

姜黄素-酪胺共晶介导的光动力技术对冷藏三文鱼的保鲜作用

李亮辉¹, 徐芳¹, 邓曦², 吴艺圆¹, 林少玲¹

1. 福建农林大学 食品科学学院, 福建 福州 350002;

2. 鄂州市食品药品检验检测所, 湖北 鄂州 436000

摘要: 【目的】评价姜黄素-酪胺共晶 (Curcumin-tyramine Co-crystal, CTC) 介导的光动力技术对冷藏三文鱼品质保持及货架期的影响。【方法】以 100 $\mu\text{mol/L}$ CTC 为光敏剂, 采用中心波长为 425 nm 的 LED 蓝灯对三文鱼样品进行光动力处理, 研究其在 4 $^{\circ}\text{C}$ 贮藏期间的外观形态、理化指标、微生物变化及水分迁移规律。【结果】CTC 介导的光动力技术 (CTC-PDT) 可显著抑制冷藏三文鱼的微生物增殖、pH 值升高、TVB-N 累积及脂质氧化。冷藏 6 d 时, CTC-PDT 处理组的菌落总数为 (3.77 ± 0.15) lg CFU/g, TVB-N 值为 (23.46 ± 0.84) mg/100 g, 均显著低于空白对照组; TBA 值为 (0.83 ± 0.02) mg MDA/kg, 与空白对照组冷藏 3 d 时的水平相近。CTC-PDT 处理能有效延缓三文鱼样品的色泽劣变, 冷藏 9 d 时 ΔE 为 13.94 ± 0.27 , 减少水分流失, 较好地维持其外观、咀嚼度等质构特性, 并显著抑制苦味、涩味等不良滋味物质生成。与阳性对照组 (1 mg/mL 山梨酸钾处理组) 相比, CTC-PDT 处理组在菌落总数、TVB-N 值、TBA 值及部分质构指标上整体表现更优。【结论】CTC-PDT 处理能够延缓微生物增殖和品质劣变, 使样品在冷藏 6 d 时仍保持可接受状态, 从而延长冷藏三文鱼的货架期, 可作为冷藏三文鱼的非热保鲜新方法。

关键词: 姜黄素-酪胺共晶; 光动力技术; 三文鱼; 冷藏保鲜

中图分类号: TS254.4

文献标志码: A

Preservation effect of curcumin-tyramine cocrystal-mediated photodynamic technology on refrigerated salmon

Li Lianghui¹, Xu Fang¹, Deng Xi², Wu Yiyuan¹, Lin Shaoling¹

1. College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, 350002, China;

2. Ezhou Institute for Food and Drug Control, Ezhou 436000, China

收稿日期: 2026-01-25; 修回日期: 2026-04-23; 出版日期: 2026-10-15

基金项目: 国家自然科学基金面上基金项目 (32272450); 福建省自然科学基金计划项目杰青项目 (2023J06020); 福建农林大学科技创新专项基金项目 (KFB23132A)

作者简介: 李亮辉 (2003—), 男, 四川省宜宾市人, 福建农林大学硕士研究生, 研究方向为水产品加工与安全。E-mail: lilianghui1216@163.com

通信作者: 林少玲 (1985—), 女, 广东省汕头市人, 福建农林大学教授, 博士, 研究方向为水产品加工与安全。E-mail: shaoling_lin@yeah.net

Abstract: 【Objective】 To evaluate the effects of curcumin–tyramine cocrystal (CTC)-mediated photodynamic treatment on the quality preservation and shelf life of salmon during refrigerated storage. **【Methods】** Salmon samples were subjected to photodynamic treatment using 100 $\mu\text{mol/L}$ CTC as the photosensitizer under 425 nm LED blue light. Changes in appearance, physicochemical properties, microbial growth, and water migration were investigated during storage at 4 °C. **【Results】** Curcumin-tyramine cocrystal-mediated photodynamic treatment(CTC-PDT) significantly inhibited microbial proliferation and retarded the increase in pH, the accumulation of total volatile basic nitrogen (TVB-N), and lipid oxidation during refrigerated storage. After 6 d of refrigerated storage, the total viable count and total volatile basic nitrogen (TVB-N) content in the CTC-PDT group were (3.77 ± 0.15) lg CFU/g and (23.46 ± 0.84) mg/100 g, respectively, both significantly lower than those in the blank control group. The thiobarbituric acid (TBA) value was (0.83 ± 0.02) mg MDA/kg, which was numerically close to that of the blank control group on 3 d. In addition, CTC-PDT also delayed color deterioration, with a ΔE value of 13.94 ± 0.27 on day 9, reduced water loss, better maintained the appearance and textural properties of the samples, including chewiness, and significantly suppressed increases in bitterness and astringency. Compared with the positive control group(1 mg/mL potassium sorbate treatment group), the CTC-PDT group showed overall performance in terms of total viable count, TVB-N content, TBA value, and some texture-related parameters. **【Conclusion】** CTC-PDT effectively inhibited microbial growth and delayed quality deterioration, enabling salmon samples to remain acceptable after 6 d of refrigerated storage and thereby extending their refrigerated shelf life. These findings indicate that CTC-PDT has potential as a novel non-thermal preservation method for chilled aquatic products.

Key words: curcumin-tyramine cocrystal; photodynamic technology; salmon; refrigerated preservation

0 引言

三文鱼 (*Salmo salar*)，又名鲑鳟鱼、大马哈鱼，属冷水性洄游鱼类，其肉色鲜亮，呈鲜红色或橘红色，肉质紧密、细嫩，口感丰富细腻，颇受消费者喜爱^[1]。三文鱼肌肉组织中含有丰富的营养物质，其中，蛋白质含量约为 18%~22%，且含人体所需的 8 种必需氨基酸； ω -3 多不饱和脂肪酸含量丰富，其中二十二碳六烯酸 (DHA) 含量约为 0.8~1.2 g/100 g，二十碳五烯酸 (EPA) 含量约为 0.4~0.8 g/100 g， ω -3 脂肪酸在总脂肪酸中占比超过 70%；天然虾青素含量约为 5~8 mg/kg；钙 (12~15 mg/100 g)、磷 (200~250 mg/100 g) 等矿物质元素含量也较为丰富^[2-3]。

生食能较大程度地保留食材的营养价值和独特风味，是三文鱼最为常见的食用方法^[4]。然而，生鲜三文鱼在加工、贮藏和销售过程中易受微生物污染，甚至食源性致病菌的侵袭，这易

导致产品营养流失、品质劣变，对消费者健康构成潜在风险^[5-7]。目前，三文鱼的保鲜方式主要包括物理保鲜、化学保鲜和生物保鲜^[8]，这些方法虽然能在一定程度上抑制微生物生长，但可能破坏三文鱼的色泽、质地和风味，并存在处理不均匀、剂量不当、化学残留等问题，货架期延长效果有限。光动力技术（Photodynamic Technology, PDT）是一种新型非热杀菌技术，利用可见光激发光敏剂（Photosensitizer, PS），产生大量活性氧，对微生物细胞的关键组分产生氧化损伤，最终导致其死亡^[9]。与传统保鲜方式相比，PDT 具有更高的安全性、更低的能耗，且能有效防止食品风味、色泽和营养成分的变化或丢失，在食品安全领域具有广阔的应用前景^[10]。

姜黄素（Curcumin）是从姜科植物姜黄（*Curcuma longa* L.）根茎中提取的 1 种黄色多酚类化合物，是目前常用的食品级光敏剂之一^[11]，并被《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》（GB 2760—2014）^[12]列为 9 种天然食品色素之一。研究^[13-14]表明，姜黄素经 400~480 nm 蓝光激活后，会产生大量的活性氧，其介导的 PDT 具有安全可靠、绿色环保等特点。目前，姜黄素介导的 PDT 在水产保鲜领域已有研究。例如，J.M.Huang 等^[15]研究发现，经姜黄素介导的 PDT 处理后，三文鱼中菌落总数最多减少 4.0 lg CFU/g（对应抑菌率达 99.99%）。然而，姜黄素分子具有高度疏水性，且结构不稳定、水溶性较低，这极大限制了其在食品保鲜中的应用。

为克服上述瓶颈，近年来研究者^[16-17]通过递送体系优化、晶体改性等策略提升姜黄素的水溶性。其中，共晶技术是一种通过氢键、范德华力等非共价键，将 2 种或多种中性分子按一定比例形成晶体的材料加工方法^[18]。该技术能有效调控分子间相互作用、改善溶解性、且制备工艺相对简单，受到业界广泛关注。例如，W.M.Gu^[19]等采用自然挥发法，利用姜黄素和 D 酪氨酸制得姜黄素-D 酪氨酸共晶，其水溶性较姜黄素大幅提升。本课题组^[20]前期研究表明，姜黄素与酪胺可通过共晶技术形成姜黄素-酪胺共晶（Curcumin-tyramine Co-crystal, CTC），相较于姜黄素，CTC 的溶解度提升了 98.53 倍；在 425 nm LED 蓝光照射 30 min 后，CTC 与姜黄素的抗菌光动力活性相近，菌落总数对数值分别为（2.44±0.36）lg CFU/mL 和（3.24±0.42）lg CFU/mL。然而，目前关于 CTC 介导的 PDT（Curcumin-tyramine Co-crystal Mediated Photodynamic Technology, CTC-PDT）对实际食品体系保鲜作用的系统研究仍然缺乏，尤其是其对微生物生长抑制、品质劣变延缓及货架期延长的具体影响尚不明确。

鉴于此，本研究拟以三文鱼为研究对象，采用 CTC-PDT 对其进行保鲜处理，并从微生物生长、理化品质、水分迁移、滋味特征等方面系统评估其冷藏保鲜效果，以期绿色高效的水产品非热保鲜技术的开发提供参考。

1 材料与amp;方法

1.1 主要材料与试剂

新鲜三文鱼，广东海斯特供应链有限公司；LB 琼脂培养基、LB 肉汤培养基，广东环凯生物科技有限公司；山梨酸钾，上海麦克林生化科技股份有限公司；无水乙醇、硫代巴比妥酸（TBA）、三氯乙酸，国药集团化学试剂有限公司；生理盐水，福州海王福药制药有限公司；磷酸盐（PBS）缓冲液，北京索莱宝科技有限公司；姜黄素（纯度≥97%）、酪胺（纯度>98%），梯希爱（上海）化成工业发展有限公司；MgCl₂，上海申光食用化学品有限公司。以上试剂均为分析纯。

1.2 主要仪器与设备

PL202-S100 型精密分析天平，Mettler Toledo（上海）仪器有限公司；MJ-54A 型高压蒸气灭菌锅，施都凯仪器设备（上海）有限公司；ADCI 型色差仪，北京辰泰克仪器技术有限公司；TA.XT.plus 型质构仪，英国 SMS 公司；SA402B 型电子舌，日本 INSENT 公司；FE28-Meter 型 pH 计，瑞士 Mettler-Toledo 公司；SW-CJ-1FD 型超净工作台，苏州安泰空气技术有限公司；HPX-9000 型数显电热培养箱，上海博讯实业有限公司医疗设备厂；ZWY-200D 型恒温培养振荡器，上海智城分析仪器制造有限公司；PL-LED20FL 型 425 nm LED 蓝灯，北京普林塞斯科技有限公司；Evolution Pro 型紫外-分光光度计，美国赛默飞世尔科技；SCIENTZ-09 型拍打式均质器，宁波新芝生物科技股份有限公司；JM-38D-28/45 型液晶超声波清洗机，深圳市洁盟清洗设备有限公司；SCAN1200 型菌落计数器，法国 Interscience 公司；NMZ20-060H-I 型低场核磁仪，苏州纽迈分析仪器股份有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 CTC 制备

参考 F.Wu 等^[20]的方法，分别称取 368.38 mg 姜黄素与 411.51 mg 酪胺倒入研钵中，加入 3 mL 无水乙醇，研磨 20 min。将所得混合物转移至离心管中，于-49℃、68 kPa 条件下真空冷冻干燥 2 h，制得橘黄色粉末状产物，于 4℃条件下避光保存，备用。

1.3.2 三文鱼预处理

参照 J.M.Huang^[15]等的方法，并稍作修改。将新鲜三文鱼肉切成约4 cm×2 cm×1 cm块状，随机分为空白对照组、CTC-PDT 组和阳性对照组。CTC-PDT 组样品于避光条件下在 100 μmol/L CTC 溶液中浸泡 30 min，取出擦干表面水分，随即用中心波长为 425 nm 的 LED 蓝灯照射 30

min; 阳性对照组样品置于 1 mg/mL 山梨酸钾溶液中浸泡 30 min^[21], 取出擦干表面水分; 空白对照组样品不作任何处理。将 3 组样品置于保鲜盒中, 于 4 °C 条件下冷藏 9 d, 每 3 d 取样 1 次, 进行相关指标测定。

1.3.3 外观形态观察

在相同背景和光照条件下, 观察各组样品的表面色泽、肌间条纹清晰度、黏液、霉斑等外观特征, 并用相机拍照记录。

1.3.4 菌落总数测定

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—2022)^[22]测定样品菌落总数。准确称取样品 5 g, 加入 45 mL 无菌 PBS 缓冲液(0.01 mol/L, pH 值为 7.2~7.4), 经拍打式均质器处理 3 min, 制得 10 倍匀浆稀释液; 在超净工作台内, 将匀浆稀释液进行 10 倍梯度稀释后, 吸取 100 μL 均匀涂布于 LB 琼脂培养基上, 于 37 °C 恒温培养 24 h 后, 进行菌落计数。

1.3.5 色差测定

使用色差仪测定样品的 L^* (亮度)、 a^* (a^+ 为红色, a^- 为绿色) 和 b^* (b^+ 为黄色, b^- 为蓝色)。色差 (ΔE) 按下公计算:

$$\Delta E = \left[(L_n^* - L_0^*)^2 + (a_n^* - a_0^*)^2 + (b_n^* - b_0^*)^2 \right]^{1/2}$$

式中, L_n^* 、 a_n^* 、 b_n^* 为第 n 天的测定值, L_0^* 、 a_0^* 、 b_0^* 为初始值。

1.3.6 质构特性测定

参考 L.Prabhu 等^[23]的方法, 并稍作修改。采用 TA/32 探头, 在全质构分析 (TPA) 模式下测定样品的硬度、弹性和咀嚼度。探头移动速度: 测试前与测试后均为 3.0 mm/s, 测试中为 1.0 mm/s; 触发力为 5.0 g; 压缩比例为样品初始高度的 70%。

1.3.7 pH 值测定

参考邹小波等^[24]的方法, 并稍作修改。称取 10 g 样品置于无菌均质袋中, 加入 90 mL 蒸馏水, 用拍打式均质器处理 3 min; 将样品匀液转移至离心管中, 于 4 °C、5000 r/min 条件下离心 10 min, 取上清液, 测定 pH 值。

1.3.8 水分分布测定

参考李立^[25]的方法, 并稍作修改。采用低场核磁共振 (LF-NMR) 技术测定样品的水分分

布。将样品装入直径为 60 mm 的核磁管中, 设定线圈温度为 32 °C, 质子共振频率为 21 kHz。利用 Carr-Purcell-Meiboom-Gill (CPMG) 脉冲序列测定横向弛豫时间 (T_2), 具体参数设置为: 采样频率 200 kHz, 模拟增益 20 dB, 数字增益 3, 频率偏置 49 055.40 Hz, 90°脉宽 13.8 μs, 180°脉宽 28 μs, 重复间隔 2000 ms, 累加次数 8 次, 回波时间 0.2 ms, 回波个数 10 000 个。

1.3.9 电子舌检测

参考赵勇等^[26]的方法, 并稍作修改。称取 5 g 样品置于无菌均质袋中, 加入 45 mL 蒸馏水后, 采用拍击式均质器处理 3 min, 再于 4 °C、6000 r/min 条件下离心 10 min, 取上清液, 用滤纸 (15~20 μm) 进行过滤; 将滤液稀释 100 倍后, 取 35 mL 稀释液于样品杯中, 置于电子舌自动进样器上, 并选取鲜味、苦味、涩味和丰富度进行分析。

1.3.10 挥发性盐基氮 (TVB-N) 含量测定

参照《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》(GB 5009.228—2016)^[27]测定样品中 TVB-N 含量。准确称取 10.0 g 经均质处理的样品, 加入 100 mL 蒸馏水, 充分混匀后静置提取 30 min, 经滤纸过滤后, 收集滤液, 于 4 °C、5000 r/min 条件下离心 5 min, 取上清液作为待测液; 测定时, 向接收瓶中加入 10 mL 20 g/L 的硼酸吸收液和 5 滴混合指示剂 (V (1 g/L 甲基红乙醇溶液): V (1 g/L 溴甲酚绿乙醇溶液)=1: 5), 确保冷凝管末端浸入液面以下; 将 10 mL 待测液注入反应室, 用 10 mL 蒸馏水洗涤加样口后, 加入 5 mL 10 g/L $MgCl_2$ 溶液, 立即密封装置并开始蒸馏; 蒸馏过程持续 6 min, 前 5 min 收集馏出液, 后 1 min 冲洗管路, 馏出液用 0.01 mol/L HCl 标准溶液滴定至溶液颜色变为紫红色即为终点, 同时进行空白试验。每个样品设置 3 个平行。TVB-N 含量/(mg·(100 g)⁻¹) 按照下式计算:

$$\text{TVB-N 含量} = \frac{(V_1 - V_2) \times C \times 14}{m \times \left(\frac{V}{V_0}\right)} \times 100$$

式中, V_1 为馏出液消耗 HCl 标准溶液的体积/mL; V_2 为空白试验消耗 HCl 标准溶液的体积/mL; C 为 HCl 标准溶液的浓度/(mol·L⁻¹); m 为样品质量/g; V 为吸取上清液的体积/mL; V_0 为上清液的总体积/mL, 本方法中 V_0 为 100 mL; 14 为滴定 1.0 mL 1 mol/L HCl 标准溶液相当的氮摩尔质量/(g·mol⁻¹); 100 为换算系数。

1.3.11 TBA 值测定

采用 TBA 法测定样品的 TBA 值, 结果以丙二醛 (MDA) 当量表示。准确称取 10.0 g 样品, 加入 50 mL 质量分数为 5% 的三氯乙酸溶液进行均质处理后, 过滤, 弃去初滤液, 收集澄

清滤液，备用；取 5 mL 滤液与等体积的 0.02 mol/L TBA 溶液混合，于 80 °C 恒温水浴中反应 40 min，使 MDA 与 TBA 充分反应生成红色复合物，冷却至室温，于 532 nm 波长处测定吸光度。每个样品设置 3 个平行。

标准曲线绘制：准确称取 0.315 g 的 1,1,3,3-四乙氧基丙烷，用蒸馏水溶解并定容至 1000 mL，制得质量浓度为 100 µg/mL 的 MDA 标准储备液；准确吸取 1 mL MDA 标准储备液，用三氯乙酸溶液稀释至 100 mL，制得质量浓度为 1.00 µg/mL MDA 的标准使用液；准确吸取 0.1 mL、0.5 mL、1.0 mL、1.5 mL 和 2.5 mL MDA 标准使用液于容量瓶中，并加入三氯乙酸溶液定容至 10 mL，分别配置质量浓度为 0.01 µg/mL、0.05 µg/mL、0.10 µg/mL、0.15 µg/mL 和 0.25 µg/mL 的标准溶液，用于标准曲线绘制。

TBA 值/(mg MDA·kg⁻¹) 按照下式计算：

$$\text{TBA 值} = \frac{c \times V \times 1000}{m \times 1000}$$

式中， c 为从标准系列曲线中得到的样品溶液中 MDA 的质量浓度/(µg·mL⁻¹)， V 为显色反应液总体积/mL， m 为样品滤液所代表的样品质量/g，1000 为换算系数。

1.4 数据处理

所有实验均设置 3 个独立重复，数据结果以（平均值±标准差）表示。采用 SPSS Statistics 26 软件进行单因素方差分析（One-way ANOVA），结合 Duncan 多重比较检验评估组间差异， $P < 0.05$ 表示存在显著性差异。通过 GraphPad Prism 8.0 和 Origin 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 CTC-PDT 处理对冷藏三文鱼外观形态的影响

三文鱼肉质软嫩，富含优质蛋白质、水分等，这有利于腐败菌快速增殖，进而加速三文鱼感官品质下降^[28]。各组三文鱼样品在冷藏期间的外观变化如图 1 所示。由图 1 可知，各组三文鱼样品在冷藏初始（0 d）品质良好，肌肉呈典型淡橘红色，色泽鲜亮，肌间白色条纹清晰。空白对照组在冷藏 3 d 时开始出现品质劣变现象，具体表现为表面黏液明显增多；冷藏 6 d 时，白色霉点形成，条纹结构逐渐模糊，并伴有明显的腐败气味；冷藏 9 d 时，霉斑进一步扩大。相比之下，CTC-PDT 组和阳性对照组在冷藏 6 d 时表面均出现轻微黏液，在冷藏 9 d 时表面才出现白色霉点和腐败气味。这表明 CTC-PDT 处理与传统山梨酸钾处理的防腐保鲜效果相当，二者均能有效延缓三文鱼冷藏时的腐败变质。

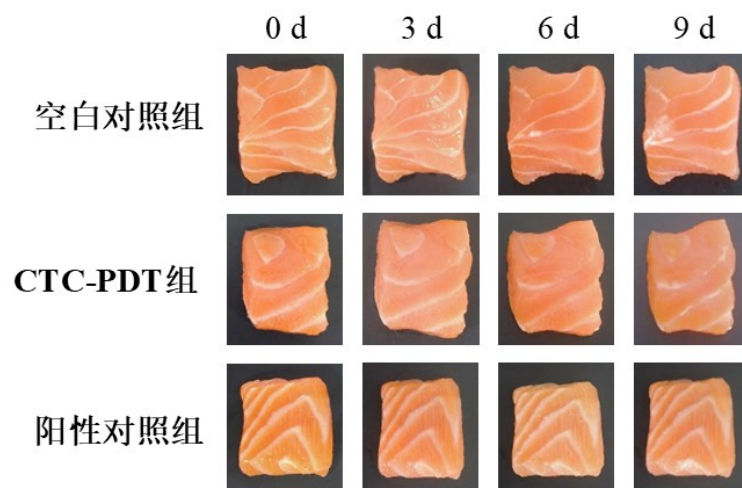


图 1 各组三文鱼样品在冷藏期间的外观变化

Fig. 1 Changes in appearance of each group of salmon samples during refrigerated storage

2.2 CTC-PDT 处理对冷藏三文鱼菌落总数的影响

各组三文鱼样品在冷藏期间的菌落总数变化如图 2 所示, 其中不同大写字母表示不同冷藏时间下相同处理方式之间具有显著性差异 ($P<0.05$), 不同小写字母表示相同冷藏时间下不同处理方式之间具有显著性差异 ($P<0.05$)。下同。冷藏初始 (0 d), 各组三文鱼样品的菌落总数无显著差异, 表明初始污染水平基本一致。随着冷藏时间的延长, 各组三文鱼样品的菌落总数均呈上升趋势, 但上升速率存在明显差异。冷藏 6 d 时, 空白对照组的菌落总数已达 (5.05 ± 0.17) lg CFU/g, 略高于《食品安全国家标准 动物性水产制品》(GB 10136—2015)^[29]规定的限值 (5 lg CFU/g), 而 CTC-PDT 组和阳性对照组的菌落总数分别为 (3.77 ± 0.15) lg CFU/g 和 (4.23 ± 0.12) lg CFU/g, 均显著低于空白对照组 ($P<0.05$), 且处于安全限量范围内。H.M.Chen 等^[30]研究发现, PDT 介导的光动力处理三文鱼样品后, 表现出显著的细菌抑制效果, 本研究结果与之相符。此外, CTC-PDT 处理的抑菌效果优于传统山梨酸钾处理, 结合已有研究^[31-32]推测, 这可能是因为 CTC-PDT 通过光动力效应产生的活性氧可对微生物细胞造成瞬时、广泛的损伤, 而山梨酸钾主要是通过干扰微生物代谢延缓其增殖。

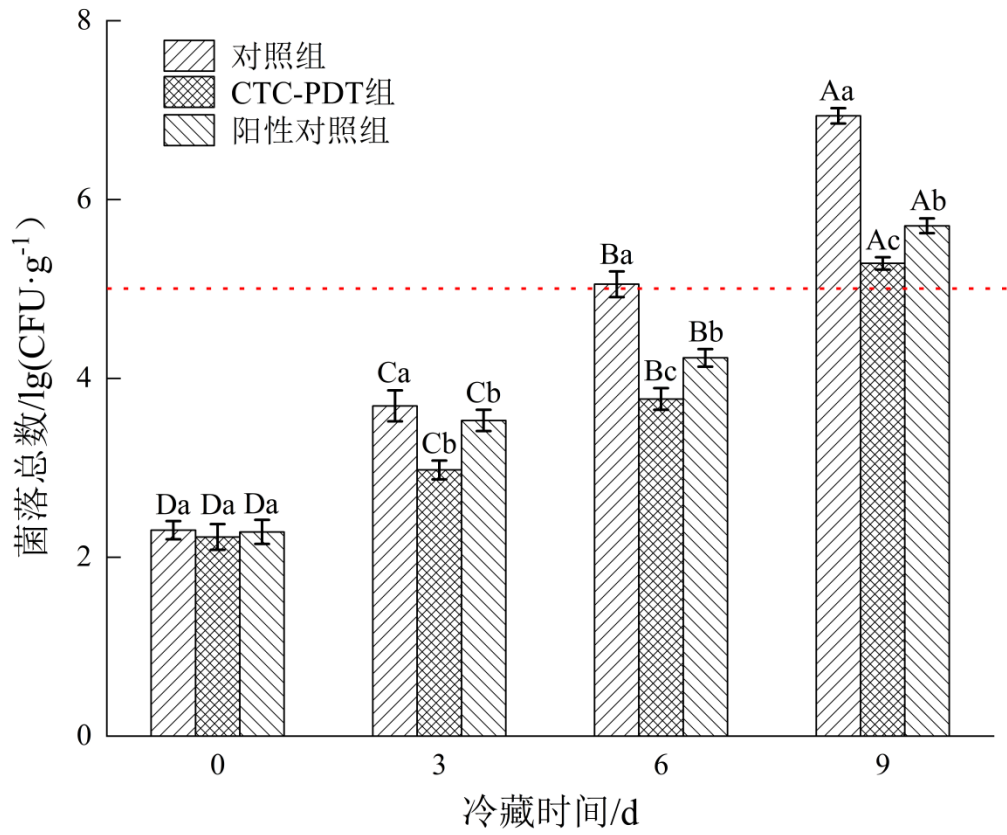


图 2 各组三文鱼样品在冷藏期间的变化

Fig. 2 Changes in total viable counts of each group of salmon samples during refrigerated storage

2.3 CTC-PDT 处理对冷藏三文鱼色泽的影响

色泽是直观反映三文鱼新鲜度的重要指标之一^[33]。各组三文鱼样品在冷藏期间的色差变化见表 1,其中不同大写字母表示不同冷藏时间下相同处理方式之间具有显著性差异($P<0.05$),不同小写字母表示相同冷藏时间下不同处理方式之间具有显著性差异($P<0.05$)。下同。由表 1 可知,冷藏 9 d 时,空白对照组的 L^* 由冷藏初始的 50.12 ± 2.15 升至 54.95 ± 0.32 ($P<0.05$), a^* 由 54.70 ± 0.45 降至 37.54 ± 0.92 , b^* 由 26.59 ± 1.12 降至 11.85 ± 0.32 ($P<0.05$),这与 T.C.Merlo 等^[34]报道的冷藏鱼肉色泽变化趋势一致。CTC-PDT 组和阳性对照组均展现出显著的色泽稳定作用。冷藏 6 d 时,CTC-PDT 组和阳性对照组的 a^* 和 b^* 均显著高于空白对照组,表明 CTC-PDT 处理与传统山梨酸钾处理均能有效延缓三文鱼红度和黄度的下降。冷藏 9 d 时,CTC-PDT 组的 ΔE (13.94 ± 0.27) 显著低于空白对照组 (23.23 ± 0.57) 和阳性对照组 (17.45 ± 1.32) ($P<0.05$)。结合本研究菌落总数变化与已有研究^[35]推测,CTC-PDT 处理对微生物生长的抑制可能有利于

延缓三文鱼色泽劣变，进而维持三文鱼肌肉组织的色泽稳定性。

表 1 各组三文鱼样品在冷藏期间的色差参数

Table 1 Color parameters of each group of salmon samples during refrigerated storage					
参数	组别	冷藏时间/d			
		0	3	6	9
L^*	空白对照组	50.12±2.15 ^{Ca}	52.55±1.64 ^{Ba}	54.22±0.48 ^{Aa}	54.95±0.32 ^{Aa}
	CTC-PDT 组	49.62±3.14 ^{Aa}	50.34±1.34 ^{Aa}	50.93±0.29 ^{Ab}	51.63±0.52 ^{Ac}
	阳性对照组	50.02±1.79 ^{Ba}	51.35±0.81 ^{Ba}	53.41±0.48 ^{Aa}	53.86±0.48 ^{Ab}
a^*	空白对照组	54.70±0.45 ^{Aa}	50.82±0.56 ^{Bb}	45.81±0.58 ^{Cc}	37.54±0.92 ^{Dc}
	CTC-PDT 组	54.07±0.37 ^{Aa}	53.10±0.28 ^{Ba}	48.38±0.41 ^{Cb}	44.90±0.89 ^{Ca}
	阳性对照组	54.24±0.94 ^{Aa}	52.24±0.44 ^{Ba}	50.07±0.69 ^{Ca}	41.39±0.97 ^{Db}
b^*	空白对照组	26.59±1.12 ^{Aa}	21.30±0.87 ^{Bb}	16.28±0.57 ^{Cb}	11.85±0.32 ^{Dc}
	CTC-PDT 组	26.77±0.35 ^{Aa}	23.41±0.46 ^{Ba}	20.12±0.49 ^{Ca}	16.89±0.81 ^{Da}
	阳性对照组	26.50±1.47 ^{Aa}	22.92±0.40 ^{Ba}	19.19±0.43 ^{Ca}	15.50±0.35 ^{Db}
ΔE	空白对照组		7.16±0.50 ^{Ca}	14.35±0.14 ^{Ba}	23.23±0.57 ^{Aa}
	CTC-PDT 组		4.75±1.62 ^{Cb}	9.18±0.94 ^{Bb}	13.94±0.27 ^{Ab}
	阳性对照组		4.62±0.98 ^{Cb}	9.17±1.49 ^{Bb}	17.45±1.32 ^{Ac}

2.4 CTC-PDT 处理对冷藏三文鱼质构特性的影响

质构特性是反映鱼肉组织结构完整性和力学性能的重要指标，可用于客观评价其新鲜度与品质。各组三文鱼样品在冷藏期间的质构特性变化见表 2。由表 2 可知，随着冷藏时间的延长，空白对照组的硬度、弹性和咀嚼度均显著降低。冷藏 3 d 时，CTC-PDT 组和阳性对照组的硬度分别为（3 761.96±162.98） g 和（3 635.37±121.79） g，均显著高于空白对照组，但弹性和咀嚼度无显著差异；冷藏 6 d 和 9 d 时，CTC-PDT 组和阳性对照组的硬度、弹性及咀嚼度均显著高于空白对照组。Y.F.Li 等^[36]研究发现，利用可溶性南极磷虾蛋白-姜黄素复合物介导的 PDI 处理鲜虾，冷藏 3 d 后，处理组仍能保持肌肉纤维的完整性和弹性，本研究结果与其基本一致。综上，CTC-PDT 处理能有效延缓三文鱼在冷藏期间质构特性的劣变，其质构特性保持效果与阳性对照处理组接近。

表 2 各组三文鱼样品在冷藏期间的质构特性变化

Table 2 Changes in textural properties of each group of salmon samples during refrigerated storage		
参数	组别	冷藏时间/d

		0	3	6	9
硬度/g	空白对照组	3 972.61±121.25 ^{Aa}	3 088.71±303.03 ^{Bb}	2 418.68±184.08 ^{Cc}	1 510.77±126.28 ^{Db}
	CTC-PDT 组	4 077.31±202.06 ^{Aa}	3 761.96±162.98 ^{Ba}	3 096.66±53.19 ^{Ca}	2 753.48±177.91 ^{Da}
	阳性对照组	4 061.35±211.44 ^{Aa}	3 635.37±121.79 ^{Ba}	2 858.10±70.06 ^{Cb}	2 469.08±191.57 ^{Da}
弹性	空白对照组	0.94±0.04 ^{Aa}	0.88±0.04 ^{Aa}	0.69±0.03 ^{Bb}	0.64±0.06 ^{Bb}
	CTC-PDT 组	0.94±0.04 ^{Aa}	0.90±0.04 ^{Aa}	0.80±0.04 ^{Ba}	0.77±0.07 ^{Ba}
	阳性对照组	0.94±0.02 ^{Aa}	0.90±0.03 ^{Aa}	0.78±0.03 ^{Ba}	0.74±0.06 ^{Ba}
咀嚼度	空白对照组	842.27±26.42 ^{Aa}	761.52±20.56 ^{Ba}	587.48±37.44 ^{Cb}	446.51±21.97 ^{Db}
	CTC-PDT 组	854.28±28.33 ^{Aa}	805.54±30.50 ^{ABa}	781.48±23.91 ^{Ba}	705.22±26.50 ^{Ca}
	阳性对照组	849.12±28.70 ^{Aa}	814.50±30.50 ^{ABa}	773.95±23.78 ^{Ba}	678.03±26.09 ^{Ca}

2.5 CTC-PDT 处理对冷藏三文鱼 pH 值的影响

各组三文鱼样品在冷藏期间的 pH 值变化如图 3 所示。由图 3 可知，冷藏初始（0 d）时，各组三文鱼样品的 pH 值均处于 6.51~6.54 之间，与 Z.Wang 等^[37]报道的新鲜鲑鱼初始 pH 值基本一致。冷藏 3 d 时，空白对照组的 pH 值升至 6.63±0.01，显著高于 CTC-PDT 组和阳性对照组；冷藏 6 d 时，各组三文鱼样品的 pH 值差异显著（ $P<0.05$ ）；冷藏 9 d 时，空白对照组的 pH 值升至 7.33±0.01，已超过中性，而阳性对照组和 CTC-PDT 组的 pH 值分别为 7.19±0.01 和 7.11±0.01，且 CTC-PDT 组的 pH 值显著低于阳性对照组（ $P<0.05$ ），表明 CTC-PDT 处理能更有效地抑制 pH 值升高，延缓三文鱼品质劣变。三文鱼冷藏后期 pH 值升高通常与其组织自溶及微生物代谢产生的碱性物质（如氨类化合物）的持续累积有关^[38]。C.Gong 等^[39]研究发现，姜黄素介导的 PDT 可有效抑制鲟鱼冷藏期间 pH 值的上升，本研究结果与之吻合，进一步证实了 CTC-PDT 处理在延缓水产品品质劣变方面的有效性。

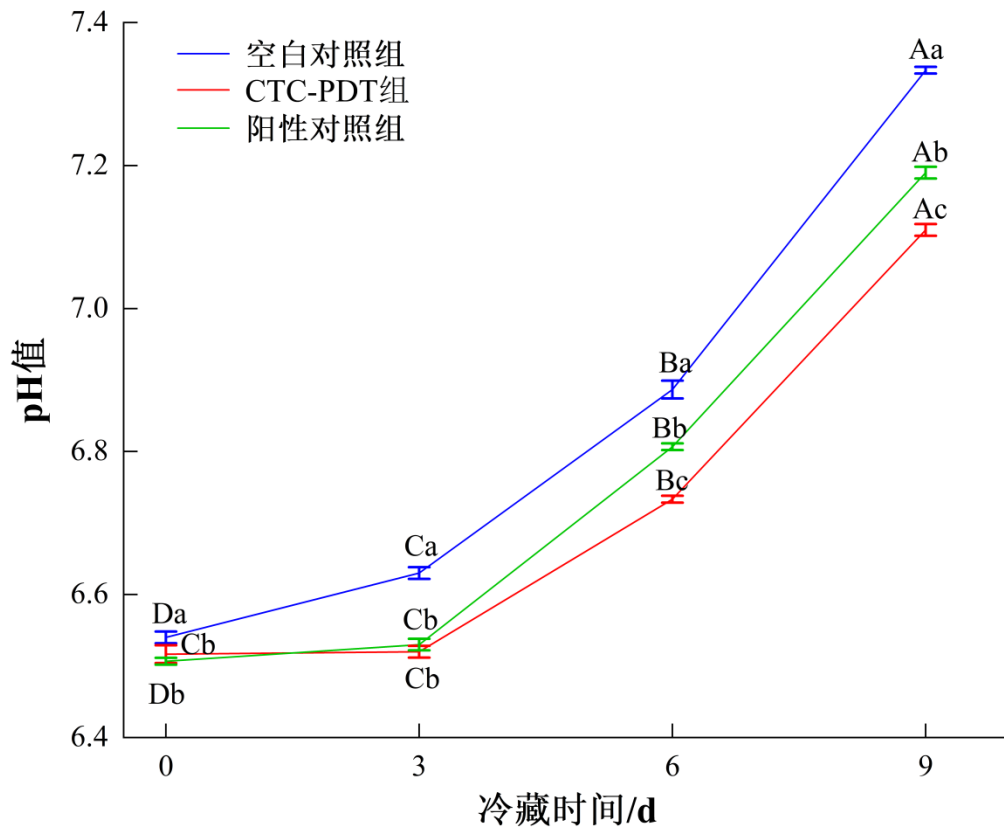


图 3 各组三文鱼样品在冷藏期间的 pH 值变化

Fig. 3 Changes in pH values of each group of salmon samples during refrigerated storage

2.6 CTC-PDT 处理对冷藏三文鱼水分分布的影响

各组三文鱼样品在冷藏期间的水分分布变化如图 4 所示。由图 4 可知，各组三文鱼样品的水分分布均呈现 3 个特征峰： T_{21} 峰（0~10 ms）代表与蛋白质分子通过氢键紧密结合的结合水； T_{22} 峰（10~100 ms）对应肌原纤维网络中的不易流动水，其状态受蛋白质构象直接影响； T_{23} 峰（100~1000 ms）对应组织间隙中的自由水。随着冷藏时间的延长，各组三文鱼样品的 T_{21} 峰面积略有减小，表明三文鱼样品在冷藏期间的肌肉组织结构发生了改变，削弱了水分与生物大分子之间的结合强度。同时，各组三文鱼样品的 T_{22} 峰面积明显减小，而 T_{23} 峰面积总体呈增加趋势，这可能是因为冷藏期间肌肉纤维束网络遭到破坏，导致肌原纤维网络中的不易流动水向自由水转化。相较于空白对照组，CTC-PDT 组和阳性对照组的 T_{22} 和 T_{21} 峰面积的下降幅度均较低，而在冷藏中后期，CTC-PDT 组的 T_{23} 峰面积及其变化幅度均总体低于空白对照组和阳性对照组，表明 CTC-PDT 处理能够更有效地限制自由水累积。Q.H.Zeng 等^[40]采用糖基化南极磷

虾蛋白-姜黄素结合物处理三文鱼，同样观察到水分迁移受到了有效抑制，本研究结果与之相符。此外，CTC-PDT 组对水分迁移的抑制效果较阳性对照组更优，更能有效改善三文鱼的持水性，延缓水分流失，进而维持其良好的质地与口感。

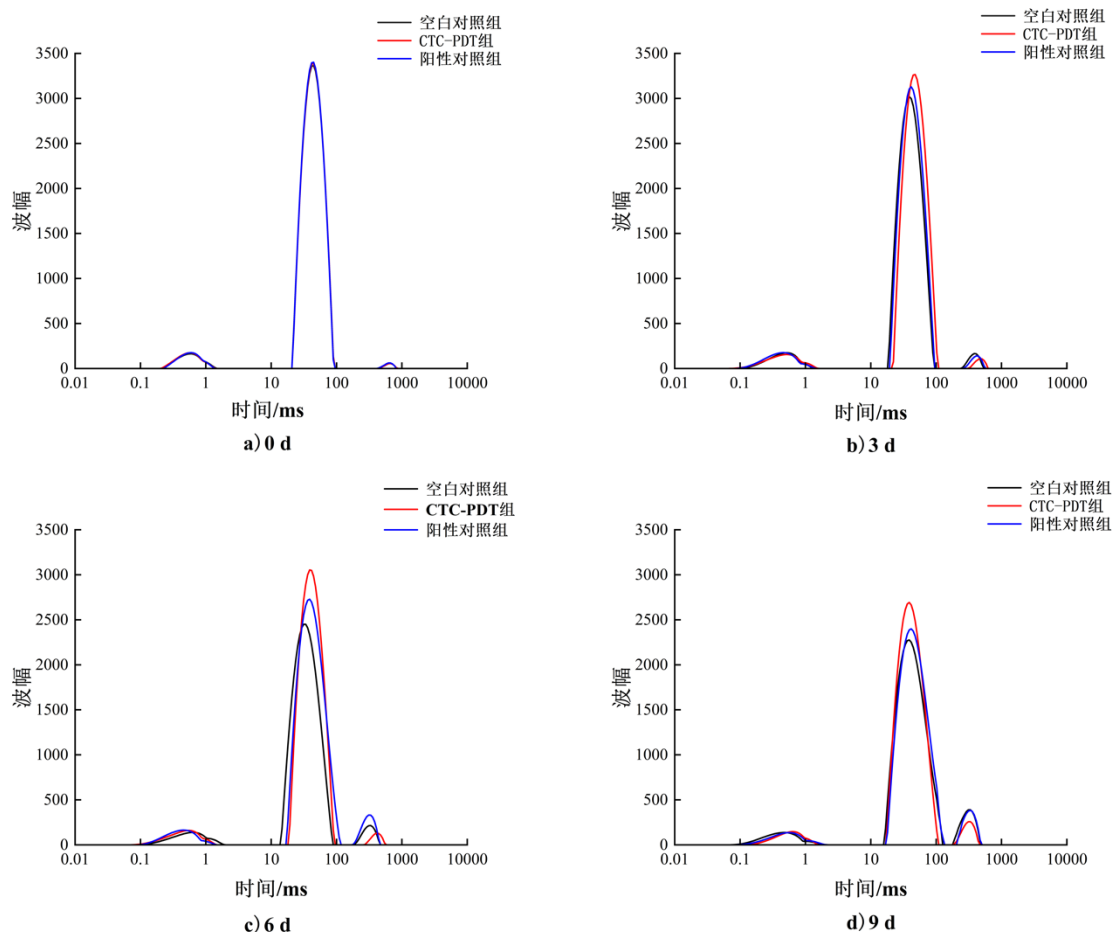


图 4 各组三文鱼样品在冷藏期间的水分分布变化

Fig. 4 Changes in water distribution of each group of salmon samples during refrigerated storage

2.7 CTC-PDT 处理对冷藏三文鱼滋味的影响

电子舌能模拟人类味觉感知，通过多传感器阵列对食品滋味进行检测，可为三文鱼新鲜度评价提供参考。各组三文鱼样品在冷藏期间的滋味变化如图 5 所示。由图 5 可知，随着冷藏时间的延长，各组三文鱼样品的鲜味呈持续下降趋势，苦味与涩味则呈持续上升趋势。这与 X.Li 等^[41]报道的鱼类贮藏期间滋味变化趋势基本一致。以空白对照组为例，鲜味在冷藏 3 d、6 d、9 d 时分别为 9.12 ± 0.23 、 8.42 ± 0.17 和 7.52 ± 0.24 ，较初始值 (12.13 ± 0.16) 降低了 24.8%、30.6% 和 38.0%，这可能与三文鱼样品在冷藏过程中蛋白质降解及脂肪氧化产物累积相关。相较于空

白对照组, CTC-PDT 组和阳性对照组的鲜味下降幅度均较小, 冷藏 6 d 和 9 d 时, CTC-PDT 组的鲜味分别为 9.93 ± 0.41 和 8.43 ± 0.27 , 阳性对照组的鲜味分别为 10.17 ± 0.30 和 8.37 ± 0.36 。此外, 丰富度的变化趋势与鲜味相似。同时, 各组三文鱼样品的苦味和涩味均呈上升趋势。整个冷藏期间, 空白对照组的苦味由 4.01 ± 0.14 增至 8.34 ± 0.36 , 涩味由 0.96 ± 0.08 增至 3.64 ± 0.21 。冷藏 9 d 时, CTC-PDT 组的苦味和涩味分别为 6.86 ± 0.20 和 2.59 ± 0.14 , 阳性对照组的苦味和涩味分别为 7.08 ± 0.13 和 2.63 ± 0.11 , 均低于同期空白对照组。综上所述, CTC-PDT 处理对鲜味和丰富度的保持作用更为明显, 同时对苦味和涩味的抑制效果更优, 表明其更有利于维持冷藏三文鱼的滋味品质。

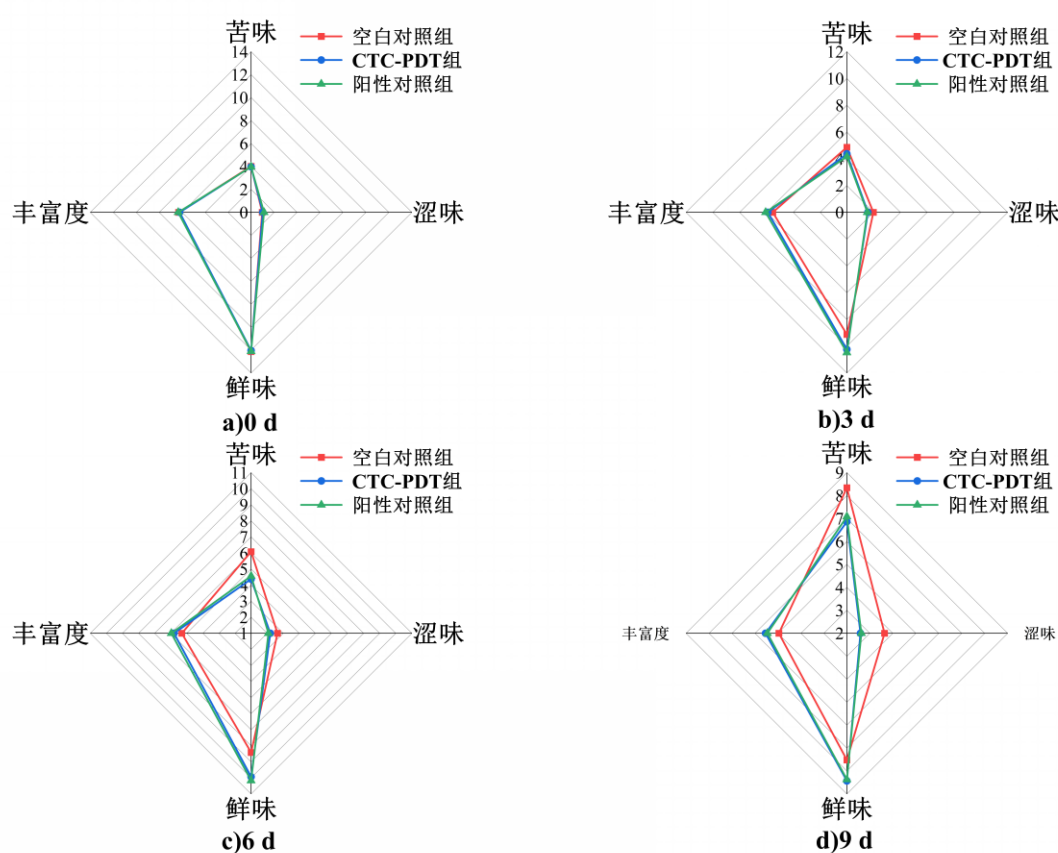


图 5 各组三文鱼样品在冷藏期间的滋味变化

Fig. 5 Changes in the taste of each group of salmon samples during refrigerated storage

2.8 CTC-PDT 处理对冷藏三文鱼 TVB-N 含量的影响

TVB-N 是评价鱼类新鲜度的关键指标之一, 用于表征蛋白质和氨基酸降解过程中产生的氨 (NH_3)、三甲胺 (TMA)、二甲胺 (DMA) 等挥发性碱性含氮化合物的累积程度^[42]。各组三文鱼样品在贮藏期间的 TVB-N 含量变化如图 6 所示。由图 6 可知, 冷藏初期 (0 d), 各组三文鱼样品的 TVB-N 含量介于 $12.37\sim12.52$ mg/100 g 之间。根据《食品安全国家标准 动物

性水产制品》(GB 10136—2015)^[29], 即食三文鱼的 TVB-N 含量不得超过 30 mg/100 g。随着冷藏时间的延长, 空白对照组的 TVB-N 含量逐渐增加, 冷藏 6 d 时的 TVB-N 含量(32.04 ± 0.20) mg/100 g 已超过该限值, 而 CTC-PDT 组和阳性对照组的 TVB-N 含量分别为 (23.46 ± 0.84) mg/100 g 和 (26.07 ± 0.55) mg/100 g, 均显著低于空白对照组 ($P < 0.05$) 且仍在该限值以内。冷藏 9 d 时, 阳性对照组的 TVB-N 含量超过该限值, 而 CTC-PDT 组的 TVB-N 含量仍未超过该限值, 表明 CTC-PDT 处理在延缓冷藏三文鱼的 TVB-N 累积方面效果最佳。H.M.Chen 等^[30]采用姜黄素介导的 PDT 处理三文鱼, 同样观察到 TVB-N 的累积被显著延缓, 本研究结果与之一致。

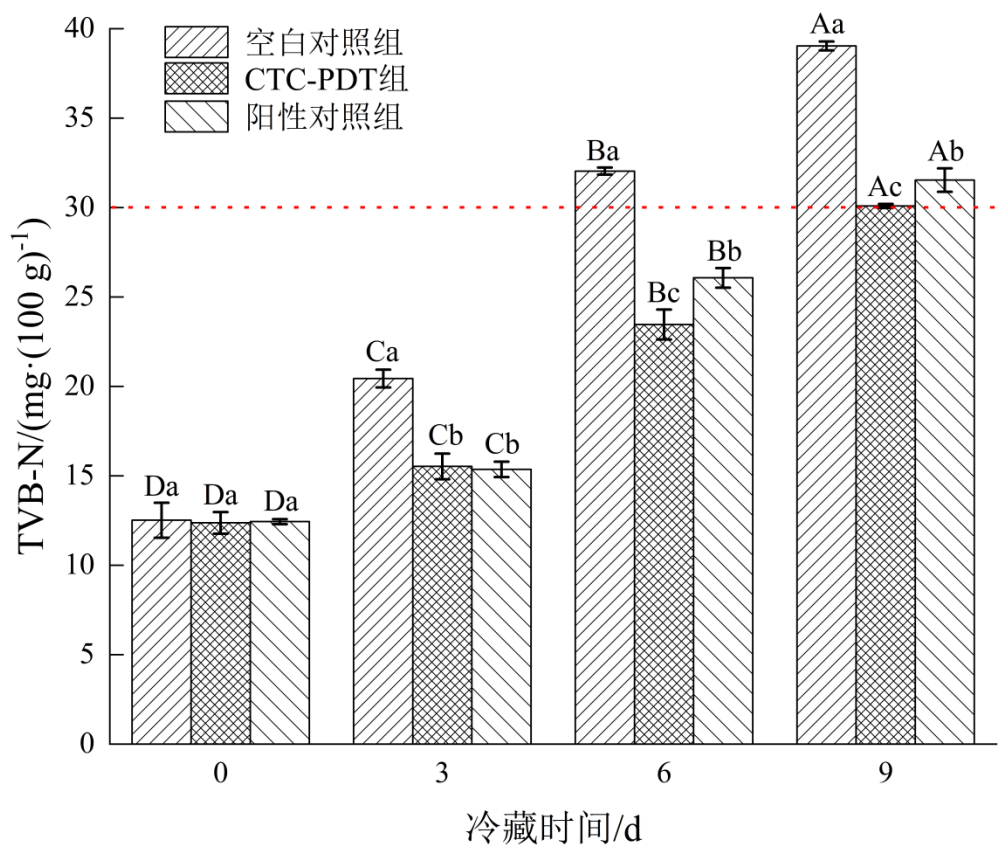


图 6 各组三文鱼样品在冷藏期间的 TVB-N 含量变化

Fig. 6 Changes in TVB-N content of each group of salmon samples during refrigerated storage

2.9 CTC-PDT 处理对冷藏三文鱼 TBA 值的影响

TBA 值是评价水产制品脂质氧化程度的关键指标之一, 用于表征不饱和脂肪酸氧化降解产物 (主要为醛类物质) 与 TBA 反应生成的有色化合物含量^[43]。各组三文鱼样品在冷藏期间

的 TBA 值变化如图 7 所示。由图 7 可知，冷藏初期（0 d），各组三文鱼样品的 TBA 值处于 0.40~0.46 mg MDA/kg 之间。随着冷藏时间的延长，各组三文鱼样品的 TBA 值均呈逐渐增加的趋势。冷藏 3 d 时，CTC-PDT 组和阳性对照组的 TBA 值分别为（0.53±0.02） mg MDA /kg 和（0.58±0.02） mg MDA /kg，均显著低于同期空白对照组（（0.80±0.06） mg MDA /kg）。冷藏至第 6 d 时，CTC-PDT 组的 TBA 值为 0.83 mg MDA/kg，与空白对照组冷藏第 3 d 时的水平相近，并显著低于同期空白对照组（（1.61±0.05） mg MDA/kg）。冷藏 9 d 时，CTC-PDT 组的 TBA 值为（1.64±0.07） mg MDA /kg，与空白对照组冷藏 6 d 时的 TBA 值（（1.61±0.05） mg MDA /kg）相近，同时显著低于阳性对照组（（2.39±0.07） mg MDA /kg）。综上可知，CTC-PDT 处理与传统山梨酸钾处理均可有效抑制三文鱼脂质氧化变质，且 CTC-PDT 处理的效果更佳。

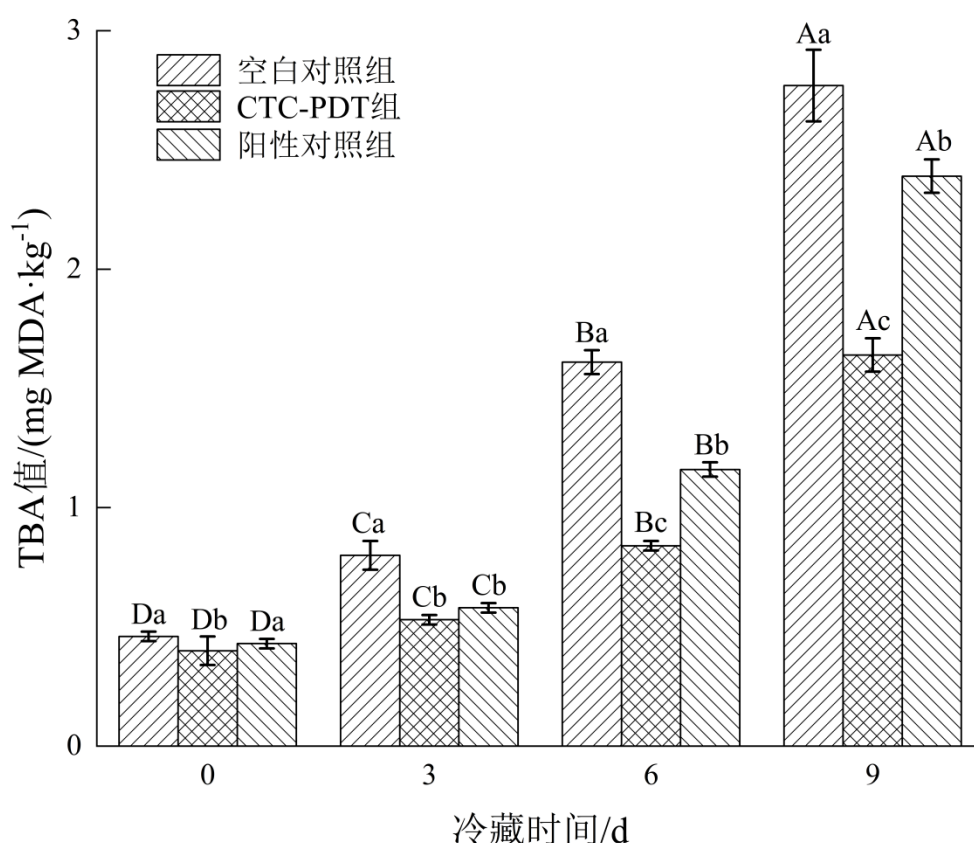


图 7 各组三文鱼样品在冷藏期间的 TBA 值变化

Fig. 7 Changes in TBA values of each group of salmon samples during refrigerated storage

综上，冷藏 6 d 时，空白对照组的菌落总数与 TVB-N 值分别达到（5.05±0.17） lg CFU/g

和 (32.04 ± 0.20) mg/100g, 均已超过《食品安全国家标准 动物性水产制品》(GB/10136—2015) 限定范围内^[29], 同期 CTC-PDT 组的菌落总数 (3.77 ± 0.15) lg CFU/g 与 TVB-N 值 (23.46 ± 0.84) mg/100 g 仍在此限定范围内; 冷藏 9 d 时, CTC-PDT 组的 TBA 值与空白对照组冷藏 6 d 时的水平相当, 且在色泽稳定性、质构特性、水分保持能力等方面均表现出明显的劣变延缓效果。因此, CTC-PDT 处理能有效延缓冷藏三文鱼的品质劣变进程, 并使其可接受冷藏时间维持至 6 d, 较空白对照组明显延长。

3 结论

本研究将经 CTC-PDT 处理后的三文鱼样品于 4 °C 条件下冷藏 9 d, 系统探究了其在冷藏期间的外观形态、菌落总数、色泽、质构特性、pH 值、水分分布等方面的变化, 得出如下结论: CTC-PDT 处理能显著延缓冷藏三文鱼的品质劣变。相较于空白对照组, CTC-PDT 处理可有效抑制菌落总数增长和 TVB-N 累积, 减缓脂质氧化, 并延缓三文鱼冷藏期间 a^* 和 b^* 下降、 ΔE 增加及硬度、弹性和咀嚼度降低; 低场核磁结果进一步表明, CTC-PDT 处理有助于减缓不易流动水向自由水迁移, 维持肌肉组织的水分分布稳定性; 电子舌结果显示, 该处理还可延缓鲜味和丰富度下降, 并抑制苦味、涩味等不良滋味特征的增强; 依据菌落总数和 TVB-N 含量的变化, 冷藏 6 d 时, CTC-PDT 处理的菌落总数和 TVB-N 含量仍低于相应限值, 而空白对照组同期两项指标均已超过限值, 表明 CTC-PDT 处理可使三文鱼在冷藏 6 d 时仍保持可接受状态, 从而延长其冷藏货架期。总体而言, CTC-PDT 处理的综合保鲜效果与传统山梨酸钾处理相当, 并在菌落总数、TVB-N 含量、TBA 值及部分质构指标上表现更优, 表明该处理方法具有应用于冷藏水产品非热保鲜的潜力。未来可进一步结合感官评价、GC-IMS 等技术对冷藏三文鱼样品的品质变化进行深入研究; 利用代谢组学、分子动力学等技术, 阐明 CTC-PDT 处理对冷藏三文鱼优势腐败菌及自身酶活性的精准调控机制, 并探索其在水产品中的应用潜力。

参考文献：

- [1] 靳春秋, 迟海, 杨宪时, 等. 冰藏三文鱼品质变化及菌相分析[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(4): 220-226.
- Jin C Q, Chi H, Yang X S, et al. Quality and bacterial phase changes of Salmon during iced storage[J]. Food and Fermentation Industries, 2013, 39(4): 220-226.
- [2] Kitson A P, Patterson A C, Izadi H, et al. Pan-frying salmon in an eicosapentaenoic acid (EPA) and docosahexaenoic acid (DHA) enriched margarine prevents EPA and DHA loss[J]. Food Chemistry, 2009, 114(3): 927-932.
- [3] Blanchet C, Lucas M, Julien P, et al. Fatty acid composition of wild and farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*) and rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. Lipids, 2005, 40(5): 529-531.
- [4] di Pinto A, Novello L, Montemurro F, et al. Occurrence of *Listeria monocytogenes* in ready-to-eat foods from supermarkets in Southern Italy[J]. The New Microbiologica, 2010, 33(3): 249-252.
- [5] Liu D, Gu W M, Wang L, et al. Photodynamic inactivation and its application in food preservation[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 63(14): 2042-2056.
- [6] Sheng L N, Li X R, Wang L X. Photodynamic inactivation in food systems: a review of its application, mechanisms, and future perspective[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 124: 167-181.
- [7] 孙新城, 杜月霞, 周军, 等. 噬菌体及其衍生物抗食源性致病菌生物被膜的研究进展[J]. 轻工学报, 2025, 40(5): 37-43, 54.
- Sun X C, Du Y X, Zhou J, et al. Research progress of bacteriophages and their derivatives against foodborne pathogens biofilms[J]. Journal of Light Industry, 2025, 40(5): 37-43, 54.
- [8] 程琳丽, 李来好, 马海霞. 罗非鱼的保鲜研究进展[J]. 食品工业科技, 2013, 34(11): 372-375.
- CHeng L L, Li L H, Ma H X. Research progress in preservation of tilapia[J]. Food Industry Science and Technology, 2013, 34(11): 372-375.
- [9] Yuan Y, Liu Q Y, Huang Y J, et al. Antibacterial efficacy and mechanisms of curcumin-based photodynamic treatment against *Staphylococcus aureus* and its application in juices[J]. Molecules, 2022, 27(20): 7136.
- [10] 刘卿妍. 三文鱼贮存过程中金黄色葡萄球菌生长预测模型的构建及光动力杀菌技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- Liu Q Y. Establishment of growth prediction model of *Staphylococcus aureus* in salmon storage process and study of photodynamic sterilization technology[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [11] 陈妙凤, 杨昊青, 卢艺慧, 等. 光动力抗真菌技术研究进展[J]. 食品科学, 2025, 46(15): 27-34.

Chen M F, Yang H Q, Lu Y H, et al. Research progress on photodynamic antifungal technology[J]. Food Science, 2025, 46(15): 27-34.

[12] 姜浩, 张沐棠, 吴柳清, 等. 姜黄素药食特性及应用综述[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(4): 363-373.

Jiang H, Zhang M T, Wu L Q, et al. Review on characteristics and applications of curcumin for both food and medicine[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(4): 363-373.

[13] Balaji S, Chempakam B. Toxicity prediction of compounds from turmeric (*Curcuma longa* L)[J]. Food and Chemical Toxicology, 2010, 48(10): 2951-2959.

[14] Crivello J V, Bulut U. Curcumin: a naturally occurring long-wavelength photosensitizer for diaryliodonium salts[J]. Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry, 2005, 43(21): 5217-5231.

[15] Huang J M, Chen B W, Zeng Q H, et al. Application of the curcumin-mediated photodynamic inactivation for preserving the storage quality of salmon contaminated with *L. monocytogenes*[J]. Food Chemistry, 2021, 359: 129974.

[16] Liu Y, Yin R, Tian Y, et al. Curcumin nanopreparations: recent advance in preparation and application[J]. Biomedical Materials, 2024, 19(5): 052009.

[17] Wang H, Zheng C X, Tian F Y, et al. Improving the dissolution rate and bioavailability of curcumin *via* co-crystallization[J]. Pharmaceuticals, 2024, 17(4): 489.

[18] 古伟明. 姜黄素共晶介导的光动力抗菌及其在熟花蛤保鲜中的应用[D]. 广州: 广东工业大学, 2023.

Gu W M. Photodynamic inactivation mediated by curcumin and its application in the preservation of cooked clams[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2023.

[19] Gu W M, Liu D, Sun J X. Co-crystallization of curcumin for improved photodynamic inactivation of *Vibrio parahaemolyticus* and its application for the preservation of cooked clams[J]. International Journal of Food Microbiology, 2022, 378: 109816.

[20] Xu F, Yang H Q, Dai W Z, et al. Co-crystallization of curcumin with tyramine resulted disparate impacts on the activities of photodynamic and sonodynamic treatments[J]. Food Chemistry, 2025, 475: 143254.

[21] 傅宝尚, 丁若松, 尚珊, 等. 不同防腐剂对烤制鱿鱼片贮藏品质的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(20): 301-308.

Fu B S, Ding R S, Shang S, et al. Effects of different preservatives on the storage quality of roasted flake[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(20): 301-308.

[22] GB 4789.2—2022 食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定[S].

GB 4789.2—2022 National food safety standard—Microbiological examination of foods—Determination of total

colony count[S].

[23] Prabhu L, Skuland A V, Varela P, et al. Fish protein hydrolysate as protein enrichment in texture-modified salmon products[J]. Foods, 2025, 14(2): 162.

[24] 邹小波, 薛瑾, 黄晓玮, 等. 一种双层智能膜的制备及在指示三文鱼新鲜度中的应用[J]. 食品科学, 2019, 40(23): 206-212.

Zou X B, Xue J, Huang X W, et al. Development and application of an intelligent biolayer packaging film as a freshness indicator for salmon[J]. Food Science, 2019, 40(23): 206-212.

[25] 李立. 超高压解冻对三文鱼水分迁移及肌原纤维蛋白变性的影响[J]. 包装工程, 2024, 45(21): 174-182.

Li L. Effects of high pressure thawing on water migration and myofibrillar degeneration of salmon[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(21): 174-182.

[26] 赵勇, 蒋东丰, 朱克卫, 等. 不同产地进口三文鱼挥发风味物质组成特征研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(3): 734-744.

Zhao Y, Jiang D F, Zhu K W, et al. Study on the characteristics of volatile flavor components of imported salmon from different habitats[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(3): 734-744.

[27] GB 5009.228—2016 食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定[S].

GB 5009.228—2016 National food safety standard—Determination of volatile basic nitrogen in foods[S].

[28] 蔡路昀, 赵敏, 沈俊, 等. 三文鱼生物保鲜技术应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(20): 12-19.

Cai L Y, Zhao M, Shen J, et al. Research progress in application of bio-preservation technology for *Salmo salar*[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(20): 12-19.

[29] GB 10136—2015 食品安全国家标准 动物性水产制品[S].

GB 10136—2015 National food safety standard—Animal-based aquatic products[S].

[30] Chen H M, Zhou Q, Huang L J, et al. Curcumin-mediated photodynamic treatment extends the shelf life of salmon (*Salmo salar*) sashimi during chilled storage: comparisons of preservation effects with five natural preservatives[J]. Food Research International, 2023, 173(Pt 1): 113325.

[31] 李玉锋, 解子维, 董文丽, 等. 光动力技术在水产品保藏中应用的研究进展[J]. 食品科学, 2025, 46(14): 345-356.

Li Y F, Xie Z W, Dong W L, et al. Recent progress on the application of photodynamic inactivation in the preservation of aquatic products[J]. Food Science, 2025, 46(14): 345-356.

[32] 崔姗, 刘凯, 孙美君, 等. 水产品劣变机制及其保鲜技术研究进展[J]. 肉类研究, 2024, 38(12): 55-62.

- Cui S, Liu K, Sun M J, et al. Research progress on the deterioration mechanism and preservation technologies for aquatic products[J]. Meat Research, 2024, 38(12): 55-62.
- [33] Desantos F A, Bechtel P, Smiley S, et al. Quality characteristics of freeze-dried salmon baby food purees during storage[J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2012, 21(1): 22-38.
- [34] Merlo T C, Contreras-Castillo C J, Saldaña E, et al. Incorporation of pink pepper residue extract into chitosan film combined with a modified atmosphere packaging: effects on the shelf life of salmon fillets[J]. Food Research International, 2019, 125: 108633.
- [35] Dehghani S, Hosseini S V, Regenstein J M. Edible films and coatings in seafood preservation: a review[J]. Food Chemistry, 2018, 240: 505-513.
- [36] Li Y F, Tan L J, Liu F Y, et al. Effects of soluble Antarctic krill protein-curcumin complex combined with photodynamic inactivation on the storage quality of shrimp[J]. Food Chemistry, 2023, 403: 134388.
- [37] Wang Z, Hu S F, Gao Y P, et al. Effect of collagen-lysozyme coating on fresh-salmon fillets preservation[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 75: 59-64.
- [38] Yan Q, Wang L L, Sun X Y, et al. Improvement in the storage quality of fresh salmon (*Salmo salar*) using a powerful composite film of rice protein hydrolysates and chitosan[J]. Food Control, 2022, 142: 109211.
- [39] Gong C, Li Y J, Gao R C, et al. Preservation of sturgeon using a photodynamic non-thermal disinfection technology mediated by curcumin[J]. Food Bioscience, 2020, 36: 100594.
- [40] Zeng Q H, Hu D, Li Y F, et al. Conjugates of glycosylated Antarctic krill proteins and curcumin: maintaining the storage quality of salmon fillets coupling with photodynamic inactivation[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 155: 110191.
- [41] Li X, Tu Z C, Sha X M, et al. Effect of coating on flavor metabolism of fish under different storage temperatures[J]. Food Chemistry, 2022, 13: 100256.
- [42] García M R, Ferez-Rubio J A, Vilas C. Assessment and prediction of fish freshness using mathematical modelling: a review[J]. Foods, 2022, 11(15): 2312.
- [43] Mozzon M, Foligni R, Mannozi C, et al. Assessment of lipid oxidation in fish and fish products processed by cold plasma technologies[J]. Applied Food Research, 2024, 4(2): 100646.

[责任编辑：杨晓娟 李波]