牛逍瞳, 马燕, 张健, 等. 超高压杀菌对低脂核桃酱品质的影响及其货架期预测 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(7): 408−421. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050033

NIU Xiaotong, MA Yan, ZHANG Jian, et al. Effect of Ultra-high Pressure Sterilization on the Quality of Low-fat Walnut Sauce and Its Shelf Life Prediction[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(7): 408−421. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050033

· 贮运保鲜 ·

超高压杀菌对低脂核桃酱品质的影响及其货架期预测

牛逍瞳[1,2], 马　燕[1,2,*], 张　健[1,2], 许铭强[1,2], 张　婷[1,2], 孟新涛[1,2]

（1.新疆维吾尔自治区农业科学院农产品加工研究所, 新疆乌鲁木齐 830091;
2.新疆主要农副产品精深加工工程技术研究中心, 新疆乌鲁木齐 830091）

摘　要: 为探究超高压杀菌对低脂核桃酱品质的影响并预测其货架期，通过优选超高压最适杀菌条件，并采用多元统计分析对比评价超高压杀菌（Ultra-high pressure sterilization，HPP）、高温蒸汽杀菌（High temperature steam sterilization，HPST）和巴氏杀菌（Pasteurization，PS）对低脂核桃酱的多维品质指标的影响，筛选适宜杀菌方式。进一步基于 Arrhenius 方程构建了不同贮藏条件下（4、25、35 ℃）的货架期预测模型。研究结果表明，HPP 能更好地保留低脂核桃酱原有品质，经 HPP 处理（500 MPa、4 min）的低脂核桃酱色泽最佳，且具有较高的粘附性，适中的硬度、内聚力、咀嚼性和较好的稳定性。应用气相色谱-离子迁移谱法（gas chromatography-ion mobility spectroscopy，GC-IMS）结合正交偏最小二乘法（Orthogonal partial least squares method，OPLS-DA）模型从低脂核桃酱中筛选得到 26 种关键挥发性化合物，并结合 ROAV 判定得到低脂核桃酱的整体特征风味物质为 3-甲基丁醛，主要贡献了蘑菇香和果香；HPP 组的主要贡献风味物质为（E）-2-庚烯醛，主要呈青草味和黄瓜味。经主成分分析得到 HPP 处理的低脂核桃酱综合品质最佳（综合得分 1.52 分），可作为低脂核桃酱的最适杀菌方式，同时预测低脂核桃酱在 4 ℃ 贮藏条件下的货架期为 118 d。研究为低脂核桃酱品质提升提供一定的理论参考依据。

关键词: 低脂核桃酱, 杀菌方式, 多维品质, 挥发性物质, 主成分分析, 货架期

中图分类号: TS377　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)07−0408−14

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050033

本文网刊:

Effect of Ultra-high Pressure Sterilization on the Quality of Low-fat Walnut Sauce and Its Shelf Life Prediction

NIU Xiaotong[1,2], MA Yan[1,2,*], ZHANG Jian[1,2], XU Mingqiang[1,2], ZHANG Ting[1,2], MENG Xintao[1,2]

（1.Institute of Agro-products Processing, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China;
2.Xinjiang Engineering Technology Center for Deep Processing of Main Agricultural Products, Urumqi 830091, China）

Abstract: To investigate the effects of ultra-high pressure sterilization on the quality of low-fat walnut sauce and predict its shelf life, the optimal ultra-high pressure sterilization conditions were selected. Moreover, multivariate statistical analysis was employed to comparatively evaluate the impacts of ultra-high pressure sterilization (HPP), high temperature steam sterilization (HPST), and pasteurization (PS) on the multi-dimensional quality indices of low-fat walnut sauce, so as to screen out the appropriate sterilization method. Furthermore, based on the Arrhenius equation, shelf life prediction models under different storage conditions (4, 25 and 35 ℃) were constructed. The research results showed that HPP could better retain the original quality of low-fat walnut sauce. The low-fat walnut sauce treated by HPP (500 MPa, 4 min) had the best color, relatively high adhesiveness, moderate hardness, cohesion, chewiness, and good stability. Through the application of

收稿日期: 2025−05−08

基金项目: 新疆农业科学院自主培育专项（xjnkyzzp-2022003）。

作者简介: 牛逍瞳（1999−）, 女, 硕士, 研究方向: 农产品加工及副产物综合利用, E-mail: 2365969236@qq.com。

*** 通信作者:** 马燕（1984−）, 女, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品加工及副产物综合利用, E-mail: 282568949@qq.com。

gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) combined with Orthogonal Partial Least Squares Method (OPLS-DA), 26 key volatile compounds were identified from low-fat walnut sauce. ROAV analysis revealed that 3-methylbutyral was the dominant flavor compound, primarily contributing mushroom and fruity aromas. The HPP group exhibited (E)-2-heptenal as its primary flavor component, mainly presenting grassy and cucumber-like notes. Principal component analysis demonstrated that HPP-treated low-fat walnut sauce achieved optimal overall quality (comprehensive score 1.52), serving as the most effective sterilization method. Additionally, shelf life predictions indicated 118 days under 4 ℃ storage conditions. This study provides theoretical references for quality improvement in low-fat walnut sauce production.

Key words: low-fat walnut sauce; sterilization method; multidimensional quality; volatile flavor; principal component analysis; shelf life

核桃是世界“四大坚果”之一，素有“长寿果”的美誉，其富含蛋白质、维生素和不饱和脂肪酸等营养成分，在预防糖尿病、高胆固醇血症、冠心病等疾病中起着至关重要的作用[1−2]。现核桃加工产品有核桃乳、核桃油、核桃蛋白、核桃酱及各类休闲食品，其中，核桃酱作为便利佐餐食品，深受消费者的青睐。目前核桃酱加工研究主要集中在工艺优化和单一品质调控方面，Shahidi-Noghabi 等[3] 研究了不同水平的乳化剂对核桃酱的流变性和稳定性的影响，得到稳定型核桃酱配方。但现有核桃酱产品普遍存在“油脂含量高、易氧化分层”等问题，随着大食物观、大健康产业的快速发展，开发低脂食品已成为食品加工产业可持续发展的新路径，尤其是低脂坚果酱加工制品的开发将更符合人类健康需求。目前低脂坚果酱加工仅见对开心果酱[4]、花生酱[5] 和芝麻酱[6] 方面的研究，尚未见低脂核桃酱相关研究。

杀菌作为食品加工的重要环节之一，直接影响了产品的质量安全及品质。现今传统热杀菌技术在食品工业中仍占据主导地位，巴氏杀菌（Pasteurization, PS）和超高压杀菌（Ultra-high pressure sterilization, HPP）、高温蒸汽杀菌（High temperature steam sterilization, HPST）是酱品杀菌常用的杀菌方式。其中，PS 在杀灭食品中有害微生物的同时可有效保留了产品中的活性物质和风味物质[7]，但其对冷藏保存和冷藏运输条件苛刻。HPST是一种强高压和高温相结合的热杀菌方法，其具有杀菌速度快、杀菌范围广、操作简便等优点，但高温处理会导致食品中的营养成分和风味流失[8]。由于传统灭菌方式的局限性，进而衍生了新型非热杀菌方式。王雪青等[9] 采用超高压对猕猴桃酱进行杀菌，确定了压力> 500 MPa 条件下的杀菌效果最佳，经 700 MPa 处理后的样品色泽及维 C 保持效果最佳。李靖等[10] 研究发现超高压杀菌（500 MPa、10 min）能更有效地保留刺梨汁的品质特性与抗氧化物质。但不同食品的异质性导致其杀菌效果不同。食品货架期是衡量食品安全关键指标[11]，尤其是基于温度的货架期预测模型在食品贮藏条件控制和决策过程中具有重要实践意义和理论意义。而采用超高压杀菌对低脂核桃酱品质分析及其货架期研究均未见报道。

因此，本研究通过优选低脂核桃酱超高压杀菌参数（压力、保压时间），对比 PS、HTST 与 HPP 杀菌对低脂核桃酱的 22 项品质指标（色泽、离心析出率、质构、酸价、微生物和挥发性成分等）的影响；并结合主成分分析对不同杀菌方式低脂核桃酱的品质进行综合评价，旨在得到最适杀菌方式；同时基于零级动力学模型预测低脂核桃酱货架期。研究为低脂核桃酱产品保质提供了一定的理论参考依据，也为核桃副产物多元化加工利用开拓了新方向，具有较好的应用价值与现实意义。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

脱脂核桃粕　新疆阿克苏晟鼎油脂有限责任公司；海藻酸钠（食品级）　河南祥意商贸有限公司；单甘酯（食品级）　河南万邦实业有限公司；蜂蜡　佰康蜂业；盐酸、硫酸　四川西陇科学有限公司；硫酸铜、硫酸钾、硼酸、氢氧化钠　天津市致远化学试剂有限公司；甲基红、溴甲酚绿，2-戊酮、2-己酮、2-庚酮、2-辛酮、2-壬酮　上海源叶生物科技有限公司，以上试剂均为分析纯。微生物培养基　青岛海博生物技术有限公司；蛋白酶活力≥20 U/mL、脂肪酶活力≥150 U/mL　山东利尔康医疗科技股份有限公司。

MA35M 型水分天平　德国 Sartorius 公司；T10 型食品均质机　德国 IKA 公司；G80F20CN2L-B8 微波炉　佛山市顺德区格兰仕微波炉电器有限公司；DZKW-S-6 型水浴锅　北京市光明医疗仪器有限公司；LDZX-75L-I 型高压灭菌锅　上海申安医疗机械厂；YS6060 型台式分光测色仪　深圳市三恩时科技有限公司；Centrifge5810R 型高速冷冻离心机　德国 Eppendorf 公司；PILOT 质构仪　北京盈盛恒泰科技有限责任公司；SHPP-T-5L 超高压温压结合杀菌设备　山西力德福科技有限公司；Flavour Spec 气相离子迁移谱联用仪　德国 G.A.S 公司；SPX-250B-Z 生化培养箱　上海博迅医疗生物仪器股份有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　低脂核桃酱的制备　参考牛逍瞳等[12] 的方法，将脱脂核桃粕与辅料按比例经混合均匀，经烘烤、均质、杀菌、灌装等工艺制得，冷却后置于 4 ℃冰箱备用。

1.2.2　低脂核桃酱超高压杀菌条件的筛选　杀菌时间筛选：在压力 600 MPa 时，分别以 2、4、6、8、10、

12 min 处理样品，考察不同杀菌时间对低脂核桃酱菌落总数和总色差的影响。

杀菌压力筛选：在时间为 4 min 时，分别以 100、200、300、400、500、600 MPa 的压力处理样品，考察不同杀菌压力对低脂核桃酱的菌落总数和总色差影响。

1.2.3 低脂核桃酱不同杀菌方式处理 将均质后的样品分别进行巴氏杀菌（PS：65 ℃，20 min）[13]；高压蒸汽杀菌（HPST：121 ℃，20 min）[14]；超高压杀菌（HPP：500 MPa，4 min）处理后置于 4 ℃ 保存，以未杀菌（CK）为对照组，测定其色泽、基本组分、离心析出率、质构、酸价和过氧化值、微生物、体外模拟消化、挥发性成分等品质指标。

1.2.4 品质指标测定方法

1.2.4.1 色泽的测定 采用色差仪测定低脂核桃酱外观颜色，将 10 g 样品置于样品容器中，白校正标准化后，测定 L^*（亮度值）、a^*（红绿值）、b^*（黄蓝值）、ΔE（总色差）值。

1.2.4.2 微生物指标的测定 菌落总数：参照国标 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》中平板计数法测定核桃酱的菌落总数。大肠杆菌：参照国标 GB 4789.3-2025《食品安全国家标准 食品微生物学检测 大肠杆菌计数》中平板计数法测定核桃酱的大肠杆菌。沙门氏菌：参照国标 GB 4789.4-2024《食品安全国家标准 食品微生物学检测 沙门氏菌》中平板计数法测定核桃酱的沙门氏菌。

1.2.4.3 基本组分的测定 水分：使用卤素水分测定仪进行测定。灰分：参照 GB 5009.4-2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》中的总灰分的测定方法。脂肪：参照 GB 5009.6-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》中索氏抽提法。蛋白质：参照 GB 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》中自动凯氏定氮法。碳水化合物：参考胡婷婷等[15] 的方法，按照碳水化合物=100−（灰分+蛋白质+脂肪+水分）进行计算。

1.2.4.4 质构的测定 参考胡婷婷等[15] 的方法稍作修改，将 20 g 样品搅拌均匀置于 50 mL 烧杯中，测试速度为 0.1 mm/s，循环两次，探头为圆柱形；测试过程在室温下进行。

1.2.4.5 离心析出率的测定 参考孙剑[16] 的方法稍作修改，称取 1 g 样品于离心管中，将离心管置于高速台式离心机中，以 8500 r/min 离心 15 min，倒置 5 min 使析出的油沥出，用脱脂棉将离心管壁上残存的油擦除。离心出油率质量分数通过以下公式计算：

$$\text{离心析出率}(\%) = \frac{\text{析出液体质量(g)}}{\text{样品总质量(g)}} \times 100$$

1.2.4.6 酸价和过氧化值的测定 酸价：参考 GB 5009.229-2016《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》中的第二法进行测定；过氧化值：参考 GB 5009.227-2023《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》第一法滴定法进行测定。

1.2.4.7 体外模拟消化的测定 参考王煜林等[17] 的方法略作修改。将 125 mg 样品加入 25 mL 水中，置于 37 ℃ 水浴锅，加入 25 mL 胃液，恒温摇床 37 ℃，120 r/min，消化 120 min，进行模拟胃消化阶段实验；取 30 mL 胃消化产物进行模拟肠消化阶段实验，调整体系 pH7.0，使酶钝化，加入等量的肠液、胰蛋白酶（0.003 mg/mL）、脂肪酶（0.25 mg/mL）溶于上述溶液，磁力搅拌 20 min，即为肠液），消化 120 min，加热 10 min，使酶失活。将体外消化结束后的沉淀物放入 105 ℃ 烘箱中干燥至恒重。样品体外消化率（X，%）的计算方法如下式所示。

$$X = \frac{M_1}{M_0} \times 100$$

式中：M_1 为消化沉淀物恒重后的质量，g；M_0 为消化前样品质量，g。

1.2.4.8 挥发性成分的测定 参考孟新涛等[18] 的测定方法略作修改。称取 5 g 核桃酱放置于顶空进样瓶中进行 80 ℃ 孵化 10 min，振动转速：500 r/min；采用面积归一法计算不同组分的峰面积占总峰面积的比值，表示为不同挥发性化合物的相对含量。

1.2.4.9 相对气味活度值（Relative odor activity value，ROAV）计算 采用 ROAV 对不同杀菌方式低脂核桃酱关键挥发性风味物质进行鉴定，并识别关键香气成分[19]。根据以下公式计算 ROAV。

$$ROAV = 100 \times \frac{C\%}{C\%_{stan}} \times \frac{T_{stan}}{T}$$

式中：T_{stan} 与 $C\%_{stan}$ 分别为对样品挥发性风味贡献最大组分的阈值及相对含量；T 与 C% 分别为各挥发性风味物质的阈值及相对含量。

1.2.4.10 感官评价的测定 参照 Liu 等[20] 的方法，选择 10 名经过感官评价培训的食品专业研究人员进行评定，如表 1 所示，分别从：色泽、香气、口感、组织状态、总体可接受性五个方面进行评价。

1.2.5 低脂核桃酱货架期试验设计 选用最适杀菌方式制备低脂核桃酱，将其分别置于 4、25、35 ℃ 三个恒温条件下贮藏，每隔 3 d 取样，测定其总色差、离心析出率、菌落总数、酸价、感官评价等品质指标，且基于相关性分析选定酸价和感官评价作为构建低脂核桃酱货架期预测模型的关键指标。

1.2.5.1 品质变化动力学模型的建立 化学动力学方程可用来反映食品品质指标与贮藏时间的关系，分为零级和一级化学反应动力学方程，可应用于食品货架期的预测，果蔬中品质指标的动力学反应多采用零级或一级反应描述。

零级动力学方程：$C_t = C_0 + kt$

表 1　低脂核桃酱感官评价标准

Table 1　Sensory evaluation criteria for low-fat walnut sauce.

评定项目	好(100~91)	较好(90~81)	一般(80~71)	差(70~61)	极差(<60)
色泽	棕黄色，有光泽	棕黄色，略有光泽	颜色较深，无光泽	颜色较暗，无光泽	颜色极暗，无光泽
香味	核桃清香浓郁，无异味	核桃清香较浓郁，无异味	核桃清香淡，无异味	没有香味或有异味	有异味
组织状态	酱体均匀，稠度适中，无油析现象	酱体均匀，稠度较好，无油析现象	酱体较好，酱体较稠或较稀，有油析现象	酱体不均匀，酱体过稠或过稀，有油析现象	酱体不均匀或过稠
口感	口感细腻，粘性好，无苦味	口感较细腻，粘性较好，无苦味	口感较粗糙，粘性较差，略有苦味	口感粗糙，粘性较差，有苦味	口感粗糙，粘性极差，有苦味

一级动力学方程：$C_t = C_0 e^{kt}$

式中：C_t 为贮藏第 t 天的实际指标值；C_0 为初始指标值；k 为化学反应速率常数

1.2.5.2　品质变化模型的建立　化学基元反应的经典模型 Arrhenius 方程，可描述温度与化学反应速率的关系。首先计算出 k 值，以 lnk 对 1/T 作图，可以得到斜率为-E_a/R，截距为 $\ln k_0$ 的线性方程，即可计算出反应活化能 E_a 和前因子 k_0

阿伦尼乌斯公式：$k = k_0 \cdot e^{\frac{-Ea}{RT}}$

将公式两边取对数：$\ln k = \ln k_0 - \frac{E_a}{RT}$

式中：k 为品质指标变化的速率常数；k_0 为指前因子；E_a 为活化能，kJ/mol；R 为摩尔气体常数，8.314 J/mol；T 为贮藏温度，K。

通过货架期终点对应的品质指标 C_t 和贮藏温度 T 线性拟合获得 Arrhenius 方程和动力学方程，依据方程的截距和斜率可求得 E_a 和 k_0，即可得到货架期方程。

零级动力学货架期公式：$SL_0 = \frac{|C - C_0|}{k_0^{-\frac{Ea}{RT}}}$

一级动力学货架期：$SL_1 = \frac{\ln \frac{C}{C_0}}{k_0^{-\frac{Ea}{RT}}}$

式中：SL_0 为零级反应下的货架期，d；SL_1 为一级反应下的货架期，d；C 为贮藏终点时品质指标的临界值；C_0 为品质指标初始测定值。

1.3　数据处理

所有实验重复三次，结果均以平均值±标准差表示。采用 SPSS 23.0 统计软件对数据进行统计分析、差异显著性分析（P<0.05 表示差异显著），使用 EXCEL、Origin 2021、SIMCA 软件进行数据绘图与分析。

2　结果与分析

2.1　超高压杀菌对低脂核桃酱品质的影响

由图 1 可知，菌落总数随着超高压杀菌时间的增加而减少，当杀菌时间达 4 min 时，菌落总数为 4.47 lg CFU/g，达到安全标准（<5 lg CFU/g）。杀菌压力在 100~400 MPa 时，菌落总数差异不显著（P>0.05），当杀菌压力达 500 MPa 时，菌落总数则降至 4.23 lg CFU/g，达到国家安全标准。不同杀菌时间和压力处理后的总色差差异不显著（P>0.05），这是由于超高压杀菌仅作用于非共价键，对色素等小分子物质无明显影响[21]。这与超高压杀菌可较好地保持猕猴桃果肉饮料色泽的结果一致[22]。因此，综合考虑适度加工与实际生产，选择低脂核桃酱超高压最适杀菌条件为：500 MPa，4 min。

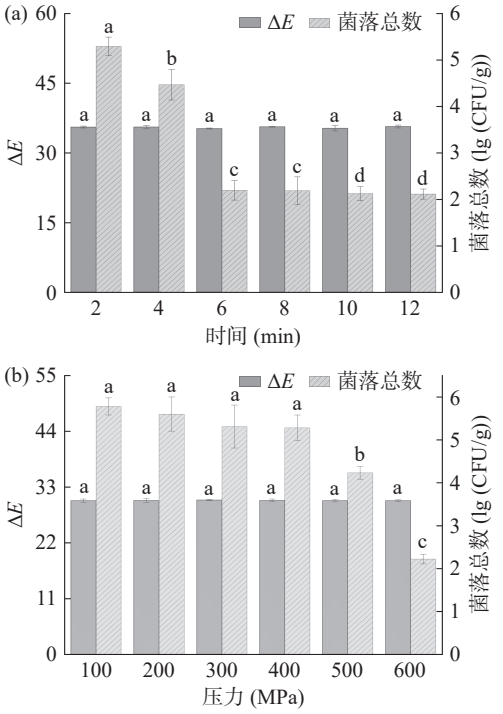


图 1　超高压不同条件对低脂核桃酱菌落总数和总色差的影响

Fig.1　Effects of different ultra-high pressure conditions on the total number of colonies and total color difference of low-fat walnut sauce

注：a：不同时间；b：不同压力。图中不同字母代表差异显著（P<0.05）；图 3~图 5 同。

2.2　不同杀菌方式对低脂核桃酱品质的影响

2.2.1　不同杀菌方式对低脂核桃酱中微生物的影响

微生物是衡量食品安全的重要指标[23]。如表 2 所示，不同杀菌方式样品的菌落总数差异显著（P<0.05），HPST 组和 HPP 组均达到国家安全标准。大肠杆菌和沙门氏菌在 HPST 组、HPP 组、PS 组和 CK 组中均未检出。杀菌效果依次为：HPST>HPP>PS>CK，HPST 处理的杀菌效果最好，HPP 处理的杀菌效果次之。以上两种杀菌方式均达到半固态调味料 Q/FXL 0001S-2021 安全标准，而 PS 处理虽能杀

表 2 不同杀菌方式低脂核桃酱的微生物指标

Table 2 Microbial indexes of low-fat walnut paste with different sterilization methods

微生物指标	CK	PS	HPST	HPP	安全标准
菌落总数(lg CFU/g)	6.37±0.23^{a}	5.08±0.52^{b}	4.09±1.11^{d}	4.37±1.13^{c}	<5
大肠杆菌(CFU/g)	ND	ND	ND	ND	100
沙门氏菌(CFU/g)	ND	ND	ND	ND	ND

注: ND表示未检测出; 同行不同字母代表差异显著(P<0.05), 表6同。

灭绝大多数细菌, 但由于杀菌温度较为温和, 对耐热性细菌和芽孢等的杀菌效果较弱[24]。

2.2.2 不同杀菌方式对低脂核桃酱基本品质的影响

2.2.2.1 不同杀菌方式对低脂核桃酱色泽的影响 如表 3 所示, 不同杀菌方式中 HPP 组的 L^*值和 a^*值最高, 而 b^*值和 ΔE 显著低于 PS 组和 HPST 组, 说明 HPP 组对低脂核桃酱的色泽影响较小, 与 CK 组数据较接近, 这是由于超高压主要作用于非共价键, 能更好地保留其色泽[25]。而 HPST 组的 L^*值和 a^*值最低, 说明其亮度和红度最低, b^*值和 ΔE 最高, 其色泽变化程度最大, 这可能是由于高温使样品发生了美拉德和焦糖化反应, 促使非酶促褐变产生特定风味和色泽, 从而导致亮度值与黄蓝值降低[26]。总体而言, HPP 组的色泽与 CK 组未杀菌组的色泽最为接近(图 2)。

表 3 不同杀菌方式对低脂核桃酱色泽的影响

Table 3 Effect of different sterilization methods on color difference of low-fat walnut sauce

杀菌方式	L^*	a^*	b^*	ΔE
CK	56.02±0.85^{ab}	6.24±0.27^{b}	17.13±1.36^{c}	37.49±2.61^{c}
PS	48.00±4.08^{b}	6.42±0.71^{a}	19.73±1.83^{b}	45.95±3.00^{b}
HPST	37.31±5.81^{c}	4.97±0.06^{c}	21.58±0.13^{a}	63.56±5.33^{a}
HPP	58.10±5.67^{a}	6.81±0.10^{a}	17.56±0.09^{c}	33.00±0.12^{c}

注: 同列不同字母代表差异显著(P<0.05); 表4~表5同。

2.2.2.2 不同杀菌方式对低脂核桃酱基本组分的影响 由表 4 可知, 不同杀菌方式低脂核桃酱基本理化指标中的蛋白质含量范围在 8.95~9.95 g/100 g, 其中, HPST 组的蛋白质含量最低, 为 8.95 g/100 g, 这可能是由于高温使热敏性蛋白质降解所致[27]; HPP 杀菌对低脂核桃酱的蛋白质含量影响较小, 这进一步证实了超高压的非热特性更利于低脂核桃酱中蛋白质含量的保留。各杀菌处理组中的脂肪含量在 2.74~2.94 g/100 g 范围, 不同杀菌方式对低脂核桃酱的脂肪稳定性影响较小, 这与脂肪分子结构的耐热性有关[28]。

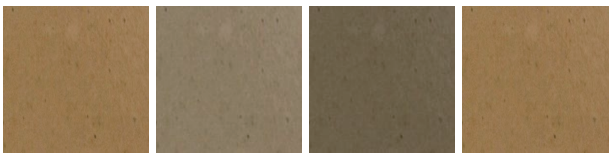


图 2 不同杀菌条件色卡对比图

Fig.2 Comparison chart of color cards under different sterilization conditions

注: 从左向右依次为 CK、PS、HPST、HPP。

2.2.2.3 不同杀菌方式对低脂核桃酱质构的影响 质构是反映低脂核桃酱口感与细腻程度的代表性指标之一, 代表了消费者对样品的接受程度[29]。由表 5 可知, HPST 组中的硬度与咀嚼性最高, 且与其他组相比差异显著(P<0.05), PS 组中内聚性与胶粘性较高, 这与刘正才等[30] 研究的蛋白质大分子结构可显著改变食品口感和质构特征的结果一致。HPP 组在保持较高粘附性的同时, 其硬度、内聚力和咀嚼性适中, 胶黏性最小, 这与张园园等[31] 探究不同压力(300、400 MPa/10 min)可提高干酪的涂抹性且具有适中硬度的结果一致。综上表明, PS 组与 HPP 组均具有较好的质构特性。

2.2.2.4 不同杀菌方式对低脂核桃酱的离心析出率的影响 离心析出率是食品稳定性品质重要指标之一。由图 3 可见, HPST 组的离心析出率最低(12.00%)(P<0.05), 这可能是由于高温杀菌后使样品中的水分流失, 进一步增强了低脂核桃酱的内部结构稳定性, 降低了离心后析出率。而超高压处理的样品也具有较好的稳定性, 且更接近初始样品的

表 4 不同杀菌方式对低脂核桃酱基本组分的影响

Table 4 Effects of different sterilization methods on basic components of low-fat walnut sauce

杀菌方式	蛋白质(g/100 g)	脂肪(g/100 g)	水分(g/100 g)	灰分(g/100 g)	碳水化合物(g/100 g)
CK	9.95±0.69^{a}	2.94±0.68^{a}	53.39±2.40^{a}	0.68±0.02^{b}	33.04±3.94^{a}
PS	9.03±0.59^{a}	2.80±0.44^{a}	53.42±2.02^{a}	0.69±0.02^{b}	34.14±1.58^{a}
HPST	8.95±0.27^{a}	2.76±0.31^{b}	49.11±1.57^{b}	1.14±0.16^{a}	37.96±2.51^{a}
HPP	9.60±0.87^{a}	2.74±0.79^{b}	50.94±1.17^{ab}	0.38±0.06^{c}	36.34±1.61^{a}

表 5 不同杀菌方式对低脂核桃酱质构的影响

Table 5 Effects of different sterilization methods on texture of low-fat walnut sauce

杀菌方式	硬度(N)	粘附性(mJ)	内聚性	胶粘性(N)	咀嚼性(mJ)
CK	0.65±0.01^{d}	3.77±0.62^{b}	0.74±0.03^{a}	14.52±0.51^{b}	7.61±0.04^{c}
PS	0.82±0.03^{c}	2.59±0.24^{c}	0.74±0.05^{a}	15.83±0.46^{a}	10.48±0.22^{b}
HPST	4.42±0.08^{a}	2.05±0.12^{c}	0.38±0.01^{b}	14.81±0.26^{b}	25.48±0.13^{a}
HPP	1.27±0.05^{b}	4.82±0.34^{a}	0.72±0.02^{a}	11.35±0.26^{c}	10.61±0.26^{b}

稳定性，这说明 HPP 处理能较好地保留样品的原始状态。

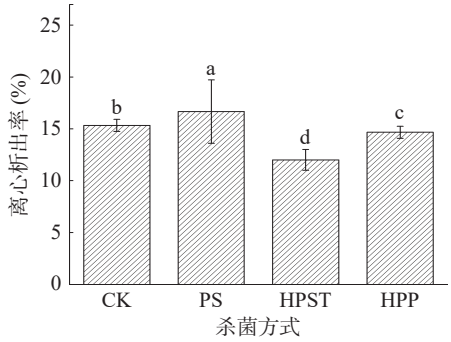


图 3　不同杀菌方式对低脂核桃酱离心析出率的影响

Fig.3　Effect of different sterilization methods on centrifugal precipitation rate of low-fat walnut sauce

2.2.2.5　不同杀菌方式对低脂核桃酱的酸价和过氧化值的影响　酸价和过氧化值是衡量油脂氧化程度的重要指标，二者含量越高则体现油脂酸败越严重[32]。如图 4 所示，不同杀菌处理低脂核桃酱的酸价（0.61~0.86 mg/g）与过氧化值（0.04~0.06 g/100 g）含量均达到半固态调味料 Q/HQS0005S-2021 标准（酸价≤3.0 mg/g，过氧化值≤0.25 g/100 g）。其中 HPP 组的酸价最低、HPST组的酸价最高，这是由于超高压可钝化脂肪酶活性，抑制游离脂肪酸生成，使样品酸价较低[33]，而高温诱导脂肪酶活性升高，使游离脂肪酸增加，从而导致酸价增加。

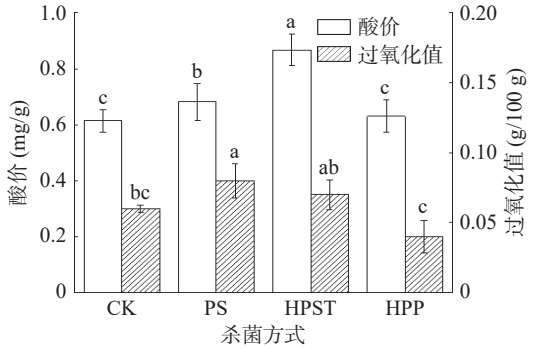


图 4　不同杀菌方式对低脂核桃酱酸价和过氧化值的影响

Fig.4　Effects of different sterilization methods on acid value and peroxide value of low-fat walnut sauce

2.2.3　不同杀菌方式对低脂核桃酱体外消化率的影响　体外消化率体现了低脂核桃酱在胃肠中的消化情况[34]，结果如图 5 所示。不同杀菌方式对低脂核桃酱体外模拟消化的影响显著（P<0.05）。不同杀菌方式低脂核桃酱的胃消化率范围为 13.00%~26.6%，肠消化率范围为 27.67%~49.00%，其中 HPP 组的胃和肠消化率最高，胃消化率较 CK、PS、HPST 组分别提高了 0.24%、3.57%、13.57%，肠消化率较 CK、PS、HPST 组分别提高了 6.33%、10%、21.33%。这是由于 HPP 通过改变蛋白质空间结构改善了蛋白质的溶解度[35]，从而提高了样品消化率。而 HPST 组的体外模拟消化率最低，这是由于高温导致蛋白的肽链伸展，使蛋白质分子内部疏水性基团充分暴露，伸展的肽链通过表面疏水及二硫键的作用重新结合，生成了分子量更大的蛋白聚集体[36]，从而降低其消化率。

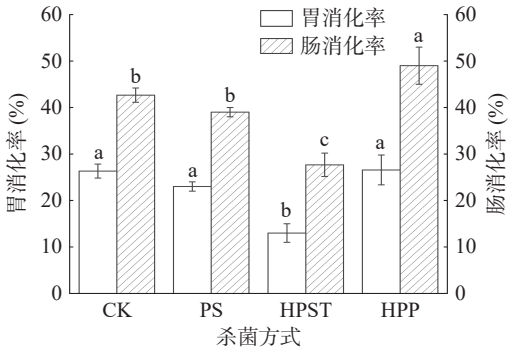


图 5　不同杀菌方式对低脂核桃酱体外模拟消化率的影响

Fig.5　Effects of different sterilization methods on simulated digestibility of low-fat walnut sauce *in vitro*

2.2.4　不同杀菌方式对低脂核桃酱式挥发性风味物质的影响　采用 GC-IMS 对不同杀菌方式低脂核桃酱的挥发性风味物质进行分析，通过对挥发性化合物进行气味分类、相对含量计算和气味描述（表 6），共鉴定出 79 种挥发性物质，其中醛类 25 种、醇类 19 种、酮类 15 种、酯类 10 种、酸类 3 种、呋喃类 4 种、吡嗪类 2 种，其他类 1 种。不同杀菌方式低脂核桃酱的挥发性物质差异显著（P<0.05）。从表中可以看出，低脂核桃酱中的己醛-D、3-甲基丁醛、3-戊烯-2-酮、2-丁酮挥发性物质所占含量相对较高，初步判断其为低脂核桃酱的主要香气物质，主要呈清新水果香、油脂味和蘑菇味。

指纹图谱可清晰地观察出不同杀菌方式低脂核桃酱的挥发性物质差异，图 6 中每一列代表挥发性物质，其颜色越亮表示挥发性物质的含量越高。由图 6 可得，不同杀菌样品可根据挥发性化合物明显区分成四个区域（A、B、C、D）。其中 A 区域为四组样品共有的挥发性化合物 33 种，分别为：2-丁醇、己醛-D、3-戊烯-2-酮等，初判其为代表性挥发性物质；B 区域为 CK 和 PS 组共有的挥发性物质 23 种，分别为：丙酸、2-乙基-3，5-二甲基吡嗪等。CK 与 PS 两组中丙酸（相对含量分别为 1.16% 和 0.59%）和庚醛-D（相对含量分别为 1.55% 和 2.38%）的相对含量差异显著（P<0.05），为两种杀菌方式的特征性差异化合物。C 区域为 HPST 组共有挥发性物质 26 种，分别为 1-丙醇、2-戊酮、正戊醛-D、庚醛-D 等，其中 2-丁酮与 3-甲基-1-戊醇的相对含量与其他组相比差异显著（P<0.05），分别为 7.84% 和 2.08%；D 区域为 HPP 组共有挥发性化合物 20 种，分别为：2,3-丁二酮、（E）-2-己烯醛、3-甲基-3-丁烯-1-醇、3-甲基-2-丁烯醛等，其中（E）-2-己烯醛与 3-甲基-2-丁烯醛的相对含量显著高于其他组，分别为 1.22% 与 1.41%（P<0.05）。

为更系统全面地分析不同加工工段中挥发性化

表 6 不同杀菌方式低脂核桃酱 GC-IMS 检测结果

Table 6 GC-IMS test results of low-fat walnut sauce with different sterilization methods

化合物种类	化合物名称	相对含量(%)				保留时间(s)	气味描述
		CK	PS	HPST	HPP		
醛类(25)	3-(甲硫基)丙醛-M	0.59±0.06^{a}	0.63±0.04^{a}	0.48±0.01^{b}	0.43±0.04^{b}	1.48696	烤面包味
	己醛-D	6.54±0.82^{b}	7.38±0.23^{a}	6.31±0.06^{b}	6.27±0.22^{b}	1.94888	玫瑰, 柑橘等香气, 有强的油脂气味
	己醛-M	1.78±0.27^{a}	2.08±0.08^{a}	1.85±0.02^{a}	1.83±0.12^{a}	1.40868	醛, 蜡味, 柑橘, 橙子, 果香, 脂肪
	庚醛-M	2.07±0.11^{a}	2.13±0.08^{a}	1.77±0.01^{b}	1.27±0.10^{c}	1.2549	豆香, 果香, 泥土, 清香及类似蔬菜香韵
	3-甲基丁醛	7.77±0.20^{a}	6.85±0.28^{a}	6.21±0.05^{b}	5.50±0.46^{b}	1.15902	蘑菇, 果香
	正戊醛-M	2.26±0.06^{a}	2.13±0.12^{a}	1.49±0.02^{b}	1.44±0.11^{b}	1.18254	温和的果味, 酒味, 甜辣
	苯乙醛	1.08±0.13^{b}	1.00±0.04^{b}	1.14±0.09^{b}	1.35±0.12^{a}	1.3327	新鲜, 醛, 脂肪, 清香草药, 酒, 果香
	3-(甲硫基)丙醛-D	0.86±0.10^{a}	0.62±0.03^{b}	0.70±0.02^{b}	0.88±0.12^{a}	1.38923	烤面包味
	2-甲基丙醛	0.83±0.06^{a}	0.73±0.08^{ab}	0.53±0.03^{c}	0.60±0.12^{bc}	1.18771	强烈酸焦香和水果香气, 有朗姆酒和醚香
	正壬醛-M	0.99±0.01^{b}	1.04±0.06^{b}	1.31±0.04^{a}	0.77±0.13^{c}	1.26031	新鲜的、清香、脂肪味、水果味
	苯甲醛-M	1.98±0.06^{b}	1.41±0.09^{c}	2.18±0.05^{a}	2.02±0.03^{b}	1.56259	新鲜的、清香、脂肪味、水果味
	2-糠醛	1.08±0.11^{a}	0.91±0.07^{b}	0.73±0.01^{c}	0.84±0.04^{bc}	1.18055	强烈酸焦香和水果香气, 有朗姆酒和醚香
	3-甲基-2-丁烯醛	1.07±0.05^{b}	0.94±0.02^{c}	0.75±0.01^{d}	1.41±0.06^{a}	1.25235	甜香味、果味
	(E)-2-庚烯醛-M	0.49±0.01^{b}	1.25±0.23^{a}	0.92±0.02^{a}	1.34±0.11^{a}	1.5148	青草, 黄瓜香
	(E)-2-庚烯醛-D	0.23±0.01^{c}	0.55±0.15^{b}	0.42±0.01^{bc}	0.81±0.23^{a}	1.10728	青草、黄瓜香
	(E)-2-己烯醛	0.38±0.04^{b}	0.30±0.01^{b}	0.24±0.02^{b}	1.22±0.31^{a}	1.29393	甜香, 黄油奶油, 焦糖, 坚果, 干酪
	苯甲醛-D	0.68±0.06^{c}	0.43±0.03^{d}	1.51±0.08^{a}	1.11±0.11^{b}	1.05914	黄油味、奶油味
	2-糠醛-M	1.65±0.02^{b}	1.46±0.09^{c}	2.37±0.06^{a}	1.48±0.01^{c}	1.30867	醚样气味
	正辛醛	0.50±0.01^{c}	0.65±0.03^{b}	0.82±0.02^{a}	0.36±0.04^{d}	1.40396	巧克力、脂肪味
	正壬醛-D	0.33±0.01^{b}	0.33±0.02^{b}	0.43±0.01^{a}	0.28±0.02^{c}	1.15345	果香
	2-甲基-2-丙烯醛	0.48±0.02^{b}	0.50±0.04^{b}	1.17±0.05^{a}	0.56±0.21^{b}	1.57072	甜焦糖味
	2-糠醛-D	1.22±0.25^{b}	0.85±0.13^{c}	3.52±0.21^{a}	0.86±0.12^{c}	1.09251	香蕉味, 甜瓜味, 微弱坚果气味
	庚醛-D	1.55±0.19^{b}	2.38±0.09^{a}	1.48±0.02^{b}	0.57±0.16^{c}	1.51819	清香、香蕉、脂肪
	正戊醛-D	3.86±0.07^{b}	4.19±0.08^{a}	2.07±0.06^{c}	1.35±0.06^{d}	1.42225	甜水果味
	(Z)-4-庚烯醛	0.94±0.16^{a}	0.87±0.01^{a}	0.37±0.01^{b}	0.47±0.02^{b}	1.10186	果香
醇类(19)	2-甲基-1-丙醇-D	2.60±0.04^{a}	2.27±0.17^{b}	1.95±0.06^{c}	1.60±0.07^{d}	1.14817	苦杏仁, 樱桃及坚果香
	1-戊醇-M	2.33±0.17^{a}	2.22±0.06^{a}	1.84±0.03^{b}	1.86±0.07^{b}	1.47381	苦杏仁, 樱桃及坚果香
	丙二醇	1.95±0.10^{a}	1.88±0.08^{a}	1.64±0.02^{b}	1.57±0.13^{b}	1.28566	水果味
	1-戊醇-D	1.64±0.12^{a}	1.65±0.06^{a}	1.08±0.02^{c}	1.48±0.06^{b}	1.09208	洋葱, 肉香, 果香
	1-丁醇	1.19±0.09^{a}	1.05±0.06^{b}	1.17±0.03^{a}	0.99±0.06^{b}	1.63372	梨, 香蕉似的果香, 轻微的药香)
	异戊醇	0.80±0.05^{a}	0.74±0.04^{ab}	0.58±0.02^{c}	0.69±0.01^{b}	1.32996	清新的, 果味, 酒精, 甜, 清香
	2-甲基-1-丙醇-M	0.87±0.03^{b}	0.75±0.05^{c}	0.78±0.01^{c}	1.16±0.05^{a}	1.33292	甜味、杏仁香、
	1-己醇-M	1.34±0.18^{b}	1.49±0.06^{b}	0.98±0.05^{c}	2.03±0.14^{a}	1.41359	甜味、面包、黄油、坚果
	2-丁醇	1.40±0.04^{a}	1.18±0.02^{b}	0.66±0.03^{d}	1.08±0.03^{c}	1.52893	强烈苹果味、菠萝味
	3-甲基丁醇-M	0.96±0.03^{b}	0.73±0.01^{c}	0.50±0.01^{d}	1.29±0.05^{a}	1.23302	烤洋葱, 果香, 花香, 酒香
	3-甲基丁醇-D	0.32±0.01^{b}	0.25±0.01^{c}	0.18±0.01^{d}	1.08±0.02^{a}	1.18292	红酒味
	2-乙基-1-己醇	0.26±0.02^{b}	0.21±0.01^{b}	0.22±0.01^{b}	0.48±0.09^{a}	1.34305	空灵, 绿色, 热带果香
	1-己醇-D	0.41±0.08^{c}	0.54±0.04^{b}	0.29±0.02^{d}	1.69±0.09^{a}	1.36957	丙酮气味, 清新的, 甜果味, 酒香
	3-甲基-3-丁烯-1-醇	0.58±0.02^{b}	0.49±0.02^{c}	0.30±0.01^{d}	1.14±0.04^{a}	1.42164	青草气味, 带微弱香蕉味, 味刺激
	乙醇	1.40±0.12^{c}	2.72±0.41^{b}	5.17±0.16^{a}	5.57±0.47^{a}	1.17212	清新的、酒味
	1-戊烯-3-醇	0.45±0.03^{c}	0.48±0.02^{c}	1.15±0.04^{a}	0.86±0.02^{b}	1.67435	辛辣的, 清香蔬菜, 新鲜, 脂肪
	3-甲基-1-戊醇	0.48±0.08^{b}	0.40±0.01^{b}	2.08±0.51^{a}	0.75±0.04^{b}	1.33554	清新的, 果味, 甜味, 草味
	2-呋喃甲醇	0.40±0.13^{ab}	0.32±0.02^{b}	0.71±0.01^{a}	0.75±0.36^{a}	1.39926	柑橘, 新鲜花香, 油腻
	1-丙醇	3.08±0.25^{a}	2.19±0.48^{b}	2.07±0.36^{b}	1.23±0.58^{c}	1.49718	威士忌酒香, 香蕉果香
酮类(15)	5-甲基-3-庚酮	0.62±0.10^{a}	0.49±0.03^{b}	0.60±0.03^{a}	0.55±0.02^{ab}	1.13369	烤香, 咖啡, 花生, 土豆气味
	1-羟基-2-丙酮	0.65±0.06^{ab}	0.68±0.03^{a}	0.52±0.02^{c}	0.61±0.01^{b}	1.2618	梨, 香蕉似的果香, 轻微的药香)
	3-戊烯-2-酮	6.51±0.11^{a}	6.32±0.06^{a}	2.22±0.01^{c}	5.53±0.36^{b}	1.15937	强烈的醋酸, 奶酪, 黄油, 水果
	2, 3-戊二酮	0.58±0.11^{b}	0.66±0.01^{b}	0.68±0.05^{b}	1.32±0.09^{a}	1.16131	果香, 梨似香气
	2, 3-丁二酮	0.45±0.03^{b}	0.52±0.03^{b}	0.45±0.01^{b}	0.86±0.26^{a}	1.07977	强烈刺激性气味
	2-己酮-M	0.87±0.07^{c}	1.22±0.05^{b}	1.57±0.02^{a}	0.87±0.08^{c}	1.2458	果香
	4-庚酮	0.33±0.01^{d}	0.62±0.02^{b}	1.16±0.02^{a}	0.47±0.04^{c}	1.09647	清新的, 果味, 甜味, 草味
	1-戊烯-3-酮-M	0.34±0.02^{b}	0.34±0.01^{b}	0.56±0.01^{a}	0.35±0.01^{b}	1.123	芳香气味

续表 6

化合物种类	化合物名称	相对含量(%)				保留时间(s)	气味描述
		CK	PS	HPST	HPP		
	2-己酮	0.54±0.02^{c}	0.59±0.02^{b}	0.82±0.03^{a}	0.52±0.03^{c}	1.22048	烧焦味、咖啡、坚果、烤木质
	1-戊烯-3-酮-D	0.47±0.06^{b}	0.41±0.01^{b}	0.59±0.01^{a}	0.57±0.06^{a}	1.25815	风信子香气，水果甜香，杏仁，樱桃
	2-己酮-D	0.34±0.01^{d}	0.56±0.01^{b}	1.25±0.03^{a}	0.45±0.10^{c}	1.14855	青草，油脂味
	3-羟基-2-丁酮	0.63±0.21^{ab}	0.44±0.01^{c}	0.85±0.13^{a}	0.64±0.06^{ab}	1.2009	梅子
	2-丁酮	4.55±0.23^{b}	4.61±0.29^{b}	7.84±0.18^{a}	3.36±0.61^{c}	1.64153	清新的，果味，酒精，甜，清香
	2-戊酮	1.31±0.06^{b}	1.86±0.06^{a}	1.32±0.02^{b}	1.00±0.21^{c}	1.24914	威士忌酒香，香蕉果香
	3-巯基-2-丁酮	0.64±0.11^{a}	0.46±0.08^{b}	0.21±0.00^{c}	0.24±0.02^{c}	1.48969	酸臭，奶酪
酯类(10)	2-甲基丁酸甲酯	0.92±0.04^{bc}	1.06±0.03^{a}	0.98±0.01^{b}	0.9±0.04^{d}	1.25671	辛辣的，清香蔬菜，新鲜，脂肪
	3-甲基丁酸甲酯	0.77±0.08^{c}	1.13±0.03^{a}	1.04±0.02^{ab}	0.97±0.13^{b}	1.40256	洋葱，肉香，果香
	乙酸丙酯	0.77±0.02^{a}	0.68±0.02^{b}	0.62±0.04^{b}	0.82±0.06^{a}	1.30921	清香、水果味
	巴豆酸乙酯	0.87±0.06^{a}	0.68±0.04^{b}	0.62±0.01^{bc}	0.60±0.01^{c}	1.0825	甜味、木头、杏仁香、烤面包
	甲酸丁酯	0.67±0.09^{a}	0.70±0.05^{a}	0.43±0.00^{c}	0.57±0.01^{b}	1.25941	微弱的酒精味
	异丁酸异丙酯	0.58±0.04^{a}	0.58±0.02^{a}	0.33±0.01^{c}	0.52±0.02^{b}	1.50068	果香、肉质、黄油
	甲基-2-糠酸酯	0.95±0.08^{b}	0.90±0.03^{b}	0.60±0.03^{c}	1.27±0.04^{a}	1.19232	苹果
	反-2-丁烯酸乙酯	0.92±0.11^{b}	0.82±0.05^{bc}	0.72±0.02^{c}	1.45±0.05^{a}	1.34062	水果香
	乙酸乙酯-M	1.25±0.06^{b}	1.36±0.06^{b}	0.59±0.02^{c}	1.72±0.15^{a}	1.10758	土豆，豌豆
	乙酸乙酯-D	0.46±0.01^{c}	0.69±0.02^{b}	0.21±0.01^{d}	1.67±0.19^{a}	1.18882	青草气味，带微弱香蕉味，味刺激
酸类(3)	丁烷酸	1.46±0.18^{a}	1.13±0.06^{b}	0.54±0.05^{d}	0.75±0.08^{c}	1.16904	黄油，爆米花，甜味
	3-甲基丁酸	0.68±0.09^{a}	0.43±0.06^{b}	0.24±0.03^{c}	0.33±0.02^{bc}	1.22538	焦糖味，清新
	丙酸	1.16±0.40^{a}	0.59±0.05^{b}	0.66±0.07^{ab}	0.86±0.05^{ab}	1.26098	果香，刺激
呋喃类(4)	2-甲基二氢-3(2H)呋喃酮	0.81±0.01^{ab}	0.89±0.08^{a}	0.55±0.02^{c}	0.71±0.13^{b}	1.23809	果香
	5-甲基-2-呋喃甲醇	0.31±0.01^{d}	0.50±0.05^{c}	0.76±0.02^{b}	0.93±0.14^{a}	1.31063	强烈刺激性气味
	2-戊基呋喃	0.47±0.03^{c}	0.87±0.03^{b}	2.34±0.12^{a}	0.58±0.12^{c}	1.18096	清新的、酒味、皮质
	2-丁基呋喃	0.66±0.09^{a}	0.46±0.02^{b}	0.63±0.03^{a}	0.36±0.02^{c}	1.11809	酒精、刺激性气味
吡嗪类(2)	2, 6-二甲基吡嗪	0.52±0.12^{a}	0.36±0.02^{b}	0.62±0.02^{a}	0.38±0.02^{b}	1.21632	风信子叶
	2-乙基-3, 5-二甲基吡嗪	0.47±0.05^{a}	0.39±0.02^{bc}	0.34±0.01^{c}	0.41±0.03^{ab}	1.44474	洋葱
其他类(1)	1, 2-二甲氧基乙烷	2.28±0.12^{b}	2.16±0.14^{b}	1.93±0.05^{b}	2.84±0.05^{a}	1.69814	脂肪，清香草药，酒，果香

注：气味描述由气相离子迁移色谱系统导出。

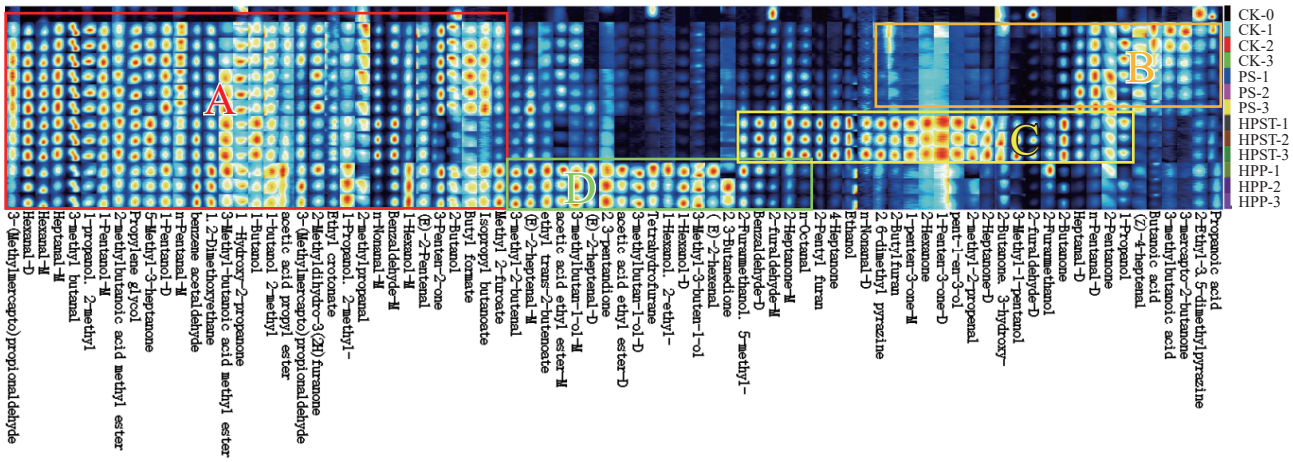


图 6　不同杀菌方式低脂核桃酱挥发性风味物质指纹图谱

Fig.6　Fingerprint of volatile flavor substances in low-fat walnut sauce with different sterilization methods

合物类别的风味信息，通过百分比柱状图对其类别占比进行分析。由图 7a 所示，根据峰强度和种类划分得到不同杀菌方式低脂核桃酱中的醛类所含挥发性物质较为丰富(35%~42%)，其主要源于脂肪的氧化水解、微生物代谢活动以及糖类参与的美拉德反应，具有较高的气味阈值，微量醛类的存在可显著提升香气的醇厚感，且醛类与其他风味物质间存在强烈的风味重叠效应[37]。HPST 组中的醛类相对含量最高，这是由于高温促使化合物产生美拉德反应，形成浓度较高的醛。研究表明，醛类物质的种类和数量会伴随着氧化程度的加剧而发生变化[38]，主要贡献为浓郁的坚果香、油脂香。其次是醇类，相对含量占比为 21%~27%，主要来源于脂肪的氧化分解和羰基化合物的还原，具有植物香和果香等丰富的风味[39]。HPP

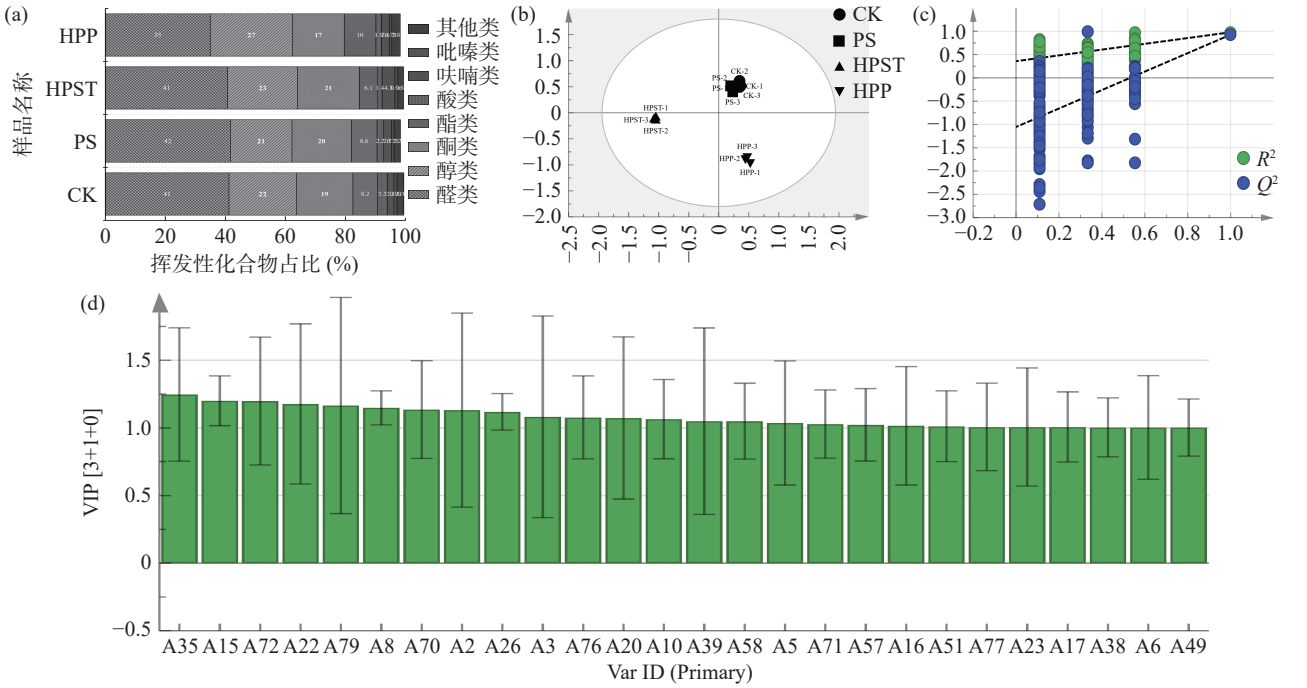


图 7 不同杀菌方式对低脂核桃酱挥发性风味的影响

Fig.7 Effects of different sterilization methods on volatile flavor of low-fat walnut sauce

注: a: 挥发性化合物分类图; b: PCA 图; c: 置换检验图; d: VIP 得分图。图 7d 中横坐标字母与数字由左到右分别为: (E)-2-庚烯醛-M、3-甲基丁酸甲酯、2-戊酮、巴豆酸乙酯、丙酸、2-甲基丁酸甲酯、庚醛-D、己醛-D、苯甲醛-M、己醛-M、3-甲基丁酸、3-(甲硫基)丙醛、5-甲基-3-庚酮、(E)-2-庚烯醛-D、2-丁基呋喃、3-甲基丁醛、正戊醛-D、2,6-二甲基吡嗪、1-羟基-2-丙酮、2-庚酮-M、3-巯基-2-丁酮、2-甲基-1-丙醇-D、1-丁醇、3-甲基-1-丁醇-M、2-甲基-1-丙醇-M、氘代苯甲醛-D。

组醇类物质的相对含量显著高于其他组(P<0.05), 研究表明, 经超高压处理的样品导致糖苷结合化合物生成, 并通过醇类物质释放[40]。HPP 组中正丙醇的含量最高, 为 1.23%~3.08%, 赋予了 HPP 组低脂核桃酱酒香和果香味。酮类相对含量排名第三, 为 17%~21%。酮主要通过饱和脂肪酸的热氧化分解、氢过氧化物的酮-烯醇互共轭异构化、烃的进一步氧化和分解、不饱和脂肪酸中过氧化物的分子内电子重排和氨基酸的热氧化降解来产生[41]。除此之外, 酯类、酸类、吡嗪类、呋喃类占比较低。

通过挥发性化合物的峰强度生成 OPLS-DA 评分图(R^2X=0.931, R^2Y=0.99, Q^2=0.961), 由图 7b 可得不同杀菌方式低脂核桃酱各样品间的挥发性成分存在差异与共性, 其中 CK 与 PS 组的挥发性化合物相接近且均位于第一象限, 而 HPST 与 HPP 差距较大, 分别位于第三象限和第四象限。通过 200 次置换检验得到原始 OPLS-DA 模型具有良好的性能(R^2=0.359, Q^2=−1.05)(图 7c), 无过拟合现象, 可用于进一步筛选贡献率 VIP 值>1 的化合物。

为确定不同杀菌组中的关键差异化合物, 从 OPLS-DA 模型中得出 VIP 值>1 的化合物共 26 个。ROAV 是评估食品中挥发性风味成分的关键指标, 将 VIP>1 的风味化合物进一步分析其 ROAV。如表 7 所示, 不同杀菌方式低脂核桃酱中 ROAV 值>1 的化合物被认为是关键香气物质, 0.1≤ROAV<1 的化合物对样品风味具有一定修饰作用, 值越大贡献越大。不同杀菌方式低脂核桃酱中的主要风味贡献物质是 3-甲基丁醛, 呈蘑菇香、果香。HPP 组的重要特征化合物为(E)-2-庚烯醛-M, 主要呈青草、黄瓜香味, 此结果与表 6 中化合物相对含量表现一致, 可针对喜爱果香、清新油脂香味的群体食用。PS 组中代表性化合物为 3-(甲硫基)丙醛(ROAV=91.971), 贡献了烤面包香味。HPST 组中重要特征风味物质是苯甲醛-D(ROAV=28.947), 呈现油脂、黄油、奶油香味, 可供喜爱坚果香、烘烤香的群体食用。不同杀菌方式影响了低脂核桃酱的风味, 挥发性化合物因其含量及浓度的不同, 形成了特有的风味轮廓。

2.2.5 不同杀菌方式低脂核桃酱的品质综合评价

为筛选低脂核桃酱综合品质最佳的杀菌方式, 对 22 项品质指标进行综合评价, 如表 8 所示, 以方差贡献率大于 85% 为依据, 前两个主成分累计方差贡献率可达 95.07%, 可作为评价不同杀菌方式低脂核桃酱品质指标的主成分因子。

如表 9 所示, 主成分载荷矩阵反映了各指标在主成分中的作用方向及大小程度, 结合表 8 可知, PC_1 的累计方差贡献率为 73.134%, 主要综合了硬度、弹性、粘附性、体外消化模拟(胃)、胶黏性、过氧化值、体外消化模拟(肠)、酸价、咀嚼性、L^*、内聚性、ΔE、a^*、b^*、碳水化合物、挥发性风味物质、离心析出率等相关性较高且呈正向分布的指标, 说明这些指标在不同杀菌方式低脂核桃酱综合品质评价中占主要位置; PC_2 的累计方差贡献率为 95.07%, 主要综

表 7　不同杀菌方式低脂核桃酱特征性风味 ROAV

Table 7　Characteristic flavor and ROAV of low-fat walnut sauce under different sterilization methods

编号	化合物名称	香气阈值 (mg/kg)	ROAV			
			CK	PS	HPST	HPP
1	(E)-2-庚烯醛-M	0.03	10.511	30.414	24.691	40.606
2	3-甲基丁酸甲酯	0.3	1.652	2.749	2.791	2.939
3	2-戊酮	200	0.004	0.007	0.005	0.005
4	巴豆酸乙酯	0.5	1.120	0.993	0.998	1.091
5	丙酸	20	0.037	0.022	0.027	0.039
6	2-甲基丁酸甲酯	0.2	2.960	3.869	3.945	4.091
7	庚醛-D	0.5	1.995	3.474	2.383	1.036
8	己醛-D	2.5	1.683	2.155	2.032	2.280
9	苯甲醛-M	0.5	2.548	2.058	3.510	3.673
10	己醛-M	2.5	0.456	0.604	0.593	0.655
11	3-甲基丁酸	0.3	1.459	1.046	0.644	1.000
12	3-(甲硫基)丙醛	0.005	75.933	91.971	77.295	78.182
13	5-甲基-3-庚酮	50	0.008	0.007	0.010	0.010
14	(E)-2-庚烯醛-D	0.03	4.934	13.382	11.272	24.545
15	2-丁基呋喃	5	0.085	0.067	0.101	0.065
16	3-甲基丁醛	0.05	100.000	100.000	100.000	100.000
17	正戊醛-D	5	0.497	0.612	0.333	0.245
18	2,6-二甲基吡嗪	5	0.067	0.053	0.100	0.069
19	1-羟基-2-丙酮	500	0.001	0.001	0.001	0.001
20	2-庚酮-M	50	0.011	0.018	0.025	0.016
21	3-巯基-2-丁酮	0.005	82.368	67.153	33.816	43.636
22	2-甲基-1-丙醇-D	300	0.006	0.006	0.005	0.005
23	1-丁醇	250	0.003	0.003	0.004	0.004
24	3-甲基-1-丁醇-M	50	0.012	0.011	0.008	0.023
25	2-甲基-1-丙醇-M	300	0.002	0.002	0.002	0.004
26	苯甲醛-D	0.042	10.419	7.473	28.947	24.026

注: 阈值查询源自《化合物嗅觉阈值汇编》和https://www.chemicalbook.com/ProductIndex.aspx。

表 8　不同杀菌方式低脂核桃酱品质指标特征值及方差贡献率

Table 8　Characteristic value and variance contribution rate of low-fat walnut sauce quality index with different sterilization methods

PC	初始特征值		
	特征值	方差贡献率(%)	累计方差贡献率(%)
1	16.09	73.13	73.134
2	4.826	21.94	95.07
3	1.085	4.93	100

合了离心析出率、水分、灰分等相关性较高且呈正向分布的指标。

将各指标进行标准化, 并通过计算得出 2 个主成分的函数表达式: F_1、F_2, X_1~X_{22} 分别表示蛋白质、脂肪、水分、灰分、碳水化合物、L^*、a^*、b^*、ΔE、离心析出率、硬度、粘附性、内聚性、弹性、胶粘性、咀嚼性、体外模拟消化(胃)、体外模拟消化(肠)、酸价、过氧化值、总挥发性成分和菌落总数, 如下所示:

$$F_1=-0.124X_1-0.246X_2-0.173X_3-\ldots\ldots-0.230X_{22}$$

$$F_2=0.126X_1+0.015X_2+0.298X_3+\ldots\ldots0.010X_{22}$$

将 2 个主成分的方差贡献率为权重进行加权求和, 构建主成分综合评价函数如下:

$$F_{综合}=\frac{0.7313\times F_1+0.2194\times F_2}{0.9507}$$

如表 10 所示, 不同杀菌方式低脂核桃酱品质指标综合得分越高说明品质越好, 综合得分及排名依次为: HPP>PS>HPST>CK, 由此可知, HPP 组综合评分最高, 其不仅可作为低脂核桃酱的最适杀菌方式, 也最大程度地保留了食物的营养、感官功能特性。后续将其作为货架期预测试验组。

表 9　不同杀菌方式低脂核桃酱的品质指标主成分载荷矩阵

Table 9　Principal component load matrix of quality index of low-fat walnut sauce with different sterilization methods

指标	PC	
	1	2
蛋白质	−0.499	0.276
脂肪	−0.988	0.034
水分	−0.695	0.655
灰分	−0.797	0.560
碳水化合物	0.825	−0.553
L^*	0.866	−0.487
a^*	0.833	−0.531
b^*	0.833	−0.539
ΔE	0.838	−0.530
离心析出率	0.596	0.802
硬度	0.995	0.066
粘附性	0.941	0.333
内聚性	0.852	0.523
弹性	0.945	0.324
胶粘性	0.916	0.398
咀嚼性	0.907	0.419
体外模拟消化(胃)	0.924	0.381
体外模拟消化(肠)	0.915	0.401
酸价	0.915	0.401
过氧化值	0.916	0.398
挥发性风味	0.697	−0.715
菌落总数	−0.924	0.021

表 10　不同杀菌方式低脂核桃酱品质指标综合得分及排名

Table 10　Comprehensive score and ranking of quality indexes of low-fat walnut sauce with different sterilization methods

杀菌方式	F_1	F_2	综合得分	排名
CK	−5.47	1.64	−3.831871847	4
PS	−0.28	1.38	1.199467302	2
HPST	1.98	−3.10	0.099955685	3
HPP	3.78	1.72	1.519183499	1

2.3　低脂核桃酱产品的货架期预测

2.3.1　不同贮藏条件对低脂核桃酱酸价的影响　由图 8 可知, 在 4 ℃ 贮藏条件下, 低脂核桃酱的酸价整体变化趋势较为平稳, 基本维持在 0.6 mg/g 左右。在 25 ℃ 贮藏条件下, 低脂核桃酱的酸价随整体呈上升趋势, 酸值范围为 0.63~0.95 mg/g; 在 35 ℃ 贮藏条件下, 其酸价变化尤为显著(P<0.05)。但贮藏温度越高, 低脂核桃酱的酸价上升速度则越快, 这与高温环

境促进油脂中甘油三酯和磷酸水解导致酸价升高有关[42]。不同贮藏温度下贮藏 30 d 的低脂核桃酱的酸价仍处于国家安全范围之内(<3.0 mg/g)。

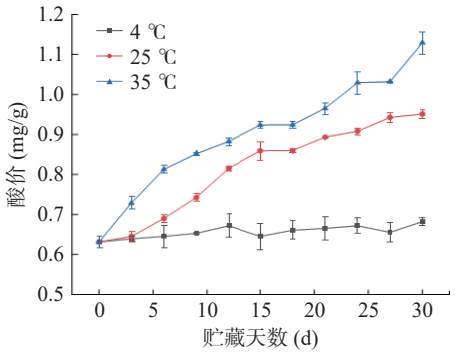


图 8 低脂核桃酱不同贮藏条件下酸价的变化

Fig.8 Changes of acid value of low-fat walnut sauce under different storage conditions

2.3.2 不同贮藏条件对低脂核桃酱感官评价的影响

感官评价能够提供消费者对产品质量的直观感受[43]。由图 9 可见,在 4 ℃ 贮藏 30 d 的低脂核桃酱感官评分为 81.3 分,品质较好。但在 25℃ 温度下贮藏 30 d 的低脂核桃酱感官评分已降到了 50.03 分,35 ℃ 温度下在第 18 d 已降至 41.03 分,且两个温度下贮藏的产品品质较差,出现结块、接受度较差、微生物超标等现象。

2.3.3 低脂核桃酱货架期预测模型的建立 综合不同贮藏条件下对低脂核桃酱感官评价和酸价的影响,对低脂核桃酱的货架期进行动力学模型拟合,由表 11 分析得知,R^2 越大表明拟合模型越好,低脂核桃酱在不同贮藏条件下的感官评分和酸价这 2 项指

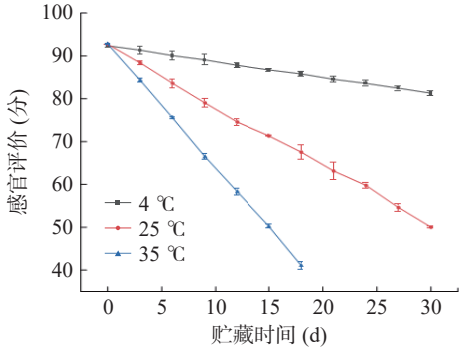


图 9 低脂核桃酱不同贮藏条件下对于感官评价的影响

Fig.9 Effect of low-fat walnut sauce under different storage conditions on sensory evaluation

标的拟合模型均在 0.90 以上,表明此模型模拟较好。而零级动力学模型在各温度下的 R^2 均大于一级动力学模型,因此,对低脂核桃酱货架期预测采用零级动力学模型反映更准确。

根据上述内容拟合得到的零级反应动力学方程,得到不同贮藏温度下低脂核桃酱的感官评价和酸价变化的反应速率常数和相关参数,结果详见表 12。

以 lnk 为纵坐标,1/T 为横坐标作图,不同温度与感官评价变化速率常数的拟合曲线结果见图 10a,不同温度与酸价变化速率常数的拟合曲线见图 10b,图中直线斜率为-E_a/R,截距为 lnk_0,得到的方程及相关参数见表 13,感官评分的回归方程 R^2 为 0.99523,酸价的回归方程 R^2 为 0.95608。

根据前期品质指标分析结果可知,低脂核桃酱在 25 ℃ 与 35 ℃ 分别贮藏 27 d 和 18 d 时已不符合微生物安全范围,表明低脂核桃酱不适于高温贮藏,因此将 4 ℃ 作为最终预测温度。以感官评分的判断

表 11 低脂核桃酱不同贮藏条件下感官评分与酸价的动力学模型拟合

Table 11 Sensory evaluationand dynamic model fitting of acid value of low-fat walnut sauce under different storage conditions

指标	温度(℃)	零级		一级	
		动力学方程	R^2	动力学方程	R^2
感官评价	4	C_t=92.34242−0.36768t	0.9995	C_t=92.44661exp(−0.00423t)	0.99946
	25	C_t=92.19545−1.39061t	0.99842	C_t=93.85418exp(−0.0194t)	0.99346
	35	C_t=92.71667−2.86429t	0.99977	C_t=94.97079exp(−0.04235t)	0.98871
酸价	4	Ct=0.63779+0.00125t	0.63802	Ct=0.638exp(0.00189t)	0.63621
	25	C_t=0.64052+0.01148t	0.95281	C_t=0.65535exp(0.01379t)	0.93052
	35	Ct=0.96111+0.014t	0.95202	Ct=0.70898exp(0.01529t)	0.93702

表 12 不同贮藏温度下低脂核桃酱感官评价与酸价变化零级反应动力学模型及相关参数

Table 12 Sensory evaluation and acid value change of low-fat walnut sauce at different temperatures Zero-order reaction kinetic model and related parameters

指标	温度(℃)	动力学方程	k	lnk	1/T
感官评价	4	C_t=92.34242−0.36768t	0.36768	0.003608154	−1.000542284
	25	C_t=92.19545−1.39061t	1.39061	0.003342805	0.3297425
	35	C_t=92.71667−2.86429t	2.86429	0.003234676	1.052320501
酸价	4	Ct=0.63779+0.00125t	0.00125	0.003608154	−6.684611728
	25	C_t=0.64052+0.01148t	0.01148	0.003342805	−4.467148888
	35	Ct=0.96111+0.014t	0.014	0.003234676	−4.268697949

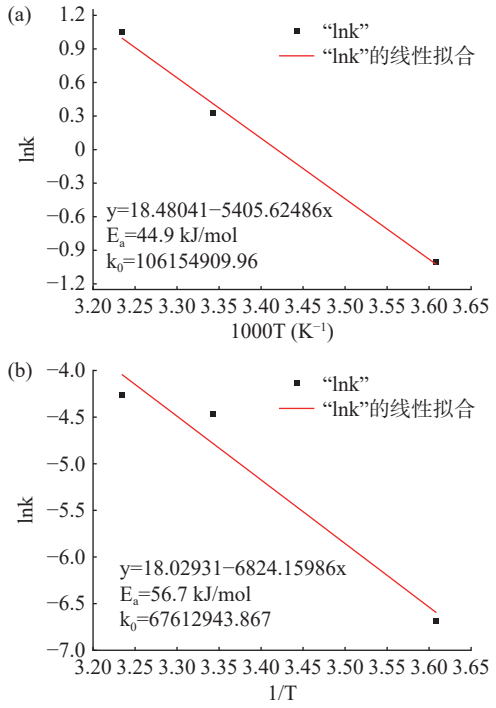


图 10　不同温度与感官评价(a)和酸价(b)变化速率常数的关系

Fig.10　Relationship between different temperatures and rate constants of sensory evaluation (a) and acid value (b)

表 13　低脂核桃酱感官评价变化动力学参数

Table 13　Dynamic parameters of sensory score change of low-fat walnut sauce

参数值	$\ln k_0$	$-E_a/R$	k_0	E_a	R^2
感官评价	18.48041	5405.62486	106154909.96	44.9	0.99523
酸价	18.02931	6824.15986	67612943.867	56.7	0.95608

达到 50 分时，作为货架期终点[44]，将反应活化能和指前因子代入方程，得到 4 ℃ 下低脂核桃酱预测货架期为 118 d。

感官评价的货架期预测公式：

$$SL_0 = \frac{|C - C_0|}{106154909.96e^{-\frac{44946.149}{8.3144T}}}$$

酸价的货架期预测公式：

$$SL_0 = \frac{|C - C_0|}{67612943.867e^{-\frac{56738.79424}{8.3144T}}}$$

2.3.4　货架期验证试验　为证明模型预测的真实性，对感官评价 4 ℃ 贮藏和酸价 36 ℃ 贮藏的低脂核桃酱进行试验验证，结果如表 14 所示，结果表明低脂核桃酱货架期实测值与预测值之间的相对误差仅为 5.9% 和 3.7%，表明模型预测能力较好，可信度较高。

表 14　低脂核桃酱货架期实测值和预测值

Table 14　Measured and predicted values of shelf life of low-fat walnut sauce

指标	贮藏温度（℃）	货架期预测值（d）	货架期实测值（d）	相对误差（%）
感官评价	4	118	125	5.9
酸价	36	135	130	3.7

3　结论

研究确定了低脂核桃酱的超高压最适杀菌条件（500 MPa、4 min），并对比分析了不同杀菌方式（HPP、HPST 和 PS）对低脂核桃酱品质的影响。研究发现 HPP 不仅具有较好的杀菌效果，且杀菌组低脂核桃酱的色泽、蛋白质含量、质构、消化率等品质指标也优于其他杀菌组，其中胃消化率较 CK、PS、HPST 组分别提高了 0.24%、3.57%、13.57%，肠消化率较 CK、PS、HPST 组分别提高了 6.33%、10%、21.33%。采用 GC-IMS 从低脂核桃酱中共鉴定出挥发性风味物质 79 种，其中醛类占比最高（35%~42%），其次是醇类（21%~27%）。HPP 组中的醇类含量高于其他组，呈“清香型”风味；HPST 组中的醛类含量最高，赋予样品浓郁的坚果香、油脂香，主要为“浓香型”香味；结合 ROAV 得到低脂核桃酱的整体特征风味物质为 3-甲基丁醛，主要贡献了蘑菇香和果香。通过评价进一步证实了 HPP 组低脂核桃酱的综合品质最佳，并基于酸价和感官评价为以主要指标的零级动力学模型预测 HPP 低脂核桃酱在 4 ℃ 贮藏温度下的货架期为 118 d。研究为低脂核桃酱及低脂坚果酱产品的工业化生产应用与品质提升提供了参考依据，为低脂核桃酱的贮藏及货架期预测提供了理论依据。后续可在此基础上进一步探究“超高压+”技术协同绿色包装对低脂核桃酱货架期的影响，实现产品品质的提档升级。

© 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] TAPSELL L C, GILLEN L J, PATCH C S, et al. Including walnuts in a low-fat/modified-fat diet improves HDL cholesterol-to-total cholesterol ratios in patients with type 2 diabetes[J]. Diabetes Care, 2004, 27(12): 2777−2783.

[2] LIU G, GUASCH-FERRÉ M, HU Y, et al. Nut consumption in relation to cardiovascular disease incidence and mortality among patients with diabetes mellitus[J]. Circulation Research, 2019, 124(6): 920−929.

[3] SHAHIDI-NOGHABI M, NAJI-TABASI S, SARRAF M. Effect of emulsifier on rheological, textural and microstructure properties of walnut butter[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2019, 13(1): 785−792.

[4] EMADZADEH B, RAZAVI S M A, SCHLEINING G. Dynamic rheological and textural characteristics of low-calorie pistachio butter[J]. International Journal of Food Properties, 2013, 16(3): 512−526.

[5] KLU Y A K, CHEN J R. Effect of peanut butter matrices on the fate of probiotics during simulated gastrointestinal passage[J]. LWT - Food Science and Technology, 2015, 62(2): 983−988.

[6] ACHILLADELIS P, PETSAS A S, KARANTONIS H C. Effect of fortification of tahini with natural plant origin raw materials on its bioactivity[J]. Applied Sciences, 2023, 13(17): 9626.

[7] 马琳. HACCP 体系在巴氏杀菌乳生产中的应用[J]. 食品安

全导刊, 2024(23): 185−189. [MA Lin. Application of HACCP system in the production of pasteurized milk[J]. China Food Safety Magazine, 2024(23): 185−189.]
[8] 胡杰, 石启丽, 冯文伦. 非热杀菌技术及其在各食品领域中的应用[J]. 食品安全导刊, 2024(14): 129−135. [HU Jie, SHI Qili, FENG Wenlun. Non-thermal sterilization technology and its application in various food fields[J]. China Food Safety Magazine, 2024(14): 129−135.]
[9] 王雪青, 兰凤英, 邵汝梅. 高压对猕猴桃酱质量的影响[J]. 食品与发酵工业, 2001, 27(8): 28−30. [WANG Xueqing, LAN Fengying, SHAO Rumei. Effect of high-pressure on quality of Chinese gooseberry paste[J]. Food and Fermentation Industries, 2001, 27(8): 28−30.]
[10] 李靖, 王嘉祥, 陈欢, 等. 超高压与热杀菌对刺梨汁贮藏期品质影响的比较[J]. 食品科学, 2022, 43(15): 101−108. [LI Jing, WANG Jiaxiang, CHEN Huan, et al. Comparison of the effects of ultra-high pressure and thermal processing on quality changes of *Rosa roxburghii* juice during storage[J]. Food Science, 2022, 43(15): 101−108.]
[11] CHENG Shiwen, QIN Yumei, MAO Yuezhong, et al. "Reference sample comparison method": A new voltammetric electronic tongue method and its application in assessing the shelf life of fresh milk[J]. Food Chemistry, 2025, 463: 141064.
[12] 牛逍瞳, 塔吉妮萨古丽·艾麦提, 许铭强, 等. 模糊数学感官评价结合随机质心映射法优化低脂核桃酱工艺配方及品质特性分析[J]. 中国调味品, 2025, 50(5): 20−28. [NIU X T, TAJINISAGULI A, XU M Q, et al. Optimization of process formula of low-fat walnut sauce by fuzzy mathematics sensory evaluation combined with random centroid optimization method and analysis of its quality characteristics[J]. China Condiment, 2025, 50(5): 20−28.]
[13] 姜春露. 石榴制汁加工与贮藏过程护色研究[D]. 无锡: 江南大学, 2024. [JIANG Chunlu. Research on color protection during pomegranate juice processing and storage[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2024.]
[14] 赵慧娟, 陈峰, 陈志强, 等. 红椒牛肉酱的制作工艺及品质研究[J]. 食品工业, 2025, 46(4): 13−17. [ZHAO Huijuan, CHEN Feng, CHEN Zhiqiang, et al. Research on the production technology and quality of red pepper beef sauce[J]. The Food Industry, 2025, 46(4): 13−17.]
[15] 胡婷婷, 吴运锋, 王宇轩, 等. 佛手瓜块根生全粉添加量对小麦粉加工特性的影响[J]. 食品科学技术学报, 2023, 41(4): 168−178. [HU Tingting, WU Yunfeng, WANG Yuxuan, et al. Effect of raw chayote tuber flour additive amount on processing properties of wheat flour[J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 41(4): 168−178.]
[16] 孙剑. 可溶性大豆多糖对花生酱品质及货架期的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023. [SUN Jian. Effect of soluble soybean polysaccharides on peanut butter quality and shelf life[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023.]
[17] 王煜林, 宝音朝克图, 吉日木图. 不同乳源乳脂肪球的体外消化特性[J]. 中国食品学报, 2024, 24(7): 70−78. [WANG Y L, BAO Y C K T T, JI R M T. *In vitro* digestive characteristics of different milk yeru milk fat globules[J]. Journal of Chinese Food Science, 2024, 24(7): 70−78.]
[18] 孟新涛, 潘俨, 邹淑萍, 等. 不同储藏条件下鲜牛肉特征风味动态变化分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(15): 289−298. [MENG Xintao, PAN Yan, ZOU Shuping, et al. Characterization of volatile component changes in fresh beef during storage under different storage conditions[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(15): 289−298.]
[19] 彭斌, 陈云云, 黄志强, 等. 三种鱿鱼内脏鱼油提取精炼及品质分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(17): 282−293. [PENG Bin, CHEN Yunyun, HUANG Zhiqiang, et al. Extraction, refining, and quality analysis of fish oil from three types of squid viscera[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(17): 282−293.]
[20] LIU Minghao, LIU Minhua, BAI Lin, et al. Establishing a berry sensory evaluation model based on machine learning[J]. Foods, 2023, 12(18): 3502.
[21] 吴思宇, 徐阳, 熊思慧, 等. 超高压和热处理对低糖柑橘酱品质及流变特性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(7): 89−95. [WU Siyu, XU Yang, XIONG Sihui, et al. Effects of high hydrostatic pressure versus heat treatment on the quality and rheological properties of low-sugar *Citrus* jam[J]. Food Science, 2023, 44(7): 89−95.]
[22] CHEN Yajing, FENG Xiaoping, REN Hong, et al. Changes in physicochemical properties and volatiles of kiwifruit pulp beverage treated with high hydrostatic pressure[J]. Foods, 2020, 9(4): 10−28.
[23] LI S T, MANN D A, ZHANG S K, et al. Microbiome-informed food safety and quality: Longitudinal consistency and cross-sectional distinctiveness of retail chicken breast microbiomes[J]. mSystems, 2020, 5(5): e00589−e00520.
[24] 张加稳, 张联琴, 刘羽晏, 等. 2022—2024 年昆明市巴氏杀菌乳中微生物污染现状及其菌株的鉴定[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(24): 308−314. [ZHANG Jiawen, ZHANG Lianqin, LIU Yuyan, et al. Microbial contamination status and strain identification of pasteurized milk in Kunming City from 2022 to 2024[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(24): 308−314.]
[25] 朱淼淼, 刘园, 牛佳钰, 等. 过热蒸汽预处理技术在油脂加工中的研究进展[J]. 食品科学, 2025, 46(9): 337−350. [ZHU Miaomiao, LIU Yuan, NIU Jiayu, et al. Research progress on superheated steam pretreatment in oil processing[J]. Food Science, 2025, 46(9): 337−350.]
[26] 马晓蕊, 瓮亚楠, 陈涛, 等. 炭烧干酪的工艺优化及对其在不同成熟期蛋白质降解的研究[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(1): 116−123. [MA Xiaorui, WENG Yanan, CHEN Tao, et al. Process optimization of fermented brown cheese and study of its protein degradation at different stages of ripening[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(1): 116−123.]
[27] 王宇. 驼乳乳清蛋白的膜分离制备研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024. [WANG Yu. Study on preparation of camel whey protein by membrane separation[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024.]
[28] 赵文华, 温柔, 李书国. 小麦胚芽贮藏氧化稳定性提升技术的研究[J]. 粮食加工, 2024, 49(6): 86−93,97. [ZHAO Wenhua, WEN Rou, LI Shuguo. Study on improving the oxidation stability of wheat germ in storage[J]. Grain Processing, 2024, 49(6): 86−93, 97.]
[29] 陶虹. 超声波预处理对糙米品质与萌芽性能的影响[D]. 上海: 上海交通大学, 2018. [TAO Hong. Effects of ultrasound pretreatment on quality and germination of brown rice[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018.]
[30] 刘正才, 叶志伟, 李垄清, 等. 可得然胶与生物大分子的相互作用及其研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(5): 52−60. [LIU Zhengcai, YE Zhiwei, LI Longqing, et al. Research progress on the interaction between curdlan and biomacromolecules[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(5): 52−60.]
[31] 张园园, 郑远荣, 刘振民. 超高压处理对奶油干酪功能特性

及其应用的影响[J]. 中国调味品，2024, 49(2)：79−83,146.［ZHANG Yuanyuan, ZHENG Yuanrong, LIU Zhenmin. Effect of high hydrostatic pressure treatment on functional characteristics of cream cheese and its application[J]. China Condiment, 2024, 49(2)：79−83,146.］

［32］ MA Yanping, WANG Chaoye, LIU Chaobin, et al. Physiochemical responses of the kernel quality, total phenols and antioxidant enzymes of walnut in different forms to the low-temperature storage[J]. Foods, 2021, 10(9)：2027.

［33］ 刘春山, 陈苏, 陈思羽, 等. 稻谷热风干燥工艺分析与模型探究[J]. 农业机械学报，2024, 55(S1)：364−372.［LIU Chunshan, CHEN Su, CHEN Siyu, et al. Analysis and model exploration of paddy hot air drying process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(S1)：364−372.］

［34］ 朱文慧, 李雯政, 郭慧芳, 等. 纳米解冻对鱿鱼蛋白消化后氧化特性的影响[J]. 中国食品学报，2024, 24(12)：117−125.［ZHU Wenhui, LI Wenzheng, GUO Huifang, et al. Effects of nanothawing on oxidation characteristics of jumbo squid (*Dosidicus gigas*) protein after digestion[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(12)：117−125.］

［35］ 李闪闪, 刘哲, 职兰懿, 等. 新型物理改性技术改善植物蛋白加工特性研究进展[J]. 中国食品学报，2023, 23(11)：413−422.［LI Shanshan, LIU Zhe, ZHI Lanyi, et al. Research progress of novel physical modification techniques to improve processing properties of plant proteins[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(11)：413−422.］

［36］ 尚静. 热处理及超临界脱脂对核桃蛋白结构与功能特性的影响[D]. 西安：陕西师范大学, 2021.［SHANG Jing. Effects of heat treatment and supercritical degreasing on the structure and functional properties of walnut protein[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2021.］

［37］ 毛红艳, 祖力皮牙·买买提, 王佳敏, 等. 基于电子感官技术结合 HP-SPME-GC-MS 分析不同馕的关键风味物质[J]. 中国粮油学报，2025, 40(4)：176−185.［MAO H Y, ZULIPIYA M M T, WANG J M, et al. Analysis of key aroma components of different naan by HS-SPME-GC-MS coupled with electric-sense technology[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2025, 40(4)：176−185.］

［38］ 王国王, 祁岩龙, 徐芹, 等. 不同氧化程度核桃油品质分析及快速判别模型的建立[J]. 食品工业科技，2025, 46(19)：104−112.［WANG Guowang, QI Yanlong, XU Qin, et al. Quality analysis of walnut oil with different degrees of oxidation and establishment of a rapid discrimination model[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(19)：104−112.］

［39］ 郭京凤, 龙正森, 秦磊, 等. 不同食用油油炸挂糊罗非鱼块的风味特征分析[J]. 食品工业科技，2025, 46(19)：308−318.［GUO Jingfeng, LONG Zhengsen, QIN Lei, et al. Analysis of the flavor characteristics of deep-fried and battered tilapia pieces prepared with various cooking oils[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(19)：308−318.］

［40］ CHEN Qiuhan, YANG Xuebo, HONG Pengzhi, et al. GC-MS, GC-IMS, and E-nose analysis of volatile aroma compounds in wet-marinated fermented golden pomfret prepared using different cooking methods[J]. Foods, 2024, 13(3)：390.

［41］ 张倩, 邓影妹. “哈喇味”的秘密[J]. 中国食品安全，2024(12)：78−79.［ZHANG Qian, DENG Yingmei. The secret of "hare taste"[J]. China Food Safety, 2024(12)：78−79.］

［42］ 曾小峰, 盖智星, 颜蜜, 等. 蒸汽爆破预处理对压榨紫苏籽油品质和风味的影响[J]. 食品科学，2025, 46(7)：257−263.［ZENG Xiaofeng, GAI Zhixing, YAN Mi, et al. Effect of steam explosion pretreatment on the quality and flavor of pressed *Perilla* seed oil[J]. Food Science, 2025, 46(7)：257−263.］

［43］ 吴燕红, 林胜利, 尹晨静, 等. 不同冷冻方式对南美白对虾冻藏品质的影响研究[J]. 保鲜与加工，2025, 25(2)：38−45.［WU Yanhong, LIN Shengli, YIN Chenjing, et al. Effect of different freezing methods on the frozen storage quality of *Litopenaeus vannamei*[J]. Storage and Process, 2025, 25(2)：38−45.］

［44］ ZHOU Xingjian, PENG Xingyu, PEI Huan, et al. An overview of walnuts application as a plant-based[J]. Frontiers in Endocrinology, 2022, 13：1083707.