DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2026.17.015

风味即食牡蛎工艺优化及特征风味的气相色谱-质谱分析

韩婉婷[1],兰智海[1],刘奕斌[1],许欣妍[1],薛诚甜[1],陈慧斌[1,2,3*]
(1. 福建师范大学 生命科学学院,福建 福州 350117;2. 福建师范大学 南方海洋研究中心,福建 福州 350117;3. 福建师范大学 福建省特色海洋生物资源可持续利用重点实验室,福建 福州 350117)

摘　要:为提高即食牡蛎的风味品质,该研究以福建近海新鲜牡蛎为原料,通过单因素试验和 $L_9(3^4)$ 正交试验,优化蒜末添加量、白砂糖添加量、料酒添加量及含水量等工艺参数,采用顶空固相微萃取(headspace solid-phase microextraction,HS-SPME)结合气相色谱-质谱联用仪(gas chromatography-mass spectrometry,GC-MS)对挥发性风味物质进行定性与定量分析。结果表明,风味即食牡蛎最佳工艺条件为 10% 蒜末、6% 白砂糖、1.0% 料酒和 50% 含水量,优化条件下的产品感官评分为 90.42,质构特性优良。GC-MS 分析结果显示,优化组挥发性成分种类增加至 45 种,腥味标志物 1-辛烯-3-醇未检出,而苯甲醛和 3-乙基-2,5-二甲基吡嗪等芳香物质的含量高度显著增加($P<0.001$)。聚类分析和主成分分析(principal component analysis,PCA)显示综合评分最高组(RO-1)与综合评分最低组(RO-2)风味特征显著分离,进一步验证了优化工艺在风味改善方面的有效性。

关键词:牡蛎;工艺优化;气相色谱-质谱法;挥发性风味物质;主成分分析

Optimization of Processing Parameters and GC-MS Analysis of Flavor Characteristics of Ready-to-Eat Oysters

HAN Wanting[1], LAN Zhihai[1], LIU Yibin[1], XU Xinyan[1], XUE Chengtian[1], CHEN Huibin[1,2,3*]
(1. College of Life Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, Fujian, China; 2. Southern Institute of Oceanography, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, Fujian, China; 3. Key Laboratory of Special Marine Bio-Resources Sustainable Utilization of Fujian Province, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, Fujian, China)

Abstract: The flavor quality of ready-to-eat oysters was improved. With fresh oysters (*Crassostrea gigas*) from Fujian as raw materials, the process parameters including minced garlic addition, white granulated sugar addition, cooking wine addition, and moisture content were optimized through single-factor experiments and an $L_9(3^4)$ orthogonal array design. Volatile flavor compounds were qualitatively and quantitatively analyzed via headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The optimal process conditions were determined as follows: 10% minced garlic, 6% white granulated sugar, 1.0% cooking wine, and 50% moisture content. The product prepared under these optimized conditions showed a sensory score of 90.42 and possessed excellent texture properties. According to the GC-MS results, the number of volatile compounds identified in the optimized group was increased to 45. The fishy odor marker 1-octen-3-ol was not detected, while the content of aromatic compounds such as benzaldehyde, and 3-ethyl-2,5-dimethylpyrazine increased ($P<0.001$). Cluster analysis and principal component analysis demonstrated significant separation in flavor characteristics between the group with the highest comprehensive score (RO-1) and the group with the lowest score (RO-2), further validating the effectiveness of the optimized process in flavor improvement.

Key words: oyster; process optimization; gas chromatography-mass spectrometry; volatile flavor compounds; principal component analysis

基金项目:国家自然科学基金项目(31401564);福建省科技计划项目(2022N5015、2024N3011)
作者简介:韩婉婷(2000—),女(汉),硕士研究生,研究方向:食品微生物。
*通信作者:陈慧斌(1981—),男(汉),教授,博士,研究方向:水产品加工与贮藏。

引文格式：
韩婉婷，兰智海，刘奕斌，等．风味即食牡蛎工艺优化及特征风味的气相色谱-质谱分析[J]. 食品研究与开发，2026，47（17）：122-130.
HAN Wanting, LAN Zhihai, LIU Yibin, et al. Optimization of Processing Parameters and GC-MS Analysis of Flavor Characteristics of Ready-to-Eat Oysters[J]. Food Research and Development，2026，47（17）：122-130.

牡蛎（*Crassostrea gigas*）又称蚝、蛎子、蛎黄、海蛎子等，隶属于瓣鳃纲牡蛎科牡蛎属，广泛分布于全球温、热带沿海地区，是我国重要的经济贝类[1]。牡蛎肌肉组织以高蛋白为特征，富含锌、牛磺酸及多种必需氨基酸，兼具营养与保健双重价值[2]。然而，牡蛎的水分活度高，且富含内源性组织蛋白酶，在流通过程中易发生腐败变质[3]。目前，牡蛎多以活体市售或简易腌制、罐头等传统加工形式流通，以上加工有效抑制微生物，但常出现腥味、金属味、口感软烂等问题影响产品的口感和品质。

前期有学者研究表明，如微波-热风干燥的非油炸技术[4]、真空低温烹调技术[5]、烟熏技术[6]等可提升质构、保持营养与构建特征风味。丘华等[4]通过响应面法研究微波-热风联合干燥对即食牡蛎感官品质的影响，确定微波功率 300 W、微波时间 60 s、热风温度 60 ℃、热风时间 60 min 的最优工艺参数，解决了传统干燥方式效率低、品质差的问题。Zhang 等[5]探讨真空低温烹饪时间（0~30 min，75 ℃）对牡蛎风味和滋味的影响，揭示了其处理中脂质氧化与风味形成的关联机制。目前，针对牡蛎固有的腥味及加工过程中易出现的金属异味，腥味遮蔽、脱腥及调味策略成为研究热点。李辉等[6]以新鲜牡蛎肉为原料，通过优化即食液熏牡蛎的加工工艺，确定了烟熏调味液的最优配方（食盐 2.5%、白砂糖 12%、烟熏液 0.4%、酱油 5%）和液熏工艺参数（浸渍温度 50 ℃、时间 1.5 h；干燥温度 60 ℃、时间 120 min），证实液熏工艺对牡蛎色泽与质构的协同优化作用。陈晓婷等[7]开发的鲜甜口味即食牡蛎采用分段烘烤工艺（60 ℃烘烤 3 h 与 70 ℃烘烤 1 h）和最佳调味配比（酱油 2.5%、白糖 5.0%、味精 0.4%、料酒 0.2%），阐明了调味剂比例与牡蛎风味形成的定量关系。以上研究取得较好的效果，同时也表明牡蛎加工过程中水分含量与质构特性和感官品质关系密切，且与不同加工方式有关，但在优良风味形成方面仍有待考察。

本研究针对牡蛎含水量与配方工艺，采用单因素与正交试验优化即食牡蛎辅料配方，并借助顶空固相微萃取-气相色谱质谱联用（headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry，HS-SPME-GC-MS）技术对挥发性风味物质进行定性与定量解析，结合聚类分析与主成分分析，探究即食牡蛎加工过程中关键风味物质的变化特征，以期为低腥味、高风味即食牡蛎提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

1.1.1 材料与试剂

新鲜牡蛎：福建漳州元新食品有限公司；蒜末、白砂糖、食用盐、食用糖、鸡精、水溶性姜粉、生抽、料酒、香油：市售；氯化钠（分析纯）：国药集团化学试剂有限公司；环己酮（纯度≥99.5%，分析纯）：西陇科学股份有限公司

1.1.2 仪器与设备

TA-XT Plus C 型质构仪：英国 Stable Micro Systems 公司；HJ-9 型集热式磁力搅拌器、HH-3A 型数显恒温水浴锅：金坛市易晨仪器制造有限公司；7890B/5977B 型气相色谱-质谱联用仪：美国安捷伦科技有限公司；MJ-78A 型高压蒸汽灭菌锅：施都凯仪器设备（上海）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。

1.2 风味即食牡蛎制备工艺

1.2.1 工艺流程

风味即食牡蛎制备工艺流程如图 1 所示。

图 1 风味即食牡蛎制备工艺流程

Fig.1 Process flow for the preparation of ready-to-eat oysters

具体操作如下。

1）原料处理：选用个体完整、大小均一、无腐败异味的新鲜牡蛎，用流动清水冲洗表面泥沙与杂质，开壳取肉，沥干后待调味。

2）调味腌渍：将白砂糖、食用盐、鸡精、水溶性姜粉、生抽、料酒、香油、蒜末等辅料配制后，将牡蛎与调味液混合，并煮沸 3 min，静置 45 min，腌渍入味。

3）干燥脱水：参照徐玫瑰等[8]的方法，将腌渍结束后的牡蛎肉再次沥干，均匀平铺于烘盘中，置于电热鼓风干燥箱（70 ℃）中干燥，至成品含水率达（45±2）%。

4）装袋灭菌：将脱水后的牡蛎肉按定量装入高温蒸煮袋，热封封口。使用 121 ℃高压蒸汽灭菌锅处理 15 min，以确保无菌。

5）成品冷却：灭菌后迅速冷却至室温以下（可使用

冰水浴或风冷方式），成品即食牡蛎包装完成，储存在 4 ℃条件下。

1.2.2　风味即食牡蛎加工工艺优化试验设计

1.2.2.1　单因素试验设计

在固定基础配方（食盐 1%、鸡精 0.4%、生抽 0.7%、水溶性姜粉 0.04%、香油 4%）的基础上，系统考察蒜末添加量、白砂糖添加量、料酒添加量及含水量对即食牡蛎感官品质的影响，以 500 g 新鲜牡蛎肉为基准，依次对 4 个因素进行单因素试验。每个因素均设置 5 个水平：1）蒜末添加量：6%、8%、10%、12% 和 14%；2）白砂糖添加量：3%、4%、5%、6% 和 7%；3）料酒添加量：0.2%、0.6%、1.0%、1.4% 和 1.8%；4）含水量：40%、45%、50%、55% 和 60%。

每次试验仅变动 1 个因素的水平，其余因素固定中间水平以及固定基础配方的条件均保持一致，并以感官评分为主要响应指标，初步确定各因素的适宜添加范围，为后续正交试验提供水平依据。

1.2.2.2　正交试验设计

在单因素试验结果的基础上，选取蒜末添加量、白砂糖添加量、料酒添加量和含水量 4 个因子设计正交试验，以硬度、弹性、咀嚼性及感官评分为评价指标，优化风味即食牡蛎加工工艺参数，获得综合评分最高组（RO-1）和综合评分最低组（RO-2）。正交因素与水平设计见表 1。

表 1　正交试验因素水平设计

Table 1　Factors and levels of orthogonal design

水平	因素			
	A 蒜末添加量/%	B 白砂糖添加量/%	C 料酒添加量/%	D 含水量/%
1	8	4	1.0	45
2	10	5	1.4	50
3	12	6	1.8	55

1.2.3　产品指标测定

1.2.3.1　感官评定

参照 GB/T 37062—2018《水产品感官评价指南》并结合郝恩瑞[9]的评价标准略作修改，制定风味即食牡蛎感官评价标准表，如表 2 所示。由 10 位经培训的品评员采用 100 分法，从色泽、气味滋味、口感和组织状态 4 个方面评分。

1.2.3.2　水分含量测定

水分含量依据 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》，采用直接干燥法测定。

1.2.3.3　质构测定

即食牡蛎样品的硬度、弹性、咀嚼性等质构特性使用质构仪进行测定。参考林靖莹等[10]的方法并稍作修改。采用 P/36R 圆柱形探头，探头的下降、测试和返回速度分别为 2、1 mm/s 和 2 mm/s，压缩比为 60%，触发力为 5.0 g，测量时间为 5.0 s。平行测定 5 个样品，结果取平均值。

表 2　风味即食牡蛎感官质量评定标准

Table 2　Sensory evaluation criteria for ready-to-eat oysters

项目	评分标准	分值
组织形态（20 分）	牡蛎外形完整无缺，肉质紧密饱满	15~20
	牡蛎有少量破损，肉质稍松散	6~<15
	牡蛎破损严重，肉质松散不成形	0~<6
色泽（20 分）	牡蛎表面呈现出自然的光泽，颜色深浅适中、略带金黄	11~20
	牡蛎表面色泽变化严重，过焦或过白	0~<11
气味滋味（30 分）	无腥味，牡蛎香气浓郁，甜咸恰到好处	20~30
	有轻微腥味，牡蛎香气较淡，味道偏甜或偏咸	10~<20
	腥味刺鼻，无牡蛎香气，味道过甜或过咸	0~<10
口感（30 分）	紧实有嚼劲，口感弹牙	20~30
	口感稍硬，咀嚼稍费力	10~<20
	口感软烂，缺乏嚼劲	0~<10

1.2.3.4　综合评分

综合评分法参照叶琳弘等[11]的研究。将 9 组正交试验测得的感官评分、硬度、弹性、咀嚼性的数值进行线性百分制赋分，其中感官评价及硬度、弹性、咀嚼性权重分别为 0.7、0.1、0.1 和 0.1，进一步进行加权统计，获得综合评分。

1.2.3.5　挥发性风味物质测定

参考杨欣然等[12]的方法并略作修改，采用顶空固相微萃取（headspace solid-phase microextraction，HS-SPME）结合气相色谱-质谱联用仪（gas chromatography-mass spectrometry，GC-MS）分析即食牡蛎中的挥发性风味物质。称取 2.5 g 搅碎后的样品，置于 40 mL 顶空瓶内，依次添加 100 μL 环己酮内标溶液（9.47×10^{-4} mg/mL）和 2.5 mL 饱和氯化钠溶液。将顶空瓶置于 65 ℃、300 r/min 磁力搅拌器中，平衡 10 min，萃取 30 min 后进样。各组分风味物质通过计算机谱库（NEST17）检索进行定性分析，选取匹配度高于 80% 的化合物。挥发性风味物质含量计算公式如下，每组样品测定 3 个平行，结果取其平均值。

$$C_x = \frac{C_0 \times V_0 \times S_x}{S_0 \times m}$$

式中：C_x 为未知挥发性风味物质含量，μg/kg；C_0 为环己酮内标浓度，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 为添加的内标环己酮的峰面积；m 为样品质量，kg。

1.3　数据处理

采用 SPSS Statistics 26 软件对数据进行显著性差异分析及组间相关性分析；采用 Origin 2018 软件绘图；采用 SIMCA-P 软件（14.1）进行主成分分析（princi-

pal components analysis，PCA）；结果以平均值±标准差表示，$P<0.05$ 表示差异显著且具有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 蒜末添加量的确定

蒜末添加量对即食牡蛎感官评分的影响见图 2。

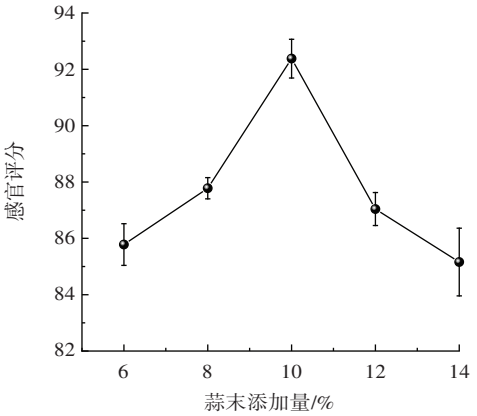


图 2 蒜末添加量对即食牡蛎感官评分的影响

Fig.2 Effect of minced garlic addition on sensory score of ready-to-eat oysters

由图 2 可知，随着蒜末添加量增加，牡蛎感官评分先升高后降低。在蒜末添加量为 10% 时，感官评分最高。含硫化合物是大蒜特征风味的关键物质基础，其中大蒜素产生的辛辣芳香可与牡蛎固有的腥味发生中和反应，同时还能与牡蛎中的鲜味组分产生协同效应，显著提升整体鲜味强度[13]。当蒜末添加量增至 12% 及以上时，感官上表现为大蒜辛辣感，导致感官评分下降。因此，选择蒜末添加量为 8%、10%、12% 进行后续正交试验。

2.1.2 白砂糖添加量的确定

白砂糖添加量对即食牡蛎感官评分的影响如图 3 所示。

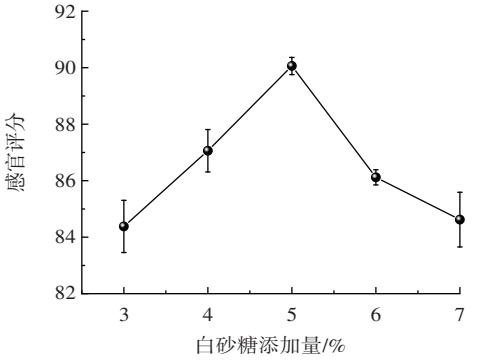


图 3 白砂糖添加量对即食牡蛎感官评分的影响

Fig.3 Effect of white granulated sugar addition on sensory score of ready-to-eat oysters

由图 3 可见，随着白砂糖添加量的增加，即食牡蛎的感官评分先上升后下降，在白砂糖添加量为 5% 时，感官评分达到最高。牡蛎的蛋白质含量高，添加适量糖可与氨基化合物发生美拉德反应，促进吡嗪、呋喃等风味增强物质的形成，从而显著改善产品的色泽与香气[14]；同时，也可以降低产品的水分活度，起到抑菌作用，有利于产品的贮藏。当白砂糖添加量≥6% 时，体系甜度升高，口感趋于甜腻，感官评分因此下降。因此，选择白砂糖添加量为 4%、5%、6% 进行后续正交试验。

2.1.3 料酒添加量的确定

料酒添加量对即食牡蛎感官评分的影响见图 4。

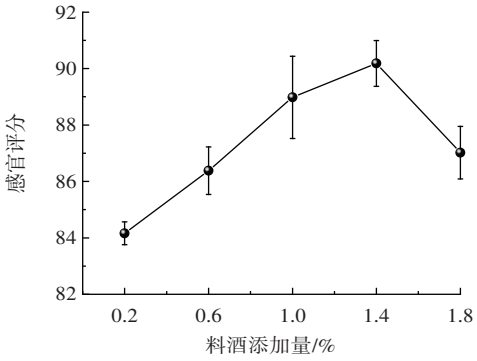


图 4 料酒添加量对即食牡蛎感官评分的影响

Fig.4 Effect of cooking wine addition on sensory score of ready-to-eat oysters

由图 4 可知，随料酒添加量递增，感官评分呈先升高后降低的变化趋势。在料酒添加量为 1.4% 时，牡蛎腥味显著减弱，滋味协调，感官评分达到峰值。这可能与料酒中含微量乙醇与多种呈香组分有关，乙醇的挥发及其与调味料间的化学反应可提升产品风味[15]。当料酒用量继续增大时，感官评分下降。其原因可能与酒味过浓，掩盖牡蛎本味，导致风味失衡有关，该趋势与 Xue 等[15]的研究一致。因此，选择料酒添加量为 1.0%、1.4%、1.8% 进行后续正交试验。

2.1.4 含水量的确定

含水量对即食牡蛎感官评分的影响如图 5 所示。

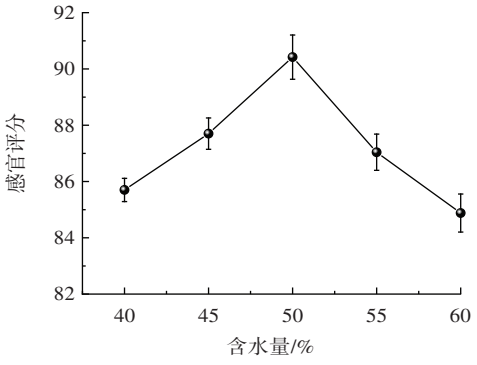


图 5 含水量对即食牡蛎感官评分的影响

Fig.5 Effect of moisture content on sensory score of ready-to-eat oysters

如图 5 所示，当含水量为 50% 时，牡蛎的感官评分达到峰值，其组织形态、色泽、气味滋味及口感均处于最优状态。在该水分水平下，牡蛎既保留了适度的湿润度，又兼具良好的口感与风味，质地、口感及风味三者间实现了最佳平衡。感官评价结果表明，水分含量过低会导致牡蛎过度干燥，表现为硬度增加、弹性下降；而水分含量过高则使牡蛎过于湿润，质地软烂，咀嚼性减弱，进而破坏口感与风味的协调性。因此，选择含水量为 45%、50%、55% 进行后续正交试验。

2.2　正交试验

基于单因素试验结果，本研究选取蒜末添加量(A)、白砂糖添加量(B)、料酒添加量(C)和含水量(D) 4 个关键因素，进行 $L_9(3^4)$ 正交组合试验设计，以优化风味即食牡蛎加工工艺参数，正交试验结果如表 3 所示。

表 3　风味即食牡蛎正交试验结果及极差分析

Table 3　Orthogonal experimental results and range analysis of processing parameters of ready-to-eat oysters

试验号		A 蒜末添加量	B 白砂糖添加量	C 料酒添加量	D 含水量	质构特性			感官评分	综合评分
						硬度/N	弹性/mm	咀嚼性/J		
1		1	1	1	1	85.46	13.15	46.53	86.20	74.85
2		1	2	2	2	89.09	28.36	46.27	86.10	76.64
3		1	3	3	3	111.24	29.74	18.23	87.50	77.17
4		2	1	2	3	145.57	11.43	35.00	89.00	81.50
5		2	2	3	1	157.42	10.00	4.64	90.90	80.84
6		2	3	1	2	158.19	27.56	37.11	90.50	85.64
7		3	1	3	2	77.66	17.02	40.64	88.40	75.41
8		3	2	1	3	72.14	22.78	45.09	88.00	75.60
9		3	3	2	1	70.27	24.85	46.96	85.60	74.13
综合评分	K_1	228.67	231.77	236.09	229.82					
	K_2	247.98	233.08	232.27	237.69					
	K_3	225.15	236.93	233.42	234.27					
	R	7.61	1.72	1.28	2.62					
主次顺序						A>D>B>C				
最优组合						$A_2B_3C_1D_2$				

由表 3 可知，试验号 6($A_2B_3C_1D_2$ 组，标记为 RO-1)综合评分最高，试验号 9($A_3B_3C_2D_1$ 组，标记为 RO-2)综合评分最低。进一步分析各因素对综合评分的影响程度，其主次顺序为蒜末添加量(A)>含水量(D)>白砂糖添加量(B)>料酒添加量(C)。其中，蒜末添加量对综合评分的影响最为显著(R=7.610)，表明其是影响即食牡蛎品质的最主要因素。

根据正交试验极差分析结果，确定最优组合为 $A_2B_3C_1D_2$，即蒜末添加量为 10%、白砂糖添加量为 6%、料酒添加量为 1.0%、含水量为 50%。在该组合下，产品的质构特性(硬度、弹性和咀嚼性)和感官评分均表现良好，综合评分最高。对其进行验证性试验，结果显示，该组合下产品的质构特性(硬度 160.28 N、弹性 28.18 mm、咀嚼性 38.06 J)和感官评分(90.42)均表现优异，综合评分为 85.95，与正交试验结果无显著差异(P>0.05)。这表明 RO-1 工艺参数具有稳定性和可重复性，可作为风味即食牡蛎加工的最佳配方。

2.3　品质特性分析

2.3.1　挥发性成分分析

食品的感官品质主要由挥发性风味物质的组成决定，而风味物质的种类和含量对食品的整体风味特征具有重要影响[16]。RO-1 与 RO-2 的挥发性风味物质及其含量如表 4 和图 6 所示。

由表 4 和图 6 可知，RO-1 共检出 45 种挥发性成

表 4　RO-1 与 RO-2 的挥发性化合物含量

Table 4　Volatile compound content in RO-1 and RO-2 groups

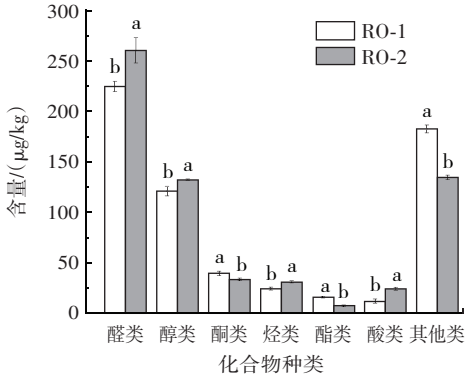
化合物类别	化合物名称	RO-1 含量/(μg/kg)	RO-2 含量/(μg/kg)	t 值	P 值
醛类	戊醛	22.02±1.47	40.28±0.40	−29.27	<0.001***
	己醛	17.81±1.35	38.85±2.83	−16.46	<0.001***
	庚醛	16.19±0.47	ND	83.69	<0.001***
	壬醛	22.39±1.12	36.89±1.15	−22.17	<0.001***
	辛醛	27.71±2.81	19.61±0.95	6.70	0.003**
	苯甲醛	31.37±1.62	19.78±1.64	12.34	<0.001***
	肉桂醛	18.19±2.49	ND	17.91	0.003**

续表 4　RO-1 与 RO-2 的挥发性化合物含量

Continue table 4　Volatile compound content in RO-1 and RO-2 groups

化合物类别	化合物名称	RO-1 含量/(μg/kg)	RO-2 含量/(μg/kg)	t 值	P 值
醛类	2-己烯醛	3.49±0.13	ND	68.42	<0.001***
	反-2-辛烯醛	5.94±1.33	ND	10.96	0.008**
	反式-2,4-癸二烯醛	ND	3.77±0.20	−45.51	<0.001***
	反式-2-己烯醛	4.50±0.71	18.78±1.34	−23.06	<0.001***
	反式-2,4-庚二烯醛	19.6±6.05	36.61±3.33	−6.03	0.004**
	糠醛	15.28±0.47	3.99±0.03	58.52	<0.001***
	5-甲基呋喃醛	ND	3.14±0.20	−37.78	0.001**
	反式-2,6-壬二醛	19.67±0.83	5.54±0.68	32.17	<0.001***
	5-羟甲基糠醛	11.03±2.85	4.09±0.31	5.93	0.004**
	异戊醛	28.2±2.31	14.92±2.00	10.64	<0.001***
	反式-2-癸烯醛	ND	12.30±2.28	−13.20	0.006**
	肉豆蔻醛	13.80±0.91	2.22±0.32	29.32	<0.001***
	合计	224.81±5.07	260.77±12.66		
醇类	乙醇	18.44±1.75	28.68±2.64	−28.03	0.001**
	糠醇	ND	9.40±0.82	−36.89	<0.001***
	正戊醇	12.74±1.20	35.87±0.96	9.74	<0.001***
	环己醇	4.13±1.04	ND	−6.00	0.001**
	1-辛烯-3-醇	5.89±0.87	17.46±4.64	12.00	0.004**
	苯乙醇	26.10±2.35	13.57±1.02	32.89	<0.001***
	正庚醇	37.72±1.83	13.11±0.06	16.46	<0.001***
	反式-2-辛烯-1-醇	16.10±1.09	8.45±0.33	−118.15	<0.001***
	3-甲基-1-丁醇	ND	6.06±0.13	85.31	<0.001***
	合计	121.13±4.72	132.60±0.54		
酮类	甲基庚烯酮	9.00±0.26	ND	1 776.76	<0.001***
	2-壬酮	14.43±1.86	6.06±0.97	−2 424.60	0.001**
	苯乙酮	16.24±0.02	ND	−397.54	<0.001***
	3-辛酮	ND	10.02±0.01	31.00	<0.001***
	β-紫罗兰酮	ND	12.61±0.08	10.76	<0.001***
	合计	39.67±2.1	33.82±1.15		
烃类	右旋萜二烯	11.56±0.91	ND	−1.81	<0.001***
	十六烷	6.49±1.48	ND	21.46	<0.001***
	2,6,10,14-四甲基十五烷	3.58±0.05	13.33±1.23	−55.53	<0.001***
	环辛四烯	2.94±0.89	12.60±0.22	15.42	0.144
	合计	24.57±1.46	31.3±1.05		
酯类	乙酸乙酯	15.91±0.7	7.62±0.64	28.87	<0.001***
	合计	15.91±0.7	7.62±0.64		
酸类	丙酸	3.67±0.02	13.49±0.43	6.50	<0.001***
	壬酸	2.47±0.39	ND	17.57	0.004**
	乙酸	ND	10.75±1.06	10.20	0.002**
	合计	12.13±2.09	24.24±1.50		
其他类	二烯丙基硫醚	21.41±0.50	6.63±1.15	−31.08	<0.001***
	甲基烯丙基二硫醚	28.64±0.60	18.87±0.95	47.08	<0.001***
	2-乙烯基-噻吩	23.15±3.81	13.03±0.03	18.40	0.003**
	二甲基三硫	14.60±0.79	ND	6.11	<0.001***
	甲基烯丙基三硫醚	20.83±0.81	13.69±1.51	1.73	0.001**
	二烯丙基三硫醚	12.34±0.24	11.84±0.47	−1.73	<0.001***
	二烯丙基二硫	41.39±1.56	64.86±0.99	−29.27	<0.001***
	3,4-二甲基噻吩	20.39±0.21	3.18±0.87	−16.45	<0.001***
	2-戊基呋喃	12.46±1.28	2.59±0.28	83.68	<0.001***
	3-乙基-2,5-二甲基吡嗪	3.51±0.05	ND	−22.17	0.004**
	2,3,5-三甲基吡嗪	2.34±0.49	ND	6.69	0.158
	2,5-二甲基吡嗪	2.17±0.24	1.17±0.24	12.34	0.158
	合计	182.74±3.97	136.12±2.40		

注：t 值表示两组独立样本 t 检验的统计量；P 值为对应的双尾检验显著性水平。*表示差异显著，$P<0.05$；**表示差异极显著，$P<0.01$；***表示差异高度显著，$P<0.001$。ND 表示未检出。



同类化合物不同小写字母表示差异显著，$P<0.05$。

图 6　RO-1 和 RO-2 各类化合物含量对比

Fig.6　Comparison of content of compound categories between RO-1 and RO-2 groups

分，显著多于 RO-2（40 种），包括醛类、醇类、酮类、烃类、酯类、酸类及其他类化合物共七大类。其中，醛类、醇类和酮类是即食牡蛎的主要挥发性成分，这一结果与 Van Houcke 等[17]的研究结论一致。

醛类化合物是影响水产品风味的关键因素，主要是由脂肪氧化分解产生。与 RO-2 相比，RO-1 中典型腥味醛类（如反-2-辛烯醛、反式-2-己烯醛及辛醛）的含量显著降低甚至未检出（$P<0.01$）。其中，己醛、庚醛和辛醛等饱和直链醛可能源于 ω-6 多不饱和脂肪酸的氧化降解，其阈值较低且呈青草或腥臭味，对腥味具有显著贡献[18]。而 RO-1 中苯甲醛含量高度显著提升 58.6%（$P<0.001$），并具有令人愉快的杏仁香、坚果香和水果香[19]，其浓度升高可在一定程度上掩盖不良腥味，并赋予产品更为丰富的香气层次。

醇类化合物在水产品中普遍存在，主要来源于多不饱和脂肪酸的降解或羰基化合物的还原[20]，微生物活动和其他生化反应等，饱和醇阈值相对较高，对食品整体风味的贡献较低[21]。1-辛烯-3-醇是一种不饱和醇，广泛存在于贝类中[20]，具有蘑菇和土腥味，且气味阈值低，却是牡蛎的特征风味物质。RO-1 中 1-辛烯-3-醇含量为 5.89 μg/kg，而 RO-2 含量达 17.46 μg/kg，差异极显著（$P<0.01$），也侧面表明优化工艺能有效抑制腥味物质的生成。此外，RO-1 中苯乙醇（26.10 μg/kg）和正庚醇（37.72 μg/kg）含量高度显著高于 RO-2（$P<0.001$），这些物质具有花香和果香特征，对产品风味具有正向贡献。统计比较显示，尽管两组醇类总量差异不显著（$P>0.05$），但 RO-1 在降低腥味醇类和富集芳香醇类方面效果显著。

酮类化合物是脂肪氧化的最终产物，主要由脂肪的分解、氧化和美拉德反应产生[22]，能够通过进一步的还原反应生成相应的醇类，也可经氧化反应转化为其他化合物[21]。RO-1 检出的 3-辛酮、2-壬酮等物质，具有清香和水果香气，含量极显著高于 RO-2（$P<0.01$），且随着碳原子数的增加，花香味会更加明显[23]。

烷烃也是通过脂质氧化作用产生，其风味阈值较高，但对牡蛎整体风味的贡献较小[24]。在其他杂环化合物方面，研究表明，杂环含氮化合物是熟食制品风味的重要贡献者，吡嗪和呋喃类均与美拉德反应有关[25-26]，RO-1 中 2-戊基呋喃具有烤肉香，有助于提升产品风味，这也与 Fu 等[27]的研究结果相符合。

此外有研究表明，大蒜果聚糖在酶解后生成的果糖可以与氨基酸发生美拉德反应，促进吡嗪类化合物生成[13]。同时，外加糖类亦可通过类似途径促进美拉德反应的发生，提升吡嗪含量，从而增强整体香气的效果[28]。RO-1 中 3-乙基-2,5-二甲基吡嗪、2,3,5-三甲基吡嗪等烘烤香型吡嗪含量显著高于 RO-2。

总体而言，RO-1 的挥发性风味物质种类显著多于 RO-2（$P<0.05$），腥味特征物质（如 1-辛烯-3-醇、反式-2-己烯醛）平均降低了 46.2%（$P<0.01$），愉悦香气物质（如苯甲醛、3-乙基-2,5-二甲基吡嗪）平均提升了 58.7%（$P<0.001$）。这些显著性差异与感官评价结果高度一致，从统计学角度进一步验证了优化工艺在“降腥增香”方面的有效性。

2.3.2　挥发性风味物质聚类分析

RO-1 和 RO-2 的挥发性化合物聚类分析热图如图 7 所示。

由图 7 可知，RO-1 与 RO-2 在挥发性风味物质分布上呈现出明显差异。RO-1 中含硫化合物（二烯丙基硫醚、甲基烯丙基二硫醚）及吡嗪类物质（如 3-乙基-2,5-二甲基吡嗪、2,3,5-三甲基吡嗪）显著富集，这些化合物具有较强的烘烤香和刺激性香气，可有效掩盖牡蛎原有的腥味。此外，RO-1 中苯甲醛和 2-壬酮等具有坚果香和果香特征的化合物也表现出较高丰度，表明优化工艺可通过激活美拉德反应及脂肪氧化通路，有效削减腥味醛类并富集吡嗪-硫醚类愉悦香气，从而提升产品整体香气品质。相比之下，RO-2 中腥味物质（如 1-辛烯-3-醇、反式-2-己烯醛）和酸类物质（如乙酸、丙酸）的聚类紧密，可能与水分控制不足及调味配比不合理有关，从而导致产品呈现出腥重、酸败等负面风味特征。这一结果从化合物空间分布角度证实了优化工艺对风味特征的显著调控作用。

2.3.3　主成分差异分析

为进一步探究 RO-1 和 RO-2 的挥发性风味物质差异，采用 PCA 方法分析两组样品中挥发性风味物质的贡献，结果如图 8 所示。

由图 8 可知，PC1 的贡献率为 98.9%，PC2 的贡献率为 0.9%，累计贡献率为 99.8%，大于 90%，表明这两个主成分能够较为全面地代表样品中挥发性风味物质的主要信息。PCA 空间分布表明，RO-1、RO-2 在风味

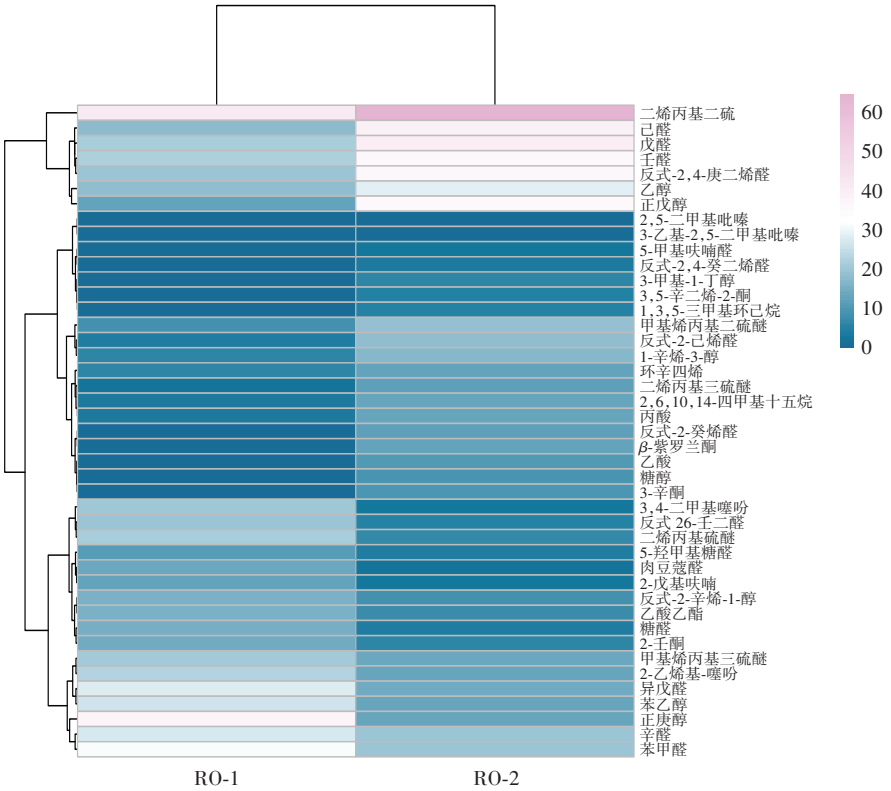


图 7　RO-1 和 RO-2 的挥发性化合物聚类分析热图

Fig.7　Heatmap of hierarchical cluster analysis of volatile compounds in RO-1 and RO-2 groups

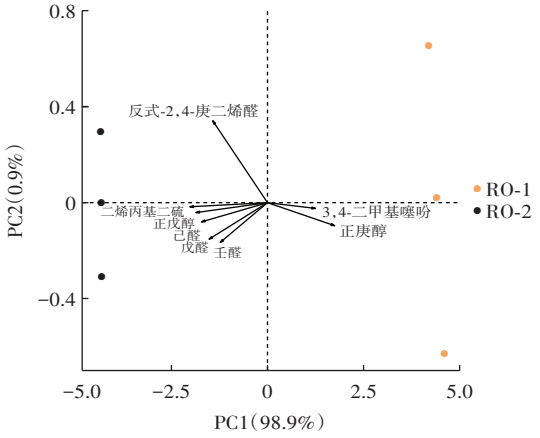


图 8　RO-1 和 RO-2 挥发性风味物质的主要成分差异分析

Fig.8　Principal component analysis of volatile flavor compounds in RO-1 and RO-2 groups

特征上存在显著分离。具体而言，RO-1 样品沿 PC1 正向分布，表明其风味轮廓以 3,4-二甲基噻吩（蒜香-烘烤香）为主导，辅以正庚醇（花果香）与戊醛（坚果香），整体呈“低腥高香”特征。相较之下，RO-2 聚集于 PC1 负向，壬醛（鱼腥味）、己醛（油脂氧化味）、正戊醇（酸腐味）及反式-2,4-庚二烯醛（金属腥味）贡献显著，是形成腥味的主因。PCA 结果与 GC-MS 及感官评价数据高度一致，从统计学角度验证了工艺优化对即食牡蛎风味品质的提升作用。

3　结论

本文围绕风味即食牡蛎产品的工艺优化与品质特性展开研究，通过单因素试验与正交试验，确定最优配方为蒜末添加量 10%、白砂糖添加量 6%、料酒添加量 1.0%、含水量 50%。在此条件下，产品的感官评价达 90.42，表现出良好的组织形态、色泽、风味和口感。质构分析显示，优化工艺显著改善了产品的硬度、弹性与咀嚼性，提升了整体口感；风味成分分析结果表明，优化工艺能有效降低腥味关键物质如 1-辛烯-3-醇、反式-2-己烯醛的含量，同时富集 3-辛酮、3-乙基-2,5-二甲基吡嗪等风味增强物质，使产品具有更为浓郁的烘烤香和坚果香。聚类分析和主成分分析结果进一步证实，不同加工工艺对产品风味特征具有显著影响，优化组合 RO-1 形成了以低腥味、高愉悦香气为特征的风味主导区，实现了牡蛎产品风味从“腥腻”向“鲜香”的显著转变。本研究为低腥味、高风味即食牡蛎的开发提供了理论依据与技术方案，为牡蛎产业的精深加工和可持续发展提供一定支持。

参考文献：

[1]　杨志伟，解万翠．牡蛎资源的产业现状与食品加工研究进展[J].

农产品加工, 2023(5): 73-77.
YANG Zhiwei, XIE Wancui. Current industrial status and development and utilization of oyster resources[J]. Farm Products Processing, 2023(5): 73-77.

[2] ZHANG H, CHOONG K, LI Z X, et al. Nutrition and nutraceutical values of commercially important oysters: A systematic review[J]. Reviews in Aquaculture, 2025, 17(4): e70074.

[3] 徐海菊 . 即食调味牡蛎休闲食品加工工艺研究[J]. 现代食品, 2017, 23(19): 120-123.
XU Haiju. Study on processing technology of ready-to-eat oyster retort pouch[J]. Modern Food, 2017, 23(19): 120-123.

[4] 丘华, 李昊, 崔妍妍, 等 . 响应面法优化非油炸即食牡蛎的微波-热风干燥研究[J]. 轻工学报, 2017, 32(1): 21-27.
QIU Hua, LI Hao, CUI Yanyan, et al. Optimization of microwave and hot-air drying for non-fried instant oyster by response surface methodology[J]. Journal of Light Industry, 2017, 32(1): 21-27.

[5] ZHANG H, HOU Z X, JIA Z, et al. Effect of *sous-vide* processing duration on flavor and taste variations of oyster (*Crassostrea gigas*)[J]. Food Chemistry, 2025, 465: 142066.

[6] 李辉, 黄枝梅, 林晨艳 . 即食液熏牡蛎加工工艺优化[J]. 现代食品, 2020, 26(4): 94-98, 113.
LI Hui, HUANG Zhimei, LIN Chenyan. Optimization of processing technology of ready-to-eat liquid-smoked oysters[J]. Modern Food, 2020, 26(4): 94-98, 113.

[7] 陈晓婷, 吴靖娜, 刘淑集, 等 . 一种即食牡蛎加工工艺[J]. 广东海洋大学学报, 2020, 40(2): 117-122.
CHEN Xiaoting, WU Jingna, LIU Shuji, et al. Study on the processing technology of a kind of instant oyster[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2020, 40(2): 117-122.

[8] 徐玫瑰, 黄鹭强, 陈慧斌 . 温度对牡蛎热风干燥脱水品质的影响[J]. 福建轻纺, 2021(8): 18-21, 29.
XU Meigui, HUANG Luqiang, CHEN Huibin. Effect of temperature on dehydration quality of oyster by hot air drying[J]. The Light & Textile Industries of Fujian, 2021(8): 18-21, 29.

[9] 郝恩瑞 . 即食牡蛎加工工艺及货架期的研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2023.
HAO Enrui. Research on processing technology and shelf life of ready-to-eat oyster[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2023.

[10] 林靖莹, 任雯雯, 叶培洁, 等 . 鱿鱼-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.
LIN Jingying, REN Wenwen, YE Peijie, et al. The gel properties and flavor characteristics of combined squid and snapper surimi[J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2024, 40(5): 139-148.

[11] 叶琳弘, 蔡水淋, 吴靖娜, 等 . 即食菲律宾蛤仔休闲食品加工工艺研究[J]. 渔业研究, 2016, 38(5): 363-371.
YE Linhong, CAI Shuilin, WU Jingna, et al. Study of processing technology for leisure food of ready-to-eat *Ruditapes philippinarum*[J]. Journal of Fisheries Research, 2016, 38(5): 363-371.

[12] 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 Xinran, YE Peijie, ZHENG Fengjie, 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.

[13] 王瑜, 邢效娟, 景浩 . 大蒜含硫化合物及风味研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(10): 3092-3097.
WANG Yu, XING Xiaojuan, JING Hao. Advances in sulfur compounds and garlic flavor research[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2014, 5(10): 3092-3097.

[14] ZHAO T T, ZHANG Q, WANG S G, et al. Effects of Maillard reaction on bioactivities promotion of anchovy protein hydrolysate: The key role of MRPs and newly formed peptides with basic and aromatic amino acids[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 97: 245-253.

[15] XUE D D, HE T P, YOU M C, et al. Effects of different treatments on fishy odor of fish soups[J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2018, 27(6): 722-732.

[16] 孙甜 . 即食小黄鱼挥发性风味分析及去腥工艺研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.
SUN Tian. Volatile flavor analysis and study on the deodorization technolog of instant small yellow croaker[D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.

[17] VAN HOUCKE J, MEDINA I, LINSSEN J, et al. Biochemical and volatile organic compound profile of European flat oyster (*Ostrea edulis*) and Pacific cupped oyster (*Crassostrea gigas*) cultivated in the Eastern Scheldt and Lake Grevelingen, the Netherlands[J]. Food Control, 2016, 68: 200-207.

[18] XU X X, LU S X, LI X F, et al. Effects of microbial diversity and phospholipids on flavor profile of caviar from hybrid sturgeon (*Huso dauricus*×*Acipenser schrencki*)[J]. Food Chemistry, 2022, 377: 131969.

[19] 祝亚辉, 曹文红, 刘忠嘉, 等 . 热加工处理对华贵栉孔扇贝柱特征风味形成的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(20): 131-138.
ZHU Yahui, CAO Wenhong, LIU Zhongjia, et al. Effect of heat processing treatments on the formation of characteristic flavor components of *Chlamys nobilis* adductor muscle[J]. Food Science, 2017, 38(20): 131-138.

[20] 步营, 韩梦琳, 祝伦伟, 等 . 蓝蛤酶解液美拉德反应工艺优化及其对挥发性风味物质的影响[J]. 中国调味品, 2022, 47(6): 10-17.
BU Ying, HAN Menglin, ZHU Lunwei, et al. Optimization of maillard reaction process of enzymatic hydrolysate of *aloididae aloidi* and its effect on volatile flavor compounds[J]. China Condiment, 2022, 47(6): 10-17.

[21] 李彤彤, 赵玲, 王善宇, 等 . 太平洋牡蛎活体冷藏过程中脂质及挥发性物质变化[J]. 肉类研究, 2024, 38(10): 23-29.
LI Tongtong, ZHAO Ling, WANG Shanyu, et al. Changes in lipids and volatile compounds of Pacific oysters during live storage[J]. Meat Research, 2024, 38(10): 23-29.

[22] MATERA J, LUNA A S, BATISTA D B, et al. Brazilian cheeses: A survey covering physicochemical characteristics, mineral content, fatty acid profile and volatile compounds[J]. Food Research International, 2018, 108: 18-26.

[23] 陆大鹏 . 水产品挥发性成分的研究进展[J]. 食品安全导刊, 2022(3): 142-145.
LU Dapeng. Research progress on volatile components of aquatic products[J]. China Food Safety Magazine, 2022(3): 142-145.

[24] CHEN C, FAN X K, HU Y Y, et al. Effect of different salt substitutions on the decomposition of lipids and volatile flavor compounds in restructured duck ham[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 176: 114541.

[25] LIU H, WANG Z Y, ZHANG D Q, 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.

[26] DING A Z, ZHU M, QIAN X Q, et al. Effect of fatty acids on the flavor formation of fish sauce[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 134: 110259.

[27] FU Y, ZHANG Y H, SOLADOYE O P, et al. Maillard reaction products derived from food protein-derived peptides: Insights into flavor and bioactivity[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(20): 3429-3442.

[28] JIANG S S, FENG X, ZHANG F, et al. Effects of cooking methods on the Maillard reaction products, digestibility, and mineral bioaccessibility of *Pacific* oysters (*Crassostrea gigas*)[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 141: 110943.

加工编辑:张岩蔚
收稿日期:2025-09-18