

南美白对虾在酸性电解水减菌处理下鲜度品质及挥发性风味物质的变化

吴雨轩¹, 何瀚文¹, 张毅¹, 侯温甫^{1*}, 王丽梅², 王宏勋²

(1. 武汉轻工大学食品科学与工程学院, 湖北武汉 430023)

(2. 武汉轻工大学生命科学与技术学院, 湖北武汉 430023)

摘要: 该研究就酸性电解水对南美白对虾减菌工艺条件进行了优化, 在此基础上, 采用 GC-IMS 技术分析美白对虾的挥发性风味物质, 并结合感官评价、微生物指标(菌落总数和优势腐败菌)和理化指标(色度和 TVB-N 值)共同评价酸性电解水减菌处理对南美白对虾品质特性的影响。研究表明, 酸性电解水对南美白对虾减菌的最佳处理方式为, 电解水液温 4 °C 条件下, 以料液比为 1:6 进行冲淋。经酸性电解水处理后, 虾肉颜色亮度更高, 感官评分优于对照组, 并且酸性电解水处理能抑制菌落总数、优势腐败菌和 TVB-N 值的生长, 减缓 3-羟基-2-丁酮和 2,3-戊二酮等呈腐败特征的物质的产生。综合表明, 酸性电解水处理能有效保持南美白对虾的鲜度品质, 并减缓风味劣变, 可延长货架期 2~3 d。

关键词: 酸性电解水; 南美白对虾; GC-IMS; 挥发性风味物质; 货架期

文章编号: 1673-9078(2022)01-296-305

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.1.0464

Changes of Freshness Quality and Volatile Flavor Compounds of Pacific White Shrimp (*Penaeus vannamei*) under Acidic Electrolytic Water Treatment

WU Yuxuan¹, HE Hanwen¹, ZHANG Yi¹, HOU Wenfu^{1*}, WANG Limei², WANG Hongxun²

(1.School of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

(2.College of Life Science and Technology, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

Abstract: In this paper, the sterilization conditions of acid electrolyzed water for *Penaeus vannamei* were optimized. On this basis, GC-IMS technology was used to analyze the volatile flavor compounds of *Penaeus vannamei*, and the effects of acid electrolyzed water on the quality characteristics of *Penaeus vannamei* were evaluated by sensory evaluation, microbial indexes (total number of colonies and dominant spoilage bacteria) and physical and chemical indexes (color and TVB-N value). The results showed that the best treatment method for bacteria reduction of *Penaeus vannamei* with acidic electrolyzed water was to wash and drench with the ratio of material to liquid at 4 °C. After treated with acidic electrolyzed water, the color brightness of shrimp meat was higher, and the sensory score was better than that of the control group. Acidic electrolyzed water treatment could inhibit the growth of colony number, dominant spoilage bacteria and TVB-N value, and slow down the production of 3-hydroxy-2-butanone and 2,3-pentanedione. The results showed that acidic electrolyzed water treatment could effectively maintain the freshness quality of *Penaeus vannamei*, slow down the flavor deterioration and prolong the shelf life by 2~3 days.

Key words: acidic electrolyzed water; *Penaeus vannamei*; GC-IMS; volatile flavor substances; shelf life

引文格式:

吴雨轩,何瀚文,张毅,等.南美白对虾在酸性电解水减菌处理下鲜度品质及挥发性风味物质的变化[J].现代食品科技,2022,38(1):296-305

WU Yuxuan, HE Hanwen, ZHANG Yi, et al. Changes of freshness quality and volatile flavor compounds of pacific white shrimp (*Penaeus vannamei*) under acidic electrolytic water treatment [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(1): 296-305

收稿日期: 2021-04-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0701001)

作者简介: 吴雨轩(2000-),男,本科在读,研究生方向:生鲜产品保鲜技术, E-mail: 1013285251@qq.com

通讯作者: 侯温甫(1979-)女,博士,副教授,研究方向:生鲜产品质量控制与安全, E-mail: hwf407@163.com

南美白对虾 (*Penaeus vannamei*) 又称白脚虾, 为对虾科对虾属虾类, 是迄今世界上养殖产量最高的三大优良虾种之一^[1], 因其味道鲜美、营养丰富而深受全球消费者的喜爱。由于化学变化以及微生物作用, 它在贮藏过程中极易腐烂变质, 保质期很短^[2]。大量文献研究了虾的保鲜技术, 包括预煮^[2]、冷等离子活化水^[3]、臭氧技术^[4]、高压^[5]、壳聚糖涂膜^[6]、天然生物保鲜^[7,8]等, 大部分针对微生物尤其是初始微生物进行控制, 从而达到保持品质和延长产品货架期的目的。

电解水又称氧化还原电位水, 是由电解装置电解稀盐溶液产生的, 包括酸性电解水和碱性电解水。酸性电解水是一种新型抗菌消毒剂, 与常见的物理、化学和生物消毒方法相比^[9,10], 其制取设备操作简单, 生产成本更低, 安全性更高, 而且有研究表明酸性电解水还可以有效抑制部分酶的活性^[11], 因此具有抑菌和钝化酶活双重作用, 保鲜效果良好, 越来越多的国内外科研工作者将其应用于鱼、虾、贝类等水产品的清洗处理, 在水产品保鲜上具有良好的应用前景。但是酸性电解水的保鲜效果通常随着水产品中有机物质(蛋白质、脂质等)浓度的增加而降低, 从而影响杀菌效果。碱性电解水作为酸性电解水产生的副产物, 由于缺乏较强的杀菌活性, 限制了其在食品工业中的应用, 对其杀菌作用的研究较少。目前, 将酸性电解水和碱性电解水联合使用的相关研究较为少见。据报道, 碱性电解水可作为一种预洗剂, 来提高了酸性电解水对虾肉上副溶血性弧菌的杀灭效果^[12]。此外, 两者联合使用对香菜进行处理也能达到相较于单一处理更好的杀菌作用^[13]。

岑剑伟等^[14]报道了酸性电解水能抑制罗非鱼片细菌生长繁殖, 4℃下延长货架期 2~3 d。高薇珊^[15]研究了酸性电解水对嗜水气单胞菌的抑制效果, 发现酸性电解水对嗜水气单胞菌抑制率可高到 96% 以上, 且能抑制罗非鱼体色发黑。孙江萍等^[16]研究发现酸性电解水能钝化多酚氧化酶活性, 延缓南美白对虾黑变速度。Tantratia 等^[17]研究发现酸性电解水能抑制大肠杆菌, 沙门氏菌, 金黄色葡萄球菌和乳酸菌的生长繁殖。此外, Jung 等^[18]指出酸性电解水能有效地抑制尖吻黄盖鲷上菌落总数、假单胞菌和产 H₂S 的细菌的生长。Xuan 等^[19]研究表明, 酸性电解水能抑制过氧化值、总挥发性盐基氮 (TVB-N) 和硫代巴比妥酸活性物质 (TBARS) 含量的增加。

气相离子迁移谱色谱技术 (Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry, GC-IMS) 是一种将离子迁移谱技术和气相色谱技术两者结合的检测技术, 它将离子迁移谱仪作为 GC 的检测器, 通过色谱的保留时

间和相对迁移时间二维信息进行定性, 通过峰强进行定量^[20]。GC-IMS 技术具有快速、灵敏、无需前处理、简单的优点, 现广泛应用于肉类、果蔬和酒类等食品中, 在水产品中的应用相对较少, 应用领域主要集中在食品的分级、溯源、品质评价^[21,22]和质量控制^[23]等方面。目前, 酸性电解水在南美白对虾上的应用较少, 尤其是利用酸性电解水处理对南美白对虾的品质特别是挥发性风味物质造成的影响的研究暂时缺乏。本研究优化了南美白对虾的酸性氧化电解水减菌工艺, 并探讨了该处理对南美白对虾品质和挥发性物质的影响, 以期酸性电解水在虾肉上的应用提供一定的参考。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

厄瓜多尔白虾 (南美白对虾) 购于湖北省武汉市东西湖区常青花园中百仓储超市。

酸性电解水由武汉丽辉新技术有限公司提供。

平板计数琼脂、假单胞菌 CFC 选择性培养基、铁琼脂培养基、气单胞菌培养基, 青岛海博生物技术有限公司; 氯化钠、硼酸、人造沸石、甲基红、溴甲酚绿, 国药集团化学试剂有限公司; 浓硫酸、盐酸, 中国平煤神马集团。

1.2 仪器与设备

立式压力蒸汽灭菌器、HRP-9082MBE 型电热恒温箱, 上海博迅公司; 万用电炉, 北京市永光明医疗仪器公司; SW-CJ-2FD 型双人单面净化工作台, 苏州净化公司; HBM-400D 系列样品均质器, 天津恒奥公司; XHF-D 高速分散器 (内切式匀浆机), 宁波新芝生物科技公司; ST2100 型实验室 PH 计、CP214 (C) 型电子天平, 奥康斯仪器 (常州) 有限公司; LRH-100C 型低温培养箱, 上海一恒科学仪器有限公司; FlavourSpec 1H1-00092 型气相色谱离子迁移谱, 德国 G.A.S. 公司。

1.3 方法

1.3.1 原料预处理

将冷冻的虾肉解冻, 在提前通臭氧的无菌实验室内剥壳处理, 并用清水将虾肉冲洗干净, 备用。

1.3.2 单因素条件对酸性电解水杀菌效果的影响

根据实际的应用, 以及实验室前期研究结果, 选择碱性电解水 (pH 值 11.043, 氧化还原电位-320 mV)

和酸性电解水（有效氯质量浓度 80 mg/L, pH 2.977, 氧化还原电位 1270 mV）结合进行减菌前处理。实验用到的酸性电解水和碱性电解水委托武汉丽辉新技术有限公司按照电解水参数进行制备。处理条件为清水冲洗 30 s, 以料液比 1:3 的碱性电解水浸泡虾肉 2 min, 再用清水冲洗 30 s, 沥干 1 min 后, 进行酸性电解水处理时间、料液比、处理方式、处理温度单因素实验。

表 1 单因素水平表

Table 1 Single factor level table

水平	因素			
	浸泡时间	料液比	处理方式	电解水温度
1	1 min	1:3	浸泡	室温 (20 °C 左右)
2	3 min	1:4	喷淋	4 °C
3	5 min	1:5	冲淋	对照
4	7 min	1:6	对照	
5	对照	对照		

1.3.3 酸性电解水对南美白对虾品质及货架期的影响

将南美白对虾剥壳处理后, 用优化的减菌条件对虾肉进行处理作为处理组, 无处理作为空白对照, 探究酸性电解水对南美白对虾品质及货架期的影响。

酸性电解水处理组: 清水冲洗 30 s, 碱性电解水 1:3 料液比浸泡 2 min, 再清水冲洗 30 s, 再进行酸性电解水处理, 进行托盘包装后贮存于 4 °C 冰箱。

空白对照组: 将未经处理的南美白对虾进行托盘包装后贮存于 4 °C 冰箱。

每天取样, 进行各指标的测定。

1.3.4 指标测定

1.3.4.1 微生物测定

采用平板计数法测定南美白对虾肉的菌落总数, 方法参照 GB/T 4789-2010《食品卫生微生物学检验: 菌落总数测定》。用测得的各处理组菌落总数值 (CFU/g) 和对照组菌落总数值 (处理前菌落总数,

CFU/g) 来计算各组减菌率。

$$\text{减菌率} / \% = \frac{\text{处理前菌落总数} - \text{处理后菌落总数}}{\text{处理前菌落总数}} \times 100\%$$

假单胞菌数、气单胞菌数、希瓦氏菌数分别采用假单胞菌 CFC 选择性培养基、气单胞菌培养基、铁琼脂培养基进行培养, 方法同菌落总数检验方法。

1.3.4.2 色度

使用 CR-400 色差计测定样品的 L^* 值 (亮度), 每组样品重复 3 次, 结果取平均值。

1.3.4.3 TVB-N 值

挥发性盐基氮 (TVB-N 值) 按 GB 5009.228-2016《食品中挥发性盐基氮的测定》中的半微量定氮法进行测定。

1.3.4.4 感官评价

选择 10 名专业评定人员根据表 2 对虾肉进行色泽、气味、弹性、组织状态评价。

1.3.4.5 挥发性风味物质

顶空进样条件: 孵化温度 60 °C; 孵化时间 15 min; 进样方式为顶空进样; 加热方式为振荡加热; 进样针温度 80 °C。

GC-IMS 条件: 色谱柱温度 40 °C; 载气为高纯度 N_2 ; 载气流速程序: 初始流速 5.0 mL/min, 保持 3 min, 8 min 内线性升至 50.0 mL/min, 5 min 内线性升至 150.0 mL/min, 保持 3 min; 总运行时间为 19 min。漂移管温度 45 °C; 漂移气为高纯度 N_2 ; 漂移气流速 150 mL/min。

检测方法: 取 3.0 g 样品, 放入 20.0 mL 顶空进样瓶中, 经顶空进样用 FlavourSpec® 风味分析仪进行测试。

1.3.5 数据分析与统计

采用 IBM SPSS Statistics 19 对数据进行单因素方差分析, 以 $p < 0.05$ 表示差异有统计学意义, 用 Excel 2016 对数据进行处理及统计。

表 2 感官评分表

Table 2 sensory score table

描述	好 (10分)	较好 (8分)	一般 (6分)	较差 (4分)	差 (2分)
色泽	色泽正常, 肌肉切面富有光泽	色泽正常, 肌肉切面有光泽	色泽稍暗淡, 肌肉切面稍有光泽	色泽较暗淡, 肌肉切面无光泽	色泽暗淡, 肌肉切面无光泽
气味	固有香味浓郁	固有香味较浓郁	固有香味清淡, 略带异味	固有香味消失, 有腥臭味或氨臭味	有强烈腥臭味或氨味
组织形态	肌肉组织致密完整, 纹理很清晰	肌肉组织紧密, 纹理较清晰	肌肉组织不紧密, 但不松散	肌肉组织不紧密, 局部松散	肌肉组织不紧密, 松散
组织弹性	坚实富有弹性, 手指压后凹陷立即消失	坚实有弹性, 手指压后凹陷较快消失	较有弹性, 手指压后凹陷消失较慢	稍有弹性, 手指压后凹陷消失很慢	无弹性, 手指压后凹陷不消失

2 结果与讨论

2.1 酸性电解水减菌工艺优化

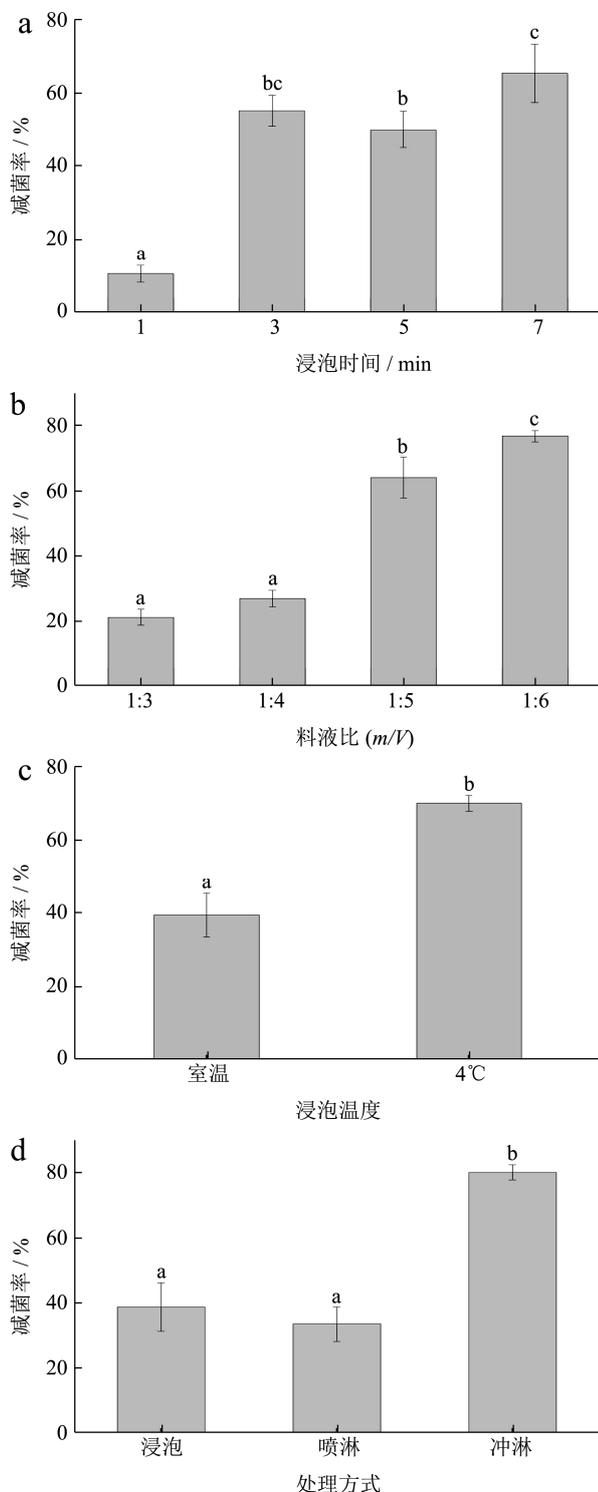


图1 酸性电解水浸泡时间、料液比、温度以及处理方式对减菌率的影响

Fig.1 Effects of soaking time, material-liquid ratio, temperature and water treatment mode on bacteria reduction rate

注：图中指标的组间显著性差异采用不同小写英文字母

(a、b、c)表示($p<0.05$), 下同。

常温条件下, 以浸泡时间为5 min, 料液比1:4, 开展虾肉不同浸泡时间的减菌实验研究, 结果如图1a所示。由图1a可知, 减菌率总体随着浸泡时间的延长而呈增加的趋势。浸泡时间大于3 min的减菌率较浸泡时间为1 min有显著提高($p<0.05$), 这是因为酸性电解水杀菌需要一定的时间。对于南美白对虾来说, 浸泡时间达到3 min能达到比较好的减菌效果, 并且减菌率随着浸泡时间的增加有继续增大的趋势。当浸泡时间为5 min, 减菌率为75.59%, 浸泡时间为7 min的减菌率为83.11%, 浸泡时间为7 min的减菌率显著高于5 min($p<0.05$), 因此选取7 min为最优的浸泡时间。Liao等^[24]用酸性电解水分别将大肠杆菌和金黄色葡萄球菌处理0、5、20、30 s, 发现处理时间为30 s时抑菌效果最显著。因此, 在酸性电解水浓度一定时, 可通过适当延长处理时间来提高杀菌效果。然而, 在敞口和不避光的条件下酸性电解水有效氯快速损失, 其抑菌和钝化酶活的能力会显著下降, 甚至对水产品的色泽、风味等产生不良影响^[14]。在浸泡时间为7 min时, 既能达到较好的减菌效果又不会对虾肉的外观产生明显影响。

南美白对虾不同料液比的减菌试验结果如图1b所示。减菌率随料液比的增加而增大, 料液比为1:5的减菌率显著高于料液比为1:3和1:4, 这是因为随着料液比的增大, 虾肉可以充分的与酸性电解水接触, 有助于减菌。因此, 可通过适当增大料液比来提高电解水的杀菌效果。料液比为1:5的减菌率为64.23%, 料液比为1:6的减菌率为76.70%, 料液比为1:6的减菌率显著高于料液比为1:5($p<0.05$)。但是值得注意的是, 酸性电解水与虾肉的接触面积有限, 减菌率会随料液比的增加而逐渐趋于稳定。综合不同料液比对虾肉的减菌率来看, 当料液比为1:6时能达到最好的减菌效果。

图1c呈现的是不同温度对虾肉的减菌结果。由图1c可知, 室温的减菌率为39.49%, 4°C的减菌率为69.94%, 4°C减菌率显著高于室温($p<0.05$)。电解水主要是以其中的有效氯来达到减菌的目的^[25,26], 因此保持其有效氯的活性是提高减菌率的关键。朱志伟等^[27]研究表明, 加热、光照和搅拌对有效氯影响最为显著, 会影响酸性电解水的杀菌效果。本研究中低温条件更好的保持了减菌剂中有效氯的活性, 所以4°C的减菌效果比室温的好。也有研究用电解水冰来对南美白对虾进行保鲜, 一方面低温条件下有效氯的损失小, 另一方面电解水冰能通过缓慢释放的有效氯达到持续作用的效果, 维持更好的感官品质^[28]。

以浸泡时间为 5 min, 料液比为 1:4, 对虾肉进行不同处理方式的减菌处理试验, 结果如图 1d 所示。由图 1d 可知, 喷淋的减菌率为 33.54%, 冲淋的减菌率为 80.00%, 浸泡的减菌率为 38.77%, 冲淋的减菌率显著高于浸泡和喷淋 ($p < 0.05$)。冲淋时酸性电解水的流动冲走了一部分虾肉表面的微生物, 因此减菌效果更好。而喷淋时喷壶内的压力较高, 使酸性电解水中的有效氯散失, 影响了减菌效果。因此, 选择冲淋为虾肉最佳的减菌处理方式。

根据浸泡时间、料液比和电解水液温优化的结果来看, 浸泡处理最优的处理工艺是 4 °C 条件下, 以料液比为 1:6 浸泡 7 min。但值得注意的是, 当料液比一致时, 冲淋的减菌率要优于浸泡, 所以最优处理工艺是 4 °C 条件下, 以料液比为 1:6 进行冲淋。

2.2 酸性电解水对南美白对虾品质及货架期的影响

2.2.1 感官评分

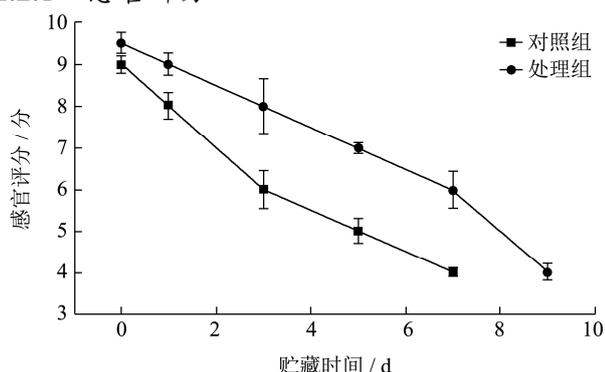


图 2 酸性电解水处理对虾肉感官评分的影响

Fig.2 Effect of oxidative electrolytic water treatment on sensory score of prawn meat

冷藏期间虾肉贮藏过程中感官评分的变化如图 2 所示。由图 2 可知, 随着贮藏时间的延长, 对照组和处理组感官评分均呈下降趋势, 处理组在整个贮藏过程中感官评分都高于对照组。在颜色上, 氧化电解水处理前虾肉颜色呈灰白色, 经过处理后虾肉颜色发白,

表 3 酸性电解水处理对南美白对虾菌落总数和 TVB-N 值的影响

Table 3 Effect of oxidative electrolytic water treatment on the total number of colonies and TVB-N value of prawn

指标	组别	贮藏时间/d					
		0	1	3	5	7	9
菌落总数/(CFU/g)	对照组	2.79±0.04	2.49±0.06	2.53±0.03	2.94±0.03	3.41±0.13	
	处理组	1.80±0.04	2.02±0.33	2.18±0.13	1.89±0.23	1.64±0.19	2.38±0.28
TVB-N 值/(mg/100 g)	对照组	16.52±0.40	18.48±2.38	15.82±0.59	15.40±1.98	23.38±1.39	
	处理组	13.16±1.19	10.92±0.40	10.08±0.40	11.90±0.99	16.10±0.99	16.52±2.38

色泽上要优于对照组, 但是随着贮藏时间的延长, 处理组和对照组虾肉均会发生不同程度的黑变, 导致感官品质下降。在气味上, 对照组在第 7 d 出现感官拒绝接收的异味, 而处理组在第 9 d 还没有明显异味。从组织形态和组织弹性来看二者并没有明显差异。对虾的感官评分低于 5 分被视为消费者消费不可接受^[29]。总体来看, 对照组在第 5 d 已经视为“不可接受”, 而处理组在第 7 d 的感官评分仍大于 5 分, 表明酸性电解水处理能有效改善对虾的感官品质, 延长货架期 3 d 左右。

2.2.2 色度

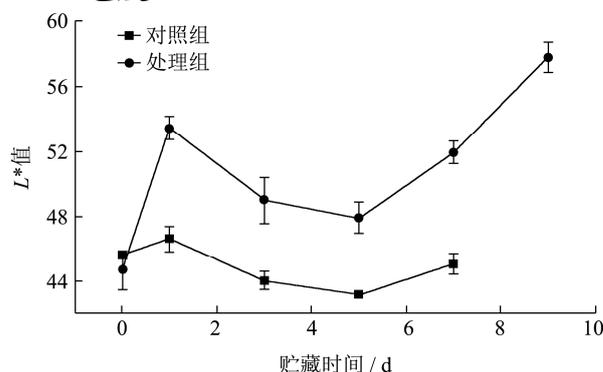


图 3 酸性电解水处理对虾肉 L* 值的影响

Fig.3 Effect of oxidation and electrolysis water treatment on L* value of prawn meat

酸性电解水对虾肉 L* 值的影响见图 3。由图 3 可知, 对照组和处理组在整个贮藏期间的变化趋势是一致的, 处理组的 L* 值总体高于对照组。在贮藏第 1 d, 处理组 L* 值为 53.37, 对照组 L* 值为 46.63, 处理组 L* 值较对照组显著升高 ($p < 0.05$), 这可能是电解水具有强氧化性, 残留在虾肉上的电解水对虾肉的色泽具有一定的影响。王玲等^[30]研究表明酸性电解水对鱼肉有一定的漂白作用, 并且随着有效氯浓度的增大, 白度值维持较稳定。第 1 d 到第 5 d, 亮度随贮藏期的延长而降低, 可能是因为随着贮藏时间的增加, 水分流失严重导致 L* 值降低。贮藏 5 d 以后, 处理组和对照组 L* 值均有所升高, 推测原因可能与贮藏期间腐败菌的繁殖以及蛋白质变性有关^[31]。

表 4 酸性电解水处理对南美白对虾腐败菌的影响

Table 4 Effect of oxidative electrolytic water treatment on spoilage bacteria of prawn

贮藏时间/d	假单胞菌/1g(CFU/g)		气单胞菌/1g(CFU/g)		产 H ₂ S 细菌/1g(CFU/g)	
	对照组	处理组	对照组	处理组	对照组	处理组
0	0	0	0	0	1.65±0.68	1±0.00
5	3.41±0.09	2.09±0.16	2.45±0.09	0	3.51±0.11	2.33±0.16
7	4.38±0.11	2.50±0.15	2.57±0.05	0	4.81±0.04	3.61±0.13
9		4.29±0.41		0		5.39±0.04

2.2.3 菌落总数和 TVB-N 值

贮藏过程中虾肉菌落总数和 TVB-N 值的变化结果如表 3 所示。有研究表明南美白对虾菌落总数及 TVB-N 含量增加与肠道细菌增殖有关^[32]。由表 3 可知, 虾肉的初始菌落总数为 2.79 lg(CFU/g), 经酸性电解水处理后, 虾肉的初始菌落总数为 1.80 lg(CFU/g), 说明酸性电解水具有一定的减除初始微生物的作用。处理组和对照组菌落总数总体均随贮藏时间的延长而增加, 但处理组增长速度比对照组缓慢, 在整个贮藏期间菌落总数始终低于对照组。由表 3 可知, 对照组和处理组的初始 TVB-N 值分别为 16.52 mg/100 g 和 13.16 mg/100 g。随着贮藏期的延长, 两组虾肉 TVB-N 含量均整体呈上升趋势, 且处理组 TVB-N 值的增加速度明显慢于对照组。对照组样品在贮藏第 7 d 的 TVB-N 值为 23.38 mg/100 g, 而酸性电解水处理组在贮藏第 9 d 的 TVB-N 值才达到 16.52 mg/100 g。可见酸性电解水处理能减少 TVB-N 的生成, 保持虾肉的品质。根据国家标准 GB 2733-2015 中 20 mg/100 g 为淡水虾中 TVB-N 值的可接受性上限, 酸性电解水处理后可将虾肉的保质期延长 2 d 以上。岑剑伟等^[14]研究表明酸性电解水可减缓 TVB-N 值的增长速度。经强酸性电解水和弱酸性电解水处理的淡水对虾的研究中也报告了类似的现象^[33]。

2.2.4 优势腐败菌

虾在低温环境下的保质期主要由微生物和酶的作用决定。虾肉中含有大量的游离氨基酸, 可促进优势腐败菌生长。Du 等^[34]研究发现假单胞菌属、希瓦氏菌属等是新鲜白虾中的主要细菌。Yang 等^[35]发现冷藏期间的太平洋白虾在 4 °C 时优势微生物是腐败希瓦氏菌等。本研究进一步考察了酸性电解水对南美白对虾片贮藏后期假单胞菌、气单胞菌、产 H₂S 细菌数量的影响, 结果见表 4。

由表 4 可知, 对照组贮藏第 7 d 的气单胞菌数量达到为 2.57 lg(CFU/g), 而处理组中始终没有检出。对照组贮藏第 7 d 的假单胞菌数量为 4.38 lg(CFU/g), 希瓦氏数量为 4.81 lg(CFU/g)。而处理组第 9 d 假单胞菌数量为 4.29 lg(CFU/g), 希瓦氏菌数量为 5.39

lg(CFU/g)。处理组的腐败微生物数量始终小于贮藏相同时间的对照组微生物数量, 表明酸性电解水对虾肉有良好的抑制微生物增殖的效果, 特别是对气单胞菌的抑制效果最为明显。

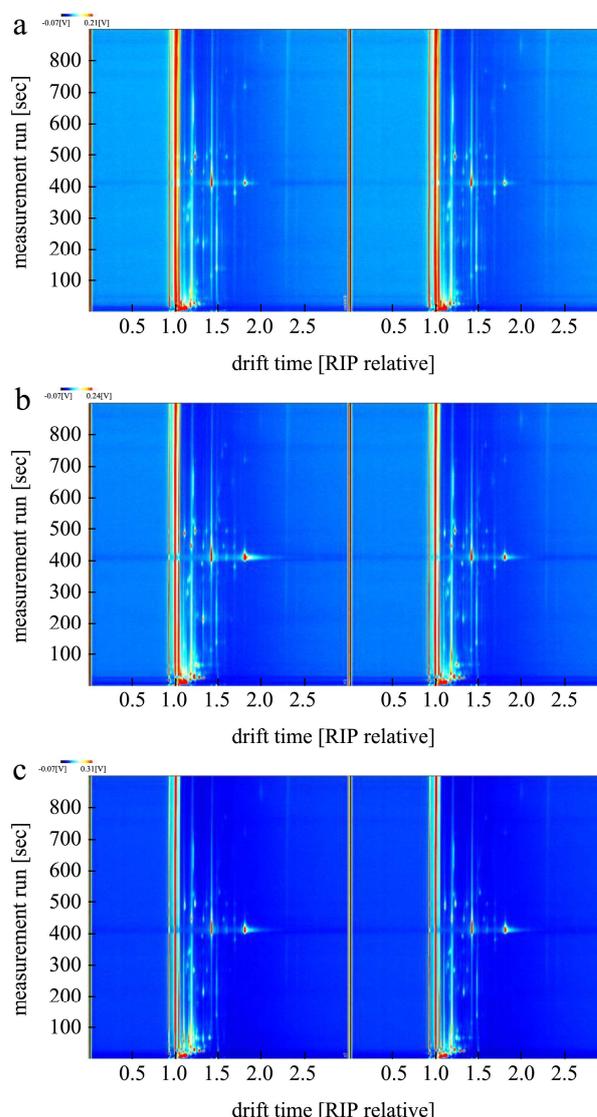


图 4 南美白对虾不同贮藏时间的气相离子迁移谱图

Fig.4 Comparison of GC-IMS of prawn

注: a: 第 0 d 处理组和对照组的气相离子迁移谱; b: 第 4 d 处理组和对照组的气相离子迁移谱; c: 第 8 d 处理组和对照组的气相离子迁移谱。

表5 南美白对虾挥发性组分的定性

Table 5 Volatiles in prawn identified by GC-IMS

编号	中文名称	英文名称	保留指数	保留时间/s	漂移时间/ms
1	2-乙基-1-己醇	2-Ethyl-1-hexanol	1189.3	415.17	1.812
2	2-甲基苯酚	2-Methylphenol	1256.6	486.36	1.111
3	α -蒎烯	α -pinene	1064.9	283.50	1.217
4	1-己醇	1-Hexanol	1000.6	212.94	1.328
5	庚酸	Heptanoic acid	1264.9	495.18	1.365
6	(E)-2-辛烯醛	(E)-2-octenal	1217.8	445.41	1.328
7	苯甲醇	Benzyl alcohol	1167.2	391.86	1.313
8	2-苯乙醇	2-Phenylethanol	1297.7	529.83	1.514
9	1-苯乙醇	1-phenylethanol	1217.3	444.78	1.562
10	正戊醛	pentanal	837.4	66.15	1.399
11	3-甲基丁醇	3-methylbutanol	840.0	67.41	1.247
12	3-甲基-3-丁烯-1-醇	3-Methyl-3-buten-1-ol	831.6	63.63	1.274
13	1-戊醇	1-Pentanol	880.7	90.72	1.251
14	丙酸	propionic acid	760.8	39.69	1.341
15	正丁醇	1-butanol	756.2	38.43	1.183
16	3-甲基-1-丁醇	3-methyl-1-butanol	809.4	54.81	1.101
17	2,3-二氢-4-羟基-2,5-二甲基-3-呋喃酮	2,3-Dihydro-4-hydroxy-2,5-dimethyl-3-furanone	1184.5	410.13	1.597
18	3-羟基-2-甲基-4H-吡喃-4-酮麦芽酚	3-Hydroxy-2-methyl-4H-pyran-4-one maltol	1289.9	521.64	1.210
19	α -水芹烯	α -Phellandrene	1409.0	647.64	1.207
20	2,3-戊二酮	2,3-Pentanedione	821.0	59.22	1.214
21	2-己酮	2-Hexanone	901.9	107.10	1.191
22	2-庚酮	2-heptanone	1014.3	228.48	1.262
23	戊酸	pentanoic acid	1008.1	221.55	1.236
24	糠醛	furfural	919.5	123.27	1.339
25	2,3-丁二醇	2,3-Butanediol	920.2	123.90	1.365
26	对乙烯基愈创木酚	p-Vinylguaiacol	1668.7	922.32	1.212
27	二丙基硫化物	Dipropyl sulfide	986.6	196.88	1.159
32	丁酸甲酯	methyl butanoate	1115.4	337.05	1.152
33	2-乙基-5-甲基吡嗪	2-Ethyl-5-methylpyrazine	1118.9	340.72	1.171
34	1-苯乙醇	1-phenylethanol	1221.6	449.40	1.186
35	3-羟基-2-丁酮	3-hydroxy-2-butanone	833.8	64.58	1.323
36	2-乙基-1-己醇	2-Ethyl-1-hexanol	1191.8	417.90	1.422
37	丙酮醇	Hydroxyacetone	719.0	29.82	1.219
38	丁醛	Butanal	679.4	23.21	1.100

2.3 基于GC-IMS评价酸性电解水对南美白对虾挥发性风味物质的影响

从南美白对虾不同贮藏时间的气相离子迁移谱图(图4)可以看出,处理组和对照组南美白对虾的挥发性风味物质在冷藏后期存在差异。为进一步比较酸性电解水对南美白对虾中挥发性有机物质的影响,利

用LAV软件可选取图中待分析区域,通过Library Search定性软件进行定性分析,共计检测出38种挥发性物质(表5),用Gallery Plot插件自动生成指纹图谱(图5)。

由图5可知,虾肉中的挥发性风味物质大致可以分为3类,分布在A、B、C3个区域。区域A包含的物质如庚酸、2,3-丁二酮、2-乙基-1-己醇、丁酸甲酯、2-乙基-5-甲基吡嗪、(E)-2-辛烯醛等,它们在处理

组和对照组中检测到的时间没有很大差异。其中(E)-2-辛烯醛被认为有助于产生令人不快的鱼腥味和腐臭的异味。有研究表明(E)-2-辛烯醛会引起鱼类品质劣变,但它与细菌作用无关^[36]。另外值得注意的是,2,3-丁二酮是最丰富的气味活性化合物之一,据报道在斑点鲮鱼中具有强烈的黄油味和理想的香味^[37]。2,3-丁二酮在对照组中的含量要高于处理组,说明酸性电解水处理会造成部分香味物质的损失。

区域 B 包含的物质如 α -萜烯、戊醛、丙酸、3-甲基-1-丁醇、2,3-戊二酮、二丙基硫化物、异戊酸乙酯、3-羟基-2-丁酮等,在对照组贮藏第 7 d 检测到,在处理组中没有检出。其中 3-羟基-2-丁酮与嗜冷菌属(包括嗜冷菌属和假交替单胞菌属)的代谢活性相关^[38],

它可以认为是国王鲑鱼和其他生鱼的腐败指标物^[39]。与对照组相比,酸性电解水处理抑制了戊醛、2,3-戊二酮和 3-羟基-2-丁酮等与腐败相关物质的产生。推测原因可能是酸性电解水处理抑制了微生物的增长,从而减少腐败代谢物的产生,这与菌落总数和优势腐败菌的结果一致。

区域 C 包含的物质如 2,3-丁二醇、糠醛、2-庚酮等,这些物质随着贮藏时间的延长在冷藏过程中被耗尽。其中,2,3 丁二醇和糠醛只在处理组和对照组第 1 d 可以检测到。2-庚酮在对照组第 0 d 中含量很高,而在其他样品中几乎没有被检测到,这可能是 2-庚酮不稳定^[40],容易在电解水的作用下或者贮藏过程中氧化分解。

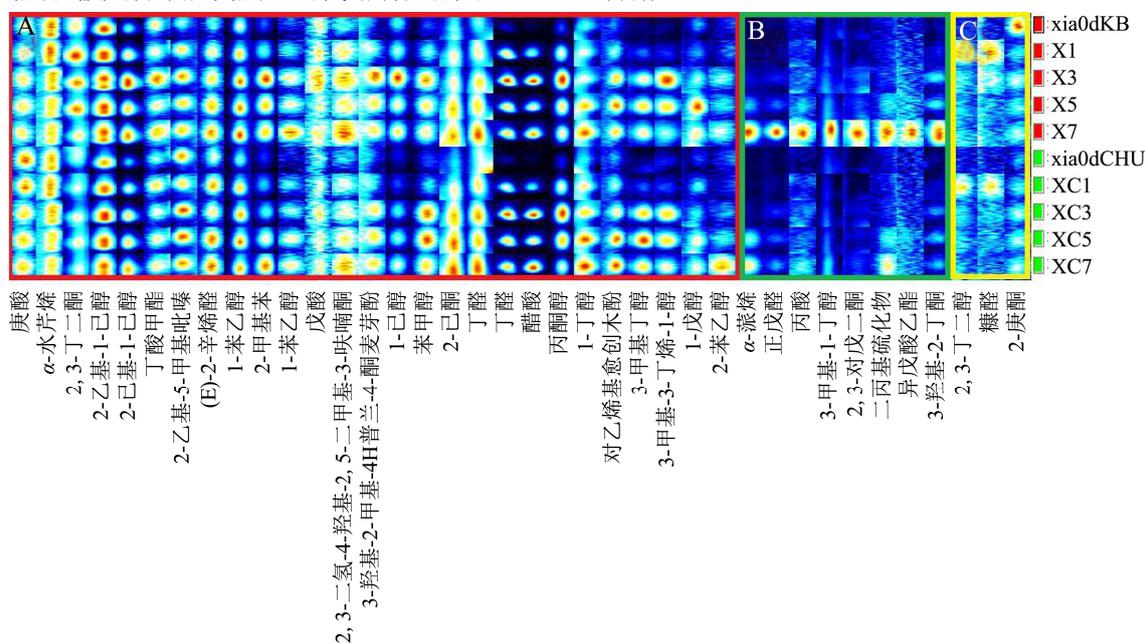


图 5 南美白对虾不同贮藏时间指纹图谱

Fig.5 Fingerprint of prawn meat under different storage time

注: xia0dKB、X1、X3、X5、X7 为对照组贮藏第 0 d、1 d、3 d、5 d、7 d 指纹图谱, xia0dCHU、XC1、XC3、XC5、XC7 为处理组贮藏第 0 d、1 d、3 d、5 d、7 d 指纹图谱。

3 结论

酸性电解水对南美白对虾减菌的最优处理条件为 4 °C、料液比 1:6 冲淋处理。在该条件下,酸性电解水处理能有效保持虾肉的感官品质,抑制菌落总数、优势腐败菌、TVB-N 值的生长,延长其货架期 3 d 左右。并且与对照组相比,酸性电解水处理能抑制 3-羟基-2-丁酮和 2,3-戊二酮等腐败相关的酮类物质的产生。综上所述,酸性电解水处理可有效地保持虾肉鲜度品质,减缓风味劣变,达到延长其货架期的目的。

参考文献

[1] 齐飞.四种物质对凡纳滨对虾利用植物蛋白的影响[D].武汉:华中农业大学,2015
 QI Fei. Effects of four materials on the utilization of dietary plant proteins of *Litopenaeus vannamei* [D]. Wuhan: Huazhong Agriculture University, 2015

[2] Sae-Leaw T, Benjakul S, Vongkamjan K. Retardation of melanosis and quality loss of pre-cooked Pacific white shrimp using epigallocatechin gallate with the aid of ultrasound [J]. Food Control, 2018, 84: 75-82

[3] Liao X, Su Y, Liu D, et al. Application of atmospheric cold plasma-activated water (PAW) ice for preservation of shrimps (*Metapenaeus ensis*) [J]. Food Control, 2018: 307-314

- [4] A A A G, B T C L S. Improving quality and shelf-life of whole chilled Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) by ozone technology combined with modified atmosphere packaging [J]. LWT, 2019, 99: 568-575
- [5] Kaur B P, Srinivasa Rao P. Effect of storage temperature and packaging on quality and shelf-life of high pressure processed black tiger shrimp (*Penaeus monodon*) [J]. Journal of Food Processing & Preservation, 2017: e13366
- [6] Yuan G, Lv H, Tang W, et al. Effect of chitosan coating combined with pomegranate peel extract on the quality of Pacific white shrimp during iced storage [J]. Food Control, 2016, 59(1): 818-823
- [7] Sae-Leaw T, Benjakul S. Prevention of quality loss and melanosis of Pacific white shrimp by cashew leaf extracts [J]. Food Control, 2019, 95: 257-266
- [8] 尤祯丹,蒋玉涵,陈传君,等.虾类劣变机制及其天然生物保鲜技术的研究进展[J].食品安全质量检测学报,2019,10(9): 2468-2473
YOU Zhendan, JIANG Yuhan, CHEN Chuanjun, et al. Research advances in shrimp deterioration mechanism and its natural biological preservation technology [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2019, 10(9): 2468-2473
- [9] Xiang Li, Mohammed Farid. A review on recent development in non-conventional food sterilization technologies [J]. Journal of Food Engineering, 2016, 182
- [10] Ana Meireles, Efsthios Giaouris, Manuel Simões. Alternative disinfection methods to chlorine for use in the fresh-cut industry [J]. Food Research International, 2016, 82
- [11] 姚鑫,赵爱静,杜苏萍,等.酸性电解水冰对小黄鱼品质及肌肉组织中酶活力变化的影响[J].食品科学,2017,38(13):244-250
YAO Xin, ZHAO Aijing, DU Suping, et al. Effect of acidic electrolyzed water ice on quality and enzyme activities in muscular tissue of small yellow croaker (*Larimichthys polyactis*) [J]. Food Science, 2017, 38(13): 244-250
- [12] Jun Xie, Xiaohong Sun, Yingjie Pan, et al. Combining basic electrolyzed water pretreatment and mild heat greatly enhanced the efficacy of acidic electrolyzed water against *Vibrio parahaemolyticus* on shrimp [J]. Food Control, 2012, 23(2): 320-324
- [13] Jianxiong Hao, Huiying Li, Yangfang Wan, et al. Combined effect of acidic electrolyzed water (AcEW) and alkaline electrolyzed water (AIEW) on the microbial reduction of fresh-cut cilantro [J]. Food Control, 2015, 50: 699-704
- [14] 岑剑伟,于福田,杨贤庆,等.微酸性电解水对罗非鱼片保鲜效果的研究[J].食品与发酵工业,2019,45(18):209-214
CEN Jianwei, YU Futian, YANG Xianqing, et al. Study on the fresh-keeping effect of slightly acidic electrolyzed water on tilapia fillets [J]. Food and Fermentation Industry, 2019, 45(18): 209-214
- [15] 高薇珊.微酸性电解水对嗜水气单胞菌杀菌机制及其抑制罗非鱼感染效果的研究[D].杭州:浙江大学,2017
GAO Weishan. Study of sterilization mechanism of slightly acidic electrolyzed water on *Aeromonas hydrophila* and anti-infection effects on tilapia [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017
- [16] 孙江萍,赵莉,俞文英,等.酸性电解水对南美白对虾中多酚氧化酶活性的影响[J].食品科学,2018,39(9):7-12
SUN Jiangping, ZHAO Li, YU Wenyong, et al. Effect of acidic electrolyzed water on polyphenoloxidase activity from *Litopenaeus vannamei* [J]. Food Science, 2018, 39(9): 7-12
- [17] Tantratian S, Kaephen K. Shelf-life of shucked oyster in epigallocatechin-3-gallate with slightly acidic electrolyzed water washing under refrigeration temperature [J]. LWT, 2019: 118
- [18] Jung S, Ko B S, Jang H J, et al. Effects of slightly acidic electrolyzed water ice and grapefruit seed extract ice on shelf life of brown sole (*Pleuronectes herzensteini*) [J]. Food Science & Biotechnology, 2017, 27(1): 261-267
- [19] Xuan X T, Fan Y F, Ling J G, et al. Preservation of squid by slightly acidic electrolyzed water ice [J]. Food Control, 2016, 73:1483-1489
- [20] Vautz W, Franzke J, Zampolli S, et al. On the potential of ion mobility spectrometry coupled to GC pre-separation - a tutorial [J]. Analytica Chimica Acta, 2018: S0003267018302800
- [21] 陈东杰,张明岗,聂小宝,等.基于气相离子迁移谱检测静电场处理的大菱鲆品质[J].食品科学,2019,40(24):313-319
CHEN Dongjie, ZHANG Minggang, NIE Xiaobao, et al. Quality detection of turbot (*Scophthalmus maximus*) treated with electrostatic field using gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Food Science, 2019, 40(24): 313-319
- [22] 李娟,任芳,甄大卫,等.气相色谱-离子迁移谱分析几种乳制品挥发性风味化合物[J].食品科学,2020,42(10):235-240
LI Juan, REN Fang, ZHEN Dawei, et al. Analysis of volatile flavor compounds in several dairy products by gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Food Science, 2020, 42(10): 235-240
- [23] 祁兴普,陈通,刘萍,等.GC-IMS 技术结合化学计量学方法

- 在食用肉种类判别中的应用[J].食品科技,2019,44(8):311-315,321
- QI Xingpu, CHEN Tong, LIU Ping, et al. Discrimination of edible meat by gas chromatography-ion mobility spectrometry technology and chemometric tools [J]. Food Science and Technology, 2019, 44(8): 311-315, 321
- [24] Liao X, Xuan X, Li J, et al. Bactericidal action of slightly acidic electrolyzed water against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* via multiple cell targets [J]. Food Control, 2017, 79: 380-385
- [25] Hao J, Wu T, Li H, et al. Differences of bactericidal efficacy on *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, and *Bacillus subtilis* of slightly and strongly acidic electrolyzed water [J]. Food & Bioprocess Technology, 2016, 10(1): 1-10
- [26] 中村悌一,岳宵.微酸性电解水在食品厂卫生管理方面的应用[J].中国洗涤用品工业,2017,1:14-19
- Nakamura Teiichi, YUE Xiao. The application of slightly acidic electrolyzed water in food factory sanitary control [J]. Food Industry Cleaning Topics, 2017, 1: 14-19
- [27] 朱志伟,李保明,张玥,等.不同处理对酸性电解水物理化学特性的影响[J].食品科技,2008,33(5):119-122
- ZHU Zhiwei, LI Baoming, ZHANG Yue, et al. Physicochemical characteristics of acidic electrolyzed water with different treatments [J]. Food Science and Technology, 2008, 33(5): 119-122
- [28] 赵爱静,王萌,赵飞,等.酸性电解水冰对南美白对虾杀菌保鲜效果的研究[J].现代食品科技,2016,32(3):126-131,245
- ZHAO Aijing, WANG Meng, ZHAO Fei, et al. Application of acidic electrolyzed water ice in sterilization and preservation of shrimp [J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(3): 126-131, 245
- [29] Li Y, Yang Z, Li J. Shelf-life extension of Pacific white shrimp using algae extracts during refrigerated storage [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, 97(1): 291-298
- [30] 王玲.酸性电解水处理对鲟鱼冰温贮藏品质变化的影响[D].大连:大连工业大学,2018
- WANG Ling. Effect of acidic electrolyzed water pretreatment on quality of sturgeon during ice temperature storage [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018
- [31] Marta, Mikš-Krajnik, Lee, et al. Inactivation of *Listeria monocytogenes* and natural microbiota on raw salmon fillets using acidic electrolyzed water, ultraviolet light or/and ultrasounds [J]. Food Control, 2017
- [32] 宛立,王吉桥,高峰,等.南美白对虾肠道细菌菌群分析[J].水产科学,2006,1:13-15
- WAN Li, WANG Jiqiao, GAO Feng, et al. Analysis of intestinal bacterial flora of *Penaeus vannamei* [J]. Fisheries Science, 2006, 1: 13-15
- [33] Yan W, Zhang Y, Yang R, et al. Combined effect of slightly acidic electrolyzed water and ascorbic acid to improve quality of whole chilled freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*) [J]. Food Control, 2019, 108: 106820
- [34] Lihui D U, Fan X, Liu F, et al. Changes of dominant spoilage bacteria and biogenic amines of Taihu white prawn (*Exopalaemon modestus*) during ice storage [J]. J Food Prot, 2017, 80(12): 2099-2104
- [35] Yang S P, Xie J, Qian Y F. Determination of spoilage microbiota of Pacific white shrimp during ambient and cold storage using next-generation sequencing and culture-dependent method [J]. J Food Sci, 2017, 82(5): 1178-1183
- [36] Parlapani F F, Verdos G I, Haroutounian S A, et al. The dynamics of *Pseudomonas* and volatiles during the spoilage of gutted sea bream stored at 2 °C [J]. Food Control, 2015, 55: 257-265
- [37] Giri A, Osako K, Ohshima T. Identification and characterisation of headspace volatiles of fish miso, a Japanese fish meat based fermented paste, with special emphasis on effect of fish species and meat washing [J]. Food Chemistry, 2010, 120(2): 621-631
- [38] Broekaert K, Noseda B, Heyndrickx M, et al. Volatile compounds associated with *Psychrobacter* spp. and *Pseudoalteromonas* spp. the dominant microbiota of brown shrimp (*Crangon crangon*) during aerobic storage [J]. International Journal of Food Microbiology, 2013, 166(3): 487-493
- [39] Mijs-Krajnik M, Yoon Y J, Ukuku D O, et al. Volatile chemical spoilage indexes of raw Atlantic salmon (*Salmo salar*) stored under aerobic condition in relation to microbiological and sensory shelf lives [J]. Food Microbiology, 2016, 53(FEB. PT. B): 182-191
- [40] Li P, Chen Z, Tan M, et al. Evaluation of weakly acidic electrolyzed water and modified atmosphere packaging on the shelf life and quality of farmed puffer fish (*Takifugu obscurus*) during cold storage [J]. Journal of Food Safety, 2020, 40(3): e12773