

天然保鲜剂对预制南美白对虾 贮藏品质的影响

谢伊莎,傅新鑫,郑佳楠,刘宇轩,祁立波*,董秀萍*

(国家海洋食品工程技术研究中心,海洋食品精深加工关键技术省部共建协同创新中心,
辽宁省海产品精深加工产业共性技术创新平台,大连工业大学食品学院,辽宁大连 116034)

摘要:为研究阿魏酸、绿原酸、咖啡酸三种天然保鲜剂对预制南美白对虾冷藏(4℃)期间品质变化影响,以菌落总数(Total Bacterial Count,TBC)、挥发性盐基氮(Total Volatile Base Nitrogen,TVB-N)、pH、硫代巴比妥酸值(Thiobarbituric Acid Reactive Substances,TBARS)、剪切力等为考察指标,结合表现性状综合评价作用效果。结果表明,与对照组样品相比,三种天然保鲜剂均可抑制预制南美白对虾冷藏期间TBC、TVB-N、TBARS值的升高,延缓质地软化,保持较好的感官品质,且作用效果与浓度正相关。pH与TBARS的变化趋势相似,且显著正相关($r=0.997, P<0.05$)。在三种天然保鲜剂中,绿原酸处理对预制南美白对虾冷藏抑菌效果最佳,咖啡酸处理对其质地保护能力最佳,阿魏酸能明显抑制虾肉蛋白降解、质地变软,延缓虾体黑变。与对照组样品冷藏货架期5 d相比,使用1%阿魏酸、绿原酸、咖啡酸处理后,预制南美白对虾冷藏货架期分别延长至14、12、12 d。

关键词:阿魏酸,绿原酸,咖啡酸,预制南美白对虾,冷藏

Effects of Bio-preservatives on the Quality of Pre-cooked Pacific White Shrimp(*Penaeus vannamei*) during Refrigerated Storage

XIE Yisha, FU Xinxin, ZHENG Jianan, LIU Yuxuan, QI Libo*, DONG Xiuping*

(National Engineering Research Center of Seafood, Collaborative Innovation Center of Seafood Deep Processing,
Liaoning Province Collaborative Innovation Center for Marine Food Deep Processing, School of
Food Science and Technology, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China)

Abstract: In order to investigate the effects of ferulic acid, chlorogenic acid and caffeic acid treatments on the preservation of precooked Pacific white shrimp during refrigerated storage(4℃), different indexes, such as total bacterial count(TBC), total volatile base nitrogen(TVB-N), pH, thiobarbituric acid reactive substances(TBARS) and shear force, were used to evaluate their effects by combining the apparent properties. The results of this study showed that compared with the control group, the three natural preservatives could inhibit the increase of the TBC, TVB-N, and TBARS value of shrimp during storage, delay the softening of texture, and maintain good sensory quality. The preservation effect of three natural preservatives was positively correlated with its concentration. The change trend of pH and TBARS was similar, showing significant positive correlation($r=0.997, P<0.05$). Among the three natural preservatives, chlorogenic acid treatment had the best antibacterial effect on precooked Pacific white shrimp in refrigerated storage, and caffeic acid had the best ability to protect the texture of pre-cooked shrimp. Ferulic acid had obvious effects of inhibiting protein degradation and softening of shrimp, which could delay the occurrence of browning in shrimp. Compared with the control group, its' refrigerated shelf life was 5 d, and the shelf life of pre-cooked shrimp treated with 1% ferulic acid, chlorogenic acid and caffeic acid was extended to 14, 12 and 12 d, respectively.

Key words: ferulic acid; chlorogenic acid; caffeic acid; pre-cooked Pacific white shrimp; refrigerated storage

中图分类号:TS254.4

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2021)04-0264-07

doi:10.13386/j.issn1002-0306.2020050159

引文格式:谢伊莎,傅新鑫,郑佳楠,等.天然保鲜剂对预制南美白对虾贮藏品质的影响[J].食品工业科技,2021,42(4):264-270.

XIE Yisha, FU Xinxin, ZHENG Jianan, et al. Effects of Bio-preservatives on the Quality of Pre-cooked Pacific

收稿日期:2020-05-15

作者简介:谢伊莎(1994-),女,博士研究生,研究方向:食品科学与工程,E-mail:isabella-xie@foxmail.com。

*通信作者:祁立波(1974-),女,硕士,高级工程师,研究方向:农(水)产品精深加工,E-mail:905390442@qq.com。

董秀萍(1977-),女,博士,教授,研究方向:水产品加工理论与技术,E-mail:dxiuping@163.com。

基金项目:国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”重点专项(2019YFD0902000)。

White Shrimp (*Penaeus vannamei*) during Refrigerated Storage [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(4): 264-270. (in Chinese with English abstract) <http://www.spgykj.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]。南美白对虾是一种“海虾淡水养”的优质甲壳类品种, 2019 年我国南美白对虾淡水养殖产量为 67.12 万吨, 海水养殖产量为 114.44 万吨, 占甲壳类水产品养殖总产量的 32.00%^[2]。虾肉富含蛋白质与 18 种氨基酸^[3], 其中必需氨基酸占氨基酸总量的 38.78%, 必需氨基酸与非必需氨基酸的比值符合联合国粮农组织 (Food and Agriculture Organization, FAO)/世界卫生组织 (World Health Organization, WHO) 提出的理想氨基酸标准模式要求, 是一种营养均衡的优质蛋白来源^[4]。然而, 南美白对虾水分含量高, 内源酶活性强, 导致其品质易在贮藏期间快速降低^[5]。据报道, 采用不同预制方式 (煮制、蒸制或微波等) 处理鲜活水产品^[6], 可提高其品质, 延长货架期, 其中煮制是虾类食品最常用的预制处理方式。Manheem 等^[7]研究发现通过延长煮制时间, 虾体中内源酶被钝化、在冷藏过程中黑斑生成数量减少、蒸煮损失降低, 货架期相应延长。

传统的生鲜食品保鲜技术包括低温保鲜和化学保鲜。低温保鲜技术通过降低食品的温度, 并维持食品长期处于低温环境, 延缓食品腐败变质, 延长保质期; 该技术因易操作在食品企业中广泛应用。但水产品缓慢降温的过程中, 温度降至 -1~5℃ 时, 食品中约有 80% 的水形成较大冰晶, 对细胞膜和组织结构造成机械损害, 改变其质构, 降低产品品质^[8]。化学保鲜技术具有价格低、能耗少、操作简易等优势, 被越来越多的企业应用。目前根据原料的来源, 常用的化学保鲜剂被分为天然保鲜剂和合成保鲜剂。其中天然保鲜剂是指从动、植物和微生物中提取的安全、健康、无毒, 具有保鲜效果的食品添加剂^[9-10]。天然保鲜剂具有抑制微生物生长繁殖的作用, 相对于化学合成品, 其对人体健康的危害甚微。天然保鲜剂种类多, 来源广, 保鲜效果各有不同。阿魏酸 (Ferulic acid, FA) 是一种酚酸, 可从伞形科、毛茛科及禾本科等植物中提取得到, 具有较好的抗菌抗氧化活性^[11]。研究发现, 含有阿魏酸的大豆蛋白基食用涂层可延长鲜切苹果的保质期^[12]。绿原酸 (Chlorogenic acid, CGA) 是植物体有氧呼吸的天然产物, 可在金银花等植物中提取得到, 具有抗氧化活性^[13]。绿原酸与明胶接枝制备得到的新型水产品生物保鲜剂可有效延缓哈氏仿对虾在微冻贮藏期间蛋白质分解和脂肪氧化^[14]。咖啡酸 (Caffeic acid, CA) 是一种天然的酚类化合物, 可在水果和蔬菜中提取得到, 具有抗氧化、抑菌等生物活性^[15]。Gatto 等^[16]发现含有咖啡酸衍生物的可食性野生草药提取物具有抑制果蔬表面病原菌生长的作用, 能有效提高果蔬保鲜期。

本文研究不同种类及浓度的天然保鲜剂对预制南美白对虾的保鲜效果, 考察在 4℃ 贮藏过程中菌落总数、挥发性盐基氮值 (Total Volatile Base Nitrogen,

TVB-N)、pH、硫代巴比妥酸值 (Thiobarbituric Acid Reactive Substances, TBARS)、剪切力及表观性状变化, 综合分析阿魏酸、绿原酸、咖啡酸三种天然保鲜剂对预制南美白对虾贮藏期间微生物、蛋白质水解与脂肪氧化的作用效果, 延缓其质地变软与黑变, 为天然保鲜剂延长预制南美白对虾的货架期提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜南美白对虾 辽宁省营口科技产业园养殖基地, 选取个体均匀原料, 约 11.5 ± 1.0 g/只, 冰温运至大连, 真空包装速冻后贮藏于 -40℃ 冰箱。实验前 12 h 将冻存的虾取出并置于 4℃ 环境中缓化; 阿魏酸 (白色粉末, 纯度 ≥ 99%)、甘油 分析纯, 上海生工生物有限公司; 咖啡酸 (淡黄色结晶粉末, 纯度 ≥ 98%)、绿原酸 (白色结晶粉末, 纯度 ≥ 98%) 分析纯, 上海笛柏化学品技术有限公司; 三氯乙酸、硫代巴比妥酸 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; 平板计数培养基 生物试剂, 青岛高科园海博生物技术有限公司; 硼酸、无水碳酸钾、氢氧化钠、盐酸 分析纯, 天津市大茂化学试剂厂。

PHS-3C 型 pH 计 上海估科仪器仪表有限公司; TA-XT Plus 物性测试仪 英国 Stable Micro System 公司; JJ200 型电子天平 常熟市双杰测试仪器厂; 车载冰箱 德国 WAECO 公司; Lambda-35 紫外可见光谱仪 珀金埃尔默股份有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品预处理 取解冻的南美白对虾放入 100℃ 的水中 (料液比 1:4 (m:V)) 煮制 2 min 捞出并迅速放入冰水混合物中冷却, 8 min 后取出放置于冰上沥水。将预制南美白对虾按 1:2 (m:V) 的料液比于 4℃ 浸泡在保鲜剂溶液中 20 min。经滤纸吸附虾体表面残余的保鲜剂溶液后, 每 10 只相同处理条件的虾放入一个一次性塑料盘中, 用保鲜膜隔绝空气, 放入 4℃ 冰箱中贮藏。

1.2.2 保鲜剂溶液配制 参考 Alves 等^[12]方法并结合预实验, 本文选择对比三种保鲜剂在 0.5% 和 1.0% 浓度下的保鲜效果。使用饱和 NaOH 溶液将浓度分别为 0.5% 和 1% 的阿魏酸、绿原酸、咖啡酸悬浊液的 pH 调节至 8~9, 待溶液中的固体充分溶解后, 滴入 12 mol/L HCl 调节各浓度保鲜剂溶液的 pH 至中性, 避免因保鲜液 pH 对实验造成的误差。

1.2.3 菌落总数测定 按照 GB 4789.2-2016《食品微生物学检验-菌落总数测定》^[17]进行测定。

1.2.4 总挥发性盐基氮 (TVB-N) 值测定 按照 GB/T 5009.228-2016《食品中挥发性盐基氮的测定》第二法微量扩散法^[18]进行测定。试样中挥发性盐基氮的含量按公式 (1) 计算。

$$X = \frac{(V_1 - V_2) \times c \times 14}{m \times 1/100} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

式中: X 表示试样中 TVB-N 含量, $\text{mg}/100\text{ g}$; V_1 表示测定试样消耗 HCl 标准溶液体积, mL ; V_2 表示试剂空白消耗 HCl 标准溶液体积, mL ; c 表示 HCl 标准溶液实际浓度, mol/L ; m 表示试样的质量, g ; 14 表示滴定 1.00 mL 盐酸 [$C(\text{HCl}) = 1.000\text{ mol}/\text{L}$] 标准滴定溶液相当的氮的质量, g/mol ; $1/100$ 表示准确吸取的滤液体积与样液总体积的比值; 100 表示计算结果换算为毫克每百克 ($\text{mg}/100\text{ g}$) 的换算系数。

1.2.5 pH 测定 参考 Wang 等^[19] 方法, 取虾碎肉与去离子水充分搅拌 (1: 10, $m: V$), 静置 30 min 后, 用 pH 计对上清液进行测定。

1.2.6 硫代巴比妥酸 (TBARS) 值测定 参考 Dong 等^[20] 法, 取虾碎肉 0.5 g 与 2.5 mL 试剂 A (含有 0.375% 硫代巴比妥酸、15% 三氯乙酸和 0.25 mol/L HCl) 混合, 沸水浴反应 15 min, 待溶液变成粉红色后, 取出以流水冷却, 4000 r/min 离心 25 min, 于 532 nm 下测定上清液的吸光度, 按如式 (2) 计算 TBARS 值:

$$\text{TBARS} = \frac{A_{532\text{ nm}} \times 0.0025 \times 72.07 \times 1000 \times 1000}{1.56 \times 10^5 \times 0.50}$$

式 (2)

式中: TBARS 表示试样中硫代巴比妥酸值, mg/kg ; $A_{532\text{ nm}}$ 表示上清液在 532 nm 下的吸光度值; 0.0025 表示混合溶液体积, L ; 72.70 表示丙二醛分子量, g/mol ; 1.56×10^5 表示丙二醛摩尔消光系数; 0.50 表示试样质量, g 。

1.2.7 剪切力测定 参考 Brauer 等^[21] 方法, 利用 TA-XT Plus 物性测试仪, 测定预制南美白对虾脱壳后头部起第三节和第四节之间的位置。测试条件: HDP-BS 刀形探头, 探头的测前、测试、测后速度分别为 1.0、1.0、10.0 mm/s。

1.3 数据处理

每处理组选取 10 只南美白对虾进行测定, 每只虾测定 3 次。所得实验数据使用“统计产品与服务解决方案”软件 (Statistical Product and Service Solutions, SPSS 19.0) (美国 IBM 公司), 采用单因素方差法分析实验数据, 显著性水平设定为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 预制南美白对虾贮藏过程中菌落总数的变化

菌落总数最能直观反映食品的食用安全性, 预制南美白对虾在 4℃ 环境贮藏过程中菌落总数的变化如表 1 所示。

经预制处理, 随着贮藏时间的延长, 空白组和处理组菌落总数均呈上升趋势。贮藏第 2 d 时, 经三种天然保鲜剂处理组菌落总数显著低于空白组 ($P < 0.05$), 但 0.5% 浓度处理组间无显著性差异。贮藏第 5 d 时, 1% 的绿原酸处理组菌落总数显著低于阿魏酸和咖啡酸处理组。贮藏时间达到第 9 d 时, 0.5% 浓度下三种天然保鲜剂处理组的菌落总数无明显差异, 1% 浓度下绿原酸和咖啡酸处理组的菌落总数相近, 均显著低于阿魏酸处理组。贮藏第 12 d 时, 1% 绿原酸处理组的菌落总数最低, 为 $10^6\text{ CFU}/\text{g}$, 刚达到二级鲜度临界值。贮藏第 14 d 时, 经 0.5% 绿原酸处理组的菌落总数显著低于其他两种保鲜剂同浓度处理组 ($P < 0.05$)。

综合分析发现, 经天然保鲜剂处理组虾肉中菌落总数显著低于空白组, 且在相同贮藏时间下, 1% 浓度处理组的效果要优于 0.5% 浓度处理组, 说明所选择的三种保鲜剂均具有抑菌效果, 且抑菌效果与保鲜剂的浓度具有相关性。曹增梅^[22] 同样发现含有没食子酸、绿原酸、阿魏酸、咖啡酸等物质的番石榴多酚能有效抑制虾肉糜中细菌的繁殖, 且对虾肉糜的保鲜效果具有浓度依赖性。此外, 三种保鲜剂处理组中绿原酸抑菌效果最佳。有研究表明绿原酸通过破坏细胞膜的膜电位, 使细胞膜受损, 导致胞内大分子物质泄漏, 从而抑制腐败菌生长^[23]。符莎露^[14] 研究证实绿原酸-明胶接枝产物对哈氏仿对虾中腐败菌的增长繁殖具有良好抑制效果。

2.2 预制南美白对虾贮藏过程中 TVB-N 值的变化

水产品在腐败过程中, 蛋白质在酶和细菌作用下分解并产生以二甲胺和三甲胺为主的氨以及胺类等碱性含氮物质^[24-26], 被称为总挥发性盐基氮 (TVB-N), 其含量是反映水产品新鲜程度的重要指标。随着贮藏时间的延长, 微生物生长繁殖速率加快, 胞外蛋白酶产生速度随之提高, 蛋白质被分解并产生氨气及挥发性胺类物质, 使 TVB-N 值快速增长^[27]。经不同保鲜剂处理的预制南美白对虾贮藏过程中 TVB-N 值的变化如表 2 所示。

随着贮藏时间的延长, 样品的 TVB-N 值均呈现增加趋势, 其中三种保鲜剂处理组的 TVB-N 值均显著低于空白样品, 说明具有一定抑菌作用。根据 GB 2733-2015《食品安全国家标准——鲜、冻动物性水产品》^[28] 及 GB 10136-2015《食品安全国家标准——动物性水产制品》^[29] 的要求, 预制南美白对虾的

表 1 保鲜剂处理后预制南美白对虾贮藏过程中菌落总数的变化

Table 1 Total bacterial count changes of pre-cooked Pacific white shrimp during storage with preservative treatment

天数 (d)	0.5% 浓度处理组菌落总数 ($\lg(\text{CFU}/\text{g})$)				1% 浓度处理组菌落总数 ($\lg(\text{CFU}/\text{g})$)			
	空白	阿魏酸	咖啡酸	绿原酸	空白	阿魏酸	咖啡酸	绿原酸
0	2.09 ± 0.007 ^{Aa}	2.19 ± 0.06 ^{Aa}	2.16 ± 0.10 ^{Aa}	2.10 ± 0.10 ^{Aa}	2.04 ± 0.11 ^{Aa}	2.06 ± 0.08 ^{Aa}	2.12 ± 0.16 ^{Aa}	2.19 ± 0.03 ^{Aa}
2	6.47 ± 0.02 ^{Ba}	3.28 ± 0.04 ^{Be}	3.26 ± 0.11 ^{Be}	3.36 ± 0.03 ^{Be}	6.10 ± 0.16 ^{Bb}	3.51 ± 0.07 ^{Bcd}	3.57 ± 0.02 ^{Be}	3.26 ± 0.11 ^{Be}
5	6.67 ± 0.07 ^{Ca}	5.18 ± 0.02 ^{Cc}	5.98 ± 0.32 ^{Cb}	5.50 ± 0.40 ^{Cbc}	6.58 ± 0.08 ^{Ca}	5.92 ± 0.41 ^{Cb}	5.79 ± 0.12 ^{Cb}	4.55 ± 0.06 ^{Cd}
9	7.59 ± 0.13 ^{Da}	7.40 ± 0.10 ^{Da}	7.48 ± 0.11 ^{Da}	7.45 ± 0.18 ^{Da}	7.08 ± 0.31 ^{Db}	6.96 ± 0.04 ^{Db}	6.60 ± 0.09 ^{De}	6.59 ± 0.11 ^{De}
12	8.01 ± 0.14 ^{Ea}	7.99 ± 0.05 ^{Ea}	7.61 ± 0.39 ^{DEa}	7.74 ± 0.19 ^{Da}	7.80 ± 0.12 ^{Ea}	7.02 ± 0.10 ^{Db}	7.17 ± 0.07 ^{Eb}	6.31 ± 0.28 ^{De}
14	8.45 ± 0.15 ^{Fa}	8.19 ± 0.18 ^{Eb}	7.97 ± 0.05 ^{Eb}	7.65 ± 0.10 ^{De}	8.05 ± 0.06 ^{Fb}	7.69 ± 0.17 ^{Ec}	7.42 ± 0.06 ^{Fc}	7.48 ± 0.21 ^{Ec}

注: 不同的字母间表示数据间存在显著差异 ($P < 0.05$); 大写字母代表 0.5% 浓度或 1.0% 浓度的相同处理组在不同贮藏时间菌落总数的差异; 小写字母代表相同贮藏时间 0.5% 浓度和 1.0% 浓度不同处理组间菌落总数值的差异。

表2 保鲜剂处理后预制南美白对虾贮藏过程中 TVB-N 值的变化

Table 2 TVB-N changes of pre-cooked Pacific white shrimp during storage with preservative treatment

天数 (d)	0.5% 浓度处理组挥发性盐基氮 (mg/100 g)				1% 浓度处理组挥发性盐基氮 (mg/100 g)			
	空白	阿魏酸	咖啡酸	绿原酸	空白	阿魏酸	咖啡酸	绿原酸
0	5.89 ± 0.36 ^{Aa}	5.22 ± 0.78 ^{Aa}	5.64 ± 0.30 ^{Aa}	6.09 ± 0.28 ^{Aa}	5.88 ± 0.76 ^{Aa}	5.62 ± 0.62 ^{Aa}	5.80 ± 1.27 ^{Aa}	5.92 ± 0.44 ^{Aa}
2	8.32 ± 0.80 ^{Aa}	6.42 ± 1.02 ^{ABab}	8.14 ± 0.54 ^{ABab}	7.75 ± 1.63 ^{Ab}	8.05 ± 0.18 ^{Ab}	4.75 ± 1.14 ^{Ac}	7.08 ± 1.06 ^{Aab}	4.80 ± 0.62 ^{Ac}
5	14.57 ± 1.87 ^{Ba}	8.14 ± 2.39 ^{Bde}	9.01 ± 1.03 ^{Bde}	7.30 ± 0.43 ^{Ac}	13.83 ± 1.58 ^{Bab}	9.86 ± 0.65 ^{Bcd}	11.82 ± 0.25 ^{Bbc}	8.07 ± 0.05 ^{Ade}
9	31.64 ± 2.01 ^{Ca}	17.92 ± 1.33 ^{Cc}	21.23 ± 1.26 ^{Cbc}	23.04 ± 1.12 ^{Bb}	31.64 ± 2.01 ^{Ca}	10.12 ± 2.05 ^{Bd}	24.22 ± 2.45 ^{Cb}	13.17 ± 3.09 ^{Bd}
12	47.17 ± 1.26 ^{Da}	21.24 ± 0.40 ^{De}	38.35 ± 0.73 ^{Db}	36.89 ± 2.75 ^{Cb}	45.68 ± 1.65 ^{Da}	24.05 ± 1.03 ^{Ccd}	22.40 ± 0.56 ^{Cde}	25.34 ± 1.25 ^{Cc}
14	74.52 ± 3.44 ^{Ea}	30.15 ± 0.58 ^{Ee}	42.09 ± 2.93 ^{Ec}	46.85 ± 0.54 ^{Db}	74.33 ± 2.93 ^{Ea}	31.32 ± 0.59 ^{De}	38.24 ± 1.18 ^{Dd}	37.05 ± 2.25 ^{Dd}

注:不同的字母间表示数据间存在显著差异 ($P < 0.05$);大写字母代表 0.5% 浓度或 1.0% 浓度的相同处理组在不同贮藏 TVB-N 值的差异;小写字母代表相同贮藏时间 0.5% 浓度和 1.0% 浓度不同处理组间 TVB-N 值的差异。

表3 保鲜剂处理后预制南美白对虾贮藏过程中 pH 的变化

Table 3 pH changes of pre-cooked Pacific white shrimp during storage with preservative treatment

天数 (d)	0.5% 浓度处理组 pH				1% 浓度处理组 pH			
	空白	阿魏酸	咖啡酸	绿原酸	空白	阿魏酸	咖啡酸	绿原酸
0	7.41 ± 0.06 ^{Aa}	7.44 ± 0.09 ^{Aa}	7.44 ± 0.13 ^{Aa}	7.49 ± 0.158 ^{Aa}	7.29 ± 0.14 ^{Aa}	7.31 ± 0.12 ^{Aa}	7.30 ± 0.12 ^{Aa}	7.32 ± 0.10 ^{Aa}
2	7.69 ± 0.11 ^{Bab}	7.50 ± 0.16 ^{Aa}	7.65 ± 0.09 ^{Bab}	7.66 ± 0.22 ^{Bab}	7.82 ± 0.14 ^{Bab}	7.68 ± 0.19 ^{Bb}	7.66 ± 0.12 ^{Bab}	7.62 ± 0.15 ^{Bab}
5	8.10 ± 0.12 ^{Ca}	7.83 ± 0.15 ^{Bb}	8.01 ± 0.15 ^{Cab}	7.96 ± 0.11 ^{Cab}	8.10 ± 0.08 ^{Ca}	7.92 ± 0.09 ^{Cab}	8.00 ± 0.12 ^{Cab}	8.05 ± 0.09 ^{Ca}
9	8.26 ± 0.15 ^{Da}	8.05 ± 0.08 ^{Cbc}	8.13 ± 0.12 ^{CDab}	8.15 ± 0.17 ^{Dab}	8.14 ± 0.13 ^{Cab}	8.01 ± 0.07 ^{Cbc}	8.05 ± 0.09 ^{Cbc}	7.95 ± 0.07 ^{CDe}
12	8.35 ± 0.12 ^{Da}	8.03 ± 0.09 ^{Cc}	8.28 ± 0.15 ^{Dab}	8.21 ± 0.10 ^{Dabc}	8.19 ± 0.08 ^{Cbc}	8.08 ± 0.05 ^{Cc}	8.04 ± 0.11 ^{Cc}	8.10 ± 0.06 ^{De}
14	8.31 ± 0.06 ^{Da}	8.09 ± 0.06 ^{Cb}	8.22 ± 0.10 ^{Dab}	8.21 ± 0.14 ^{Dab}	8.28 ± 0.07 ^{Ca}	8.09 ± 0.03 ^{Cb}	8.09 ± 0.10 ^{Cb}	8.11 ± 0.06 ^{Db}

注:不同的字母间表示数据间存在显著差异 ($P < 0.05$);大写字母代表 0.5% 浓度或 1.0% 浓度的相同处理组在不同贮藏时间 pH 的差异;小写字母代表相同贮藏时间 0.5% 浓度和 1.0% 浓度不同处理组间 pH 的差异。

TVB-N鲜度限定含量是 30 mg/100 g。在贮藏第 9 d 时,空白样品 TVB-N 值(31.64 ± 2.01 mg/100 g)已超过该限量值。贮藏到第 12 d 时,经 0.5% 阿魏酸、1% 阿魏酸、1% 咖啡酸和 1% 绿原酸处理组的 TVB-N 值分别为 21.24 ± 0.40、24.05 ± 1.03、22.40 ± 0.56 与 25.34 ± 1.25 mg/100 g,未超过 TVB-N 限量,说明所选择的三种天然保鲜剂均能有效抑制蛋白分解,延缓虾肉腐败。综合比较,三种天然保鲜剂能抑制预制南美白对虾贮藏期间 TVB-N 值升高,延缓蛋白降解,延长其货架期。其中阿魏酸的保鲜效果最佳,可将预制南美白对虾的保鲜期从 5 d 延长至 14 d;咖啡酸和绿原酸可将保鲜期延长至 12 d。这是由于阿魏酸不仅能抑制微生物繁殖,还具有钝化酶活的能力。研究证明阿魏酸能有效抑制多酚氧化酶,经其处理的南美白对虾在冰温贮藏 4 d 内,TVB-N 含量未显著增加^[30]。

2.3 预制南美白对虾贮藏过程中 pH 的变化

水产动物死后,体内糖原会最先被微生物利用并产生乳酸,pH 先轻微下降,之后随着贮藏时间延长,蛋白质被分解产生大量碱性胺类物质,pH 逐渐上升^[31],因此 pH 变化可一定程度反映水产品贮藏期间的腐败程度。经天然保鲜剂处理的预制南美白对虾贮藏过程中 pH 的变化如表 3 所示,空白样品的 pH 在贮藏过程中持续增大,推测与预制虾中蛋白质被酶水解产生氨基酸等物质,同时被微生物利用,产生氨及胺类物质有关。贮藏第 2~14 d 时,保鲜剂处理组 pH 低于空白样品,这可能是由于阿魏酸、绿原酸、咖啡酸均属于多酚类物质,具有一定的抑菌性^[32],延缓 pH 增加,抑制虾肉腐败。曹增梅^[22]研究发现含没食子酸、绿原酸、阿魏酸、咖啡酸等物质的

番石榴多酚可以减缓虾肉糜在贮藏过程中 pH 的升高。

相同贮藏时间,阿魏酸处理组的 pH 在 0.5% 浓度的天然保鲜剂处理组中最低,如表 3 所示。在贮藏第 14 d 时,0.5% 浓度的阿魏酸处理组 pH 为 8.09,1% 浓度咖啡酸和绿原酸处理组的 pH 分别为 8.09 和 8.11。这表明在同等保鲜效果下,三种保鲜剂中低浓度的阿魏酸可以有效抑制预制南美白对虾在贮藏期间 pH 的升高。王丽平^[33]研究发现阿魏酸和β-环糊精以 0.5:1 的比例制备得到的包合物能够降低带鱼在冷藏期间 pH 升高速率,并显著降低鱼肉 TVB-N 值、TBARS 和 POV 值,具有延缓脂肪氧化作用,延长带鱼货架期,与本实验结果相类似。

2.4 预制南美白对虾贮藏过程中 TBARS 值的变化

脂质在贮藏过程中通过氧化反应产生不稳定的过氧化物或分解成更短链的碳氢化合物,如醛类,这些化合物都可以通过硫代巴比妥酸值(TBARS)检测^[34],本实验通过检测 TBARS 的含量反映天然保鲜剂对预制南美白对虾贮藏过程中脂肪氧化的抑制程度。

如表 4 所示,随着贮藏时间的延长,样品的 TBARS 值均呈现增长趋势,但增长幅度有所不同。相同贮藏时间条件下,天然保鲜剂处理组 TBARS 值均低于空白组,说明保鲜剂能够抑制预制南美白对虾脂肪氧化,起到保鲜作用。1% 天然保鲜剂处理组 TBARS 值低于 0.5% 处理组,且贮藏期间三种保鲜剂处理组中,阿魏酸处理组数值最低,但在相同贮藏时间下,各保鲜剂处理组的 TBARS 值间无显著性差异 ($P > 0.05$)。说明三种天然保鲜剂均能够抑制预制南美白对虾的脂肪氧化,但作用效果差异不大。分

表 4 保鲜剂处理后预制南美白对虾贮藏过程中 TBARS 值的变化

Table 4 TBARS changes of pre-cooked Pacific white shrimp during storage with preservative treatment

天数 (d)	0.5% 浓度处理组硫代巴比妥酸值 (mg/kg)				1% 浓度处理组硫代巴比妥酸值 (mg/kg)			
	空白	阿魏酸	咖啡酸	绿原酸	空白	阿魏酸	咖啡酸	绿原酸
0	0.18 ± 0.03 ^{Aa}	0.18 ± 0.03 ^{Aa}	0.19 ± 0.01 ^{Aa}	0.17 ± 0.02 ^{Aa}	0.18 ± 0.02 ^{Aa}	0.15 ± 0.01 ^{Aa}	0.17 ± 0.01 ^{Aa}	0.18 ± 0.02 ^{Aa}
2	0.20 ± 0.02 ^{ABa}	0.20 ± 0.01 ^{Aa}	0.21 ± 0.01 ^{Aa}	0.21 ± 0.01 ^{ABa}	0.18 ± 0.01 ^{Aab}	0.16 ± 0.02 ^{Ab}	0.18 ± 0.03 ^{Aab}	0.19 ± 0.03 ^{Aab}
5	0.21 ± 0.01 ^{Ba}	0.20 ± 0.01 ^{Aa}	0.21 ± 0.02 ^{Aa}	0.21 ± 0.02 ^{ABa}	0.22 ± 0.03 ^{Ba}	0.20 ± 0.02 ^{Ba}	0.18 ± 0.01 ^{Aa}	0.20 ± 0.01 ^{ABa}
9	0.22 ± 0.01 ^{BCa}	0.20 ± 0.01 ^{Aa}	0.23 ± 0.01 ^{Ba}	0.22 ± 0.02 ^{Ba}	0.22 ± 0.01 ^{Ba}	0.20 ± 0.02 ^{Ba}	0.22 ± 0.02 ^{Ba}	0.23 ± 0.02 ^{BCa}
12	0.25 ± 0.03 ^{CDa}	0.25 ± 0.01 ^{Ba}	0.25 ± 0.02 ^{Ba}	0.23 ± 0.02 ^{Ba}	0.25 ± 0.03 ^{BCa}	0.20 ± 0.02 ^{Ba}	0.24 ± 0.02 ^{Ba}	0.25 ± 0.02 ^{Ca}
14	0.26 ± 0.02 ^{Da}	0.25 ± 0.03 ^{Ba}	0.25 ± 0.02 ^{Ba}	0.24 ± 0.02 ^{Ba}	0.27 ± 0.01 ^{Ca}	0.24 ± 0.01 ^{Ca}	0.24 ± 0.03 ^{Ba}	0.24 ± 0.01 ^{BCa}

注:不同的字母间表示数据间存在显著差异 ($P < 0.05$);大写字母代表 0.5% 浓度或 1.0% 浓度的相同处理组在不同贮藏时间 TBARS 值的差异;小写字母代表相同贮藏时间 0.5% 浓度和 1.0% 浓度不同处理组间 TBARS 值的差异。

表 5 保鲜剂处理后预制南美白对虾贮藏过程中剪切力的变化

Table 5 Shear force changes of pre-cooked Pacific white shrimp during storage with preservative treatment

天数 (d)	0.5% 浓度处理组剪切力 (g)				1% 浓度处理组剪切力 (g)			
	空白	阿魏酸	咖啡酸	绿原酸	空白	阿魏酸	咖啡酸	绿原酸
0	1536.21 ± 94.17 ^{Aa}	1695.84 ± 148.00 ^{Aab}	1641.94 ± 213.25 ^{Aa}	1718.95 ± 242.23 ^{Aab}	1740.00 ± 122.74 ^{Aab}	2036.02 ± 226.59 ^{Ab}	1800.71 ± 134.33 ^{Aab}	1795.05 ± 217.46 ^{ABab}
2	1551.28 ± 218.16 ^{Aa}	1621.32 ± 20.68 ^{Aab}	1634.31 ± 179.39 ^{Aab}	1640.12 ± 214.79 ^{Aab}	1790.73 ± 157.13 ^{Aabc}	1932.90 ± 0.02 ^{Ac}	1895.94 ± 90.58 ^{Abc}	1862.94 ± 70.17 ^{Bbc}
5	1699.2 ± 173.59 ^{Aa}	1670.08 ± 147.79 ^{Aa}	1671.35 ± 129.64 ^{Aa}	1633.69 ± 226.48 ^{Aa}	1758.07 ± 75.13 ^{ABa}	1927.01 ± 214.73 ^{Aa}	1891.92 ± 93.59 ^{Aa}	1849.74 ± 66.56 ^{Ba}
9	1557.08 ± 198.71 ^{Aa}	1411.81 ± 178.57 ^{ABa}	1622.09 ± 131.14 ^{Aa}	1592.35 ± 262.24 ^{Aa}	1751.96 ± 203.15 ^{ABa}	1787.73 ± 229.245 ^{Aa}	1706.27 ± 196.98 ^{Aa}	1725.06 ± 172.34 ^{ABa}
12	1185.81 ± 201.63 ^{Ba}	1309.43 ± 136.33 ^{Bab}	1552.28 ± 172.81 ^{Abc}	1488.13 ± 108.19 ^{Abc}	1507.87 ± 182.36 ^{Bbc}	1758.74 ± 147.54 ^{Acd}	1896.32 ± 322.86 ^{Ad}	1530.46 ± 139.94 ^{Abc}
14	1156.27 ± 166.66 ^{Ba}	1205.78 ± 314.77 ^{Ba}	1541.93 ± 209.04 ^{Aabc}	1108.20 ± 234.87 ^{Bc}	1288.33 ± 148.36 ^{Bab}	1782.35 ± 306.30 ^{Aa}	1517.88 ± 315.06 ^{Aabc}	1697.89 ± 170.29 ^{ABbc}

注:不同的字母间表示数据间存在显著差异 ($P < 0.05$);大写字母代表 0.5% 浓度或 1.0% 浓度的相同处理组在不同贮藏时间剪切力的差异;小写字母代表相同贮藏时间 0.5% 浓度和 1.0% 浓度不同处理组间剪切力的差异。

析三种保鲜剂处理组 TBARS 值与其他理化指标间相关性发现,TBARS 值与 pH 具有显著相关性 ($r = 0.997, P < 0.05$),与挥发性盐基氮的相关系数大于 0.9,这是由于三种天然保鲜剂具有延缓预制虾中蛋白和脂肪氧化分解的作用,抑制 pH 增长,本研究结果与王丽平^[33]使用阿魏酸-β-环糊精对带鱼保鲜效果的研究结果相似。

2.5 预制南美白对虾贮藏过程中剪切力的变化

虾在贮藏过程中,由于微生物生长繁殖,蛋白和脂肪分解氧化,导致虾肉组织结构逐渐松散,质地变软^[35]。通过物性分析仪检测虾在贮藏过程中剪切力的大小,可以直观反映预制南美白对虾质构特性的变化。

如表 5 所示,随着贮藏时间的延长,空白组剪切力数值不断减小,预制南美白对虾质地逐渐变软。贮藏 0~5 d 内,各处理组初始样品剪切力数值变化不明显,其中 0.5% 阿魏酸处理变化最小。贮藏至第 5 d 时,三种保鲜剂处理组间剪切力值无显著性差异;贮藏至 14 d 时,0.5% 咖啡酸和 1% 阿魏酸处理组剪切力与各自初始样品相比分别减少 6.09% 和 12.46%,变化相对较小,说明对预制虾肉质构变软有一定的抑制作用。综合挥发性盐基氮变化结果,阿魏酸具有明显缓解预制南美白对虾贮藏期间 TVB-N 升高和剪切力值降低的效果,有利于维持预制虾的质构品质。Nirmal 等^[30]研究发现阿魏酸对于维持南美白对虾的冰温贮藏品质也有一定作用效果。

2.6 预制南美白对虾贮藏过程中表观性状的变化

与理化特性相比,表观性状更有利于直观反映预制南美白对虾在贮藏过程中的实际状态。

如图 1 所示,贮藏 0 d 的空白样品和经阿魏酸处理的预制南美白对虾表面色泽光亮,呈熟虾典型红

色,且鲜味浓郁,组织紧密。由于咖啡酸和绿原酸溶液自身呈褐色和绿色,因此经其处理后,虾体颜色加深。贮藏第 2 d,以头部和尾部关节处作为对照观察点,空白组出现明显黑变,绿原酸处理组呈现轻微黑变,阿魏酸和咖啡酸处理组则无明显变化。贮藏第 5 d,空白组虾头黑变面积增加,尾部关节处黑变明显,同时虾表面出现粘液,并有明显腐败的胺味;保鲜剂处理组虾肉均结构紧实,无胺味。其中经阿魏酸处理组黑变程度最轻,咖啡酸处理组次之,绿原酸处理组最严重,但仍优于空白组。贮藏第 9 d,空白组头部完全黑变成黑色,胺味加重,质地松散,表面附有大量粘性物质;保鲜剂处理组表观性状均优于空白样品。但三种保鲜剂相比较而言,咖啡酸处理组的虾头黑变较严重,其次是绿原酸处理组,阿魏酸处理组的虾头黑变程度较轻,其中采用 1% 浓度阿魏酸处理组的表观性状最佳。贮藏第 12 d,表观性状持续下降,阿魏酸处理组表面粘性物质增多,但黑变程度较轻,咖啡酸处理组和绿原酸处理组的粘性物质较少,胺味较轻,但黑变程度加重,而 1% 的保鲜剂处理组的表观性状均优于 0.5% 的保鲜剂处理组和空白组。贮藏第 14 d,预制南美白对虾表面粘性物质含量增加和胺味加重,阿魏酸处理组虽然表面产生大量粘性物质且具有明显胺味,但无明显黑变,说明其对虾头黑变抑制作用效果明显。

鱼虾和果蔬黑变/褐变的主要原因是 L-酪氨酸被酪氨酸酶催化氧化而形成黑色素^[36-38]。在选择三种天然保鲜剂中,发现阿魏酸具有钝化酶活能力,能够延缓预制南美白对虾贮藏期间黑变的发生。金一琼等^[39]研究发现阿魏酸能够有效抑制虾血淋巴中酪氨酸活力,抑制 L-酪氨酸氧化反应,并对苹果切片表面褐变具有抑制作用。

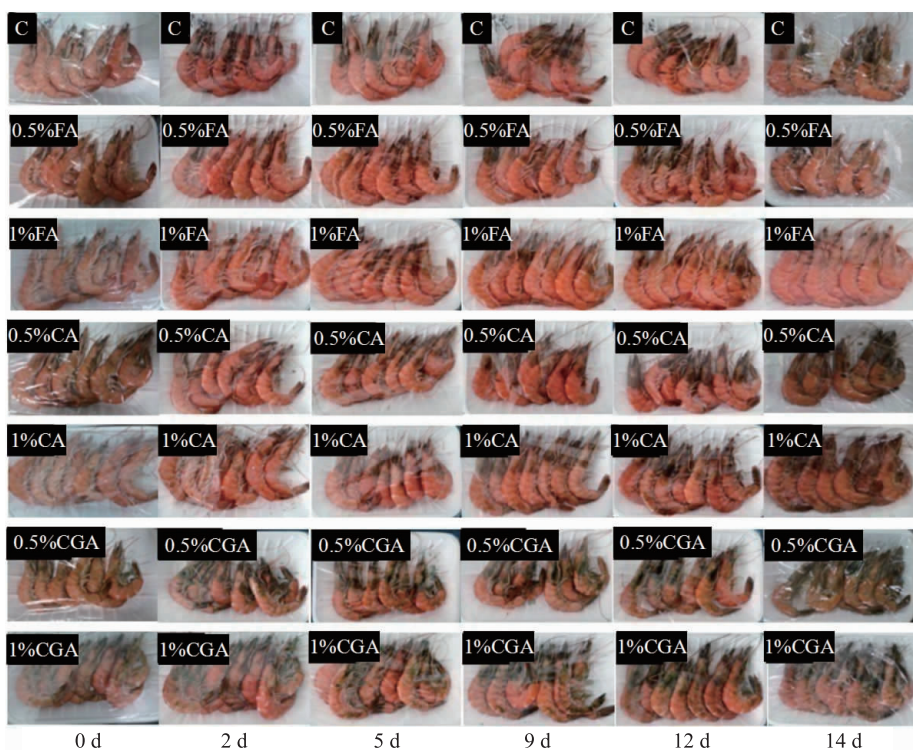


图1 预制南美白虾贮藏过程中表观性状的变化

Fig.1 Apparent traits changes of pre-cooked Pacific white shrimp during storage

注:C、FA、CA、CGA 分别表示空白组、阿魏酸处理组、咖啡酸处理组及绿原酸处理组。

3 结论

本研究发现阿魏酸、绿原酸、咖啡酸均对预制南美白对虾具有保鲜效果,且保鲜效果与其浓度呈正相关性。在低温(4℃)贮藏过程,预制虾肉中微生物生长繁殖被绿原酸显著性抑制;阿魏酸具有钝化酶活的能力,低浓度条件下可有效抑制预制南美白对虾在贮藏期间pH的升高,并能显减缓TVB-N升高和虾体黑变的发生;阿魏酸与咖啡酸能够有效改善预制虾肉质变软的现象;但这绿原酸和咖啡酸溶液本身具有一定颜色,经其处理后预制虾肉颜色加深;三种保鲜剂抑制脂肪氧化的效果无显著性差异。从消费者健康的角度分析,阿魏酸、咖啡酸和绿原酸可以作为天然保鲜剂延长预制南美白对虾低温条件的保质时间。

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.
[2] 农业农村部渔业渔政管理局,全国水产技术推广总站,中国水产学会.2020中国渔业统计年鉴[M].中国农业出版社.2020,22-24.
[3] Li D Y,Zhou D Y,Yin F W,et al.Impact of different drying processes on the lipid deterioration and color characteristics of *Penaeus vannamei* [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture,2020,100(6):2544-2553.
[4] 张高静,韩丽萍,孙剑锋,等.南美白对虾营养成分分析与评价[J].中国食品学报,2013,13(8):254-260.
[5] 赵亚,石启龙,曹淑敏.南美白对虾贮藏期间 Ca^{2+} -ATPase 活力变化规律与机制[J].食品科学,2018,39(5):258-264.

[6] 王阳.不同预制条件和熟化方式对鲍鱼品质的影响[D].大连:大连工业大学,2017.
[7] Manheem K,Benjukul S,Kijroongrojana K,et al.The effect of heating conditions on polyphenol oxidase,proteases and melanosis in pre-cooked Pacific white shrimp during refrigerated storage [J]. Food Chemistry,2012,131(4):1370-1375.
[8] 李苑,王丽平,李钰金,等.水产品冻结贮藏中冰晶的形成及控制研究进展[J].食品科学,2016,37(19):277-282.
[9] 张茜,李洋,王磊明,等.生物保鲜剂在果蔬保鲜中的应用研究进展[J].食品工业科技,2018,39(6):308-316.
[10] 李柳冰,刘巧瑜,陈海光,等.天然保鲜剂的研究进展[J].广州化工,2018,46(15):32-34.
[11] 张欣,高增平.阿魏酸的研究进展[J].中国现代中药,2020,22(1):138-147.
[12] Alves M M,Gonçalves M P,Rocha C M R.Effect of ferulic acid on the performance of soy protein isolate-based edible coatings applied to fresh-cut apples [J]. LWT, 2017, 80: 409-415.
[13] 马懿,秦兵,张晶,等.金银花叶中绿原酸的提取及抗氧化活性研究[J].食品工业科技,2018,39(13):30-35.
[14] 符莎露.绿原酸接枝明胶制备新型水产品生物保鲜剂的研究[D].杭州:浙江大学,2017.
[15] 杨采凤,李长龙,周雨,等.桑椹鲜果经壳聚糖咖啡酸衍生物保鲜处理后的主要活性成分检测[J].蚕业科学,2016,42(1):124-130.
[16] Gatto M A,Ippolito A,Linsalata V,等.可食性野生草药活性提取物对果蔬采后病害的抑制活性[J].保鲜与加工,2012,12(2):55-56.
[17] 国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总

局.食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定:GB 4789.2-2016[S].北京:中国标准出版社,2017.

[18] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会.食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定:GB 5009.228-2016[S].北京:中国标准出版社,2017.

[19] Wang Q Y, Lei J, Ma J J, et al. Effect of chitosan-carvacrol coating on the quality of Pacific white shrimp during iced storage as affected by caprylic acid[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 106: 123-129.

[20] Dong Z, Xu F J, Ahmed I, et al. Characterization and preservation performance of active polyethylene films containing rosemary and cinnamon essential oils for Pacific white shrimp packaging[J]. Food Control, 2018, 92: 37-46.

[21] Brauer J M E, Jesús Aarón Salazar Leyva, Alvarado L B, et al. Effect of dietary protein on muscle collagen, collagenase and shear force of farmed white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) [J]. European Food Research and Technology, 2003, 217 (4): 277-280.

[22] 曹增梅. 番石榴多酚的提取分离及保鲜应用研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2013.

[23] 苏萌萌, 孙芝兰, 刘芳, 等. 绿原酸对鸡肉腐败菌的抑菌机理[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(6): 1386-1391.

[24] Zhen Z, Yunpo H, Xuesong G, et al. Effects of chitosan combined with ϵ -polylysine coating on flavor and texture quality of Chinese shrimp during refrigerated storage[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(3): 1480-1488.

[25] Nie X B, Wang L H, Wang Q, et al. Effect of a sodium alginate coating infused with tea polyphenols on the quality of fresh Japanese sea bass (*Lateolabrax japonicus*) fillets[J]. Journal of Food Science, 2018, 83(6): 1695-1700.

[26] Parlapani F F, Mallouchos A, Haroutounian S A, et al. Volatile organic compounds of microbial and non-microbial origin produced on model fish substrate un-inoculated and inoculated with gilt-head sea bream spoilage bacteria[J]. LWT, 2017, 78: 54-62.

[27] Wang H B. Effect of dandelion polysaccharides on the retardation of the quality changes of white shrimp[J]. International

Journal of Biological Macromolecules, 2014, 68: 205-208.

[28] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会.食品安全国家标准 鲜、冻动物性水产品:GB 2733-2015[S].北京:中国标准出版社,2016.

[29] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会.食品安全国家标准 动物性水产制品:GB 10136-2015[S].北京:中国标准出版社,2016.

[30] Nirmal N P, Benjakul S. Effect of ferulic acid on inhibition of polyphenoloxidase and quality changes of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during iced storage[J]. Food Chemistry, 2009, 116(1): 323-331.

[31] Shange N, Makasi T N, Gouws P A, et al. The influence of normal and high ultimate muscle pH on the microbiology and colour stability of previously frozen black wildebeest (*Connochaetes gnou*) meat[J]. Meat Science, 2018, 135: 14-19.

[32] Li Y C, Yang Z Y, Li J R. Shelf-life extension of Pacific white shrimp using algae extracts during refrigerated storage[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(1): 291-298.

[33] 王丽平. 阿魏酸- β -环糊精包合物制备及带鱼保鲜研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.

[34] Hultmann L, Rustad T. Iced storage of Atlantic salmon (*Salmo salar*) - effects on endogenous enzymes and their impact on muscle proteins and texture[J]. Food Chemistry, 2004, 87(1): 31-41.

[35] 刘娜, 翁佩芳, 朱亚珠, 等. 贮藏温度对中国毛虾 (*Acetes chinensis*) 品质变化影响的研究[J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(4): 838-844.

[36] Sariri R, Aghaghaziani F, Sajedi R H. Inhibition of mushroom tyrosinase by aliphatic alcohols[J]. Biosciences Biotechnology Research Asia, 2016, 6(2): 489-496.

[37] 张启勤. 酪氨酸酶抑制剂的研究进展[J]. 科技资讯, 2015, 13(18): 200-201.

[38] 何云. 复合抑制剂对酪氨酸酶抑制的相互作用研究[D]. 广州: 广东药学院, 2015.

[39] 金一琼, 陈周谭, 赖富饶, 等. 曲酸与阿魏酸对酪氨酸酶的抑制作用研究[J]. 现代食品科技, 2012, 28(4): 378-381.

(上接第 263 页)

-cut pineapples at different irradiances and temperatures[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 196: 130-138.

[20] Winter S, Tortik N, Kubin A, et al. Back to the roots: Photodynamic inactivation of bacteria based on water-soluble curcumin bound to polyvinylpyrrolidone as a photosensitizer[J]. Photochemical & Photobiological Sciences, 2013, 12(10): 1795.

[21] Schastak S, Ziganshyna S, Gitter B, et al. Efficient photodynamic therapy against gram-positive and gram-negative bacteria using THPTS, a cationic photosensitizer excited by infrared wavelength[J]. PLoS One, 2010, 5(7): e11674.

[22] Donnelly R F, Cassidy C M, Loughlin R G, et al. Delivery of Methylene Blue and meso-Tetra(N-methyl-4-pyridyl) porphine Tetra tosylate from cross-linked poly(vinyl alcohol) hydrogels: A

potential means of photodynamic therapy of infected wounds[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 2009, 96(3): 223-231.

[23] 唐姝姝, 唐书泽, 李红爱, 等. 亚甲基蓝对肠出血性大肠杆菌 O157 的光动力杀菌技术研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(23): 136-139, 143.

[24] 杨鹏高, 王川, 王宁, 等. 460 nm 可见光杀灭浮游状态和生物膜内大肠埃希菌的实验研究[J]. 上海交通大学学报(医学版), 2014, 34(7): 1001-1005.

[25] Liu F, Li Z J, Cao B B, et al. The effect of a novel photodynamic activation method mediated by curcumin on oyster shelf life and quality[J]. Food Research International, 2016, 87: 204-210.