

姜黄素-紫苏精油乳液保鲜膜特性及对卵形鲳鲹保鲜效果研究

王恒恒^{1,2}, 吴燕燕², 王悦齐², 魏 涯², 潘 创², 陈胜军²

1. 上海海洋大学 食品学院, 上海 201306

2. 中国水产科学研究院南海水产研究所/农业农村部水产品加工重点实验室, 广东 广州 510300

摘要: 为开发智能绿色鱼类保鲜膜, 探究了不同添加量 (1%、3%、5% 和 7%, w) 的壳聚糖-二氧化钛 (CS-TiO₂) 复合颗粒紫苏精油乳液与姜黄素、明胶制备的保鲜薄膜 (EP1、EP3、EP5、EP7) 的特性 (机械性能、阻湿性、热稳定性、抗氧化性) 以及薄膜对卵形鲳鲹 (*Trachinotus ovatus*) 保鲜指标 [挥发性盐基氮 (TVB-N)、硫代巴比妥酸反应物 (TBARS)、羰基、总巯基、抗菌性和指示性能)] 的影响, 以明胶制备的薄膜作为对照组 (EP0)。结果表明, 相较于对照组, 各组薄膜的特性及其对卵形鲳鲹的保鲜效果均显著提升 ($p < 0.05$)。其中, EP7 组性质最优, 保鲜效果及鲜度指示效果最好。EP7 薄膜展现出优异的力学性能 (拉伸强度 38.34 MPa, 断裂伸长率 25.80%) 和阻湿性能 (溶解率 32.16%, 溶胀率 152.18%), 还具有突出的阻隔性能 (水蒸气透过率 $3.04 \times 10^{-13} \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$) 和抗氧化活性 (DPPH 清除率 45.97%, ABTS 清除率 87.36%)。应用于卵形鲳鲹冷藏保鲜时, 薄膜能有效抑制鱼肉腐败变质, 7 d 后 TVB-N 和 TBARS 值分别控制在 $22.36 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ 和 $0.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 同时显著维持蛋白质氧化稳定性 (羰基 $55.89 \mu\text{mol} \cdot \text{mg}^{-1}$, 总巯基 $48.86 \mu\text{mol} \cdot \text{mg}^{-1}$)。在鲜度指示方面, EP7 组的颜色随贮藏时间延长由浅黄色变为红棕色, 直观反映了鱼肉的鲜度变化。研究表明, 开发的姜黄素-紫苏精油乳液保鲜膜兼具延长货架期和智能指示鱼肉鲜度的双重功能。

关键词: 保鲜膜; 卵形鲳鲹; CS-TiO₂ 复合颗粒紫苏精油乳液; 姜黄素; 鲜度指示

中图分类号: TS 254.4

文献标志码: A

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Properties and applications of curcumin and perilla essential oil emulsion-based freshness-indicating films in golden pomfret (*Trachinotus ovatus*) freshness extension

WANG Hengheng^{1,2}, WU Yanyan², WANG Yueqi², WEI Ya², PAN Chuang², CHEN Shengjun²

1. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

2. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences/Key Laboratory of Aquatic Product Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510300, China

Abstract: To develop intelligent, green fish freshness-indicating films, we evaluated the physicochemical properties (Mechanical strength, moisture barrier capability, thermal stability, and antioxidant activity) of chitosan titanium dioxide (CS-TiO₂) composite particle perilla essential oil lotion with different addition levels (1%, 3%, 5%, and 7%, w) and the freshness-indicating films (EP1, EP3, EP5, and EP7) prepared from curcumin and gelatin. Additionally, we assessed the preservation efficacy of the films on golden pomfret (*Trachinotus ovatus*) by monitoring total volatile basic nitrogen (TVB-N), thiobarbituric acid reactive substances (TBARS), carbonyl content, total sulfhydryl content, antibacterial activity, and freshness-indicating performance.

收稿日期: 2025-06-17; 修回日期: 2025-07-02

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目 (2025B1111140001); 国家海水鱼产业技术体系 (CARS-47)

作者简介: 王恒恒 (1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水产品加工与质量安全。E-mail: whh553483159@163.com

通信作者: 吴燕燕 (1969—), 女, 研究员, 博士, 研究方向为水产品加工与质量安全。E-mail: wuyygd@163.com

Pure gelatin film (EP0) served as the control. Results demonstrate that all CS-TiO₂-incorporated films exhibited significantly enhanced properties compared with EP0. EP7 films exhibited excellent mechanical properties (Tensile strength 38.34 MPa, elongation at break 25.80%) and moisture resistance (Dissolution rate 32.16%, swelling rate 152.18%). They also demonstrated outstanding barrier properties (Water vapor transmission rate $3.04 \times 10^{-13} \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$) and antioxidant activity (DPPH scavenging rate 45.97%, ABTS scavenging rate 87.36%). When applied to the refrigerated preservation of golden pomfret, the films effectively inhibited fish spoilage. After 7 d, TVB-N and TBARS values were controlled at $22.36 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ and $0.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively, while significantly maintaining protein oxidation stability (Carbonyl content $55.89 \mu\text{mol} \cdot \text{mg}^{-1}$, total sulfhydryl content $48.86 \mu\text{mol} \cdot \text{mg}^{-1}$). For freshness indication, the EP7 group exhibited significant color changes from pale yellow to russet with prolonged storage, correlating with freshness deterioration. Therefore, curcumin and perilla essential oil emulsion-based freshness-indicating films in this research can not only extend the shelf life, but also intelligently indicate the freshness of fish.

Keywords: Freshness-indicating film; *Trachinotus ovatus*; Chitosan-titanium dioxide (CS-TiO)-perilla essential oil nanoemulsion; Curcumin; Freshness indicator

卵形鲳鲹 (*Trachinotus ovatus*) 也称金鲳, 是中国南方重要的经济鱼类, 富含蛋白质、不饱和脂肪酸等多种营养成分, 具有较高的营养和经济价值^[1]。据统计, 2023 年中国卵形鲳鲹养殖产量高达 29.4 万吨, 在海水鱼类养殖产业中占据重要地位^[2]。然而, 卵形鲳鲹捕捞后极易因微生物滋生而腐败变质, 而传统冷冻保鲜易影响口感和品质, 化学保鲜则存在残留风险。因此, 开发安全、高效的新型保鲜技术成为产业亟需解决的问题^[3]。近年来, 兼具抑菌功能与新鲜度实时监测能力的智能活性包装材料, 因其绿色、可控等优势, 成为水产品保鲜领域的研究热点^[4]。

当前食品包装广泛采用聚丙烯 (PP)、聚乙烯 (PE) 等不可降解的高分子材料, 这类材料不仅会带来环境负担和资源浪费, 还存在化学迁移风险, 影响食品安全。因此, 开发环境友好、安全无毒的生物可降解薄膜显得尤为重要^[5]。天然高分子材料的绿色薄膜主要包括多糖类、蛋白质类、脂质类以及复合型基质^[6]。单一成分制备的薄膜通常存在力学性能和阻隔性能差等问题, 且在功能性 (如抗菌、抗氧化和新鲜度指示) 拓展方面存在局限。此外, 直接将活性成分添加至成膜基质中容易导致稳定性下降或快速分解^[7]。针对这一问题, 可采用乳液包埋技术对活性物质进行封装, 实现可控释放。

明胶凭借其优异的成膜性、低温加工适应性和成本优势, 在食品包装领域应用广泛。杜鹏莹等^[5]利用明胶制备的活性膜显著延长了牛肉的货架期。紫苏精油 (PEO) 是一种从紫苏 (*Perilla frutescens* var. *frutescens*) 籽中提取的天然功能活性成分, 含有多钟活性化合物, 因其疏水性、生物安全性及抗

菌和抗氧化特性备受关注^[8]。唐森等^[9]研究表明, 紫苏精油壳聚糖复合膜可有效维持雪莲 (*Smalanthus sonchifolius*) 果的感官品质并延长其货架期。目前关于多重功能特性复合薄膜的研究仍处于起步阶段, 尤其在水产品保鲜领域鲜见报道。本团队前期研发了壳聚糖-二氧化钛 (CS-TiO₂) 复合颗粒稳定的紫苏精油乳液^[10], 提高了精油的稳定性, 并达到缓慢持续释放精油的抗菌效果。但此类包装薄膜仅表现出单一保鲜抗菌能力, 尚无法实现新鲜度实时监测。姜黄素是一种天然水溶性 pH 敏感指示剂, 在食品储存过程中, 它会因包装食品中某些化学物质的作用而发生颜色变化, 展现出在智能包装领域重要的应用潜力。本研究拟通过多重功能集成策略, 将姜黄素、不同浓度的 CS-TiO₂ 复合颗粒及紫苏精油乳液与明胶结合, 开发一种兼具保鲜与指示功能的智能薄膜, 探明其在卵形鲳鲹保鲜中的应用效果。该薄膜预期实现以下功能: 1) 抑制微生物生长, 延长卵形鲳鲹货架期; 2) 利用姜黄素的 pH 响应特性, 通过颜色直观反映鱼肉鲜度。本研究结果不仅可为卵形鲳鲹等鱼类提供新型智能保鲜解决方案, 满足产业需求, 还将为深远海养殖水产品的高品质保鲜提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

鲜活卵形鲳鲹 [(400±50) g] 购自广州市华润万家超市 (泡沫箱放冰袋密封运输)。

明胶、姜黄素、月桂酸钠、壳聚糖 (CS, 分子量: 150 kD; 脱乙酰度: 95%; 黏度: 100~200 mPa.s; CAS 号: 9012-76-4) 和紫苏精油 (PEO)

购自上海阿拉丁生化科技有限公司；二氧化钛 (TiO_2 , 纯度: 99.3%; 粒径: 5~10 nm) 购自北京华威瑞科化工有限公司；蛋白质羰基试剂盒 (BC1275)、总巯基试剂盒 (BC1375) 均购自北京阳光生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

电子拉力试验机 (东莞东日仪器有限公司)；磁力搅拌水浴锅 (金坛区西城新瑞仪器厂)；全自动凯氏定氮仪 (上海宝英光电)；色度计 (JZ-500 型, 中国金纬仪器有限公司)；恒温恒湿培养箱 (上海力辰邦西仪器科技有限公司)；红外光谱仪 (日本岛津公司)；热重分析仪 (TGA Q500, TA Instruments, 美国)；质构仪 (TA.XTC-20, 上海保圣实业发展有限公司)；数显测厚仪 (浙江德清盛泰芯电子科技有限公司)；其他均为实验室常用仪器。

1.3 方法

1.3.1 薄膜的制备方法

于 100 mL 去离子水中加入 2 g 的明胶, 在 40 °C 水浴下溶解得到明胶溶液, 将明胶溶液浇铸在玻璃板上, 于 4 °C 下保持 8 h, 然后在室温下风干获得薄膜样品, 记为 EP0。参考 Wang 等^[10]的方法制备 CS- TiO_2 复合颗粒紫苏精油乳液备用。

将 1.2% (w) 的姜黄素加入 2% (w) 的明胶溶液, 并分别加入 1%、3%、5%、7% (φ) 的 CS- TiO_2 复合颗粒紫苏精油乳液, 分别混匀后将溶液浇铸在玻璃板上, 并在 4 °C 下保持 8 h, 然后在室温下风干得到薄膜样品, 分别记为 EP1、EP3、EP5、EP7。

1.3.2 保鲜薄膜特性测定方法

1.3.2.1 傅里叶变换红外 (FTIR) 光谱

将样品采用真空冷冻干燥至恒质量, 然后研磨成粉, 采用溴化钾 (KBr) 压片, 然后使用红外光谱仪在 4 000~500 cm^{-1} 的波数范围内分析薄膜的结构特性。每个样品扫描 32 次^[11]。

1.3.2.2 拉伸强度和断裂伸长率

将膜样品裁成 2 cm×8 cm 条状, 置于室温的加湿器中 7 d。使用质构仪测定膜的拉伸强度 (TS) 和断裂伸长率 (EB)。测试参数: 夹具起始间距 30 mm; 拉伸速度 10 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。每组膜测定 3 个平行, 结果取其平均值。

1.3.2.3 水蒸气渗透率、溶胀率和水溶性

将膜样品裁剪为 2 cm×2 cm 的方形片段, 置于 120 °C 烘箱中干燥 4 h, 测量质量 (W_1)。随后,

将干燥后的薄膜浸入盛有 100 mL 去离子水的烧杯内, 静置 24 h。取出后用滤纸吸干表面残留水分, 测量质量 (W_2)。最后, 再次将样品在 120 °C 烘干至质量恒定, 记录最终质量 (W_3)^[12]。溶胀率 (SR, %) 和水溶性 (S, %) 的计算公式分别为:

$$\text{SR} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100\% \quad (1)$$

$$S = \frac{W_1 - W_3}{W_1} \times 100\% \quad (2)$$

准确称量 15 g 无水氯化钙 (CaCl_2) 并置于称量瓶中。在瓶口覆盖待测薄膜, 用石蜡密封后记录初始质量。将该装置放入装有去离子水的玻璃干燥器内, 在 25 °C 下放置。每隔 2 h 取出称量瓶进行质量测定, 共重复测量 6 次^[13]。复合膜的水蒸气透过率 (R_{WVP} , %) 的计算公式为:

$$R_{\text{WVP}} = \frac{V_{\text{WVP}} \times L}{\Delta P} \quad (3)$$

式中: V_{WVP} 为薄膜的水蒸气透过速率 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); L 为薄膜平均厚度 (m); ΔP 为穿过薄膜的水蒸气压差 (3.167 1 kPa)。

1.3.2.4 热稳定性

称取 10 mg 样品于氧化铝 (Al_2O_3) 坩埚中, 使用热重分析仪在恒定 N_2 流速 (60 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$) 下进行热重分析, 设置升温速率为 10 $^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$, 测试温度范围为 30~800 $^\circ\text{C}$ ^[14]。

1.3.2.5 色值

薄膜的表面亮度、红度和黄度色系由色度计测量。测量在标准白色背景上进行^[14]。总色差 (ΔE) 计算公式为:

$$\Delta E = \sqrt{(L - L^*)^2 + (a - a^*)^2 + (b - b^*)^2} \quad (4)$$

式中: L 、 a 和 b 是标准白色背景的颜色参数值; L^* 、 a^* 和 b^* 是不同薄膜的颜色参数值。

1.3.2.6 DPPH、ABTS 自由基清除试验

使用稳定自由基 2,2-二苯基-1-苦基肼 (DPPH) 测定薄膜的抗氧化性。首先, 将薄膜样品和 DPPH 溶液 (0.1 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) 以 2:1 的体积比混合均匀, 并在黑暗中反应 1 h。反应结束后, 用孔径为 0.45 μm 的过滤器过滤, 在 517 nm 处测量滤液的吸光度^[14]。DPPH 清除率计算公式如下:

$$R_{\text{DPPH}} = \left(1 - \frac{A_{\text{sample}} - A_{\text{film}}}{A_{\text{DPPH}}} \right) \times 100\% \quad (5)$$

式中: R_{DPPH} 为 DPPH 清除率 (%); A_{sample} 、 A_{film} 和

A_{DPPH} 分别为样品溶液、过滤薄膜溶液和 DPPH 溶液的吸光度。

取 2,2'-联氮-双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐 (ABTS) 溶于水中, 浓度达到 $7 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 加入 $2.45 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的过硫酸钾 ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$) 溶液, 避光反应 12~16 h, 用乙醇稀释至吸光度为 0.70 ± 0.02 (734 nm)。将薄膜样品和 ABTS 检测溶液混匀, 在无光环境中放置 30 min, 在 734 nm 波长下测量吸光度 A_1 [15]。空白对照组记为 A_0 。ABTS 自由基清除率 (η_{ABTS} , %) 的计算公式为:

$$\eta_{\text{ABTS}} = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\% \quad (6)$$

1.3.3 薄膜对卵形鲳鲹的保鲜效果

1.3.3.1 鱼的前处理

将鲜活卵形鲳鲹控晕后宰杀, 去除头、尾、内脏, 再用去离子水冲洗表面血渍与其他杂质, 沥干表面水分, 将鱼肉分别切成 $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ 小块, 鱼块随机分为 4 组, 分别进行以下处理。对照组 (A 组): 将鱼块用 PE 薄膜包裹; 实验组: 将鱼块分别用 EP0、EP5 和 EP7 薄膜包裹, 设为 B、C 和 D 组。将各组放于容器中, 置于 4°C 保存, 分别于贮藏 1、3、5、7 d 后取样进行以下指标分析。

1.3.3.2 保鲜指示效果

将 1.3.3.1 的样品在 4°C 下保存 7 d, 分别观察第 1、第 3、第 5、第 7 天样品的色泽变化并拍照。

1.3.3.3 总挥发性盐基氮 (TVB-N) 测定

参考吕金润等 [15] 的方法, 使用全自动凯氏定氮仪, 对 1.3.3.1 样品进行 TVB-N 质量分数测定。

1.3.3.4 硫代巴比妥酸反应物的测定 (TBARS) 测定

参考钟旭美等 [1] 的方法, 将 1.3.3.1 的样品进行 TBARS 测定。

1.3.3.5 羰基值测定

使用蛋白质羰基测定试剂盒测量蛋白质羰基

值。准确称量 1 g 鱼肉, 置于提取液中, 在冰浴条件下进行匀浆处理和离心 (4°C , $5000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 10 min)。按试剂盒说明书操作, 取上清液并测定其在 370 nm 处的吸光度 [16]。

1.3.3.6 总巯基值测定

总巯基测定试剂盒用于总巯基值测定。取鱼肉 0.5 g 放入提取液中, 按说明书进行匀浆处理和离心分离。收集上清液, 并依次加入反应物中, 最后测定在 412 nm 处的吸光度 [17]。

1.3.3.7 菌落总数测定

参照国标 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》测定样品菌落总数。

1.3.4 统计分析

使用 SPSS 软件对数据进行单因素方差分析 (ANOVA)。 $p < 0.05$ 表示结果具有统计学显著性。

2 结果

2.1 保鲜薄膜的特性分析

2.1.1 薄膜的颜色

图 1 显示, 当姜黄素和乳液添加量为 0 时 (EP0), 薄膜表面光滑透明。加入姜黄素后, 随着乳液添加量增加, 薄膜颜色加深, 透明度降低, 但表面仍保持均匀和致密。由表 1 可见, 随着乳液浓度增加, 复合膜的亮度 L^* 值从 96.44 降至 35.33, 红度 a^* 值从 -0.58 增至 -1.15 , 黄度 b^* 值从 0.53 增至 12.12, 复合膜的透光率逐渐降低。

2.1.2 薄膜的结构

通过傅里叶红外光谱 (FTIR) 分析了各种薄膜的结构 (图 2)。图中显示, 薄膜在 3400 、 3500 、 $1750 \sim 1400$ 、 $1000 \sim 800$ 、 3350 、 2300 、 850 、 1500 cm^{-1} 处出现了明显的吸收峰, 表明各组分之间发生了化学键的相互作用。此外, 蓝色柱图的特征峰进一步

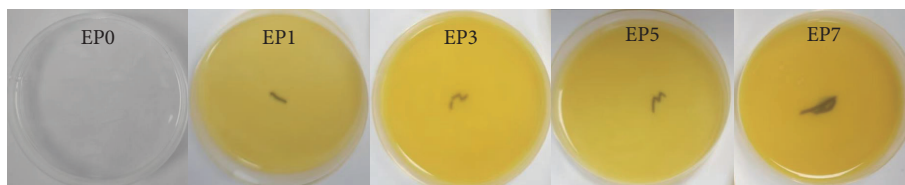


图1 不同浓度制备的薄膜

注: EP0. 对照组薄膜; EP1、EP3、EP5、EP7 指分别添加 1%、3%、5%、7% (φ) 的 CS-TiO₂ 复合颗粒紫苏精油乳液制成的薄膜。

Fig. 1 Thin films prepared with different concentrations

Note: EP0. Control group film (Without additives); EP1, EP3, EP5, EP7. Films prepared by incorporating 1%, 3%, 5%, and 7% (φ) of CS-TiO₂ composite particle-perilla essential oil emulsions, respectively.

表1 薄膜的色度和色差
Table 1 Color parameters and color difference of films

样品 Sample	亮度 Lightness L^*	红绿色度 Red-green chroma a^*	黄蓝色度 Yellow-blue chroma b^*	色差 Color difference ΔE^*
EP0	96.44±0.32 ^a	-0.58±0.03 ^a	0.53±0.12 ^e	61.68±0.49 ^a
EP1	55.10±0.55 ^b	-1.40±0.04 ^{bc}	6.80±0.21 ^d	41.67±0.57 ^d
EP3	50.58±0.24 ^c	-1.53±0.01 ^c	8.52±0.10 ^c	46.01±0.63 ^c
EP5	41.29±0.33 ^d	-0.70±0.07 ^a	10.30±0.06 ^b	55.20±0.22 ^b
EP7	35.33±0.61 ^e	-1.15±0.03 ^b	12.12±0.31 ^a	62.11±0.86 ^a

注：同列的不同字母表示存在显著性差异 ($p<0.05$)。
Note: Values with different letters within the same column are significantly different ($p<0.05$).

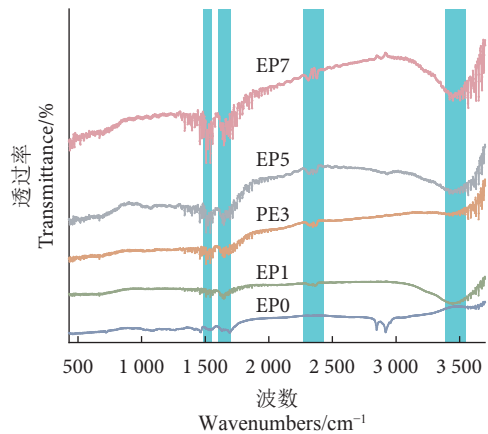


图2 薄膜的傅里叶红外光谱
Fig. 2 Fourier transform infrared spectra of films

揭示了不同组分之间的相互作用和键合作用。

2.1.3 薄膜的机械性能

薄膜的机械性能如图 3 所示。随着乳液添加量的增加，复合膜的拉伸强度从 21.13 显著提升到 38.34 MPa，同时断裂伸长率从 23.15% 略微增至 25.80%。表明乳液有效增强了薄膜的抗拉能力、改善了其柔韧性。

2.1.4 薄膜的阻湿性能

实验结果表明 (图 4)，随着乳液添加量的增加，薄膜的水蒸气透过率显著降低，从 EP0 的 4.65×10^{-13} 降至 EP5 的 3.24×10^{-13} $\text{g}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$ 。同时，薄膜的水溶性从 EP0 的 36.80% 降至 EP7 的 32.16%。此外，薄膜的溶胀率随着乳液添加量的增加而显著降低，从 EP0 的 346.65% 降至 EP5 的 146.14%。

2.1.5 薄膜的抗氧化性

实验结果表明 (图 5)，未添加姜黄素和乳液的 EP0 薄膜对 DPPH 和 ABTS 自由基的清除率仅分别为 11.17% 和 17.23%，而随着乳液添加量的增加，薄膜的抗氧化性能显著提升，其中 EP7 薄膜的

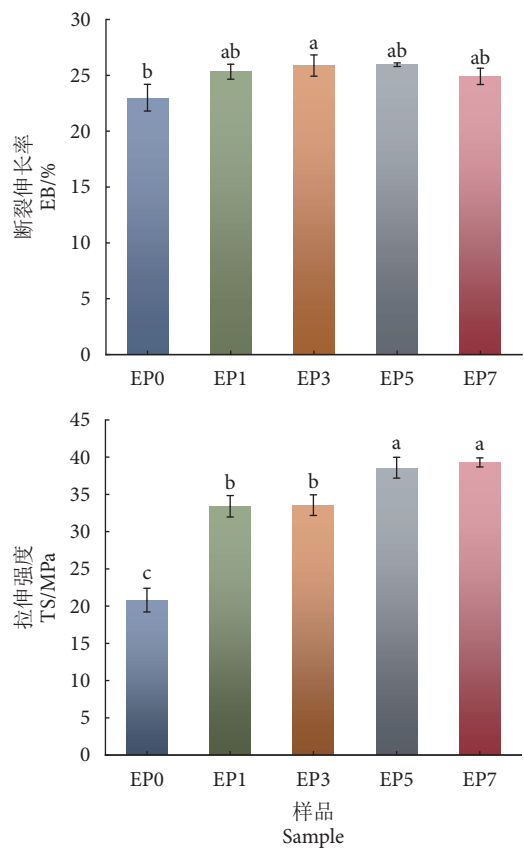


图3 薄膜的断裂伸长率和拉伸强度
注：不同的字母代表不同组薄膜间有显著差异 ($p<0.05$)。

Fig. 3 Elongation and tensile strength at break of films

Note: Different letters represent significant differences among groups of films ($p<0.05$).

DPPH 自由基清除率达到 44.97%，ABTS 自由基清除率高达 82.36%。

2.1.6 薄膜的热力学性能

复合薄膜的热量 (TG) 曲线和微商热量分析 (DTG) 曲线如图 6 所示。薄膜在 TG 和 DTG 曲线中显示出多个失重步骤，并且薄膜均具有相似的热分解曲线，反映了不同阶段的热分解行为。第 1 阶

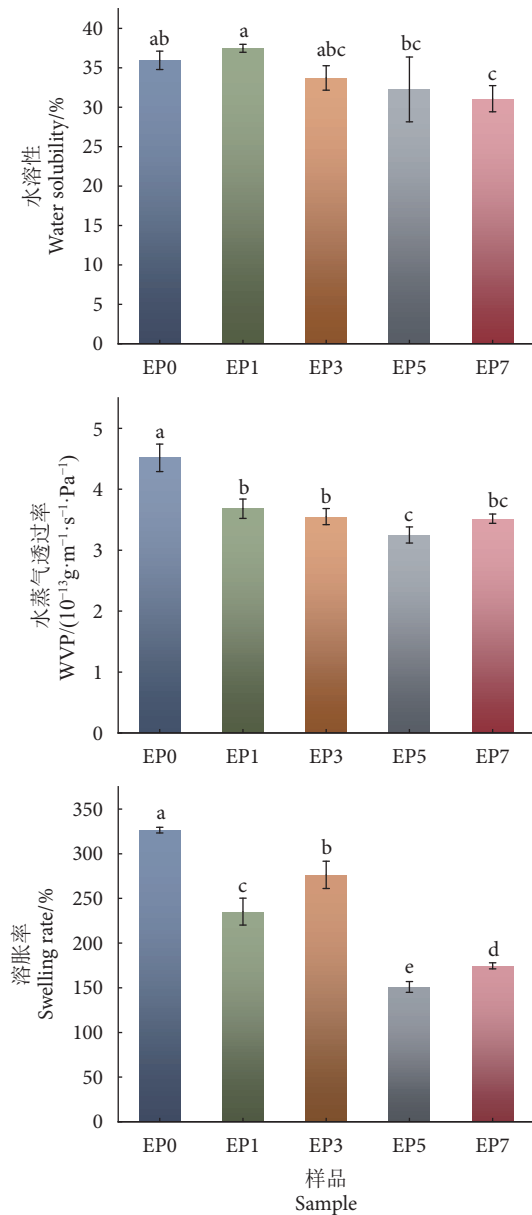


图4 薄膜的水溶性、水蒸气透过率和溶胀率

注: 不同的字母代表不同组薄膜间有显著性差异 ($p < 0.05$)。

Fig. 4 Water solubility, water vapor permeability and swelling ratio of films

Note: Different letters represent significant differences among groups of films ($p < 0.05$).

段的热分解行为发生在 204.5°C 之前, 第2阶段发生在 $204.5 \sim 346.7^\circ\text{C}$, 第3阶段发生在 346.7°C 之后。这表明薄膜各组在不同温度下发生了显著的热分解行为。

2.2 薄膜对卵形鲳鲹的保鲜效果

2.2.1 薄膜对卵形鲳鲹鲜度的影响

由图7可见, EP7薄膜对鱼片保鲜效果显著, 贮藏至第7天, 其TVB-N值 ($22.36 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) 分别比EP1、EP3、EP5组低70%、56%、47%, 产品依然符合GB 2733—2015《食品安全国家标准

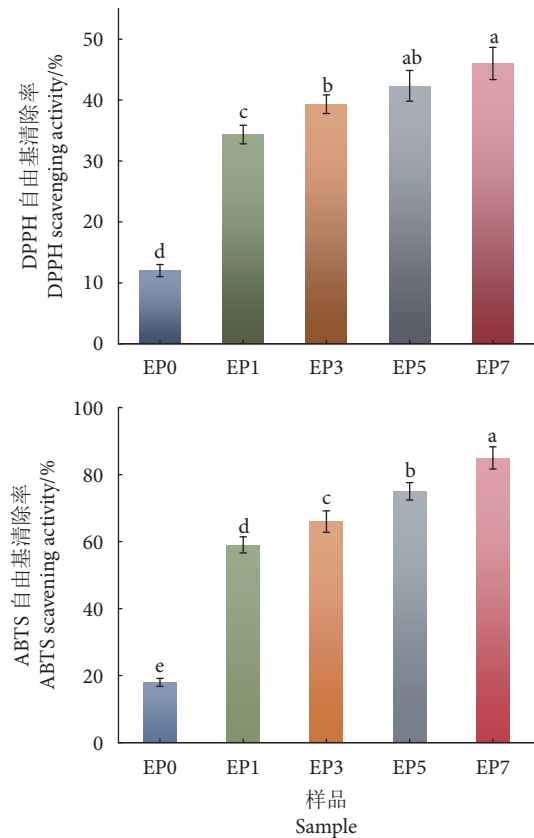


图5 薄膜的DPPH自由基和ABTS自由基清除率

注: 不同的字母代表不同组薄膜间有显著性差异 ($p < 0.05$)。

Fig. 5 DPPH radical scavenging activity, ABTS radical scavenging activity of films

Note: Different letters represent significant differences among groups of films ($p < 0.05$).

鲜、冻动物性水产品》的要求 ($\leq 30 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$)。

图7显示, 各组鱼肉的TBARS值均随贮藏时间的延长而上升, 但EP7组始终显著低于其他组。贮藏初期(第1—第3天)各组差异不显著; 第5—第7天, EP0组TBARS值急剧上升 ($0.84 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 而EP7组增幅缓慢 ($0.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 表明该膜能有效抑制脂质氧化的加速。第7天时, EP7组的TBARS值较EP1、EP3和EP5组分别降低24%、20%和7%, 且低于脂质酸败临界值 ($0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 证实其具有显著的保鲜优势。

2.2.2 薄膜对鱼肉蛋白质氧化的影响

如图8所示, 在贮藏期间, EP7薄膜表现出显著的抗氧化效果: 3~7 d内其包裹鱼肉的羰基值增长显著慢于EP0组, 表明能有效延缓蛋白质氧化; 同时, 各处理组总巯基值虽均呈下降趋势, 但EP7组的下降速率最缓, 其第7天的质量摩尔浓度 ($48.86 \mu\text{mol} \cdot \text{mg}^{-1}$) 较第3天仅下降10.15%, 显著优于EP0组 (31.67%) 和EP1组 (22%) 的降

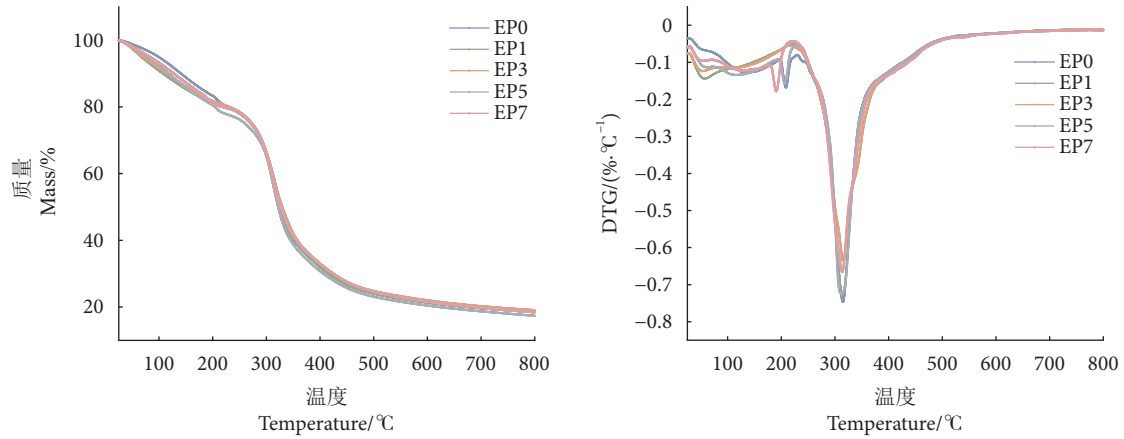


图6 薄膜的热力学性能 TG 曲线 和 DTG 曲线

Fig. 6 TG and DTG curves of thermodynamic properties of films

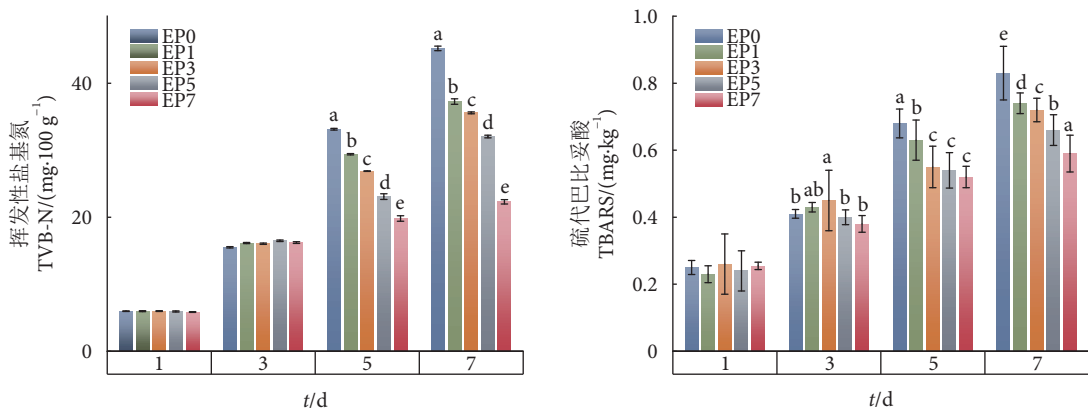


图7 薄膜对卵形鲳鲹鱼肉 TVB-N 和 TBARS 的影响

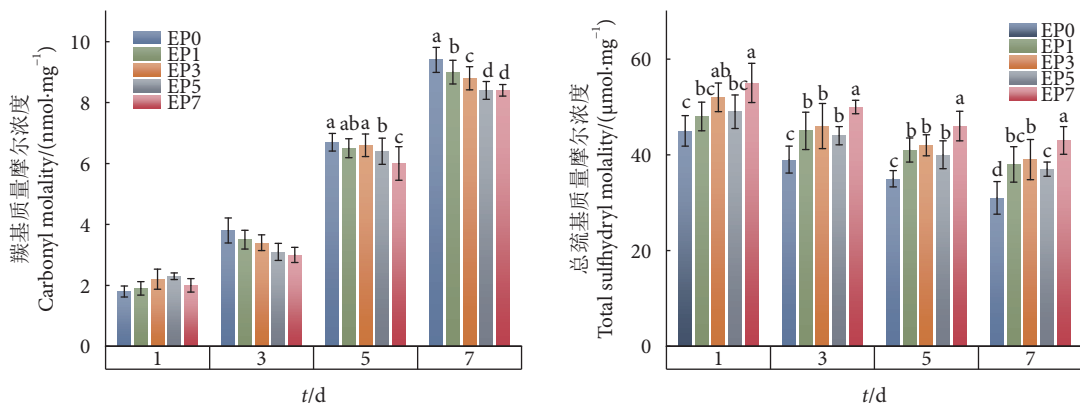
注：不同的字母代表不同组薄膜间有显著性差异 ($p < 0.05$)。Fig. 7 Effect of film on TVB-N and TBARS in *T. ovatus* meatNote: Different letters represent significant differences among groups of films ($p < 0.05$).

图8 薄膜对卵形鲳鲹鱼肉蛋白中羰基和总巯基含量的影响

注：不同的字母代表不同组薄膜间有显著性差异 ($p < 0.05$)。Fig. 8 Effect of film on carbonyl content and total sulfhydryl content in *T. ovatus* meat proteinsNote: Different letters represent significant differences among groups of films ($p < 0.05$).

幅, 进一步证明了 EP7 薄膜的抗氧化保护作用。

2.2.3 薄膜对鱼肉菌落总数的影响

由图 9 可见, 随着贮藏时间的延长, 各组鱼片

的菌落总数均呈上升趋势, 但 EP7 薄膜包裹的鱼片的菌落总数显著低于 EP0 和其他低乳液浓度的薄膜。在贮藏初期 (第 1—第 2 天), 各组鱼片的菌

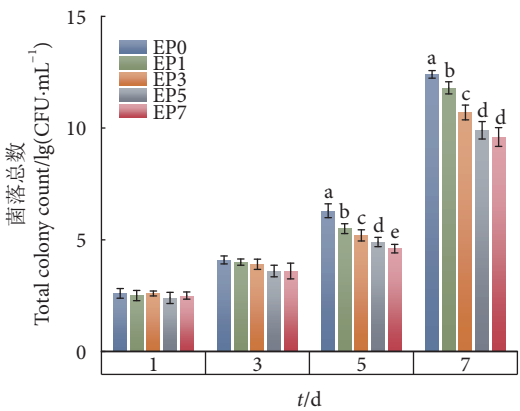


图9 薄膜对卵形鲳鲹鱼肉冷藏过程菌落总数的影响
注: 不同的字母代表不同组薄膜间有显著性差异 ($p<0.05$)。

Fig. 9 Effect of film on total viable count in *T. ovatus* meat during cold storage

Note: Different letters represent significant differences among groups of films ($p<0.05$).

落总数差异较小,随着实验的进行,EP7 薄膜的优势逐渐显现。在贮藏第 7 天,EP7 组的鱼片菌落总数较 EP0 和 EP1 组分别减少 42.2% 和 30.4%。

2.2.4 薄膜对卵形鲳鲹鱼肉鲜度的指示效果

由图 10 可见,乳液组的薄膜颜色均随贮藏时

间延长薄膜颜色由浅黄色逐渐变为红棕色,其中 EP7 组的变化最为显著。

3 讨论

3.1 复合薄膜的结构特性分析

由于姜黄素的羟基在碱性环境中可以完全电离,因此在浇铸过程中,电离的姜黄素分子重新获得质子,并通过氢键与乳液中的 CS-TiO₂ 复合颗粒的壳聚糖分子结合,形成均匀的姜黄素乳液基复合膜^[18]。在添加姜黄素和乳液后,薄膜的不透明度显著提高,这可能是因为姜黄素与乳液中的 CS-TiO₂ 基质发生相互作用,缩短了大分子链间的距离,阻碍了可见光的透过,从而提高了薄膜的不透明度^[10]。为进一步验证这种相互作用机制,对复合膜进行了 FTIR 表征。复合薄膜的 FTIR 光谱分析揭示了 CS、姜黄素和 TiO₂ 的特征峰及其相互作用机制。CS 在 3 400 cm⁻¹ 处显示出典型的 N-H 和 O-H 伸缩振动峰,而姜黄素的特征峰则出现在 3 500 cm⁻¹ (O-H)、1 750~1 400 cm⁻¹ (C=C 和 C=O)

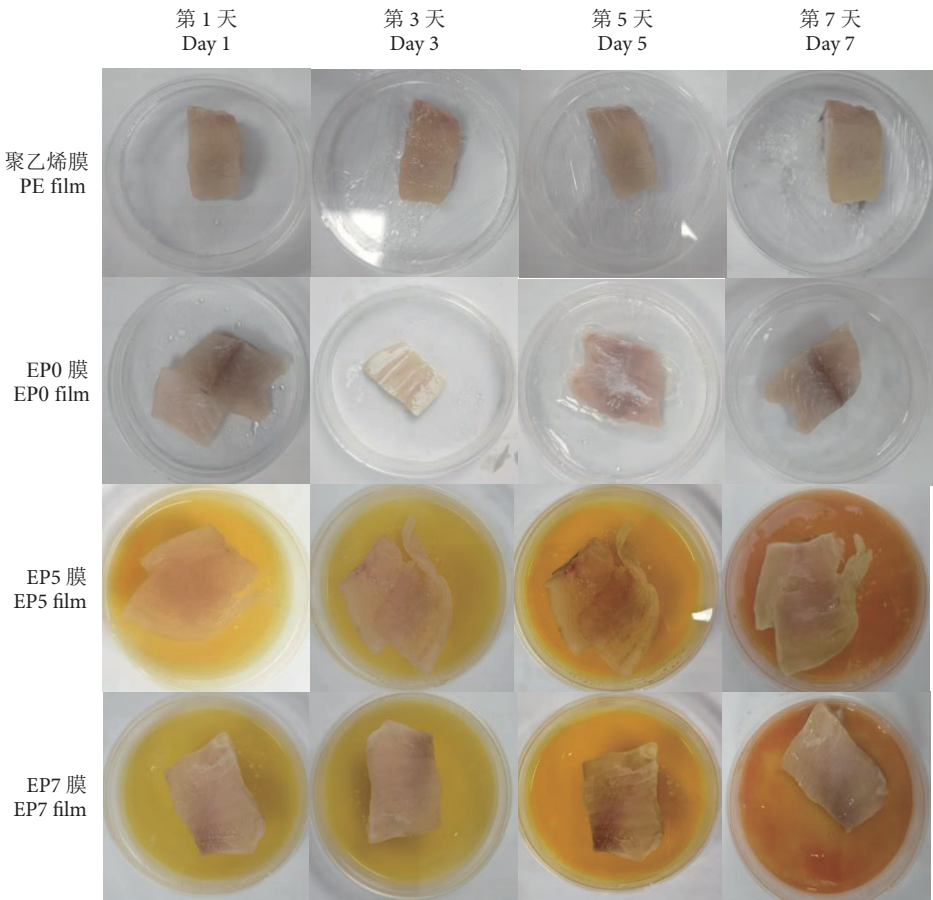


图10 薄膜对卵形鲳鲹鱼肉鲜度指示图

Fig. 10 Freshness indicator diagram of film on *T. ovatus* fish meat

以及 $1\ 000\sim 800\text{ cm}^{-1}$ (C—O—C), 表明其结构中的酚羟基、共轭双键和醚键成功保留。复合薄膜在 $3\ 350\text{ cm}^{-1}$ 处的宽峰表明 CS 和姜黄素可能通过氢键相互作用, 而 $2\ 300\text{ cm}^{-1}$ (C—H) 和 850 cm^{-1} (C—O—C) 的峰进一步证实了姜黄素的负载。 $1\ 500\text{ cm}^{-1}$ 处的特征峰则归属于 TiO_2 的 Ti—O—Ti 键, 证明了 TiO_2 纳米颗粒的存在, 其表面的 Ti—OH 可能与 CS 中的羟基形成配位键, 从而提高薄膜稳定性。综合来看, CS 与姜黄素通过氢键和疏水作用形成的复合结构可能有利于缓释作用, 而 TiO_2 的引入有望增强机械性能^[10]。

这种分子间的相互作用不仅影响薄膜的光学性质, 还对其力学性能产生显著影响。拉伸强度 (TS) 与断裂伸长率 (EB) 的提升主要源于乳液体系中 CS- TiO_2 复合颗粒与姜黄素分子间的多重相互作用。通过红外光谱分析, 可以证实姜黄素分子中的酚羟基与 CS- TiO_2 基质中的氨基、羟基之间形成了稳定的分子间氢键网络, 这种键合作用不仅提高了复合体系的分子间作用力, 还限制了聚合物链段的自由运动, 从而显著提升了薄膜的拉伸强度。研究表明, 姜黄素通过氢键及范德华力等物理作用有效强化了 CS- TiO_2 乳液基质的内部结构^[19]。TS 与 EB 的持续增长表明以下协同效应: 一方面, 复合乳液在成膜过程中呈均匀分散状态; 另一方面, 姜黄素与 CS- TiO_2 及薄膜基体间具有优异的界面相容性, 实现了应力的高效传递^[10]。此外, 良好的力学性能进一步证实该乳液薄膜具备显著的塑化效应, 其机制在于姜黄素可削弱聚合物链间作用力, 增强分子链运动能力, 最终赋予材料更高的延展性。

除力学性能外, 复合膜的阻隔性能对食品包装应用至关重要。水溶性和水蒸气透过率是衡量薄膜阻隔性能的重要指标。在食品包装中, 低水蒸气透过率可以有效防止水分流失或外界水分的侵入, 从而延长食品的保质期; 而水溶性是薄膜在水中溶解能力的体现, 对于包装材料而言, 较低的水溶性有助于薄膜在潮湿环境中的稳定性。薄膜水溶性和水蒸气透过率随乳液量的增加而降低, 这可能由于乳液浓度增加时, 乳液中 CS- TiO_2 复合颗粒与明胶交联反应不断加强, CS- TiO_2 复合颗粒基质与明胶之间的氢键相互作用减少了聚合物链间的空隙, 增强了壳聚糖和明胶基质的结构紧密性^[5]。并且交联反应使得水分子更难渗透和溶解薄膜, 限制了水分子

的扩散路径, 降低了水蒸气渗透性^[20]。其次, 姜黄素和 TiO_2 本身具有疏水性, 其引入增加了薄膜的整体疏水特性, 而疏水性的提升使得水分子更难渗透薄膜表面, 进一步降低了水蒸气透过率; 姜黄素的疏水性也减少了水分子与薄膜的相互作用, 进一步抑制了薄膜在水中的溶解^[21]。Zeng 等^[22] 的研究也表明, 姜黄素与壳聚糖基质之间的氢键相互作用可能增强薄膜的结构稳定性, 形成更为致密的网络, 阻碍水分子在薄膜内部的迁移。薄膜溶胀率随乳液量的增加而降低, 这一现象可以归因于以下因素: 溶胀率与聚合物中电离基团的数量密切相关。 TiO_2 在与薄膜基质交联过程中可能发生离子化反应 ($\text{TiOH}^{2+} \leftrightarrow \text{TiOH} \leftrightarrow \text{TiO}^-$), 导致带正电荷的电离基团 (TiOH^{2+}) 相互排斥, 抑制了薄膜的溶胀作用^[23]。CS- TiO_2 复合颗粒与姜黄素、明胶的交联反应减少了聚合物链间的自由度, 限制了薄膜在吸水后的膨胀空间, 降低了溶胀率。氢键和交联反应共同作用下, 薄膜形成了更为致密的网络空间结构, 减少了水分子在薄膜内部的滞留, 抑制了溶胀现象^[24]。上述结果表明, CS- TiO_2 乳液的添加显著改善了薄膜的水蒸气透过率、水溶性和溶胀率, 使其在包装材料领域具有潜在的应用价值。

3.2 复合薄膜的功能特性分析

氧化反应是导致食品营养价值下降和品质劣化的主要因素之一, 尤其是在脂肪、维生素和色素等成分中。薄膜的自由基清除率随乳液量的增加而增大, 这主要源于紫苏精油富含多种具有强效抗氧化能力的天然化合物, 如多酚、黄酮类和挥发性酚类物质。随着乳液的添加, 薄膜中引入的抗氧化分子能够通过提供氢原子或电子, 直接有效地淬灭 (中和) DPPH 自由基和 ABTS 自由基, 从而显著提升薄膜的清除率^[19,25]。其次 CS- TiO_2 复合颗粒稳定作用对精油的释放至关重要。这是因为精油本身是疏水的 (油相), 需要被乳化分散在水相中。CS- TiO_2 复合物能吸附在油/水界面, 形成一层物理屏障 (Pickering 乳液稳定机制), 大幅提高了紫苏精油乳液的稳定性^[26]。确保了精油均匀分散在薄膜中, 减少精油中易氧化或挥发性活性成分 (抗氧化分子) 在乳化、成膜或储存过程中的损失或降解。Wang 等^[10] 研究也表明 CS- TiO_2 复合颗粒稳定的紫苏精油乳液可在油滴上形成不可逆的界面多层三维弹性网络凝胶结构, 乳化液中分离良好的油滴呈现密集

分布, 这种状态能够延长紫苏精油向水/空气界面的迁移距离, 增加紫苏精油分子与界面层之间的分子间相互作用, 从而维持紫苏精油的长期缓慢释放。此外, 姜黄素是一种天然酚类化合物, 其分子结构中含有多个酚羟基和 β -二酮基团, 这些活性基团通过提供氢原子 (H^+) 或单电子中和自由基, 终止自由基链反应, 表现出显著抗氧化活性^[27]。具体而言, 姜黄素酚羟基能够与 DPPH 自由基发生反应, 生成稳定化合物。因此, 这种高抗氧化活性的改性复合薄膜可用于包装易氧化的食品, 减轻氧化降解并延长保质期。

最终, 薄膜的热稳定性进一步验证了其结构稳定性。薄膜的热分解分为 3 个阶段。第 1 阶段发生在 25.0~204.5 $^{\circ}C$: 此阶段的质量损失主要归因于薄膜中物理吸附水的释放以及包埋乳液中精油的挥发。这一现象的热稳定性对薄膜在食品包装等领域的应用至关重要, 需确保其在常温或低温储存时性能不受水分或挥发性成分流失的影响^[11]。第 2 阶段发生在 204.5~346.7 $^{\circ}C$: 该阶段的显著质量损失源于结合水及其他低分子量化合物的分解。结合水的释放, 表明水分子通过氢键等相互作用与聚合物基质 (如壳聚糖) 结合, 其热分解行为直接反映薄膜的分子间作用力强弱, 进而揭示结构稳定性。第 3 阶段发生在 346.7 $^{\circ}C$ 以后: 此阶段涉及高分子聚合物的复杂降解过程, 包括壳聚糖主链断裂、乙酰基团分解以及 CS-TiO₂ 复合颗粒的热分解。后者可能受表面修饰及与壳聚糖相互作用的影响。该阶段分解温度显著提高, 证实壳聚糖与 CS-TiO₂ 复合颗粒形成了稳定的复合材料结构^[11]。

3.3 保鲜应用效果

脂质氧化是导致鱼类食品品质下降的主要原因之一, 尤其是在富含不饱和脂肪酸的鱼类中。脂质氧化不仅会导致食品产生不良气味 (如哈喇味) 和风味劣化, 还可能生成对健康有害的化合物 (如醛类和酮类)。TVB-N 和 TBRRS 值的变化是评估鱼片新鲜度的关键指标。本实验结果表明, 在实验初期 (第 1—第 3 天), 不同组别的薄膜对 TVB-N 值的影响差异较小, 这可能是因为鱼片的新鲜度较高, 微生物活动尚未显著增强。而随着实验的进行, EP7 薄膜的优势逐渐显现, 特别是在实验后期 (第 5—第 7 天), 其 TVB-N 和 TBRRS 上升趋势明显减

缓。这一优异表现可归因于 EP7 薄膜中紫苏精油和壳聚糖的协同作用机制: 首先, 紫苏精油中的活性成分可螯合 Zn^{2+} 等金属离子, 抑制微生物蛋白酶的活性, 从而减少蛋白质的降解 (TVB-N 增长的关键因素); 其次, 壳聚糖凭借其正电性氨基与细菌细胞膜的负电荷相互作用, 破坏其膜结构完整性, 进而干扰细菌生理代谢 (导致 TBRRS 积累的主要原因)^[28]。两种成分共同构建了“酶活性抑制-细菌膜破坏”双路径协同效应。此外, 紫苏精油可能在初期主导保鲜作用 (如挥发性抗菌作用), 而壳聚糖则在中后期通过长期物理阻隔性和持续抗菌活性进一步抑制腐败进程^[29]。马玉英等^[30]研究也表明壳聚糖致膜通透性上升后, 紫苏精油活性成分 (如百里香酚) 更易侵入胞内靶点, 从源头抑制蛋白酶分泌。较高浓度的乳液提供更多的 CS-TiO₂ 复合颗粒物理位点 (如介孔结构) 包埋精油, 延长活性成分释放周期, 保障后期有效浓度。此外, Zhou 等^[31]研究也证明姜黄素可以通过破坏微生物细胞膜、抑制酶活性或干扰 DNA 复制等方式发挥抑菌作用; 而且 EP7 薄膜的阻隔性能 (如低水蒸气透过率和致密的结构) 也进一步抑制了外界微生物的侵入和鱼片内部水分的流失, 延缓了鱼片的腐败过程。与其他单一成分保鲜膜相比, EP7 薄膜的协同增效作用使其在长周期保鲜中更具优势。

蛋白质氧化是食品贮藏过程中品质劣变的重要表现之一, 不仅会降低食品营养价值, 还会影响其质地、风味和功能特性。其中, 羰基含量和总巯基值是评价蛋白质氧化程度的直接指标。本实验结果表明, 与对照组相比, EP7 薄膜包裹的鱼肉在贮藏过程中羰基含量的增幅显著降低。具体而言, EP0 组鱼肉的羰基含量在第 3—第 7 天迅速上升, 而 EP7 组增长较慢, 表明 EP7 薄膜能有效抑制蛋白质氧化的加速阶段。此外, 随着贮藏时间的延长, EP7 薄膜的抗氧化性能逐渐增强。这种效果可能归因于 EP7 薄膜中的紫苏精油和壳聚糖具有较强的抗氧化活性, 尤其是紫苏精油能够清除脂质氧化产生的羟基自由基和过氧自由基^[32]。同时, 该膜的致密结构和低水蒸气透过率减少了氧气和水分的渗透, 延缓了氧化进程^[33]。相比之下, EP0 薄膜虽具一定阻隔性, 但由于缺乏活性抗氧化成分, 抑制蛋白质氧化的效果较差。综上所述, 高浓度乳液基 EP7 薄膜能够有效延缓鱼肉蛋白质氧化, 延长货架期。

3.4 微生物抑制与智能指示

鱼片中的菌落总数是评估其新鲜度和保鲜效果的关键指标之一。EP7 薄膜能够较好抑制微生物的生长,延缓鱼片的腐败进程。这一结果与薄膜对精油的缓释性能和抗菌性能密切相关。紫苏精油的酚羟基能够与微生物细胞膜上的磷脂双分子层发生相互作用,导致细胞膜结构破坏,进而引起细胞内容物泄漏和微生物死亡^[34];此外紫苏精油能够抑制微生物体内关键酶的活性^[35]。

姜黄素是一种 pH 敏感型化合物,其颜色变化与其分子结构在不同 pH 下的变化相关,在酸性或中性环境中,姜黄素呈黄色,而在碱性环境中,其分子结构发生异构化,导致颜色转变为红棕色^[36]。在鱼片保鲜过程中,TVB-N、TBARS 等值的增加表明蛋白质被微生物分解生成氨和胺类物质,这些物质导致薄膜内部的 pH 升高,从而触发了姜黄素的颜色变化^[37]。薄膜的颜色变化与 TVB-N 值的动态变化高度一致,表明薄膜不仅具有保鲜功能,还可通过颜色变化直观地指示鱼片的腐败程度,为消费者和生产者提供了一种实时监测食品安全性的便捷方法。与普通 PE 薄膜和不含姜黄素的 EP0 薄膜相比,EP7 薄膜的颜色变化特性使其在食品包装中具有独特的优势。

4 结论

本研究成功构建了一种基于明胶、姜黄素及 CS-TiO₂ 复合颗粒紫苏精油乳液的智能保鲜薄膜(EP7),其机械性能、阻湿性、抗氧化性和热力学性能均显著优于其他实验组。在 4℃ 贮藏卵形鲳鲹的实验中,EP7 薄膜表现出卓越的保鲜效果:相较于 EP0 组,第 7 天时 TVB-N 值、TBARS 值、羰基含量和菌落总数分别降低了 56%、31%、13% 和 42%,同时总巯基值提升了 52%。在鲜度指示方面,薄膜的颜色由浅黄色变为红棕色,可直观指示鱼肉腐败程度。结果表明,该智能保鲜薄膜兼具抗氧化、抑菌和鲜度指示功能,其制备工艺简单,能有效延缓鱼肉氧化变质和微生物生长,显著延长货架期,为水产品保鲜提供了新的技术方案和理论基础。

参考文献:

- [1] 王迪,陈胜军,于刚,等.不同养殖规格卵形鲳鲹品质差异性研究[J].南方水产科学,2024,20(2):172-180.
- [2] 农业农村部渔业渔政管理局,全国水产技术推广总站,中国水产学会.2024 中国渔业统计年鉴[M].北京:中国农业出版社,2024:159.
- [3] 刘蒙佳,周强,蔡利,等.丁香精油抑菌保鲜衬垫协同气调包装对金鲳鱼品质影响[J].上海交通大学学报(农业科学版),2019,37(6):164-170,81.
- [4] HUO J J, WANG L S, SU S, et al. Development and characterization of soy protein isolate-based emulsion films with green sichuan pepper essential oil: functional and structural insights[J]. *Food Res Int*, 2025, 211: 116365.
- [5] 杜鹏莹,任国艳,赵冰,等.负载白藜芦醇乳液的壳聚糖-明胶缓释膜制备及其调理牛排保鲜效果[J].食品科学,2025,46(10):240-248.
- [6] CHENG Y Y, CAI X M, ZHANG X, et al. Applications in Pickering emulsions of enhancing preservation properties: current trends and future prospects in active food packaging coatings and films[J]. *Trends Food Sci Tech*, 2024, 151: 104643.
- [7] DING F Y, LONG S W, HUANG X W, et al. Emerging Pickering emulsion films for bio-based food packaging applications[J]. *Food Packag Shelf*, 2024, 42: 101242.
- [8] CAO J, ZHAO H Y, PENG Z Y, et al. The effects of non-covalent interaction between rice glutelin and gum arabic on digestibility and stability of perilla oil emulsion[J]. *Food Chem*, 2025, 479: 143726.
- [9] 唐森,李孟玲,陈显玲,等.紫苏精油壳聚糖复合膜的制备及其对鲜切雪莲果的保鲜效果研究[J].粮食与油脂,2023,36(9):61-65,83.
- [10] WANG H H, WATERHOUSE G I N, XIANG H, et al. Mechanisms of slow-release antibacterial properties in chitosan-titanium dioxide stabilized perilla essential oil Pickering emulsions: focusing on oil-water interfacial behaviors[J]. *Carbohydr Polym*, 2024, 346: 122613.
- [11] 王牌,杨少玲,戚勃,等.基于共混和层层自组方法协同交联剂对琼胶/海藻酸钠复合膜性能的影响[J].食品与发酵工业,2024,50(1):89-97.
- [12] 王牌,杨少玲,戚勃,等.不同交联剂对琼胶/海藻酸钠复合膜性能的影响[J].南方水产科学,2023,19(2):142-149.
- [13] 沈永康,朱峰,冯雪锋,等.壳聚糖基保鲜膜/涂层的制备及应用[J].包装工程,2025,46(1):79-88.
- [14] 李招玉,李向平,杨少玲,等.氧化 κ-卡拉胶/聚丙烯酰胺水凝胶的制备与表征[J].食品与发酵工业,2024,50(20):153-160.
- [15] 吕金润,戚勃,杨贤庆,等.坛紫菜多糖对冻藏凡纳滨对虾品质维持的研究[J].食品与发酵工业,2025,51(8):125-32.
- [16] 尹国友,杨卓凡,孙婕,等.酶交联法制备肉桂精油-明胶-壳聚糖可食用膜及其保鲜效果研究[J].食品与发酵工业,2025,50(6):1-12.
- [17] 董华,刘泽,刘晓强.孜然精油微乳液-壳聚糖复合涂膜对冷鲜牛肉的保鲜作用[J].食品科技,2025,50(3):121-129.
- [18] XING Z H, CHEN H T, YAN Y Z, et al. Emulsions and oleogels stabilized by egg white protein-tannic acid-xanthan gum conju-

- gate: preparation, characterization and potential application in curcumin[J]. *Int J of Biol Macromol*, 2025, 312: 144211.
- [19] ZHAO C G, AI C, WANG R B, et al. The preservation effect of curcumin-containing emulsion on the freshness of crisp grass carp during refrigerated storage[J]. *Food Biosci*, 2025, 68: 106688.
- [20] 邓兴群, 尤娟, 刘茹, 等. 负载肉桂醛-单宁酸纳米乳液的壳聚糖涂层的制备及其对冷鲜肉保鲜效果[J]. *食品工业科技*, 2025, 46(3): 350-360.
- [21] REN J H, FAN Y T, CHEN R X, et al. A novel starch-based film integrated with Nisin-A and curcumin nanoemulsion for real-time monitoring of salmon freshness[J]. *Food Chem*, 2025, 489: 145041.
- [22] ZENG J, REN X N, LI X P, et al. Development of pH-responsive active intelligent chitosan film incorporated with pomegranate cellulose nanocrystals and curcumin nanoparticles[J]. *Int J of Biol Macromol*, 2025, 309: 142051.
- [23] 洪逸斌, 李文祥, 王红梅, 等. 基于壳聚糖/聚乙烯醇/二氧化钛修饰的硝酸纤维素复合膜研究[J]. *应用化工*, 2023, 52(2): 366-371.
- [24] 余文海, 吴雄, 董浩, 等. 壳聚糖涂膜在水产食品中的保鲜机理与应用进展[J]. *轻工科技*, 2025, 41(3): 1-4.
- [25] ZHAO S L, LI K, HUANG H C, et al. Regulation of polysaccharide-protein complex interfacial structures by gum Arabic to improve emulsions performance for curcumin delivery and application [J]. *Carbohydr Polym*, 2025: 123782.
- [26] 李卓渊, 赵红梅, 马晓丽, 等. 基于壳聚糖/蓝莓花青素/二氧化钛肉制品新鲜度指示膜的制备及性能表征[J]. *包装工程*, 2025, 46(5): 92-100.
- [27] 卢晓雪, 王兵丽, 赖文强, 等. 漆酶催化制备姜黄素-果胶共聚物及其抗氧化和抑菌活性研究[J]. *食品与发酵工业*, 2025, 47(5): 11-18.
- [28] ZHAO Q L, WANG L F, HONG X, et al. Structural and functional properties of perilla protein isolate extracted from oilseed residues and its utilization in Pickering emulsions[J]. *Food Hydrocolloid*, 2021, 113: 106412.
- [29] SHI B S, CHEN G, TU M L, et al. Ultrasound-assisted enzymatic construction of sodium caseinate-polyphenol-polysaccharide emulsion delivery system: Innovative strategy to improve curcumin retention and stability[J]. *Food Chem*, 2025, 487: 144778.
- [30] MA Y Y, CAO Y J, ZHANG L, et al. Preservation of chilled beef using active films based on bacterial cellulose and polyvinyl alcohol with the incorporation of perilla essential oil Pickering emulsion[J]. *Int J Biol Macromol*, 2024, 271: 132118.
- [31] ZHOU S Y, LI J C, LIN D H, et al. Development of konjac glucomannan-based active-intelligent emulsion films loaded with different curcumin-metal chelates: stability, antioxidant, fresh-keeping and freshness detection properties[J]. *Int J Biol Macromol*, 2024, 282: 137231.
- [32] YANG Z, CHEN Q F, WEI L T. Active and smart biomass film with curcumin Pickering emulsion stabilized by chitosan-adsorbed laurate esterified starch for meat freshness monitoring[J]. *Int J Biol Macromol*, 2024, 275: 133331.
- [33] TANG T T, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. 3D printed curcumin-based composite film for monitoring fish freshness[J]. *Food Packaging Shelf*, 2024, 43: 101289.
- [34] WANG Z T, TANG W X, SUN Z L, et al. An innovative Pickering W/O/W nanoemulsion co-encapsulating hydrophilic lysozyme and hydrophobic Perilla leaf oil for extending shelf life of fish products[J]. *Food Chem*, 2024, 439: 138074.
- [35] HUANG M X, YU J, GUO M, et al. Recent advances in the preservation effects of spice essential oils on fruits and vegetables[J]. *Food Chem*, 2025, 464: 141827.
- [36] GAO J L, TAN X Y, DAI H J, et al. Properties regulation and mechanism on ferritin/chitoooligosaccharide dual-compartmental emulsions and its application for co-encapsulation of curcumin and quercetin bioactive compounds[J]. *Food Chem*, 2024, 458: 140243.
- [37] LIU Y Y, MA M J, YUAN Y K. The potential of curcumin-based co-delivery systems for applications in the food industry: food preservation, freshness monitoring, and functional food[J]. *Food Res Int*, 2023, 171: 113070.