

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240827006

超声波协同过氧化氢对鲍鱼减菌及品质的影响

田 晏^{1,2}, 游舒怡^{1,2}, 张 怡^{1,2}, 曾红亮^{1,2,3,4*}

(1. 闽台特色海洋食品加工及营养健康教育部工程研究中心, 福州 350002; 2. 福建农林大学食品科学学院, 福州 350002;
3. 福州海洋研究院, 福州 350108; 4. 福建农林大学海洋研究院, 福建省海洋生物技术重点实验室, 福州 350002)

摘 要: **目的** 探究超声波协同过氧化氢对鲍鱼减菌及品质的影响。**方法** 本研究以鲍鱼的菌落总数为评价指标, 以过氧化氢的质量浓度、超声时间以及超声波功率为单因素水平, 运用响应面法对鲍鱼的减菌工艺进行优化, 并通过测定 pH、色泽、质构特性和电子鼻等指标, 探讨超声波协同过氧化氢对鲍鱼品质的影响。**结果** 在过氧化氢的质量浓度为 1.5 g/L, 超声时间 4 min, 超声功率 400 W 的条件下, 鲍鱼的减菌率达到最高, 为 97.92%。减菌处理后鲍鱼肉的亮度 L^* 显著升高($P<0.01$)。电子鼻能够灵敏地检测到鲍鱼的香气变化, W1S、W2S 和 W1W 传感器响应值较对照组有显著下降($P<0.05$), 表明鲍鱼肉腥味有所减弱。**结论** 超声波协同过氧化氢减菌是一种适用于鲍鱼减菌预处理的技术。

关键词: 鲍鱼; 食品级过氧化氢; 减菌; 超声波; 品质

Effects of ultrasonic combined with hydrogen peroxide on bacteria reduction and quality of *Abalone*

TIAN Yan^{1,2}, YOU Shu-Yi^{1,2}, ZHANG Yi^{1,2}, ZENG Hong-Liang^{1,2,3,4*}

(1. Engineering Research Center of Fujian-Taiwan Special Marine Food Processing and Nutrition, Ministry of Education, Fuzhou 350002, China; 2. College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;
3. Fuzhou Ocean Research Institute, Fuzhou 350108, China; 4. Key Laboratory of Marine Biotechnology of Fujian Province, Institute of Oceanology, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the effects of ultrasonic combined with hydrogen peroxide on *Abalone* bacterial reduction and quality. **Methods** In this study, the response surface was applied to optimize the reduction process of *Abalone* by using the mass concentration of hydrogen peroxide, ultrasonic time, and ultrasonic power as one-factor levels with the total number of *Abalone* colonies as the evaluation indexes, and to explore the effect of ultrasonic synergistic hydrogen peroxide on the quality of *Abalone* through the determination of the indexes of pH, color, textural characteristics, and electronic nose. **Results** The highest bacterial reduction rate of 97.92% was achieved for *Abalone* at a mass concentration of hydrogen peroxide of 1.5 g/L, a sonication time of 4 min, and a sonication power of 400 W. The brightness L^* of *Abalone* meat increased significantly ($P<0.01$) after the bacteria reduction treatment. The electronic nose was able to sensitively detect the changes in the aroma of *Abalone*, and the response values of the W1S, W2S, and W1W sensors decreased significantly ($P<0.05$) compared with those of the

基金项目: 福建农林大学学科交叉融合项目(71202103C)、福州海洋研究院科技项目(2022F16)

Fund: Supported by the Interdisciplinary Integration Project of Fujian Agriculture and Forestry University (71202103C), and the Science and Technology Projects of Fuzhou Ocean Research Institute (2022F16)

*通信作者: 曾红亮, 博士, 教授, 主要研究方向为海洋生物资源开发与综合利用。E-mail: zhlfst@fafu.edu.com

*Corresponding author: ZENG Hong-Liang, Ph.D, Professor, College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, No.15, Shangxiadian Road, Cangshan District, Fuzhou 350002, China. E-mail: zhlfst@fafu.edu.com

control group, indicating that the fishy odor of *Abalone* was weakened. **Conclusion** Ultrasonic synergistic hydrogen peroxide sterilization is a suitable technique for *Abalone* pretreatment.

KEY WORDS: *Abalone*; food grade hydrogen peroxide; sterilization; ultrasonic; quality

0 引言

鲍鱼(*Abalone*)蛋白质含量丰富,主要由肌原纤维蛋白(30%~50%)和高胶原蛋白(10%~30%)组成^[1],氨基酸配比合理,因其风味独特、肉质鲜美且营养丰富而深受消费者的青睐,在中国、澳大利亚、韩国等多个地区广泛养殖^[2-3]。据报道,摄食鲍鱼有多种生理益处,包括抗疲劳^[4]、免疫调节^[5]、保持怀孕期间的健康与活力^[6]等。随着海洋食品的发展,我国鲍鱼产量也在逐年增加,2022 年已达 22.82 万 t,其中以福建鲍鱼产量最高,占全国总产量的 79.54%^[7]。然而,微生物在水产品中生长活跃,是引起鲍鱼在加工、贮藏和运输期间腐败变质的根本原因。

海产品捕捞上岸会携带大量海洋腐败微生物和病原微生物,初始菌含量是导致后续加工和贮藏期间感官和营养特性的变化的主要因素之一^[8-9],因此在加工中进行减菌预处理显得尤为重要。食品级过氧化氢(食品级 H_2O_2)作为一种环境友好型的抗菌剂,利用活性氧破坏微生物体内的原生质,导致细胞膜通透性增加,从而消灭或抑制食品表面的微生物^[10-11]。超声波通过空化作用产生的液压冲击力和自由基破坏微生物的细胞壁和细胞质膜^[12-13],与其他消毒剂结合已成为食品工业上提高减菌效果的常用方式。李银汇^[14]利用高频超声波与次氯酸钠联合处理樱桃番茄表面的大肠杆菌 O157:H7,结果表明处理 3 min 能够有效降低樱桃番茄表面的大肠杆菌。CICHOSKI 等^[15]研究表明超声波联合微酸性电解水能够有效杀灭鸡肉表面细菌,同时保持鸡肉在冻藏期间的品质。 H_2O_2 和超声波处理分别在肉制品、果蔬及其他食品加工中得到了广泛应用^[16-17],而超声波协同 H_2O_2 对鲍鱼进行减菌处理的应用研究较少。

本研究以鲍鱼为研究对象,立足于食品工业化生产,运用超声波协同 H_2O_2 对其进行加工前的减菌预处理,并探究该减菌工艺对鲍鱼品质的影响,旨在为我国鲍鱼等海产品工业化安全高效生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜鲍鱼(*Halotis discus hannai*)同一时间购于福州金屿码头,放置于装有无菌冰水的泡沫箱中运输至实验室,规格大体一致,重约 55 g。

H_2O_2 (食品级,河南慧泽生物工程有限公司);平板计数琼脂培养基(杭州百思生物技术有限公司);氯化钠(分析纯,国药集团化学试剂有限公司)。

1.2 仪器与设备

JY92-IIN 超声细胞破碎仪(宁波新芝生物科技股份有限公司); SPX 生化培养箱(宁波市科技园区新江南仪器有限公司); ZEALWAY 高压灭菌锅(致微仪器有限公司); SW-CJ-2FD 超净工作台(苏净集团苏州安泰空气技术有限公司); CTX-JJ 色差仪(北京辰泰克仪器技术有限公司); FTC TMS-Pilot 质构仪(北京盈盛恒泰科技有限公司); PEN-3 电子鼻(德 AIRSENSE 公司); E-201F 雷磁 pH 计(上海仪电科学仪器股份有限公司); PL202-S100 精密分析天平(精度 0.0001 g,梅特勒-托利多仪器上海有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 样品处理

选取完整饱满、大小基本一致的鲜活鲍鱼,取腹足部分,流动无菌水洗去表面黏液,称重,于 4 °C 冷藏条件下保存在无菌袋中备用。样品放入盛有 H_2O_2 溶液的烧杯中,并立刻用超声细胞破碎仪进行超声处理,探头直径 6 mm,深入液面下 1 cm,工作 1 s,停歇 1 s;以未处理的样品为对照组,每组处理均做 3 个平行。

1.3.2 超声波协同 H_2O_2 减菌工艺优化实验

(1) 单因素实验

选择 H_2O_2 质量浓度(0.3、0.6、0.9、1.2、1.5 g/L)、超声时间(1、2、3、4、5、6 min)、超声功率(200、250、300、350、400、450 W)进行单因素实验,考察各因素对鲍鱼减菌效果和感官品质的影响。

(2) 响应面分析实验

在单因素实验基础上,综合考虑鲍鱼感官质量和减菌率,确定各因素的最佳水平值范围,按照 Box-Behnken 中心组合实验设计原理,以 H_2O_2 质量浓度(A)、超声时间(B)、超声功率(C)为自变量,以减菌率为响应值,其因素与水平设计见表 1。

表 1 响应面实验设计因素与水平

Table 1 Factors and levels used in response surface methodology

因素	水平		
	-1	0	1
A (H_2O_2 质量浓度)/(g/L)	0.9	1.2	1.5
B(超声时间)/min	3	4	5
C(超声功率)/W	350	400	450

1.3.3 指标测定

(1) 菌落总数的测定

菌落总数参照 GB 4789.2—2022《食品安全国家标准

食品微生物学检验 菌落总数测定》测定。减菌率的计算公式如式(1)。

减菌率/%=(减菌前菌落总数-减菌后菌落总数)/减菌前菌落总数 × 100% (1)

(2) pH 测定

pH 参照 GB 5009.237—2016《食品安全国家标准 食品中 pH 值的测定》进行测定。

(3)色泽测定

采用色差仪测定减菌处理前后的鲍鱼腹足部位的亮度(L*)、红度(a*)、黄度(b*), 测量面积 8 mm, 每次测定前用比色板对色差仪进行校准, 每个样品重复测定 3 次, 取平均值^[18]。

(4)质构测定

将鲍鱼腹足部分切成 10 mm×10 mm×10 mm 小块, 使用质构仪 Texture Profile Analysis 模式测定处理前后样品的硬度、弹性、咀嚼性等指标。测试参数: 探头型号 P/0.5; 测试速度 1 mm/s; 压缩程度 50%; 触发力 10 g; 循环次数 2 次, 每次压缩间隔时间 5 s^[19]。

(5)电子鼻分析

称取(5.00±0.05) g 鲍鱼肉糜样品于 20 mL 顶空瓶中, 室温静止 40 min, 瓶内样品与挥发性气体达到相对平衡后, 采用顶空进样测量。电子鼻测定条件为: 传感器清洗时间为 120 s, 自动调零时间为 10 s, 样品准备时间 5 s, 检测时间 60 s, 内部流量 300 mL/min^[20]。

(6)感官评价

鲍鱼肉的感官评价标准参照 GB/T 37062—2018《水产品感官评价指南》和文献[21]并适当修改。选择 10 名具有感官评价经验的人员组成评价小组, 对鲍鱼肉的色泽、气味、弹性进行感官鉴定和评分, 评分标准见表 2。

1.4 数据处理

采用 Excel 2019 软件和 SPSS Statistics 16.0 软件对实验数据进行统计分析, 采用单因素方差分析和 t 检验进行差异性比较, P<0.05 表示显著性差异; 响应面实验数据采用 Design Expert 13 软件处理; 采用 Origin 2021 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 单因素实验

由图 1A 可知, 不同质量浓度的 H₂O₂ 对鲍鱼具有较好的杀菌效果, 且减菌效果随着质量浓度逐渐增加。当 H₂O₂ 质量浓度为 0.9 g/L 时, 减菌率为 94.20%, 减菌率显著提高 (P<0.05), 但在 0.9~1.5 g/L 时, H₂O₂ 处理鲍鱼菌落总数的速率仅呈微弱增长。闫玉红等^[22]使用 H₂O₂ 处理鲜罗非鱼片, 结果表明杀菌效果随浓度增加而逐渐增强, 与本研究结果一致。H₂O₂ 溶液杀菌机制是利用活性氧附着于微生物细胞表面, 并作用于细胞膜的磷脂双分子层, 引起氧化应激从而破坏微生物体内组织, 达到杀灭微生物的目的^[10,23], 但过高浓度的 H₂O₂ 溶液会因氧化性太强而影响鲍鱼肉的品质。因此 H₂O₂ 的质量浓度选择 0.9 g/L。

由图 1B 可知, 0~4 min 内减菌率随超声时间的增加而显著增加(P<0.05), 此时最高减菌率为 96.13%, 超声时间超过 4 min, 减菌率有所下降且趋势趋于平缓。分析其原因, 可能是因为鲍鱼体表初始菌落数较大, 超声前期减菌速率快, 后期由于 H₂O₂ 受超声处理时长和环境中紫外线的影响, 分解为水和氧气, 从而溶液浓度降低, 鲍鱼的减菌率有所下降。杨贤庆等^[24]用质量浓度 1.27 g/L 的 H₂O₂ 溶液处理冻罗非鱼片, 随着处理时间的延长, 减菌率不断增加, 浸泡 6 min 时减菌率可达 90%以上。因此超声时间选择 4 min。

如图 1C 所示, 减菌率在超声功率增大的过程中不断提高, 在 250~300 W 内减菌率提升幅度最大, 此后缓慢上升, 400 W 时减菌率达 95%以上。高频的声波在介质内振动引起分子的生热作用, 从而产生超声热效应^[25]。H₂O₂ 溶液在超声波热效应和空化效应在作用下, 加速分解为水和氧气, 会在一定程度上影响鲍鱼的减菌效果。因此超声功率选择 400 W。

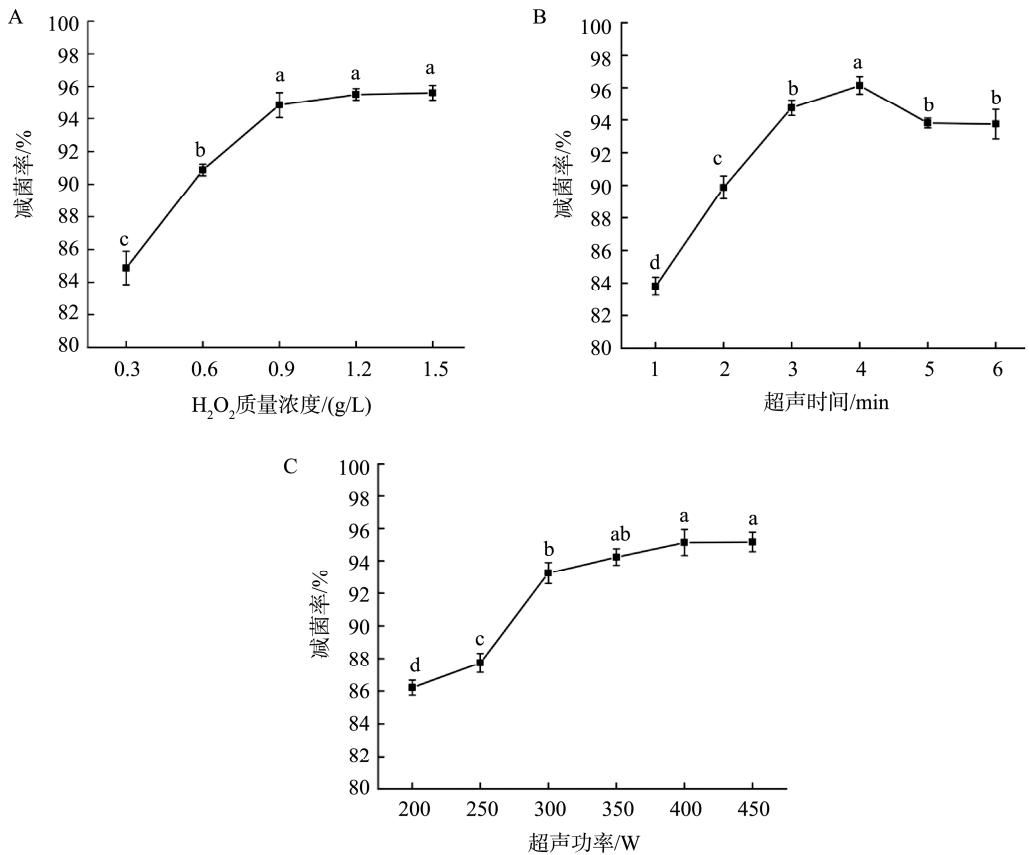
2.2 Box-Behnken 响应面分析

2.2.1 响应面模型建立与显著性分析

根据 Box-Behnken 中心设计原理^[26], 在单因素实验的基础上, 选取 H₂O₂ 质量浓度、超声时间、超声功率为考察因素, 以超声波协同 H₂O₂ 对鲍鱼的减菌率为响应值, 设计实验及实验结果如表 3 所示。

表 2 鲍鱼感官评定标准
Table 2 Sensory evaluation criteria for Abalone

评分指标	好(7~8 分)	较好(5~6 分)	一般(3~4 分)	差(0~2 分)
气味	气味正常, 无腥味, 具有鲍鱼特有鲜味	气味正常, 鲍鱼特有海腥味	无鲍鱼海腥味, 略有 H ₂ O ₂ 味道	有强烈的 H ₂ O ₂ 味道
颜色	肉质鲜亮, 有光泽	色泽黄白, 有光泽	光泽较暗	色泽发生明显变化, 无光泽
弹性	肉质紧密, 有弹性	肉质较紧密, 有一定的弹性	肉质中度柔软, 按压不易复原	肉质非常柔软



注：不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。
图1 不同因素对鲍鱼减菌率的影响(n=3)

Fig.1 Effects of different factors on the bacteria-reducing rates of Abalone (n=3)

表 3 响应面分析法实验方案及结果
Table 3 Experimental scheme and results of response surface methodology

编号	H ₂ O ₂ 质量浓度 /(g/L)	超声时间 /min	超声功率 /W	减菌率 /%
1	1.2	3	450	90.3
2	1.5	4	450	96.3
3	1.2	4	400	94.9
4	0.9	4	450	87.2
5	1.5	5	400	97.5
6	0.9	3	400	82.6
7	1.2	4	400	96.0
8	1.5	3	400	93.9
9	1.5	4	350	95.5
10	1.2	4	400	94.8
11	1.2	4	400	95.2
12	1.2	5	350	95.6
13	1.2	3	350	86.5
14	1.2	4	400	96.1
15	1.2	5	450	95.7
16	0.9	5	400	87.4
17	0.9	4	350	84.7

利用统计软件对实验结果进行多元回归拟合，得到关于 H₂O₂ 质量浓度、超声时间、超声功率对鲍鱼减菌率(Y)

的二次多项回归式模型方程： $Y=95.40+5.16A+2.86B+0.90C-0.30AB-0.43AC-0.92BC-3.08A^2-1.98B^2-1.04C^2$ 。

方差分析结果如表 4 所示，模型 $P<0.0001$ ，表明该回归模型达到极显著水平，且失拟项 $P=0.0924>0.05$ 不显著；相关系数 $R^2=0.9824$ ，表明模型拟合程度较好；变异系数 (coefficient of variation, CV)=1.04%<10%，表明实验精确度和可信度较高。模型一次项 A 和 B，二次项 A^2 和 B^2 为极显著水平 ($P<0.01$)，C 和 C^2 为显著水平 ($P<0.05$)；该模型对于鲍鱼减菌率的预测值和实际拟合度较好，可用其确定最佳减菌率。由 H₂O₂ 质量浓度(A)、超声时间(B)、超声功率(C) 3 个影响因素的 F 可知，各因素对鲍鱼减菌率的影响大小依次为：A>B>C。

2.2.2 交互作用分析

H₂O₂ 质量浓度、超声时间和超声功率两两交互项的响应曲面图如图 2 所示，各因素及其交互作用对鲍鱼减菌率的影响可以通过响应面及其等高线图直观反映。图 2A 中曲面陡峭程度较大，说明 H₂O₂ 质量浓度与超声时间的交互作用对鲍鱼的减菌率影响较大；图 2C 中的响应面坡度较为平缓，说明超声功率和超声时间的交互作用对鲍鱼的减菌率影响较小，与回归模型中的方法分析结果一致。

表 4 回归模型的方差分析						
Table 4 Variance analysis of regression model						
来源	平方和	自由度	均方和	F	P	显著性
模型	360.80	9	40.09	43.32	<0.0001	**
A	213.21	1	213.21	230.41	<0.0001	**
B	65.55	1	65.55	70.84	<0.0001	**
C	6.48	1	6.48	7.00	0.0331	*
AB	0.36	1	0.36	0.39	0.5526	
AC	0.72	1	0.72	0.78	0.4062	
BC	3.42	1	3.42	3.70	0.0959	
A ²	39.81	1	39.81	43.02	0.0003	**
B ²	16.42	1	16.42	17.75	0.004	**
C ²	8.25	1	8.25	8.92	0.0203	*
残差	6.48	7	0.93			**
失拟项	4.98	3	1.66	4.42	0.0924	
纯误差	1.5	4	0.38			
总和	367.28	16				

2.2.3 响应面模型的优化与验证

根据二次多元回归方程得到鲍鱼减菌工艺的最佳条件为: H₂O₂ 质量浓度 1.398 g/L, 超声时间 4.205 min, 超声功率 415.122 W, 在该条件下, 鲍鱼减菌率可达 97.93%。考虑到实际生产要求, 故将技术工艺设置为 H₂O₂ 质量浓度 1.5 g/L, 超声时间 4 min, 超声功率 400 W。在此条件下, 经过 3 次重复实验, 测得鲍鱼减菌率分别为 97.96%、97.86%、97.94%, 平均值为 97.92%, 与模型理论预测值(97.93%)拟合较好, 可用于超声波协同 H₂O₂ 对鲍鱼减菌工艺的优化。

2.3 鲍鱼净化前后肌肉品质变化

为评价超声波协同 H₂O₂ 减菌工艺对鲍鱼肌肉产生的

影响, 将减菌前后的鲍鱼肌肉品质进行比较。由表 5 可知, 减菌处理后的鲍鱼肉 *L*^{*}显著升高(*P*<0.01), 而对鲍鱼的其他品质变化均无显著影响(*P*>0.05)。H₂O₂ 分解产生氧自由基, 通过破坏发色团的化学键而发挥脱色作用, 将发色团氧化为不含发色团或含有不吸收可见光的发色团物质^[27]。MAGRI 等^[28]研究发现使用 H₂O₂ 处理甘蔗能够显著降低甘蔗中非糖成分对色泽的不良影响。此外, 超声空化作用所产生的化学和机械冲击也可能造成鲍鱼亮度值数的提升^[29]。

电子鼻作为模拟人类嗅觉系统的分析仪器, 能够短时间内给予样品中挥发性成分的整体信息, 前处理简便快捷, 降低食品品鉴中的人为评定差异^[30-31]。由图 3A 可知, 主成分 PC1 和 PC2 的累计贡献率达 99%以上, 基本上涵盖了鲍鱼样品的大部分原始信息。对照组的鲍鱼与减菌处理的鲍鱼在 PC1 轴上分布较远, 表明在协同减菌处理前后的风味信息特征差距较大。图 3B 电子鼻传感器雷达图显示, 经协同减菌处理后鲍鱼各传感器的响应值均呈现不同程度的减弱趋势。其中, W1S、W2S 和 W1W 传感器响应值较对照组有显著下降(*P*<0.05), 说明减菌处理后的鲍鱼样品气味物质变化最大的是碳氢化合物, 其次是醇和醛酮类化合物和无机硫化物、萜烯类物质, 可能是超声波协同 H₂O₂ 处理使鲍鱼的土腥味等不良气味减弱, 主要是腥味成分中感官阈值较低的醛类和醇类^[20,32]。使用 H₂O₂ 处理能够增强蛋白质与二甲基硫醚的结合作用, 减少挥发性硫化物含量, 抑制食品中腥味物质生成^[33]。杨运懿^[34]使用 20 mmol/L 的 H₂O₂ 处理鱼糜凝胶, 结果表明部分腥味物质含量比 Tris-HCl 缓冲溶液处理的对照组显著降低。

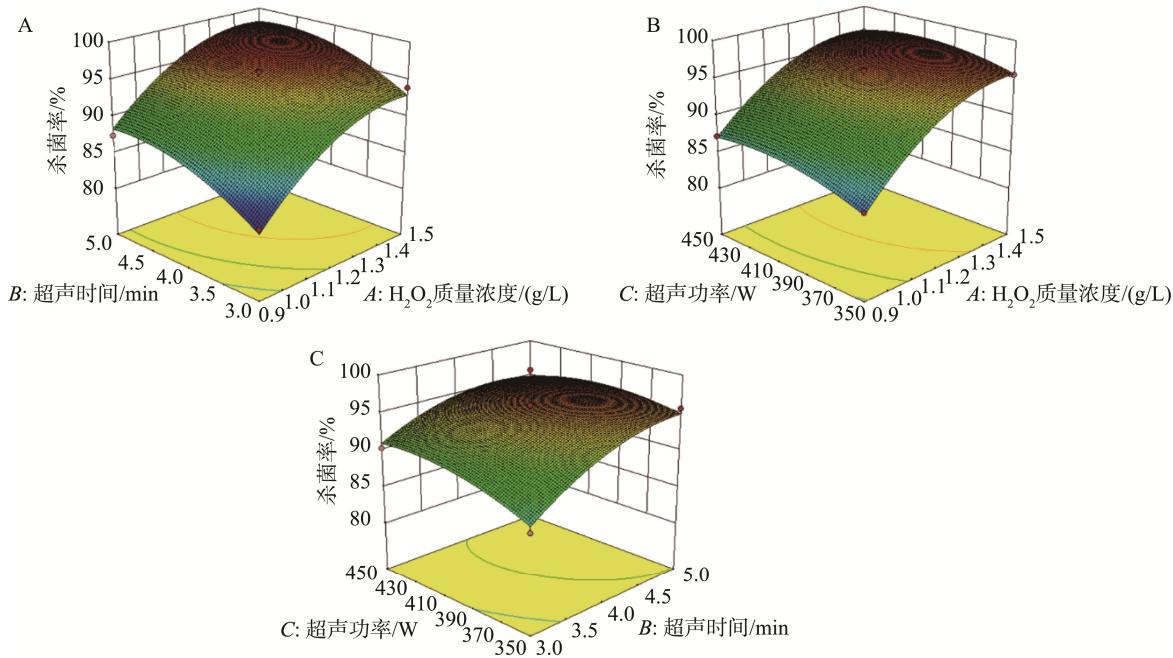
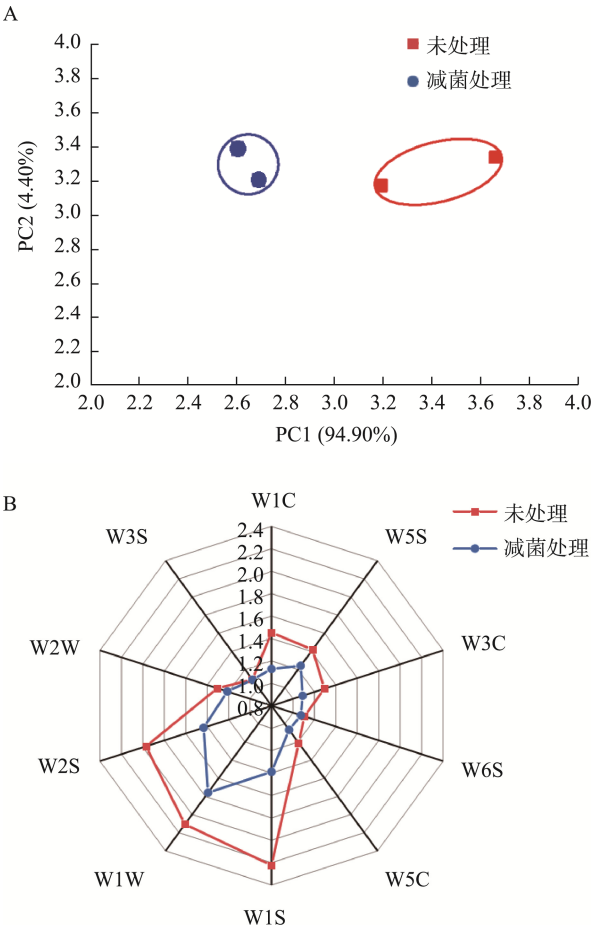


图2 两两因素交互作用对鲍鱼减菌率影响的响应面图
Fig.2 Response surface maps of the interaction of pairwise factors on the bacterial reduction rates of Abalone

表 5 鲍鱼减菌前后品质变化(n=3)
Table 5 Changes in quality of *Abalone* after bacteria-reducing treatment (n=3)

指标	减菌前	减菌后
pH	6.86±0.08	6.67±0.02
<i>L</i> [*]	66.98±0.87	72.00±0.66**
<i>a</i> [*]	7.35±0.77	6.83±0.57
<i>b</i> [*]	8.12±0.18	8.78±0.67
硬度	44.47±1.96	45.53±1.72
弹性	2.52±0.04	2.44±0.02
感官评定	22.67±0.46	22.70±0.53

注: ***P*<0.01 表示差异极显著。



注: 其中W1C代表芳香族化合物, W5S代表氮氧化物, W3C代表氮和芳香族化合物, W6S代表氢化合物, W5C代表烯烃和芳香族化合物, W1S代表碳氢化合物, W1W代表无机硫化物、萜烯类物质, W2S代表醇和醛酮类化合物, W2W代表芳香类、有机硫化物, W3S代表烷烃甲烷化合物。

图3 减菌处理前后鲍鱼样品的电子鼻分析主成分分析结果(A)和相对强度雷达图(B)

Fig.3 Electronic nose analysis of *Abalone* before and after bacteria reduction principal component analysis (A) and relative strength radar map (B)

3 结 论

本研究利用超声波协同食品级 H_2O_2 对鲍鱼进行减菌处理,可以有效减少鲍鱼体表的微生物。 H_2O_2 在水中极易分解为水和氧气,避免其他过激减菌剂在食品中过度残留而可能带来的安全隐患。本研究在单因素实验的基础上,选择 H_2O_2 质量浓度、超声时间及超声功率为影响因子,减菌率为响应值进行响应面实验,得出最佳减菌条件: 400 W 超声功率协同质量浓度为 1.5 g/L 的食品级 H_2O_2 处理 4 min,在此条件下得到对鲍鱼的减菌率为 97.92%。同时,在该工艺条件下,鲍鱼肉的 *L*^{*} 显著升高(*P*<0.01),腥味有所减弱,其他品质得到较好的保持,为鲍鱼的工业化生产中减菌预处理方式提供理论支持。在实际生产中,可以与现有鲍鱼加工生产工艺中的保水、保色等处理工序相结合,提升鲍鱼的减菌效率,提高鲍鱼的综合品质。此外,超声波协同食品级 H_2O_2 处理对鲍鱼以及腥味物质结合能力的影响还需要进一步研究。

参考文献

[1] 游舒怡, 田晏, 张雯棋, 等. 加工方式对鲍鱼蛋白质及品质特性的影响研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(24): 230–238.
YOU SY, TIAN Y, ZHANG WQ, *et al.* Research progress on the effects of processing methods on protein and quality characteristics of abalone [J]. J Food Saf Food Qual, 2023, 14(24): 230–238.

[2] YU M, FAN Y, LI D, *et al.* Differences in texture and digestive properties of different parts in boiled abalone muscles [J]. Food Chem, 2022, 404(Pt A): 134514.

[3] 韦依依, 贾敏, 张涛, 等. 不同鲍鱼原料在热加工中的品质变化及条件优化[J]. 食品工业科技, 2017, 38(15): 181–184.
WEI N, JIA M, ZHANG T, *et al.* Quality changes and optimization of different abalones during heat processing [J]. Sci Technol Food Ind, 2017, 38(15): 181–184.

[4] LI Q, LU J, CHANG Y, *et al.* Effect of different cooking methods on nutritional intake and different storage treatments on nutritional losses of abalone [J]. Food Chem, 2022, 377: 132047.

[5] 刘萌, 桓霏, 张建华, 等. 鲍鱼及其制品加工与综合利用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(15): 47–54.
LIU M, HENG F, ZHANG JH, *et al.* Research advance in processing and comprehensive utilization of abalone and its products [J]. J Food Saf Qual, 2023, 14(15): 47–54.

[6] JO YJ, JUNG KH, LEE M, *et al.* Effect of high-pressure short-time processing on the physicochemical properties of abalone (*Haliotis discus hannai*) during refrigerated storage [Z]. 2014.

[7] 农业农村部渔业渔政管理局. 2023 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2023.
The Fisheries and Fisheries Administration Bureau of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs. 2022 China fisheries statistical yearbook [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2023.

[8] ODUNAYO O, BENJAKUL S. Natural preservatives for extending the shelf-life of seafood: A revisit [J]. Compr Rev Food Sci F, 2018. DOI: 10.1111/1541-4337.12390

[9] 李娜, 谢晶, 梅俊. 水产品优势腐败菌及致腐潜能综述[J]. 中国食品学报, 2024, 24(1): 407–417.
LI N, XIE J, MEI J. Review on dominant spoilage organism and spoilage potential of aquatic products [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2024, 24(1): 407–417.

[10] REBECCA S, ANNETTE F, CANGLIANG S. Literature review for applying peroxyacetic acid and/or hydrogen peroxide to control foodborne

- pathogens on food products [J]. *J Agric Food Res*, 2022. DOI: 10.1016/j.jafr.2022.100442
- [11] FAN X, SOKORAI KJB, GURTLE JB. Advanced oxidation process for the inactivation of *Salmonella typhimurium* on tomatoes by combination of gaseous ozone and aerosolized hydrogen peroxide [J]. *Int J Food Microbiol*, 2020, 312: 108387.
- [12] BHARGAVA N, MOR RS, KUMAR K, *et al*. Advances in application of ultrasound in food processing: A review [J]. *Ultrason Sonochem*, 2021. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2020.105293
- [13] 李元皓天, 胥凤芹, 罗欣, 等. 臭氧结合超声协同低浓度次氯酸钠复合处理对冰鲜鸡腿的保鲜效果[J]. 肉类研究, 2023, 37(12): 46–53.
LI YHT, XU FQ, LUO X, *et al*. Synergetic effects of ozone water combined with ultrasonic and low-concentration sodium hypochlorite on the preservation of chilled chicken thighs [J]. *Meat Res*, 2023, 37(12): 46–53.
- [14] 李银江. 高频超声波联合次氯酸钠杀菌机理及应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
LI YH. Antibacterial mechanism of high-frequency ultrasound combined with sodium hypochlorite and their application [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [15] CICHOSKI AJ, FLORES DRM, MENEZES CRD, *et al*. Ultrasound and slightly acid electrolyzed water application: An efficient combination to reduce the bacterial counts of chicken breast during pre-chilling [J]. *Int J Food Microbiol*, 2019, 301: 27–33.
- [16] 王可. 木质化鸡胸肉分级模型构建与过氧化氢体外氧化肌原纤维蛋白劣变机制及功能特性改善[D]. 泰安: 山东农业大学, 2023.
WANG K. Construction of grading model of wooden breast and degradation mechanism of myofibrillar protein oxidized by hydrogen peroxide in vitro and improvement of functional characteristics [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2023.
- [17] LIU J, LI X, GENG F, *et al*. Ultrasound-assisted improvement of thawing quality of Tibetan pork by inhibiting oxidation [J]. *Ultrason Sonochem*, 2024, 110: 107029.
- [18] LU W, QIN Y, RUAN Z. Effects of high hydrostatic pressure on color, texture, microstructure, and proteins of the tilapia (*Oreochromis niloticus*) surimi gels [J]. *J Texture Stud*, 2020, 52(2): 177–186.
- [19] ISETH SK, DELAHUNTY C, COCHET M, *et al*. Why is abalone so chewy? Structural characterization and relationship to textural attributes [J]. *J Shellfish Res*, 2013, 32(1): 73–79.
- [20] 吴靖娜, 路海霞, 刘智禹, 等. 用电子鼻和 SPME-GC-MS 分析鲍鱼熟制前后挥发性风味物质的变化[J]. 大连海洋大学学报, 2016, 31(4): 431–437.
WU JN, LU HX, LIU ZY, *et al*. Changes in flavor volatile compounds in discus abalone *Haliotis discus hannai* Ino before and after cooked by electronic nose and solid phase micro-extraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry [J]. *J Dalian Ocean Univ*, 2016, 31(4): 431–437.
- [21] 朱卫忠. 蒙脱土—丁香精油杂化抗菌材料的制备及其在鲍鱼保鲜中的应用研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2024.
ZHU WZ. Preparation of montmorillonite-clove essential oil hybrid antimicrobial material and its application in abalone preservation [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2024.
- [22] 闫玉红, 黄卉, 李来好, 等. 5 种氧化型减菌剂对罗非鱼片品质及蛋白质的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(6): 15–23.
YAN YH, HUANG H, LI LH, *et al*. Effects of five oxidative decontaminating agents on the quality and proteins of tilapia fillets [J]. *Food Sci*, 2024, 45(6): 15–23.
- [23] 陈超, 陶倩, 柳琦. 食品级过氧化氢在食品工业中的应用[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(12): 220–224.
CHEN C, TAO Q, LIU Q. The application of food grade hydrogen peroxide in food industry [J]. *Food Res Dev*, 2018, 39(12): 220–224.
- [24] 杨贤庆, 郝淑贤, 石红, 等. 食品级过氧化氢对染菌罗非鱼片杀菌效果研究[J]. 食品工业科技, 2007(1): 90–92.
YANG XQ, HAO SX, SHI H, *et al*. Bactericidal effect of food-grade hydrogen peroxide on tilapia fillets infected with bacteria [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2007(1): 90–92.
- [25] LIU B, LIAO Y, JIANG L, *et al*. Effects of ultrasound-assisted immersion freezing on the protein structure, physicochemical properties and muscle quality of the bay scallop (*Argopecten irradians*) during frozen storage [J]. *Foods*, 2022, 11(20): 3247.
- [26] SUNGSUE R. Optimizing food processing through a new approach to response surface methodology [J]. *Food Sci Anim Resour*, 2023, 43(2): 374–381.
- [27] THANONKAEW A, BENJAKUL S, VISESSANGUAN W, *et al*. The effect of antioxidants on the quality changes of cuttlefish (*Sepia pharaonis*) muscle during frozen storage [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2007, 41(1): 161–169.
- [28] MAGRI CTN, SARTORI SDAJ, JARA PLJ, *et al*. Precipitation of nonsugars as a model of color reduction in sugarcane juice (*Saccharum spp.*) submitted to the hydrogen peroxide clarification of the crystal sugar process [J]. *J Food Process Pres*, 2019, 43(10): 14137.
- [29] KANG D, ZOU Y, CHENG Y, *et al*. Effects of power ultrasound on oxidation and structure of beef proteins during curing processing [J]. *Ultrason Sonochem*, 2016, 33: 47–53.
- [30] 蔡路昀, 马帅, 曹爱玲, 等. 烤制温度对沙丁鱼块挥发性风味物质的影响[J]. 中国食品学报, 2017, 17(6): 195–205.
CAI LJ, MA S, CAO AIL, *et al*. Effect of roasting temperatures on aroma compounds of sardine fillets [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2017, 17(6): 195–205.
- [31] KONG Y, WU Z, LI Y, *et al*. Analyzing changes in volatile flavor compounds of soy protein isolate during ultrasonic-thermal synergistic treatments using electronic nose and HS-SPME-GC-MS combined with chemometrics [J]. *Food Chem*, 2024, 445: 138795.
- [32] 邱文兴, 杜柳, 易弛, 等. 不同加热方式结合迷迭香对大口黑鲈脂质氧化及其风味的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(11): 43–51.
QIU WX, DU L, YI C, *et al*. Effects of different heating methods combined with rosmarinus on lipid oxidation and its flavour in *Micropterus salmoides* [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, 14(11): 43–51.
- [33] 杨凯, 张森, 胡乐, 等. 脱腥剂在我国鱼类脱腥处理中的研究进展[J]. 食品工业, 2018, 39(8): 217–220.
YANG K, ZHANG M, HU L, *et al*. Research progress of deodorization agent in fish deodorization treatment in china [J]. *Food Ind*, 2018, 39(8): 217–220.
- [34] 杨运懿. 双氧水适度氧化处理对鱼糜凝胶腥味脱除及品质特性的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
YANG YY. Effect of hydrogen peroxide moderate oxidation treatment on fishy off-odor deodorization and quality of surimi gel [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.

(责任编辑: 于梦娇 韩晓红)

作者简介



田 晏, 硕士研究生, 主要研究方向为食品加工与安全。
E-mail: TY912912@163.com



曾红亮, 博士, 教授, 主要研究方向为海洋生物资源开发与综合利用。
E-mail: zhlfst@fafu.edu.com