

汽爆柚皮对南美白对虾的保鲜效果

邱珍涛[#], 王永妍[#], 马莉, 徐仰仓^{*}

(天津科技大学海洋与环境学院, 天津 300457)

摘要: **目的** 探究蒸汽爆破技术处理后的柚皮对南美白对虾的保鲜效果。**方法** 分别用汽爆柚皮、汽爆柚皮与海藻酸钠的混合物、乳酸菌处理对虾, 然后4 °C贮藏, 检测贮藏时对虾的鲜度指标。**结果** 1.6 Mpa 汽爆柚皮与海藻酸钠混合物处理的对虾鲜度品质最好, 其感官分值一直最高, pH 始终最低, 第6 d 的细菌总数为5.73 lg CFU/mL, 未超过可食用标准, 而对照组已不可食用, 第4 d 的硫代巴比妥酸反应物(thiobarbituric acid reactive substances, TBARS)为1.33 mg/kg、挥发性盐基氮(total volatile base nitrogen, TVB-N)为12.50 mg/100 g, 指标明显好于对照。**结论** 汽爆柚皮与海藻酸钠混合物能有效延长4 °C贮藏环境下南美白对虾的货架期。

关键词: 南美白对虾; 柚皮; 蒸汽爆破技术; 保鲜

Fresh-keeping effects of steam-exploded pomelo peel on *Penaeus vannamei*

DI Zhen-Tao[#], WANG Yong-Yan[#], MA Li, XU Yang-Cang^{*}

(Tianjin University of Science and Technology, College of Marine and Environmental Sciences, Tianjin 300457, China)

ABSTRACT: Objective To explore the fresh-keeping effects of pomelo peel treated by steam explosion technology on *Penaeus vannamei*. **Methods** The steam-exploded pomelo peels, the mixture of steam-exploded pomelo peels and sodium alginate, and lactic acid bacteria were used to treat shrimp, respectively, and then stored at 4 °C, and the freshness index of shrimp during storage was tested. **Results** The freshness quality of shrimp treated with the mixture of 1.6 Mpa steam-exploded pomelo peel and sodium alginate was the best, its sensory score was always the highest, pH was always the lowest, and the total number of bacteria on the 6th day was 5.73 lg CFU/mL, which did not exceed edible The standard, while the comparison group was inedible, the thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) on the 4th day was 1.33 mg/kg, total volatile base nitrogen (TVB-N) was 12.50 mg/100 g, and the indicators are significantly better than the comparison. **Conclusion** The mixture of steam-exploded pomelo peel and sodium alginate can effectively extend the shelf life of *Penaeus vannamei* in 4 °C storage environment.

KEY WORDS: *Penaeus vannamei*; pomelo peel; steam explosion technology; freshness preservation

0 引言

南美白对虾(*Penaeus vannamei*)因其肉质鲜美、富含蛋

白质和微量元素而受到消费者的喜爱^[1]。然而, 因蛋白质和水分含量高使其在捕捞销售及贮运的过程中极易受到细菌的侵袭而腐败变质, 严重降低了对虾的营养价值和经济

基金项目: 天津市海洋局科技项目(KJXH2012-14)

Fund: Supported by the Oceanic Administration of Tianjin Science and Technology Project (KJXH2012-14)

[#]邱珍涛、王永妍为共同第一作者

[#]DI Zhen-Tao and WANG Yong-Yan are Co-first Authors

*通信作者: 徐仰仓, 教授, 主要研究方向为水产品的保鲜贮藏。E-mail: xuyc@tust.edu.cn

*Corresponding author: XU Yang-Cang, Professor, Tianjin University of Science And Technology, No.9 13th Avenue, Economic and Technological Development Zone, Tianjin 300457, China. E-mail: xuyc@tust.edu.cn

价值^[2-3]。为此, 科技人员研发了各种保鲜技术, 但目前的保鲜技术或因化学残留、或因技术复杂而存在一些缺陷^[4]。因此, 寻找天然低成本保鲜剂成为保鲜领域的研究热点。柚[*Custrus grandis* (L.) *Osbeck*]是广泛分布于我国南方的一种水果, 柚皮约占整个果实的 40%^[5], 柚子皮资源丰富, 但利用率不高。有研究表明柚皮含有丰富的果胶、黄酮、柠檬烯、月桂烯等活性物质, 它们具有较强的抗菌、抗氧化作用^[6]。然而, 柚子皮的活性物质存在于植物组织, 不容易被释放。蒸汽爆破技术是利用高温高压使压力瞬间释放进而改变原料结构的技术^[7], 研究表明蒸汽爆破技术可以极大提高活性物质的性能和获取率^[8-9]。本研究拟探讨汽爆柚皮对南美白对虾的保鲜效果。另外史国萃等^[10]发现乳酸菌能够抑制南美白对虾贮藏期间的腐败菌希瓦氏菌、假单胞菌和不动杆菌, 延缓对虾的腐败变质, 本研究也对比了汽爆柚皮和乳酸菌的保鲜效果, 以期为开发新的经济、有效的植物源保鲜剂提供有益信息。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜马家柚[*Custrus grandis* (L.) *Osbeck*](天津市塘沽水果超市); 鲜活南美白对虾(*Penaeus vannamei*)(天津市塘沽北塘海鲜市场)。

RSP-6 乳酸菌株(天津市海洋资源与化学重点实验室); 蛋白胨(生化试剂, 北京奥博星生物技术有限公司); 牛肉膏(生化试剂, 天津市英博生化试剂有限公司); 琼脂(生化试剂)、硫代巴比妥酸(thiobarbituric acid, TBA)(分析纯)(天津市鼎国昌盛科技有限公司); 高氯酸(分析纯, 天津市风船化学试剂科技有限公司); 氯化钙、氯化钠(分析纯, 天津市北方天医化学试剂厂); 氢氧化钠(分析纯, 天津市赢达稀贵化学试剂厂); 海藻酸钠(生化试剂, 天津市光复精细化工研究所); 三氯乙酸(分析纯, 天津市富宇精细化工有限公司); 乙二胺四乙酸(ethylenediaminetetraacetic acid, EDTA)、浓硫酸、氯仿(分析纯, 北京化工厂)。

营养琼脂培养基: 蛋白胨 5.0 g, 牛肉膏 1.5 g, 氯化钠 7.5 g, 琼脂 7.5 g, 蒸馏水 500 mL, pH 调至 7.0±0.2。

1.2 仪器

QBS-200B 汽爆工艺试验台(中国鹤壁正道生物能源有

限公司); GC-MS-4000 气相色谱-质谱联用仪(美国 VARIAN 公司); Kjeltec TM8000 全自动凯氏定氮仪(丹麦 FOSS 公司); 752N 紫外分光光度计(上海菁华科技仪器有限公司); TGL-16M 高速台式冷冻离心机(湖南湘仪有限公司); DHP-9162 电热恒温培养箱(上海申贤恒温设备厂); PHS-3C 数显 pH 计(上海精密仪器厂); Rtx-5 MS 色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm, 北京豫维科技有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 汽爆柚皮的制备

将新鲜柚皮, 洗净, 切成体积不大于 1 cm³ 的碎块, 在蒸汽爆破压强分别为 0.8、1.4、1.6 MPa 的条件下处理柚皮 5 min^[11], 得到泥状汽爆产物分别标记为 0.8EP、1.4EP、1.6EP。

1.3.2 南美白对虾保鲜处理

将南美白对虾洗净后加冰猝死。处理组(1)分别将 5 g 在 0.8、1.4、1.6 MPa 压强汽爆处理的柚皮涂在 10 只平均重量为 (20±5) g 的对虾上, 记为 0.8GP、1.4GP、GP; (2)将南美白对虾浸入 5 g 1.6 Mpa 汽爆柚皮和 100 mL 海藻酸钠(2%)混合溶液中, 3 min 后浸入 3%氯化钙水溶液中凝胶化, 记为 SP; (3)选择具有抑菌效果的 RSP-6 乳酸菌^[12], 参照周晔等^[13]的方法, 将新鲜南美白对虾用经细胞计数法确定的 10⁸ 数量级浓度的活乳酸菌液浸泡 30 min 记为 LP。设置空白对照组, 记为 BP。所有样品均放入自封袋, (4±1) °C 冰箱贮藏。

1.3.3 挥发性物质检测

挥发性物质(volatile organic compounds, VOCs)采用顶空固相微萃取气相色谱质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GS-MS)测定。

色谱条件: Rtx-5 MS 色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm)。程序升温: 初始温度 40 °C 保持 3 min, 以 4 °C/min 升至 150 °C, 保持 1 min, 以 8 °C/min 升至 250 °C, 保持 6 min。进样口温度 250 °C, 分流比: 5:1 (V:I); 载气: He; 纯度: 99.99%; 载气流量: 1 mL/min;

质谱条件: 传输线温度 280 °C; 质量分析器: 离子阱; 离子阱温度: 220 °C; 扫描方式: full scan; 扫描范围: 43~500 m/z^[14]。

1.3.4 感官品质的测定

参照熊青等^[15]的方法略做修改, 由 5 位经过培训的测评人按表 1 进行感官评估, 取平均值。一般认为分数大于 24 被确定为一级新鲜, 18 分以下被确定为腐败。

表 1 感官评价表
Table 1 Sensory evaluation form

类别	评分标准	评分上限/分
肉质	肉质弹性好, 虾壳坚硬, 肉与壳连接紧密	9
	肉质较有弹性, 虾壳稍变软, 肉与壳连接较紧密	8
	肉质与虾壳较软, 肉与壳连接松弛	6
	肉质呈海绵状柔软, 肉与壳脱落	3

表 1(续)

类别	评分标准	评分上限/分
外观	体表纹理清晰, 虾肉较透明有光泽, 头与身连接紧密	9
	微红或黑色, 头尾部出现黑斑, 头与身连接较紧密	8
	体表出现大面积黑斑, 头与身连接松弛	6
	体表色泽完全黑变, 头与身分离	3
气味	新鲜海虾固有的气味, 无任何异味	9
	有海虾固有气味, 略有异味	8
	腐败味较强, 固有海虾味较淡	6
	强烈腐败味, 仅有一点或没有海虾味	3

1.3.5 pH 测定

参照 BALTI 等^[16]的方法略作改动。取 3 g 虾肉(去头去壳)于 50 mL 离心管中, 加入 27 mL 煮沸冷却的蒸馏水均质离心, 测其上清液 pH。

1.3.6 细菌总数测定

参照 GB 4789.2—2016《食品安全国家标准 食品微生物检验学 菌落总数》测定中菌落总数的测定方法, 取 5 g 虾肉加入 45 mL 0.85%灭菌的生理盐水, 均质 20 min 后制成具有浓度梯度的样品稀释液, 取适宜稀释度样品 0.1 mL 于营养琼脂培养基上, (34±1) °C 培养 48 h 后计数。

1.3.7 TBARS 含量测定

取 5 g 虾肉, 加入 45 mL 三氯乙酸(7.5%, 含 0.1% EDTA), 充分振荡 30 min, 取 5 mL 上清液, 加入硫代巴比妥酸溶液(0.02 mol/L) 5 mL 混匀, 沸水浴 40 min, 冷却至常温后离心(3000 r/min, 15 min, 4 °C), 收集上清液 5 mL, 加入 5 mL 氯仿混匀后静置分层, 用紫外分光光度计测上清液在 532 nm 和 600 nm 处的吸光值 $A^{[17]}$, 按公式(1)计算:

$$TBARS = \frac{(A_{532} - A_{600}) \times 72.6 \times 100}{155 \times 10} \quad (1)$$

式(1)中, TBARS (thiobarbituric acid reactive substances)指硫代巴比妥酸反应的物质的量, 以每 100 g 南美白对虾肌肉中所含有丙二醛($C_3H_4O_2$)的毫克数表示。

1.3.8 TVB-N 值测定

将 10 g 均质虾肉放入离心管, 添加 0.6 mol/L 高氯酸溶液至 40 mL 混匀, 过滤, 取上清液, 参照 Kjeltac TM8000 系列凯氏定氮仪中测定肉类产品挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)方法进行测定。

1.4 数据处理

采用 Excel 处理数据, SPSS25.0 进行显著性差异分析, 数据图由 Origin 8.5 完成, 挥发性物质检测利用 NIST05 谱图库数据处理系统按峰面积归一化进行定量分析。

2 结果与分析

2.1 汽爆处理对柚皮挥发性物质的影响

如表 2 所示, 不同汽爆强度下柚子皮挥发性物质的种类及相对含量各不相同, 但主要成分是烯类, 其中 *D*-柠檬烯和月桂烯含量最多。汽爆柚皮中 α -松油醇相对含量显著高于未处理的柚子皮($P < 0.05$), 另外, 1.6EP 组检测结果与柚子皮相比出现多种新物质, 如糠醛、5-甲基呋喃醛、(-)- β -蒎烯、乙酸等, 有研究表明以上这些物质均具有抑菌抗氧化功能^[18-19]。体内物质的氧化及细菌的侵染是对虾贮藏期间面临的主要问题, 因此推测柚子皮具有保鲜对虾的效果, 且汽爆柚皮的效果好于柚子皮。

表 2 不同压强条件汽爆柚皮主要挥发性物质($n=3$, 匹配度均>70)Table 2 Main volatile substances in pomelo peel under different pressure conditions ($n=3$, suitability>70)

挥发性物质	0.8EP	1.4EP	1.6EP	柚子皮
<i>D</i> -柠檬烯	56.91±1.42 ^a	52.82±1.26 ^b	32.74±1.53 ^c	57.31±0.94 ^a
月桂烯	19.48±1.90 ^d	23.15±0.82 ^c	11.53±0.8 ^b	30.39±1.82 ^a
α -蒎烯	0.28±0.09 ^b	0.20±0.10 ^b	0.36±0.06 ^b	1.54±0.22 ^a
乙酸香叶酯	0.65±0.14 ^{bc}	1.00±0.24 ^{ab}	0.33±0.07 ^c	1.45±0.45 ^a
罗勒烯	0.93±0.22 ^a	1.16±0.17 ^a	0.48±0.14 ^b	1.11±0.30 ^a
α -松油醇	6.96±0.26 ^a	6.94±0.09 ^a	6.81±1.02 ^a	0.13±0.10 ^b
左旋香芹酮	0.47±0.21 ^b	0.82±0.32 ^b	3.31±0.15 ^a	0.06±0.06 ^c
Δ -杜松烯	0.63±0.09 ^{bc}	1.67±0.19 ^a	0.89±0.14 ^b	0.50±0.08 ^c
糠醛	0.13±0.12 ^c	0.83±0.04 ^b	8.06±0.19 ^a	0

表 2(续)

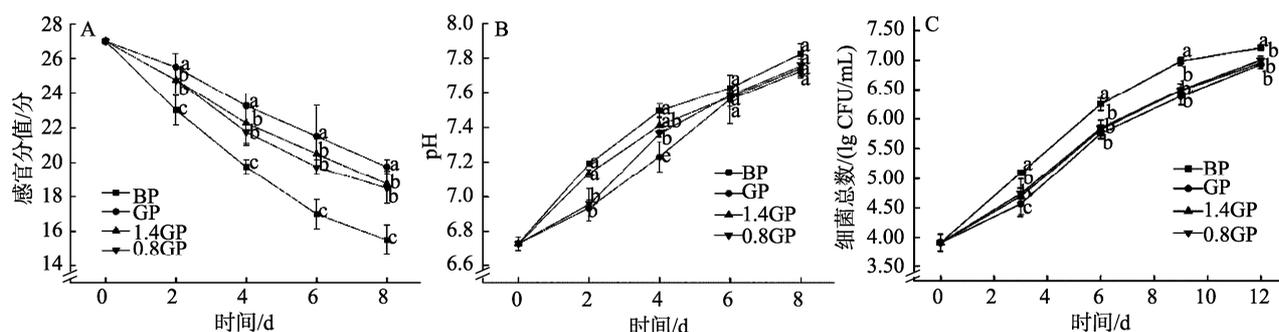
挥发性物质	0.8EP	1.4EP	1.6EP	柚子皮
5-甲基呋喃醛	0.05±0.06 ^c	1.16±0.11 ^b	11.51±0.93 ^a	0
(-)-β-蒎烯	1.35±0.13 ^a	0.74±0.16 ^b	0.22±0.09 ^c	0
乙酸	0.1±0.05 ^b	0.05±0.04 ^b	1.32±1.69 ^a	0
香芹醇	0	0	2.88±0.22 ^a	0

注: 同行的不同小写字母有显著性差异($P<0.05$), 下表 3 同。

2.2 不同汽爆压强的柚皮对南美白对虾的保鲜效果

图 1 为不同压强汽爆处理的柚皮对南美白对虾感官、pH 和细菌总数的影响。从图 1 中可以看出随着贮藏时间的延长, 感官评分、pH 和细菌总数均朝腐败方向发展, 但处理组变质程度小于对照组($P<0.05$)。图 1A 中, 第 6 d, BP 组感官评分降至 18 以下, 样品肉质较软、连接松弛、黑变明显, 有较强的腐败味, 其感官质量已被认为不可接受^[15], GP 组、1.4GP 组、0.8GP 组评分分别为 21.5、20.5、19.75, 黑变不明显, 所以柚皮汽爆产物能够保持贮藏期南美白对虾的感官特性。图 1B 中, 可以看到处理组 pH 整体低于空白组(BP), 其中 GP 组 pH 最低。图 1C 中, BP

组第 6 d 的细菌总数达到 6.25 lg CFU/mL, 超过了通常的可食用标准(6 lg CFU/mL)^[20]。GP 组、1.4GP 组、0.8GP 组细菌总数分别为 5.75、5.82、5.84 lg CFU/mL, 都低于 6 lg CFU/mL, 说明柚皮汽爆产物对细菌生长有一定抑制作用。综上所述, GP 组对南美白对虾品质的保持效果最好, 其次是 1.4GP 组, 0.8GP 组效果最差。蒸汽爆破柚皮会伴随美拉德反应的产生, 有研究报道美拉德反应产物具有抗氧化、抗菌以及细胞保护的作用^[21-22], 且高浓度的美拉德反应可以作为防腐剂来提升肉馅的感官品质并抑制微生物的生长^[23]。GP 组最优可能因为美拉德反应产物相对较多。



注: A. 感官评分; B. pH; C. 细菌总数, 下图 2 同。BP(空白对照); GP(1.6 压强汽爆柚皮处理组); 1.4GP(1.4 压强汽爆柚皮处理组); 0.8GP(0.8 压强汽爆柚皮处理组)。折线上不同小写字母代表不同组间有显著性差异($P<0.05$), 下图 2、4、5 同。

图 1 4 °C 贮藏下不同压强汽爆柚皮处理的南美白对虾的鲜度指标($n=3$)

Fig.1 Freshness index of *Penaeus vannamei* treated with steam-exploded pomelo peel at different pressures stored at 4 °C ($n=3$)

2.3 不同处理方式对南美白对虾的保鲜效果

2.3.1 鲜度指标

(1) 感官评分、pH 和细菌总数的变化

图 2 中看到, 随着贮藏时间的延长, 感官评分、pH 和细菌总数均朝腐败方向发展, 处理组趋势相对缓慢。图 2A 中, 在第 6 d, BP 组感官分值降至 18 左右, 其质量已被认为不可接受^[15], 但此时 GP 组评分 22.5, 气味带有柚皮的水果香; SP 组评分 23, 肉质相对紧致有弹性, 外观表现良好; LP 组评分 22, 但肉质和外观表现一般。图 3 为实验过程中部分南美白对虾的外观图像, 图 3A(第 0 d BP)的对虾为新鲜对虾固有的青色, 无黑变, 图 3 其他 4 张图片与之相比, 外观上虽都有部分发黄或发黑, 但其中图 3B(第 6 d SP)的对虾体黑点最少, 头连接较紧密。所以, 也可以看出 SP 组与其他

组相比其对虾的外观表现较好。图 2B 中, BP 组和 GP、LP 组的 pH 在贮藏前 6 d 具有显著性差异($P<0.05$), 而 SP 组与 BP 组一直存在显著差异($P<0.05$), pH 始终较低。图 2C 中, BP 组细菌总数在第 6 d 超过可食用标准(6 lg CFU/mL)^[20], 处理组细菌总数在 5.75 lg CFU/mL 左右, 均未超过可食用标准, 其中 SP 组最低, 为 5.73 lg CFU/mL。在第 8 d, GP 和 SP 处理组细菌总数增加到 6 lg CFU/mL 以上, 说明柚子果皮汽爆产物与其和海藻酸钠形成的包衣涂层能够抑制细菌的繁殖, 与 ABBASVALI 等^[24]用藏红花提取物保鲜对虾相比, 抑制效果更好。LP 组各项指标虽都好于 BP, 但感官评分整体低于 GP、SP 组, 前 4 d 降低 pH 和 4 d 后抑制细菌总数增长的效果稍弱。综上所述, 汽爆柚皮与海藻酸钠的涂层保鲜效果最好, 其次是汽爆柚皮, 乳酸菌浸泡效果最弱。

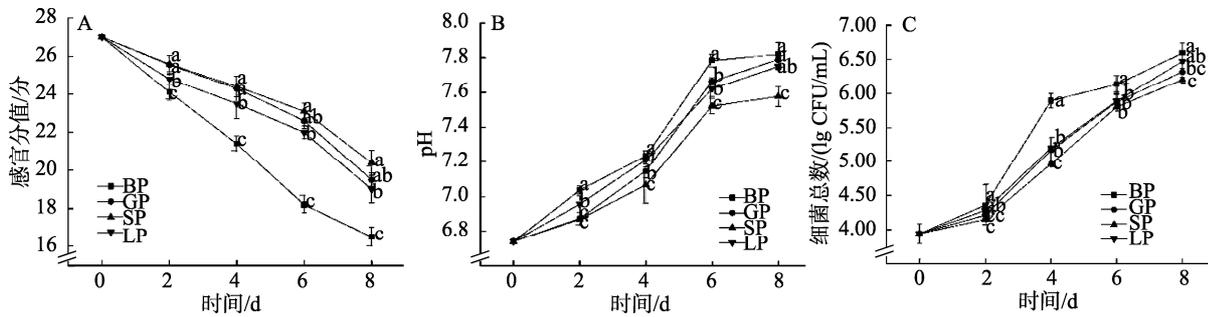


图2 4 °C贮藏不同方式处理的南美白对虾的鲜度指标(n=3)

Fig.2 Freshness index of *Penaeus vannamei* stored in different ways at 4 °C (n=3)

注: A. 第0 d BP; B. 第6 d SP; C. 第6 d GP; D. 第6 d LP; E. 第6 d BP。

图3 4 °C贮藏不同方式处理南美白对虾的外观

Fig.3 Appearance of *Penaeus vannamei* stored in different ways at 4 °C

(2)TBARS 含量的变化

在贮藏期间南美白对虾的一些生物大分子会遭受破坏, 所以通过测定脂肪氧化产物丙二醛与硫代巴比妥酸的反应可以判断南美白对虾的新鲜程度。图4所示, 第2 d 4种检测结果上升幅度都相对较大, 且处理组和对照组有显著性差异($P < 0.05$), 其中SP组上升幅度最小。随着贮藏时间延长, BP组上升最快, GP和SP组相对缓慢, 其中SP组在前4 d始终最低, 第2、4 d分别为1.10、1.33 mg/kg, 说明汽爆柚皮和其与海藻酸钠形成的包衣涂层能够抑制南美白对虾脂类的过氧化。LP组前4 d上升较快可能有乳酸菌的部分影响, 4 d后GP和LP组没有显著性差异($P > 0.05$), 说明LP组也一定程度上延缓了脂肪氧化。第8 d SP组TBARS值有所降低, 可能是由于贮藏后期丙二醛与蛋白质的降解产物发生反应从而产生其他物质^[25]。另一方面TBARS值在贮藏过程中虽然随时间的延长增大, 但本质上并没有太大的变化幅度, 可能是因为南美白对虾自身脂肪含量较低, 这与朱金虎^[25]研究对虾品质评价时测定的结果相一致。

(3)TVB-N 值的变化

TVB-N由蛋白质在活性内源酶和微生物的作用下生成^[26], 一般认为对虾TVB-N值不超过15 mg/100 g为一级, 15~20 mg/100 g为二级, 20~30 mg/100 g为三级^[15]。图5为贮藏第4 d时空白组和对照组的TVB-N值, 可以看出BP组的TVB-N值为16.20 mg/100 g, 已经超过一级鲜度指标, GP、SP组TVB-N值分别为13.00、12.50 mg/100 g, 还在一

级鲜度指标范围内。而LP组TVB-N值为21.15 mg/100 g, 已超过二级鲜度指标。说明汽爆柚皮(GP组)及其与海藻酸钠的涂层(SP组)能够减少TVB-N的产生, 表现出一定保鲜效果, 而乳酸菌浸泡的方式虽能够抑制一些腐败菌的生长, 但可能在贮藏后期也成为南美白对虾腐败因素之一^[27]。

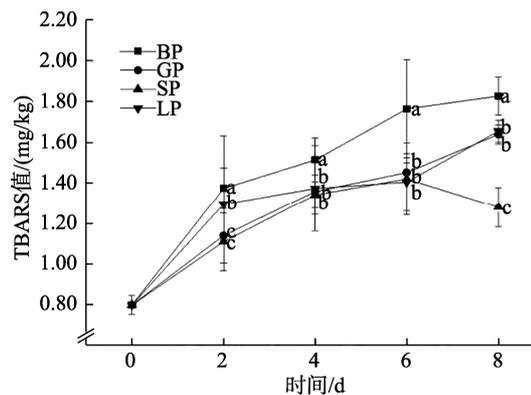


图4 4 °C贮藏不同方式处理的南美白对虾 TBARS 值(n=3)

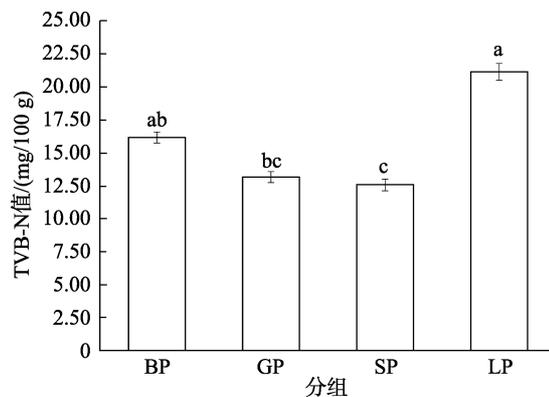
Fig.4 TBARS value of *Penaeus vannamei* stored in different ways at 4 °C (n=3)

图5 第4 d 4 °C贮藏不同方式处理的南美白对虾 TVB-N 值(n=3)

Fig.5 TVB-N value of *Penaeus vannamei* stored in different ways on the 4th day at 4 °C (n=3)

2.3.2 南美白对虾挥发性物质的变化

水产品贮藏的过程中因微生物的侵染以及自身脂肪

和蛋白质等物质的自溶降解会产生挥发性物质, 特征性的挥发性物质可以作为评价水产品鲜度的指标。如表 3 所示, GP 组和 SP 组的烯类物质相对含量明显较高, 这主要来源于柚皮的汽爆产物, 这些物质被认为具有清淡的香脂香气^[28]。GP 组的主要挥发性物质为 *D*-柠檬烯、 α -松油醇、月桂烯, SP 组的主要挥发性物质为 *D*-柠檬烯、月桂烯、乙酸, 这几种物质在 BP 组中相对含量都较低, 说明汽爆柚皮中的挥发性物质能够渗透到对虾体内。另外, α -蒎烯、 Δ -杜松烯是表 2 柚皮和表 3 SP 组中共有化合物, 但在 BP 组和 GP 组中未检测到, 可能是当汽爆柚皮、海藻酸钠及氯化钙形成的络合物附于对虾体表时, 促进了活性物质向对虾体内渗透。LP 组中含量较高的前 5 种化合物分别为丙酮、2-氨基-5-甲基苯甲酸、2-乙基己醇、

N-甲基乙胺、苯乙烯, 其中 2-乙基己醇一般被认为是新鲜度节点物质之一, 但 BP 组中却未检测到, 这可能与 LP 组的保鲜剂是乳酸菌有一定关系。葛敏敏等^[29]在研究南美白对虾贮藏过程中挥发性物质的变化时, 发现吡嗪、2-庚酮是新鲜度节点物质, 此两种物质在 LP 组、GP 组和 SP 组中未检测到, 而存在于 BP 组中。另外苯乙醛、肉豆蔻醛的相对含量会随贮藏时间不断增加, 苯乙醛在 SP 组中相对含量最小, 其次是 GP 组和 BP 组, 而肉豆蔻醛只在 BP 组中被检测到。综上所述, 3 种处理方式都抑制了对虾贮藏期间腥臭物质的产生, 提升了对虾的气味品质, 其中汽爆柚皮与海藻酸钠的复合涂层检测到的抑菌活性物质最多, 这可能是其抑制能力好, 提升对虾品质显著的原因之一。

表 3 不同方式处理的南美白对虾主要挥发性物质($n=3$, 匹配度均 >70)
Table 3 Main volatile organic compounds of *Penaeus vannamei* treated by different methods ($n=3$, suitability >70)

挥发性物质	BP	GP	SP	LP
<i>D</i> -柠檬烯	0	14.95±1.23 ^b	27.99±1.45 ^a	0
苯乙烯	0	0	1.12±0.1 ^b	3.23±0.54 ^a
α -蒎烯	0	0	0.52±0.12 ^a	0
月桂烯	0	3.13±0.35 ^b	6.95±0.13 ^a	0
Δ -杜松烯	0	0	0.20±0.05 ^a	0
十五烯	1.72±0.39 ^a	0	0	0
2,4-二甲基-1-庚烯	0	0	0	1.21±0.48 ^a
癸醛	0.42±0.15 ^a	0	0.21±0.08 ^b	0
壬醛	0	2.52±0.39 ^a	0	1.89±0.46 ^b
肉豆蔻醛	0.35±0.13 ^a	0	0	0
十五醛	3.31±0.32 ^a	0	0	0
十六醛	0	0.53±0.13 ^a	0	0
苯乙醛	0.62±0.18 ^{ab}	0.48±0.18 ^{ab}	0.37±0.11 ^b	0.75±0.16 ^a
苯甲醛	0	0	0.11±0.07 ^a	0
十三醛	0	0.58±0.06 ^a	0	0
十四烷醛	0	0	0	1.85±0.25 ^a
2-壬酮	6.97±0.20 ^a	0	4.15±0.24 ^b	0
2-庚酮	1.23±0.3 ^a	0	0.64±0.12 ^b	0
2-十一酮	0.67±0.11 ^a	0	0.58±0.33 ^a	0
丙酮	0.55±0.12 ^b	0	0	14.96±1.58 ^a
异戊醇	1.85±0.11 ^a	0.95±0.13 ^c	1.34±0.13 ^b	0
α -松油醇	0	8.33±0.86 ^a	1.39±0.34 ^b	0
1-辛烯-3-醇	0.39±0.08 ^a	0	0.19±0.02 ^b	0
(-)-4-萜品醇	0	0.70±0.21 ^a	0.20±0.15 ^b	0
2,4-二乙基庚烷-1-醇	0	0	0	0.91±0.22 ^a

表 3(续)

挥发性物质	BP	GP	SP	LP
2-乙基己醇	0	0	0	6.91±0.29 ^a
正戊醇	0	0	0	1.65±0.67 ^a
乙酸丁酯	0	0.45±0.13 ^a	0	0.68±0.27 ^a
邻苯二甲酸丁基酯 2-乙基己基酯	0.50±0.24 ^a	0	0	0
D-山梨糖醇六乙酸酯	0	0.55±0.17 ^b	0.26±0.18 ^c	1.01±0.12 ^a
乙酸香叶酯	0	0.13±0.09 ^a	0	0
二十二烷酸二十二烷基酯	0	0	0	1.52±0.23 ^a
乙酸	0.67±0.14 ^b	0.37±0.22 ^{bc}	5.99±0.34 ^a	0
2-氨基-5-甲基苯甲酸	6.64±0.43 ^b	0	0	10.85±2.84 ^a
棕榈酸	0	0	0.72±0.17 ^b	2.24±0.03 ^a
三甲胺	0.23±0.09 ^a	0	0.06±0.04 ^b	0
2,5-二甲基吡嗪	4.75±0.58 ^a	0	0.09±0.06 ^b	0
N-甲基乙胺	0	0	0	6.70±1.43 ^a
二甲硫基甲烷	0	0	0.26±0.19 ^a	0
十一烷	0.73±0.14 ^a	0	0	0
十五烷	0	0	1.13±0.21 ^a	1.20±0.44 ^a
十四烷	0	1.34±0.28 ^a	0	0.74±0.35 ^b
二十一烷	0.30±0.2 ^b	2.00±0.83 ^a	0	1.00±0.57 ^{ab}
1,2-环氧十六烷	0.25±0.12 ^a	0	0	0
萘	0	3.01±0.28 ^a	0	3.02±0.96 ^a
十九烷	0	0	0	0.89±0.55 ^a

3 结论与讨论

GC-MS 检测发现柚子皮的主要挥发性物质为 *D*-柠檬烯、 α -松油醇、月桂烯、 α -蒎烯、乙酸香叶酯等, 经过蒸汽爆破处理后的柚皮在进行 GC-MS 分析时也检测到了这些成分, 除此之外还新检测到 5-甲基呋喃醛和少量的糠醛、乙酸和香芹醇等物质, 这些活性成分也具有抑菌和抗氧化的作用^[30], 其中 1.6 Mpa 压强汽爆处理的柚皮检测到的活性物质种类和数量最多。另外通过对比不同压强汽爆处理的柚皮对南美白对虾的保鲜效果, 发现 1.6 Mpa 压强汽爆处理的柚皮能够很好地维持对虾感官品质, 抑制腐败菌的生长, 这可能与蒸汽爆破能够充分释放柚皮的活性物质、加速美拉德反应进行、产生更多的功能性化合物有很大关系。

本研究通过对比 1.6 MPa 汽爆柚皮(GP 组)、乳酸菌(LP 组)和 1.6 MPa 汽爆柚皮与海藻酸钠复合涂层(SP 组)对南美白对虾的保鲜效果, 发现 1.6 Mpa 汽爆柚皮与海藻酸钠的复合涂层(SP 组)保鲜效果最好, 其能较好地缓解对虾贮藏期间感官品质的恶化、抑制细菌总数、TBRAS 和 TVB-N

的增长, 延缓了对虾的腐败进程。其原因可能是海藻酸钠涂层能够隔绝对虾与氧气接触, 同时限制柚皮活性物质的向外释放, 进而使这些物质能够充分地发挥作用。王希瑞等^[31]研究表明淀粉和海藻酸钠与钙离子作用形成可食用膜, 对鲜肉有保鲜作用, 能够延长其货架期。王娟等^[32]将海藻酸钠与植物精油的复合膜应用到双孢蘑菇, 体现出良好的抑菌防腐效果。

通过检测不同处理方式处理 4 °C 贮藏的南美白对虾的挥发性物质, 结果发现, 南美白对虾经过汽爆柚皮与海藻酸钠的复合涂层处理后能够检测到多种来源于柚皮的挥发性物质, 如 *D*-柠檬烯、 α -松油醇、月桂烯、 α -蒎烯、 Δ -杜松烯等, 这些物质能够抑制对虾贮藏期间细菌的增殖。三甲胺、2,5-二甲基吡嗪等带给对虾异常风味的含氮、含硫物质经过处理后其相对含量显著降低, 较好地维持了对虾的感官品质和鲜度。进一步说明了柚皮的挥发性物质能够渗透到对虾中, 抑制腐败菌的生长, 提升对虾品质。另外, 有其他研究表明用马家柚果皮包裹的方式处理冷藏鲫鱼, 能够改变其贮藏品质^[14]。综上所述, 汽爆柚皮与海藻

酸钠的复合涂层在一定程度上保持了对虾贮藏期间的新鲜度, 抑制了腥臭化合物的产生, 具有延长对虾低温冷藏货架期的作用。为水产品领域开发新的经济、环保的生物保鲜剂提供了参考。

参考文献

- [1] LI DY, ZHOU DY, YIN FW, *et al.* Impact of different drying processes on the lipid deterioration and color characteristics of *Penaeus vannamei* [J]. *J Sci Food Agric*, 2020, 100(6): 2544–2553.
- [2] 朱素芹. 冷藏凡纳滨对虾特定腐败菌群体感现象与致腐能力的研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
ZHU SQ. Study on the quorum sensing and spoilage potential of specific spoilage organisms of refrigerated *Litopenaeus vannamei* [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [3] SOOKYING D, DAVIS DA, SILVA FSDD. A review of the development and application of soybean-based diets for Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* [J]. *Aquacul Nutr*, 2013, 19(4): 441–448.
- [4] 高晓光, 吕蒙, 臧芳波, 等. 小龙虾加工与保鲜技术研究进展 [J]. *保鲜与加工*, 2021, 21(12): 126–131, 139.
GAO XG, LV M, ZANG FB, *et al.* Research progress of crayfish processing and preservation technology [J]. *Storage Process*, 2021, 21(12): 126–131, 139.
- [5] LI XA, FY A, YUN ZA, *et al.* Utilization of pomelo peels to manufacture value-added products: A review [J]. *Food Chem*, 2021, 351: 129247.
- [6] LIAO T, CAO J, YANG Z, *et al.* Leaf and flower extracts of six *Michelia* L.: Polyphenolic composition, antioxidant, antibacterial activities and in vitro inhibition of α -amylase and α -glucosidase [J]. *Chem Biodivers*, 2022, 19(3): 1612–1880.
- [7] 夏智慧, 崔文玉, 丰程凤, 等. 蒸汽爆破对从植物中提取的多酚含量及抗氧化活性影响的研究进展 [J]. *江苏农业学报*, 2021, 37(5): 1352–1360.
XIA ZH, CUI WY, FENG CF, *et al.* Research progress on the effects of steam explosion on the content and antioxidant activity of polyphenols extracted from plants [J]. *Jiangsu J Agric Sci*, 2021, 37(5): 1352–1360.
- [8] JY A, XIN LB, SW A, *et al.* Steam explosion pretreatment of *Achyranthis bidentatae* radix: Modified polysaccharide and its antioxidant activities [J]. *Food Chem*, 2022, 375: 131746.
- [9] 崔文玉, 丰程凤, 夏智慧, 等. 蒸汽爆破对葡萄皮渣酚类物质含量及抗氧化活性的影响 [J]. *食品与发酵工业*, 2022. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.030008
CUI WY, FENG CF, XIA ZH, *et al.* Effect of steam explosion on the phenolics and antioxidant activities in grape pomace [J]. *Food Ferment Ind*, 2022. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.030008
- [10] 史国萃, 常晶, 宣晓婷, 等. 海水鱼肠道低温乳酸菌的分离及其在南美白对虾保鲜中的应用研究 [J]. *食品科技*, 2019, 44(7): 37–42.
SHI GC, CHANG J, XUAN XT, *et al.* Isolation of lactic acid bacteria from marine fish intestine and their application in the refrigerated storage of *Litopenaeus vannamei* [J]. *Food Sci Technol*, 2019, 44(7): 37–42.
- [11] LI W, ZHANG X, HE X, *et al.* Effect of steam explosion pretreatment on the composition and bioactive activities of tartary buckwheat bran phenolics [J]. *Food Funct*, 2020, 11(4): 648–658.
- [12] 崔青曼, 李文学, 高彤, 等. 一株具有抑菌活性的乳酸片球菌的鉴定与培养条件优化 [J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2020, (12): 137–140.
CUI QM, LI WX, GAO T, *et al.* Identification and optimization of culture conditions of abacteriostatic strain of *Pediococcus acidilactici* [J]. *Heilongjiang Anim Sci Vet Med*, 2020, (12): 137–140.
- [13] 周晔, 王国霞, 黄文庆. 乳酸菌对南美白对虾保鲜效果的初步探讨 [J]. *广东农业科学*, 2010, 37(10): 117–119.
ZHOU Y, WANG GX, HUANG WQ, *et al.* Primary study on the application of lactic acid bacterium in *Penaeus vannamei* preservation [J]. *Guangdong Agric Sci*, 2010, 37(10): 117–119.
- [14] 梁广钰, 徐仰仓. 马家柚果皮对鲫鱼贮藏期挥发性物质的影响 [J]. *食品工业科技*, 2020, 41(4): 224–228.
LIANG GY, XU YC. Effect of Majiyou peel on volatile compounds in *Carassius auratus* during storage [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2020, 41(4): 224–228.
- [15] 熊青, 谢晶, 钱韵芳, 等. 茶多酚复合保鲜剂对冷藏南美白对虾品质的影响 [J]. *食品科学*, 2014, 35(2): 287–291.
XIONG Q, XIE J, QIAN YF, *et al.* Effect of tea polyphenol complex preservative on the quality of *Penaeus vannamei* under cold storage [J]. *Food Sci*, 2014, 35(2): 287–291.
- [16] BALTI R, MANSOUR MB, ZAYOUD N, *et al.* Active exopolysaccharides based edible coatings enriched with red seaweed (*Gracilaria gracilis*) extract to improve shrimp preservation during refrigerated storage [J]. *Food Biosci*, 2020, 34: 100522.
- [17] 马敏杰, 巴吐尔·阿不力克木. 不同风干温度对风干草鱼品质特性的影响 [J]. *肉类研究*, 2019, 33(12): 12–17.
MA MJ, BUTUER ABLKM. Effect of different air-drying temperatures on quality characteristics of air-dried grass carp [J]. *Meat Res*, 2019, 33(12): 12–17.
- [18] HE Y, SANG S, TANG H, *et al.* In vitro mechanism of antibacterial activity of eucalyptus essential oil against specific spoilage organisms in aquatic products [J]. *J Food Process Preserv*, 2022, 46(3): e16349.
- [19] MALIK I, SHAH FA, ALI T, *et al.* Potent natural antioxidant carveol attenuates MCAO-stress induced oxidative, neurodegeneration by regulating the Nrf-2 pathway [J]. *Front Neurosci*, 2020, 14: 659.
- [20] KAI CA, LLS A, YFH A, *et al.* Antimicrobial and antioxidant effects of a hydroxypyridinone derivative containing an oxime ether moiety and its application in shrimp preservation-science [J]. *Food Control*, 2019, 95: 157–164.
- [21] KLANGPETCH W, PHROMSURIN K, HANNARONG K, *et al.* Antibacterial and antioxidant effects of tropical citrus peel extracts to improve the shelf life of raw chicken drumettes [J]. *Int Food Res J*, 2016, (23): 700–707.
- [22] DING XW, SU Y, XU Y, *et al.* A study on the inhibiting effect of pomelo peel extract on autoxidation in lard [J]. *J Southwest Agric Univ*, 2000, (22): 413–415.
- [23] 李鑫, 章银良, 张陆燕. 美拉德反应产物在肉品中的应用研究 [J]. *食品科技*, 2019, (9): 5.
LI X, ZHANG YL, ZHANG LY. Application of maillard reaction products in meat [J]. *Food Sci Technol*, 2019, (9): 5.
- [24] ABBASVALI M, RANA EI A, SHEKARFOROUSH SS, *et al.* The effects of aqueous and alcoholic saffron (*Crocus sativus*) tepal extracts on quality and shelf-life of pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during iced storage [J]. *J Food Qual*, 2016, 39(6): 732–742.

- [25] 朱金虎. 对虾品质评价及分级技术研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
ZHU JH. *Penaeus vannamei* quality evaluation and classification technology [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012.
- [26] ALEX AG, CANDIDO SG. The effect of glaze uptake on storage quality of frozen shrimp [J]. *J Food Eng*, 2009, 90: 285–290.
- [27] 罗庆华. 水产品特定腐败菌研究进展[J]. *食品科学*, 2010, 31(23): 468–472.
LUO QH. Research advances on specific spoilage organisms of aquatic products [J]. *Food Sci*, 2010, 31(23): 468–472.
- [28] 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/OL]. *食品工业科技*, 2021, 42(4): 264–270.
XIE YS, FU XX, ZHENG JN, *et al.* Effects of bio-preservatives on the quality of pre-cooked pacific white shrimp (*Penaeus vannamei*) during refrigerated storage [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(4): 264–270.
- [29] 葛敏敏, 王建华, 刘靖靖, 等. 南美白对虾贮藏过程中挥发性物质的变化[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(19): 225–231.
GE MM, WANG JH, LIU JJ, *et al.* Changes of volatile compounds in *Penaeus vannamei* during storage [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2018, 39(19): 225–231.
- [30] REIS DR, AMBROSI A, LUCCIO MD. Encapsulated essential oils: A perspective in food preservation [J]. *Future Foods*, 2022, 5: 100126.
- [31] 王希瑞, 李新瑞, 于梦怡, 等. 天然浸泡膜对鲜肉品质影响的研究及应用[J]. *现代食品*, 2021, (22): 124–127.
WANG XR, LI XR, YU MY, *et al.* Study and application of natural soak film on the quality of fresh meat [J]. *Mod Food*, 2021, (22): 124–127.
- [32] 王娟, 程萌, 孔瑞琪, 等. 植物精油海藻酸钠复合膜对双孢蘑菇的抑菌保鲜效果研究[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(5): 319–326.
WANG J, CHENG M, KONG RQ, *et al.* Inhibitory and fresh-keeping effects study of plant essential oil sodium alginate composite film on *Agaricus bisporus* [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2019, 35(5): 319–326.

(责任编辑: 于梦娇 张晓寒)

作者简介



邸珍涛, 硕士研究生, 主要研究方向为水产品的保鲜贮藏。

E-mail: 884706129@qq.com



王永妍, 硕士研究生, 主要研究方向为水产品的保鲜贮藏。

E-mail: 827989294@qq.com

徐仰仓, 教授, 主要研究方向为水产品的保鲜贮藏。

E-mail: xuyc@tust.edu.cn