

超声联合微酸性电解水处理克氏原螯虾条件优化及其品质影响

李佳¹, 钟洪亮¹, 丁甜², 韩文静³, 刘书成^{1,4}, 魏帅^{1,4*}

(1.广东海洋大学 a.食品科技学院 b.广东省水产品加工与安全重点实验室 c.广东省海洋生物制品工程实验室 d.广东省海洋食品工程技术研究中心 e.水产品深加工广东普通高等学校重点实验室, 广东湛江 524088; 2.浙江大学 生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058; 3.淮安渔姑娘食品科技开发有限公司, 江苏 淮安 223100; 4.大连工业大学 海洋食品精深加工关键技术省部共建协同创新中心, 辽宁 大连 116034)

摘要: **目的** 探寻超声协同微酸性电解水处理对克氏原螯虾杀菌效果以及贮藏期品质的影响。**方法** 考察微酸性电解水有效氯浓度、浸泡时间、超声功率三者分别对微生物的影响, 分析4℃贮藏期间联合处理对克氏原螯虾菌落总数、总挥发性盐基氮、丙二醛、色差、感官等的影响。**结果** 在微酸性电解水中浸泡10 min、有效氯浓度为60 mg/L、超声功率为405 W的条件下, 克氏原螯虾菌落总数与空白组相比降低了1.48 lg(CFU/g), 与单一处理相比杀菌作用更强。在冷藏期间, 联合处理组能够抑制克氏原螯虾菌落总数的增长, 其总挥发性盐基氮和丙二醛的上升速度均低于未处理组, 对延缓样品的脂肪氧化与腐败变质有较好效果。**结论** 与对照组相比, 超声协同微酸性电解水处理有良好的杀菌效果, 能更好地保持克氏原螯虾的品质并延长冷藏货架期至4 d以上。

关键词: 克氏原螯虾; 超声结合微酸性电解水; 杀菌; 贮藏; 品质

中图分类号: S983 文献标志码: A 文章编号: 1001-3563(2024)03-0139-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.03.016

Optimization of Ultrasound and Slightly Acidic Electrolyzed Water for Crayfish Treatment and Its Effect on Quality during Storage

LI Jia¹, ZHONG Hongliang¹, DING Tian², HAN Wenjing³, LIU Shucheng^{1,4}, WEI Shuai^{1,4*}

(1.a. College of Food Science and Technology, b. Guangdong Provincial Key Laboratory of Aquatic Products Processing and Safety, c. Guangdong Province Engineering Laboratory for Marine Biological Products, d. Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center of seafood, e. Key Laboratory of Advanced Processing of Aquatic Product of Guangdong Higher Education Institution, Guangdong Ocean University, Guangdong Zhanjiang 524088, China;

2. School of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

3. Huaian Fisherman Food Technology Development Co., Ltd., Jiangsu Huai'an 223100, China;

4. Collaborative Innovation Center of Seafood Deep Processing, Dalian Polytechnic University,

Liaoning Dalian 116034, China)

收稿日期: 2023-06-27

基金项目: 广东省教育厅重点项目(2022ZDZX4014); 江苏省苏北科技专项(SZ-HA2021017); 国家虾蟹产业技术体系(CARS-48)

*通信作者

ABSTRACT: The work aims to investigate the sterilization effect and changes of storage quality of crayfish treated by ultrasound and slightly acidic electrolyzed water (US-SAEW). The effects of available chlorine concentration (ACC) of SAEW, soaking time, and US power on microorganisms were evaluated. The effect of combined treatment on the total bacteria, total volatile base nitrogen (TVB-N), malondialdehyde (MDA), color difference, and sensory characteristics of crayfish during storage at 4°C were analyzed. The results showed that when the crayfish were treated with US-SAEW at ACC of 60 mg/L, and ultrasonic power of 405 W for 10 min, the total bacteria of crayfish decreased by 1.48 lg CFU/g compared with the blank group, indicating a stronger bactericidal effect compared with the single treatment. During the cold storage, the growth of the total bacteria was inhibited by US-SAEW, and the rate of increase in total volatile base nitrogen and malondialdehyde was lower than that of the blank group, which showed a positive effect on delaying the fat oxidation and spoilage of samples. Thus, compared with the control group, US-SAEW treatment has a good bactericidal effect, which could better maintain the quality of crayfish and extend the refrigerated shelf life by at least 4 days.

KEY WORDS: crayfish; ultrasound combined with slightly acidic electrolyzed water; sterilization; storage; quality

克氏原螯虾, 俗称小龙虾 (*Procambarus clarkii*), 广泛分布在湖泊、河流和稻田等淡水中^[1]。其独特风味和鲜美肉质备受消费者青睐, 具有高蛋白、低脂肪的特点, 富含人体必需的氨基酸和大量不饱和脂肪酸及微量元素等^[2]。2022年克氏原螯虾产业发展报告指出, 克氏原螯虾养殖产量位居我国淡水养殖品种的第6位, 总产值为4 221.95亿元, 同比增长22.43%, 在水产预制菜加工产业中具有重要地位^[3]。

克氏原螯虾中存在大量自由氨基酸, 是细菌的生长基质, 且虾肉的水分活度高, 易发生腐败变质^[4]。此外, 克氏原螯虾虾体与水环境直接接触, 受环境水域影响, 自身微生物污染严重^[5]。与其他水产品相似, 克氏原螯虾品质在运输、储藏过程中也易受微生物活动破坏^[6]。如2011年报道的因食用克氏原螯虾出现副溶血性弧菌群体食物中毒事件^[7], 在克氏原螯虾样本中分别检出大肠菌群、金黄色葡萄球菌、沙门氏菌与副溶血性弧菌等4种致病菌^[8]。因此, 需加强对克氏原螯虾的微生物污染控制。

微酸性电解水 (Slightly Acidic Electrolyzed Water, SAEW) 是一种绿色杀菌剂^[9], 其可在细胞水平上破坏脂多糖, 造成金属离子泄露、肽聚糖层失序, 破坏细胞膜; 在分子水平上导致酶结构受损、核糖体泄露以及RNA的异常合成^[10]。超声 (Ultrasound, US) 利用超声波产生的空化现象灭活微生物, 增加各种微生物的热敏性, 且能维持食品原有品质^[11]。目前, 超声协同微酸性电解水联合杀菌处理 (US-SAEW) 的研究主要应用在果蔬、禽畜肉方面, 在水产品贮藏保鲜中的应用研究较少。Cichoski等^[12]发现, US-SAEW处理能有效杀灭鸡肉表面细菌, 较好维持鸡肉肌原纤维蛋白结构的稳定。Li等^[13]采用US-SAEW处理甘薯, 发现该技术可有效灭活甘薯块根的匍匐茎根霉, 延长甘薯的贮藏期。Li等^[14]研究发现US-SAEW处理可抑制假单胞菌的生长, 减少欧洲鲤在冷藏过程中的水分损失、脂质氧化和蛋白质降解。此外, 蓝蔚青等^[15]发现

US-SAEW能抑制海鲈鱼肉样品在贮藏期间的菌落总数与嗜冷菌生长, 并延长6d货架期。

本文探究SAEW和US处理条件对克氏原螯虾微生物和品质的影响, 并监测冷藏过程中克氏原螯虾的品质变化, 以期为克氏原螯虾的保鲜加工提供新技术方法。

1 实验

1.1 材料与试剂

主要材料: 鲜活克氏原螯虾 (质量约30~35g), 购于广东省湛江市霞山批发市场。

主要试剂: 氯化钠、硼酸, 西陇科学股份有限公司, 为国产分析纯; 氧化镁, 上海麦克林生化科技有限公司, 为国产分析纯; 0.1 mol/L标准盐酸滴定液, 上海安谱实验科技股份有限公司; 营养琼脂、甘露醇氯化钠琼脂 (MSA)、假单胞菌琼脂基础培养基 (CN), 北京陆桥技术股份有限公司; 丙二醛 (MDA) 含量检测试剂盒, 北京索莱宝科技有限公司。

1.2 仪器与设备

主要仪器与设备: AnyWhere-320W酸性氧化电位水机, 北京睿安德环保设备有限公司; NE-1500Z超声波处理器, 上海方需科技有限公司; PTH-027型双量程余氯测试计, 英国百灵达有限公司; CYDC-2010匀速率控恒温槽, 杭州川一仪器实验有限公司; VAPODEST-450型全自动凯氏定氮仪, 德国格哈特分析仪器有限公司; CR-20色差仪, 日本美能达公司。

1.3 样品前处理

整体克氏原螯虾: 将10只中等大小均匀鲜活的克氏原螯虾打碎, 取3个平行。克氏原螯虾肉: 将3只中等大小均匀的鲜活克氏原螯虾用冰水猝死, 剥壳取肉, 搅碎, 取3个平行。

1.4 单一条件以及 US-SAEW 处理对克氏原螯虾的影响

1.4.1 微酸性电解水制备

采用酸性氧化电位水生成器电解 pH 值为 1.1 的稀盐酸以及质量分数为 2% 的氯化钠混合溶液, 制得 SAEW 参数如下: pH 值为 5.91 ± 0.40 , 氧化还原电位 (Oxidation-Reduction Potential, ORP) 值为 (900.0 ± 50.0) mV, 有效氯浓度 (Available Chlorine Concentration, ACC) 为 (150.0 ± 30.0) mg/L。

1.4.2 微酸性电解水浓度对克氏原螯虾微生物的影响

将制备的微酸性电解水稀释成不同浓度, 取 3 只中等大小均匀的新鲜整体克氏原螯虾, 按虾水比 (g/mL) 1:10 的比例放入装有 SAEW 的烧杯中; 分别用 ACC 值为 20、40、60 mg/L 的微酸性电解水浸泡 10 min, 测定不同浓度 SAEW 对其菌落总数的影响。

1.4.3 处理时间对克氏原螯虾微生物的影响

取 3 只中等、大小均匀的新鲜整体克氏原螯虾, 选择 1.4.2 节中最适 ACC 的微酸性电解水, 按虾水比 (g/mL) 1:10 的比例放入烧杯中, 分别浸泡 5、10、20、30 min, 测定 SAEW 不同处理时间对其菌落总数的影响。

1.4.4 超声功率对克氏原螯虾微生物的影响

取 3 只中等大小均匀的新鲜整体克氏原螯虾, 按虾水比 (g/mL) 1:10 的比例放入烧杯中, 调节功率分别为 255、300、360、405 W 进行超声处理, 根据 1.4.2 节与 1.4.3 节的实验结果选择 SAEW 的 ACC 以及超声时间, 测定不同功率处理对其菌落总数的影响。

1.4.5 超声联合微酸性电解水处理对克氏原螯虾微生物的影响

联合微酸性电解水和超声处理克氏原螯虾, 测定经处理后整体克氏原螯虾的菌落总数、金黄色葡萄球菌数以及假单胞菌数。

1.4.6 贮藏实验

将鲜活克氏原螯虾用冰水猝死, 超声联合微酸性电解水处理之后取出沥干, 于 4 °C 冰箱中贮藏。于 0、2、4、6、8 d 对其进行菌落总数、TVB-N、MDA 值、色差分析以及感官评定。

1.5 指标测定

1.5.1 微生物测定

菌落总数测定依据 GB 4789.2—2022《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数的测定》方法, 将样品按 1:9 比例用 0.85% 无菌生理盐水稀释, 均质, 无菌吸取 1.0 mL 进行 10 倍梯度稀释, 选择 2~3 个适宜稀释度涂板于营养琼脂平板、金黄色葡萄球菌选择培养基平板、假单胞菌选择培养基平板, 倒置于 36 °C 恒温培养箱培养 72 h, 计算菌落总数, 单位为 CFU/g。

1.5.2 丙二醛 (MDA) 测定

按照丙二醛 (MDA) 含量检测试剂盒说明书要求测定, 并计算贮藏期间克氏原螯虾 MDA 含量变化, 结果以 mg/kg 表示。

1.5.3 总挥发性盐基氮 (TVB-N) 测定

参考 GB 5009.228—2016《食品中挥发性盐基氮的测定》, 使用自动凯氏定氮仪测定样品的 TVB-N 含量。准确称量 (1.0 ± 0.1) g 的样品放入 50 mL 离心管中, 加入 7.5 mL 蒸馏水, 经均质后将离心管中的样品全部洗入消化管中, 于上机前加入 0.1 g 氧化镁。使用 (0.100 ± 0.001) mol/L 的盐酸标准滴定溶液, 以 20.0 g/L 硼酸为吸收液, 记录所得样品的响应值, 重复 3 次。

1.5.4 感官评定

参照 SB/T 10876—2012《淡水小龙虾购销规范》与孔金花等^[16]方法, 在光线充足, 无异味的环境中, 将克氏原螯虾置于白色搪瓷盘中逐项检验, 评价标准如表 1 所示。由 10 名提前经过感官评价培训的食品专业人员进行感官评价 (男女比例为 1:1)^[17], 根据评定标准对克氏原螯虾的品质打分。每名人员的评分是 2 项评分指标的平均分, 最终得分是所有评价人员的平均分。

表 1 克氏原螯虾感官评定
Tab.1 Sensory evaluation of crayfish

评分指标	优秀 (10 分)	良好 (8 分)	一般 (6 分)	较差 (4 分)	差 (2 分)
颜色与形态	颜色均匀, 色泽和光泽好; 肌肉弹性好	色泽正常, 稍有光泽; 肌肉略有弹性	色泽较暗, 稍有光泽; 肌肉弹性较差	色泽暗, 无光泽; 肌肉弹性差	色泽发生明显变化, 无光泽; 肌肉组织松软
气味	气味正常, 具有克氏原螯虾的固有鲜味	无异味, 克氏原螯虾的固有鲜味明显, 略带电解水味	克氏原螯虾的固有鲜味较弱, 电解水味道较明显	无龙虾的固有鲜味, 电解水味道明显	有异味, 有强烈的电解水味

1.5.5 色差分析

参考孔金花等^[16]法,采用色差仪测定克氏原螯虾虾肉腹部表面颜色。分析前用标准黑白板对仪器进行校正,校正完成后对每组 L^* 、 a^* 、 b^* 进行3次平行分析,分别为明度(黑-白=0-100分)、红度或绿度、黄度或蓝度。

1.6 数据处理

实验结果均以平均值±标准差表示。采用 SPSS Statistics 20 进行单因素方差分析,用 LSD 法和 Duncan 多重比较进行显著性分析;采用 Origin 2023b 统计软件作图等。

2 结果与分析

2.1 单一条件以及 US-SAEW 处理对克氏原螯虾微生物的影响分析

根据美国 FDA 发布的“有效食品接触物质通知清单”,次氯酸水有效氯浓度不得超过 60 mg/L。实验选取 ACC 值分别为 20、40 和 60 mg/L 的 SAEW 处理克氏原螯虾,实验结果如图 1a 所示。当 ACC 值为 60 mg/L 时,杀菌效果最好,显著优于空白组 ($P<0.05$),与空白

组相比,整体克氏原螯虾的菌落总数减少了 0.88 lg(CFU/g),故后续选择 ACC 值为 60 mg/L 的 SAEW 进行实验。在此浓度下,采用 SAEW 浸泡 30 min 时杀菌效果最好,SAEW 浸泡 10 min 与空白组相比整体克氏原螯虾菌落总数减少了 0.98 lg(CFU/g),但与浸泡时间为 20 min 与 30 min 的处理组无显著性差异 ($P>0.05$)。综合生产效率因素,选择 SAEW 处理时间为 10 min。

在 ACC 值为 60 mg/L、超声功率为 405 W 时,处理 10 min 对克氏原螯虾的杀菌效果最好,处理效果显著优于其他处理组和空白组 ($P<0.05$)。此时菌落总数为 7.35 lg(CFU/g),与空白组相比整体克氏原螯虾菌落总数减少了 0.70 lg(CFU/g)。后续贮藏实验选择 ACC 值为 60 mg/L 的 SAEW 与超声功率 405 W 联合处理 10 min。

经 US-SAEW 杀菌处理后克氏原螯虾虾肉的菌落总数、金黄色葡萄球菌数和假单胞菌数与未处理组相比均有显著性差异 ($P<0.05$)。克氏原螯虾初始菌落总数为 6.38 lg(CFU/g),处理后的菌落总数为 4.90 lg(CFU/g)。其中 US-SAEW 对假单胞菌的杀菌效果优于对金黄色葡萄球菌的杀菌效果,与对照组相比菌落总数减少了 0.92 lg(CFU/g)。Lan 等^[18]研究也发现 US-SAEW 能有效杀灭鲑鱼片中假单胞菌与产 H_2S 菌。

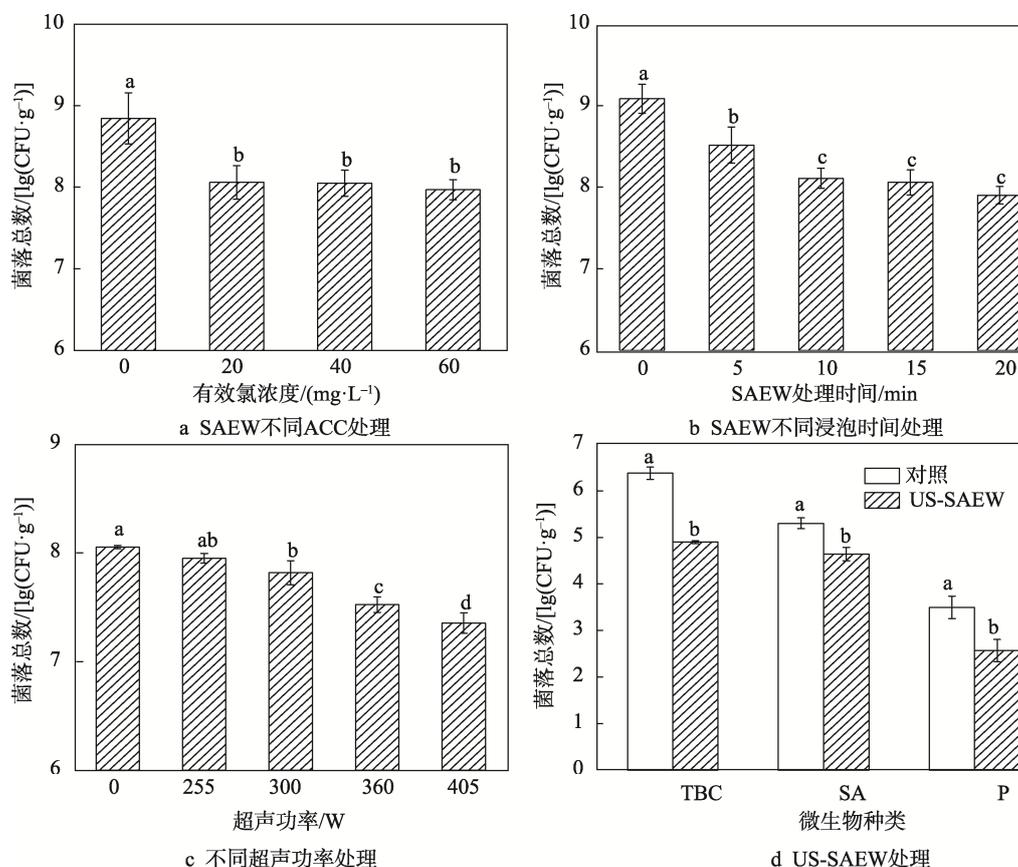


图 1 不同条件处理对克氏原螯虾微生物的影响

Fig.1 Effects of different conditions on crayfish microorganisms

注: TBC 为菌落总数 (Total Bacterial Colonies), SA 为金黄色葡萄球菌计数 (*Staphylococcus aureus*), P 为假单胞菌计数 (*Pseudomonas*); 不同小写字母表示不同处理间具有显著性差异 ($P<0.05$), 下同。

2.2 克氏原螯虾贮藏实验结果分析

随着贮藏时间的延长, 克氏原螯虾对照组和处理组的菌落总数均逐渐增加。在 4 °C 贮藏期间内, US-SAEW 处理后克氏原螯虾的菌落总数始终小于对照组 (图 2a)。克氏原螯虾初始菌落总数为 6.38 lg (CFU/g), 处理后的菌落总数为 4.90 lg (CFU/g)。贮藏至第 8 天时, 对照组的菌落总数为 7.16 lg (CFU/g), 处理组的菌落总数为 5.96 lg (CFU/g)。超声的空化作用破坏了微生物的结构, 增加了 SAEW 与菌体的作用面积, US-SAEW 处理有协同作用, US 促进 SAEW 的杀菌效果^[19]。

总挥发性盐基氮是蛋白质和非蛋白质的氮化合物降解所产生的碱性挥发性化合物的总称^[20]。根据 GB 2733—2015《食品安全国家标准 鲜、冻动物性水产品》的规定, 淡水鱼虾的 TVB-N 的限值不得超过 20 mg/100 g。各组的 TVB-N 值均随着贮藏时间的延长而逐渐上升 (图 2b), 而 US-SAEW 组的 TVB-N 值增长速度低于对照组的。未处理的克氏原螯虾在第 4 天时的 TVB-N 含量达到 25.25 mg/100 g, 含量已超过限值, 而此时 US-SAEW 处理后的克氏原螯虾 TVB-N 含量为 19.97 mg/100 g, 第 6 天时达到货架期终点。

丙二醛 (MDA) 值反映脂类氧化程度。MDA 值

越高, 脂肪的氧化程度越大, 即 MDA 值越大, 腐败程度就越严重^[21]。克氏原螯虾肉 MDA 值的变化趋势如图 2c 所示。在冷藏期间, MDA 值呈先降低后升高的变化趋势。在第 0 天时, 用 US-SAEW 处理的虾肉的 MDA 值与对照组的 MDA 值相差不大, 其他冷藏时间处理组的 MDA 含量均低于对照组的 MDA 值。

由图 2d 可知, 随着贮藏时间的增加, 对照组和处理组的感官评分均下降, 且同一处理不同贮藏时间有显著性差异 ($P < 0.05$)。第 0 天对照组克氏原螯虾的感官评分略高于处理组, 其含有轻微的电解水味。在贮藏第 8 天, 对照组虾头黑变和肌肉松散程度高于处理组, US-SAEW 能保持贮藏期内克氏原螯虾的肌肉品质。

克氏原螯虾在 4 °C 贮藏期间的色差结果如表 2 显示, 对照组和处理组的 L^* 值和 b^* 值均逐渐上升, 而其 a^* 值均逐渐降低。其中实验组的 L^* 值和 b^* 值的增幅均低于对照组的, a^* 值则反之。 L^* 值上升的原因可能是随着贮藏期延长虾体肌肉失水, 其表面的自由水增加, 光反射增强, 与肌肉的损伤程度有关^[22]。 b^* 值上升的原因可能是脂肪氧化与褐变反应产生黄色素沉淀^[23]。 a^* 值的降低程度可能与肌红蛋白的变性与流失呈正相关^[24]。这些实验结果表明, US-SAEW 处理能延缓克氏原螯虾品质的劣变。

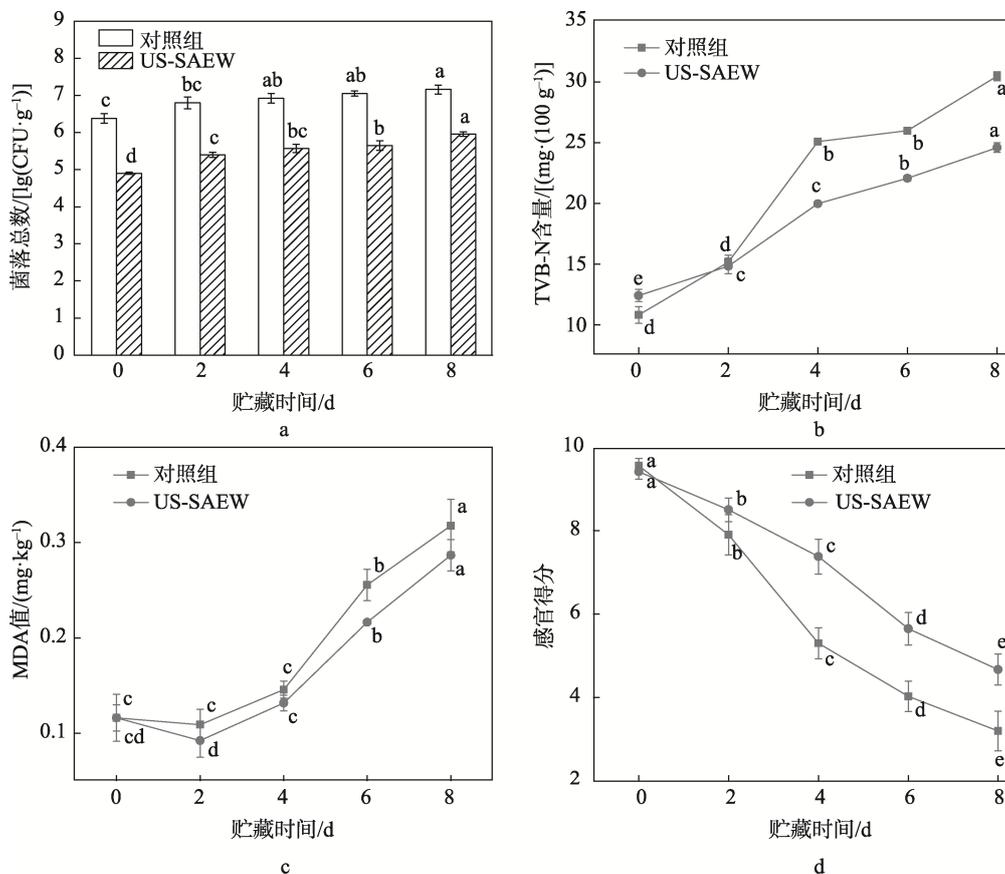


图 2 克氏原螯虾在 4 °C 贮藏期间菌落总数 (a)、TVB-N 值 (b)、MDA 值 (c) 和感官评分 (d) 的变化

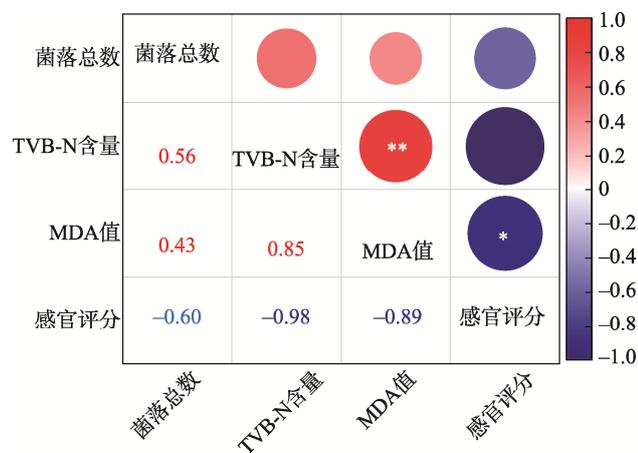
Fig.2 Changes of total bacterial count (a), TVB-N value (b), MDA value (c) and sensory score (d) of crayfish during storage at 4 °C

表2 克氏原螯虾在4℃贮藏期间色差的变化
Tab.2 Changes in color difference of crayfish during storage at 4℃

组别	色差	时间/d				
		0	2	4	6	8
对照	L^*	35.67±0.25 ^d	40.27±1.17 ^c	42.00±0.85 ^{bc}	42.40±0.66 ^b	48.60±1.59 ^a
	a^*	4.97±0.15 ^e	4.30±0.17 ^d	2.63±0.15 ^c	2.20±0.17 ^b	1.03±0.29 ^a
	b^*	2.43±0.06 ^e	5.27±0.55 ^d	7.97±0.38 ^c	9.07±0.42 ^b	11.67±0.15 ^a
US-SAEW	L^*	33.97±0.15 ^d	37.77±1.16 ^c	38.97±0.35 ^c	41.55±0.78 ^b	47.37±0.25 ^a
	a^*	5.45±0.07 ^e	4.87±0.12 ^d	3.55±0.21 ^c	2.45±0.07 ^b	1.67±0.25 ^a
	b^*	2.20±0.10 ^d	3.37±0.12 ^c	6.53±0.55 ^b	7.87±0.45 ^a	8.30±0.35 ^a

2.3 相关性分析

由图3可知,在贮藏期间克氏原螯虾菌落总数与TVB-N含量呈正相关,与感官评分呈现负相关;TVB-N含量与MDA含量呈显著正相关,与感官评分呈显著负相关。随着贮藏期延长,克氏原螯虾菌落总数、TVB-N含量与MDA值增加,感官评分降低的同时,微生物引起腐败变质开始加剧,鲜度越低,脂肪氧化程度越大,品质劣变程度越高。



* $P \leq 0.05$

图3 克氏原螯虾在4℃贮藏期间各项指标相关性分析

Fig.3 Correlation analysis of various indexes of crayfish during storage at 4℃

3 结语

采用微酸性电解水有效氯浓度60 mg/L并联合超声功率405 W处理10 min,克氏原螯虾菌落总数与对照组相比降低了1.48 lg(CFU/g),与单一处理相比杀菌作用更强。US-SAEW处理能够显著降低克氏原螯虾肉中的菌落总数、金黄色葡萄球菌数和假单胞菌数,其中对假单胞菌的杀菌效果最好,假单胞菌减少了0.92 lg(CFU/g)。经处理后的克氏原

螯虾在4℃贮藏期间内,菌落总数均低于对照组,贮藏至第8天时,处理组的菌落总数显著低于对照组的。根据菌落总数的影响结果分析可知,与对照组相比,US-SAEW处理可延长克氏原螯虾贮藏期至少4 d,减缓了TVB-N与MDA值的升高,且有助于保持贮藏期克氏原螯虾的肌肉品质,延缓品质劣变。因此,超声结合微酸性电解水处理能够延长克氏原螯虾的货架期,在水产品保鲜上具有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] ANANDKUMAR A, LI J, PRABAKARAN K, et al. Accumulation of Toxic Elements in an Invasive Crayfish Species (*Procambarus clarkii*) and Its Health Risk Assessment to Humans[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2020, 88: 103449.
- [2] HOU J, STYLES D, CAO Y X, et al. The Sustainability of Rice-Crayfish Coculture Systems: A Mini Review of Evidence from Jiangnan Plain in China[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101(9): 3843-3853.
- [3] 全国水产技术推广总站, 中国水产学会, 中国水产流通与加工协会. 中国小龙虾产业发展报告(2022)[N]. 中国渔业报, 2022-06-13(004). National Aquatic Technology Extension Station, China Aquatic Association, China Aquatic Circulation and Processing Association. China Crayfish Industry Development Report(2022)[N]. China Fisheries Journal, 2022-06-13(004).
- [4] 汤纯. 小龙虾细菌污染情况调查及控制技术研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2020: 1. TANG C. Investigation on Bacterial Pollution of Crayfish and Study on Its Control Technology[D]. Yangzhou:

- Yangzhou University, 2020: 1.
- [5] KAMADIA V V, SCHILLING M W, MARSHALL D L. Cooking and Packaging Methods Affect Consumer Acceptability and Shelf Life of Ready-to-Eat Gulf Brown Shrimp[J]. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 2013, 22(2): 146-159.
- [6] 江杨阳, 杨水兵, 余海霞, 等. 基于培养基法和高通量测序法分析冷藏小龙虾优势腐败菌[J]. *食品科学*, 2019, 40(16): 130-136.
- JIANG Y Y, YANG S B, YU H X, et al. Analysis of Specific Spoilage Organisms in Chilled Red Swamp Crayfish Using Culture-Dependent Method and High-Throughput Sequencing[J]. *Food Science*, 2019, 40(16): 130-136.
- [7] 孙吉昌, 游兴勇, 刘成伟, 等. 一起由副溶血性弧菌致群体性食物中毒的调查报告[J]. *中国食品卫生杂志*, 2012, 24(1): 89-91.
- SUN J C, YOU X Y, LIU C W, et al. A Case Report on Mass Food Poisoning Caused by *Vibrio Parahaemolyticus*[J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2012, 24(1): 89-91.
- [8] 金璇, 俞兴伟, 杨章力, 等. 小龙虾重金属和微生物含量检测及食用建议[J]. *分析仪器*, 2020(2): 61-69.
- JIN X, YU X W, YANG Z L, et al. Heavy Metal and Microbiological Test of Crayfish and Recommendations for Consumption[J]. *Analytical Instrumentation*, 2020(2): 61-69.
- [9] 蓝蔚青, 赵家欣, 张溪, 等. 微酸性电解水-复合保鲜剂对冷藏凡纳滨对虾品质及菌群结构影响[J]. *广东海洋大学学报*, 2021, 41(6): 91-98.
- LAN W Q, ZHAO J X, ZHANG X, et al. Effects of Mixture of Slightly Acidic Electrolytic Water and Compound Preservative on the Quality and Microflora Structure of *Litopenaeus Vannamei* during Refrigerated Storage[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2021, 41(6): 91-98.
- [10] 许愈. 酸性电解水结合超声波杀菌机制的初步研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019: 24-25.
- XU Y. Preliminary Study on the Mechanism of Acidic Electrolyzed Water Combined with Ultrasonic Sterilization[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019: 24-25.
- [11] LI X, FARID M. A Review on Recent Development in Non-Conventional Food Sterilization Technologies[J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 182: 33-45.
- [12] CICHOSKI A J, FLORES D R M, DE MENEZES C R, et al. Ultrasound and Slightly Acid Electrolyzed Water Application: an Efficient Combination to Reduce the Bacterial Counts of Chicken Breast during Pre-Chilling[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2019, 301: 27-33.
- [13] LI L L, MU T H, ZHANG M. Contribution of Ultrasound and Slightly Acid Electrolytic Water Combination on Inactivating *Rhizopus Stolonifer* in Sweet Potato[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 73: 105528.
- [14] LI F F, ZHONG Q, KONG B H, et al. Synergistic Effect and Disinfection Mechanism of Combined Treatment with Ultrasound and Slightly Acidic Electrolyzed Water And Associated Preservation of Mirror Carp (*Cyprinus Carpio* L.) during Refrigeration Storage[J]. *Food Chemistry*, 2022, 386: 132858.
- [15] 蓝蔚青, 张炳杰, 周大鹏, 等. 超声联合微酸性电解水处理对真空包装海鲈鱼冷藏期间品质变化的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(5): 62-68.
- LAN W Q, ZHANG B J, ZHOU D P, et al. Effect of Ultrasonic Combined With Slightly Acidic Electrolyzed Water Treatment on Quality Changes of Vacuum-Packaged Sea Bass (*Lateolabrax Japonicus*) During Refrigerated Storage[J]. *Food Science*, 2022, 43(5): 62-68.
- [16] 孔金花, 诸永志, 葛庆丰, 等. 超声波协同微酸性电解水对小龙虾净化及品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(21): 182-189.
- KONG J H, ZHU Y Z, GE Q F, et al. Effect of Ultrasonic and Slightly Acidic Electrolyzed Water ON The Purification And Quality of Crayfish[J]. *Science And Technology of Food Industry*, 2021, 42(21): 182-189.
- [17] 张泽伟, 吉宏武, 段伟文, 等. 两种灭菌方式对熟制小龙虾冷藏期间品质的影响[J]. *广东海洋大学学报*, 2019, 39(6): 93-100.
- ZHANG Z W, JI H W, DUAN W W, et al. Effect of Two Sterilization Treatment on the Quality of Cooked Crayfish (*Procambarus Clarkii*) Product During Refrigerated Storage[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2019, 39(6): 93-100.
- [18] LAN W Q, LANG A, ZHOU D P, et al. Combined Effects of Ultrasound and Slightly Acidic Electrolyzed Water on Quality of Sea Bass (*Lateolabrax Japonicus*) Fillets during Refrigerated Storage[J]. *Ultrasonics So-*

- nochemistry, 2021, 81: 105854.
- [19] PALANISAMY N, SEALE B, TURNER A, et al. Low Frequency Ultrasound Inactivation of Thermophilic Bacilli (*Geobacillus* SPP. and *Anoxybacillus Flavithermus*) in the Presence of Sodium Hydroxide and Hydrogen Peroxide[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 51: 325-331.
- [20] XU J, SUN Q, DONG X, et al. Insight into the Microorganisms, Quality, and Protein Structure of Golden Pompano (*Trachinotus ovatus*) Treated with Cold Plasma at Different Voltages[J]. *Food Chemistry: X*, 2023, 18: 100695.
- [21] BARRERA G, PIZZIMENTI S, DAGA M, et al. Lipid Peroxidation-Derived Aldehydes, 4-Hydroxynonenal and Malondialdehyde in Aging-Related Disorders[J]. *Antioxidants*, 2018, 7(8): 102.
- [22] LU H, ZHANG L, SHI J, et al. Effects of Frozen Storage on Physicochemical Characteristics of Bighead Carp (*Aristichthys nobilis*) Fillets[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2019, 43(10): 14141.
- [23] 向迎春, 吴丹, 黄佳奇, 等. 冻藏过程中冰晶对水产品品质影响的研究现状[J]. *食品研究与开发*, 2018, 39(12): 187-193.
- XIANG Y C, WU D, HUANG J Q, et al. The Current Research Progress of Ice Crystals Acting on the Quality of Seafood During Freezing Storage[J]. *Food research and development*, 2018, 39(12): 187-193.
- [24] 周明珠, 陈方雪, 邓祎, 等. 蒸煮方式对熟制小龙虾尾肉解冻后品质的影响[J]. *肉类研究*, 2021, 35(8): 16-22.
- ZHOU M Z, CHEN F X, DENG Y, et al. Effects of Cooking Methods on the Quality of Frozen-Thawed Cooked Crayfish Muscle[J]. *Meat Research*, 2021, 35(8): 16-22.