

姜黄素介导的光动力技术对生鲜南美白对虾品质的影响

林以琳, 李 璟, 张江玲, 林少玲*
(福建农林大学食品科学学院 福州 350002)

摘要 目的:以南美白对虾为原材料,研究贮藏期菌落总数及理化指标的变化情况,分析姜黄素介导的光动力技术对生鲜南美白对虾品质的影响。方法:以菌落总数为检测指标,采用姜黄素质量浓度(0,10,20,30,40 mg/L)、孵育时间(0,10,20,30,40 min)和光照时间(0,10,20,30,40 min)设计单因素试验,在此基础上进行正交试验设计,优化减菌工艺条件。测定光动力处理后南美白对虾在 4℃条件下贮藏 8 d,挥发性盐基氮、硫代巴比妥酸、质构、含水量、色泽和 pH 值等理化指标的动态变化。结果:用 30 mg/L 姜黄素喷洒对虾,在黑暗条件孵育 40 min,LED 照射 40 min,可灭活南美白对虾中 99.99% 的细菌。与对照组第 8 天相比,光动力组的挥发性盐基氮值下降了 8.83 mg/100 g,且其硫代巴比妥酸值下降了 0.057 mg/kg;光动力组的硬度、咀嚼性和回弹性均得到较好的维持。在贮藏第 8 天时,光动力组的含水量相较于对照组提高了 2.70%,且其 pH 值相较于对照组下降了 0.49。另外,光动力处理后的对虾色泽较好。结论:姜黄素介导的光动力作用对生鲜南美白对虾具有良好的减菌特性。与传统 4℃保鲜相比,光动力处理的南美白对虾在质构、色泽等方面更佳。本研究可为虾肉的光动力杀菌提供参考依据。

关键词 姜黄素;光动力技术;南美白对虾;理化指标;品质;保鲜

文章编号 1009-7848(2023)05-0271-10 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2023.05.027

南美白对虾(*Penaeus vannamei*)属对虾科、滨对虾属,原产于南美太平洋沿岸水域。上世纪 90 年代初期,南美白对虾实现了人工繁殖,并成为中国虾类养殖的主要对象^[1]。目前,南美白对虾在我国福建、海南、山东等地已有大规模的养殖,因味道鲜美、经济效益高且营养价值丰富而深受人们的喜爱。然而,南美白对虾在养殖水域环境中易受水体微生物的富集;同时其自身水分含量高、组织脆弱等因素导致其在捕捞、运输、加工及贮藏过程中极易造成微生物污染^[2-3]。研究表明,微生物活动可直接影响水产品的货架期,同时微生物代谢产生的一些物质,如挥发性盐基氮严重影响水产食品等感官品质^[4-6]。研究发现,冷藏能有效延长南美白对虾的货架期至 4 d,然而,其色差和质构等品质发生明显的下降趋势^[7]。邓文静等^[8]通过复合生物保鲜剂较好地抑制了南美白对虾的腐败变质,然而复合生物保鲜剂的投资成本较高。采用适当

的杀菌保鲜方式来保证南美白对虾的安全性并延缓其货架期,成为亟待解决的问题。

光动力技术(Photodynamic technology, NTPT)作为一种新型非热杀菌技术,因具有高效、低成本、可重复、易于维护、安全和环境友好等特点,在食品保鲜领域展现出巨大的应用前景^[9]。光动力技术的原理是利用光敏剂、氧气和可见光之间的相互作用,产生活性氧物质,以灭活食品中有害微生物^[10]。在有氧条件下,光敏剂暴露于可见光后,可在微生物细胞内累积大量的活性氧物质;活性氧物质通过破坏其生物靶分子的结构,引起有害微生物细胞的损伤,甚至死亡,而达到抗菌目的^[11]。

姜黄素(Curcumin)是从姜黄中分离出的天然多酚类物质。其作为一种天然的食品添加剂,已被 WHO、美国药品管理局(Food and Drug Administration, FDA)和我国批准使用。其具有毒性低、代谢快且靶向性强等特点,是极具开发潜力的天然食品级光敏剂。研究表明,姜黄素具有抗氧化、抗炎、抗凝血、抗肿瘤、抗衰老等功效^[12-15]。同时,姜黄素本身具有一定的杀菌功效,被作为食品添加剂应用于食品加工领域,在食品微生物控制领域具有广泛的应用前景^[16-17]。

目前,光动力技术在水产及鲜切水果的保鲜

收稿日期:2022-05-04

基金项目:国家自然科学基金面上项目(32272450);福建省自然科学基金项目-对外合作项目(2020I0010; 2020I0012)

第一作者:林以琳,女,硕士生

通信作者:林少玲 E-mail: shaoling.lin@fafu.edu.com

方面已有相关应用。如 Hu 等^[18]以 50 mmol/L 姜黄素结合 15 min 光照对即食海蜇进行微生物灭活,结果表明光动力技术更好地维持了即食海蜇的感官品质,且在 4 ℃条件下有效延长了即食海蜇的贮藏期。Tao 等^[19]采用光动力技术研究 4 ℃贮藏条件对鲜切富士苹果品质的影响,结果表明:光动力处理降低了苹果片表面大肠杆菌的数量,其菌落总数降低了 0.95 对数值。Lin 等^[20]探讨了光动力技术对鲜切哈密瓜保鲜效果的影响;结果表明:光动力作用降低了鲜切哈密瓜表面的微生物,杀菌后菌落总数降低了 1.8 lg(CFU/g);此外,光动力作用维持了鲜切哈密瓜的感官品质和理化特性。曹斌斌等^[21]采用姜黄素介导的光动力探究牡蛎中细菌的灭活效果,结果表明:相较于空白组,光动力处理后牡蛎的杀菌率在 90%以上。

本文将姜黄素介导的光动力技术应用于南美白对虾的保鲜,以菌落总数和理化特征为评价指标,在姜黄素浓度、日晒时间及光照时间单因素实验的基础上做正交试验设计,优化光动力减菌工艺条件。对 4 ℃贮藏 8 d 内光动力处理前、后的南美白对虾的挥发性盐基氮、硫代巴比妥酸、质构、色泽和含水量等理化指标进行分析,探究姜黄素介导的光动力处理对南美白对虾的保鲜作用。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

生鲜南美白对虾,福州大润发超市。

95%姜黄素,梯希爱(上海)化成工业发展有限公司;氯化钾、硫代巴比妥酸、硼酸,国药集团化学试剂有限公司;三氯乙酸、75%生理盐水,北京索莱宝科技有限公司。

1.2 主要仪器与设备

PB-10 型 pH 酸度计,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;425 nm LED 灯,北京卓立汉光仪器有限公司;CM-5 型色差仪,日本柯尼卡美能达;EZ-test 型质构分析仪,日本岛津有限公司;UV-1100 紫外分光光度计,上海美谱达仪器有限公司;SCIENTZ-09 型无菌均质器,宁波新芝生物科技股份有限公司;Legend Micro17R 冷冻高速离心机,赛默飞世尔科技(中国)有限公司。

1.3 方 法

1.3.1 原材料处理和光动力技术 将体质量约 20 g 的新鲜南美白对虾去除虾体表面的水分,使用无菌培养皿对南美白对虾进行单体包装,并用无菌袋进行二次包装,置 4 ℃冰箱保鲜,备用。

光动力处理流程:1) 在样品上日晒一定质量浓度的姜黄素溶液;2) 在无菌环境下避光孵育样品;3) 使用波长为 425 nm 的 LED 灯对样品进行光照;4) 通过菌落总数计算验证(是否达到光动力杀菌效果)。

1.3.2 单因素实验

1) 光敏剂质量浓度的选择 分别用 0, 10, 20, 30, 40 mg/L 姜黄素溶液日晒对虾表面,并在黑暗条件下孵育 20 min,于 LED 灯下光照 30 min。

2) 孵育时间的选择 用 30 mg/L 姜黄素溶液日晒对虾表面,并在黑暗条件下孵育 0, 10, 20, 30, 40 min,于 LED 灯下光照 30 min。

3) 光照时间选择 用 30 mg/L 姜黄素溶液日晒对虾后,在黑暗条件下孵育 30 min,分别用 LED 灯光照 0, 10, 20, 30, 40 min。

1.3.3 正交试验设计 选取姜黄素质量浓度、孵育时间及光照时间 3 个因素为考察变量,以菌落总数为评价指标设计正交试验,以优化光动力减菌工艺。做 $L_9(3^3)$ 正交试验设计,见表 1。测定姜黄素光动力后各组对虾的菌落总数,每组试验重复 3 次。

表 1 最优组合的 $L_9(3^3)$ 正交试验设计
Table 1 $L_9(3^3)$ orthogonal test design for the optimal combination

| 组别 | 因素 | | |
|----|--------------------------------|--------------|--------------|
| | 姜黄素质量浓度/ mg·L ⁻¹ | 孵育时间/ min | 光照时间/ min |
| 1 | 20 | 20 | 20 |
| 2 | 30 | 30 | 30 |
| 3 | 40 | 40 | 40 |

1.3.4 细菌菌落平板计数 参照 GB 4789.1-2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 总则》进行细菌菌落平板计数。试验重复 3 次,取平均值。

$$\text{灭活率}(\%) = \frac{N-n}{N} \times 100 \quad (1)$$

式中, N ——对照组的平均菌落数; n ——试验组的平均菌落数。

1.3.5 挥发性盐基氮(TVBN)含量的测定 参考张沛玲等^[22]的处理方法,检测光动力处理前、后南美白对虾挥发性盐基氮的情况。

精确称取不同处理条件、不同贮藏时间的南美白对虾各 5.00 g,去壳、搅碎,装于无菌均质袋中。加入 10 mL 无菌水,高速均质 2 min,于 4 °C 静置 20 min,过滤虾肉,吸取 5.0 mL 上清液于 100 mL 容量瓶中,备用。用乙酰丙酮-甲醛分光光度计法测定南美白对虾中的挥发性盐基氮含量。每个样品分别测定 3 次,取其平均值,记录。

$$X = \frac{A}{m \times \frac{5}{100} \times \frac{V}{50} \times 1000} \times 100 \quad (2)$$

式中, X ——样品挥发性盐基氮含量(mg/100 g); A ——待测样中挥发性盐基氮含量(μg); m ——样品质量(g); V ——待测样体积(mL)。

1.3.6 硫代巴比妥酸(TBA)含量的测定 精确称取不同贮藏时间,经光动力处理前、后的 5.00 g 南美白对虾,去壳、搅碎,加入 20 mL 蒸馏水搅拌,混合均匀,加 2 mL 盐酸溶液及 2 mL 液体石蜡,采用水蒸气蒸馏,收集 50 mL 蒸馏液。取 5 mL 蒸馏液,与 5 mL TBA 醋酸溶液充分混合,沸水浴加热 30 min 后冷却 10 min,以蒸馏水为空白样,在波长 535 nm 测其吸光度 A 。每个样品分别测定 3 次,取其平均值记录。

$$\text{TBA 值}(\text{mg/kg}) = A \times 7.8 \quad (3)$$

1.3.7 质构(TPA)的测定 参照徐南^[23]的处理方法,取不同贮藏时间,经光动力处理前、后的南美白对虾的第 2 腹节,用二次挤压质构分析方法(TPA)测定南美白对虾的硬度、弹性。

质构仪:P5 探头(直径 5 mm),测试前速度 2.00 mm/s,测试时速度 1.00 mm/s,起始力度 0.6 N,形变量 30%,上升高度 5 mm,测试时间 3 s。每个样品分别测定 3 次,取其平均值,记录。

1.3.8 含水量的测定 精确称取不同贮藏时间,经光动力处理前、后的 5.00 g 南美白对虾,去壳、搅碎,置于水分测定仪中,测定含水量。每个样品测定 3 次,取其平均值,记录。

1.3.9 色差的测定 精确称取不同贮藏时间,经光动力处理前、后的南美白对虾,置于手持式色差仪中测定其 L^* 、 a^* 和 b^* 值。每个样品测定 3 次,取其平均值,记录。

1.3.10 pH 值的测定 精确称取不同贮藏时间,经光动力处理前、后的 5.00 g 南美白对虾,去壳、搅碎,置于烧杯中,加入 10 mL 无菌水,高速均质 2 min,于 4 °C 喷洒 10 min,过滤虾肉后用 PB-10 酸度计测定滤液的 pH 值。每个样品测定 3 次,取其平均值,记录。

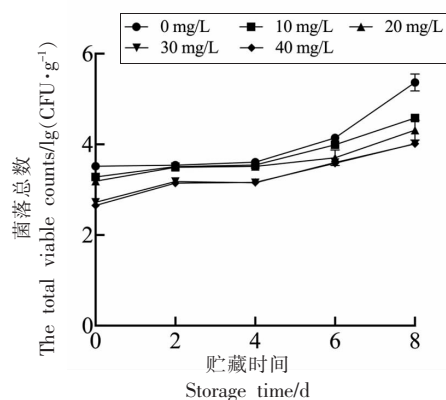
1.4 数据统计与分析

所有试验结果均测定 3 次,表示为平均值 \pm 标准差。采用 GraphPad Prism 6 软件对单因素实验进行显著性差异性分析,并绘制相关图表;运用 SPSS(Statistical Product and Service Solutions)数据处理系统(IBM SPSS Statistics 24.0)对试验数据进行统计分析,显著性差异水平选取 $P < 0.05$ 。

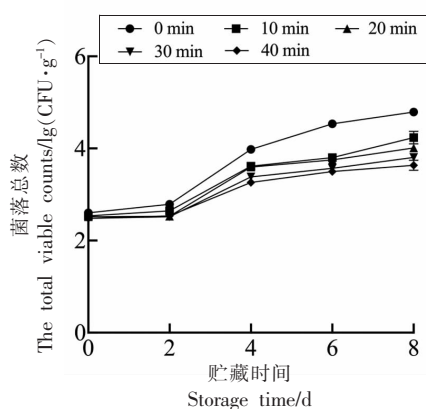
2 结果与分析

2.1 单因素实验结果

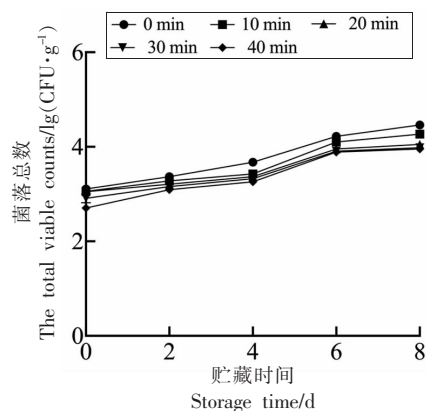
如图 1a 所示,随着贮藏时间的增加,对虾的菌落总数呈上升趋势;姜黄素浓度增加可显著降低虾肉的微生物($P < 0.05$)。贮藏 8 d 时,无姜黄素处理的对虾的菌落总数上升 (1.85 ± 0.877) lg(CFU/g);经 30 mg/L 姜黄素处理的菌落总数上升 (1.29 ± 0.028)lg(CFU/g)。图 1a 表明姜黄素处理减缓了贮藏过程中微生物的生长。如图 1b 所示,随着贮藏时间的增加,对虾的菌落总数呈上升趋势;孵育时间增加可显著降低虾体内的微生物($P < 0.05$)。贮藏 8 d 时,孵育 0 min 处理的对虾菌落总数为 4.61 lg(CFU/g);经 30 mg/L 姜黄素孵育 40 min 处理的对虾菌落总数下降 (0.94 ± 0.123)lg(CFU/g)。如图 1c 所示,随着贮藏时间的增加,对虾的菌落总数呈上升趋势;光照时间增加可显著降低虾体内的微生物数量($P < 0.05$)。贮藏 8 d 时,光照 0 min 处理的对虾菌落总数上升 (1.35 ± 0.017)lg(CFU/g);相较于第 8 天光照 0 min 处理组,经 30 min 光照处理的对虾的菌落总数下降 (0.48 ± 0.017) lg(CFU/g)。由单因素试验可知,光动力处理降低了对虾中的微生物菌落总数。



(a)不同姜黄素质量浓度对南美白对虾菌落总数的影响



(b)不同孵育时间对对虾菌落总数的影响



(c)不同光照时间对对虾菌落总数的影响

图1 不同条件对南美白对虾的抑菌效果

Fig.1 Effects of different conditions on the antibacterial activity of *Penaeus vannamei*

2.2 正交试验结果

为进一步优化光动力灭活对虾中微生物的杀菌工艺条件,选取姜黄素质量浓度(20,30,40 mg/L)、孵育时间(20,30,40 min)、光照时间(20,30,40 min)3个因素进行正交试验设计(如表2)。 R 值

表2 光动力处理南美白对虾中细菌的

$L_9(3^3)$ 正交试验结果

Table 2 $L_9(3^3)$ orthogonal test design

of NTPT inactivated bacterial in *Penaeus vannamei*

| 组别 | A | B | C | 菌落总数/lg(CFU·g ⁻¹) |
|-------|------|------|------|-------------------------------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 4.59 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 3.33 |
| 3 | 1 | 3 | 3 | 2.81 |
| 4 | 2 | 1 | 2 | 3.17 |
| 5 | 2 | 2 | 3 | 2.14 |
| 6 | 2 | 3 | 1 | 2.83 |
| 7 | 3 | 1 | 3 | 3.68 |
| 8 | 3 | 2 | 1 | 3.42 |
| 9 | 3 | 3 | 2 | 2.92 |
| k_1 | 3.58 | 3.81 | 3.61 | |
| k_2 | 2.71 | 2.96 | 3.14 | |
| k_3 | 3.34 | 2.85 | 2.88 | |
| R | 0.86 | 0.96 | 0.74 | |

表明由姜黄素介导的光动力技术灭活对虾中细菌,主次因素是:孵育时间(B) > 姜黄素质量浓度(A) > 光照时间(C)。通过比较各因素的 k 值大小,确定其较优水平组合为 $A_2B_3C_3$,即30 mg/L姜黄素,40 min孵育,40 min光照。经试验测定,以30 mg/L姜黄素结合40 min孵育,并光照40 min,可灭活(99.9 ± 0.01)%南美白对虾中的细菌。

2.3 对虾中挥发性盐基氮和硫代巴比妥酸的含量

总挥发性盐基氮(Total volatile basic nitrogen, TVBN)是用于评价水产品品质的新鲜度指标,当食品发生腐败时,由体内微生物繁殖产生的胞外酶和肉质中的内源性蛋白酶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^[24]。研究表明,当水产食品的TVBN值超过30 mg/100 g时,表示该水产品已腐败且达到不可食用状态^[25]。由图2a所示,在贮藏过程中对照组和NTPT组中TVBN值均呈上升趋势,且对照组TVBN的每日增量显著高于NTPT组。第8天时,对照组的TVBN值达到(34.23 ± 0.81)mg/100 g,达到不可食用状态,而NTPT组的TVBN值为(25.40 ± 0.80)mg/100 g,说明光动力处理显著减缓南美白对虾的腐败。硫代巴比妥酸(Thiobarbituric

表 3 光动力处理南美白对虾中细菌的正交试验方差分析

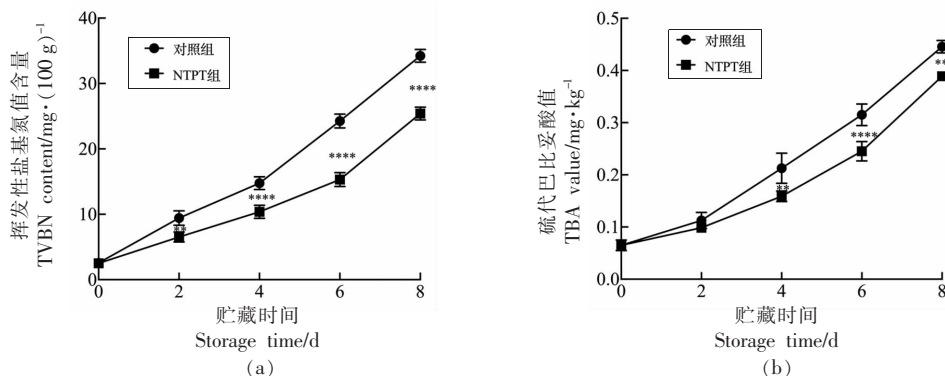
Table 3 The variance analysis result of orthogonal test of NTPT inactivated bacterial in *Penaeus vannamei*

| 方差来源 | 平方和 | 自由度 | 均方 | F 值 | 显著性 |
|----------------------------|--------------------|-----|--------|----------|--------|
| 模型 | 3.686 ^a | 6 | 0.614 | 37.847 | 0.026 |
| 截距 | 92.737 | 1 | 92.737 | 5712.745 | 0.000 |
| 姜黄素质量浓度/mg·L ⁻¹ | 1.194 | 2 | 0.597 | 36.778 | 0.026* |
| 孵育时间/min | 1.656 | 2 | 0.828 | 51.012 | 0.019* |
| 光照时间/min | 0.836 | 2 | 0.418 | 25.752 | 0.037* |
| 净误差 | 0.032 | 2 | 0.016 | | |
| 总和 | 96.456 | 9 | | | |
| 总离差 | 3.719 | 8 | | | |

注: $R^2 = 0.991$ (调整后 $R^2 = 0.965$); * 表示 $P < 0.05$ 。

acid, TBA) 是评价油脂氧化程度的指标之一。从图 2b 可知, 随着贮藏时间的增加, 对照组与 NTPT 组虾肉的 TBA 值均呈上升趋势, 而对照组虾肉的

TBA 值增加速率高于 NTPT 组。其原因可能为姜黄素具有抗氧化性, 短时间的光照射减弱了脂质的过度氧化^[26-27]。



注: **** 表示 $P < 0.0001$; *** 表示 $P < 0.0005$ 。

图 2 不同处理条件下对虾挥发性盐基氮和巴比妥酸含量的变化

Fig.2 The changes of different treatment on total volatile basic nitrogen and thiobarbituric acid value of *Penaeus vannamei*

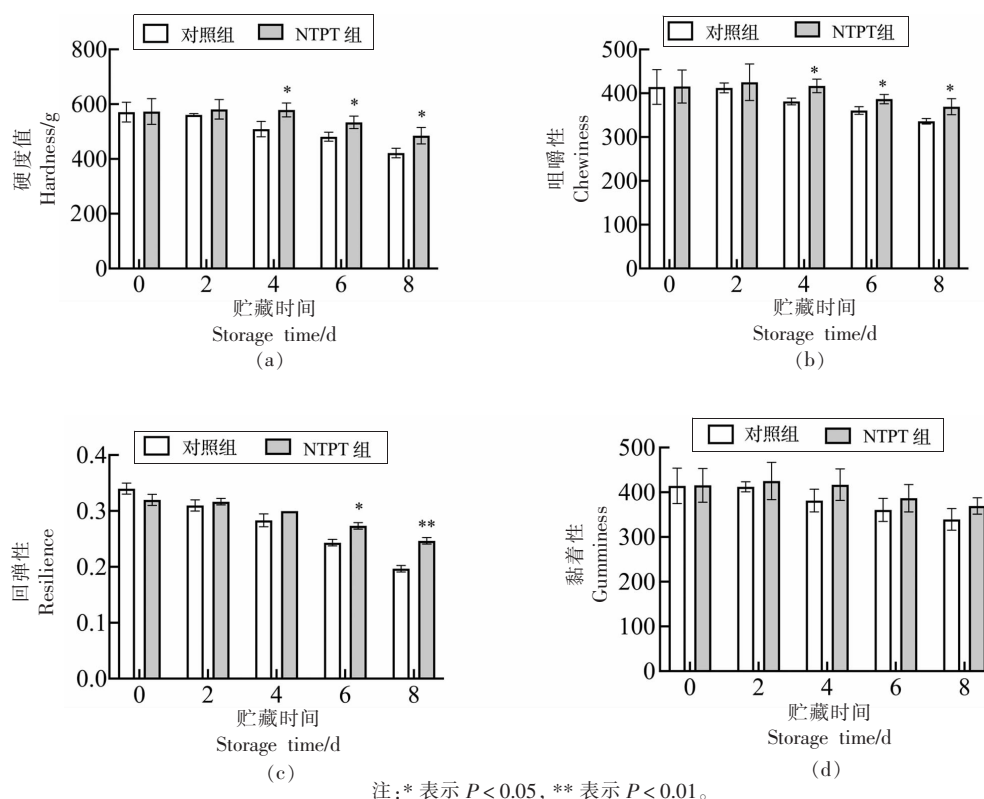
2.4 光动力处理对虾肉质构特性的影响

随着贮藏时间的增加, 水产品会降解; 而微生物作用对水产品的质构特性也有一定的影响^[28]。研究表明, 微生物作用可导致肌肉组织结构被破坏, 肌体变软, 质构指标下降, 引起食品腐败变质^[29-30]。图 3 显示不同贮藏时间对虾的硬度、咀嚼性、回弹性和黏性的变化情况。结果表明, 相较于对照组, 贮藏期间光动力组中对虾的硬度、咀嚼性、回弹性和咀嚼性的下降较少。贮藏 4 d 时, NTPT 组硬度和咀嚼性分别为 (579.26 ± 25.34) g 和 416.92 ± 15.28 , 对照组的硬度和咀嚼性分别为

(508.93 ± 28.18) g 和 381.39 ± 7.78 , 二者存在显著性差异 ($P < 0.05$)。此外, 贮藏 6 d 时, NTPT 组回弹力为 0.27 ± 0.005 , 对照组的回弹力为 0.24 ± 0.005 , 具有显著性差异 ($P < 0.05$)。从 TVBN (图 2a) 的变化趋势可以看出对照组对虾中挥发性盐基氮含量的上升速度显著高于 NTPT 组。对照组对虾第 4 天时的质构特性显著下降, 导致虾体变软; 而光动力处理较好地维持了南美白对虾的质构特性, 减缓了对虾的腐败变质。

2.5 光动力处理对虾肉含水量的影响

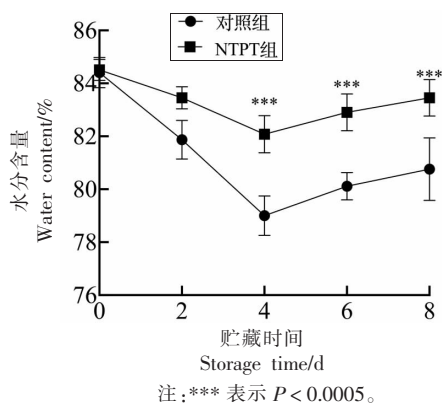
4 °C 贮藏环境以及微生物的生长是影响虾肉



注:*表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$ 。

图3 不同处理条件下对虾质构的变化

Fig.3 The changes of different treatment on texture of *Penaeus vannamei*



注:***表示 $P < 0.0005$ 。

图4 不同处理条件下对虾含水量的变化情况

Fig.4 The change of different treatment on water content of *Penaeus vannamei*

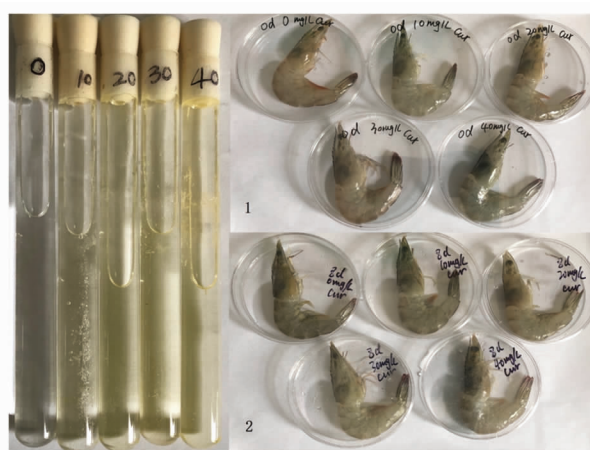
含水量的关键因素^[31-32]。由图4可知,随着贮藏时间的增加,虾肉的含水量均降低。贮藏4d时,对照组的含水量下降5.40%,NTPT组含水量下降2.43%。NTPT组在各贮藏时间的含水量均高于对

照组。其原因可能是光动力处理可以较好地维持虾肉的持水性,保持肌肉组织的紧密性^[33]。

2.6 光动力处理对虾肉色泽的影响

色泽是衡量食品新鲜程度的指标之一,直接影响消费者对食品的接受度和消费力。图5显示不同姜黄素浓度处理后对虾外观的变化情况。不同浓度的姜黄素不影响同一批处理组中对虾的色泽变化。

采用色差仪评价不同处理条件对南美白对虾亮度值(L^*)、红度值(a^*)和黄度值(b^*)的影响。如表4所示,随着贮藏时间的增加, L^* 值逐渐增加。这可能是由于对虾捕捞后经冰水处理引起虾体持水性下降,进而增大了虾体表面游离水的含量,以及南美白对虾对光的反射作用^[23]。与对照组相比,经光动力处理组的 b^* 值变化较小;贮藏6d后,对虾表面出现黑变现象。这可能与对虾贮藏过程中微生物的生长以及对虾中营养物质的氧化有关。



(a)不同质量浓度的姜黄素 (b)不同质量浓度姜黄素处理对南美白对虾外观色泽图像

注:1、2 均为同一批对虾样品在不同质量浓度姜黄素处理下外观的变化情况。

图 5 不同质量浓度姜黄素对对虾外观的影响

Fig.5 Effect of different curcumin mass concentrations on the appearance of *Penaeus vannamei*

表 4 不同处理条件对南美白对虾色差的影响

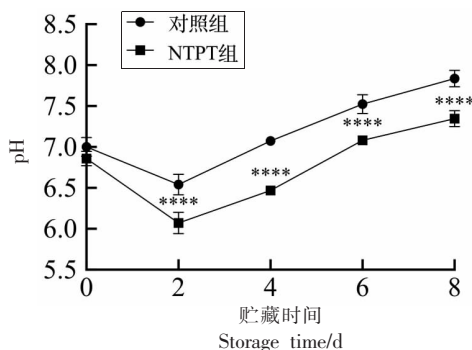
Table 4 Effect of different treatment on the color of *Penaeus vannamei*

| 色泽 | 组别 | 贮藏时间/d | | | | |
|-------|------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 |
| L^* | CK | 28.93 ± 1.93 ^d | 40.15 ± 1.26 ^b | 41.77 ± 1.26 ^b | 42.04 ± 1.53 ^b | 44.56 ± 1.18 ^a |
| | NTPT | 28.30 ± 2.47 ^d | 37.25 ± 0.37 ^c | 40.59 ± 1.26 ^b | 41.16 ± 1.74 ^b | 42.42 ± 0.91 ^{ab} |
| a^* | CK | 0.81 ± 0.46 ^a | 1.23 ± 0.56 ^a | 1.34 ± 0.59 ^a | 1.26 ± 0.54 ^a | 0.97 ± 0.27 ^a |
| | NTPT | 0.59 ± 0.36 ^a | 0.81 ± 0.79 ^a | 1.08 ± 0.46 ^a | 0.99 ± 0.35 ^a | 0.75 ± 0.37 ^a |
| b^* | CK | 1.01 ± 0.33 ^d | 2.10 ± 0.45 ^{bcd} | 3.32 ± 0.18 ^b | 3.64 ± 0.12 ^b | 7.56 ± 0.4 ^a |
| | NTPT | 1.23 ± 0.24 ^{cd} | 1.45 ± 0.59 ^{cd} | 1.53 ± 0.61 ^{cd} | 2.32 ± 0.28 ^{bcd} | 2.74 ± 0.53 ^{bc} |

注:a,b,c 表示同一列处理样本间存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

2.7 光动力处理对虾肉 pH 值的影响

对虾死后会发生一系列的生化反应, 虾体内糖类逐渐降解生成酸类物质, 使虾肉 pH 值在贮藏前期出现下降趋势; 由于微生物的作用, 虾体内蛋白质被分解成氨、二甲胺、三甲胺等物质, 使虾肉的 pH 值在贮藏中、后期逐渐升高^[34]。如图 6 所示, NTPT 组与对照组虾肉的 pH 值变化趋势相同, 贮藏前 2 d 虾肉的 pH 值短暂下降, 随后逐渐升高。各时段 NTPT 组虾肉的 pH 值均显著低于对照组, 其原因可能是光动力处理降低了虾体内的微生物, 从而减缓虾肉在贮藏过程中的腐败速率, 较好地保持虾肉的新鲜度。



注:**** 表示 $P < 0.0001$ 。

图 6 不同处理条件对南美白对虾酸碱度的影响

Fig.6 Effect of different treatment on pH of *Penaeus vannamei*

3 结论

采用姜黄素介导的光动力技术对南美白对虾进行非热杀菌后保鲜处理,与无处理的4℃保鲜组作比较,研究两种处理方式对南美白对虾保鲜过程中菌落总数和理化指标的影响。得出试验结论如下:在南美白对虾表面喷洒30 mg/L姜黄素避光孵育40 min,采用LED光照射40 min的控菌效果明显,可灭活南美白对虾体中99.99%的细菌。此外,光动力技术较好地保持了南美白对虾虾肉的含水量、pH值和色泽等理化特性,能够杀灭对虾表面微生物,并抑制虾体中微生物的生长,从而减缓虾肉贮藏过程中的腐败速率,较好地保持南美白对虾的新鲜度。该方法可应用于生鲜南美白对虾的保鲜。然而,光动力作用在改善南美白对虾的黑变方面还需要进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 张振. 壳聚糖- ϵ -聚赖氨酸-卡拉胶复合涂膜对冷藏中国对虾品质影响研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
ZHANG Z. Effect of chitosan combined with ϵ -polylysine and carrageen coating on the quality of refrigerated Chinese shrimp[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020.
- [2] 范晓然. 太湖白虾低温贮藏时的菌相分析及其保鲜剂的开发[D]. 南京: 南京财经大学, 2018.
FANG X R. Microflora analysis and preservation of Taihu white prawn during low temperature storage[D]. Nanjing: Nanjing University of Finance and Economics, 2018.
- [3] CEN S J, FANG Q, TONG L, et al. Effects of chitosansodium alginate-nisin preservatives on the quality and spoilage microbiota of *Penaeus vannamei* shrimp during cold storage[J]. International Journal of Food Microbiology, 2021, 349(3): 109227.
- [4] 蓝蔚青, 冯豪杰, 刘大勇, 等. 微生物源生物保鲜剂对水产品腐败菌作用机制研究进展[J]. 包装工程, 2020, 41(5): 31-38.
LAN W Q, FENG H J, LIU D Y, et al. Research progress on mechanism of microbial source bio-preservatives on spoilage bacteria of aquatic products [J]. Packaging Engineering, 2020, 41(5): 31-38.
- [5] 谢晶, 李沛响, 梅俊. 气调包装复合保鲜技术在水产品中的研究进展[J]. 上海海洋大学学报, 2019, 29(3): 467-473.
XIE J, LI P Y, MEI J. Progress on modified atmosphere packaging technology combined other methods in preservation of aquatic products [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2019, 29(3): 467-473.
- [6] 杨丽丽. 茶多酚复合保鲜剂缓释体系的建立及性能研究[D]. 锦州: 渤海大学, 2019.
YANG L L. Establishment and properties of sustained release system of tea polyphenol compound preservative[D]. Jinzhou: Bohai University, 2019.
- [7] 李晓, 王颖, 刘洪军, 等. 0℃贮藏下南美白对虾品质变化研究[J]. 核农学报, 2020, 34(12): 2734-2741.
LI X, WANG Y, LIU H J, et al. Quality changes of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during 0℃ storage [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(12): 2734-2741.
- [8] 邓文静, 钱磊, 张军, 等. 复合生物保鲜剂在南美白对虾保鲜中的应用[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(9): 205-211.
DENG W J, QIAN L, ZHANG J, et al. Application of complex biological fresh-keeping agents in preservation of Pacific white shrimp [J]. Food Research and Development, 2021, 42(9): 205-211.
- [9] DAMYEH M S, MEREDDY R, NETZEL M E, et al. An insight into curcumin - based photosensitization as a promising and green food preservation technology[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19(4): 1727-1759.
- [10] GHATE V S, ZHOU W, YUK H G. Perspectives and trends in the application of photodynamic inactivation for microbiological food safety [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2019, 18(2): 402-424.
- [11] MORTON C A, BRAATHEN L R. Daylight photodynamic therapy for actinic keratoses [J]. American Journal of Clinical Dermatology, 2018, 19(5): 647-656.
- [12] SHAKERI A, WARD N, PANAHY Y, et al. Anti-angiogenic activity of curcumin in cancer therapy: A narrative review [J]. Current Vascular Pharmacology, 2019, 17(3): 262-269.
- [13] MORTEZAEE K, SALEHI E, MIRTAVOOS-MAH-

- YARI H, et al. Mechanisms of apoptosis modulation by curcumin: Implications for cancer therapy [J]. *Journal of Cellular Physiology*, 2019, 234 (8): 12537–12550.
- [14] WADA R, TAKAHASHI S, MUGURUMA H, et al. Electrochemical detection of curcumin in food with a carbon nanotube-carboxymethylcellulose electrode [J]. *Analytical Sciences*, 2020, 36(9): 1113–1118.
- [15] 张萌, 李潭, 林韬, 等. 姜黄素抗衰老作用及分子机制研究新进展[J]. *中国医药导报* 2020, 17(28): 40–43.
- ZHANG M, LI T, LIN T, et al. Recent progress on anti-aging and molecular mechanisms of curcumin[J]. *China Medical Herald*, 2020, 17(28): 40–43.
- [16] JOAQUÍN G E, RAFAEL G, PILAR H M. Encapsulation of curcumin in electrosprayed gelatin microspheres enhances its bioaccessibility and widens its uses in food applications[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2015, 29: 302–307.
- [17] 周阿容, 陈妮, 郑宝东, 等. 姜黄素介导的光动力技术对真空包装鲜莲胀袋控制效果的研究[J]. *食品科技*, 2019, 332(6): 50–55.
- ZHOU A R, CHEN N, ZHENG B D, et al. Inhibition effect of curcumin-mediated photodynamic technology on spoilage of fresh lotus with vacuum package[J]. *Food Science and Technology*, 2019, 332(6): 50–55.
- [18] HU J M, FENG Z, LIN Y, et al. The effects of photodynamically activated curcumin on the preservation of low alum treated ready-to-eat jellyfish[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 115: 108443–108443.
- [19] TAO R, ZHANG F, TANG Q J, et al. Effects of curcumin-based photodynamic treatment on the storage quality of fresh-cut apples[J]. *Food Chemistry*, 2019, 274(15): 415–421.
- [20] LIN Y L, HU J M, LI S Y, et al. Curcumin-based photodynamic sterilization for preservation of fresh-cut hami melon[J]. *Molecules*, 2019, 24(13): 2374.
- [21] 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 B B, WU J, XU C S, et al. Inactivation effect of curcumin-mediated photodynamic non-thermal sterilization on bacteria in oysters[J]. *Food Science*, 2016, 37(5): 46–49.
- [22] 张沛玲, 李薇. 乙酰丙酮-甲醛分光光度法测定肉与肉制品中挥发性盐基氮[J]. *口岸卫生控制*, 2001 (6): 30–31.
- ZHANG P L, LI W. Determination of the total volatile basic nitrogen in meat and meat produce with acetyl-acetone-formaldehyde spectrophotometry[J]. *Port Health Control*, 2001(6): 30–31.
- [23] 徐南. 加工预处理对南美白对虾品质的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019.
- XU N. Effect of processing pretreatment on the quality of white shrimp[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019.
- [24] 杨胜平, 章缜, 程颖, 等. 牛至精油对荧光假单胞菌的抑制作用及其对冷藏三文鱼品质的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(1): 215–222.
- YANG S P, ZHANG Z, CHENG Y, et al. Inhibitory effect of oregano essential oil against spoilage microorganism *Pseudomonas fluorescens* and its influence on quality changes during chilled storage of salmon[J]. *Food Science*, 2020, 41(1): 215–222.
- [25] 张永杏, 唐峰华, 郭全友, 等. 轻微加工熟制鲈鱼品质特性及腐败菌鉴定[J]. *食品科学*, 2020, 618 (5): 216–222.
- ZHANG Y X, TANG F H, GUO Q Y, et al. Quality characteristics of lightly preserved cooked mackerel and identification of spoilage bacteria[J]. *Food Science*, 2020, 618(5): 216–222.
- [26] 周阿容, 林以琳, 邱建清, 等. 姜黄素膜运载体系的构建及功能性应用研究进展[J]. *食品科学*, 2020, 41(7): 266–274.
- ZHOU A R, LIN Y L, QIU J Q, et al. Recent progress in the construction and functional application of curcumin membrane delivery systems[J]. *Food Science*, 2020, 41(7): 266–274.
- [27] ZHU Z W, 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.
- [28] 张皖君, 蓝蔚青, 赖晴云, 等. 不同冰藏处理对鲈鱼品质, ATP 关联物及微生物变化的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(18): 35–42.
- ZHANG W J, LAN W Q, LAI Q Y, et al. Changes in quality, ATP-related compounds and

- microorganisms of perch treated with different ice storages[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(18): 35–42.
- [29] 冯豪杰, 蓝蔚青, 刘大勇, 等. 不同减菌化处理方式对暗纹东方鲀冷藏期间品质变化的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(7): 210–217.
- FENG H J, LAN W Q, LIU D Y, et al. Effects of different sterilization treatments on the quality of puffer fish (*Takifugu obscurus*) during refrigerated storage[J]. Food Science, 2020, 41(7): 210–217.
- [30] WANG R F, HU X Y, AGYEKUMWAA A K, et al. Synergistic effect of kojic acid and tea polyphenols on bacterial inhibition and quality maintenance of refrigerated sea bass (*Lateolabrax japonicus*) filets[J]. LWT–Food Science and Technology, 2021, 137: 110452.
- [31] OLSSON G B, SEPPOLA M A, OLSEN R L. Water-holding capacity of wild and farmed cod (*Gadus morhua*) and haddock (*Melanogrammus aeglefinus*) muscle during ice storage[J]. LWT– Food Science and Technology, 2007, 40(5): 793–799.
- [32] 孙天利. 冰温保鲜技术对牛肉品质的影响研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2013.
- SUN T L. Influences of controlled freezing point storage on beef[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2013.
- [33] 王道营, 诸永志 徐为民. 复合磷酸盐在肉品加工中的应用[J]. 农村新技术, 2007, 28(10): 167–169.
- WANG D Y, ZHU Y Z, XU W M. The application of compound phosphates in meat products[J]. Rural New Technology, 2007, 28(10): 167–169.
- [34] GEORGANTELIS D, AMBROSLADIS 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.

Effect of Curcumin-mediated Photodynamic Technology on the Quality of Fresh *Penaeus vannamei*

Lin Yilin, Li Jing, Zhang Jiangling, Lin Shaoling*

(College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002)

Abstract In this study, the effect of curcumin-mediated photodynamic technology (NTPT) on the quality of fresh *Penaeus vannamei* were analyzed by the total number of the bacterial colony and physical-chemical properties during storage. The single factor experiment including different curcumin mass concentration (0, 10, 20, 30, 40 mg/L), illumination time (0, 20, 30, 40, 50 min) and exposure time (0, 10, 20, 30, 40 min) was used to screening the optical the condition. Furthermore, the orthogonal test design was used to optimize the NTPT antibacterial process for *Penaeus vannamei*. Meanwhile, the influence of NTPT on the volatile base nitrogen (TVBN), the thiobarbituric acid (TBA), texture, water content, color difference and pH value of *Penaeus vannamei* were evaluated before and after storage at 4 °C for 8 day. The results showed that the inactivation rate could reach 99.9% under 30 mg/L curcumin with 40 min illumination time and 40 min LED exposure time. Compared with the control group on the 8 d, TVBN of NTPT decreased by 8.83 mg/100 g, and TBA decreased by 0.057 mg/kg. The hardness, chewiness, and resilience of NTPT were well maintained. On the 8 d of storage, the water content of NTPT increased by 2.70% compared with the control group, and its pH value decreased by 0.49 compared with the control group. In addition, the colors of NTPT were better than the control group. In conclusion, NTPT had good antibacterial properties and could be used for the preservation of fresh *Penaeus vannamei*. Compared with tradition preservation technology by keeping in 4 °C, NTPT was superior in maintaining the texture, color and other indicators of *Penaeus vannamei*. This study provides a practical reference for the photodynamic technology of shrimp meat products.

Keywords curcumin; photodynamic technology; *Penaeus vannamei*; physical-chemical properties; quality; preservation