠质构。然而，目前针对醪糟发酵牛肉干的系统性研究较少。

基于此，本研究以牛臀肉为原料，创新性引入醪糟作为发酵剂，利用其天然菌群与酶系实现牛肉的定向发酵，通过单因素和响应面法优化试验探究发酵牛肉干制备的最佳工艺条件，并分析添加醪糟后的牛肉干制品的水分、pH、剪切力、质构、色差等以及发酵过程中牛肉肌原纤维蛋白变化情况，为醪糟的利用、发酵牛肉新产品的研究开发和工业化生产提供一定理论基础。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

牛臀后腿肉、调味料　购自当地生鲜超市；亚硝酸盐（食品级）　市售；醪糟　成都王家巷；氯化钠（NaCl）、氯化镁（$MgCl_2$）、磷酸氢二钠（Na_2HPO_4）、磷酸二氢钠（NaH_2PO_4）、乙二醇双四乙酸（EGTA）分析纯，天津科密欧化学试剂有限公司；溴酚蓝（Bromophenol blue, BPB）　分析纯，上海源叶生物科技有限公司。

AL104 精密电子天平　上海梅特勒-托利多仪器设备有限公司；ZE6000 色差仪　日本日立有限公司；TA-XT plus 型质构分析仪　英国 Stable Micro System 公司；DELTA 320 pH 计　美国 Mettler Toledo 公司；DZ-600/2S 真空包装机　山东康贝特食品包装机械有限公司；AquaLab 智能水分活度仪　美国 Decagon Devices 公司；DHG-90003A 热风干燥箱　吴江市宏泰电热设备有限公司；Labshark 水平垂直电泳仪　比克曼生物有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　醪糟理化指标的测定　酒精度测定：参考 GB 5009.225-2023《食品安全国家标准 酒和食用酒精中乙醇浓度的测定》[20]。总酸测定：参考 GB 12456-2021《食品安全国家标准 食品中总酸的测定》[21]。总糖测定：采用苯酚-硫酸法[22]。pH 测定：pH 计法。大肠杆菌测定：参考 GB 4789.3-2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验大肠菌群计数》[23]。沙门氏菌测定：参考 GB 4789.4-2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验沙门氏菌检验》[24]。

1.2.2　醪糟发酵牛肉干的工艺流程　参考张玉[25] 的方法，并有所修改，发酵牛肉干工艺流程见图 1。



图 1　发酵牛肉干工艺流程图

Fig.1　Process of fermented beef jerky production flowchart

原料肉预处理：选用新鲜的牛臀肉，去除筋膜和多余脂肪，切成 6 cm×1.5 cm×1.5 cm 的条状。

清洗浸泡：将切好的牛肉条用清水浸泡，以去除血水和杂质。

添加配料：根据配方，向 100 g 牛肉中添加食盐 1.2 g、白砂糖 1 g、葡萄糖 0.5 g、酱油 3 g、料酒 2 g、十三香 0.4 g、姜粉 0.3 g、味精 0.2 g、亚硝酸盐 0.015 g 调味料，充分搅拌均匀后进行腌制。

腌制：将调味后的牛肉在 4 ℃ 条件下腌制 18 h，使调味料充分渗透到肉中，增强风味。

发酵：将打碎的醪糟按比例涂抹到腌制好的牛肉中，混合均匀，25 ℃ 恒温发酵。

蒸制：发酵好的肉干转移至蒸箱中蒸制 30 min，确保肉干完全变熟。

烘烤：将蒸熟后的肉干转至鼓风干燥箱中烘干，烘烤温度为 75 ℃，去除多余的水分。

包装：干燥后的牛肉干冷却至室温，进行真空包装。

1.2.3 单因素实验设计 选取 3 个对醪糟发酵牛肉干品质影响较大的因素，醪糟添加量、发酵时间、烘烤时间进行单因素实验，测定产品的水分含量、色差、pH、剪切力等理化特性，同时进行感官评价，确定单因素最适条件。醪糟添加量对肉干品质的影响：分别设定醪糟的添加量为肉重的 0%、2%、4%、6%、8%、10%，发酵时间为 24 h，烘烤时间为 2.5 h。发酵时间对肉干品质的影响：分别设定发酵时间为 0、8、16、24、32、40 h，醪糟添加量为 6%，烘烤时间为 2.5 h。烘烤时间对肉干品质的影响：分别设定烘烤时间为 1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0 h，醪糟添加量为 6%，发酵时间为 24 h。

1.2.4 水分含量测定 参考 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》，采用直接干燥法进行测定[26]。

1.2.5 色泽的测定 样品的色泽采用色差仪反射模式测定，检测前将仪器分别用黑井和白板校准，光源采用 D65/2。取切碎的牛肉均匀铺满样品盒底部，置于载样台上进行测定。测定时将样品盒沿一个方向旋转三次，测定三次，分别记录样品的亮度值(L^*)、红度值(a^*)和黄度值(b^*)，输出值为其三次的平均值。

1.2.6 pH 的测定 称取 10 g 搅碎肉样，加 10 mL 蒸馏水涡旋 1 min，静置 30 min 过滤，用 pH 计测定上清液的 pH，每次测定重复三次。

1.2.7 剪切力测定 肉样的剪切力通过 TA.XT Plus 质构仪进行测定。将处理好的肉块放置于仪器的测试台上，调整刀片探头和肉样方向，使刀片垂直于肌纤维方向进行剪切测试。剪切力(SF)分析测前和测后速度为 5 mm/s，返回速度为 1 mm/s。刀片穿透距离为 8 mm，触发力为 30.0 g。于肉干不同位置测定 8 次，并计算其平均剪切力值，表示为 N。

1.2.8 质地剖面分析测定 将各个处理组的牛肉切成 1 cm^3 肉块，选择 P50 探头(36 mm 不锈钢圆柱体)测定质构，参数设置为测试速度为 1 mm/s，压缩率为 50%。测前和测后速度均为 5 mm/s，返回速度为 1 mm/s。两次压缩之间的测试间隔设置为 5 s。

1.2.9 水分活度测定 将处理组的牛肉室温下切成肉末并铺满样品盒底部，仪器稳定后读数。

1.2.10 感官评价 由 10 男和 10 女(年龄在 20~25 岁)组成 20 人感官小组，进行专业感官评估，评分细则如表 1 所示。每组选择粗细均一的牛肉干置于直径为 20 cm 的托盘中，并随机编号。感官评价在常温(约 25 ℃)下进行，另向成员提供娃哈哈纯净水来避免混淆不同样品之间的风味。

1.2.11 响应面试验设计 在单因素实验的基础上，将醪糟添加量、发酵时间、烘烤时间作为自变量，感官评分为响应值，进行三因素三水平响应面试验，对发酵牛肉干的发酵工艺参数进行优化。各因素水平如表 2 所示。

表 1 发酵牛肉干感官评价细则

Table 1 Sensory scoring rules for fermented beef jerky

指标	标准	评分
色泽	暗红色、颜色均一、有光泽	20~16
	深红色、颜色均一、光泽较差	15~11
	棕褐色、色泽不均匀	10~6
	深黑色、色泽差	5~1
风味	酒香味重且肉香味重	20~16
	酒香味淡或肉香味淡	15~11
	无发酵酒香味	10~6
	肉味淡，有异味	5~1
咀嚼性	容易咀嚼、弹性好、硬度适中	20~16
	较易咀嚼、稍硬	15~11
	较难咀嚼、较硬	10~6
	难咀嚼、很硬	5~1
组织状态	结构紧密、肌纤维完整、呈条状	20~16
	结构较紧密、肌纤维较完整、呈条状	15~11
	结构松散、肌纤维断裂、呈块状	10~6
	结构松散、表面有毛刺	5~1
滋味	甜咸酸度适中、回味浓郁	20~16
	甜咸酸度适中、回味不足	15~11
	偏酸、偏甜或偏咸、无异味	10~6
	风味不佳、偏酸或偏咸	5~1

表 2 响应面试验因素水平

Table 2 Factors and levels of response surface test

水平	因素		
	醪糟添加量(%)	发酵时间(h)	烘烤时间(h)
−1	4	16	2
0	6	24	2.5
1	8	32	3

1.2.12 肌原纤维蛋白的提取 根据董智铭等[27]的方法稍作修改，提取肌原纤维蛋白(MP)。每隔 8 h 称取醪糟处理的牛肉 100 g，加入 400 mL 提取缓冲液(10 mmol/L 磷酸盐缓冲液，2 mmol/L $MgCl_2$，0.1 mol/L NaCl，1 mmol/L EGTA，pH7.0)，用组织捣碎机，在 8000 r/min 下匀浆 1 min。将匀浆以 3500×g 离心 15 min，弃去上清液，加入 400 mL 提取缓冲液。重复此步骤三次。将所得沉淀加入 400 mL 洗液(0.1 mol/L NaCl)中，以 8000 r/min 匀浆 60 s，并以 3500×g 离心 15 min。在最后一次离心之前用 4 层纱布过滤去除结缔组织。收集所有滤液，用 0.1 mol/L HCl 调节 pH 至 6.25，以 3500×g 离心 15 min。弃去上清液，得到糊状沉淀物为 MP。用牛血清蛋白(BSA)制作标准曲线，以 BSA 浓度(mg/mL)为横坐标，吸光度为纵坐标绘制标准曲线，根据牛血清蛋白线性回归方程 y=0.0515x+0.0027(R^2=0.9998)计算 MP 含量。

1.2.13 蛋白溶解度的测定 依据 Zhang 等[28]的方法，略有修改。将肌原纤维蛋白悬液 7500×g 离心 15 min。蛋白溶解度为离心后上清液的蛋白含量(C_a)与离心前悬液的蛋白含量(C_b)的比值。

$$溶解度(\%) = \frac{C_a}{C_b} \times 100$$

1.2.14　表面疏水性　依据 Yin 等[29] 的方法，稍有修改，取 5 mg/mL 的蛋白稀释液 5 mL（稀释于 20 mmol/L 的磷酸盐缓冲溶液中）于 10 mL 的离心管中，随后加入 1 mg/mL 的溴酚蓝溶液（BPB）100 μL，涡旋混合。于 5000 r/min 下离心 10 min，吸取上清液，继续离心，吸取上清液置于波长 595 nm 处测其吸光度为 A 样品，并用稀释的磷酸盐缓冲溶液作为空白样品，通过相同的方法，测其吸光度为 A 对照，表面疏水性用 BPB 的结合量来表示，计算方法如下。

$$BPB结合量(\mu g) = \frac{A对照 - A样品}{A对照} \times 100$$

1.2.15　SDS-PAGE 测定　根据 Pan 等[30] 的方法，稍作修改。将肌原纤维蛋白用缓冲溶液稀释至 4 mg/mL，各取 1 mL 蛋白溶液分别与 1 mL 的 SDS-PAGE 溶解液混合均匀，振荡 1 min 后，于 100 ℃ 煮沸 3 min，之后冷却至室温，最终蛋白浓度为 2 mg/mL。使用电泳预制胶进行电泳。上样量为 10 μL。电泳开始时电压为 80 V，样品进入分离凝胶后改为 120 V。电泳结束后取出胶片用染色液染色 20 min，用脱色液脱至透明，随后进行拍照。

1.3　数据处理

所得数据采用 SPSS 22.0 统计软件进行方差分析和邓肯多重比较分析（P<0.05），统计表利用 Excel 表格进行绘制，Origin 2019 软件分析绘图。独立生产三批牛肉干，对每批牛肉干所有指标进行三次重复测定。结果表示为平均数±标准差。运用 Design Expert 10 软件进行 Box-Behnken 试验设计。

2　结果与分析

2.1　醪糟的理化指标

醪糟的酒精度为 2.4%vol，总酸含量为 0.68±0.02 g/100 g，总糖含量为 117.11±9.51 mg/mL，pH 为 3.69±0.03，未检测出大肠杆菌和沙门氏菌。其理化指标和微生物指标均符合 NY/T 1885-2017《绿色食品米酒》的要求[31]。

2.2　单因素实验结果

2.2.1　醪糟添加量的确定　如图 2（A）所示，随着醪糟添加量的增加，发酵牛肉干的水分含量呈逐渐下降趋势。当添加量从 0% 增加到 10% 时，水分含量从约 44% 降至 38%。这可能是由于微生物在生长繁殖过程中吸收了环境中的水分，从而导致含水量降低。如图 2（B）所示，随着醪糟添加量的增加，牛肉干的 pH 显著降低（P<0.05）。当添加量为 10% 时，牛肉干的 pH 达到最低。这可能是由于醪糟中的乳酸菌在发酵过程中产酸，进而降低了肉干的 pH。这一结果与于立梅[32] 研究乳酸菌发酵里脊火腿的 pH 变化一致。水分活度是发酵肉制品的重要安全指标之一。如图 2（C）所示，随着醪糟添加量的增加，牛肉干的水分活度也呈现下降趋势。这可能是由于经醪糟发酵后，牛肉干中酸性物质增多，而蛋白质在酸性环境下持水能力相对较弱，进而导致牛肉干的水分活度降低[33]。如图 2（D）所示，随着醪糟添加量的增加，牛肉干的剪切力显著下降（P<0.05）。这是由于发酵导致肌原纤维蛋白降解，蛋白质之间的分子结合力减

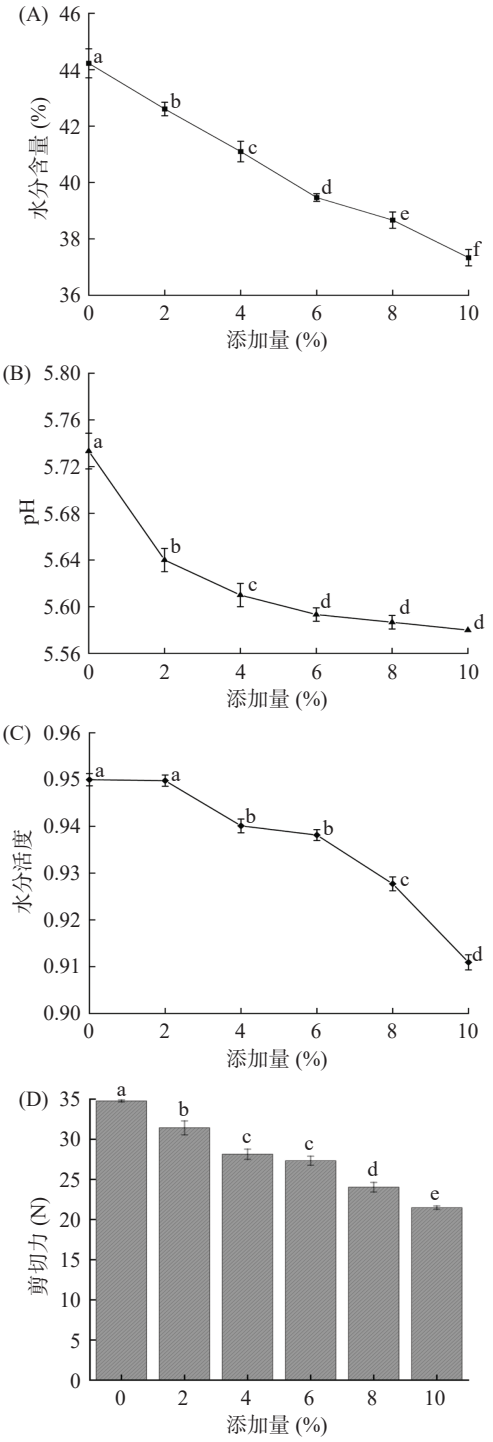


图 2　醪糟添加量对牛肉干理化特性的影响

Fig.2　Effect of rice wine addition on physicochemical properties of beef jerky

注：（A）添加量对水分含量的影响；（B）添加量对 pH 的影响；（C）添加量对水分活度的影响；（D）添加量对剪切力的影响；图中不同小写字母代表差异显著（P<0.05），图 3、图 4 同。

表 3 添加量对牛肉干质构和色泽的影响

Table 3 Effect of rice wine addition on the texture and colour of beef jerky

添加量(%)	质构				色泽		
	硬度(N)	咀嚼性(mJ)	弹性(mm)	内聚性	L^*	a^*	b^*
0	15740.28±533.06^{a}	6126.05±870.23^{a}	0.67±0.02^{a}	0.61±0.03^{a}	48.62±0.39^{a}	20.69±0.36^{e}	19.66±0.83^{ab}
2	15109.33±635.19^{a}	6321.57±619.06^{a}	0.69±0.05^{a}	0.60±0.01^{a}	47.23±0.54^{bc}	21.55±0.28^{d}	18.31±0.53^{c}
4	12544.92±482.77^{b}	4578.75±176.20^{b}	0.60±0.04^{a}	0.60±0.04^{a}	47.60±0.22^{ab}	22.07±0.13^{c}	18.98±0.43^{bc}
6	11669.06±283.04^{c}	4308.19±469.11^{bc}	0.63±0.05^{a}	0.60±0.03^{a}	46.39±0.98^{c}	22.31±0.21^{bc}	18.72±0.52^{c}
8	10443.78±95.65^{d}	4056.26±228.28^{bc}	0.61±0.05^{a}	0.61±0.01^{a}	43.40±0.32^{d}	22.45±0.10^{ab}	18.47±0.18^{c}
10	9806.67±707.97^{d}	3494.17±243.29^{c}	0.61±0.05^{a}	0.56±0.01^{a}	44.12±0.95^{d}	22.72±0.19^{a}	20.31±0.05^{a}

注: 同一列不同字母表示差异显著(P<0.05), 表4~表8同。

表 4 添加量对牛肉干感官评分的影响

Table 4 Effect of rice wine addition on sensory scores of beef jerky

添加量(%)	色泽	风味	咀嚼性	组织状态	滋味	总分
0	12.87±0.26^{d}	10.23±0.25^{d}	13.10±0.50^{d}	13.37±0.38^{c}	12.37±0.21^{e}	62.03±0.55^{e}
2	13.67±0.21^{c}	12.70±0.17^{c}	13.43±0.32^{cd}	13.60±0.26^{bc}	13.47±0.38^{d}	66.87±0.57^{d}
4	15.00±0.10^{b}	14.27±0.46^{b}	14.43±0.35^{b}	14.23±0.32^{ab}	15.23±0.21^{ab}	73.17±0.23^{b}
6	15.63±0.25^{a}	15.77±0.15^{a}	15.20±0.30^{a}	14.90±0.20^{a}	15.80±0.40^{a}	77.30±0.62^{a}
8	14.90±0.26^{b}	14.70±0.10^{b}	14.23±0.35^{b}	14.37±0.38^{a}	15.07±0.31^{b}	73.27±0.60^{b}
10	13.73±0.38^{c}	12.83±0.21^{c}	13.83±0.21^{bc}	13.37±0.47^{c}	14.33±0.32^{c}	68.10±0.10^{c}

弱, 致使肌肉结构松散, 因此剪切力下降。这一结果与 Zhou 等[34] 的研究结果相一致。

如表 3 所示, 发酵牛肉干的质构变化与剪切力的结果相似。随着醪糟添加量的增加, 硬度和咀嚼性显著下降(P<0.05)。这可能是由于发酵过程中乳酸菌和霉菌的共同作用导致水分流失, 加剧了蛋白质的消耗, 从而使其硬度降低[35]。牛肉干色泽的形成与 pH、加热时间、微生物数量等多种因素相关, 其中肌肉结构的松散程度也是影响牛肉干亮度的主要原因之一[36]; 在发酵过程中, 随着醪糟添加量的增加, 发酵牛肉干的 L^*值下降, a^*值增加, 而 b^*值无明显规律。

如表 4 所示, 随着醪糟添加量的增加, 感官评分呈现先升高后降低的趋势。在适宜的醪糟添加量下, 醪糟中的微生物可将蛋白质分解为小分子物质, 如氨基酸和脂肪酸, 这些物质是牛肉干特殊风味的主要来源。然而, 过量添加醪糟, 由于醪糟本身的风味过强, 可能会掩盖牛肉干的发酵香气, 从而导致感官评分降低。综上所述, 醪糟添加量对发酵牛肉干的理化性质和感官品质均有显著影响。过高或过低的添加量均不利于牛肉干的风味形成, 且可能对色泽和质构产生不利影响。因此, 本研究选取添加量 4%、6%、8% 作为响应面优化水平, 以期获得最佳的发酵牛肉干品质。

2.2.2 发酵时间的确定 如图 3(A)所示, 随着发酵时间的延长, 发酵牛肉干的水分含量呈逐渐下降趋势。较低的水分含量是确保发酵牛肉干安全性的关键因素之一。如图 3(B)所示, 发酵时间对牛肉 pH 的影响显著(P<0.05), pH 随着发酵时间的延长而不断降低, 在发酵 40 h 时, pH 降至约 5.60。酸性环境能够有效抑制有害微生物的生长, 从而提高食品的安全性。Mikami 等[19] 在将清酒糟添加至发酵香肠的研究中发现, 香肠的 pH 随着时间的延长而降低, 这与本研究结果一致。如图 3(C)所示, 随着发酵时间的延长, 牛肉干的水分活度逐渐降低。较低的水分活度可以有效抑制有害菌的生长, 进一步保障发酵牛肉干的安全性。如图 3(D)所示, 发酵时间对牛肉干剪切力的影响显著(P<0.05), 随着发酵的进行, 牛肉干的剪切力呈现先下降后上升的趋势。在发酵初期, 醪糟中的微生物促进肌肉蛋白分解, 使肌纤维变得松散, 从而导致剪切力下降; 发酵进行到一定程度后, 由于微生物的活动导致产品的水分含量和水分活度大幅降低, 引起肌肉收缩, 进而导致剪切力增加。这一结果与赵改名等[37] 对接种沙克乳杆菌发酵的牛肉干的研究结果一致。发酵牛肉干的质构变化与发酵过程中的微生物活动及水分流失密切相关。

如表 5 所示, 随着发酵的进行, 牛肉干的硬度和咀嚼性呈现降低的趋势。这是由于发酵过程中微生物的生长代谢产生的蛋白酶促进了肉蛋白的降解, 使牛肉的硬度下降, 肌纤维变松散。而内聚性和弹性无显著变化, 这与 Przybylski 等[38] 的研究结果一致。在发酵过程中, 随着发酵时间的延长, 发酵牛肉干的 L^*值下降, a^*值增加, 而 b^*值无明显规律。L^*值降低可能是由于发酵过程中产生的酸性物质破坏了肉的表面结构, 使肉变暗, 这与李金等[39] 对驼肉干的研究结果相似。a^*值不断增大, 一方面可能是亚硝酸盐分解产生的 NO 与肉中的肌红蛋白结合转化为亚硝基肌红蛋白, 使发酵牛肉干的 a^*值增大, 着色也更加稳定[40]; 另一方面, 发酵期间微生物的快速繁殖使肉中碳水化合物分解为乳酸等小分子有机酸, 形成的酸性环境进一步促进生成亚硝基肌红蛋白, 使肉色变红[41], 这与王俊钢等[42] 的研究结果相似。

如表 6 所示, 随着发酵时间的延长, 感官评分呈

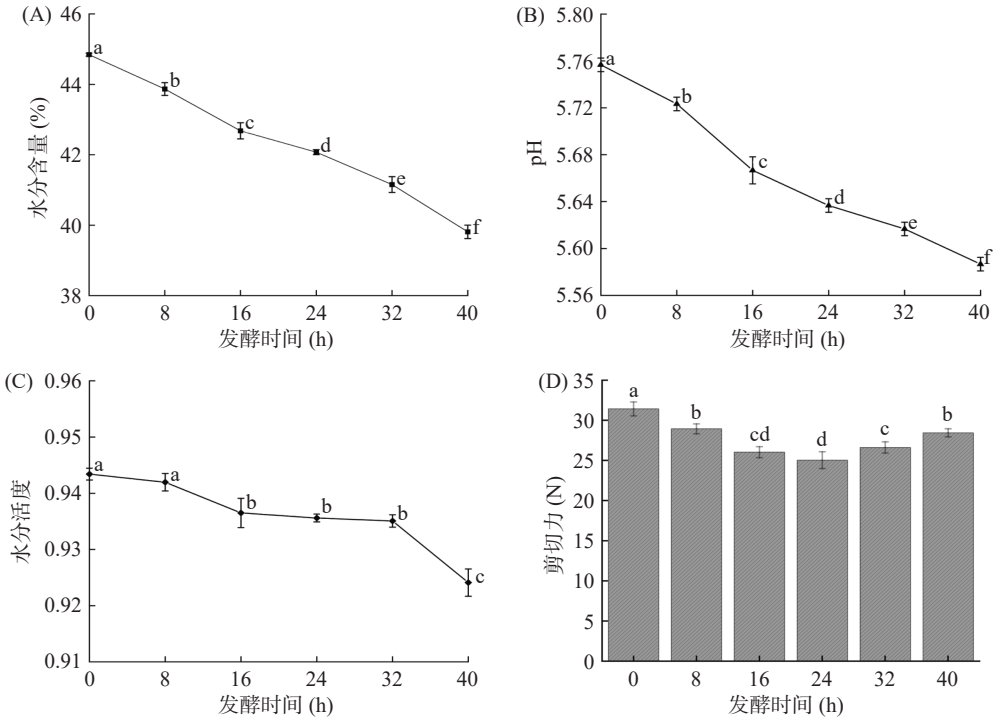


图 3　发酵时间对牛肉干理化特性的影响

Fig.3　Effect of fermentation time on the physicochemical properties of beef jerky

注：(A)发酵时间对水分含量的影响；(B)发酵时间对 pH 的影响；(C)发酵时间对水分活度的影响；(D)发酵时间对剪切力的影响。

表 5　发酵时间对牛肉干质构和色泽的影响

Table 5　Effect of fermentation time on the texture and colour of beef jerky

发酵时间(h)	质构				色泽		
	硬度(N)	咀嚼性(mJ)	弹性(mm)	内聚性	L^*	a^*	b^*
0	17001.87±732.52^{a}	7948.82±605.95^{a}	0.78±0.02^{a}	0.64±0.01^{a}	48.62±0.39^{a}	21.46±0.62^{c}	21.13±0.18^{a}
8	15020.18±259.97^{b}	7329.44±311.39^{a}	0.80±0.03^{a}	0.60±0.04^{a}	47.23±0.54^{bc}	22.45±0.62^{bc}	19.69±0.28^{bc}
16	13550.52±153.64^{c}	6345.29±185.92^{b}	0.74±0.01^{a}	0.63±0.01^{a}	47.60±0.22^{ab}	21.95±0.52^{bc}	20.16±0.30^{b}
24	12609.65±196.68^{cd}	5559.71±442.36^{b}	0.74±0.02^{a}	0.58±0.09^{a}	46.39±0.98^{c}	22.72±1.06^{b}	19.29±0.46^{c}
32	12860.84±293.62^{cd}	5131.70±533.74^{c}	0.73±0.05^{a}	0.55±0.03^{a}	43.40±0.32^{d}	23.91±0.25^{a}	19.62±0.23^{bc}
40	11787.42±419.07^{d}	5252.17±857.40^{c}	0.74±0.09^{a}	0.56±0.05^{a}	44.12±0.95^{d}	23.01±0.33^{ab}	20.09±0.49^{b}

表 6　发酵时间对牛肉干感官评分的影响

Table 6　Effect of fermentation time on sensory scores of beef jerky

发酵时间(h)	色泽	风味	咀嚼性	组织状态	滋味	总分
0	14.10±0.60^{b}	9.83±0.60^{d}	12.73±0.60^{c}	13.77±0.61^{b}	12.43±0.45^{c}	62.87±0.88^{d}
8	14.57±0.55^{ab}	12.50±0.61^{c}	13.60±0.60^{bc}	14.00±0.17^{ab}	13.70±0.17^{b}	68.37±0.41^{c}
16	15.30±0.40^{a}	14.87±0.35^{b}	14.47±0.35^{b}	15.13±0.26^{a}	15.03±0.26^{a}	74.60±0.41^{b}
24	15.40±0.44^{a}	16.03±0.49^{a}	15.57±0.32^{a}	15.00±0.72^{a}	15.57±0.35^{a}	77.57±0.55^{a}
32	14.90±0.26^{ab}	14.50±0.56^{b}	15.63±0.25^{a}	14.10±0.67^{ab}	15.07±0.16^{a}	74.20±0.29^{b}
40	14.17±0.25^{b}	10.47±0.93^{c}	13.73±0.78^{bc}	13.10±0.52^{b}	11.90±0.92^{c}	63.37±0.61^{d}

现先升高后降低的趋势。在适宜的发酵时间下，生产出的发酵牛肉干香气浓郁，软硬适中、颜色良好。然而，过度发酵，会产生不良气味，咀嚼性下降，从而导致感官评分降低。综上所述，发酵时间对发酵牛肉干的理化性质和感官品质均有显著影响。发酵时间过短不利于风味的产生，发酵时间过长则易产生不良风味。因此，本研究选取发酵时间 16、24、32 h 作为响应面优化水平，以期获得最佳的发酵牛肉干品质。

2.2.3　烘烤时间的确定　如图 4(A)所示，随着烘烤时间的延长，发酵牛肉干的水分含量呈逐渐下降趋势。在烘烤 1.5~2.5 h 期间，水分含量下降较快；而当烘烤时间延长至 2.5~4.0 h 时，水分含量下降则较为缓慢，从 44% 降至 38%。这种现象可能是因为在烘烤初期，肉中的自由水大量流失，导致水分含量迅速下降。然而，随着烘烤的进行，肉干中的自由水逐渐散失殆尽，剩余的结合水和不易流动水难以进一步散

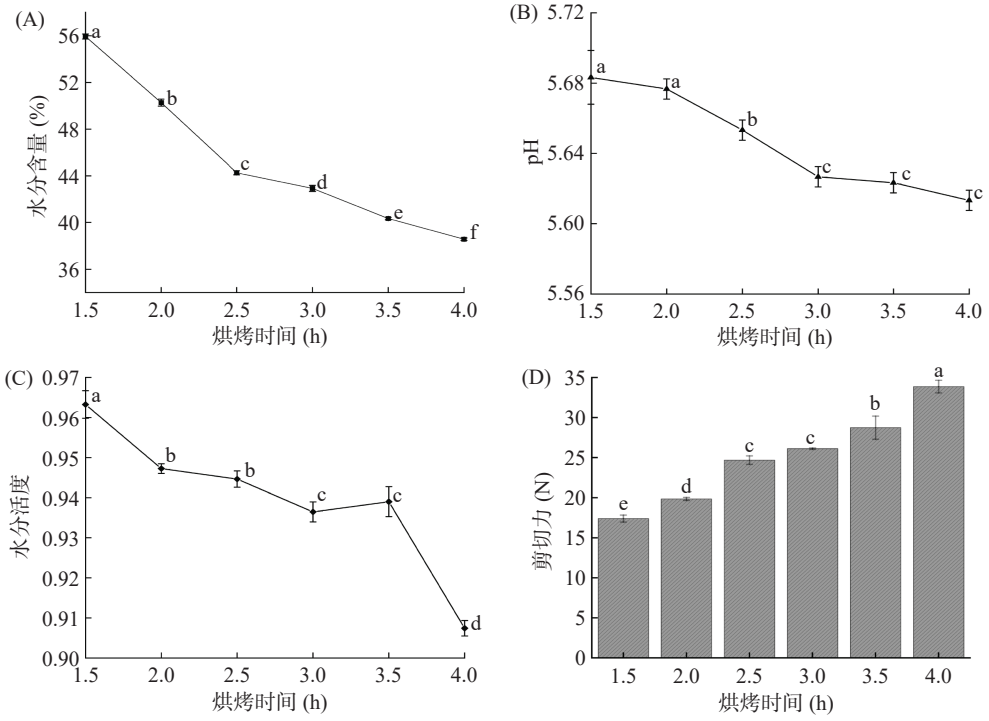


图 4 烘烤时间对牛肉干理化特性的影响

Fig.4 Effect of baking time on the physicochemical properties of beef jerky

注:(A)烘烤时间对水分含量的影响;(B)烘烤时间对 pH 的影响;(C)烘烤时间对水分活度的影响;(D)烘烤时间对剪切力的影响。

失,因此水分含量的下降速率逐渐变慢。李军年等[43]研究发现,肉中的肌原纤维蛋白会在持续加热过程中发生变性,从而降低其对水分子的约束力,促使水分蒸发流失。如图 4(B)所示,随着烘烤时间的增加,pH 显著下降(P<0.05)。这可能是由于长时间加热会加速产品的脂质氧化。如图 4(C)所示,随着烘烤时间的延长,水分活度呈逐渐下降的趋势。这可能是因为加热会使牛肉肌原纤维蛋白变性,进而导致其对水分的束缚能力减弱,水分活度随之降低。较低的水分活度能够有效抑制腐败菌的生长,从而延长发酵牛肉干的货架期[44]。如图 4(D)所示,随着烘烤时间的延长,牛肉干的剪切力逐渐增大。这可能是由于长时间加热引起的蛋白质变性与水分的流失,导致肌纤维收缩,从而使剪切力升高。这一结果与 Shi 等[45]的研究结果一致。

如表 7 所示,当烘烤时间较短时,咀嚼性与硬度较低。然而,随着烘烤时间的延长,牛肉干的硬度和咀嚼性呈现显著上升的趋势(P<0.05)。这是因为牛肉中的水分逐渐蒸发,水分含量不断降低,肌纤维收缩,形成了更致密的肌纤维结构,进而导致牛肉干的硬度增大。弹性也有上升的趋势,这可能是因为蛋白质在加热过程中发生变形和凝结,从而使弹性增大[46]。随着烘烤时间的延长,牛肉干的 L^*值逐渐下降,a^*值逐渐增加。这主要是因为烘烤过程中的热氧化及脂质氧化作用,会促使肌红蛋白生成褐色的高铁肌红蛋白,同时水分含量的显著降低也会使肉色变暗[47]。这一结果与董雪等[48]的研究一致。

如表 8 所示,随着烘烤时间的延长,感官评分呈现先升高后降低的趋势。在适宜的烘烤时间下,生产出的发酵牛肉干颜色怡人、香气浓郁,软硬适中。然而,过度烘烤会导致脂质氧化,使肉色变暗,同时水分的过度散失会使牛肉干过硬,不利于咀嚼,从而导致感官评分降低。综上所述,烘烤时间对发酵牛肉干的理化性质和感官品质均有显著影响。因此,本研究选

表 7 烘烤时间对牛肉干质构和色泽的影响

Table 7 Effect of baking time on the texture and colour of beef jerky

烘烤时间(h)	质构				色泽		
	硬度(N)	咀嚼性(mJ)	弹性(mm)	内聚性	L^*	a^*	b^*
1.5	7830.06±890.19^{e}	3059.75±592.67^{d}	0.63±0.09^{b}	0.63±0.06^{a}	51.72±0.11^{a}	20.81±1.09^{b}	18.64±0.25^{c}
2.0	10758.65±220.07^{d}	4371.92±334.56^{c}	0.65±0.02^{b}	0.63±0.05^{a}	51.60±0.17^{a}	20.99±0.60^{b}	19.07±0.60^{bc}
2.5	11924.21±497.71^{cd}	5102.11±205.28^{c}	0.70±0.01^{ab}	0.61±0.02^{a}	49.73±0.36^{b}	21.51±0.66^{ab}	19.08±0.37^{bc}
3.0	13286.93±556.48^{bc}	5406.35±402.73^{c}	0.72±0.06^{ab}	0.52±0.08^{a}	45.42±0.35^{d}	21.98±0.51^{ab}	19.44±0.25^{bc}
3.5	15562.20±281.89^{b}	6186.34±295.81^{b}	0.68±0.04^{ab}	0.60±0.04^{a}	46.64±0.53^{c}	21.95±0.52^{ab}	19.53±0.49^{ab}
4.0	18168.43±334.16^{a}	8603.79±731.63^{a}	0.78±0.05^{a}	0.60±0.03^{a}	43.26±0.47^{e}	22.67±0.74^{a}	20.25±0.48^{a}

表 8　烘烤时间对牛肉干感官评分的影响

Table 8　Effect of baking time on sensory scores of beef jerky

烘烤时间(h)	色泽	风味	咀嚼性	组织状态	滋味	总分
1.5	14.73±0.47^{a}	14.03±0.32^{d}	10.63±0.31^{d}	12.97±0.23^{c}	14.37±0.25^{b}	66.73±0.68^{d}
2.0	15.03±0.21^{a}	14.90±0.30^{bc}	14.03±0.32^{b}	14.13±0.19^{b}	15.60±0.26^{a}	73.70±0.36^{b}
2.5	15.43±0.40^{a}	16.07±0.32^{a}	15.53±0.35^{a}	15.47±0.38^{a}	15.70±0.44^{a}	78.20±0.78^{a}
3.0	15.03±0.20^{a}	15.13±0.31^{b}	14.40±0.26^{b}	14.83±0.18^{ab}	15.57±0.31^{a}	74.97±0.42^{b}
3.5	13.50±0.34^{b}	14.27±0.40^{cd}	13.00±0.20^{c}	14.60±0.23^{ab}	13.80±0.26^{b}	69.17±0.96^{c}
4.0	12.50±0.46^{c}	12.27±0.31^{e}	10.70±0.66^{d}	14.50±0.32^{b}	13.10±0.26^{c}	64.07±0.72^{e}

取烘烤时间 2、2.5、3 h 作为响应面优化水平，以期获得最佳的发酵牛肉干品质。

2.3　响应面优化试验结果

2.3.1　优化试验设计与结果　在单因素的基础上对其进行响应面优化，设计三因素三水平共 17 组优化方案，见表 9。

表 9　发酵工艺优化的响应面设计

Table 9　Response surface design for fermentation process optimisation

试验号	添加量	发酵时间	烘烤时间	感官评分
1	−1	−1	0	70.39
2	−1	0	1	72.28
3	−1	0	−1	71.66
4	−1	1	0	75.01
5	0	−1	1	72.19
6	0	−1	−1	71.35
7	0	0	0	78.67
8	0	0	0	78.20
9	0	0	0	79.01
10	0	0	0	78.82
11	0	0	0	79.13
12	0	1	−1	74.44
13	0	1	1	74.13
14	1	−1	0	73.48
15	1	0	1	75.95
16	1	0	−1	73.33
17	1	1	0	74.31

2.3.2　模型方差分析　利用 Design-Expert 11 软件对表 9 的数据进行拟合后得到模型的二元多项回归方程：以感官评分为响应值，利用软件 Design Expert 10 对表中的试验结果进行二次多项式回归分析，拟合得到发酵牛肉干的感官评分与醪糟添加量(A)、发酵时间(B)、烘烤时间(C)之间关系的三元二次回归方程如下：感官评分=78.77+0.9663A+1.31B+0.4713C−0.9475AB+0.5AC−0.2875BC−2.6A^2−2.87B^2−2.87C^2。

由表 10 可知，感官评分回归模型的 P<0.0001，模型极显著；失拟项 P 值为 0.0735>0.05，不显著，说明此方程不失拟，试验结果受未知因素影响较小；决定系数 R^2=0.9817，校正决定系数 Adj R^2=0.9582，方程较为可靠，综上可得该回归模型拟合较好，可用于预测和分析发酵牛肉干感官评分的变化。各因素中 AB 对模型影响显著(P<0.05)，一次项 A、B 与二次项 A^2、B^2、C^2 对模型影响极显著(P<0.01)。经 F 检验，三因素对发酵牛肉干感官评分影响程度由大到小依次为：发酵时间、醪糟添加量、烘烤时间。

表 10　发酵牛肉干感官评分的回归模型方差分析

Table 10　Analysis of variance for regression model of sensory scores of fermented beef jerky

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P	显著性
模型	137.05	9	15.23	41.76	<0.0001	极显著
A-添加量	7.47	1	7.47	20.48	0.0027	**
B-发酵时间	13.73	1	13.73	37.65	0.0005	**
C-烘烤时间	1.78	1	1.78	4.87	0.0630	
AB	3.59	1	3.59	9.85	0.0164	*
AC	1.0000	1	1.0000	2.74	0.2417	
BC	0.3306	1	0.3306	0.9067	0.3727	
A^2	28.36	1	28.36	77.79	<0.0001	**
B^2	34.75	1	34.75	95.31	<0.0001	**
C^2	34.57	1	34.57	94.82	<0.0001	**
残差	2.55	7	0.3646			
失拟项	2.03	3	0.6760	5.15	0.0735	不显著
纯误差	0.5245	4	0.1311			
总离差	139.60	16				

注：*表示差异显著(P<0.05)、**表示差异极显著(P<0.01)。

2.3.3　多因素交互作用响应面分析　利用 Design Expert 11 软件根据回归模型绘制 3D 响应面图，可清晰直观反映各个因素及其交互作用对响应值的影响，来探寻和预测最佳发酵工艺参数范围。响应面随自变量变化的灵敏程度可由响应面坡度变化反映，单因素对响应值的影响越显著，曲面会相对越陡峭，图 5 展示了各因素对发酵牛肉干感官评分影响的响应面图。当添加量固定时，感官评分随着发酵时间的增加呈现先上升后降低的趋势，当添加量固定时，感官评分随着烘烤时间的延长呈现先上升后降低的趋势。

2.3.4　验证实验　利用 Design Expert 11 软件对回归方程联合求解，感官评分为 Maximize，最优工艺(添加量为 6.318%、发酵时间为 25.579 h、烘烤时间 2.543 h，感官评分预测值为 78.992)略微修正调整后，得到发酵牛肉干最佳发酵工艺参数为：添加量为 6%、发酵时间为 24 h、烘烤时间 2.5 h。在最佳发酵工艺参数条件下，通过三组平行试验来验证模型的可靠性，得到发酵牛肉干感官评分均值为 78.50，与预测值相对误差小于 5%，符合模型预测结果，表明响应面优化试验建立的二次多项回归模型拟合程度较好，具有实际应用价值，同时证实了应用响应面法优化

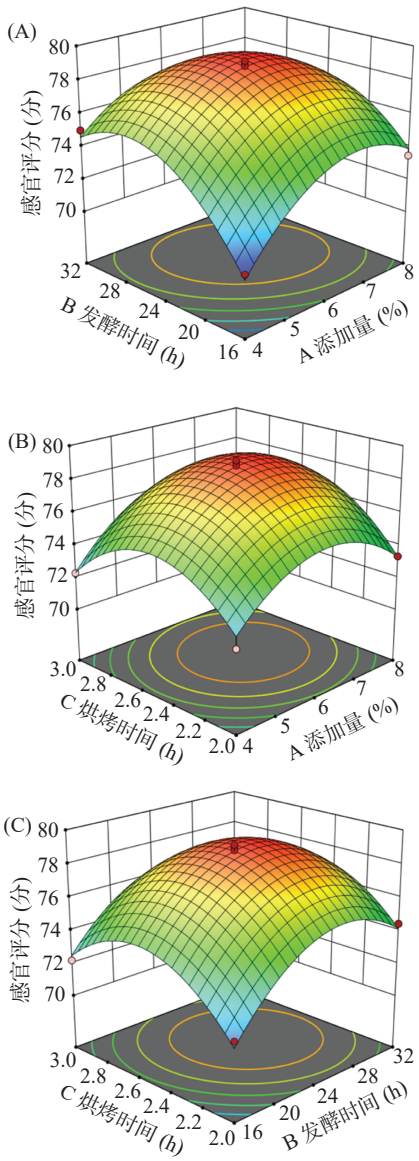


图 5 不同因素对发酵牛肉干感官评分影响的响应面图

Fig.5 Response surface plots of effect of different factors on sensory scores of fermented beef jerky

注: A 添加量与发酵时间; B 添加量与烘烤时间; C 发酵时间与烘烤时间。

醪糟发酵牛肉干的发酵工艺是可行的。此工艺下牛肉干的水分含量为 42.39%±0.48%、pH 为 5.61±0.02、水分活度为 0.9298±0.0012、剪切力为 28.97±0.83 N。

2.4 溶解度

蛋白的溶解度反映了内部结构的聚集程度及变性程度[49]。图 6 是自然发酵和醪糟发酵的蛋白溶解度的变化。自然发酵 0~40 h 时, 溶解度从 35.03% 降低到 13.56%, 醪糟发酵 0~40 h 时, 溶解度从 36.03% 降低到 14.03%。随着发酵时间延长, 肌原纤维蛋白在酶的作用下逐渐变性, 其天然构象被破坏, 内部的疏水基团暴露, 暴露的疏水基团倾向于相互结合, 形成疏水相互作用, 导致蛋白质分子间的聚集, 溶解度降低[50]。此外, 在发酵过程中, 微生物代谢产生乳酸, 使环境 pH 下降, 接近肌原纤维蛋白的等电点, 在等电点附近, 蛋白质分子表面净电荷减少, 静电排斥力减弱, 分子间更容易通过疏水相互作用或氢键聚集, 形成沉淀, 溶解度降低[51]。醪糟发酵组的溶解度高于自然发酵组, 可能是长时间发酵导致引发氧化反应, 蛋白质中的巯基(-SH)氧化形成二硫键(-S-S-)[52], 加入醪糟后能够抑制氧化反应, 氧化程度降低, 从而使其溶解度升高。

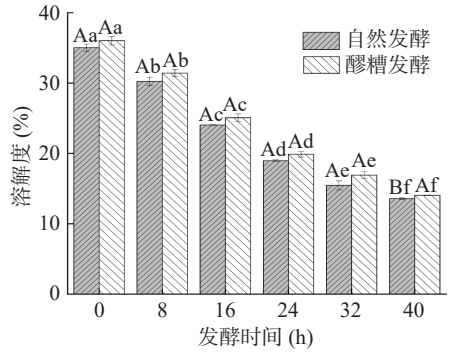


图 6 不同发酵时间下牛肉肌原纤维蛋白溶解度的变化图

Fig.6 Plot of changes in solubility of beef myofibrillar proteins at different fermentation times

注: 不同大写字母(A~B)和小写字母(a~f)表示存在显著差异(P<0.05), 图 7 同。

2.5 表面疏水性

蛋白的表面疏水性反映的是蛋白质构象的变化, 用溴酚蓝的结合量来显示表面疏水性的大小, 结合量越多表示变性程度越大[53]。如图 7 所示, 溴酚蓝的结合量随着发酵时间的延长不断增大, 即蛋白质的表面疏水性增强, 表明发酵会引起肌原纤维蛋白结构的变化, 原本包埋在内部的疏水基团暴露, 导致表面疏水性增强。另一方面, 发酵过程中微生物会产生蛋白酶, 蛋白酶的水解作用使蛋白质结构展开, 从而导致疏水基团暴露。这可能是由于蛋白质氧化致使空间结构发生改变, 疏水的基团暴露出来, 从而引起表面疏水性增大[54]。醪糟发酵组的疏水性低于自然发酵组, 可能是由于醪糟的添加可能会抑制发酵过程中氧化对肌原纤维蛋白产生的结构损伤, 有助于蛋白质三级结构中疏水基团的稳定[55]。

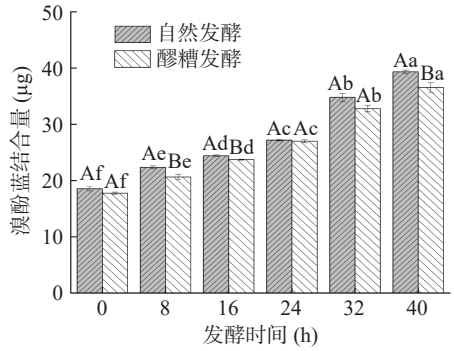


图 7 不同发酵时间下牛肉肌原纤维蛋白表面疏水性的变化图

Fig.7 Plot of changes in surface hydrophobicity of beef myofibrillar proteins at different fermentation times

2.6　SDS-PAGE 电泳分析

蛋白质降解是牛肉发酵过程中重要的生化反应。图 8 为不同发酵时间下自然发酵和醪糟发酵的牛肉肌原纤维蛋白凝胶电泳图。从电泳图谱中可看出，6 组样品条带清晰可见，随着发酵时间的延长，两组的 245、100 和 48 kDa 处的条带颜色依次变浅甚至消失，而分子量低于 25 kDa 的小分子蛋白条带颜色变深，数量变多。证明随着发酵的进行，蛋白质逐渐降解，但醪糟发酵组降解程度更深，这可能是添加了醪糟里面的乳酸菌和根霉菌促进了肌肉蛋白的降解，并促使了小分子量蛋白的累积。接种微生物会引起内源酶和微生物酶的增多，进而导致蛋白质的降解程度变深，这与王秀丽等[56] 的研究结果相似。

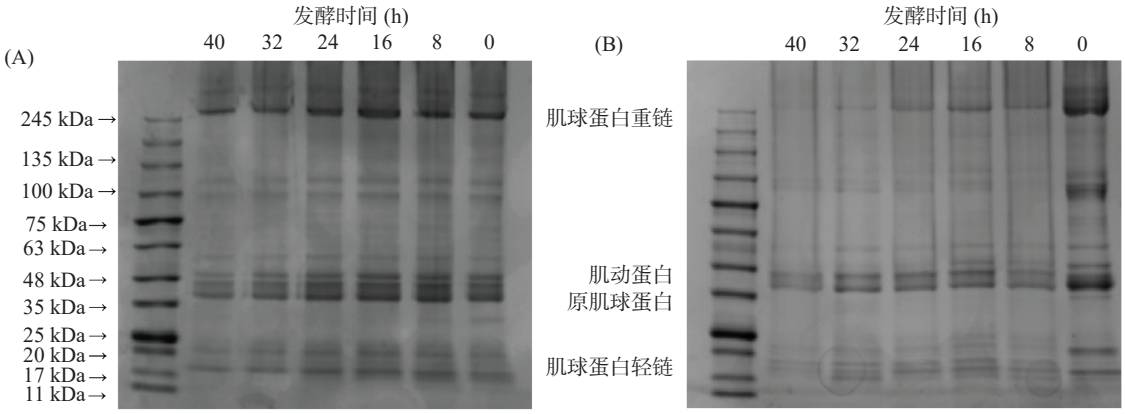


图 8　不同发酵时间的牛肉肌原纤维蛋白电泳图

Fig.8　SDS-PAGE of beef myofibrillar proteins with different fermentation times

注：(A)自然发酵，(B)醪糟发酵。

3　结论

本研究采用单因素实验结合响应面法，系统优化了醪糟发酵牛肉干的加工工艺，并深入探究了发酵过程中肌原纤维蛋白的结构变化。结果表明，醪糟发酵牛肉干的最佳工艺参数为：醪糟添加量 6%、发酵时间 24 h、烘烤时间 2.5 h。在此条件下，产品色泽红润，质地柔韧，风味独特，综合品质显著提升。发酵过程中，牛肉肌原纤维蛋白结构出现变化，引起表面疏水性上升，从电泳图谱中可看出，小分子蛋白不断累积，与自然发酵相比，醪糟的发酵能有效缓解氧化并使蛋白降解程度更深。综上所述，以醪糟为发酵剂制作牛肉干，能够显著改善牛肉干的品质和风味，为醪糟在牛肉干加工领域的应用提供了有力参考。然而，由于醪糟中微生物体系较为复杂，特定菌种与蛋白质之间的相互作用机制仍需进一步深入研究。

© 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] 李文, 初振栋, 罗生金. 影响肉牛肉质因素的研究进展[J]. 中国草食动物科学, 2024, 44(6): 76−81. [LI Wen, CHU Zhendong, LUO Shengjin. Research progress on factors affecting meat quality of beef cattle[J]. China Herbivore Science, 2024, 44(6): 76−81.]

[2] 钟方友. 冷鲜牛肉及卤牛肉保藏技术的研究[D]. 成都: 成都大学, 2019. [ZHONG F Y. Study on the preservation technology of chilled beef and marinated beef[D]. Chengdu: Chengdu University, 2019.]

[3] 张燕. 加工方式对牦牛肉蛋白质氧化及消化特性的影响研究[D]. 西宁: 青海大学, 2023. [ZHANG Y. Study on the effects of processing methods on protein oxidation and digestion characteristics of yak meat[D]. Xining: Qinghai University, 2023.]

[4] 王可, 祝超智, 赵改名, 等. 牛肉制品加工现状与发展趋势[J]. 食品科技, 2019, 44(10): 122−129. [WANG Ke, ZHU Chaozhi, ZHAO Gaiming, et al. Overview of beef product processing and development[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(10): 122−129.]

[5] 邓孟孟. 盐焗牛肉干工艺优化及其品质探究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023. [DENG Mengmeng. Study on process optimization and quality of salt-baked beef jerky[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.]

[6] LI Sining, TANG Shanhu, MO Ran, et al. Effects of NaCl curing and subsequent fermentation with *Lactobacillus sakei* or *Lactobacillus plantarum* on protein hydrolysis and oxidation in yak jerky[J]. LWT, 2023, 173: 114298.

[7] XIA Lingyan, QIAN Min, CHENG Feng, et al. The effect of lactic acid bacteria on lipid metabolism and flavor of fermented sausages[J]. Food Bioscience, 2023, 56: 103172.

[8] ZHAO Changqing, ZHAO Xingxiu, LU Ziyang, et al. Production of fermented pork jerky using *Lactobacillus bulgaricus*[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 72: 377−382.

[9] 陈俊宏, 王洋, 李芹, 等. 乳酸菌发酵工艺对肉糜理化性质及品质的影响[J]. 中国调味品, 2021, 46(6): 5−10. [CHEN Junhong, WANG Yang, LI Qin, et al. Effect of lactic acid bacteria fermentation process on the physicochemical properties and quality of minced meat[J]. China Condiment, 2021, 46(6): 5−10.]

[10] 杨晓钢, 赵鑫锐, 堵国成. 低酸牛肉发酵剂的筛选、工艺优化及品质特性研究[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(19): 185−195. [YANG Xiaogang, ZHAO Xinrui, DU Guocheng. Screening, fermentation condition optimization and quality evaluation of commer-

cial low acidity fermented beef starter[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(19): 185−195.]
[11] 周亚军, 张玉, 陈艳, 等. 发酵牛肉干加工中理化特性与风味品质分析[J]. 食品科学, 2021, 42(14): 240−247. [ZHOU Yajun, ZHANG Yu, CHEN Yan, et al. Analysis of physicochemical characteristics and flavor quality of fermented beef jerky during its processing[J]. Food Science, 2021, 42(14): 240−247.]
[12] WANG Han, SHANG Rui, GAO Suying, et al. Characterization of key aroma compounds in a novel Chinese rice wine Xijiao Huojiu during its biological-ageing-like process by untargeted metabolomics[J]. Heliyon, 2024, 10(14): e34396.
[13] WANG Yurong, CAI Wenchao, GAI Jianshe, et al. Analysis of the effect of rice wine koji on the fermentation quality of rice wine based on high-depth sequencing[J]. Food Bioscience, 2023, 56: 103109.
[14] YANG Yijin, LI Haifeng, XIA Yongjun, et al. Unraveling physicochemical characteristics, microbial community structure and functional enzymes governing fatty acid ethyl esters formation during Chinese rice wine brewing[J]. LWT, 2024, 198: 116035.
[15] LEI Yan, CAI Wenchao, WANG Yurong, et al. Fungal communities and their correlation with the sensory quality of rice wine from the Xiaogan and Dazhou regions in China[J]. LWT, 2024, 191: 115575.
[16] 谢玲, 龚小会, 张东亚, 等. 贵州特色米酒产区酒曲微生物群落多样性分析[J]. 中国酿造, 2024, 43(8): 170−176. [XIE Ling, GONG Xiaohui, ZHANG Dongya, et al. Analysis on microbial community diversity of Jiuqu in Guizhou characteristic rice wine production areas[J]. China Brewing, 2024, 43(8): 170−176.]
[17] 张蕙铭, 夏伟良, 邢枫, 等. 高温瞬时灭菌对米酒品质的影响[J]. 食品工业, 2024, 45(2): 91−96. [ZHANG Huiming, XIA Weiliang, XING Feng, et al. Effect of high-temperature instantaneous sterilization on the quality of rice wine[J]. The Food Industry, 2024, 45(2): 91−96.]
[18] 吉莉莉, 陈雪玲, 魏艳, 等. 四川传统发酵香肠中几株优势乳酸菌的分离鉴定[J]. 中国调味品, 2020, 45(1): 95−98. [JI Lili, CHEN Xueling, WEI Yan, et al. Isolation and identification of several dominant lactic acid bacteria in Sichuan traditional fermented sausage[J]. China Condiment, 2020, 45(1): 95−98.]
[19] MIKAMI N, TSUKADA Y, PELPOLAGE S W, et al. Effects of Sake lees (Sake-kasu) supplementation on the quality characteristics of fermented dry sausages[J]. Heliyon, 2020, 6(2): e03379.
[20] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB 5009.225-2023 食品安全国家标准 酒和食用酒精中乙醇浓度的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023. [National Health Commission of the People's Republic of China, National Administration of Market Regulation. GB 5009.225-2023 National food safety standard-Determination of ethanol concentration in alcoholic beverages and edible alcohol[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.]
[21] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB 12456-2021 食品安全国家标准 食品中总酸的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021: 1−3. [National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. GB 12456-2021 National food safety standard-Determination of total acid in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021: 1−3.]
[22] 张宸瑞, 杨文, 黄新球, 等. 云南省蒙自地区 4 种桑葚的酿酒特性[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(22): 172−180. [ZHANG Chenrui, YANG Wen, HUANG Xinqiu, et al. Wine-making characteristics of four kinds of mulberries in Mengzi area of Yunnan Province[J]. Food Research and Development, 2024, 45(22): 172−180.]
[23] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. GB 4789.3-2016 食品卫生微生物学检验大肠菌群测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [Ministry of Health of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB 4789.3-2016 National food safety standard-Microbiological examination of foods: Enumeration of coliforms[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
[24] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. GB 4789.4-2016 食品安全国家标准食品微生物学检验沙门氏菌检验[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [Ministry of Health of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB 4789.4-2016 National food safety standard-Microbiological examination of foods: *Salmonella* examination[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
[25] 张玉. 发酵牛肉干发酵工艺优化及品质特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021. [ZHANG Yu. Study on fermentation process optimization and quality characteristics of fermented beef jerky[D]. Changchun: Jilin University, 2021.]
[26] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.3-2016 食品安全国家标准食品中水分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.3-2016 National standard for food safety, Determination of moisture in food[S]. Beijing: China Standard Press, 2017.]
[27] 董智铭, 姜荻婉, 蒋泽临, 等. 超声时间对牛肉干品质及其肌原纤维蛋白结构的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(20): 36−42. [DONG Zhiming, JIANG Qiuwan, JIANG Zelin, et al. Effect of ultrasonic time on quality characteristics and myofibrillar protein structure of beef jerky[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(20): 36−42.]
[28] ZHANG Ruyu, XING Lujuan, KANG Dacheng, et al. Effects of ultrasound-assisted vacuum tumbling on the oxidation and physicochemical properties of pork myofibrillar proteins[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 74: 105582.
[29] YIN Feng, BAI Xueyuan, WANG Ke, et al. Mechanism of tumbling-curing to improve beef quality: Insights from the structural and functional properties of myofibrillar protein[J]. LWT, 2024, 207: 116692.
[30] PAN Jiajing, LI Chengliang, LIU Xiaojie, et al. A multivariate insight into the organoleptic properties of porcine muscle by ultrasound-assisted brining: Protein oxidation, water state and microstructure[J]. LWT, 2022, 159: 113136.
[31] 中华人民共和国农业部. NY/T 1885-2017 绿色食品米酒[S]. 北京: 中国农业出版社, 2017. [Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY/T 1885-2017 Green food rice wine[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2017.]
[32] 于立梅. 发酵里脊火腿的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2003. [YU L M. Study of fermented loin ham[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2003.]
[33] 焦阳阳. 发酵对半干型牛肉干品质的影响研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2021. [JIAO Yangyang. Effect of fermentation on quality of semi-dried beef jerky[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2021.]
[34] ZHOU Yajun, ZHANG Yu, PANG Guoqiang, et al. Effect of inoculation of starter on physicochemical properties and texture

characteristics of fermented beef jerky[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(9): e15744.
[35] 白婷, 叶富云, 张旭, 等. “浅发酵”香肠与四川传统腊肠特性的比较研究[J]. 中国调味品, 2021, 46(4): 31−37. [BAI Ting, YE Fuyun, ZHANG Xu, et al. Comparative study on the characteristics of “lightly fermented” sausage and Sichuan traditional sausage[J]. China Condiment, 2021, 46(4): 31−37.]
[36] HUGHES J, CLARKE F, PURSLOW P, et al. High pH in beef longissimus thoracis reduces muscle fibre transverse shrinkage and light scattering which contributes to the dark colour[J]. Food Research International, 2017, 101: 228−238.
[37] 赵改名, 焦阳阳, 祝超智, 等. 发酵时间对半干型发酵牛肉干品质及蛋白质构象的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(20): 45−51. [ZHAO Gaiming, JIAO Yangyang, ZHU Chaozhi, et al. Effect of fermentation time on quality and protein conformation of semi-dried fermented beef jerky[J]. Food Science, 2021, 42(20): 45−51.]
[38] PRZYBYLSKI W, JAWORSKA D, PŁECHA M, et al. Fungal biostarter effect on the quality of dry-aged beef[J]. Foods, 2023, 12(6): 1330.
[39] 李金, 云雪艳, 陈璐, 等. 乳清和商业发酵剂对半干型发酵驼肉干品质特性的影响研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(7): 1−8. [LI Jin, YUN Xueyan, CHEN Lu, et al. Studies on the effect of whey and commercial fermenters on the quality characteristics of semi-dry fermented camel jerky[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(7): 1−8.]
[40] 张秋会, 孟高歌, 王晗, 等. 腊肉源酵母菌对发酵牛肉品质特性的影响[J]. 现代食品科技, 2024, 40(4): 55−63. [ZHANG Qiuhui, MENG Gaoge, WANG Han, et al. Effects of cured meat-derived yeasts on the quality characteristics of fermented beef[J]. Modern Food Science & Technology, 2024, 40(4): 55−63.]
[41] 梁蕊芳, 张邦建, 高丽霞, 等. 复合发酵剂对发酵牛肉干理化品质及安全性能的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(7): 43−49. [LIANG Ruifang, ZHANG Bangjian, GAO Lixia, et al. Effects of starter cultures combination on physicochemical quality and safety of fermented beef jerky[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(7): 43−49.]
[42] 王俊钢, 李宇辉, 蒲顺昌, 等. 不同产蛋白酶乳酸菌对风干牛肉品质影响及安全性评价[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(12): 72−81. [WANG Jungang, LI Yuhui, PU Shunchang, et al. Effects of different protease-producing lactic acid bacteria on quality and safety of dried beef[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(12): 72−81.]
[43] 李军年, 全威, 娄爱华, 等. 烟熏液辅助腌制液熏腊肉生产工艺优化及其对产品品质的影响[J]. 肉类研究, 2024, 38(2): 17−27. [LI Junnian, QUAN Wei, LOU Aihua, et al. Optimization of the production process of liquid-smoked bacon using liquid smoke-assisted curing and its impact on product quality[J]. Meat Research, 2024, 38(2): 17−27.]
[44] 孙学颖. 传统牛肉干中细菌多样性及戊糖片球菌 37X-9 对生物胺降解机制研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022. [SUN Xueying. Degradation mechanism of biogenic amines by *Pediococcus pentosaceus* 37X-9 and the bacterial diversity of traditional beef jerky[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.]
[45] SHI Shuo, KONG Baohua, WANG Yan, et al. Comparison of the quality of beef jerky processed by traditional and modern drying methods from different districts in Inner Mongolia[J]. Meat Science, 2020, 163: 108080.
[46] PEI Yamin, GUO Xingyue, SHU Xionghui, et al. Effects of deep frying and baking on the quality attributes, water distribution, and flavor characteristics of duck jerky[J]. Frontiers in Nutrition, 2024, 11: 1309924.
[47] 赵敏. 猪肉糜发色剂的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015. [ZHAO Min. Research on colorant combination in minced pork[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2015.]
[48] 董雪, 黄晴豁, 王海滨, 等. 低钠盐腊肉液熏及烘烤工艺优化[J]. 食品工业科技, 2023, 44(20): 182−188. [DONG Xue, HUANG Qinghuo, WANG Haibin, et al. Study on processing optimization of liquid smoke and baking in low-sodium cured pork[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(20): 182−188.]
[49] 常海军, 伯朝英, 石源伟, 等. 姜黄素对羟自由基诱导的肌原纤维蛋白氧化及结构的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(11): 74−83. [CHANG Haijun, BO Zhaoying, SHI Yuanwei, et al. Effects of curcumin on oxidation and structure of myofibrillar protein induced by hydroxyl radical[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(11): 74−83.]
[50] 陈晓倩, 吴祖芳, 翁佩芳. 棒状乳杆菌发酵秘鲁鱿鱼糜凝胶特性的变化及其形成机理[J]. 食品科学, 2019, 40(4): 186−191. [CHEN Xiaoqian, WU Zufang, WENG Peifang. Changes in gel properties and formation mechanism of giant squid surimi (*Dosidicus gigas*) during fermentation by *Lactobacillus coryneformis*[J]. Food Science, 2019, 40(4): 186−191.]
[51] 屈莎, 胡婷, 唐善虎, 等. 牦牛肉肌原纤维蛋白在不同 pH 值条件下的分子结构变化[J]. 现代食品科技, 2023, 39(8): 85−93. [QU Sha, HU Ting, TANG Shanhu, et al. Molecular structure changes of yak myofibrillar proteins via protein oxidation at different pH values[J]. Modern Food Science & Technology, 2023, 39(8): 85−93.]
[52] 雷叶斯, 杨巨鹏, 吕春霞, 等. 羟自由基氧化体系对大黄鱼肌原纤维蛋白结构的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(1): 29−33. [LEI Yesi, YANG Jupeng, LÜ Chunxia, et al. Effect of hydroxyl radical oxidation system on structure of myofibrillar protein in cultured *Pseudosciaena crocea*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(1): 29−33.]
[53] 王雍雍. 功能菌株发酵剂的制备及其对香肠品质的影响研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2023. [WANG Yongyong. Preparation of functional strain starter and its effect on sausage quality[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023.]
[54] 王雍雍, 陈磊, 魏从娇, 等. 功能菌株复配对发酵香肠抗氧化特性及风味的作用[J]. 食品科学, 2023, 44(22): 149−157. [WANG Yongyong, CHEN Lei, WEI Congjiao, et al. Effect of functional multi-strain starter culture on inhibiting protein oxidation and improving flavor in fermented sausage[J]. Food Science, 2023, 44(22): 149−157.]
[55] 杨健, 富天昕, 张舒, 等. pH 值对米糠清蛋白和球蛋白的结构、溶解性及表面疏水性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(18): 51−57. [YANG Jian, FU Tianxin, ZHANG Shu, et al. Effect of pH on the structure, solubility and surface hydrophobicity of albumin and globulin from rice bran[J]. Food Science, 2020, 41(18): 51−57.]
[56] 王秀丽, 陆晨红, 霍俊辉, 等. 接种发酵对发酵牛肉香肠品质及多肽抗氧化活性的影响[J]. 肉类研究, 2022, 36(1): 7−13. [WANG Xiuli, LU Chenhong, HUO Junhui, et al. Effects of inoculated fermentation on quality of fermented beef sausage and antioxidant activity of peptides from it[J]. Meat Research, 2022, 36(1): 7−13.]