

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20240204

网络首发日期: 2025-01-14; 网络首发地址: <http://link.cnki.net/urlid/12.1355.N.20250114.1602.010>

蛤肉罐头加工工艺优化及产品品质与特征风味分析

杨欣然^{1,2}, 叶培洁¹, 郑凤杰¹, 林 杰², 陈慧斌^{1,2,3}

(1. 福建师范大学生命科学学院, 福州 350117; 2. 蛤老大(福建)食品有限公司, 莆田 351100;
3. 福建师范大学南方海洋研究中心, 福州 350117)

摘要: 以菲律宾蛤仔为原料制作蛤肉罐头产品, 探究黄豆酱添加量、白芝麻添加量和食醋添加量对蛤肉罐头感官品质的影响。通过质构特性、色差及感官评价确定最佳干燥温度。在单因素实验的基础上, 采用响应面实验对蛤肉罐头工艺参数进行优化, 并利用正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)方法, 分析最佳加工工艺条件下挥发性化合物的差异特征及测定游离氨基酸含量。结果表明: 当干燥温度为 70 ℃ 时, 蛤肉硬度 $(2110.59 \pm 76.02) \text{ N}$ 适中, 弹性 $(0.92 \pm 0.05) \text{ mm}$ 和咀嚼性 $(1390.89 \pm 52.21) \text{ J}$ 较好, 具有良好的适口性; 蛤肉罐头最佳加工工艺参数(CMS-2)为黄豆酱添加量 28.34%、白芝麻添加量 3.37%、食醋添加量 8.21%, 其感官评分为 (89.53 ± 0.86) 分; 与工艺优化后感官评分最低组(CMS-1)相比, CMS-2 促进风味的关键挥发性化合物如酸类、酯类、杂环含氮化合物等累计变量重要性投影(VIP)和含量显著增加($P < 0.05$), 游离氨基酸总含量 $(29.53 \pm 0.10) \text{ mg/g}$ 增加, 鲜味氨基酸(谷氨酸)对整体风味贡献最大, 滋味活性值(TAV)达到 37.62。该研究可为菲律宾蛤仔等贝类在食品领域的开发与利用提供参考。

关键词: 蛤肉罐头; 工艺优化; 挥发性化合物; 游离氨基酸

中图分类号: TS254.4

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2025)04-0023-10

Optimization of Processing Technology for Canned Clam Meat and Analysis of Product Quality and Characteristic Flavor

YANG Xinran^{1,2}, YE Peijie¹, ZHENG Fengjie¹, LIN Jie², CHEN Huibin^{1,2,3}

(1. College of Life Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China;

2. Ge Laoda (Fujian) Food Co., Ltd., Putian 351100, China;

3. Southern Institute of Oceanography, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China)

Abstract: A product of canned clam meat was made from *Ruditapes philippinarum* as raw materials in our current study. The effects of the addition of amounts of soybean paste contents, white sesame seeds contents, and vinegar contents on the qualities of canned clam meat were investigated. The optimal drying temperature was determined by texture property, color difference, and sensory evaluation. On the basis of the single factor experiment, response surface experiment was conducted to optimize the technology parameters of the canned clam meat. The different characteristics of volatile compounds were analyzed using the orthogonal partial least squares-discriminant analysis (OPLS-DA) model and the free amino acid contents were determined in the canned clam meat with optimal processing. The results showed that when the drying temperature was 70 ℃, the hardness of the clam meat $(2110.59 \pm 76.02) \text{ N}$ was moderate, the optimal springiness $(0.92 \pm 0.05) \text{ mm}$ and chewiness $(1390.89 \pm 52.21) \text{ J}$ were good, presenting excellent palatability. The optimal parameters of the canned clam meat (CMS-2) were soybean paste contents of 28.34%, white sesame seeds contents of 3.37%, and vinegar contents of 8.21% with a sensory score of 89.53 ± 0.86 . Compared with the lowest sensory score after processing optimization (CMS-1), in CMS-2, the cumulative variable importance in projection (VIP) value and content of key volatile compounds that promote flavors such as acids, esters, and heterocyclic nitrogen-containing compounds, increased significantly ($P < 0.05$). The total free amino acid content $(29.53 \pm 0.10) \text{ mg/g}$ increased, and the umami amino acid glutamate contributed the most to the

收稿日期: 2024-10-12; 修回日期: 2024-11-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(31401564); 福建省科技计划区域发展项目(2022N3003)

作者简介: 杨欣然(1999—), 女, 福建人, 硕士研究生; 通信作者: 陈慧斌, 研究员, chuibin@fjnu.edu.cn

overall flavors, with a taste activity value (TAV) of 37.62. This study can provide references for the development and utilization of *Ruditapes philippinarum* and other shellfish in the food field.

Key words: canned clam meat; process optimization; volatile flavor substances; free amino acid

引文格式:

杨欣然, 叶培洁, 郑凤杰, 等. 蛤肉罐头加工工艺优化及产品品质与特征风味分析[J]. 天津科技大学学报, 2025, 40(4): 23–32.

YANG X R, YE P J, ZHENG F J, et al. Optimization of processing technology for canned clam meat and analysis of product quality and characteristic flavor[J]. Journal of Tianjin university of science and technology, 2025, 40(4): 23–32.

菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*), 俗称花蛤、蛤喇、蚬子等, 在太平洋、大西洋及印度洋沿岸均有分布^[1], 其味道鲜美, 富含优质蛋白^[2]; 软体部氨基酸总量较高, 且种类丰富, 富含多种矿物质和微量元素^[3]; 脂肪含量少且饱和脂肪酸含量高, 适合人体消化吸收^[4]。此外, 菲律宾蛤仔中含有牛磺酸及代尔太 7-胆固醇和 24-亚甲基胆固醇, 对预防心血管疾病和高血压、保护肝脏健康具有积极作用^[5-6]。菲律宾蛤仔因其营养高而备受人们喜爱, 具有广泛的市场需求。

菲律宾蛤仔繁殖周期短、生长速度快、适应性强、食物来源广、投资要求低, 近年来已成为我国养殖量最大的海产经济贝类之一^[7]。我国菲律宾蛤仔生长季节为 6—10 月, 生长于沿海地带, 北至辽宁、山东, 南至广东、福建各海域^[8-9]。由于其生长周期具有明显的季节性和地域性, 且长途运输成本较高, 大多都以生鲜品销售为主并集中于沿海地区。随着人民生活水平的提高, 市场逐渐出现菲律宾蛤仔的加工制品, 如即食产品、干制品和罐头产品等^[10]。目前, 由于蛤仔等贝类加工技术的创新研究较少, 企业缺乏多样性的加工制品, 从而极大程度地限制了销售范围和消费群体^[11]。

本文以菲律宾蛤仔为研究对象, 通过质构特性、色差及感官评价确定最佳干燥温度, 在单因素实验的基础上, 进一步以感官品质为指标对蛤肉罐头加工工艺进行响应面实验优化, 利用正交偏最小二乘分析(OPLS-DA)方法分析优化后蛤肉罐头的挥发性化合物, 筛选出其关键挥发性化合物, 并测定其游离氨基酸成分, 为菲律宾蛤仔等海洋贝类资源在休闲食品领域的深入开发与利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 实验原料

菲律宾蛤仔, 蛤老大(福建)食品有限公司提供;

辅料黄豆酱、食用盐、白砂糖、白芝麻、食醋、香辛料、食用油等均为市售优质等级产品。

1.1.2 试剂

氯化钠、色谱级乙腈、色谱级甲醇, 国药集团化学试剂有限公司; 环己酮(纯度 $\geq 99.5\%$)、无水乙酸钠, 西陇科学股份有限公司; 磺基水杨酸, 北京索莱宝科技有限公司; 6-氨基喹啉-N-羧基琥珀酰亚胺氨基甲酸酯(纯度 $\geq 90\%$), 加拿大 Toronto Research Chemicals 公司。

1.1.3 主要仪器与设备

NS810 型分光测色仪, 深圳市三恩时科技有限公司; TA-XT plus C 型质构仪, 英国 Stable Micro Systems 公司; 7890B/5977B 型气相色谱-质谱联用仪, 美国安捷伦科技有限公司; DHG-9070A 型电热鼓风干燥箱, 上海一恒科学仪器有限公司; e2695 型高效液相色谱仪, 沃特世科技(上海)有限公司; MJ-78A 型高压灭菌锅, 施都凯仪器设备(上海)有限公司。

1.2 蛤肉罐头制作工艺

1.2.1 工艺流程

蛤肉罐头制作工艺参照 Li 等^[12]的方法并稍作修改。新鲜菲律宾蛤仔经过预处理、蒸煮液调味后, 将蛤肉腌渍入味、干燥、复配调味, 进行装罐和灭菌, 制得蛤肉罐头。工艺流程如图 1 所示。

1.2.2 操作要点

(1) 原料预处理

选择形态完整、大小合适的新鲜菲律宾蛤仔在 5% 盐水中净化吐沙 6 h, 吐沙后清洗沥干, 蒸煮 5 min 后开口取肉, 预留蒸煮液。

(2) 蒸煮液调味

蒸煮液加入适量的食盐、味精、料酒进行调味。

(3) 腌渍入味

将蛤肉放入调味液中煮沸 5 min, 静置 45 min, 入味着色。

(4) 干燥脱水

取出静置后的蛤肉沥干, 平铺于烘干盘上, 放入

干燥箱,直至蛤肉保持 $(45 \pm 2)\%$ 的水分含量。

(5) 搅拌混匀

将玉米油加热至 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$,放入蒜泥和辣椒煸炒 30 s,温度调至 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$,加入蛤肉、黄豆酱、食盐、食醋、白砂糖、酱油、白芝麻及胡椒粉等适量香辛料煸炒约 1 min 后出锅,加工完成。

(6) 装罐、灭菌

空罐提前用水煮沸消毒并沥干。将加工后的蛤肉装入罐中并预留 2 cm 左右的顶隙,初步加热排出罐内的空气,然后旋紧罐盖,置于高压灭菌锅, $121\text{ }^{\circ}\text{C}$ 灭菌 15 min。灭菌完毕后进行冷却,形成最终产品。

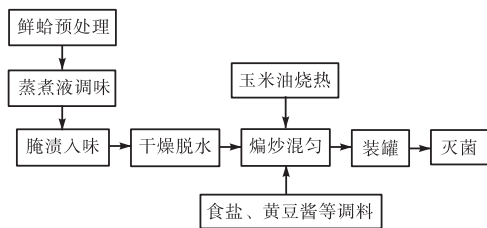


图 1 蛤肉罐头生产工艺流程图

Fig. 1 Production process flow chart of canned clam meat

1.3 蛤肉罐头实验设计

1.3.1 干燥工艺优化

蛤肉经腌渍入味后分别在 50 、 60 、 70 、 80 、 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 干燥,直至蛤肉水分含量为 $(45 \pm 2)\%$,灭菌,冷却后进行全质构(TPA)测定、色差测定以及感官评价,确定最佳干燥温度。

1.3.2 单因素实验设计

以 500 g 蛤肉为基准,在工艺步骤相同的前提下,固定添加 1.5% 食盐、4% 白砂糖、2% 料酒、0.1% 生姜粉、2% 蒜泥、1% 辣椒、0.05% 胡椒粉和 0.05% 其他香辛料,控制黄豆酱添加量 25%、白芝麻添加量 3% 和食醋添加量 8%,研究黄豆酱添加量(15%、20%、25%、30%、35%)、白芝麻添加量(1%、2%、3%、4%、5%)、食醋添加量(6%、7%、8%、9%、10%)对蛤肉罐头感官品质的影响。

1.3.3 响应面实验设计

通过单因素实验可知,黄豆酱添加量、白芝麻添加量和食醋添加量对蛤肉罐头的色泽、气味、滋味和组织形态影响显著。在此基础上,采用 Design-Expert 13.0 软件,依据 Box-Behnken 模型原理,选取黄豆酱添加量、白芝麻添加量和食醋添加量 3 个因素进行响应面实验,以感官评价为响应值,拟合得到二次多项回归方程,并对该方程进行回归模型方差分析,最终确定蛤肉罐头最佳加工工艺参数。响应面优化因素

与水平设计见表 1。

表 1 响应面优化因素与水平设计

Tab. 1 Response surface optimization factors and horizontal design

水平	因素		
	黄豆酱添加量(A)/%	白芝麻添加量(B)/%	食醋添加量(C)/%
-1	20	2	6
0	25	3	8
1	30	4	10

1.4 产品指标测定

1.4.1 感官评价

参照 GB/T 37062—2018《水产品感官评价指南》,制定蛤肉罐头感官评价标准表。感官评价小组由 10 名经过感官评价培训的人员组成(5 名男性,5 名女性),分别从色泽、气味、滋味和组织状态 4 个方面进行感官评价。

1.4.2 水分含量

按照 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中的直接干燥法进行测定。

1.4.3 色差

参考刘永杰等^[13]的方法,使用分光测色仪进行测定,每份样品测定 3 次并记录数值。其中: L^* 表示亮度; a^* 表示红绿度,正值表示偏红,负值表示偏绿; b^* 表示黄蓝度,正值表示偏黄,负值表示偏蓝。

1.4.4 质构特性

参考林靖莹等^[14]的方法并略作修改。采用 P/36R 型圆柱形探头测定,探头的下降、测试和返回速度分别为 2 mm/s 、 1 mm/s 和 2 mm/s ,压缩比为 50%,触发力为 5.0 g ,测量时间为 5.00 s 。平行测定 5 个样品,结果取平均值。

1.4.5 气相色谱-质谱(GC-MS)测定

固相微萃取:参考杨欣然等^[15]的方法并略作修改。将 2.5 g 搅碎后的样品置于顶空瓶中,加入 $100\text{ }\mu\text{L}$ 环己酮内标溶液($9.47 \times 10^{-4}\text{ }\mu\text{g}/\mu\text{L}$)与 2.5 mL 饱和氯化钠溶液,置于 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、300 r/min 磁力搅拌器中平衡 10 min,将萃取头(50/30 μm DVB/CAR/PDMS)插入顶空瓶中,萃取 30 min, $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ 解析 5 min。

气相色谱(GC)条件:HP-INNOWax Polyethylene Glycol 色谱柱($60\text{ m} \times 0.25\text{ mm} \times 0.25\text{ }\mu\text{m}$),以流量为 1 mL/min 的氦气(纯度 $>99\%$)作为载气,进样口温度 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$,检测器温度 $230\text{ }^{\circ}\text{C}$,解析 7 min,不分流模式。

柱温箱升温程序: $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保持 6 min, $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升

温至 230 ℃, 保持 10 min。

质谱(MS)条件: 电子轰击离子源(EI), 电子能量为 70 eV, 发射电流为 100 μA; 扫描范围(*m/z*)为 35 ~ 550。

定性定量方法: 每组 3 个平行, 通过计算机谱库(NEST17)检索风味化合物, 选取匹配度高于 80% 的化合物。计算公式如式(1)所示。

$$C_x = \frac{\rho_0 \times V_0 \times S_x}{S_0 \times m} \quad (1)$$

式中: C_x 为未知风味化合物含量, μg/kg; ρ_0 为环己酮内标质量浓度, μg/μL; V_0 为环己酮内标的进样体积, μL; S_x 为未知风味化合物的峰面积; S_0 为添加的环己酮内标的峰面积; m 为样品质量, kg。

1.4.6 游离氨基酸的测定

参考 Lestari 等^[16]的方法并略作修改。取 2 g 搅碎的样品, 加入 10 mL 6% 磺基水杨酸溶液与 10 mL 0.1 mol/L HCl 溶液, 涡旋混匀, 超声 30 min, 去离子水稀释后, 用 0.22 μm 膜过滤。滤液用 6-氨基喹啉-N-羧基琥珀酰亚胺氨基甲酸酯衍生。采用 AccQ-Tag Ultra C-18 柱(3.9 mm × 150 mm)进行色谱分离; 流动相 A 为超纯水, 流动相 B 为乙酸钠溶液, 流动相 C 为乙腈; 温度设定为 36 ℃, PDA 紫外检测器的检测波长为 254 nm, 流量为 0.98 mL/min。

1.5 数据处理

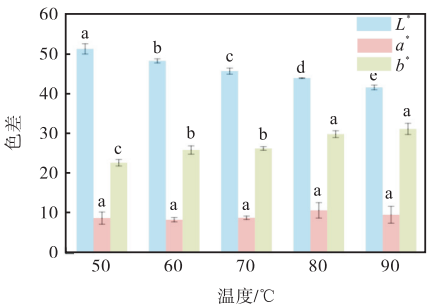
利用 Design-Expert 13.0 软件进行响应面实验; 采用 Origin 2024 软件绘图以及 SPSS 27 进行数据统计分析; 运用 SIMCA 14.1 软件进行 OPLS-DA, 计算变量重要性投影(variable importance in projection, VIP)值, 结合 SPSS 27 进行独立样本 *t* 检验, 蛤肉罐头挥发性化合物成分筛选条件为 VIP > 1 且 *P* < 0.05。图表中不同小写字母表示组间具有显著差异(*P* < 0.05)。

2 结果与讨论

2.1 干燥温度的确定

菲律宾蛤仔水分含量高, 易导致口感软烂, 嚼劲不足, 而适宜的干燥温度不仅赋予产品色泽, 还可以均匀降低蛤肉的水分含量, 保持其良好的质构特性。不同干燥温度下菲律宾蛤仔色泽变化如图 2 所示。由图 2 可知, 蛤肉的 L^* 随着温度的升高而显著降低(*P* < 0.05), 而 a^* 随温度变化不明显(*P* > 0.05)。不同干燥温度下菲律宾蛤仔质构特性及感官评价见表 2。

随着温度的升高, 蛤肉的硬度、弹性、咀嚼性均呈现先升高后降低的趋势。当温度从 50 ℃ 升高到 60 ℃ 时, 水分蒸发速度快, 导致蛤肉组织的收缩和硬化。当温度大于 60 ℃ 时, 蛤肉硬度下降, 可能是温度过高, 导致蛤肉表面快速硬化, 形成硬壳致使内部水分蒸发不均匀^[13]; 也可能是蛤肉中蛋白质分子间结构变化而导致硬度下降^[17]。当干燥温度为 70 ℃ 时, 蛤肉色泽良好, 硬度适中〔(2 110.59 ± 76.02) N〕, 弹性〔(0.92 ± 0.05) mm〕和咀嚼性〔(1 390.89 ± 52.21) J〕较好, 同时感官评价得分〔(86.30 ± 0.82) 分〕最高, 具有良好的适口性。综合考虑, 选择 70 ℃ 作为最佳干燥温度。



注: 不同小写字母表示组间具有显著差异(*P* < 0.05)。

图 2 不同干燥温度下菲律宾蛤仔色泽变化

Fig. 2 Color changes of *Ruditapes philippinarum* at different drying temperatures

表 2 不同干燥温度下菲律宾蛤仔质构特性及感官评价

Tab. 2 Texture property of *Ruditapes philippinarum* and sensory evaluation at different drying temperatures

温度/℃	质构特性			感官评价/分
	硬度/N	弹性/mm	咀嚼性/J	
50	1 211.55 ± 45.49 ^d	0.76 ± 0.02 ^b	820.02 ± 41.18 ^c	82.7 ± 0.82 ^c
60	2 231.98 ± 13.72 ^a	0.80 ± 0.02 ^{ab}	1 219.76 ± 10.99 ^b	85.5 ± 0.71 ^b
70	2 110.59 ± 76.02 ^a	0.92 ± 0.05 ^a	1 390.89 ± 52.21 ^a	86.3 ± 0.82 ^a
80	1 961.28 ± 35.18 ^b	0.88 ± 0.05 ^{ab}	1 261.51 ± 52.03 ^b	84.4 ± 0.70 ^c
90	1 581.51 ± 53.60 ^c	0.81 ± 0.04 ^{ab}	901.22 ± 75.01 ^c	83.5 ± 0.85 ^d

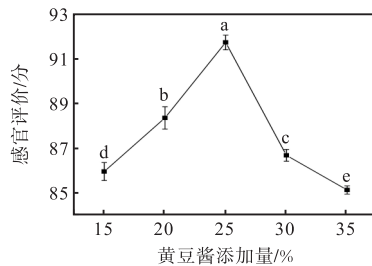
注: 不同上标小写字母表示组间具有显著差异(*P* < 0.05)。

2.2 单因素实验结果

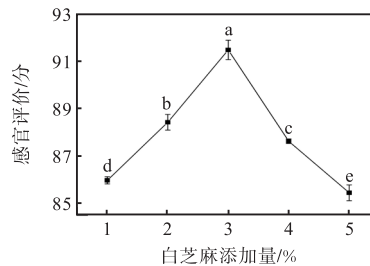
不同因素对蛤肉罐头感官评价的影响如图 3 所示。由图 3(a) 可知, 随着黄豆酱添加量的增加, 蛤肉罐头感官评价得分呈现先升高后降低的趋势。当黄豆酱添加量为 25% 时, 感官评价得分达到最高, 这是因为适量的黄豆酱可以使蛤肉罐头的口感更加细腻丰富; 而当黄豆酱添加量为 30% 或更高时, 感官评价得分呈下降趋势, 此时黄豆酱添加过多, 导致酱体过于浓稠, 口感变得厚重, 掩盖了蛤肉本身的鲜美。因

此, 优化后黄豆酱添加量为 25%。

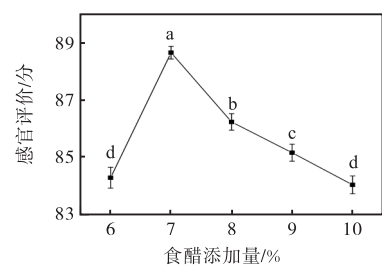
在加热条件下, 白芝麻可以与蛤肉罐头中的还原糖和氨基酸等成分发生美拉德反应, 生成一系列具有浓郁香气的化合物, 从而提升蛤肉罐头的风味^[18]。由图 3(b)可知, 随着白芝麻添加量的增加, 蛤肉罐头感官评价得分呈现先升高后降低的趋势。当白芝麻添加量为 3%时, 蛤肉罐头的风味和口感达到最佳, 感官评价得分最高; 而当白芝麻添加量为 4%或更高时, 蛤肉罐头口感浓稠, 产生腻感, 感官评价得分呈下降趋势。因此, 优化后白芝麻添加量为 3%。



(a) 黄豆酱添加量



(b) 白芝麻添加量



(c) 食醋添加量

注:不同小写字母表示组间具有显著差异($P<0.05$)。

图 3 不同因素对蛤肉罐头感官评价的影响

Fig. 3 Effects of different factors on the sensory evaluation of canned clam meat

2.3 响应面实验分析

2.3.1 响应面实验结果及方差分析

选取黄豆酱添加量(A)、白芝麻添加量(B)、食醋添加量(C) 3 个因素进行响应面实验优化, 结果见表 3 和表 4。

表 3 响应面实验设计及结果

Tab. 3 Experimental design and results of response surface methodology

实验号	黄豆酱添加量(A)/%	白芝麻添加量(B)/%	食醋添加量(C)/%	感官评价/分
1	25	2	10	84.4
2	20	2	8	81.0
3	25	3	8	89.6
4	20	4	8	85.1
5	30	3	10	89.2
6	25	3	8	89.5
7	20	3	10	84.1
8	30	2	8	85.7
9	25	4	6	86.7
10	25	3	8	88.3
11	25	2	6	84.1
12	20	3	6	82.2
13	25	4	10	86.8
14	30	3	6	87.2
15	25	3	8	87.3
16	30	4	8	88.8
17	25	3	8	88.4

由图 3(c)可知, 随着食醋添加量的增加, 蛤肉罐头感官评价得分呈现先升高后降低的趋势, 当食醋添加量为 7%时, 感官评价得分达到最高, 原因是适量的食醋能够提升蛤肉罐头的整体风味和口感; 而当食醋添加量为 8%或更高时, 感官评价得分呈下降趋势, 过多食醋使蛤肉罐头的酸味突出, 掩盖其他风味成分, 导致整体风味失衡。因此, 食醋添加量为 7%能够使蛤肉罐头的酸、香、鲜等风味相互协调, 达到最佳的感官效果。

对表 3 数据进行多元回归拟合, 得到感官评价得分(Y)对黄豆酱添加量(A)、白芝麻添加量(B)和食醋添加量(C)的二次多项回归方程式为 $Y = 88.64 + 2.31A + 1.53B + 0.5375C - 0.25AB + 0.025AC - 0.05BC - 1.66A^2 - 1.83B^2 - 1.31C^2$ 。

表 4 响应面回归模型方差分析

Tab. 4 Variance analysis of response surface regression

来源	平方和	自由度	均方	F	P	显著性
模型	100.64	9	11.18	12.37	0.001 6	**
A	42.78	1	42.78	47.31	0.000 2	**
B	18.61	1	18.61	20.58	0.002 7	**
C	2.31	1	2.31	2.56	0.153 9	
AB	0.25	1	0.25	0.28	0.615 3	
AC	0.003	1	0.003	0.003	0.959 5	
BC	0.01	1	0.01	0.01	0.919 2	
A^2	11.57	1	11.57	12.79	0.009 0	**
B^2	14.14	1	14.14	15.64	0.005 5	**
C^2	7.20	1	7.20	7.96	0.025 7	*
残差	6.33	7	0.90			
失拟项	2.50	3	0.83	0.87	0.527 1	
纯误差	3.83	4	0.96			
总值	106.96	16				

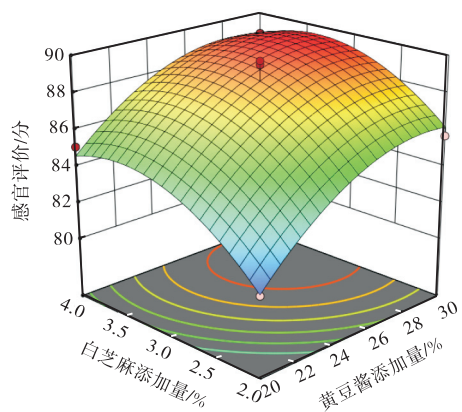
注: *表示显著($P<0.05$), **表示极显著($P<0.01$)。

由表 4 可知, 模型 $P<0.01$, 表明该模型差异影响极显著, 模型有意义。失拟项 $P=0.527 1>0.05$ 不显著, 表明该回归拟合度高^[19]。通过 F 值可知, 3 个

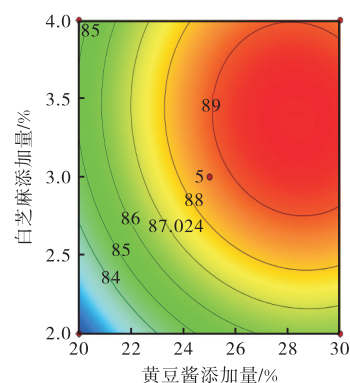
因素对蛤肉罐头感官评价得分的影响程度依次为 $A > B > C$ 。

不同因素之间交互作用对蛤肉罐头感官评价得分的响应面图和等高线图如图4所示。由图4可知, 黄豆酱添加量与白芝麻添加量(AB)、黄豆酱添加量与食醋添加量(AC)、白芝麻添加量与食醋添加量(BC)交互作用响应面图开口向下, 均存在极大值。当等高线图为椭圆形时, 表示两个自变量之间存在显著

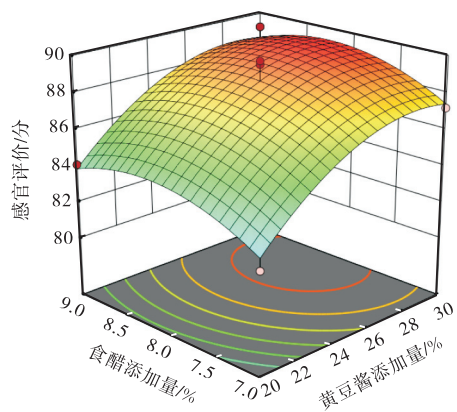
的交互作用; 当等高线图为圆形时, 表示两个自变量之间的交互作用不显著^[20]。等高线图表明, AB 、 AC 、 BC 的曲线斜率小, 等高线图接近圆形, 这说明 AB 、 AC 和 BC 的交互作用不显著($P > 0.05$), 这与回归模拟实验结果(表4)一致。因此, 响应面实验优化蛤肉罐头加工工艺最佳参数为黄豆酱添加量 28.34%、白芝麻添加量 3.37%、食醋添加量 8.21%, 感官评价得分 89.75 分。



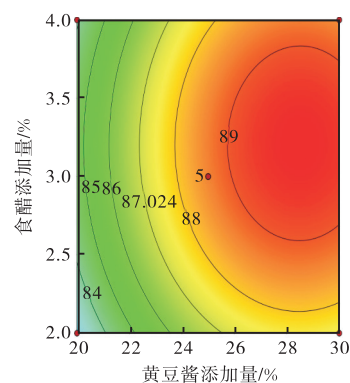
(a) 黄豆酱添加量与白芝麻添加量的响应面图



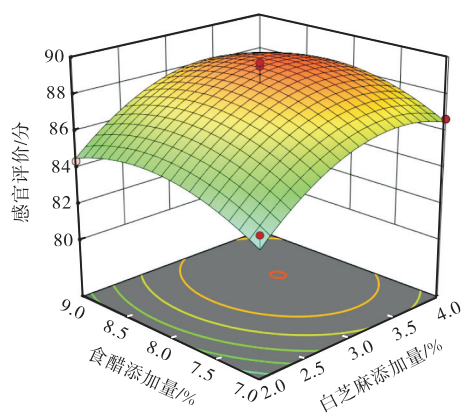
(b) 黄豆酱添加量与白芝麻添加量的等高线图



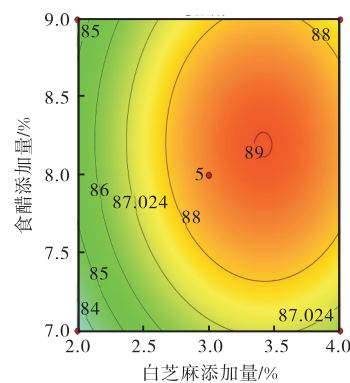
(c) 黄豆酱添加量与食醋添加量的响应面图



(d) 黄豆酱添加量与食醋添加量的等高线图



(e) 白芝麻添加量与食醋添加量的响应面图



(f) 白芝麻添加量与食醋添加量的等高线图

图4 不同因素之间交互作用对蛤肉罐头感官评价得分的响应面图和等高线图

Fig. 4 Response surface plots and contour plots of interaction effects between different factors on the sensory scores of canned clam meat

以表 3 中蛤肉罐头工艺优化后感官评分最低组 (CMS-1) 即黄豆酱添加量 20%、白芝麻添加量 2%、食醋添加量 8% 的蛤肉罐头为实验对照进行后续分析。

2.3.2 验证实验

在最优条件下进行验证实验, 制得的蛤肉罐头感官评价得分为 (89.53 ± 0.86) 分, 与模型预测值基本一致, 说明该实验的拟合性能好, 有较好的分析预测能力。

2.4 蛤肉罐头挥发性化合物 OPLS-DA 分析

采用 OPLS-DA 模型分析蒸煮开壳后的蛤肉 (CK)、蛤肉罐头工艺优化后感官评分最低组 (CMS-1) 和蛤肉罐头最佳加工工艺参数 (CMS-2) 的挥发性化合物之间的差异特征, 结果见表 5 和图 5。由表 5 可知, 该模型自变量拟合指数 $R^2(X)$ 为 0.975, 因变量拟合指数 $R^2(Y)$ 为 0.995, 模型预测指数 (Q^2) 为 0.982, R^2 和 Q^2 均超过 0.5, 表示模型稳定可靠、预测能力强^[21]。由图 5 可知, 3 组样本在 OPLS-DA 的分散点图聚类良好, 各样本组内差异小, 不同样本之间实现完全分离。图 6 为置换检验图, 经过 200 次置换检验, R^2 为 0.932, 其截距为 0.038, Q^2 为 0.992, 其截距为 -1.05, 表明该模型不存在过拟合现象^[21]。因此, OPLS-DA 模型可用于蛤肉罐头挥发性化合物成分的鉴别分析。

VIP 值为 OPLS-DA 模型关键变量分析 (表 6), 当 VIP 值 >1 时, 该成分能表达模型中的差异特征, VIP 值越大, 表示该成分对变量的解释贡献度越大, 与工艺差异的相关性越高。表 6 为 OPLS-DA 模型中 VIP 值 >1 的 33 种关键挥发性化合物, 其中醇类 2 种、酸类 5 种、烃类 3 种、酮类 5 种、酯类 5 种、醛类 2 种、其他类 11 种。由表 6 可知, CMS-2 中酸类、酯类和杂环含氮化合物 (吡嗪和呋喃类) 累计 VIP 值和含量均高于 CK 和 CMS-1, 表明这 3 类关键挥发性化合物对 CMS-2 的整体风味贡献大, 相关性也高。酸类化合物是由食醋添加以及热反应而产生, 其对 CMS-2 影响程度较大。黄豆酱中酯类物质被氧化后产生的醛类物质能够促进酱香味散发^[22]。苯乙酸乙酯、乙酸苯乙酯等酯类物质主要存在于食醋中, 促进蛤肉罐头的甜味和花果香气的产生^[23]。杂环含氮化合物是熟食制品风味的重要贡献者, 吡嗪和呋喃类物质均与美拉德反应有关^[24-25], 可能来源于黄豆酱或干燥过程中蛤肉发生的美拉德反应。由此可知, 由于黄豆酱和食醋添加量的增加, 促进了酸类、酯类、杂环含氮化合物的产生, 提高了 CMS-2 的整体风味。

醛类化合物与水产品的哈喇味、土腥味密切相关, 并具有较强的叠加效应^[26]。其中, (E, E)-2, 4-庚二烯醛对 CK 和 CMS-1 的整体风味影响较大, 且含量显著高于 CMS-2 ($P < 0.05$), 表明 CMS-2 可以达到遮腥提香效果。酮类化合物一般是多不饱和脂肪酸受热氧化降解和微生物氧化作用的产物, 会对腥味具有一定的增强作用^[27], 尤其是 β -紫罗酮、2-壬酮和 2-环己烯-1-酮对样品的风味贡献大, 而 CMS-2 的含量显著低于 CMS-1 ($P < 0.05$)。

综上所述, CMS-2 中与腥味相关的挥发性化合物 (如醛类、酮类) 的含量显著降低 ($P < 0.05$), 而大多数促进风味的关键挥发性化合物 (如酯类、酸类、吡嗪和呋喃类化合物) 的累计 VIP 值和含量均显著增加 ($P < 0.05$), 表明最佳加工工艺参数对蛤肉罐头的风味品质具有提升作用。

表 5 OPLS-DA 模型统计结果

Tab. 5 OPLS-DA model performance statistics

预测主成分数	正交主成分数	自变量拟合指数 $R^2(X)$	因变量拟合指数 $R^2(Y)$	模型预测指数 Q^2
2	1	0.975	0.995	0.982

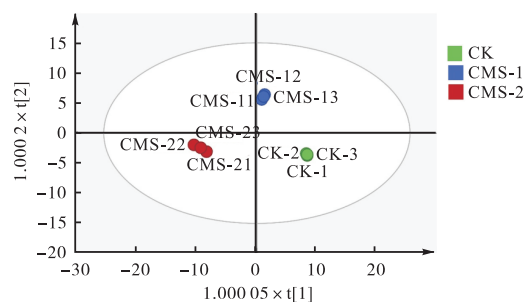


图 5 不同加工工艺蛤肉罐头挥发性化合物成分的 OPLS-DA 分析

Fig. 5 OPLS-DA analysis of volatile compounds in canned clam meat with different processing techniques

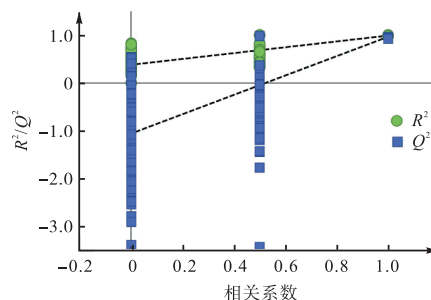


图 6 不同加工工艺蛤肉罐头的 OPLS-DA 模型置换检验

Fig. 6 OPLS-DA model permutation test in canned clam meat with different processing techniques

表6 CK、CMS-1和CMS-2挥发性化合物的VIP值和含量
Tab.6 VIP values and contents of volatile compounds in CK, CMS-1 and CMS-2

类别	化合物名称	VIP 值	含量/(μg/kg)		
			CK	CMS-1	CMS-2
醇类	1-戊醇	1.25	—	4.85 ± 0.00 ^a	1.37 ± 0.21 ^a
	正己醇	1.09	2.52 ± 0.00 ^a	3.63 ± 0.49 ^a	—
酸类	乙酸	1.08	—	3.33 ± 0.30 ^a	2.85 ± 0.44 ^a
	辛酸	1.08	—	1.74 ± 0.32 ^a	1.58 ± 0.49 ^a
	己酸	1.00	—	—	1.32 ± 1.86
	异辛酸	1.00	—	—	2.32 ± 3.28
	壬酸	1.00	—	—	1.46 ± 2.07
烃类	苡烯	1.05	1.3 ± 0.35 ^a	1.54 ± 0.28 ^a	—
	环辛二烯	1.06	—	13.44 ± 2.21 ^a	11.68 ± 6.55 ^a
	正十七烷	1.19	—	2.72 ± 0.25 ^a	1.42 ± 0.74 ^a
酮类	β-紫罗酮	1.21	2.28 ± 0.99 ^b	8.74 ± 1.58 ^a	—
	2-壬酮	1.04	17.69 ± 0.96 ^b	22.93 ± 6.18 ^a	14.96 ± 2.39 ^b
	2-环己烯-1-酮	1.16	—	2.81 ± 0.09 ^a	0.94 ± 1.33 ^b
	5-甲氧基-1-萘酮	1.00	—	—	3.77 ± 5.32
	3,5-辛二烯-2-酮	1.00	—	—	5.24 ± 0.08
酯类	苯甲酸乙酯	1.14	—	7.65 ± 0.36 ^a	5.42 ± 2.22 ^a
	苯乙酸乙酯	1.06	—	4.30 ± 0.37 ^a	3.92 ± 1.84 ^a
	乙酸苯乙酯	1.02	—	3.08 ± 0.12 ^a	3.19 ± 1.57 ^a
	十六酸乙酯	1.01	—	28.96 ± 0.36 ^a	35.72 ± 6.63 ^b
	十四酸乙酯	1.01	—	—	3.98 ± 0.00
醛类	可卡醛	1.02	—	2.05 ± 0.11 ^a	2.17 ± 0.97 ^a
	(E,E)-2,4-庚二烯醛	1.08	23.72 ± 3.76 ^a	3.68 ± 1.48 ^b	—
其他类	(E)-2-(2-戊烯基)呋喃	1.00	—	—	31.64 ± 0.45
	2-庚基呋喃	1.00	—	—	2.99 ± 0.00
	2-乙酰基呋喃	1.24	—	3.90 ± 0.33 ^a	0.67 ± 0.95 ^b
	2,6-二甲基吡嗪	1.05	—	4.46 ± 0.88 ^a	4.31 ± 1.07 ^a
	2,5-二甲基吡嗪	1.04	—	11.67 ± 2.82 ^a	11.31 ± 3.63 ^a
	2-乙基-6-甲基吡嗪	1.24	—	3.20 ± 0.36 ^a	1.15 ± 0.31 ^b
	3,4-二氢-2H-吡喃	1.25	—	5.25 ± 1.15	—
	油酸酰胺	1.23	—	3.19 ± 0.42 ^a	0.43 ± 0.6 ^b
	愈创木酚	1.03	—	3.04 ± 0.35 ^a	2.95 ± 1.47 ^a
	3-乙基苯酚	1.00	—	—	2.84 ± 4.01
	邻甲酚	1.06	—	4.14 ± 1.45 ^a	1.70 ± 2.41 ^b

注:统计VIP值>1的关键性挥发化合物,—表示未检测出挥发性化合物,不同上标小写字母表示组间具有显著差异(P<0.05)。

2.5 游离氨基酸含量分析

游离氨基酸含量及滋味活性值(TAV)见表7。CK、CMS-1和CMS-2的游离氨基酸总含量分别为(16.38 ± 0.01) mg/g、(26.74 ± 0.10) mg/g、(29.53 ± 0.10) mg/g,CK检测出15种氨基酸,而CMS-1和CMS-2检测出17种。滋味活性值(TAV)是游离氨基酸含量与其阈值的比值。TAV>1表明该氨基酸对整体滋味具有重要影响,值越大,则贡献越大。CMS-2中鲜味氨基酸谷氨酸(Glu)和天冬氨酸(Asp)的TAV均高于CK和GMS-1,说明黄豆酱添加量的增加有助于鲜味的显著提高^[23]。CK中甜味氨基酸甘氨酸

(Gly)和丙氨酸(Ala)滋味贡献较大,经过加工后,甜味贡献大的氨基酸变为Gly和Lys,表明黄豆酱和白芝麻的添加可提高赖氨酸(Lys)的甜味贡献。CK和CMS-1中贡献较大的苦味氨基酸是精氨酸(Arg)和组氨酸(His),而CMS-2中苦味贡献较大的氨基酸为Arg、His、缬氨酸(Val)和异亮氨酸(Ile)。与CMS-1相比,CMS-2中苦味氨基酸Arg和His的TAV下降为9.15和3.34,而Val和Ile的TAV均显著上升,其原因可能是黄豆酱和食醋的增加均会导致苦味氨基酸滋味的增加^[23, 28]。但是,CMS-2中苦味氨基酸TAV的增加并未影响其整体滋味,可能是由于鲜甜味增

强,平衡了苦味。因此,鲜味氨基酸是蛤肉罐头的主要滋味成分。

表 7 游离氨基酸含量及滋味活性值 (TAV)

Tab. 7 Free amino acid contents and taste activity value (TAV)

类别	名称	阈值/ (mg/100 g)	CK		CMS-1		CMS-2	
			游离氨基酸含量/ (mg/100 g)	TAV	游离氨基酸含量/ (mg/100 g)	TAV	游离氨基酸含量/ (mg/100g)	TAV
鲜味氨基酸	天冬氨酸 (Asp)	100	34.90 ± 0.00 ^c	0.35	112.65 ± 1.20 ^b	1.13	133.60 ± 1.84 ^a	1.34
	谷氨酸 (Glu)	30	112.20 ± 0.42 ^c	3.74	972.85 ± 0.07 ^b	32.43	1 128.65 ± 3.89 ^a	37.62
甜味氨基酸	丝氨酸 (Ser)	150	16.30 ± 0.14 ^b	0.11	107.00 ± 2.69 ^a	0.71	117.20 ± 0.42 ^a	0.78
	甘氨酸 (Gly)	130	392.60 ± 0.57 ^a	3.02	254.10 ± 0.00 ^b	1.95	266.45 ± 0.92 ^b	2.05
	苏氨酸 (Thr)	260	140.90 ± 0.14 ^a	0.54	95.25 ± 4.31 ^{ab}	0.37	100.80 ± 0.28 ^b	0.39
	丙氨酸 (Ala)	60	81.75 ± 0.21 ^a	2.04	1.15 ± 0.35 ^b	0.02	2.05 ± 0.07 ^b	0.03
	脯氨酸 (Pro)	300	4.50 ± 0.00 ^b	0.02	55.10 ± 4.95 ^a	0.18	86.1 ± 0.00 ^a	0.29
	赖氨酸 (Lys)	50	9.30 ± 0.00 ^b	0.19	87.35 ± 1.34 ^a	1.75	103.90 ± 0.42 ^a	1.85
苦味氨基酸	缬氨酸 (Val)	40	0.93 ± 0.04 ^c	0.02	23.40 ± 8.77 ^b	0.59	118.5 ± 0.71 ^a	2.96
	蛋氨酸 (Met)	30	—	—	17.65 ± 0.64 ^a	0.59	17.95 ± 0.07 ^a	0.60
	苯丙氨酸 (Phe)	90	2.75 ± 0.07 ^b	0.03	86.10 ± 0.28 ^a	0.96	88.25 ± 0.35 ^a	0.98
	异亮氨酸 (Ile)	90	3.20 ± 0.00 ^c	0.04	85.85 ± 0.78 ^b	0.95	92.40 ± 0.28 ^a	1.15
	亮氨酸 (Leu)	190	5.05 ± 0.07 ^c	0.03	140.80 ± 0.00 ^b	0.74	150.85 ± 0.49 ^a	0.79
	组氨酸 (His)	20	22.95 ± 0.07 ^c	1.15	84.05 ± 1.20 ^a	4.20	66.80 ± 0.28 ^b	3.34
	精氨酸 (Arg)	50	806.25 ± 1.2 ^a	16.13	523.25 ± 33.3 ^{ab}	10.47	457.65 ± 0.92 ^b	9.15
	酪氨酸 (Tyr)	91	2.60 ± 0.00 ^b	0.03	22.2 ± 0.00 ^a	0.24	20.40 ± 0.00 ^a	0.22
无味氨基酸	胱氨酸 (Cys)	—	—	—	3.55 ± 3.04 ^a	—	1.30 ± 0.28 ^a	—
合计			1 638.18 ± 1.39 ^b		2 673.8 ± 10.32 ^a		2 952.85 ± 10.11 ^a	

注:—表示未检测出挥发性化合物,不同上标小写字母表示组间具有显著差异 ($P<0.05$)。

3 结 语

本研究以菲律宾蛤仔为原料,探究蛤肉罐头加工品质及特征风味。通过全质构(TPA)、色差及感官评价确定干燥温度为 70℃,且此温度能使蛤肉达到最佳的色泽、硬度〔(2 110.59 ± 76.02) N〕、弹性〔(0.92 ± 0.05) mm〕和咀嚼性〔(1 390.89 ± 52.21) J〕。在单因素实验确定最佳工艺优化范围基础上,采用响应面实验优化蛤肉罐头工艺参数,最佳工艺参数为黄豆酱添加量 28.34%、白芝麻添加量 3.37%、食醋添加量 8.21%。基于 OPLS-DA 模型分析不同加工工艺中蛤肉罐头关键挥发性化合物含量和差异特征,并测定其游离氨基酸含量,结果表明:CMS-2 风味的关键挥发性化合物累计 VIP 值和含量显著增加,尤其是酸类、酯类、杂环含氮化合物 ($P<0.05$);游离氨基酸总含量高达 (29.53 ± 0.10) mg/g,且 Glu 的 TAV 最高 (37.62),对整体风味贡献最大,使产品的鲜味显著提高。本研究可以为开发高品质蛤肉罐头产品提供一定的理论基础和数据支撑。

参考文献:

[1] 许玲. 不同群体菲律宾蛤仔下潜行为和呼吸代谢对比

研究[D]. 大连:大连海洋大学,2022.

[2] ZHANG T,HUA Y,ZHOU C,et al. Umami peptides screened based on peptidomics and virtual screening from *Ruditapes philippinarum* and *Macrta veneriformis* clams[J]. Food chemistry, 2022, 394: 133504.

[3] ZHAO L,MILANO S,TANAKA K,et al. Trace elemental alterations of bivalve shells following transgenerational exposure to ocean acidification:implications for geographical traceability and environmental reconstruction[J]. Science of the total environment, 2020, 705: 135501.

[4] NIE H,LU Z,LI D,et al. The potential roles of fatty acid metabolism-related genes in Manila clam *Ruditapes philippinarum* under cold stress[J]. Aquaculture, 2023, 562: 738750.

[5] SONG Y,CAI Q,WANG S,et al. The ameliorative effect and mechanisms of *Ruditapes philippinarum* bioactive peptides on obesity and hyperlipidemia induced by a high-fat diet in mice[J]. Nutrients, 2022, 14 (23) : 5066.

[6] ZHANG Z,WANG J,HUO Z,et al. Identification and expression of cysteine sulfite decarboxylase genes and their response to hyposalinity stress in *Ruditapes philippinarum*[J]. Frontiers in marine science , 2023 , 10 : 1176006.

- [7] ZHOU Z, ZHANG Y Y, GAO J X, et al. Metabolomic approaches to analyze the seasonal variations of amino acid, 5'-nucleotide, and lipid profile of clam (*Ruditapes philippinarum*) [J]. LWT-Food science and technology, 2021, 148: 111709.
- [8] TAKEUCHI S, HONMA K, HIRASAKA K. Byssus production ability and degree of byssal-gland development in the infaunal clam *Ruditapes philippinarum* [J]. Acta zoologica, 2020, 101 (4): 392-403.
- [9] 陈志, 陈启春, 黄健, 等. 福建沿海菲律宾蛤仔工厂化人工育苗技术[J]. 福建农业科技, 2019, 55 (7): 25-28.
- [10] 支慧敏, 李杨, 王薇, 等. 菲律宾蛤仔肌原纤维蛋白热变性与其闭壳肌脱壳的关联性[J]. 水产学报, 2024, 48 (7): 48-57.
- [11] CAN TUNÇELI İ, ÖZDEN Ö. Evaluation of rainbow trout and meagre fillets as novel ready-to-eat products [J]. Journal of aquatic food product technology, 2023, 32 (4): 373-383.
- [12] LI K, ZHANG Z, YE H, et al. Processing optimization and quality assessment for the innovative product of canned soybean paste oyster [J]. Food science and technology, 2022, 42: e93622.
- [13] 刘永杰, 陶乐仁, 冯东昱. 冷风干燥鲫鱼干燥特性及品质分析[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50 (19): 223-228.
- [14] 林靖莹, 任雯雯, 叶培洁, 等. 鲑鱼-铜盆鱼复合鱼糜凝胶品质和风味特性研究[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2024, 40 (5): 139-148.
- [15] 杨欣然, 陈婷婷, 林靖莹, 等. 鲑鱼滑加工工艺优化及其品质特性研究[J]. 渔业研究, 2024, 46 (5): 468-479.
- [16] LESTARI S D, HUSSIN A S M, MUSTAFA S, et al. Bacterial community structure, predicted metabolic activities, and formation of volatile compounds attributed to Malaysian fish sauce flavour [J]. Food chemistry, 2023, 426: 136568.
- [17] PAN X, WANG J, XU W, et al. Uncovering quality changes of shrimp (*Penaeus vannamei*) during solar drying and its relationship with protein-related properties [J]. Food chemistry X, 2024, 23: 101696.
- [18] SHEN Y, HU L T, XIA B, et al. Effects of different sulfur-containing substances on the structural and flavor properties of defatted sesame seed meal derived Maillard reaction products [J]. Food chemistry, 2021, 365: 130463.
- [19] 陈静静, 刘贯勇, 蒙珍妮, 等. 响应面法优化无锡酱排骨制作工艺 [J]. 保鲜与加工, 2024, 24 (5): 84-90.
- [20] SREEDEVI P, JAYACHANDRAN L E, RAO P S. Response surface optimization and quality prediction of high pressure processed sugarcane juice (*Saccharum officinarum*) [J]. LWT-Food science and technology, 2021, 152: 112190.
- [21] 马雪莲, 王鹏, 耿敬章, 等. 感官评价联合 GC-MS 与 OPLS-DA 解析加热温度对椒麻鸡赋味汤料呈香品质影响规律 [J]. 食品科学, 2024, 45 (17): 127-134.
- [22] 杜喜玲, 刘云. 基于响应面法的黄豆酱生产工艺优化及色泽分析 [J]. 中国调味品, 2024, 49 (8): 120-124.
- [23] 沈广玥. 食醋风味及其与发酵工艺的相关性分析 [D]. 天津: 天津科技大学, 2023.
- [24] LIU H, WANG Z, ZHANG D, et al. Generation of key aroma compounds in Beijing roasted duck induced via Maillard reaction and lipid pyrolysis reaction [J]. Food research international, 2020, 136: 109328.
- [25] DING A, ZHU M, QIAN X, et al. Effect of fatty acids on the flavor formation of fish sauce [J]. LWT-Food science and technology, 2020, 134: 110259.
- [26] YU M, LI T, SONG H. Characterization of key aroma-active compounds in four commercial oyster sauce by SGC/GC × GC-O-MS, AEDA, and OAV [J]. Journal of food composition and analysis, 2022, 107: 104368.
- [27] 黄崇棱, 尹雪莲, 陆婷婷, 等. 即食贻贝加工过程中风味活性物质的分析 [J]. 中国食品学报, 2023, 23 (10): 294-304.
- [28] 龙正玉, 邹金浩, 杨怀谷, 等. 鸡肉和黄豆混合发酵过程中蛋白质、氨基酸与风味变化规律 [J/OL]. 食品工业科技, 1-18 [2024-11-27]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024010348>.

责任编辑: 郎婧