

DOI: 10.12161/j.issn.1005-6521.2024.10.016

明胶与葡聚糖复合膜的制备及其对冷藏扇贝品质的影响

樊凤娇, 廖海露, 岳陈林瑞, 陈彦初, 陈银基, 谢宏凯*

(南京财经大学食品科学与工程学院, 江苏省现代粮食流通与安全协同创新中心, 江苏南京 210023)

摘要: 为抑制脂质氧化和微生物繁殖, 延长扇贝货架期, 以肉桂醛和 α -生育酚为抗菌和抗氧化剂, 制备抗菌、抗氧化明胶-葡聚糖复合膜。扫描电镜证实明胶和葡聚糖兼容性较好, 添加活性物质导致复合膜产生粗糙、不均匀和多孔的微观结构。X射线衍射和红外光谱显示活性物质增强复合膜的结晶度和疏水性。随着活性物质添加量增加, 复合膜的厚度、不透明度、抗氧化能力和抗菌能力显著增加, 而水蒸气透过性、拉伸强度和断裂伸长率显著降低。相比于未包装和空白复合膜, 1.5% 活性复合膜显著提升冷藏扇贝柱的化学和微生物稳定性, 延长其货架期 6 d。因此, 添加双功能活性成分的明胶-葡聚糖复合膜可以作为一种有效包装材料, 用于水产品冷藏品质的控制。

关键词: 明胶; 葡聚糖; 肉桂醛; α -生育酚; 双功能活性成分; 复合膜; 扇贝保鲜

Preparation of Gelatin-Dextran Composite Film and Its Effect on the Quality of Scallops During Cold Storage

FAN Fengjiao, LIAO Hailu, YUE Chenlinrui, CHEN Yanchu, CHEN Yinji, XIE Hongkai*

(College of Food Science and Engineering, Collaborative Innovation Center for Modern Grain Circulation and Safety, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210023, Jiangsu, China)

Abstract: An antibacterial and antioxidant gelatin-dextran composite film was prepared using cinnamaldehyde and α -tocopherol as antibacterial and antioxidant agents to inhibit lipid oxidation and microbial production and prolong the shelf life of scallops. Scanning electron microscopy confirmed that gelatin and dextran were well compatible, and the addition of active fillers resulted in rough, uneven, and porous microstructures. X-ray diffraction and Fourier transform infrared spectroscopy showed that the active fillers enhanced the crystallinity and hydrophobicity of the composite films. The thickness, opacity, and antioxidant and antibacterial capacity of the composite films increased with the increase of active filler concentration, while the water vapor permeability, tensile strength, and elongation at break decreased. The films containing 1.5% of active fillers improved the chemical and microbial stability of refrigerated scallop adductor muscles and extended their shelf life by 6 d compared with the unpackaged and control composite films. Therefore, gelatin-dextran composite film with dual-functional active fillers could be used as an effective packaging material to control the quality of aquatic food products during cold storage.

Key words: gelatin; dextran; cinnamaldehyde; α -tocopherol; dual-functional active fillers; composite film; scallop preservation

引文格式:

樊凤娇, 廖海露, 岳陈林瑞, 等. 明胶与葡聚糖复合膜的制备及其对冷藏扇贝品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(10): 117-126.

FAN Fengjiao, LIAO Hailu, YUE Chenlinrui, et al. Preparation of Gelatin-Dextran Composite Film and Its Effect on the Quality of Scallops During Cold Storage[J]. Food Research and Development, 2024, 45(10): 117-126.

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(32202133、32202032); 江苏省高等学校自然科学研究面上项目(22KJB550007、22KJB550006); 南京市留学人员科技创新项目; 江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 樊凤娇(1990—), 女(汉), 讲师, 博士, 研究方向: 食品营养与品质控制、蛋白质基活性包装膜的构建。

*通信作者: 谢宏凯(1991—), 男(汉), 讲师, 博士, 研究方向: 水产品加工及贮藏保鲜、可降解活性包装膜的构建。

扇贝是我国四大养殖贝类之一,年产量179万^[1]。扇贝富含n-3长链多不饱和脂肪酸,特别是二十碳五烯酸(eicosapentaenoic acid, EPA)和二十二碳六烯酸(docosahexaenoic acid, DHA),因此扇贝具有较高的营养价值^[2-3]。然而,高不饱和脂肪酸极易发生氧化,引发酸败,降低扇贝营养品质^[4]。此外,高水分含量和中性pH值等特性导致扇贝极易发生微生物腐败,造成食物浪费^[5]。实际上,脂质氧化和微生物繁殖是水产品冷藏品质劣化的重要原因。因此,开发基于活性包装的水产品保鲜技术已成为当前研究热点。

由于塑料包装带来的“白色污染”问题,基于蛋白质、多糖和脂质等生物聚合物开发可降解活性包装已成为发展趋势^[6]。明胶是胶原蛋白的部分水解产物,具有良好的生物可降解性、安全性、兼容性和成膜性,已被广泛用于成膜基材^[7]。然而,明胶复合膜较差的机械和水蒸气阻隔性能限制了其作为包装材料的应用^[8]。明胶复合膜中添加多糖是一种提升其性能的技术手段^[9]。葡聚糖是一种由乳酸菌产生的胞外多糖,具有兼容性好、安全性高和生物可降解性等优点,以葡聚糖为基材制备的复合膜展现出良好的水蒸气阻隔性能^[10]。因此,在明胶中加入葡聚糖有望提高复合膜的理化性能。

精油是活性包装中常用的活性物质,具有优异的抗菌和抗氧化功能^[11]。精油具有复杂的化学组成,植物产地、提取方法和提取部位等均能影响精油活性成分的种类和含量,进而影响复合膜的抗菌和抗氧化功能。因此,复合膜中添加高纯度抗菌或抗氧化剂可以确保复合膜发挥稳定的抗菌和抗氧化作用^[12]。肉桂醛是肉桂精油中的主要活性物质, α -生育酚是维生素E中最具生物活性的形式。两种活性物质均被广泛用于制备活性复合膜,且展现出良好的抗菌和抗氧化性能^[13-15]。然而,同时添加两者制备双功能活性成分复合膜的研究鲜见。

因此,本研究以明胶和葡聚糖共混为成膜基材、以肉桂醛和 α -生育酚为抗菌和抗氧化活性物质制备复合膜,采用红外光谱、X射线衍射和扫描电镜对其进行表征。研究不同活性物质添加量对复合膜理化、抗菌和抗氧化性能的影响,分析复合膜对冷藏过程中扇贝的pH值、硫代巴比妥酸值(thiobarbituric acid reactive substances, TBARS)值、挥发性盐基氮(total volatile base nitrogen, TVB-N)、K值、EPA含量、DHA含量和菌落总数等指标的影响,为开发新型、安全的水产品保鲜包装提供参考。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

虾夷扇贝:市售;大肠杆菌、鼠伤寒沙门氏菌、金黄色葡萄球菌、铜绿假单胞菌、腐败希瓦氏菌:上海保藏生物技术中心;三磷酸腺苷(adenosine-5'-triphosphate,

ATP)(96%)、二磷酸腺苷(adenosine-5'-diphosphate, ADP)(95%)、单磷酸腺苷(adenosine-5'-monophosphate, AMP)(98%)、肌苷酸(inosinic acid, IMP)(98%)、次黄嘌呤核苷(inosine, HxR)(98%)、次黄嘌呤(hypoxanthine, Hx)(98%)、明胶(来源于鱼)、肉桂醛(95%)、吐温20:上海源叶生物科技有限公司;1,1-二苯基-2-苦基肼(2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl, DPPH)(98%)、2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐[2,2-azinobis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), ABTS](98%)、 α -生育酚(96%)、葡聚糖(70 000 Da)、37种脂肪酸甲酯(fatty acid methyl esters, FAMES)混标:上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

1.2 仪器与设备

质构仪(TA.XT plus):英国Stable Micro Systems公司;傅里叶变换红外光谱仪(Nicolet IS5):美国赛默飞世尔公司;X射线衍射仪(Smartlab SE):日本理学株式会社;扫描电镜(EVO-10):德国蔡司公司;扫描电镜(JSM IT800):日本电子株式会社;凯氏定氮仪(K1100):海能未来技术集团股份有限公司;液相色谱仪(1260)、气相色谱仪(Agilent 6890B):美国Agilent公司;紫外分光光度计(U-3900):日本日立公司;pH计(FiveEasy Plus):梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司。

1.3 方法

1.3.1 复合膜的制备

25 mL去离子水中分别加入2.0 g明胶和2.0 g葡聚糖,混合液在80℃下磁力搅拌20 min,得到空白复合膜溶液。将0.5%、1.0%和1.5%活性物质(香茅醛和 α -生育酚)分别加入空白复合膜溶液,同时分别加入活性物质质量四分之一的吐温20作为乳化剂,混合液继续在80℃下磁力搅拌5 min,以制备0.5%、1.0%和1.5%活性复合膜溶液。超声处理5 min后,取各复合膜溶液16 mL倒入13 cm×13 cm的方形培养皿中,45℃下干制4 h,以制备0%(空白)、0.5%、1.0%和1.5%4种复合膜。4种复合膜置于湿度(50±5)%、温度(25±1)℃环境中48 h备用。

1.3.2 复合膜理化性能的测定

1.3.2.1 厚度

采用精度为0.001 mm的数字千分尺随机测量复合膜6个不同位置的厚度,平均值即为复合膜厚度。

1.3.2.2 水蒸气透过性

依据GB/T 1037—2021《塑料薄膜与薄片水蒸气透过性能测定 杯式增重与减重法》测定复合膜水蒸气透过性。含无水氯化钙的称量瓶(40 mm×25 mm)用复合膜封口后置于38℃、90%相对湿度环境下,间隔固定时间称重。按式(1)计算复合膜水蒸气透过性[W, g/(m·s·Pa)]。

$$W = \frac{\Delta w \times d}{A \times \Delta t \times \Delta p} \quad (1)$$

式中: Δw 为称量瓶增加质量,g; d 为复合膜厚度,m; A 为复合膜有效面积, m^2 ; Δt 为测试时间,s; Δp 为复合膜两侧压差,6 619.34 Pa。

1.3.2.3 不透明度

依据 Ben Azaza 等^[16]的方法测定复合膜的不透明度。采用紫外分光光度计测量复合膜长条(10 mm×30 mm)在 600 nm 处吸光度。复合膜的不透明度为吸光度与复合膜厚度(mm)比值。

1.3.2.4 机械性能

依据 Zhang 等^[15]的方法利用质构仪测定复合膜的拉伸强度(tensile strength, TS)和断裂伸长率(elongation at break, EAB)。复合膜尺寸为 15 mm×60 mm,质构仪夹距和拉伸速率分别为 40 mm 和 1 mm/s。

1.3.3 复合膜的表征

复合膜研磨成粉(液氮条件下),200 目过筛,取约 5 mg 样品粉末与 100 mg 溴化钾混合研磨、压片,采用傅里叶变换红外光谱仪对复合膜进行红外光谱测定,步宽为 4 cm^{-1} ,波数范围为 $4\ 000\sim 500\text{ cm}^{-1}$;采用 X 射线衍射仪在 25 mA 和 40 kV 条件下获得复合膜的 X 射线衍射图谱, 2θ 为 $5^\circ\sim 90^\circ$,扫描速度为 $5^\circ/\text{min}$;复合膜(1 cm×1 cm)喷金处理后采用扫描电镜测定复合膜表面及横截面(液氮脆断)的微观形貌。

1.3.4 抗氧化能力的测定

依据 Li 等^[7]的方法通过 DPPH 和 ABTS⁺自由基清除率测定复合膜的抗氧化能力。

复合膜提取液的制备:0.1 g 复合膜溶于 5 mL 50% 乙醇溶液,8 000×g 离心 5 min 后获得上清液。

DPPH 法测定抗氧化能力:0.5 mL 复合膜提取液或 0.5 mL 50% 乙醇溶液(空白)与 1 mL DPPH 乙醇溶液(0.2 mmol/L)混合,25 °C 下避光孵育 0.5 h,测量 517 nm 处吸光度。

ABTS 法测定抗氧化能力:2.6 mmol/L 过硫酸钾与 7.4 mmol/L ABTS(1:1,体积比)混合,避光放置 12 h 制成 ABTS⁺自由基溶液。将 ABTS⁺自由基溶液稀释至 732 nm 处吸光度 1.1 左右。取 0.5 mL 复合膜提取液或 0.5 mL 的 50% 乙醇溶液(空白)与 10 mL ABTS⁺自由基溶液混合,25 °C 避光孵育 0.5 h,测量 732 nm 吸光度。

DPPH 和 ABTS⁺自由基清除率(R ,%)按式(2)计算。

$$R = \frac{A_{50\%乙醇溶液} - A_{复合膜样品}}{A_{50\%乙醇溶液}} \times 100 \quad (2)$$

式中: $A_{50\%乙醇溶液}$ 和 $A_{复合膜样品}$ 分别为空白和各复合膜样品的吸光度。

1.3.5 抗菌能力的测定

依据 Ahmad 等^[17]的方法通过纸片扩散法测定复合膜对大肠杆菌、鼠伤寒沙门氏菌、金黄色葡萄球菌、铜绿假单胞菌和腐败希瓦氏菌的抑制效果。分别将 0.1 mL 上述微生物培养液接种在平板计数琼脂上,将

复合膜圆片(6 mm)放置在培养皿中,37 °C 培养 24 h 后测量圆片周围的抑菌圈直径(mm)。

1.3.6 复合膜对扇贝贝柱冷藏品质的影响

将扇贝贝柱从壳中完整取出,贝柱的平均质量为(15.2±1.1) g。将贝柱随机分为 3 组,每组含 30 个贝柱,未包装组不进行包裹处理,空白复合膜组采用空白复合膜进行包裹处理,1.5% 活性复合膜组采用 1.5% 活性复合膜进行包裹处理。将各组贮藏在 4 °C,于第 0、3、6、9、12 天收集样品并进行指标检测。每组随机抽取 6 个贝柱,进行 3 次平行试验(每组 2 个贝柱)。贮藏第 0 天的样品为未包装组、空白复合膜组和 1.5% 活性复合膜组 3 组样品混合形成。

1.3.6.1 pH 值的测定

将 2.0 g 绞碎的样品与 20 mL 去离子水混合,均质,室温下静置 30 min,4 000×g 离心 5 min,取上清液用 pH 计进行测定。

1.3.6.2 TBARS 值的测定

根据 Dong 等^[18]的方法测定样品的 TBARS 值。将 2.0 g 绞碎的样品加入 20 mL 7.5% 三氯乙酸溶液(含 0.1% 乙二胺四乙酸)中,均质,4 000×g 离心 5 min,取 1 mL 上清液与 1 mL 的 2-硫代巴比妥酸(20 mmol/L)和 1 mL 的 7.5% 三氯乙酸混匀,沸水浴反应 0.5 h,冷却后测量 532 nm 处吸光度。TBARS 值根据以 1,1,3,3-四甲基氧基丙烷制作的标准曲线($y = 0.5533x + 0.0674$, $R^2 = 0.9999$)计算获得。

1.3.6.3 TVB-N 的测定

根据 GB 5009.228—2016《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》,采用凯氏定氮仪对样品的 TVB-N 进行测定,样品用量为 5.0 g。

1.3.6.4 K 值的测定

根据 Dong 等^[19]的方法采用液相色谱测定样品的 K 值。将 2.0 g 绞碎的样品加入 30 mL 10% 高氯酸中,均质,4 000×g 离心 5 min 获得上清液。上清液用 10 mol/L NaOH 和 1 mol/L NaOH 调节至 pH6.0~6.4,然后定容至 50 mL。提取液经 0.22 μm 滤膜过滤后进行检测。检测条件为 Agilent Polaris C18 色谱柱(4.6 mm×250 mm,5 μm);进样量:10 μL;流速:0.8 mL/min;检测温度:30 °C;检测波长:254 nm。流动相为磷酸缓冲液(A相,0.04 mol/L KH_2PO_4 和 0.06 mol/L K_2HPO_4)和甲醇(B相)。洗脱梯度:100% A,0~2 min;100%~85% A,2~12 min;85%~100% A,12~13 min;100% A,13~23 min。同时建立 ATP、ADP、AMP、IMP、HxR 和 Hx 的标准曲线,并依据式(3)计算 K 值(K ,%)。

$$K = \frac{e+f}{a+b+c+d+e+f} \times 100 \quad (3)$$

式中: a 为 ATP 含量,μmol/g; b 为 ADP 含量,

$\mu\text{mol/g}$; c 为 AMP 含量, $\mu\text{mol/g}$; d 为 IMP 含量, $\mu\text{mol/g}$; e 为 HxR 含量, $\mu\text{mol/g}$; f 为 Hx 含量, $\mu\text{mol/g}$ 。

1.3.6.5 EPA 和 DHA 含量测定

采用内标法对样品中 EPA 和 DHA 含量进行测定^[20]。样品总脂质的氯仿-甲醇溶液提取和甲基化与前期研究中描述的方法相同。甲酯化后的 FAMES 通过气相色谱仪进行检测。检测条件如下。DB-Fast-FAME 色谱柱 (30 m×0.25 mm, 0.25 μm) ; 进样量: 10 μL ; 分流比: 5:1; 流速: 1 mL/min; 载气: N_2 ; 进样器温度: 250 $^{\circ}\text{C}$; 检测器温度: 260 $^{\circ}\text{C}$ 。柱温箱初始温度为 80 $^{\circ}\text{C}$, 保持 0.5 min; 40 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温至 165 $^{\circ}\text{C}$, 保持 1 min; 4 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温至 230 $^{\circ}\text{C}$, 保持 4 min。采用 37 种 FAMES 混标对样品中的 EPA 和 DHA 进行定性分析。EPA 和 DHA 的含量 (C , g/100 g) 按照式 (4) 进行计算。

$$C = I \times \frac{A}{A_{\text{C}_{11:0}}} \times \frac{S \times 1.0067}{m} \times 100 \times F \quad (4)$$

式中: I 为响应因子; A 为 EPA 或 DHA 甲酯的峰面积; $A_{\text{C}_{11:0}}$ 为十一碳酸甲酯峰面积; S 为内标质量, mg; m 为样品质量, g; 1.0067 为十一碳酸三甘油酯转换为十一碳酸甲酯系数; F 为脂肪酸甲酯转换为脂肪

酸的转换系数, EPA 为 0.9557, DHA 为 0.9590。

1.3.6.6 菌落总数的测定

根据 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》对样品的菌落总数进行测定。无菌均质袋中加入 5.0 g 绞碎样品和 45 mL 无菌 0.85% NaCl 溶液, 以 8 次/s 速度均质拍打 90 s, 获得提取液。提取液用无菌 0.85% NaCl 溶液连续稀释 10 倍, 随后将 1 mL 稀释液接种到平板计数琼脂中, 30 $^{\circ}\text{C}$ 孵育 72 h 后计算菌落总数 [$\lg(\text{CFU/g})$]。

1.4 数据处理

样品均平行测定 3 次 (厚度测试除外), 结果以平均值±标准差表示。采用 Origin 2016 和 SPSS 22.0 软件进行绘图和显著性分析。通过 Duncan 多重比较确定差异显著性 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 复合膜的厚度、水蒸气透过性、不透明度和机械性能分析

活性物质添加量对复合膜厚度、水蒸气透过性、不透明度、TS 和 EAB 的影响见表 1。

表 1 活性物质添加量对复合膜厚度、水蒸气透过性、不透明度、TS 和 EAB 的影响

Table 1 Effect of different concentrations of active fillers on the thickness, water vapor permeability, opacity, tensile strength, and elongation at break of the composite films

添加量/%	厚度/mm	水蒸气透过性/[$\times 10^{-11}$ g/(m·s·Pa)]	不透明度/ mm^{-1}	TS/MPa	EAB/%
0	0.118±0.003 ^d	7.41±0.14 ^a	1.06±0.04 ^d	11.40±0.47 ^a	63.36±3.18 ^a
0.5	0.153±0.002 ^c	6.61±0.11 ^b	2.38±0.09 ^c	7.97±0.65 ^b	47.25±3.33 ^b
1.0	0.207±0.005 ^b	5.68±0.10 ^c	2.82±0.07 ^b	6.33±0.36 ^c	35.05±4.16 ^c
1.5	0.274±0.012 ^a	4.53±0.16 ^d	3.30±0.05 ^a	4.74±0.19 ^d	27.07±2.39 ^d

注: 同列不同字母表示样本间存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

由表 1 可知, 添加活性物质后, 复合膜的厚度由 (0.118±0.003) mm 显著增加至 (0.274±0.012) mm ($P < 0.05$)。Tügen 等^[21]研究表明, 添加精油会导致明胶-壳聚糖复合膜的厚度增加。复合膜厚度的增加主要是因为活性物质 (肉桂醛和 α -生育酚) 减弱了蛋白与多糖分子间的相互作用, 导致复合膜原本紧密的网络结构变得蓬松。此外, 添加活性物质使复合膜的基质物质含量升高, 同样会导致复合膜厚度增加。

水蒸气透过性可以反映复合膜的水蒸气阻隔性能。水蒸气透过性较高的复合膜难以抑制食品和包装环境之间的水分转移, 不利于食品保藏^[7, 22]。由表 1 可知, 复合膜的水蒸气透过性随着活性物质添加量升高而显著降低 ($P < 0.05$)。由于疏水特性, 肉桂醛和 α -生育酚在复合膜基质中以脂滴形式存在, 这使得水蒸气通过复合膜扩散的曲折系数升高, 降低了水蒸气的扩散速度^[7, 22]。Li 等^[7]和 Walid 等^[23]同样发现明胶-壳聚糖复合膜的水蒸气透过性随着橘子皮精油和迷迭香精油添加浓度的增加而降低。

不透明度是复合膜的重要参数, 影响着食品的外观和食品中光敏成分的稳定性。由表 1 可知, 添加活性物质后, 复合膜的不透明度显著增加 ($P < 0.05$), 含 1.5% 活性物质复合膜的不透明度比空白复合膜增加了 2.11 倍。较高的不透明度可以保护食品中的不饱和脂肪酸和其它光敏活性成分, 保持食品的营养品质^[24]。疏水性肉桂醛和 α -生育酚以脂滴形式存在于复合膜基质中, 脂滴引起光散射, 导致复合膜的不透明度升高^[25]。前期研究同样发现明胶-壳聚糖复合膜的不透明度随着精油浓度增加而升高^[21]。

空白复合膜的 TS 为 (11.40±0.47) MPa, 与 Hosseini 等^[8]制备的空白明胶-壳聚糖复合膜的 TS 相似 [(10.57±0.19) MPa], 但高于 Kavooosi 等^[26]制备的明胶复合膜 [(4.40±0.26) MPa]。添加肉桂醛和 α -生育酚显著降低了复合膜的 TS ($P < 0.05$)。活性物质的加入减弱了明胶与葡聚糖间的相互作用, 产生不连续网络结构, 导致分布在复合膜各基质单元上的力不同, 进而降低了 TS^[7]。与空白复合膜相比, 活性复合膜的 EAB 降低了

16.11%~36.29%。含 1.5% 活性物质的复合膜的 EAB [(27.07±2.39)%], 高于 Karami 等^[27]制备的含 3% 西洋蓍草精油明胶-海藻酸钠复合膜[(19.37±1.77)%]。以脂滴形式存在的活性物质形成的潜在破裂点可能是复合膜 EAB 降低的原因^[28]。Wu 等^[29]研究结果同样表明添加肉桂精油可以显著降低明胶复合膜的 EAB。

2.2 复合膜的表征

2.2.1 红外光谱分析

采用红外光谱分析活性物质和复合膜基质材料之间的相互作用,图 1 为复合膜的红外光谱图。

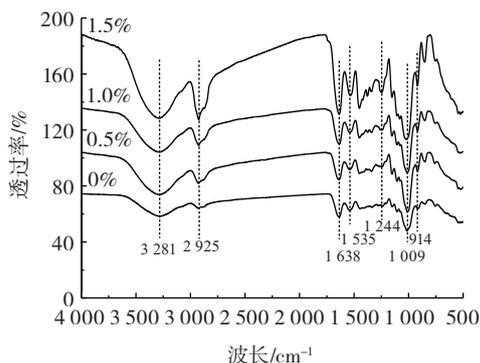


图 1 复合膜的红外光谱图

Fig.1 Fourier transform infrared spectra of the composite films

由图 1 可知,4 种复合膜均在 3 281(酰胺 A, N—H 拉伸振动)、2 925(C—H 拉伸振动)、1 638(酰胺-I, C=O 拉伸振动)、1 535 cm⁻¹(酰胺-II, N—H 弯曲振动)和 1 244 cm⁻¹(酰胺-III, C—N 和 N—H 拉伸振动)处存在特征峰^[30-33],出现在 1 009 cm⁻¹和 914 cm⁻¹处的特征峰则对应葡聚糖分子中醚键^[34]。3 种活性复合膜的红外光谱图与空白复合膜相似,未出现新的特征峰,上述特征峰也未发生明显位移。此结果表明活性物质肉桂醛和 α-生育酚并未与复合膜基质材料明胶和葡聚糖形成新的相互作用力。Wu 等^[9]研究同样

发现负载牛至精油的明胶-壳聚糖复合膜的红外光谱图中并未出现新的特征峰,但 2 928 cm⁻¹和 2 864 cm⁻¹(对应甲基及亚甲基中 C—H 的对称及非对称伸缩振动)处的峰强度显著增强。上述特征峰通常出现在疏水性和脂类物质中^[35]。因此,随着活性物质添加量增加,2 925 cm⁻¹处峰强度的增加表明活性物质肉桂醛和 α-生育酚增强了复合膜的疏水性。

2.2.2 X 射线衍射分析

采用 X 射线衍射评价活性物质对复合膜结晶性的影响,结果如图 2 所示。

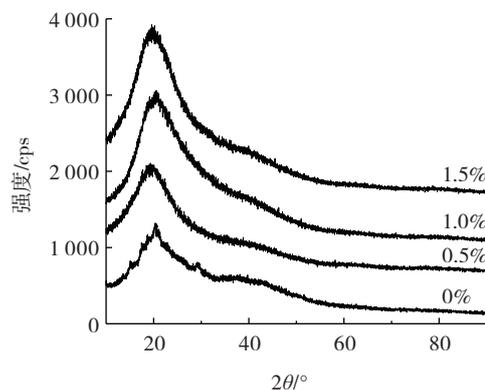


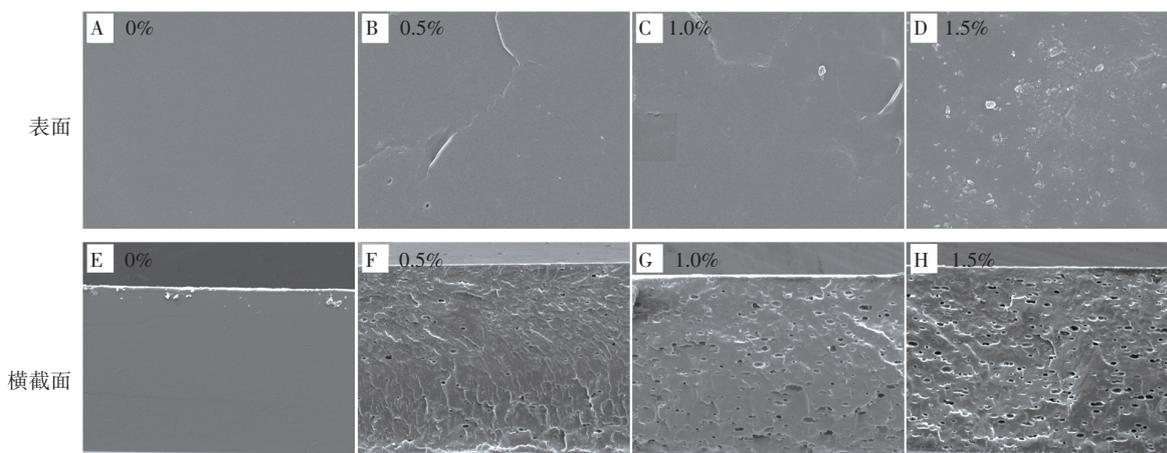
图 2 复合膜的 X 射线衍射图

Fig.2 X-ray diffraction spectrum of the composite films

由图 2 可知,空白复合膜和 3 种活性复合膜均有相似的 X 射线衍射谱图,在 21.6°处有一个较宽的衍射峰,表明其半晶结构。活性物质加入后,复合膜中衍射峰的位置并没有明显变化,但强度增大,说明活性物质的加入增强了复合膜的结晶度。Hosseini 等^[8]研究同样表明,添加牛至精油可以增强明胶-壳聚糖复合膜的结晶度。

2.2.3 微观形貌

通过扫描电镜获得复合膜的表面及横截面的微观形貌,结果见图 3。



A~D 为表面 10 000×;E~H 为横截面 500×。

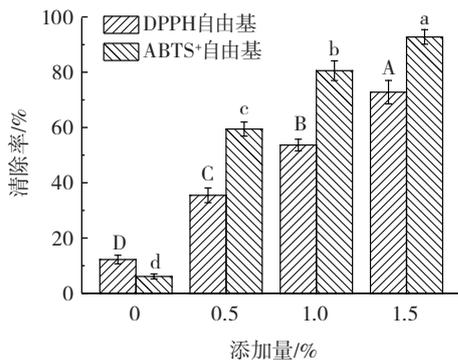
图 3 复合膜表面和横截面扫描电镜图

Fig.3 Scanning electron microscopy of surface and cross section of the composite films

由图 3A 和图 3E 可知,空白复合膜具有光滑、致密和均匀的表面及横截面,说明明胶和葡聚糖形成了有序的网络结构,这主要由于两者均为亲水性物质,具有较好的兼容性。相比之下,3 种活性复合膜的表面呈现粗糙、折叠和非均匀形貌(图 3B~D),横截面呈现多孔和不连续的结构(图 3F~H),且此微观形貌随活性物质添加量增加而逐渐增强。此结果说明原有的有序明胶-葡聚糖网络结构被活性物质破坏,且活性物质添加量越大,对有序网络结构破坏作用越强^[9]。活性复合膜多孔横截面的形成则是由添加的肉桂醛为挥发性物质,其在复合膜制备过程中的挥发所致。此种海绵状微观结构也存在于负载阿魏精油的明胶-壳聚糖复合膜中^[36]。

2.3 复合膜的抗氧化性能分析

采用 DPPH 和 ABTS⁺自由基清除法对复合膜的抗氧化性能进行评价。复合膜的 DPPH 和 ABTS⁺自由基清除率见图 4。



同一指标不同字母表示存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

图 4 复合膜的 DPPH 和 ABTS⁺ 自由基清除率

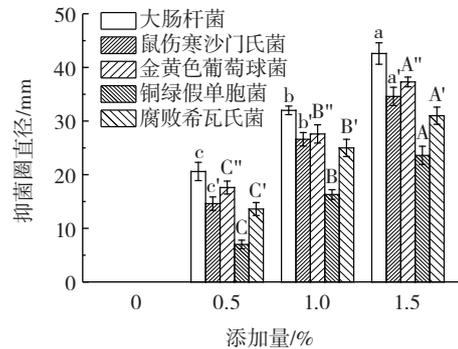
Fig.4 Scavenging activity of the composite films against DPPH and ABTS⁺ free radicals

由图 4 可知,空白复合膜的 DPPH 和 ABTS⁺ 自由基清除率较低,分别为 $(12.22 \pm 1.55)\%$ 和 $(6.11 \pm 0.88)\%$,说明空白复合膜具有较弱的抗氧化活性。明胶中的多肽或氨基酸能够提供电子与 DPPH 和 ABTS⁺ 自由基配对,同时葡聚糖也是氢原子供体,可以淬灭自由基,所以以明胶和葡聚糖为基材制备的空白复合膜展现出一定的抗氧化活性^[34,37]。Tongnuanchan 等^[35] 同样发现空白明胶膜有一定的 DPPH 和 ABTS⁺ 自由基清除能力。添加肉桂醛和 α -生育酚后,复合膜的抗氧化能力显著提高 ($P < 0.05$),且添加量与复合膜的抗氧化能力成正比,这源于 α -生育酚的优异抗氧化性能。Zhang 等^[38] 研究发现,添加 α -生育酚的可降解复合膜展现出良好的抗氧化活性。

2.4 复合膜的抑菌性能分析

大肠杆菌、鼠伤寒沙门氏菌、金黄色葡萄球菌和铜绿假单胞菌是常见的食源性致病菌,腐败希瓦氏菌是

水产品冷藏过程中的特定腐败菌。复合膜对上述致病或腐败菌的抑制效果如图 5 所示。



同种细菌不同字母表示存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

图 5 复合膜对大肠杆菌、鼠伤寒沙门氏菌、金黄色葡萄球菌、铜绿假单胞菌和腐败希瓦氏菌的抑菌圈直径

Fig.5 Inhibition zone diameter against *Escherichia coli*, *Salmonella typhimurium*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, and *Shewanella putrefaciens* of the composite films

由图 5 可知,空白复合膜对上述 5 种细菌的抑菌圈直径均为 0 mm,表明其无抑菌作用。3 种活性复合膜对上述 5 种细菌均有显著的抑制效果,且抑菌活性随活性物质添加量增加而逐渐增强。含 1.5% 活性物质的复合膜对大肠杆菌、鼠伤寒沙门氏菌、金黄色葡萄球菌、铜绿假单胞菌和腐败希瓦氏菌的抑菌圈直径分别为 (42.6 ± 2.0) 、 (34.6 ± 1.7) 、 (37.3 ± 0.9) 、 (23.6 ± 1.7) mm 和 (31.0 ± 1.6) mm。复合膜优异的抗菌性能来源于其释放的肉桂醛,肉桂醛可以破坏细菌细胞膜的完整性,使胞内物质外泄、细菌死亡^[39]。Haghighi 等^[13] 和 Hosseini 等^[14] 研究发现,肉桂醛能够显著增强蛋白质-多糖复合膜的抗菌性能。

2.5 复合膜对扇贝贝柱冷藏品质的影响

2.5.1 pH 值

扇贝贝柱冷藏过程中 pH 值的变化如图 6 所示。

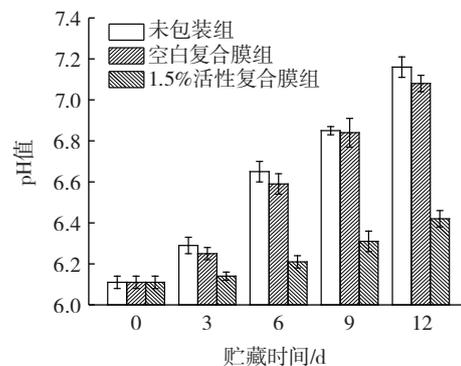


图 6 冷藏过程中扇贝贝柱 pH 值的变化

Fig.6 Changes in pH of scallop adductor muscle during cold storage

由图 6 可知,未包装组、空白复合膜组和 1.5% 活性复合膜组的 pH 值均随贮藏时间的延长而逐渐升

高。扇贝贝柱中蛋白质、非蛋白含氮物质的分解以及微生物活动引发的三甲胺和氨等碱性物质的产生和累积是 pH 值升高的原因^[16]。贮藏第 3 天后,相比于其它两组扇贝贝柱,1.5% 活性复合膜组的样品具有最低的 pH 值,这是由于 1.5% 活性复合膜释放的肉桂醛抑制了微生物的生长。上述结果表明 1.5% 活性复合膜可以有效延缓冷藏扇贝贝柱 pH 值的上升。

2.5.2 TBARS 值

脂质氧化会引发酸败,加速水产品品质劣化,TBARS 值是评价脂质氧化的常用指标。冷藏过程中扇贝贝柱 TBARS 值的变化见图 7。

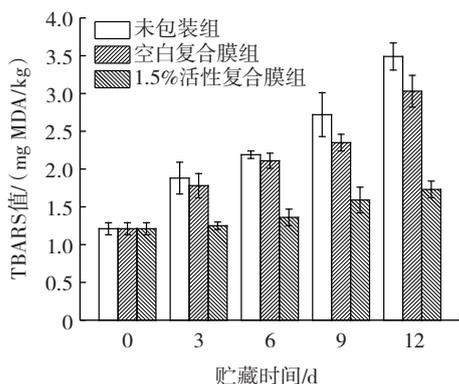


图 7 冷藏过程中扇贝贝柱 TBARS 值的变化

Fig.7 Changes in thiobarbituric acid reactive substances of scallop adductor muscle during cold storage

由图 7 可知,扇贝贝柱的初始 TBARS 值为(1.21±0.08) mg MDA/kg,随着贮藏时间的延长,未包装组、空白复合膜组和 1.5% 活性复合膜组的 TBARS 值均上升,表明脂质氧化的发生。相比于未包装组和空白复合膜组,1.5% 活性复合膜组的 TBARS 值呈现更弱的上升趋势,这说明 1.5% 活性复合膜降低了扇贝贝柱中脂质的氧化程度。这一结果与复合膜中添加的抗氧化剂 α -生育酚有关。 α -生育酚可以淬灭脂质氧化过程中产生的烷基自由基和过氧自由基等自由基,阻断脂质自氧化进程,降低脂质氧化程度^[40]。

2.5.3 TVB-N

TVB-N 是氨及胺类等碱性含氮物质的总和,是水产品品质的重要指标。冷藏过程中扇贝贝柱 TVB-N 的变化见图 8。

由图 8 可知,4 °C 贮藏 12 d 后,扇贝贝柱的 TVB-N 从(11.08±0.87) mg/100 g 逐渐升高至(37.50±1.66) mg/100 g (未包装组)、(34.24±1.02) mg/100 g (空白复合膜组)和(20.94±1.18) mg/100 g (1.5% 活性复合膜组)。Wu 等^[41] 研究报道新鲜扇贝的 TVB-N 为(10.38±0.20) mg/100 g,与本研究结果相近。TVB-N 的升高主要是由扇贝贝柱内源酶和微生物活动产生的外源酶的共同作用导致。通常,新鲜水产品 TVB-N 低于 20 mg/100 g,高于

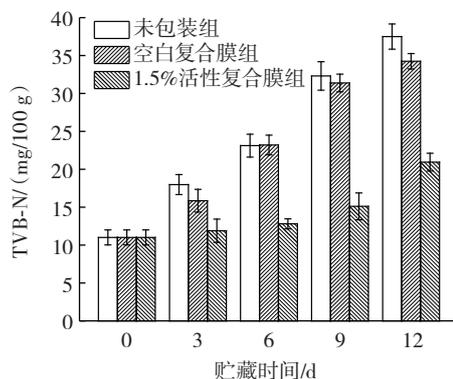


图 8 冷藏过程中扇贝贝柱 TVB-N 的变化

Fig.8 Changes in total volatile basic nitrogen of scallop adductor muscle during cold storage

30 mg/100 g 则意味着水产品变质^[42]。结果显示,未包装组扇贝贝柱的 TVB-N 在第 9 天高于 30 mg/100 g,而 1.5% 活性复合膜组样品在 9 d 的贮藏周期内一直低于 20 mg/100 g,在 12 d 的贮藏周期内一直低于 30 mg/100 g。因此,1.5% 活性复合膜可以有效保持冷藏扇贝贝柱的新鲜度。

2.5.4 K 值

K 值是由 ATP 及其相关产物的含量计算获得的水产品常用鲜度指标^[11]。冷藏过程中扇贝贝柱 K 值的变化见图 9。

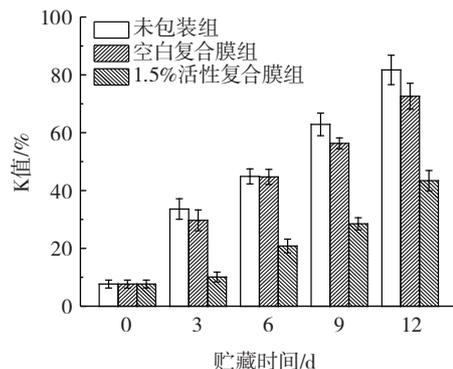


图 9 冷藏过程中扇贝贝柱 K 值的变化

Fig.9 Changes in K value of scallop adductor muscle during cold storage

由图 9 可知,贮藏第 0 天,扇贝贝柱的 K 值为(7.65±1.38)%,与 Yu 等^[43]报道的新鲜草鱼 K 值相似。未包装组、空白复合膜组和 1.5% 活性复合膜组的 K 值随着贮藏时间的延长而增加,这主要由内源酶和微生物产生的外源酶共同分解 ATP 及其衍生物导致^[44]。通常,K 值低于 20% 代表其为高品质水产品,而高于 60% 则意味着水产品失去食用价值^[45]。贮藏第 9 天,未包装组的 K 值超过 60%,为(62.87±3.90)%,而贮藏第 12 天,1.5% 活性复合膜组 K 值仍低于 60%,为(43.40±3.49)%,表明 1.5% 活性复合膜能有效保持扇贝贝柱冷藏中的新鲜度。这主要是肉桂醛抑制了微生物

物活动,减少了与ATP降解有关酶的产生,减缓了ATP的降解。

2.5.5 EPA含量和DHA含量

水产品富含对人体健康有益的n-3长链多不饱和脂肪酸,特别是EPA和DHA。冷藏过程中扇贝壳柱EPA含量和DHA含量的变化见图10和图11。

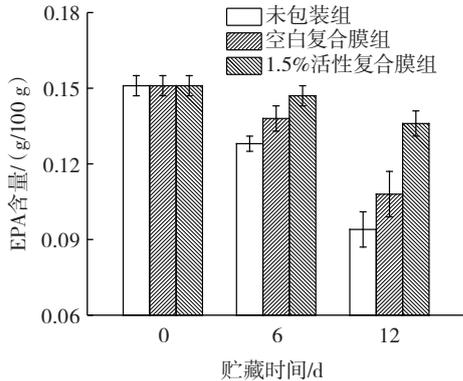


图10 冷藏过程中扇贝壳柱EPA含量的变化

Fig.10 Changes in eicosapentaenoic acid of scallop adductor muscle during cold storage

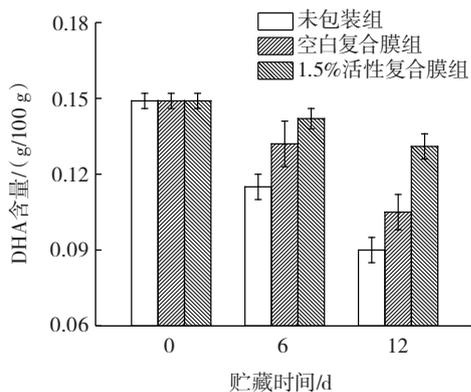


图11 冷藏过程中扇贝壳柱DHA含量的变化

Fig.11 Changes in docosahexaenoic acid of scallop adductor muscle during cold storage

由图10和图11可知,新鲜扇贝壳柱中EPA含量为 (0.143 ± 0.007) g/100g,DHA含量为 (0.149 ± 0.003) g/100g。 4°C 贮藏12d后,3组样品中EPA和DHA含量均明显降低,未包装组、空白复合膜组和1.5%活性复合膜组的EPA含量分别降低了37.74%、28.48%和9.93%,DHA含量分别降低了39.60%、29.53%和12.08%。显然,1.5%活性复合膜组EPA和DHA的氧化损失更少。在脂质氧化过程中,EPA和DHA先转化为不稳定的氢过氧化物,然后分解成各种次级氧化产物,导致EPA和DHA含量的损失^[46]。1.5%活性复合膜中释放的 α -生育酚能阻断自由基链反应,抑制脂质氧化,有效保持扇贝壳柱的营养品质。

2.5.6 菌落总数

微生物繁殖是水产品品质劣化的重要影响因素,

直接决定水产品的货架期。冷藏过程中扇贝壳柱菌落总数的变化见图12。

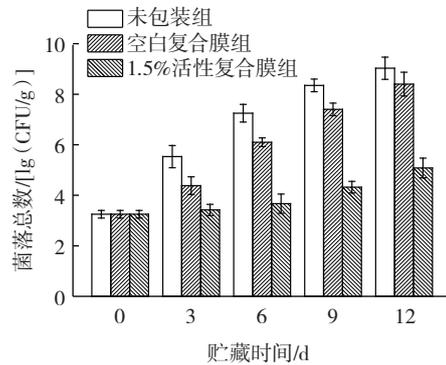


图12 冷藏过程中扇贝壳柱菌落总数的变化

Fig.12 Changes in total viable count of scallop adductor muscle during cold storage

如图12所示,新鲜扇贝壳柱的菌落总数为 (3.25 ± 0.15) lg(CFU/g),冷藏期间未包装组、空白复合膜组和1.5%活性复合膜组样品的菌落总数均呈上升趋势,但1.5%活性复合膜组样品的菌落总数最低。贮藏第6天,未包装组的菌落总数上升至 (7.25 ± 0.35) lg(CFU/g),高于 7.0 lg(CFU/g)的安全限值^[5]。贮藏第12天,1.5%活性复合膜组的菌落总数为 (5.08 ± 0.39) lg(CFU/g),仍低于限定值 7.0 lg(CFU/g),这源于复合膜中肉桂醛的抑菌活性。因此,就菌落总数而言,1.5%活性复合膜可将冷藏扇贝壳柱的货架期延长6d。

3 结论

本研究制备了负载不同含量肉桂醛和 α -生育酚的明胶-葡聚糖复合膜,并对其理化、抗菌、抗氧化和扇贝冷藏保鲜性能进行研究。扫描电镜结果表明添加活性物质使光滑、致密、均匀的表面及横截面转变为粗糙、折叠、非均匀的表面和多孔、不连续的横截面。X射线衍射和红外光谱结果分别表明添加活性物质增强了复合膜的结晶度和疏水性。随着活性物质添加量增加,复合膜的厚度、不透明度、抗菌活性和抗氧化活性显著增加,而水蒸气通过性、TS和EAB显著降低。在12d的冷藏期内,经1.5%活性复合膜包装处理的扇贝壳柱具有更低的pH值、TBARS值、TVB-N、K值、菌落总数、EPA和DHA含量损失。菌落总数结果表明,1.5%活性复合膜可延长冷藏扇贝壳柱货架期6d。综上所述,本研究开发的肉桂醛- α -生育酚/明胶-葡聚糖复合膜在延长冷藏水产品货架期、保持其品质方面具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] 农业农村部渔业渔政管理局,全国水产技术推广总站,中国水产学会编制.中国渔业统计年鉴-2023[M].北京:中国农业出版社

- 社, 2023.
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs Fisheries Administration Bureau, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China fisheries statistic yearbook-2023[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2023.
- [2] LIU B, LI D Y, WU Z X, et al. Combined effects of ultrasound and antioxidants on the quality maintenance of bay scallop (*Argopecten irradians*) adductor muscles during cold storage[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 82: 105883.
- [3] XIE H K, ZHOU D Y, LIU Z Y, et al. Effects of natural phenolics on shelf life and lipid stability of freeze-dried scallop adductor muscle[J]. Food Chemistry, 2019, 295: 423-431.
- [4] JIANG W, HU S, LI S, et al. Evaluation of the preservation effect of gelatin-water soluble chitosan film incorporated with maillard peptides on bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) slices packaging[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 113: 108294.
- [5] SHAHIDI F, HOSSAIN A. Preservation of aquatic food using edible films and coatings containing essential oils: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(1): 66-105.
- [6] 林珺琰, 陈建福, 费鹏. 果胶-纤维素-儿茶素可食复合膜的制备及性能[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(24): 122-127.
- LIN Junyan, CHEN Jianfu, FEI Peng. Preparation and properties of pectin-cellulose-catechin edible composite films[J]. Food Research and Development, 2023, 44(24): 122-127.
- [7] LI Y J, TANG C M, HE Q F. Effect of orange (*Citrus sinensis* L.) peel essential oil on characteristics of blend films based on chitosan and fish skin gelatin[J]. Food Bioscience, 2021, 41: 100927.
- [8] HOSSEINI S F, REZAEI M, ZANDI M, et al. Development of bioactive fish gelatin/chitosan nanoparticles composite films with antimicrobial properties[J]. Food Chemistry, 2016, 194: 1266-1274.
- [9] WU J L, GE S Y, LIU H, et al. Properties and antimicrobial activity of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) skin gelatin-chitosan films incorporated with oregano essential oil for fish preservation [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2014, 2(1): 7-16.
- [10] DAVIDOVIĆ S, MILJKOVIĆ M, GORDIC M, et al. Dextran-based edible coatings to prolong the shelf life of blueberries[J]. Polymers, 2021, 13(23): 4252.
- [11] SARMAST E, FALLAH A A, HABIBIAN DEHKORDI S, et al. Impact of glazing based on chitosan-gelatin incorporated with Persian lime (*Citrus latifolia*) peel essential oil on quality of rainbow trout fillets stored at superchilled condition[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 136: 316-323.
- [12] NI Z J, WANG X, SHEN Y, et al. Recent updates on the chemistry, bioactivities, mode of action, and industrial applications of plant essential oils[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 110: 78-89.
- [13] HAGHIGHI H, BIARD S, BIGI F, et al. Comprehensive characterization of active chitosan-gelatin blend films enriched with different essential oils[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 95: 33-42.
- [14] HOSSEINI S F, GHADERI J, GÓMEZ-GUILLÉN M C. Tailoring physico-mechanical and antimicrobial/antioxidant properties of biopolymeric films by cinnamaldehyde-loaded chitosan nanoparticles and their application in packaging of fresh rainbow trout fillets[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124: 107249.
- [15] ZHANG J M, CHEN J, ZHANG C C, et al. Characterization and antibacterial properties of chitosan-polyvinyl alcohol-3-phenyllactic acid as a biodegradable active food packaging[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2022, 34: 100963.
- [16] BEN AZAZA Y, HAMDI M, CHARMETTE C, et al. Development and characterization of active packaging films based on chitosan and sardinella protein isolate: Effects on the quality and the shelf life of shrimps[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2022, 31: 100796.
- [17] AHMAD M, BENJAKUL S, PRODPRAN T, et al. Physico-mechanical and antimicrobial properties of gelatin film from the skin of unicorn leatherjacket incorporated with essential oils[J]. Food Hydrocolloids, 2012, 28(1): 189-199.
- [18] DONG J L, YU D W, ZHANG L M, et al. Chitosan/alginate dialdehyde trilayer films with cinnamaldehyde nanoemulsions for grass carp preservation[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 147: 109413.
- [19] DONG Z, LUO C, GUO Y M, et al. Characterization of new active packaging based on PP/LDPE composite films containing attapulgitite loaded with *Allium sativum* essence oil and its application for large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) fillets[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2019, 20: 100320.
- [20] XIE H K, YIN F W, LIU Z Y, et al. Oxidation kinetics of polyunsaturated fatty acids esterified into triacylglycerols and phospholipids in dried scallop (*Argopecten irradians*) adductor muscles during storage[J]. Food & Function, 2020, 11(3): 2349-2357.
- [21] TÜGEN A, OCAK B, ÖZDESTAN-OCAK Ö. Development of gelatin/chitosan film incorporated with lemon essential oil with antioxidant properties[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2020, 14(6): 3010-3019.
- [22] ZONG X X, ZHANG X G, BI K Y, et al. Novel emulsion film based on gelatin/polydextrose/camellia oil incorporated with *Lactobacillus pentosus*: Physical, structural, and antibacterial properties[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 121: 107063.
- [23] WALID Y, MALGORZATA N, KATARZYNA R, et al. Effect of rosemary essential oil and ethanol extract on physicochemical and antibacterial properties of optimized gelatin-chitosan film using mixture design[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(1): e16059.
- [24] DU H Y, LIU C, UNSALAN O, et al. Development and characterization of fish myofibrillar protein/chitosan/rosemary extract composite edible films and the improvement of lipid oxidation stability during the grass carp fillets storage[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 184: 463-475.
- [25] KIM H, BEAK S E, BIN SONG K. Development of a hagfish skin gelatin film containing cinnamon bark essential oil[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 96: 583-588.
- [26] KAVOOSI G, RAHMATOLLAHI A, MOHAMMAD MAHDI DADFAR S, et al. Effects of essential oil on the water binding capacity, physico-mechanical properties, antioxidant and antibacterial activity of gelatin films[J]. LWT - Food Science and Technology, 2014, 57(2): 556-561.
- [27] KARAMI P, ZANDI M, GANJLOO A. Evaluation of physicochemical, mechanical, and antimicrobial properties of gelatin-sodium alginate-yarrow (*Achillea millefolium* L.) essential oil film[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(7): e16632.
- [28] FABRA M J, TALENS P, CHIRALT A. Tensile properties and water vapor permeability of sodium caseinate films containing oleic acid-beeswax mixtures[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 85(3): 393-400.
- [29] WU J L, SUN X Y, GUO X B, et al. Physicochemical properties, antimicrobial activity and oil release of fish gelatin films incorporated with cinnamon essential oil[J]. Aquaculture and Fisheries, 2017, 2(4): 185-192.
- [30] NURUL SYAHIDA S, ISMAIL-FITRY M R, AINUN Z M A, et al. Effects of palm wax on the physical, mechanical and water barrier properties of fish gelatin films for food packaging application[J].

- Food Packaging and Shelf Life, 2020, 23: 100437.
- [31] ROY S, RHIM J W. Fabrication of bioactive binary composite film based on gelatin/chitosan incorporated with cinnamon essential oil and rutin[J]. Colloids and Surfaces B, Biointerfaces, 2021, 204: 111830.
- [32] YADAV S, MEHROTRA G K, BHARTIYA P, et al. Preparation, physicochemical and biological evaluation of quercetin based chitosan - gelatin film for food packaging[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 227: 115348.
- [33] ZHAO J Y, WEI F, XU W L, et al. Enhanced antibacterial performance of gelatin/chitosan film containing capsaicin loaded MOFs for food packaging[J]. Applied Surface Science, 2020, 510: 145418.
- [34] HE B B, WANG W H, SONG Y X, et al. Structural and physical properties of carboxymethyl cellulose/gelatin films functionalized with antioxidant of bamboo leaves[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 164: 1649-1656.
- [35] TONGNUANCHAN P, BENJAKUL S, PRODPRAN T. Structural, morphological and thermal behaviour characterisations of fish gelatin film incorporated with basil and citronella essential oils as affected by surfactants[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 41: 33-43.
- [36] NASERI H R, BEIGMOHAMMADI F, MOHAMMADI R, et al. Production and characterization of edible film based on gelatin - chitosan containing *Ferulago angulate* essential oil and its application in the prolongation of the shelf life of Turkey meat[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(8): e14558.
- [37] DU R P, QIAO X X, ZHAO F K, et al. Purification, characterization and antioxidant activity of dextran produced by *Leuconostoc pseudomesenteroides* from homemade wine[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 198: 529-536.
- [38] ZHANG L M, LIU Z L, SUN Y, et al. Combined antioxidant and sensory effects of active chitosan/zein film containing α -tocopherol on *Agaricus bisporus*[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2020, 24: 100470.
- [39] THONGSRIKHEM N, TAOKAEW S, SRIARIYANUN M, et al. Antibacterial activity in gelatin-bacterial cellulose composite film by thermally crosslinking with cinnamaldehyde towards food packaging application[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2022, 31: 100766.
- [40] CHU C C, CHEW S C, LIEW W C, et al. Review article vitamin E: A multi-functional ingredient for health enhancement and food preservation[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2023, 17(6): 6144-6156.
- [41] WU Z X, LIU Y X, YU M M, et al. Effect of chitosan coatings incorporated with antioxidant of bamboo leaves and potassium sorbate on lipid oxidation and hydrolysis of scallop (*Chlamys farreri*) during refrigerated storage[J]. Journal of Food Bioactives, 2019, 8: 66-73.
- [42] KIM H J, ROY S, RHIM J W. Gelatin/agar-based color-indicator film integrated with *Clitoria ternatea* flower anthocyanin and zinc oxide nanoparticles for monitoring freshness of shrimp[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124: 107294.
- [43] YU D W, ZHAO W Y, DONG J L, et al. Multifunctional bioactive coatings based on water-soluble chitosan with pomegranate peel extract for fish flesh preservation[J]. Food Chemistry, 2022, 374: 131619.
- [44] HUANG Z L, WANG Q, CAO J, et al. Mechanisms of polyphenols on quality control of aquatic products in storage: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023: 1-20.
- [45] KHODANAZARY A, MOHAMMADZADEH B. Effect of alginate-gallic acid coating on freshness and flavor properties of Mackerel (*Scomberomorus commerson*) fillets under refrigerated storage[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 249: 125999.
- [46] DOMÍNGUEZ R, PATEIRO M, GAGAOUA M, et al. A comprehensive review on lipid oxidation in meat and meat products[J]. Antioxidants, 2019, 8(10): 429.

责任编辑:张璐
收稿日期:2024-01-22