

姜黄素介导光动力减菌技术对缢蛏的保鲜效果

林以琳¹, 李世洋¹, 赖丹宁¹, 黄钰婕¹, 胡嘉森¹, 张志刚², 林少玲^{1,2*}

(1. 福建农林大学食品科学学院, 福州 350002; 2. 肉食品安全生产技术国家重点实验室, 厦门 361000)

摘要: 为探究光动力减菌技术对缢蛏的保鲜效果, 以缢蛏为原材料, 菌落总数、感官及理化特征为评价指标, 在以姜黄素浓度、浸泡时间及光照时间为单因素试验的基础上进行 Box-Behnken 试验设计, 优化光动力减菌工艺条件。同时对 4℃ 下贮藏 8 d 后的光动力减菌处理前后的蛏肉进行感官指标及理化指标分析。结果表明: 以 26.6 μmol/L 姜黄素浸泡蛏肉 24.8 min, 通过 LED 蓝光照射 20.5 min 的抑菌效果明显, 可灭活 99.99% 的细菌。此外, 光动力减菌作用较好保持了蛏肉外观、色泽等感官特性, 维持了蛏肉含水率、pH 值、硫代巴比妥酸和挥发性盐基氮, 缢蛏的保质期延长至 6 d。因此, 光动力减菌技术具有良好的杀菌特性, 可用于生鲜缢蛏的保鲜。

关键词: 杀菌; 贮藏; 光动力减菌技术; 缢蛏; 菌落总数; 感官指标; 理化指标

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.16.038

中图分类号: TS254.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-16-0320-07

林以琳, 李世洋, 赖丹宁, 等. 姜黄素介导光动力减菌技术对缢蛏的保鲜效果[J]. 农业工程学报, 2020, 36(16): 320-326.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.16.038 <http://www.tcsae.org>

Lin Yilin, Li Shiyang, Lai Danning, et al. Effects of curcumin-mediated of anti-microbial photodynamic technology on preservation of razor clam[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(16): 320-326. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.16.038 <http://www.tcsae.org>

0 引言

缢蛏又名黄蛏 (*Sinonovacula constricta*), 其质地脆薄, 生活在浅海的泥沙中。据 2019 年中国渔业统计年鉴^[1]表明, 缢蛏是贝类养殖中的重要品种之一, 至 2018 年底, 其养殖产量高达 85.30 万 t。缢蛏肉质鲜美, 营养价值高, 是低脂、低热的海洋健康食品而深受消费者青睐。特别是鲜剥蛏肉的上市, 因其方便处理且易于加工等特点而日益受到消费者追捧, 成为缢蛏产业发展新亮点。但蛏肉中蛋白质和含水率较高, 肌肉中结缔组织少, 内源性蛋白酶活跃^[2-3], 新鲜缢蛏在贮藏过程中易受微生物污染, 从而引起变色、变味而腐败的现象, 使其丧失营养及食用价值。因此, 缢蛏保鲜成为国内外研究人员关注的热点。

目前, 缢蛏的保鲜技术主要包括物理保鲜法、生物保鲜法等^[4]。物理保鲜法中的低温保鲜技术是在温度低于 0℃ 时, 对食品进行贮藏保鲜的方法。其主要优点是时间短, 对技术要求低, 且能有效保持缢蛏新鲜度^[5-6]。但低温保鲜对于缢蛏的理化特性有较大影响。生物保鲜法是利用浸泡^[7]、喷淋或涂抹^[8]等方式, 将具有抑菌或杀菌的天然物质应用于食品中, 进而达到防腐保鲜效果的方法。研究表明壳聚糖^[9]、海藻酸钠^[10]、乳酸链球菌素 (Nisin)^[11]等生物保鲜剂对缢蛏肉具有保鲜作用, 能延长缢蛏肉的

货架期。但生物保鲜剂的成本较高, 在使用过程中存在不良的气味^[12]。

光动力减菌技术 (Anti-microbial Photodynamic Technology, APDT) 是通过光源、光敏剂及周围氧环境共同作用的绿色、安全的非热力灭菌手段。其作用原理是通过光敏剂的靶向性, 即光敏剂可优先聚集在有害物质周围, 给予适当波长的光照后, 光敏剂可吸收光子能量, 产生一些活性氧物质; 这些单线态氧、自由基通过氧化作用攻击有害微生物, 达到杀菌的目的^[13-14]。因此, 合适的光敏剂、孵育时间及光照时间是光动力减菌技术的核心要素, 其对杀菌效果有一定的影响。目前, 光动力减菌技术在食品领域已有相关报道, Allend 等^[15]证实了由 UV-C 激发的光动力减菌技术能有效延长新鲜草莓的保质期。此外, 曹斌斌等^[16]以姜黄素为光敏剂, 对牡蛎进行光动力减菌技术处理, 结果表明, 在 LED 灯 (波长范围 420~480 nm) 下照射, 姜黄素介导的光动力减菌技术能有效杀灭牡蛎中的有害微生物。

光敏剂是光动力减菌技术的核心要素。按其性质可分为第一代光敏剂, 如血卟啉; 第二代光敏, 如卟啉类衍生物 5-氨基乙酰丙酸; 第三代光敏剂, 如酞菁类。姜黄素 (Curcumin) 是一种天然的食品添加剂^[17], 是世界卫生组织 (World Health Organization, WHO) 和美国食品药品监督管理局 (Food and Drug Administration, FDA) 以及我国批准使用的食品添加剂, 具有低毒性、易代谢等特点。此外, 姜黄素具有高靶向性及分子识别功能, 是一种新型第三代光敏剂。大量研究表明, 姜黄素具有抗炎和清除自由基等功效^[18-19]; 姜黄素已被证实具有多种生理活性, 比如其在抗癌方面的药理作用, 有望应用于

收稿日期: 2020-04-17 修订日期: 2020-08-10

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(31801649); 肉食品安全生产技术国家重点实验室开放课题

作者简介: 林以琳, 研究方向: 食品加工与安全。Email: 286847809@qq.com

*通信作者: 林少玲, 博士, 毕业于香港中文大学, 主要从事食品科学研究。

Email: shaoling.lin@fafu.edu.cn

新型抗癌、防癌药物与保健食品的研发^[20-21]。

本研究以菌落总数和灭活率为指标，探究光动力减菌技术对缢蛏肉菌落总数的影响，并确定其最佳的姜黄素浓度、浸泡时间和光照时间。其次，结合感官指标和色差、含水率、pH 值、硫代巴比妥酸、挥发性盐基氮等理化指标，比较在 4℃贮藏条件下保存 8 d 的缢蛏肉各指标间差异，探究光动力减菌技术对缢蛏肉品质特性的影响。

1 材料与方法

1.1 试验材料

缢蛏：从福州金山大润发超市购买，挑选鲜活、完整，质量均在 25 g 左右的鲜活缢蛏，购买后将样品置于盐水中浸泡 15 min。待缢蛏吐净沙子，用水冲洗多次，直至水中无泥沙。

蛏肉的光动力处理：将开壳后鲜活的缢蛏浸泡在一定浓度的姜黄素溶液中，并给予波长为 425 nm，光功率密度为 172.8 J/cm² 的蓝光下进行光照^[22]。

1.2 主要仪器与设备

营养琼脂，北京陆桥技术有限责任公司；食品级姜黄素（纯度≥95%），合肥博美生物科技有限责任公司；全自动色差仪，北京辰泰克仪器技术有限公司；TA-XT2i 质构仪，英国 Stable Micro System 公司；SFY-20A 卤素快速水分测定仪，深圳市冠亚电子科技有限公司；MTP-601F 全自动荧光酶标仪，天美（中国）科学仪器有限公司；LED 通道控制电源，北京卓立汉光仪器有限公司。

姜黄素母液的配置：在黑暗条件下，精确量取食品级乙醇 10 mL 加入 0.1 g 姜黄素粉末充分混合，制得姜黄素母液。

1.2.1 单因素试验

光敏剂浓度的选择：在黑暗条件下，分别用 0、5、10、20、40、80 μmol/L 的姜黄素溶液中浸泡缢蛏 20 min，并在室温于 LED 灯下光照 20 min。

光敏剂浸泡时间的选择：在黑暗条件下，用 40 μmol/L 的姜黄素溶液分别浸泡 0、5、10、15、20、25 min，并在室温于 LED 灯下光照 20 min。

光照时间选择：在黑暗条件下，用 40 μmol/L 姜黄素溶液浸泡 20 min 后，分别用 LED 灯光照 0、5、10、20、30、40 min。

1.2.2 响应面试验设计

选取浓度、浸泡时间及光照时间 3 个因素作为考察变量，以菌落总数为响应值优化光动力减菌技术的工艺条件。通过 Design-Expert 8.06 设计试验并分析，如表 1 所示。

1.3 细菌菌落平板计数

参照《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）》中提供的方法进行测定^[23]。

$$\text{灭活率} = (N - n) / N \times 100\%$$

式中 N 为空白对照组的菌落总数，lg(CFU/g)； n 为光动力试验组的菌落总数，lg(CFU/g)。

表 1 响应面试验设计

Table 1 Response surface test design

水平 Levels	因素 Factors		
	姜黄素浓度 Curcumin concentration (μmol·L ⁻¹)	浸泡时间 Soaking time/min	光照时间 Exposure time/min
1	60	25	40
0	40	20	30
-1	20	15	20

1.4 感官评价

参照《食品安全国家标准 鲜、冻动物性水产品（GB 2733—2015）》中对鲜、冻动物性水产品的感官要求进行对缢蛏肉进行感官评价^[22]。首先，对光动力减菌技术处理前、后的蛏肉制定感官评价标准，如表 2 所示。随机选取 10 名曾参与过感官评价的人员对新鲜缢蛏的外观、色泽、香气、口感 4 个感官指标进行评分，每个指标为 25 分，总分为 100 分，以感官指标总分作为最终结果。

表 2 缢蛏感官评价标准

Table 2 Sensory evaluation standard of razor clam

项目 Items	感官指标 Sense indexes	分值 Scores
外观 Appearance	状态完整，外壳鲜亮，蛏肉有活力	>20
	状态较完整，外壳微黑，蛏肉发干	10~20
	状态破碎，外壳出现黑斑，蛏肉出现腐烂	<10
色泽 Colour	色泽均一，呈白色至浅黄色，具有水产品应有的色泽	>20
	色泽不均一，呈深黄色，轻微变黑	10~20
	色泽不均一，呈深黄色，严重变黑	<10
香气 Fragrance	新鲜的海腥味、鲜味，无异味	>20
	出现酸败味，腥味加重	10~20
	具有腐败味，有严重的腥味	<10
口感 Taste	肉质紧密，有弹性	>20
	肉质较紧密，弹性消失	10~20
	肉质柔软，出现腐烂，拉扯易烂	<10

1.5 理化指标的测定

含水率测定：按照《中华人民共和国食品安全国家标准 食品中水分的测定（GB 5009.3—2016）》中的相关规定，用卤素快速水分检测仪测定光动力减菌技术作用前后蛏肉中的含水率^[24]。

pH 值测定：根据《食品安全国家标准 食品 pH 值的测定（GB 5009.237—2016）》中的方法进行光动力减菌技术作用前后的蛏肉的 pH 值进行测定^[25]。

硫代巴比妥酸（Thiobarbituric Acid, TBA）测定：参照周娇娇等^[26]的方法，利用双抗体夹心法，结合试剂盒说明书，对光动力作用前后的蛏肉进行检测。

挥发性盐基氮（Total Volatile Basic Nitrogen, TVBN）值的测定：用全自动凯氏定氮仪对光动力减菌技术作用前后的蛏肉进行挥发性盐基氮的测定。

1.6 数据统计分析

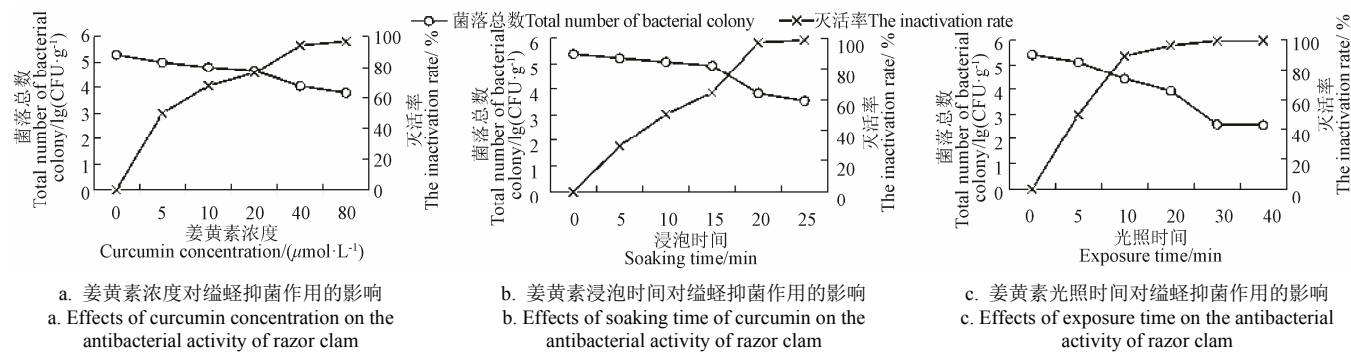
所有试验结果均测定 3 次，表示为平均值±标准差。采用 GraphPad Prism 6 软件对单因素试验进行显著性差异性分析，并绘制相关图表；运用 Design-Expert 8.06 进行响应面分析；显著性差异水平选取 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果

2.1.1 姜黄素浓度对缢蛏肉中菌落总数的影响

由图 1a 可知, 随姜黄素浓度的增加, 光动力处理后缢蛏肉中菌落总数逐渐降低。当姜黄素浓度为 0 时, 菌落总数为 5.19 lg(CFU/g), 当姜黄素浓度为 40 μmol/L 时, 缢蛏中的细菌下降了 1.14 lg(CFU/g); 相较于未浸泡姜黄素的蛏肉, 采用 40 μmol/L 的姜黄素进行光动力减菌处理后的缢蛏中的细菌的抑菌效果显著 ($P<0.05$), 可灭活蛏肉中 94.10% 的细菌。因此, 40 μmol/L 姜黄素浸泡 20 min 结合 20 min 光照能够有效抑制细菌生长。



注: 图 1a 中缢蛏的浸泡时间是 20 min, 光照时间是 20 min; 图 1b 中缢蛏的姜黄素的浓度是 40 μmol·L⁻¹, 光照时间是 20 min; 图 1c 中缢蛏的姜黄素的浓度是 40 μmol·L⁻¹, 浸泡时间是 20 min。

Note: In fig.1a, the soaking time and exposure time of razor clam were 20 min and 20 min, respectively; In fig.1b, the curcumin concentration and exposure time of razor clam were 40 μmol·L⁻¹ and 20 min, respectively; In fig.1c, the curcumin concentration and soaking time of razor clam were 40 μmol·L⁻¹ and 20 min, respectively.

图 1 单因素试验缢蛏的抑菌效果

Fig.1 Single factor test on antibacterial activity of razor clam

2.2 响应面试验结果

通过 Box-Behnken 试验设计, 以姜黄素浓度、姜黄素浸泡时间和 LED 灯光照时间为试验因素, 菌落总数为响应值所得拟合回归方程: $Y = 3.15 - 0.068A - 0.15B + 0.059C - 0.25AB + 0.13AC + 0.48BC + 0.070A^2 - 0.40B^2 - 0.15C^2$, Y 为菌落总数 (lg(CFU/g)), A 为姜黄素浓度, B 为浸泡时间, C 光照时间, 如表 3 所示。ANOVA 方差分析如表 4 所示, 结果表明 $P<0.0001$, 该回归模型极显著。此外, $R^2 = 0.9821$, 表明决定系数可解释 98.21% 的响应值变化。因此, 该模型可以较好的对光动力减菌技术后的菌落总数进行预测及分析。

同时根据所得到的拟合回归方程可发现, 其中的一次项 B , 交互项 AB 和 BC 以及二次项 B^2 和 A^2 均达到极显著水平 ($P<0.01$); 此外, 一次项 A , 交互项 AC 达到差异性显著水平 ($P<0.05$)。由表 4 中的 F 值可判断三因素对缢蛏的菌落总数的影响大小为: B (浸泡时间)、 A (姜黄素浓度)、 C (光照时间)。该结果提示浸泡时间对杀菌效果具有较大的影响, 长时间的浸泡有利于姜黄素在蛏肉内细菌中富集, 更有效发挥姜黄素的作用。同时, 姜黄素浓度也有显著的影响。但响应面优化时间范围内 (20~40 min) 光照时间的作用不显著, 提示 20 min 光照即可达到较好的灭活效果。

2.1.2 浸泡时间对缢蛏肉中菌落总数的影响

由图 1 b 可知, 随浸泡时间增加, 缢蛏中的菌落总数逐渐降低。当浸泡 20 min 后, 菌落总数降低了 1.54 lg(CFU/g); 相较于未浸泡姜黄素的蛏肉, 采用 40 μmol/L 的姜黄素浸泡 20 min 可灭活 97.11% 的细菌。结果表明, 40 μmol/L 姜黄素浸泡 20 min 结合 20 min 光照, 能够有效抑制细菌生长。

2.1.3 光照时间对缢蛏肉中菌落总数的影响

由图 1 c 可知, 40 μmol/L 姜黄素浸泡 20 min 条件下, 随着光照时间的增加, 缢蛏中的菌落总数逐渐减少。当无光照时, 蛏肉中的菌落总数为 5.43 lg(CFU/g); 当给与 30 min 光照, 蛏肉中细菌量下降了 2.82 lg(CFU/g), 可灭活 99.90% 的细菌。结果表明, 40 μmol/L 姜黄素浸泡 20 min 结合 30 min 光照, 其灭菌效果较好。

表 3 响应面设计和结果

Table 3 Experimental design and results of response surface analysis

试验组 Experimental group	姜黄素浓度 Curcumin concentration A	浸泡时间 Soaking time B	光照时间 Exposure time C	菌落总数 Total number of bacterial colony/ lg(CFU·g ⁻¹)
1	0	0	0	3.19±0.03
2	0	0	0	3.157±0.05
3	1	1	0	2.276±0.20
4	0	-1	1	2.314±0.10
5	0	1	-1	1.943±0.26
6	-1	0	1	3.012±0.21
7	-1	0	-1	3.142±0.08
8	0	0	0	3.193±0.18
9	0	1	1	3.003±0.13
10	0	0	0	3.116±0.77
11	-1	-1	0	2.875±0.07
12	0	0	0	3.112±0.12
13	0	-1	-1	3.163±0.04
14	1	0	-1	2.874±0.10
15	1	-1	0	3.112±0.05
16	-1	1	0	3.042±0.20
17	1	0	1	3.262±0.52

表 4 回归模型和方差分析
Table 4 ANOVA for response surface quadratic model

方差来源 Source of variation	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean of square	F 值 F value	P 值 P value
模型 Model	2.27	9	0.25	42.64	<0.000 1**
A	0.037	1	0.037	6.30	0.040 4*
B	0.18	1	0.18	30.44	0.000 9**
C	0.028	1	0.028	4.67	0.067 5
AB	0.25	1	0.25	42.53	0.000 3**
AC	0.067	1	0.067	11.39	0.011 8*
BC	0.91	1	0.91	154.08	<0.000 1**
A ²	0.021	1	0.021	3.48	0.104 3
B ²	0.66	1	0.66	112.27	<0.000 1**
C ²	0.095	1	0.095	16.14	0.005 1**
残差 Residual	0.041	7	5.913E-003		
失拟项 Lack of fit	0.035	3	0.012	7.93	0.1211
纯误差 Pure error	5.955E-003	4	1.489E-003		
总回归 Total regression	2.31	16			

注：P<0.05*，差异显著；P<0.01**，差异极显著。
Note: P<0.05*, significant difference, P<0.01**, difference is extremely significant.

通过回归模型对最优保鲜工艺进行预测分析，得到响应值 Y 最大值时的各因素值为 A=0.33、B=0.97、C=-0.95，对应各因素的数值为：26.6 μmol/L 姜黄素、浸泡时间 24.8 min，LED 蓝光光照时间 20.5 min。在此条件下，预测姜黄素介导的光动力杀菌技术作用后，蛏肉中的细菌数量为 1.862 lg(CFU/g)可灭活蛏肉中 99.99%的细菌。为验证该模型的可靠性，根据预测条件进行 3 次平行试验，结果表明缢蛏中的细菌数量为 1.743 lg(CFU/g)，说明此模型优化所得结果可靠。

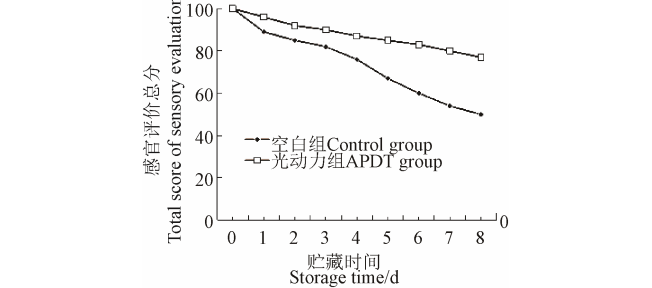
2.3 光动力减菌技术对缢蛏感官评价的影响

新鲜购买的缢蛏口感好，肉质白嫩、紧密，有弹性，呈新鲜海腥味。由图 2 可知，随贮藏时间的延长，空白组缢蛏的评分逐渐下降，当贮藏 4 d 时，空白组蛏肉的感官总分为 76 分，低于 80 分，达到不可食用状态，这可能是由于缢蛏肉中存在的微生物侵入行为，导致缢蛏肌肉组织松软、分解肌肉组织中的蛋白质等营养成分，导致缢蛏出现腐败变质的现象。而光动力组蛏肉的感官总分为 87 分，仍表现良好的新鲜水产品状态。在 4℃下贮藏第 8 天时，空白组蛏肉已腐烂，且出现黑斑、严重的腥臭味，而光动力组蛏肉的外观也开始变黑，出现酸臭味，达到不可食用状态。因此，选用 8 天内不同处理方式下的蛏肉进行理化指标的检测。

2.4 光动力减菌技术对缢蛏含水率和 pH 值的影响

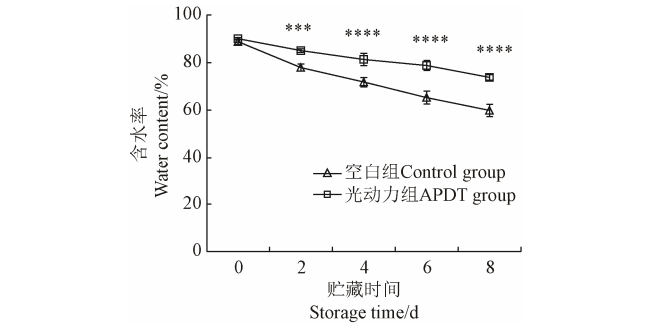
由图 3 可知，随着贮藏时间的增加，缢蛏的含水率逐渐降低。在贮藏 2 d 后，光动力组中缢蛏的含水率降低 5.02 个百分点，而空白组中缢蛏的含水率降低了 10.90 个百分点。当贮藏至第 8 天，空白组中缢蛏的含水率相较于光动力组降低了 13.85 个百分点。这可能是随着贮藏天数增加，蛏肉出现细胞破裂、细胞液流失等现象；然而，光动力组的缢蛏含水率下降较慢，这可能是光动力作用维持了蛏肉

体内的蛋白质网状结构，保持了蛏肉的肌肉组织^[17]。因此，光动力减菌技术能够有效的减缓缢蛏水分的流失。



注：光动力组处理条件为姜黄素浓度 26.6 μmol·L⁻¹、浸泡时间 24.8 min、光照时间 20.5 min。
Note: The treatment conditions of APDT were curcumin concentration of 26.6 μmol·L⁻¹, soaking time of 24.8 min, and exposure time of 20.5 min.

图 2 光动力减菌技术对缢蛏的感官评价总分
Fig.2 Effects of APDT on the total score of sensory evaluation of razor clam



注：同样贮藏天数的空白组和光动力组进行差异性分析，P<0.05***，差异显著；P<0.01****，差异极显著，下同。
Note: The difference group between the control and APDT were analyzed in the same storage days; P<0.05***, significant difference, P<0.01****, difference is extremely significant. The same below.

图 3 光动力减菌技术对缢蛏含水率的影响
Fig.3 Effects of APDT on water content of razor clam

从表 5 可以看出，空白组缢蛏的 pH 值随着贮藏天数的增加而升高，这可能是由于蛏肉自身内源酶及细菌的升高，导致其体内蛋白质被分解为氨和胺类物质，进而使蛏肉的 pH 值升高^[27]。此外，相较于 4 d 内蛏肉的 pH 值，在贮藏 4 d 后的蛏肉 pH 值的变化程度加快。光动力组蛏肉的 pH 值与空白组相比，升高速度较为平缓。因此，光动力减菌技术能够抑制缢蛏在贮藏过程中的腐败速率，能较好保持蛏肉的新鲜程度。

表 5 光动力减菌技术对缢蛏 pH 值的影响
Table 5 Effects of (APDT) Anti-microbial Photodynamic Technology on pH value of razor clam

贮藏时间 Storage time/d	0	2	4	6	8
空白组 Control group	6.82±0.26	7.41±0.21	7.84±0.09	8.52±0.18	8.85±0.13
光动力组 APDT group	6.83±0.00	7.16±0.10	7.39±0.10*	7.70±0.2**	8.19±0.21**

2.5 光动力减菌技术对缢蛏硫代巴比妥酸和挥发性盐基氮的影响

如图 4 所示，硫代巴比妥酸(Thiobarbituric Acid, TBA)是用于评价脂肪氧化的指标之一，其主要原理^[27-28]为显色反应，即 TBA 能与脂肪中的分解产物结合，加入丙二醛

生成蓝色化合物, 最终转化为黄色化合物。随储藏时间的增加, 空白组和光动力组的 TBA 值逐渐升高, 光动力组与空白组相比存在显著差异 ($P < 0.05$)。从图中可知, 2 d 内, 空白组中蛭肉的 TBA 值从 $0.093 \mu\text{mol/L}$ 升高至 $0.257 \mu\text{mol/L}$, 光动力组中蛭肉的 TBA 值从 $0.093 \mu\text{mol/L}$ 升高至 $0.195 \mu\text{mol/L}$; 第 2 天后, 其上升速度均出现减缓现象, 且光动力组的 TBA 值均低于空白组。这可能与姜黄素和 LED 光照时间有关; 同时姜黄素具有抗氧化性, 短时间的蓝光照射减弱了脂质的过度氧化^[29]。

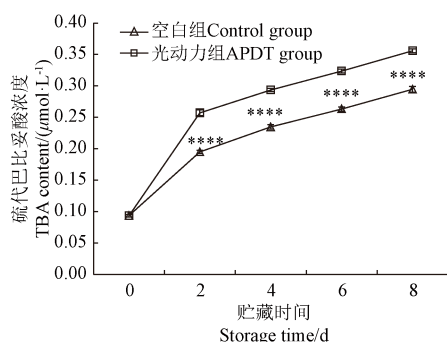


图 4 光动力减菌技术对蛭硫代巴比妥酸的影响

Fig.4 Effects of APDT on Thiobarbituric Acid (TBA) value of razor clam

当蛭出现品质下降时, 其体内微生物和内源酶的作用会引起含氮化合物的降解, 如三甲胺、二甲胺等这类含氮物质即总挥发性盐基氮。研究表明, 当水产食品的 TVBN 值超过 $25 \text{ mg}/100\text{g}$, 则不可食用^[30]。由图 5 所示, 在贮藏过程中蛭肉的 TVBN 值总体呈上升趋势。4 d 内空白组与光动力组中蛭肉的 TVBN 值均未超过 $25 \text{ mg}/100\text{g}$; 但空白组在第 6 天的 TVBN 值已经达到 $25 \text{ mg}/100\text{g}$, 光动力组在第 8 天的 TVBN 值超 $25 \text{ mg}/100\text{g}$ 。因此, 光动力减菌技术可在一定程度上减缓蛭中蛋白质的腐败。

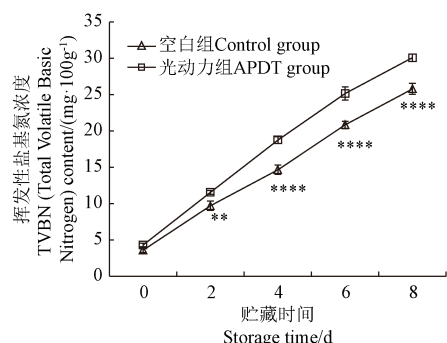


图 5 光动力减菌技术对蛭挥发性盐基氮的影响

Fig.5 Effects of APDT on total volatile basic nitrogen of razor clam

3 结 论

通过探究不同姜黄素浓度、姜黄素浸泡时间和不同光照时间条件的光动力技术对蛭细菌落总数的影响, 确定较佳抑菌参数, 并在优化条件下评价蛭肉的感官、含水率、pH 值、硫代巴比妥酸和挥发性盐基氮等指标。结

果表明, 影响光动力灭活蛭中的微生物的显著性顺序为浸泡时间、姜黄素浓度、光照时间。姜黄素介导的光动力减菌技术对蛭的优化保鲜工艺条件: $26.6 \mu\text{mol/L}$ 姜黄素浓度、浸泡时间 24.8 min , LED 蓝光光照时间 20.5 min , 在此条件下可灭活蛭肉中 99.99% 的细菌。光动力减菌技术保持了蛭肉的感官品质, 又能最大程度保留其营养成分, 有效延长了蛭的保质期至 6 d 。同时, 光动力减菌技术更好保持了蛭肉的水分, 有效减缓了蛭肉的腐败。

[参 考 文 献]

- [1] 董金和. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019.
- [2] Yang F, Chen S, Miao Z, et al. The effect of several microalgae isolated from East China Sea on growth and survival rate of postset juveniles of razor clam, *Sinonovacula constricta*[J]. Aquaculture Nutrition. 2016, 22(4): 846-856.
- [3] 黄瑞, 艾春香, 林旭吟, 等. 福建长乐海域近江蛭营养成分分析与品质评价[J]. 应用海洋学学报. 2014, 33(1): 96-104.
- [4] Huang Rui, Ai Chunxiang, Lin Xuyin, et al. Nutritional component analysis and quality evaluation of *Sinonovacula rivularis* from Changle sea area of Fujian[J]. Journal of Applied Oceanography, 2014, 33(1): 96-104. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王子萌, 苑宁, 王琳琳, 等. 保鲜技术在水产品中的应用研究[J]. 农产品加工. 2017, 43(8): 52-54.
- [6] Wang Zimeng, Yuan Ning, Wang Linlin, et al. Study on the application of preservation technology in aquatic products[J]. Farm Products Processing, 2017, 43(8): 52-54. (in Chinese with English abstract)
- [7] Zeng Yayun, Shang Zhuangzhuang, Zhang Rui, et al. The research progress of preservatives against mildew and corrosion in aquatic[J]. Journal of Food Science and Technology. 2020, 5(1): 36-41.
- [8] 陈怡璇, 焦阳. 冻藏及解冻过程对水产品品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报. 2019, 10(2): 306-311.
- [9] Chen Yixuan, Jiao Yang. Effects of frozen preservation and thawing on the quality changes of aquatic products[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2019, 10(2): 36-41. (in Chinese with English abstract)
- [10] 杨华, 张慧恩. 生物保鲜在不同条件下对蛭保鲜效果的影响[J]. 食品研究与开发. 2014, 35(21): 126-130, 131.
- [11] Yang Hua, Zhang Huien. Study on the biological preservatives fresh-keeping effect on razor clams under different conditions[J]. Food Research and Development, 2014, 35(21): 126-130. (in Chinese with English abstract)
- [12] 刘寒, 钱磊, 张志军, 等. 生物保鲜剂应用于水产品保鲜的研究进展[J]. 食品研究与开发. 2019, 40(18): 208-212.
- [13] Liu Han, Qian Lei, Zhang Zhijun, et al. Reararch progress on application of biological preservatives in aquatic products[J]. Food Research and Development, 2019, 40(18): 208-212. (in Chinese with English abstract)
- [14] 周倩倩, 谢晶. 含有壳聚糖的保鲜剂在水产品保鲜中的应用的研究进展[J]. 食品工业科技. 2019, 40(1): 341-345.

- Zhou Qianqian, Xie Jing. Research progress of preservatives containing chitosan in fresh-keeping of aquatic products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(1): 341-345. (in Chinese with English abstract)
- [10] 管彬彬, 陈彬, 程晓宏. 水产品新鲜度表征和评价方法研究综述[J]. 福建分析测试. 2019, 28(3): 15-21.
- Guan Binbin, Chen Bin, Cheng Xiaohong. A review of freshness characterization and evaluation for aquatic product[J]. Fujian Analysis and Testing. 2019, 28(3): 15-21. (in Chinese with English abstract)
- [11] 孙明恒. 河蚌贮藏保鲜及加工技术的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
- Sun Mingheng. Study on Storage and Preservation and Processing Technology of Mussel[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [12] 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. (in Chinese with English abstract)
- [13] 林少玲, 黄晨楹, 朱子瑶, 等. 非热力光动力灭菌技术在食品安全中的研究进展[J]. 中国食品学报. 2018, 18(7): 323-331.
- Lin Shaoling, Huang Chenying, Zhu Ziyao, et al. Research progress of non-thermal photodynamic therapy on food safety[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(7): 323-331. (in Chinese with English abstract)
- [14] 郑宝东, 林少玲, 曾绍校, 等. 光动力技术研究进展及其在食品工业中的应用前景[J]. 食品与生物技术学报. 2020, 39(5): 6-15.
- Zheng Baodong, Lin Shaoling, Zeng Shaoxiao, et al. Photodynamic technology and its application in food industry[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2020, 39(5): 6-15. (in Chinese with English abstract)
- [15] Allende A, Marín A, Buendía B, et al. Impact of combined postharvest treatments (UV-C light, gaseous O₃, superatmospheric O₂ and high CO₂) on health promoting compounds and shelf-life of strawberries[J]. Postharvest biology and technology. 2007, 46(3): 201-211.
- [16] 曹斌斌, 武娟, 许川山, 等. 姜黄素介导的光动力冷杀菌方法对牡蛎杀菌的效果研究[J]. 食品科学. 2016, 37(5): 46-49.
- Cao Binbin, Wu Juan, Xu Chuangshan, et al. Inactivation effect of curcumin-mediated photodynamic non-thermal sterilization on bacteria in oysters[J]. Food Science, 2016, 37(5): 46-49. (in Chinese with English abstract)
- [17] Lin Yilin, Hu Jiamiao, Li Shiyang, et al. Curcumin-based photodynamic sterilization for preservation of fresh-cut hami melon[J]. Molecules. 2019, 24(13): 2374.
- [18] Zhang H H, Zhang Y, Cheng Y N, et al. Metformin in combination with curcumin inhibits the growth, metastasis, and angiogenesis of hepatocellular carcinoma in vitro and in vivo[J]. Mol carcinog. 2018, 57(1): 44-56.
- [19] Zhang H H, Zhang Y, Cheng Y N, et al. Metformin in combination with curcumin inhibits the growth, metastasis, and angiogenesis of hepatocellular carcinoma in vitro and in vivo[J]. Molecular Carcinogenesis, 2018, 57(1): 44-56.
- [20] Bahadır A, Ceyhan A, Oz G O, et al. Protective effects of curcumin and beta-carotene on cisplatin-induced cardiotoxicity: An experimental rat model[J]. Anatol J Cardiol. 2018, 19(3): 213-221.
- [21] Shi L, Zhang L, Li H, et al. Protective effects of curcumin on acrolein-induced neurotoxicity in HT22 mouse hippocampal cells[J]. Pharmacological Reports. 2018, 70(5): 1040-1046.
- [22] Bhavya M L, Hebbar H U. Sono-photodynamic inactivation of escherichia coli and staphylococcus aureus in orange juice[J]. Ultrasonics sonochemistry. 2019, 57: 108-115.
- [23] 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 Juan, Cheng Meng, Kong Ruiqi, et al. Inhibitory and fresh-keeping effects study of plant essential oil sodium alginate composite film on *Agaricus bisporus*[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(5): 319-326. (in Chinese with English abstract)
- [24] 郑超, 王月秋. 食品中水分的测定方法[J]. 黑龙江科学技术创新, 2016(22): 8-8.
- Zheng Chao, Wang Yueqiu. The method for determination of moisture in foods[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2016(22): 8-8. (in Chinese with English abstract)
- [25] 刘金峰. pH 计的原理、使用方法和维护[J]. 口腔护理用品工业, 2019, 29(2): 35-36.
- [26] 周娇娇, 郭丹婧, 尤娟, 等. 不同致死方式对鳙鱼肌肉鲜度及生物胺含量的影响[J]. 华中农业大学学报, 2016, 35(6): 129-135.
- Zhou Jiaojiao, Guo Danjing, You Juan, et al. Effects of different slaughter methods on freshness and biogenic amines of monopterus albus muscle[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2016, 35(6): 129-135. (in Chinese with English abstract)
- [27] Georgantelis D, Ambrosiadis I, Katikou P, et al. Effect of rosemary extract, chitosan and α -tocopherol on microbiological parameters and lipid oxidation of fresh pork sausages stored at 4°C[J]. Meat Science. 2007, 76(1): 172-181.
- [28] Salih A M, Smith D M, Price J F, et al. Modified extraction 2-thiobarbituric acid method for measuring lipid oxidation in poultry[J]. Poultry Science. 1987, 66(9): 1483-1488.
- [29] Zhu Z, Cai H, Sun D W, et al. Photocatalytic effects on the quality of pork packed in the package combined with TiO₂ coated nonwoven fabrics[J]. Journal of Food Process Engineering, 2019, 42(3): e12993.
- [30] 吴渊. 乳酸菌发酵应用于水产防腐[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- Wu Yuan. The Effects of Lactic Acid Bacteria Fermentation on the Quality[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese with English abstract)

Effects of curcumin-mediated of anti-microbial photodynamic technology on preservation of razor clam

Lin Yilin¹, Li Shiyang¹, Lai Danning¹, Huang Yujie¹, Hu Jiamiao¹, Zhang Zhigang², Lin Shaoling^{1,2*}

(1. College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. State Key Laboratory of Food Safety Technology for Meat Products, Xiamen 361000, China)

Abstract: Razor clam (*Sinonovacula constricta*) is one of the most commercial clam species in China, which is in the *Siliqua* genus with narrow and slender shells. It has been reported that razor clams are rich in vitamins, amino acids and carbohydrates, and have high nutritional value. However, razor clam is easy to rot during storage, which seriously affects its sensory quality and consumer preferences. Particularly, its abundance of nutrients can lead to high reproduction of microorganisms, thus shortening its shelf life. Therefore, it is highly necessary to propose a novel and efficient sterilization method inhibiting microbial contamination for razor clam preservation. Currently, the anti-microbial photodynamic technology is considered as a novel non-thermal sterilization technology that not only can reduce the microbial growth in foods, but also can preserve their nutritional value, color, quality, and water content. Therefore, the purpose of this study was to investigate the influence of anti-microbial photodynamic technology on the preservation of razor clam. The treated conditions of the anti-microbial photodynamic sterilization for razor clam preservation were optimized by total number of bacterial colony with Box-Behnken experimental design. Meanwhile, sensory evaluation and physicochemical indexes were also evaluated on razor clam after storage at 4 °C for 8 days. The results demonstrated that curcumin-mediated could effectively inhibit the residual bacterial contamination in the razor clam and delay the growth of bacteria. The curcumin concentration, soaking time and LED exposure time were the key factors affecting the antibacterial efficiency of this photodynamic sterilization. The sterilization rate could reach 99.99%, when photodynamic sterilization using 26.6 $\mu\text{mol/L}$ curcumin concentration with 24.8 min soaking time and 20.5 min LED exposure time. In addition, the appearance, color and other sensory characteristics of razor clam were maintained in good condition after anti-microbial photodynamic technology treatment stored at 4 °C for 6 days. Compared with the control group, the physicochemical indexes water content, pH value, thiobarbituric acid and total volatile basic nitrogen values of razor clam were also in desirable range after the optimized anti-microbial photodynamic treatment. The water content of the anti-microbial photodynamic -treated samples was 73.79%, which is significantly higher than that of the control group 59.94%, indicating that treatment of razor clam with curcumin-mediated anti-microbial photodynamic technology might also maintain the water content. In addition, within 6 days of storage, the increase in pH value and decreases in thiobarbituric acid and total volatile basic nitrogen values of razor clam were observed. Moreover, anti-microbial photodynamic technology treatment could significantly delay these changes compared to the control group. In conclusion, this study suggested that the anti-microbial photodynamic technology had good bactericidal activity and could be used for the preservation of razor clam.

Keywords: sterilization; storage; anti-microbial photodynamic technology; razor clam; total number of bacterial colony; sensory indexes; physicochemical indexes