

超高压杀菌对大黄鱼理化性质及滋味、风味的影响

崔燕, 刘韩欣, 朱麟, 尚海涛, 林旭东, 陈曙颖, 宣晓婷

Effect of High Hydrostatic Pressure Sterilization on the Physicochemical Properties, Taste, and Flavor of Large Yellow Croaker (*Larimichthys crocea*)

CUI Yan, LIU Hanxin, ZHU Lin, SHANG Haitao, LIN Xudong, CHEN Shuying, and XUAN Xiaoting

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024020169>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超高压杀菌对低盐切片腊肉风味及理化性质的影响

Effect of Ultra-high-pressure Sterilization on Flavor and Physicochemical Properties of Low-salt Sliced Bacon

食品工业科技. 2024, 45(2): 101-109 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023040209>

超高压处理对养殖大黄鱼肌动球蛋白生化特性的影响

Effects of Ultra High Pressure Treatment on Biochemical Characteristics of Actin in Cultured *Pseudosciaena crocea*

食品工业科技. 2019, 40(15): 27-31 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.15.005>

大黄鱼卵分离蛋白的凝胶特性分析

Gel Properties of Large Yellow Croaker (*Pseudosciaena crocea*) Roe Protein Isolate

食品工业科技. 2022, 43(5): 56-60 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021050218>

超高压杀菌对液态鸡蛋微生物和理化特性影响研究进展

Research Progress on Effects of Ultra High Pressure Sterilization on Microorganism and Physicochemical Properties of Liquid Whole Eggs

食品工业科技. 2021, 42(10): 410-415 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020070097>

大黄鱼鱼卵油微胶囊制备工艺及其性质表征

Preparation Process and Characterization Properties of Large Yellow Croaker Roe Oil Microcapsules

食品工业科技. 2020, 41(7): 126-132 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.07.022>

大黄鱼鱼露的发酵工艺

Fermentation Process of Fish Sauce by Large Yellow Croaker (*Larimichthys crocea*) Roe

食品工业科技. 2022, 43(10): 198-205 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021080177>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

崔燕, 刘韩欣, 朱麟, 等. 超高压杀菌对大黄鱼理化性质及滋味、风味的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(5): 44–55. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024020169

CUI Yan, LIU Hanxin, ZHU Lin, et al. Effect of High Hydrostatic Pressure Sterilization on the Physicochemical Properties, Taste, and Flavor of Large Yellow Croaker (*Larimichthys crocea*) [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(5): 44–55. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024020169

· 研究与探讨 ·

超高压杀菌对大黄鱼理化性质及滋味、风味的影响

崔燕¹, 刘韩欣², 朱麟¹, 尚海涛¹, 林旭东¹, 陈曙颖¹, 宣晓婷^{1,*}

(1. 宁波市农业科学研究院农产品加工研究所, 国家蔬菜加工技术研发专业中心, 浙江宁波 315040;

2. 浙江万里学院生物与环境学院, 浙江宁波 315100)

摘要:以甬岱 1 号大黄鱼为对象, 通过菌落总数、色泽、质构、保水性、脂肪氧化、肌原纤维蛋白特性、呈味核苷酸、游离氨基酸等指标分析, 并结合气相离子迁移色谱 (gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS) 技术, 系统探究了超高压 (200、250、300 MPa, 10 min) 杀菌对大黄鱼理化性质及滋味、风味物质的影响。结果表明: 超高压可有效杀菌, 200~300 MPa 处理下, 杀菌率达 98.10% 以上, 而鱼体特征黄色区域体表色泽及脂肪氧化程度无变化。200 MPa 下, 肌肉色泽保持良好, ΔE 值仅 2.90; 质构和保水性显著改善, 回复性较对照组 (常压处理) 提高 16.92%, 蒸煮损失率则显著下降了 14.35%; 肌原纤维蛋白表面疏水性无显著变化, 巯基含量及 Ca^{2+} -ATPase 活性显著高于 250、300 MPa 组, 蛋白变性程度相对较低。超高压显著提高了鱼体中的呈味核苷酸、游离氨基酸含量及味精当量值, 鲜甜滋味明显提升改善。GC-IMS 结果显示, 超高压显著提高了鱼肉风味组分, 尤其是醇、醛及酮类等特征挥发性物质, 果香、花香、青香、甜香味增强。综合杀菌效果、理化特性及滋味、风味变化, 200 MPa 较适用于大黄鱼的杀菌。该研究为超高压保鲜加工技术的应用提供了理论依据。

关键词: 大黄鱼, 超高压, 杀菌, 理化性质, 滋味, 风味

中图分类号: TS254.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)05-0044-12

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024020169



本文网刊:

Effect of High Hydrostatic Pressure Sterilization on the Physicochemical Properties, Taste, and Flavor of Large Yellow Croaker (*Larimichthys crocea*)

CUI Yan¹, LIU Hanxin², ZHU Lin¹, SHANG Haitao¹, LIN Xudong¹, CHEN Shuying¹, XUAN Xiaoting^{1,*}

(1. Institute of Agricultural Products Processing, National Vegetable Processing Technology Research and Development Center, Ningbo Academy of Agricultural Sciences, Ningbo 315040, China;

2. College of Biological and Environmental Science, Zhejiang Wanli University, Ningbo 315100, China)

Abstract: To explore the effect of high hydrostatic pressure sterilization (HHP) on the physicochemical properties, taste and flavor of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*), Yongdai 1 (Daiqu sp.) samples were subjected to different HHP treatments (200, 250, and 300 MPa, 10 min). The total viable count, color, textural properties, water retention ability, lipid oxidation, biochemical properties of the myofibrillar proteins, flavor nucleotides, and free amino acids were analyzed. In addition, volatile flavor profiles were analyzed using gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS). The results showed that HHP, a treatment of 200~300 MPa, effectively inactivated microorganisms with a sterilization rate of $\geq 98.10\%$. No significant changes were observed in surface color and lipid oxidation levels compared to those of the

收稿日期: 2024-02-21

基金项目: 宁波市公益性科技计划项目 (2022S144)。

作者简介: 崔燕 (1987-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 农产品保鲜与加工, E-mail: cuiyan1605@126.com。

* 通信作者: 宣晓婷 (1991-), 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 微生物控制, E-mail: xuanxiaoting163@163.com。

atmospheric pressure treated samples (control group). Muscle color was maintained better in the 200 MPa group, with ΔE 2.90. Treatment at 200 MPa significantly improved the textural properties and water retention ability. Compared to the control group, the resilience of fish muscle increased significantly by 16.92%, whereas cooking loss decreased significantly by 14.35% in the 200 MPa samples. HHP treatment at 200 MPa had fewer negative effects on protein denaturation than treatment at higher pressures. The surface hydrophobicity of myofibrillar proteins exhibited no significant changes compared with those in the control group, whereas the thiol groups content and Ca^{2+} -ATPase activity in the 200 MPa samples were significantly increased compared with those in the 250 and 300 MPa groups. In addition, flavor nucleotide, free amino acid, and equivalent umami concentration levels significantly increased after HHP treatment, resulting in an improved fresh and sweet taste. GC-IMS analysis revealed that HHP treatments significantly enhanced the flavor components of *L. crocea*, particularly characteristic odorants, including alcohols, aldehydes, and ketones, thereby increasing fruity, floral, green, and sweet flavors. Considering both the sterilization efficiency and changes in physicochemical characteristics, taste, and flavor, a pressure of 200 MPa was determined to be most suitable for *L. crocea* sterilization. These results provide a theoretical basis for the application of HHP in the preservation and processing of *L. crocea*.

Key words: large yellow croaker; high hydrostatic pressure; sterilization; physicochemical properties; taste; flavor

大黄鱼(*Larimichthys crocea*)是我国养殖规模最大且产量最高的海洋主导经济鱼类^[1-2]。新鲜大黄鱼含有大量水分和蛋白,内源酶活性高且易受微生物侵染,极易腐败变质,进而造成严重经济损失^[3]。因此,研发简便、高效的大黄鱼保鲜技术具有重要的经济和科学意义。

超高压(high hydrostatic pressure, HHP)作为一种新型非热加工技术,可在室温或低温下实现杀菌、钝酶而不破坏食物营养,是提高水产品质量安全及货架期的有效手段^[4-5]。Wu 等^[5]研究发现, HHP (300 MPa、5 min)可有效杀死醉蟹中的假单胞菌、大肠杆菌及金黄色葡萄球菌并钝化多酚氧化酶,进而有效抑制黑变、脂肪氧化及生物胺前体氨基酸生成,延长货架期。Ahmed 等^[6]发现, HHP 在有效杀灭单增李斯特菌的同时,可有效维持黄鳍鲷的营养品质,脂肪酸及氨基酸谱无明显变化。近年来, HHP 亦被应用于大黄鱼保鲜,相关研究主要集中在 HHP 处理对其营养品质^[7]、肌原纤维蛋白功能特性^[8]及空间结构影响^[9]等领域。杨华等^[10]发现 200~500 MPa 可显著降低养殖大黄鱼组织中蛋白酶、脂肪酶及 ATP 酶活力,有效杀灭大肠杆菌,并基于 GC-MS 分析了冷藏过程中 500 MPa 下鱼肉腥臭物质变化情况。另有研究显示,基于电子鼻分析, 200~500 MPa 高压下大黄鱼中的挥发性成分基本保留^[7]。大黄鱼营养丰富、味道鲜美、香味浓郁,与鱼肉中丰富的脂肪、蛋白、游离氨基酸、呈味核苷酸及其挥发性物质等密切相关,然而目前 HHP 对大黄鱼脂肪氧化、蛋白氧化、滋味成分影响研究及 HHP 大黄鱼风味变化可视化分析研究却鲜有报道。

本文以甬岱 1 号大黄鱼为研究对象,在明确杀菌效果基础上,综合色泽、质构、脂肪氧化、蛋白氧化等相关指标系统分析超高压杀菌对大黄鱼理化特性的影响,同时结合高效液相色谱、气相离子迁移色谱(gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)可视化分析技术探明其滋味、风味变化,旨在为 HHP 在大黄鱼保鲜加工中的应用提供理论依

据和指导。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜网箱养殖大黄鱼(甬岱 1 号, 400±25 g)象山一桥水产养殖专业合作社,捕捞上岸后,冰藏送回实验室,冰水洗净、沥干后置于冰上备用;丙二醛试剂盒、 Ca^{2+} -ATP 酶活试剂盒 南京建成生物工程研究所;三羟甲基氨基甲烷马来酸盐(Tris-maleate)、异硫氰酸苯酯、氨基酸混标及肌苷酸(inosine 5'-monophosphate, IMP)、鸟苷酸(guanosine 5'-monophosphate, GMP)、腺苷酸(adenosine 5'-monophosphate, AMP)标准品 美国 Sigma 公司;甲醇、磷酸二氢钾、磷酸氢二钾、乙腈、乙酸钠、正己烷等为色谱纯,其他试剂均为分析纯 国药集团化学试剂有限公司。

CQC2L-600 型全液相超高压设备 北京速原中天股份有限公司;SPM-168 型智能生化培养箱 宁波江南仪器厂;Ci6X 便携式色差仪 爱色丽(上海)色彩科技有限公司;TA.XT Plus 质构仪 英国 Stable Micro Systems 公司;FE-28 型 pH 计 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;ReadMax1900 型光吸收型全波长酶标仪 上海闪谱生物科技有限公司;LC-20A 型高效液相色谱仪 日本岛津公司;LC-100 型高效液相色谱仪 上海伍丰科学仪器有限公司;FlavourSpec®气相离子迁移色谱仪 德国 G.A.S.公司;T18 型均质机 德国 IKA 公司;5415D 型冷冻离心机 德国 Eppendorf 公司;MS105DU 电子分析天平 Mettler Toledo 仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品处理 将大黄鱼剖杀,去除鱼鳞、内脏及鱼鳃后,流水洗净血污及杂质,沥水后沿背部将脊骨剔除,取下两侧片鱼肉后切块。

将鱼块随机分成 4 组,分别为对照组(CK 组)和 3 个超高压处理组。在预实验基础上,超高压处理组分别于 200(H200 组)、250(H250 组)、300 MPa

(H300组)压力下常温保压 10 min(鱼块装袋封口, 每包 80 g 鱼块、80 mL 水)。以水为传压介质, 升压速率 3 MPa/s, 3 s 内完成卸压时间, 腔内水温约 15℃。泄压后取出样品, 随即进行菌落总数(total viable counts, TVC)、色差、质构、pH、保水性等指标测定, 剩余样品液氮速冻后置于-80℃冰箱保存, 以用于蛋白、滋味及风味相关指标测定。对照组鱼块同超高压处理组装袋封口, 常压放置相同时间后取样检测。每组设置 3 个平行。

1.2.2 菌落总数测定 参照国标 GB/T 4789.2-2022《食品微生物学检验 菌落总数测定》进行, 结果以 lg CFU/g 表示。

1.2.3 色泽测定 分别对背部肌肉及腹部黄色区域表皮颜色进行测定, 记录 L^* 、 a^* 和 b^* 值, 每块选取 2 个测试点, 每组进行 3 次平行试验。以白度(WI)及与对照组间总色差(ΔE)计算背部肌肉色泽变化程度, 以处理前后 ΔE 计算腹部黄色区域表皮颜色变化程度。

$$WI = 100 - [(100 - L^*)^2 + (a^*)^2 + (b^*)^2]^{1/2} \quad \text{式 (1)}$$

$$\Delta E = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad \text{式 (2)}$$

式中: 背部肌肉: ΔL^* 、 Δa^* 、 Δb^* 分别为处理组与对照组 L^* 、 a^* 和 b^* 值之差; 腹部黄色区域表皮: ΔL^* 、 Δa^* 、 Δb^* 分别为处理前后 L^* 、 a^* 和 b^* 值之差。

1.2.4 质构测定 参考文献 [11] 方法, 以 TPA 模式对背部肌肉全质构参数(硬度、弹性、咀嚼性、回复性)进行测定。选用 P5 柱形探头, 设置下行速度为 2.0 mm/s, 下压、回升速度为 1.0 mm/s, 触发力为 5 g, 下压深度为 5 mm, 每组样品测 8 次, 取平均值。

1.2.5 pH 测定 参照《食品安全国家标准 食品 pH 值的测定》(GB/T 5009.237-2016)进行, 每组做 3 次平行。

1.2.6 保水性测定 肌肉保水性以蒸煮损失率进行评价, 测定方法参考 Zhang 等 [12] 方法并略加修改。鱼肉称重后装袋封口, 80℃水浴蒸煮 30 min, 冷却、吸干表面水分后称重, 结果以损失重量占蒸煮前质量百分比(%)表示。每组做 3 次平行。

1.2.7 TBARS 值测定 参照试剂盒操作进行测定, 结果以 $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ 表示, 每组做 3 次平行。

1.2.8 肌原纤维蛋白提取 参考 Yang 等 [13] 方法, 稍作修改。取 3 g 背部肌肉, 加入 10 倍体积 4℃预冷 Tris-maleate 缓冲溶液 A(50 mmol/L KCl-20 mmol/L Tris-maleate, pH7.0), 匀浆后 4℃、10000 r/min 离心 10 min, 弃上清, 沉淀中加入 6 倍体积预冷 Tris-maleate 缓冲溶液 B(0.6 mol/L KCl-20 mmol/L Tris-maleate, pH7.0), 匀浆后 4℃提取 1 h, 4℃、10000 r/min 离心 10 min, 上清液即为肌原纤维蛋白溶液。考马斯亮蓝法测定蛋白含量。

1.2.9 表面疏水性测定 表面疏水性测定参照文

献 [14] 方法进行, 稍作修改。取 1 mL 肌原纤维蛋白溶液, 加入 200 μL 溴酚蓝溶液(1 mg/mL), 室温下振荡反应 10 min, 随后 10000 r/min 离心 15 min, 取上清液稀释 10 倍后测定 595 nm 处吸光度, 以 Tris-maleate 缓冲溶液 B 作空白样。其值以每毫克蛋白质所结合的溴酚蓝量表示($\mu\text{g}/\text{mg prot}$)。

1.2.10 总巯基及活性巯基含量测定 参考文献 [15-16] 采用 Ellman 试剂法对样品中的总巯基(total sulfhydryl, T-SH)及活性巯基(reactive sulfhydryl, A-SH)含量进行测定。0.25 mL 肌原纤维蛋白溶液中加入 2.5 mL 磷酸盐缓冲液(0.1 mol/L, pH8.0, 含 8 mol/L 尿素), 混匀后加入 50 μL 5,5'-二硫代双(2-硝基苯甲酸)溶液(10 mmol/L)。T-SH 含量测定中, 反应液于 40℃水浴 30 min 后测定 412 nm 处吸光值, A-SH 含量测定中则于 4℃反应 1 h 后测定 412 nm 处吸光值。以反应产物 2-硝基-5-硫代苯甲酸在 412 nm 波长、pH8.0 下的摩尔消光系数 13600 L/(mol·cm)计算, T-SH、A-SH 含量以 nmol/mg prot 表示。

1.2.11 Ca^{2+} -ATP 酶活测定 按照试剂盒操作说明测定, 结果以 $\mu\text{mol Pi}/\text{mg prot}/\text{h}$ 表示。

1.2.12 呈味核苷酸测定 参考 Duan 等 [17] 方法, 略有改动。0.2 g 样品中加入 1 mL 高氯酸溶液(5 mol/L), 匀浆后超声提取 30 min, 加入 1 mL 70% 甲醇, 混匀, 4℃静置 30 min, 12000 r/min 离心 15 min。取上清液, 用 2 mol/L KOH 调至 pH6.8, 0.08 mol/L 磷酸钾缓冲液(pH7.0)定容、0.22 μm 微孔滤膜过滤后待测。

HPLC 分析条件: LC-20A 型高效液相色谱仪; C_{18} 反相色谱柱(4.6 mm×150 mm, 3 μm); 柱温 30℃; 流动相 A(100% 甲醇), 流动相 B(0.05 mol/L 磷酸钾缓冲液, pH7.0); 梯度洗脱: 0~25 min, 流动相 A 比例由 10% 线性下降至 5%, 随后 5 min 内线性下降至 1%, 再 15 min 内线性下降至 0.5%, 随后 10 min 内线性上升至 10%, 继续保持 5 min, 总运行时间 60 min; 进样量 10 μL ; 流速 0.8 mL/min; 紫外检测波长 254 nm。

1.2.13 游离氨基酸测定 参考宣晓婷等 [18] 的方法进行。0.2 g 样品中加入 1.5 mL 70% 甲醇溶液, 8000 r/min 均质 30 s, 超声提取 40 min 后, 12000 r/min 离心 10 min, 重复提取 2 次, 合并上清液。上清液经干燥后, 加入 0.3 mL 超纯水, 样品充分溶解后, 12000 r/min 离心 5 min。取 200 μL 上清液, 加入 100 μL 三乙胺, 100 μL 0.2 mol/L 异硫氰酸苯酯溶液, 混匀后室温放置 1 h。随后加入 400 μL 正己烷, 剧烈振荡 15 s 后 12000 r/min 离心 2 min, 取 100 μL 下层溶液加入 400 μL 超纯水混匀, 0.22 μm 微孔滤膜过滤待测。

HPLC 分析条件: LC-100 型高效液相色谱仪; 氨基酸专业色谱柱(4.6 mm×250 mm, 5 μm); 柱温

35 ℃; 流动相 A: 0.05 mol/L 乙酸钠溶液(pH6.50), 流动相 B: 甲醇: 乙腈: 水=20: 60: 20(v: v: v); 梯度洗脱: 0~39 min, 流动相 A 比例由 95% 线性下降至 52%, 随后 1 min 内线性下降至 40%, 再 5 min 内线性上升至 45%, 1 min 内又线性上升至 95%, 随后保持 14 min, 总运行时间 60 min; 流速 1 mL/min; 进样量 10 μL; 紫外检测波长 254 nm。

1.2.14 味精当量(equivalent umami concentration, EUC)的计算 EUC 值参照文献 [19] 的方法进行计算, 结果以每 100 g 样品味精当量(g MSG/100 g)表示。

1.2.15 挥发性物质(volatile organic compounds, VOCs)测定 参考 Wu 等[20] 方法, 采用 GC-IMS 法对样品中的挥发性组分进行测定, 每组做 3 次平行。称取 5 g 样品置于 20 mL 顶空瓶中, 60 ℃ 孵育 15 min 后进样; 进样体积 500 μL, 不分流; 进样针温度 85 ℃。

GC 条件: MXT-WAX 毛细管色谱柱(0.53 mm×15 m, 1.0 μm); 进样口温度 80 ℃; 柱温 60 ℃; 载气为高纯 N₂(纯度≥99.999%), 流速: 起始 2.0 mL/min, 保持 2 min, 随后 8 min 内线性上升至 10.0 mL/min, 再 10 min 内线性上升至 100.0 mL/min, 随后保持 10 min, 总运行时间 30 min。

IMS 条件: 电离源氙源(³H); 迁移管长度 98 mm; 电场强度: 500 V/cm; 迁移管温度 45 ℃; 漂移气为高纯 N₂(纯度≥99.999%), 流速 150 mL/min; 正离子模式。

1.3 数据处理

挥发性物质采用 GC-IMS 仪器自带 VOCal 软件内置的 GC 保留指数数据库(2020NIST)和 IMS 迁移时间数据库对样品中的特征风味物质进行分析, 利用 Reporter、Gallery Plot 等插件生成不同样品间挥发性组分指纹图谱。其他各组数据以平均值±标准差(mean±SD)表示, 应用 SPSS 18.0 软件以 one-way ANOVA 法及 Duncan 检验对实验数据进行组间比较和差异显著性分析。以 $P<0.05$ 为存在显著性差异。

2 结果与分析

2.1 不同超高压处理对大黄鱼减菌效果的影响

TVC 是反映鱼体新鲜度的重要参数, 影响着鱼体品质优劣及货架期长短。不同压力下 TVC 变化如图 1 所示, 样品初始 TVC 为 4.18 lg CFU/g, 处于新鲜状态。200~300 MPa 压力下, 鱼体中 TVC 较

CK 组显著下降 1.72~3.38 lg CFU/g($P<0.05$), 且杀菌效果随压力上升而显著增强($P<0.05$)。本实验再次证实了 HHP 的杀菌效果, 结果与对虾^[21]、欧洲黑鲈^[22] 等 HHP 研究中的发现相似。研究显示, HHP 可有效杀死水产品中主要腐败微生物, 如假单胞菌、希瓦氏菌等, 100 MPa 下假单胞菌、希瓦氏菌菌数显著下降, 200~300 MPa 下失活^[23-25], 超高压下大黄鱼样品中 TVC 的大幅下降推测与主要致腐菌对压力敏感密切相关。TVC 的下降可能是由于 HHP 作用下, 菌体细胞膜磷脂双分子层发生凝胶化、膜蛋白变性, 细胞中重要酶失活、遗传物质亚基分解, 导致细胞膜通透性改变、细胞生理功能不同程度丧失, 甚至细胞破裂, 最终导致死亡^[23,26-27]。

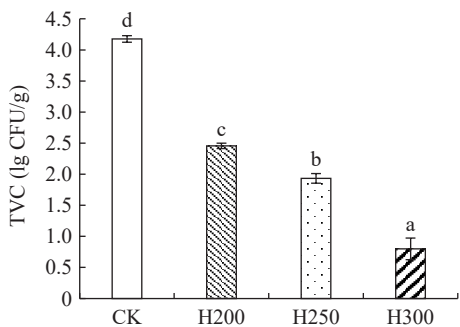


图 1 不同超高压处理对大黄鱼 TVC 的影响
Fig.1 Effect of different high hydrostatic pressure treatments on the TVC of *Larimichthys crocea*
注: 不同字母表示差异显著($P<0.05$); 图 2~图 5 同。

2.2 超高压杀菌对大黄鱼理化品质的影响

2.2.1 色泽 大黄鱼内部肌肉及其腹部黄色区域色泽是评价其品质的重要指标之一。如表 1 所示, HHP 会导致背部肌肉亮度 L^* 及 WI 值显著上升, 并随压力增加呈现显著上升趋势($P<0.05$), 肌肉白度增加、透明度下降, ≥250 MPa 时鱼体出现明显熟化外观。Humaid 等^[28] 在龙虾尾、Huang 等^[29] 在鲭鱼片以及 Tsai 等^[30] 在虱目鱼 HHP 加工中也发现了类似结果, 这主要是由于 HHP 引发了鱼体中肌原纤维蛋白、肌浆蛋白等变性凝固, 致使肌肉白度增加。各组间 a^* 值无显著差异($P>0.05$), 表明 200~300 MPa 超高压未对肌肉红绿值产生影响。大黄鱼背部肌肉 b^* 值为正, 体内色泽偏黄, ≥250 MPa 时 b^* 值显著上升($P<0.05$), 这可能是由于超高压下肌红蛋白变性等引起的。这一结果与 HHP 对龙虾尾^[28]、鲳鱼^[11]、海鲈鱼及皱纹盘鲍^[31] b^* 值的影响一致。但 Tsai 等^[30] 发

表 1 超高压杀菌对大黄鱼背部肌肉色泽的影响

Table 1 Effect of high hydrostatic pressure sterilization on the color of *Larimichthys crocea* dorsal muscle

组别	L^*	a^*	b^*	WI	ΔE
CK	63.40±2.37 ^a	-3.72±0.25 ^a	2.09±0.17 ^a	63.15±2.37 ^a	
H200	66.28±0.23 ^b	-3.74±0.30 ^a	2.08±0.19 ^a	66.01±0.22 ^b	2.90±0.23 ^a
H250	76.95±1.16 ^c	-3.97±0.35 ^a	2.67±0.21 ^b	76.46±1.16 ^c	13.57±1.15 ^b
H300	81.67±1.58 ^d	-4.02±0.26 ^a	3.24±0.14 ^c	80.95±1.52 ^d	18.31±1.57 ^c

注: 同列不同字母表示同一指标差异显著($P<0.05$); 表 2~表 3 同。

现 300~600 MPa 处理下虱目鱼肉 b^* 值显著下降, 马荣荣^[32] 认为 HHP 可使鳗鱼鱼糜的黄度下降, ≥ 300 MPa 时 b^* 值明显降低。这是因为水产品色泽变化是超高压下肌红蛋白变性、色素降解等共同作用结果, 不同水产品中所含的肌红蛋白、色素不同, 造成超高压对其 b^* 值影响不同^[29-30,33]。与 CK 组相比, 背部肌肉 ΔE 值随压力增加而上升, 其中 H200 组最小, 仅为 2.90, 整体色泽变化不大, 肉眼观察下外观色泽与新鲜鱼体无明显差异。

对比各组处理前后腹部黄色区域体表色泽(图 2), ΔE 值在 1.75~1.81 之间, 均较小, 且各组间无显著差异($P>0.05$), 表明 ≤ 300 MPa 超高压对大黄鱼特征黄色区域体表色泽无影响。

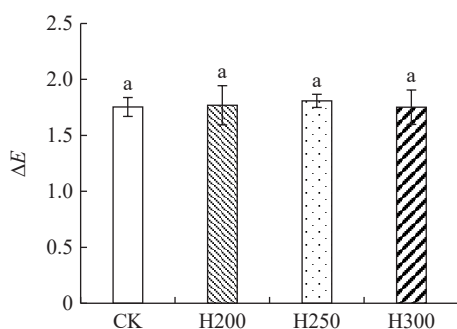


图 2 超高压杀菌对大黄鱼腹部体表色泽的影响

Fig.2 Effect of high hydrostatic pressure sterilization on the abdominal surface color of *Larimichthys crocea*

2.2.2 质构 不同 HHP 处理下质构参数变化如表 2 所示。随着压力上升, 鱼肉的硬度、弹性、咀嚼性逐渐增大, 变化趋势与虱目鱼^[30]、鲳鱼^[11]等 HHP 研究中的发现一致。其中, 咀嚼性变化最为明显, 200 MPa 下咀嚼性较 CK 组显著增加了 19.81% ($P<0.05$), 而硬度、弹性的显著变化分别始于 250 和 300 MPa。200 MPa 下, 鱼体的回复性显著高于其他组 ($P<0.05$), 分别为 CK、H250 及 H300 组的 1.17、1.14、1.29 倍。超高压引起的质构变化推测源于压力导致的肌原纤维蛋白变性、聚集, 进而引发组织结构收缩, 硬度、弹性、咀嚼性增大^[34-35]。另有研究显示, 硬度的增加与 HHP 下新的氢键网络结构形成有关^[36]。

表 2 超高压杀菌对大黄鱼质构的影响

Table 2 Effect of high hydrostatic pressure sterilization on the TPA properties of *Larimichthys crocea*

组别	硬度(N)	弹性	咀嚼性(N)	回复性(%)
CK	2.40±0.23 ^a	0.73±0.03 ^a	1.09±0.07 ^a	0.26±0.02 ^a
H200	2.41±0.19 ^a	0.72±0.04 ^a	1.31±0.12 ^b	0.31±0.04 ^b
H250	2.83±0.25 ^b	0.75±0.02 ^{ab}	1.52±0.12 ^c	0.27±0.03 ^a
H300	4.73±0.30 ^c	0.77±0.04 ^b	2.12±0.13 ^d	0.24±0.04 ^a

2.2.3 pH 研究显示, HHP 会引起水产品 pH 上升^[37-38], 本研究在大黄鱼中也发现了相似的现象。如图 3 所示, 经 HHP 处理后, 各组 pH 随压力的上升逐渐变大, 300 MPa 下显著高于 CK 组 ($P<0.05$), 推测

pH 上升可能是由于超高压诱发蛋白构象变化, 促使碱性基团暴露及酸性基团埋藏^[38]。

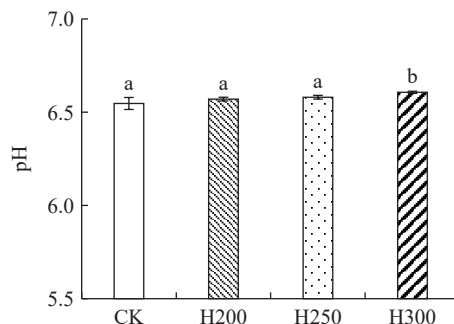


图 3 超高压杀菌对大黄鱼 pH 的影响

Fig.3 Effect of high hydrostatic pressure sterilization on the pH of *Larimichthys crocea*

2.2.4 保水性 为探究 HHP 对大黄鱼保水性的影响, 实验中对各组蒸煮损失率进行测定。如图 4 所示, 200 MPa 下蒸煮损失率较 CK 组显著下降了 14.35% ($P<0.05$), 表明鱼肉保水性得到了有效提高。然而, 随着压力的继续上升, 蒸煮损失率增加并显著高于 H200 组水平 ($P<0.05$), 但与 CK 组间无显著差异 ($P>0.05$)。Yang 等^[39] 发现 100~200 MPa 压力下, 随着压力的增加, 猪肉肠的蒸煮损失率逐渐下降, 而当压力 >200 MPa 后, 其值上升并显著高于 200 MPa 处理组, 但水平均低于对照组, 结果与本实验中的发现相一致。以上结果表明, 适当的高压可显著提高大黄鱼肌肉的保水能力, 推测是由于肌球蛋白头部对压力的高敏感性影响了肌动球蛋白复合物的形成, 进而抑制了肌原纤维及纤维丝收缩引起的水分流失。此外, 蒸煮损失率的下降亦可能是由于超高压下肌球蛋白尾部及肌动蛋白稳定性提高, 更好保持了组织完整性, 进而提高肌肉的保水能力^[38,40]。

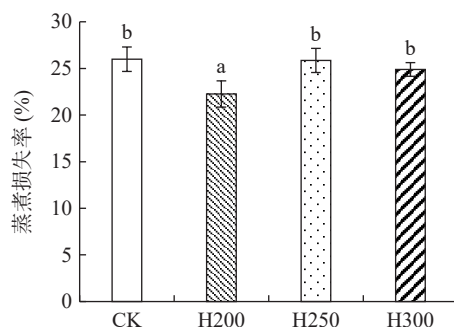


图 4 超高压杀菌对大黄鱼蒸煮损失率的影响

Fig.4 Effect of high hydrostatic pressure sterilization on the cooking loss of *Larimichthys crocea*

2.2.5 脂肪氧化 大黄鱼富含不饱和脂肪酸, 在加工及贮藏中极易发生脂肪氧化, 导致品质发生劣变。如图 5 所示, 200~300 MPa 压力下, 大黄鱼的脂肪氧化程度未发生明显变化, TBARS 值与 CK 组无显著差异 ($P>0.05$), 与鲳鱼^[11]、鲍鱼^[41]超高压研究结果一致。但另有研究发现, 超高压会加速鲜活小龙虾^[42]、黑鱼^[43]等的脂肪氧化, 表明超高压对肌肉脂肪氧化

的影响因品种、肌肉类型、压力大小及保压时间等而异。

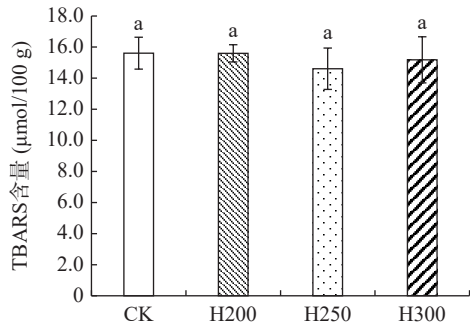


图 5 超高压杀菌对大黄鱼 TBARS 值的影响
Fig.5 Effect of high hydrostatic pressure sterilization on the TBARS value of *Larimichthys crocea*

2.3 超高压杀菌对大黄鱼肌原纤维蛋白特性的影响

2.3.1 表面疏水性 HHP 对大黄鱼肌原纤维蛋白表面疏水性的影响如表 3 所示。与前期研究结果相似^[11,42,44-45],超高压诱导了蛋白表面疏水性的增加,压力≥250 MPa 时表面疏水性急剧上升,250~300 MPa 下较 CK 组显著提高了 45.50%~175.89%($P<0.05$),表明肌原纤维蛋白结构发生了构象变化。HHP 作用下,大黄鱼肌肉蛋白变性,肽链伸展,分子内部疏水基团暴露,导致表面疏水性上升,肌球蛋白间疏水相互作用增强^[46]。

2.3.2 总巯基及活性巯基含量 由表 3 可以看出,HHP 诱发了巯基含量的显著下降($P<0.05$),随着压力的升高,总巯基和活性巯基含量均表现为下降趋势,与 CK 组相比,HHP 组总巯基和活性巯基分别下降了 32.29%~75.57%、44.26%~77.51%。Li 等^[45]在虾蛄 HHP 研究中也发现了相似结果,300~350 MPa 下虾蛄蛋白总巯基和活性巯基含量逐渐下降,且水平显著低于对照组,并认为这可能是由于超高压引发了蛋白活性位点离子键断裂,导致巯基和酪氨酸残基暴露,进而被氧化形成二硫键,导致巯基含量下降。

2.3.3 Ca^{2+} -ATP 酶活性 Ca^{2+} -ATP 酶活性是反映肌原纤维蛋白变性程度的重要指标。如表 3 所示,与巯基含量变化趋势一致,HHP 处理下 Ca^{2+} -ATP 酶活性显著下降($P<0.05$),其活性分别保留了 73.00%、53.11% 和 21.13%,表明超高压下肌原纤维蛋白发生了不同程度的变性。类似结果也在克氏螯虾^[47]、鲳鱼^[11]等水产品中被发现。超高压下 Ca^{2+} -ATP 酶活性的下降可能是由于压力改变了巯基与疏水氨基酸

的相互作用,导致蛋白分子间相互作用增强,进而引发蛋白聚合、构象变化,致使酶活下降^[45]。另有研究认为巯基,尤其是肌球蛋白头部巯基的氧化是超高压下 Ca^{2+} -ATP 酶活性下降的另一原因^[48],本实验中巯基含量的显著下降正好解释了其活性下降的可能原因。

2.4 超高压杀菌对大黄鱼滋味的影响

2.4.1 呈味核苷酸 IMP、GMP 和 AMP 是呈现鲜甜味的重要核苷酸组分。HHP 处理后,大黄鱼中呈味核苷酸含量变化如表 4 所示。AMP 是大黄鱼中的主要呈味核苷酸,其次是 GMP 和 IMP。与 CK 组相比,HHP 显著提高了大黄鱼中的 IMP、GMP、AMP 及总呈味核苷酸含量,其中 H250 组最高,分别为 CK 组的 13.07(IMP)倍、1.46(GMP)倍、1.50(AMP)倍和 1.53(总呈味核苷酸)倍($P<0.05$)。王芝妍等^[49]用 200 MPa 处理中华管鞭虾 3 min 后也发现 AMP 和 IMP 含量显著增加;宣晓婷等^[18]在中华绒螯蟹超高压研究中亦得到类似结果。以上结果表明,适当的 HHP 处理能促进呈味核苷酸的生成,有利于提高大黄鱼鱼肉的鲜甜滋味。

2.4.2 游离氨基酸 大黄鱼中 17 种游离氨基酸含量变化如表 4 所示。超高压下,除胱氨酸外,其他氨基酸含量均显著提高($P<0.05$),尤其是 250 MPa 下,鲜味、甜味、总氨基酸含量分别上升至 CK 组的 2.40 倍、3.12 倍、2.49 倍,鱼肉的鲜、甜味显著增加。宣晓婷等^[18]研究发现,超高压可显著提高中华绒螯蟹蟹黄中鲜、甜味氨基酸含量。由表 4 可知,游离氨基酸含量在 200~250 MPa 下随着压力增加显著上升($P<0.05$),而在 300 MPa 呈现显著下降趋势($P<0.05$),结果与新西兰蛤超高压研究中的相似^[50],推测较低压下游离氨基酸浓度的增加可能是由于低压下蛋白酶活性被激活诱发蛋白水解上升,而较高压下游离氨基酸的降低则可能由某些氨基酸代谢途径被激活所引起^[50]。

鲜味氨基酸(天冬氨酸、谷氨酸等)与呈味核苷酸具有增鲜协同效应,通常以 EUC 值进行评价^[19]。研究显示,HHP 可显著提高中华管鞭虾^[49]、鲢鱼^[51]等水产品的 EUC 值,本研究中亦得到了相同结果。如表 4 所示,HHP 后样品的 EUC 值显著上升至 0.18~0.50 g MSG/100 g($P<0.05$),为 CK 组的 2.18~5.98 倍,表明 HHP 可大幅提升大黄鱼鱼肉的鲜味,这与超高压诱导呈味核苷酸、鲜味氨基酸显著提升密切相关。

表 3 超高压杀菌对大黄鱼肌原纤维蛋白特性的影响

Table 3 Effect of high hydrostatic pressure sterilization on the myofibrillar protein properties of *Larimichthys crocea*

组别	表面疏水性(μg/mg prot)	总巯基含量(nmol/mg prot)	活性巯基含量(nmol/mg prot)	Ca^{2+} -ATP酶活性(μmol Pi/mg prot/h)
CK	7.36±0.72 ^a	85.01±3.37 ^d	81.31±5.12 ^c	0.74±0.02 ^d
H200	7.50±0.70 ^a	57.57±4.14 ^c	45.32±2.04 ^b	0.54±0.02 ^c
H250	10.71±1.02 ^b	25.41±1.54 ^b	20.71±1.24 ^a	0.39±0.04 ^b
H300	20.32±1.26 ^c	20.52±2.52 ^a	18.29±0.63 ^a	0.16±0.02 ^a

表 4 超高压杀菌对大黄鱼呈味核苷酸、游离氨基酸含量及味精当量的影响

Table 4 Effect of high hydrostatic pressure sterilization on the nucleotide contents, free amino acid contents and EUC value of *Larimichthys crocea*

滋味组分	CK	H200	H250	H300
呈味核苷酸(mg/100 g湿重)				
IMP(鲜味)	0.23±0.02 ^a	1.30±0.17 ^b	3.05±0.13 ^c	1.25±0.11 ^b
GMP(鲜味)	3.24±0.09 ^a	3.89±0.22 ^b	4.73±0.30 ^c	4.62±0.26 ^c
AMP(甜味)	84.69±1.50 ^a	104.89±4.47 ^b	127.33±2.77 ^c	124.79±4.37 ^c
总呈味核苷酸	88.16±1.43 ^a	110.07±4.35 ^b	135.11±2.82 ^c	130.66±4.18 ^c
游离氨基酸(mg/100 g湿重)				
天冬氨酸*	3.85±0.19 ^a	5.55±0.17 ^c	5.75±0.48 ^c	4.44±0.18 ^b
谷氨酸*	2.57±0.27 ^a	8.88±0.19 ^c	10.36±0.53 ^d	3.88±0.02 ^b
鲜味氨基酸	6.42±0.32 ^a	14.43±0.35 ^c	16.11±0.80 ^d	8.32±0.18 ^b
丝氨酸**	2.73±0.13 ^a	7.91±0.49 ^c	9.11±0.36 ^d	4.98±0.42 ^b
甘氨酸**	3.40±0.38 ^a	15.13±0.54 ^c	16.59±0.84 ^d	9.36±0.26 ^b
苏氨酸**	6.47±0.35 ^a	13.11±0.52 ^c	15.25±0.50 ^d	10.23±0.60 ^b
丙氨酸**	2.16±0.16 ^a	6.34±0.17 ^c	8.22±0.26 ^d	3.64±0.22 ^b
脯氨酸**	21.39±0.96 ^a	55.48±2.00 ^c	66.96±2.01 ^d	46.58±3.00 ^b
甜味氨基酸	36.15±1.57 ^a	97.97±2.35 ^c	116.13±2.74 ^d	74.80±3.09 ^b
组氨酸	2.86±0.31 ^a	6.77±0.40 ^c	6.34±0.22 ^c	4.09±0.35 ^b
精氨酸	1.78±0.16 ^a	2.05±0.10 ^b	2.75±0.14 ^c	1.97±0.11 ^{ab}
酪氨酸	0.88±0.03 ^a	2.20±0.21 ^c	2.45±0.07 ^d	1.57±0.12 ^b
缬氨酸	1.32±0.13 ^a	3.24±0.17 ^c	4.95±0.48 ^d	2.30±0.18 ^b
蛋氨酸	0.62±0.03 ^a	0.96±0.02 ^c	1.22±0.03 ^d	0.81±0.06 ^b
胱氨酸	17.11±0.85 ^a	16.93±0.46 ^a	16.84±0.47 ^a	17.07±0.33 ^a
异亮氨酸	1.02±0.09 ^a	2.39±0.11 ^c	3.16±0.33 ^d	1.87±0.21 ^b
亮氨酸	1.53±0.10 ^a	5.72±0.52 ^c	6.75±0.62 ^d	2.46±0.23 ^b
苯丙氨酸	3.04±0.31 ^a	5.55±0.48 ^c	7.44±0.69 ^d	4.05±0.31 ^b
赖氨酸	5.50±0.42 ^a	9.13±0.47 ^b	13.76±0.99 ^c	8.05±0.79 ^b
总氨基酸	78.24±3.00 ^a	167.34±2.23 ^c	197.90±4.03 ^d	127.37±1.32 ^b
ECU(g MSG/100 g)	0.08±0.01 ^a	0.34±0.01 ^c	0.50±0.02 ^d	0.18±0.01 ^b

注: *表示鲜味氨基酸, **表示甜味氨基酸; 同行不同字母表示同一指标差异显著($P<0.05$); 表5同。

2.5 超高压杀菌对大黄鱼风味的影响

挥发性物质组成是影响水产品风味的重要因素。为探究超高压杀菌对大黄鱼风味的影响, 采用 GC-IMS 对其 VOCs 变化进行测定。基于 GC-IMS 分析, 共定性得到 38 种 VOCs(表 5), 包括 11 种醇、17 种醛、5 种酮及 5 种其他类物质。为明确超高压处理后的风味变化, 利用网站 PubChem(<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>)、The Good Scents Company Information System(<http://www.the-good-scents-company.com/>)、食品百科(<http://www.foodbk.com/>)和 Chemical Book(<https://m.chemicalbook.com/>)对

各 VOCs 的风味特征进行描述, 具体描述见表 5。

由图 6(a)显示, HHP 处理后大黄鱼的 VOCs 指纹图谱发生了明显变化。CK 组中含有丰富的 2-糠基硫醇(硫磺烧焦烟熏气味)、乙酸(刺激性酸味)、乙醛(刺激性醛味)和己酸乙酯(脂肪味), HHP 处理后这些物质信号强度显著降低, 表明超高压有助于改善整体风味。HHP 后大黄鱼中的 VOCs 丰富度增加(红框部分), 尤其是醇、醛及酮类信号强度明显增强, 表明 HHP 可提高大黄鱼中这些挥发性组分的含量, 风味变得浓郁, 该结果在定量分析中亦得到了证实(表 5)。Ma 等^[52]在牡蛎中也发现了类似现象,

表 5 超高压杀菌对大黄鱼挥发性物质的影响

Table 5 Effect of high hydrostatic pressure sterilization on the volatile organic compounds of *Larimichthys crocea*

序号	挥发性物质	保留指数	保留时间 (s)	迁移时间 (ms)	备注	峰体积				风味特征
						CK	H200	H250	H300	
醇类										
1	1-辛烯-3-醇	1462.8	883.673	1.16045		68.26±1.12 ^a	145.57±3.42 ^b	212.07±8.11 ^c	226.77±19.59 ^c	蘑菇味
2	2-糠基硫醇	1434.0	828.586	1.10456		220.58±12.89 ^b	186.81±4.98 ^a	195.07±8.47 ^a	179.91±6.39 ^a	硫磺烧焦烟熏 气味
3	正己醇	1376.1	727.735	1.32744		77.85±6.82 ^a	125.38±7.04 ^b	153.16±9.88 ^c	155.40±8.55 ^c	果香、青草香
4	(Z)-2-戊烯醇	1343.1	676.005	0.94604		351.92±19.14 ^a	850.95±52.22 ^b	1078.19±56.74 ^c	1256.92±79.27 ^d	果香、青草香

续表 5

序号	挥发性物质	保留指数	保留时间 (s)	迁移时间 (ms)	备注	峰体积				风味特征
						CK	H200	H250	H300	
5	正戊醇	1262.5 1264.2	543.841 546.971	1.25455 1.50857	M D	246.62±2.82 ^a	639.65±46.57 ^b	908.94±40.95 ^c	1136.48±13.57 ^d	杂醇气味
6	异戊醇	1217.9	467.807	1.24482		104.05±9.49 ^a	182.39±13.45 ^b	178.11±2.83 ^b	164.61±9.01 ^b	果香
7	1-戊烯-3-醇	1171.2	397.964	0.94494		1817.32±82.73 ^a	3044.71±80.30 ^b	3129.05±3.18 ^b	3129.32±21.65 ^b	青草香
8	正丁醇	1155.4	376.099	1.18079		206.45±18.11 ^a	230.86±12.84 ^a	229.60±2.55 ^a	257.54±11.80 ^b	酒精味
9	2-甲基丙醇	1106.7	316.108	1.17096		130.31±6.39 ^a	190.55±11.69 ^d	167.75±4.82 ^c	151.86±1.85 ^b	青香
10	正丙醇	1049.6 1051.1	263.407 264.607	1.112 1.25105	M D	330.55±13.41 ^a	1062.22±74.99 ^b	1444.89±92.24 ^c	1673.53±61.06 ^d	酒香、甜香
11	乙醇	939.8	193.885	1.12744		2935.64±65.85 ^b	2623.02±25.07 ^a	2769.34±95.38 ^a	2951.79±102.27 ^b	酒精味
	小计					6489.55±173.27 ^a	9282.11±236.19 ^b	10466.17±184.77 ^c	11284.13±86.03 ^d	
醛类										
12	苯甲醛	1504.7	970.549	1.15075		114.12±8.39 ^a	330.43±21.69 ^c	173.82±12.70 ^b	120.98±9.46 ^a	杏仁香、果香
13	(E,E)-2,4-庚二烯醛	1486.5	931.768	1.19366		99.86±6.61 ^a	177.84±11.18 ^b	187.76±10.26 ^b	231.95±8.96 ^c	青草香
14	正壬醛	1401.4	770.237	1.47188		214.97±12.52 ^a	213.43±15.92 ^a	207.24±10.68 ^a	216.02±9.25 ^a	青草香、玫瑰花香
15	(E)-2-庚烯醛	1338.2	668.519	1.25717		28.53±2.49 ^a	46.74±2.51 ^b	58.30±2.20 ^c	70.34±4.52 ^d	青草香
16	正辛醛	1299.5 1299.7	613.083 613.35	1.4076 1.82116	M D	311.57±14.27 ^a	466.46±11.83 ^b	708.35±39.33 ^c	806.16±37.60 ^d	果香
17	(Z)-4-庚烯醛	1251.7	524.391	1.14741		122.26±5.53 ^a	513.92±26.07 ^b	821.65±49.31 ^c	825.65±62.51 ^c	青草香、果香
18	(E)-2-己烯醛	1227.9 1228.1	483.936 484.198	1.17955 1.51379	M D	321.94±12.63 ^a	707.93±28.98 ^b	885.76±40.04 ^c	1143.00±76.30 ^d	青草香、果香
19	正庚醛	1193.6 1193.3	431.043 430.482	1.33662 1.69742	M D	1119.32±91.02 ^a	2119.78±76.09 ^b	2721.89±258.04 ^c	2916.87±153.04 ^c	脂肪香
20	(E)-2-戊烯醛	1145.6 1144.7	363.203 362.082	1.10639 1.36189	M D	844.26±77.69 ^a	1573.44±0.76 ^b	1753.13±75.84 ^c	2267.56±93.37 ^d	青草香、果香
21	正己醛	1097.1 1098.6	305.456 307.138	1.25941 1.56265	M D	1404.06±136.57 ^a	3332.83±246.02 ^b	4764.77±427.55 ^c	4732.20±314.55 ^c	青草味
22	(E)-2-丁烯醛	1060.8	272.757	1.03505		267.89±20.15 ^a	417.31±10.35 ^b	444.81±23.99 ^b	552.55±39.14 ^c	辛辣味
23	正戊醛	997.9 998.7	224.161 224.721	1.185 1.41805	M D	1387.21±136.33 ^a	2315.28±157.15 ^b	2734.62±187.46 ^c	2658.44±157.52 ^c	果香、发酵面包香
24	2-甲基丁醛	922.5	185.73	1.15759		135.15±7.83 ^a	165.90±4.91 ^b	158.58±12.71 ^b	130.86±11.01 ^a	发酵烘培味
25	3-甲基丁醛	924.4	186.604	1.40305		312.12±30.21 ^{ab}	821.52±79.37 ^c	386.58±28.89 ^b	261.69±28.66 ^a	发酵烘培味
26	丁醛	883.3 884.2	168.574 168.929	1.11444 1.28141	M D	866.73±70.67 ^a	1949.30±85.43 ^b	2376.89±110.03 ^c	2670.17±78.59 ^d	青草香
27	丙醛	800.7	137.39	1.1448		4800.48±312.31 ^a	6161.73±65.92 ^b	6436.99±358.28 ^{bc}	6757.36±159.99 ^c	坚果香、酒香
28	乙醛	675.9	100.891	0.95682		1649.36±12.30 ^c	1556.49±36.19 ^b	1512.04±59.52 ^b	1416.50±21.00 ^a	刺激性醛味
	小计					13999.83±772.02 ^a	22870.33±678.15 ^b	26333.18±1239.28 ^c	27778.30±662.10 ^c	
酮类										
29	3-羟基-2-丁酮	1300.6 1298.9	614.638 612.305	1.06018 1.32954	M D	1134.90±71.44 ^a	2304.29±213.51 ^d	1933.98±174.59 ^c	1621.42±148.97 ^b	甜香、脂肪香
30	1-戊烯-3-酮	1037.1 1037.1	253.315 253.315	1.0769 1.30855	M D	787.33±69.73 ^a	1246.00±116.89 ^b	1563.19±151.48 ^c	1726.93±166.80 ^c	鱼香、甜香
31	3-戊酮	997 996.5	223.501 223.146	1.11094 1.3538	M D	267.54±18.15 ^a	723.96±7.08 ^b	943.31±79.40 ^c	1276.27±94.26 ^d	甜香、果香
32	2-丁酮	905.6 909.6	178.142 179.914	1.06073 1.24404	M D	4662.69±215.99 ^c	3702.89±264.24 ^a	4168.20±186.32 ^b	3650.89±267.80 ^a	果香、青草香
33	2-丙酮	825	145.895	1.11911		2366.95±121.13 ^a	3142.52±166.82 ^b	3566.89±226.57 ^c	3151.47±248.54 ^b	果香
	小计					9219.41±60.88 ^a	11119.65±635.29 ^b	12175.57±476.00 ^c	11426.98±656.32 ^{bc}	
其他										
34	乙酸	1476.4	911.053	1.05252		1603.03±17.22 ^c	1452.55±48.78 ^b	1305.97±65.12 ^a	1313.10±87.14 ^a	刺激性酸味
35	丁苯	1317.8	638.756	1.22241		125.72±10.89 ^a	353.99±30.16 ^c	358.92±32.46 ^c	276.62±30.54 ^b	
36	己酸乙酯	1242.3	508.054	1.34026		693.65±26.32 ^c	462.71±15.99 ^b	441.74±13.86 ^{ab}	421.12±18.66 ^a	脂肪味
37	2-戊基呋喃	1238.2	501.1	1.25341		27.82±1.81 ^a	64.83±6.90 ^b	77.90±7.17 ^c	64.98±5.14 ^b	果香
38	邻二甲苯	1232.6	491.699	1.06081		103.80±1.22 ^a	119.48±3.20 ^b	114.33±9.57 ^{ab}	134.91±10.11 ^c	甜香、杏仁香
	小计					2554.02±54.41 ^c	2453.56±77.35 ^{bc}	2298.86±97.07 ^{ab}	2210.72±105.21 ^a	
总计						32262.82±950.70 ^a	45725.65±685.11 ^b	51273.79±1023.14 ^c	52700.13±387.64 ^d	

注: M为单体, D为二聚体。

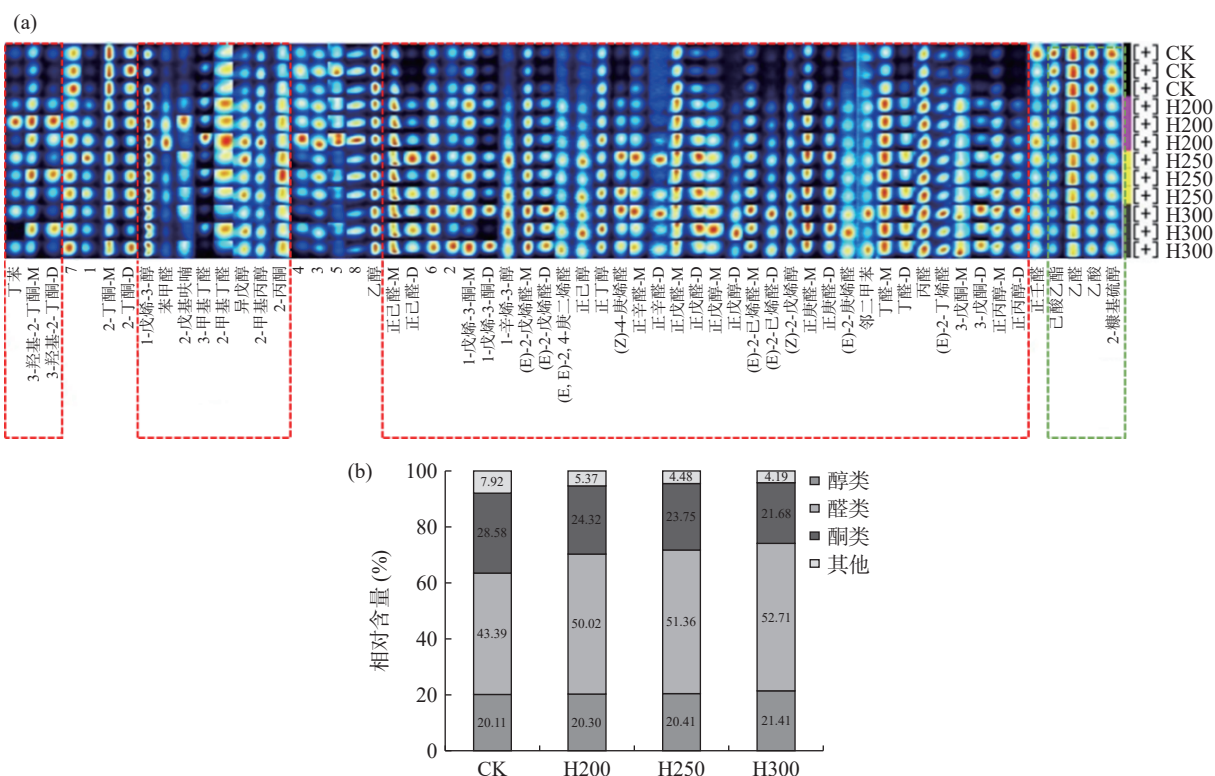


图6 超高压杀菌大黄鱼 VOCs 指纹图谱(a)和百分比柱状堆积图(b)

Fig.6 Fingerprints (a) and percentage column plot (b) of VOCs in *Larimichthys crocea* with high hydrostatic pressure sterilization

HHP 下牡蛎中的醇、醛类 VOCs 种类及含量均明显上升。周明珠等^[53]研究发现, 400 MPa 处理下鲈鱼中的醇、醛及酮类物质显著提高。

为进一步深入探究 HHP 处理后大黄鱼的特征 VOCs 差异, 以峰体积值对不同处理组的 VOCs 进行了定量分析。各处理组 VOCs 值变化如表 5 所示, 200~300 MPa 超高压处理后, 样品中的总 VOCs 值随着压力增加显著提高($P<0.05$), 分别上升至 CK 组的 1.42 倍、1.59 倍和 1.63 倍。Yue 等^[51]、Ma 等^[52]、周明珠等^[53]在 HHP 对鲑鱼、牡蛎、鲈鱼挥发性组分影响研究中亦得到了类似结果。

如表 5 所示, 在检测到的 11 种醇类中, 1-辛烯-3-醇、正己醇、(Z)-2-戊烯醇、正戊醇、异戊醇、1-戊烯-3-醇、正丁醇、2-甲基丙醇和正丙醇等 9 种物质在 HHP 处理后显著上升($P<0.05$)。其中, 1-戊烯-3-醇的含量较高, HHP 下其水平较 CK 组显著增加了 67.54%~72.19%, 表明 HHP 处理赋予了大黄鱼更多的青香。1-辛烯-3-醇、正己醇和异戊醇的气味阈值较低^[52,54], 具有蘑菇、果香、青香等特征香气, 对鱼类的风味起着重要作用, HHP 下其值显著上升, 大黄鱼的风味起着重要作用, HHP 下其值显著上升, 大黄鱼的风味起着重要作用。

醛类是各组大黄鱼中最主要的挥发性物质(图 6(b)), 占总 VOCs 的 43% 以上, 且其阈值较低, 因此在大黄鱼的风味中起着重要作用。HHP 处理下, 除正壬醛、乙醛外, (E,E)-2,4-庚二烯醛、(E)-2-庚烯醛、正辛醛、(Z)-4-庚烯醛、(E)-2-己烯醛、正庚醛、(E)-2-戊烯醛、正己醛、(E)-2-丁烯醛、正戊醛、丙醛、丁醛等 12 种醛类物质含量均显著上升, 苯甲

醛、2-甲基丁醛和 3-甲基丁醛则在 H200 组中达到最高, 并随着压力增加而逐渐下降($P<0.05$)。这些 VOCs 大多带有果香和青草香, 表明 HHP 可增强大黄鱼的宜人气味。通常认为, 醛类是由水产品中多不饱和脂肪酸在脂肪氧合酶作用下形成的氢过氧化物裂解生成^[52,55], 推测 HHP 下醛类 VOCs 的增加可能与超高压下脂肪氧合酶活性的变化有关^[56]。

酮类主要由多不饱和脂肪酸、氨基酸降解及美拉德反应产生, 具有甜香、花香、果香等特征香气^[57]。如表 5 所示, HHP 作用下, 样品中的酮类物质(3-羟基-2-丁酮、1-戊烯-3-酮、3-戊酮、2-丙酮和总酮)含量显著上升($P<0.05$), 表明 HHP 可能有助于提高大黄鱼的甜香、花香和果香味, 这可能与超高压诱发脂肪氧化、氨基酸降解等相关^[51,58]。此外, 丁苯、2-戊基呋喃(果香)和邻二甲苯(甜香、杏仁味)含量亦显著增加。

综上, HHP 处理后大黄鱼的风味发生了明显变化, 果香、花香、青香、甜香味增强, 整体风味变得浓郁。有研究显示, 超高压下 VOCs 的变化亦与压力作用下美拉德反应、香气物质及其前体物质传质过程、食品基质微观结构等改变相关^[56]。

3 结论

超高压具有良好的减菌效果, 且对大黄鱼特征黄色区域体表色泽及脂肪氧化无明显负面影响。200 MPa 下, 鱼体背部肌肉色泽、pH 无显著变化, 而回复性、蒸煮损失率则分别显著高于和低于其他组, 质构及保水性得到显著提升。200~300 MPa 下, 随着压力的增加, 表面疏水性逐渐上升, 巯基含量及

Ca²⁺-ATP 酶活性则逐渐下降,蛋白变性程度显著上升。200~300 MPa 超高压处理可显著提高大黄鱼的鲜甜滋味,呈味核苷酸、鲜味氨基酸、甜味氨基酸及 EUC 值较 CK 组显著增加。GC-IMS 分析结果表明,超高压处理后,大黄鱼中的挥发性组分发生了明显变化,尤其是醇类、醛类及酮类等 VOCs 物质浓度显著增加,果香、花香、青香、甜香味增强,整体风味变得浓郁。

综合减菌效果、色泽、质构、保水性、蛋白变性、滋味、风味等品质指标影响以及使用成本,200 MPa 超高压较适用于大黄鱼的减菌加工。超高压在有效杀菌的同时,改善了鱼体的质构特性,并提高了鱼肉的鲜甜滋味及风味,在养殖大黄鱼等水产品保鲜加工中具有潜在的应用前景,值得更深入的研究。

© The Author(s) 2025. 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] MA X, MEI J, XIE J. Effects of multi-frequency ultrasound on the freezing rates, quality properties and structural characteristics of cultured large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 76: 105657.
- [2] SUN X Y, BAO N, RUI C, et al. Identification of large yellow croakers (*Larimichthys crocea*) scavenger receptor genes: Involvement in immune response to *Pseudomonas plecoglossicida* infection and hypoxia-exposure experiments [J]. *Fish and Shellfish Immunology*, 2024, 144: 109307.
- [3] YAN Q, GUO M, CHEN B, et al. Molecular characterization of spoilage microbiota in high CO₂ refrigerated large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) fillets using metagenomic and metabolomic approaches [J]. *Food Bioscience*, 2023, 56: 103227.
- [4] HUANG H W, WU S J, LU J K, et al. Current status and future trends of high-pressure processing in food industry [J]. *Food Control*, 2017, 72: 1–8.
- [5] WU S H, YANG R J. Effect of high-pressure processing on polyphenol oxidase, melanosis and quality in ready-to-eat crabs during storage [J]. *LWT*, 2023, 178: 114607.
- [6] AHMED J, HABEEBULLAH S F K, ALAGARSAMY S, et al. Impact of high-pressure treatment on amino acid profile, fatty acid compositions, and texture of yellowfin seabream (*Acanthopagrus arabicus*) filets [J]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2022, 6: 857072.
- [7] 杨华, 陆森超, 张慧恩, 等. 超高压处理对养殖大黄鱼风味及品质的影响 [J]. *食品科学*, 2014(16): 244–249. [YANG H, LU S C, ZHANG H E, et al. Effects of high hydrostatic pressure processing on the flavor and quality of cultured yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) [J]. *Food Science*, 2014(16): 244–249.]
- [8] 雷叶斯, 陈娇, 张登科, 等. 超高压处理对养殖大黄鱼肌肉纤维蛋白理化特性的影响 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2018, 8: 1750–1758. [LEI Y S, CHEN J, ZHANG D K, et al. Effects of high hydrostatic pressure processing on the physicochemical properties of myofibrillar protein of cultured large yellow croaker [J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2018, 8: 1750–1758.]
- [9] 张登科, 张慧恩, 朱艳杰, 等. 超高压处理对养殖大黄鱼肌原纤维蛋白结构的影响 [J]. *食品科学*, 2019, 40(9): 61–67. [ZHANG D K, ZHANG H E, ZHU Y J, et al. Effect of high hydrostatic pressure treatment on myofibrillar protein structure of cultured large yellow croaker [J]. *Food Science*, 2019, 40(9): 61–67.]
- [10] 杨华, 梅清清, 张慧恩. 超高压处理和贮藏对养殖大黄鱼中微生物、酶及风味的影响 [J]. *食品科学*, 2013, 34(21): 209–216. [YANG H, MEI Q Q, ZHANG H E. Effect of high hydrostatic pressure and storage on microorganisms, enzymes and flavor compounds in cultured yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) [J]. *Food Science*, 2013, 34(21): 209–216.]
- [11] CUI Y, XUAN X T, LING J G, et al. Effects of high hydrostatic pressure-assisted thawing on the physicochemical characteristics of silver pomfret (*Pampus argenteus*) [J]. *Food Science and Nutrition*, 2019, 7(5): 1573–1583.
- [12] ZHANG L M, YU D W, XU Y S, et al. Changes in quality and microbial diversity of refrigerated carp fillets treated by chitosan/zein bilayer film with curcumin/nisin-loaded pectin nanoparticles [J]. *Food Bioscience*, 2023, 54: 102941.
- [13] YANG H J, CHEN Z Z, WANG H F, et al. Uncovering the rheological properties basis for freeze drying treatment-induced improvement in the solubility of myofibrillar proteins [J]. *Current Research in Food Science*, 2024, 8: 100651.
- [14] HE D, YI X, XIA G, et al. Effects of fish oil on the gel properties and emulsifying stability of myofibrillar proteins: A comparative study of tilapia, hairtail and squid [J]. *LWT*, 2022, 161: 113373.
- [15] ELLMAN G L. Tissue sulfhydryl groups [J]. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 1959, 82(1): 70–77.
- [16] CHOI Y J, PARK J W. Acid-aided protein recovery from enzyme-rich Pacific whiting [J]. *Journal of Food Science*, 2002, 67(8): 2962–2967.
- [17] DUAN Z L, ZHOU Y G, LIU W J, et al. Variations in flavor according to fish size in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Aquaculture*, 2020, 526: 735398.
- [18] 宣晓婷, 王瑛, 尚海涛, 等. 超高压辅助中华绒螯蟹脱壳及其品质的影响 [J]. *沈阳农业大学学报*, 2023, 54(2): 149–156. [XUAN X T, WANG Y, SHANG H T, et al. Effects of high pressure processing on the shucking and quality of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2023, 54(2): 149–156.]
- [19] LÜ Y A, BAI X T, ZHAO H L, et al. Flavor characteristics of large yellow croaker soup served with different dried edible fungi [J]. *Food Chemistry: X*, 2024, 21: 101059.
- [20] WU Y, WU Q, LIN H, et al. Effects of cold atmospheric plasma pre-treatment on maintaining the quality of ready-to-eat drunken red shrimp (*Solenocera crassicornis*) stored at chilled conditions [J]. *Food Chemistry: X*, 2023, 20: 100934.
- [21] CHEN L H, JIAO D X, ZHOU B H, et al. Shrimp (*Penaeus monodon*) preservation by using chitosan and tea polyphenol coating combined with high-pressure processing [J]. *Food Science and Nutrition*, 2022, 10(10): 3395–3404.
- [22] TSIRONI T, ANJOS L, PINTO P I S, et al. High pressure processing of European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) fillets and tools for flesh quality and shelf life monitoring [J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 262: 83–91.
- [23] 赵宏强. 超高压处理对冷藏鲈鱼片品质变化的影响及对腐败希瓦氏菌的作用机制研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2018: 42–49. [ZHAO H Q. Effects of high hydrostatic pressure (HHP) treatment on the quality of *Lateolabrax japonicus* during chilled storage

- and its antibacterial mechanism[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2018: 42–49.]
- [24] TRUONG B Q, BUCKOW R, STATHOPOULOS C E, et al. Advances in high-pressure processing of fish muscles[J]. *Food Engineering Reviews*, 2015, 7(2): 109–129.
- [25] AMANATIDOU A, SCHLÜTER O, LEMKAU K, et al. Effect of combined application of high pressure treatment and modified atmospheres on the shelf life of fresh Atlantic salmon[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2000, 1(2): 87–98.
- [26] HUANG H W, LUNG H M, YANG B B, et al. Responses of microorganisms to high hydrostatic pressure processing[J]. *Food Control*, 2014, 40: 250–259.
- [27] GEORGET E, SEVENICH R, REINEKE K, et al. Inactivation of microorganisms by high isostatic pressure processing in complex matrices: A review[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2015, 27: 1–14.
- [28] HUMAID S, NAYYAR D, BOLTON J, et al. Physicochemical properties and consumer acceptance of high-pressure processed, sous vide-cooked lobster tails[J]. *Journal of Food Science*, 2019, 84(12): 3454–3462.
- [29] HUANG C H, LIN C S, LEE Y C, et al. Quality improvement in mackerel fillets caused by brine salting combined with high-pressure processing[J]. *Biology-Basel*, 2022, 11(9): 1307.
- [30] TSAI Y H, KUNG H F, LIN C S, et al. Combined effect of brine salting and high-hydrostatic-pressure processing to improve the microbial quality and physicochemical properties of milkfish fillet[J]. *International Journal of Food Properties*, 2022, 25(1): 872–884.
- [31] 叶安妮. 超高压处理不同水产品的品质变化及其机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019: 37–38. [YE A N. Study on high pressure process on quality changes of different aquatic products and its mechanism[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019: 37–38.]
- [32] 马荣荣. 超高压技术对鳗鱼鱼糜品质和肌原纤维蛋白性能的影响及其关联性的研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2019: 22–23. [MA R R. Effects of high hydrostatic pressure on the quality of eel surimi and the properties of myofibrillar protein and the correlation between them[D]. Xiamen: Xiamen University, 2019: 22–23.]
- [33] TEIXEIRA B, FIDALGO L, MENDES R, et al. Effect of high pressure processing in the quality of sea bass (*Dicentrarchus labrax*) fillets: Pressurization rate, pressure level and holding time[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2014, 22: 31–39.
- [34] YAGIZ Y, KRISTINSSON H G, BALABAN M O, et al. Effect of high pressure processing and cooking treatment on the quality of Atlantic salmon[J]. *Food Chemistry*, 2009, 116(4): 828–835.
- [35] YAGIZ Y, KRISTINSSON H G, BALABAN M O, et al. Effect of high pressure treatment on the quality of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and mahi mahi (*Coryphaena hippurus*) [J]. *Journal of Food Science*, 2010, 72(9): 509–515.
- [36] ANGUPANICH K, LEDWARD D A. High pressure treatment effects on cod (*Gadus morhua*) muscle[J]. *Food Chemistry*, 1998, 63(1): 39–50.
- [37] SINGHA K K R, SWAMI HULLE N R, DEB S, et al. Physicochemical and microbiological characteristics of high-pressure-processed ready-to-eat hilsa (*Tenualosa ilisha*) curry[J]. *Journal of Biosystems Engineering*, 2020, 45(2): 94–103.
- [38] OLIVEIRA F A D, NETO O C, SANTOS L M R D, et al. Effect of high pressure on fish meat quality-A review[J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2017, 66: 1–19.
- [39] YANG H J, HAN M Y, WANG X, et al. Effect of high pressure on cooking losses and functional properties of reduced-fat and reduced-salt pork sausage emulsions[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2015, 29: 125–133.
- [40] HEDGES N D, GOODBAND R M. The influence of high hydrostatic pressure on the water holding capacity of fish muscle [C]//11-14 first joint trans-atlantic fisheries technology conference-TAFT 2003 33rd WEFTA and 48th AFTC meetings. Reykjavik-Iceland: Innovative handling and processing, 2003: 48–50.
- [41] JO Y J, JUNG K H, LEE M Y, et al. Effect of high-pressure short-time processing on the physicochemical properties of abalone (*Haliotis discus Hannai*) during refrigerated storage[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2014, 23: 33–38.
- [42] 叶韬, 陈志娜, 吴盈盈, 等. 超高压对鲜活小龙虾脱壳效率, 肌原纤维蛋白和蒸煮特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(1): 149–156. [YE T, CHEN Z N, WU Y Y, et al. Impact of high pressure processing on the shelling efficacy, myofibrillar protein, and cooking characteristics of fresh crayfish[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(1): 149–156.]
- [43] 孙良格, 徐佳美, 吕经秀, 等. 肌肽联合超高压对黑鱼肉脂质氧化及肌原纤维蛋白的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(4): 114–122. [SUN L G, XU J M, LÜ J X, et al. Effects of carnosisine combined with ultra high pressure on the lipid oxidation and myofibrillar protein of snakehead fish[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(4): 114–122.]
- [44] 吴颖红. 超高压技术对生腌醉蟹品质的影响及其对蟹黑斑形成的调控机制[D]. 无锡: 江南大学, 2023: 41–42. [WU S H. Effects of HPP on the quality of wine-marinade crab and its regulation mechanism on the formation of crab melanosis[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023: 41–42.]
- [45] LI G S, CHEN Y T, XUAN S F, et al. Effects of ultra-high pressure on the biochemical properties and secondary structure of myofibrillar protein from *Oratosquilla oratoria* muscle[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2019, 42(6): e13231.
- [46] 闫春子. 超高压处理对淡水鱼冷藏保鲜效果的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2016: 40–41. [YAN C Z. Effect of ultra-high pressure treatment on preservation of freshwater fish during refrigerated storage [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016: 40–41.]
- [47] SHI L, XIONG G Q, YIN T, et al. Effects of ultra-high pressure treatment on the protein denaturation and water properties of red swamp crayfish (*Procambarus clarkia*) [J]. *LWT*, 2020, 133: 110124.
- [48] WANG T T, LI Z X, MI N S, et al. Effects of brown algal phlorotannins and ascorbic acid on the physiochemical properties of minced fish (*Pagrosomus major*) during freeze-thaw cycles[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2017, 52(3).
- [49] 王芝妍, 官爱艳, 吕梁玉, 等. 超高压处理对中华管鞭虾虾肉风味的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(18): 156–162. [WANG Z Y, GUAN A Y, LÜ L Y, et al. Effect of ultra-high pressure (UHP) on the flavor of *Solenocera melantho* meat[J]. *Food Science*, 2017, 38(18): 156–162.]
- [50] HOW M S, HAMID N, LIU Y, et al. Using OPLS-DA to fingerprint key free amino and fatty acids in understanding the influence of high pressure processing in New Zealand clams[J]. *Foods*, 2023, 12(6): 1162.
- [51] YUE J, ZHANG Y F, JIN Y F, et al. Impact of high hydrostatic pressure on non-volatile and volatile compounds of squid muscles[J]. *Food Chemistry*, 2016, 194: 12–19.

- [52] MA Y Y, WANG R F, ZHANG T T, et al. High hydrostatic pressure treatment of oysters (*Crassostrea gigas*)-Impact on physicochemical properties, texture parameters, and volatile flavor compounds[J]. [Molecules](#), 2021, 26(19): 5731.
- [53] 周明珠, 乔宇, 廖李, 等. 超高压处理不同时间对鲈鱼挥发性风味的影响[J]. 食品科技, 2019, 44(12): 125-130. [ZHOU M Z, QIAO Y, LIAO L, et al. Effect of ultra-high pressure treatment on volatile flavor of bass at different time[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(12): 125-130.]
- [54] LEI Y L, AI M Y, LU S F, et al. Effect of raw material frozen storage on physicochemical properties and flavor compounds of fermented mandarin fish (*Siniperca chuatsi*) [J]. Food Chemistry: X, 2023, 20: 101027.
- [55] 周蓓蓓, 陈小雷, 鲍俊杰, 等. ROAV 法分析超高压处理对小龙虾仁关键挥发性成分的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(8): 215-220, 225. [ZHU B B, CHEN X L, BAO J J, et al. Analysis of ultra high pressure treatment influence on key volatile components of Freshwater Crawfish tailmeat by ROAV[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(8): 215-220, 225.]
- [56] XIA Q, ZHENG Y R, LIU Z M, et al. Nonthermally driven volatilome evolution of food matrices: The case of high pressure processing[J]. [Trends in Food Science and Technology](#), 2020, 106: 365-381.
- [57] LUO X Y, XIAO S T, RUAN Q F, et al. Differences in flavor characteristics of frozen surimi products reheated by microwave, water boiling, steaming, and frying[J]. [Food Chemistry](#), 2022, 372: 131260.
- [58] CRUZ-ROMERO M C, KERRY J P, KELLY A L. Fatty acids, volatile compounds and colour changes in high-pressure-treated oysters (*Crassostrea gigas*) [J]. [Innovative Food Science and Emerging Technologies](#), 2008, 9(1): 54-61.