

王成, 纪倩倩, 江宁, 等. 明胶-纳米粒子复合膜的制备及其对水产品的保鲜作用[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(5): 1009-1020.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.05.019

# 明胶-纳米粒子复合膜的制备及其对水产品的保鲜作用

王成<sup>1,2</sup>, 纪倩倩<sup>1,2</sup>, 江宁<sup>1,2</sup>, 岳泽峰<sup>1,2</sup>, 张强<sup>1,2</sup>, 孙荣雪<sup>1,2</sup>, 刘钱媛<sup>1,2</sup>,  
李志强<sup>1,2</sup>, 王兴娜<sup>1,2</sup>

(1.江苏省农业科学院农产品加工研究所, 江苏 南京 210014; 2.农业农村部水产品保鲜贮藏加工技术集成科研基地, 江苏南京 210014)

**摘要:** 本研究将负载 DL-3-苯乳酸的壳聚糖纳米粒子(NP)添加至明胶(GE)基体中, 制成明胶-纳米粒子复合膜(GE-NP), 并探究不同壳聚糖纳米粒子添加量(0、2%、4%、6%、8%、10%)对复合膜性能的影响。结果表明, 综合考虑力学性能、紫外线阻隔性能、氧气阻隔性能、水蒸气阻隔性能和抑菌性能, 明胶-8%纳米粒子复合膜(GE-NP<sub>8%</sub>)的性能最佳。通过低场核磁共振和变场核磁共振分析发现, 纳米粒子与明胶分子之间的相互作用增强了 GE-NP<sub>8%</sub>复合膜的交联强度, 减小了自由体积, 使其结构更加致密。鱼肉保鲜试验中, 贮藏第 10 d, GE-NP<sub>8%</sub>处理鱼肉红绿值( $a^*$ )和黄蓝值( $b^*$ )与新鲜鱼肉的差异较小。贮藏第 10 d, 与聚乙烯膜处理、明胶膜处理相比, GE-NP<sub>8%</sub>处理鱼肉 pH 值、挥发性盐基氮含量(TVB-N)、硫代巴比妥酸含量(TBA)、菌落总数(TVC)上升幅度较小, 同时鱼肉硬度、弹性、胶黏性、咀嚼性等质构参数下降幅度较小。综上, GE-NP<sub>8%</sub>复合膜可有效减缓鱼肉的品质劣变, 延长其货架期。本研究结果可为延长水产品保质期及保持其品质提供理论依据和技术支持。

**关键词:** 壳聚糖纳米粒子; 明胶; 保鲜膜; 阻隔性能; 抑菌性能

中图分类号: S983 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2025)05-1009-12

## Preparation of gelatin-nanoparticle composite membranes and their preservation effects on aquatic products

WANG Cheng<sup>1,2</sup>, JI Qianqian<sup>1,2</sup>, JIANG Ning<sup>1,2</sup>, YUE Zefeng<sup>1,2</sup>, ZHANG Qiang<sup>1,2</sup>, SUN Rongxue<sup>1,2</sup>,  
LIU Qianyuan<sup>1,2</sup>, LI Zhiqiang<sup>1,2</sup>, WANG Xingna<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Agricultural Products Processing, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Integrated Scientific Research Base for Preservation, Storage and Processing Technology of Aquatic Products of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** In this study, chitosan nanoparticles (NPs) loaded with DL-3-phenyllactic acid were incorporated into a gelatin (GE) matrix to fabricate gelatin-nanoparticle composite films (GE-NP). The effects of different chitosan nanoparticle concentrations (0, 2%, 4%, 6%, 8%, and 10%) on the properties of the composite films were investigated. The results showed that, considering mechanical properties, ultraviolet (UV) barrier properties, oxygen barrier properties, water

收稿日期: 2024-09-23

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(23)3056]; 中国博士后科学基金项目(2023M741457)

作者简介: 王成(1991-), 男, 江苏泰州人, 博士, 助理研究员, 研究方向为水产品保鲜与加工。(E-mail) wangcheng@jaas.ac.cn

通讯作者: 江宁, (E-mail) jaas\_jiangning@163.com

vapor barrier properties, and antimicrobial properties, the gelatin-8% nanoparticle composite film (GE-NP<sub>8%</sub>) exhibited the best performance. Low-field nuclear magnetic resonance and variable-field nuclear magnetic resonance analyses revealed that the interactions between nanoparticles and gelatin molecules enhanced the crosslinking strength of the GE-NP<sub>8%</sub> composite film, reduced the free

volume, and made its structure more compact. In the fish preservation experiment, on day 10 of storage, the red-green value ( $a^*$ ) and yellow-blue value ( $b^*$ ) of fish treated with GE-NP<sub>8%</sub> were found to be closer to those of fresh fish. On day 10 of storage, compared with fish treated with polyethylene film and gelatin film, the pH value, total volatile basic nitrogen content (TVB-N), thiobarbituric acid content (TBA), and total viable count (TVC) of fish treated with GE-NP<sub>8%</sub> increased to a lesser extent. Meanwhile, the decline in texture parameters such as hardness, elasticity, cohesiveness, and chewiness of the fish was also less pronounced. In summary, the GE-NP<sub>8%</sub> composite film can effectively slow down the quality deterioration of fish and extend its shelf life. The results of this study can provide a theoretical basis and technical support for extending the shelf life and maintaining the quality of aquatic products.

**Key words:** chitosan nanoparticles; gelatin; preservation film; barrier properties; antimicrobial properties

近年来,随着居民生活水平的提升、生活节奏的加快以及网络销售的推广,预制菜行业得到了快速发展。然而,即配型预制菜在储存、运输期间极易受到微生物污染而腐败变质。特别是水分和蛋白质含量高的水产品预制菜,更易因脂肪氧化、蛋白质降解及微生物活动而品质劣变<sup>[1]</sup>。水产品的品质劣变不仅会造成巨大的经济损失,还严重制约了水产品行业的进一步发展。因此,探索一种有效的水产品保鲜手段具有重要的科学意义和广阔的产业化应用前景。

现有的常温(气调、超高压、辐照等)保鲜措施和低温(冷藏、冻藏)保鲜措施结合使用化学防腐剂的保鲜手段能够最大限度地保持水产品原有的营养价值和风味。然而,大量化学防腐剂在杀菌的同时也可能带来食品安全隐患,气调和超高压等保鲜手段对设备要求较高,辐照保鲜产生的羟基自由基会加速水产品的氧化<sup>[2]</sup>。覆膜保鲜是一种有效的保鲜方法,可以延缓食品氧化、水分蒸发和微生物的生长繁殖,延长食品的货架期。与不可降解的石油基塑料保鲜膜(聚乙烯、聚丙烯、聚酰胺、聚苯乙烯等)相比,生物基保鲜膜具有可持续性、生物相容性、抗菌性、抗氧化性,受到广泛关注<sup>[3-4]</sup>。生物基保鲜膜按种类可分为单一组分薄膜(多糖基薄膜、蛋白基薄膜、脂类薄膜等)和复合保鲜膜。其中,单一组分薄膜受限于其分子结构特征,存在机械性能差、阻隔能力弱、生物活性不足等问题<sup>[5]</sup>。研究发现,添加了抗菌剂、抗氧化剂的复合保鲜膜能够有效改善单一组分薄膜的不足,提升其抗菌、抗氧化能力,从而延缓水产品的腐败变质。Chen 等<sup>[6]</sup>利用明胶、海藻酸钠和聚乳酸制备的明胶复合保鲜膜具有较强的阻隔性能和抗菌性能,能够有效抑制冷藏条件下的鲈鱼蛋白质降解和脂肪氧化。Liu 等<sup>[7]</sup>利用明胶、壳聚糖和百里香精油制备的复合保鲜膜结构致密且表面光滑,能够通过干扰微生物碳水化合物、氮和核苷

酸的代谢抑制微生物的增殖,维持冷藏条件下金鲷鱼鱼肉的品质。付瑞敏等<sup>[8]</sup>利用壳聚糖、甘油和茶渣提取物制备了一种兼具抗菌性和抗氧化性的活性保鲜膜,可以有效维持鲜切苹果的硬度和维生素 C 含量,表现出优异的保鲜效果。

本研究拟将负载 DL-3-苯乳酸的壳聚糖纳米粒子(NP)添加至明胶(GE)基体中,制成明胶-纳米粒子复合膜(GE-NP),并探究该复合膜的力学性能、紫外线阻隔性能、氧气阻隔性能、水蒸气阻隔性能和抑菌性能,旨在为延长水产品保质期及保持其品质提供理论依据和技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验试剂

明胶、壳聚糖、三聚磷酸钠、碳酸钾、亚甲基蓝、三氯乙酸、硫代巴比妥酸、DL-3-苯乳酸购自上海麦克林生化科技有限公司;硼酸、乙二胺四乙酸二钠购自天津市科密欧化学试剂有限公司;甲基红、乙醇、盐酸、氯化钠购自国药集团化学试剂有限公司。

### 1.2 试验仪器

分光测色计(分光式)(型号 CM-700d,日本 KONICA MINOLTA 公司产品);pH 计(型号 FE28,梅特勒-托利多(上海)有限公司产品);恒温恒湿培养箱(型号 SN-HWS-250B,上海尚普仪器设备有限公司产品);全温度振荡培养箱(型号 HZQ-F100,太仓华大实验仪器科技有限公司产品);质构仪(型号 TMS-PRO,美国 FTC 公司产品);低场核磁共振分析仪(型号 NMI20,苏州纽迈分析仪器股份有限公司产品);1T 研究级快速场循环核磁共振分析仪(型号 FFC2000,苏州纽迈分析仪器股份有限公司产品);大容量高速台式冷冻离心机(型号 H2050R,湖南湘仪实验室仪器开发有限公司产品);高速分散均质机(型号 T25,德国 IKA 公司产品);水蒸气透过率

测试仪(型号 C390H, 济南兰光机电技术有限公司产品);氧气透过率测试仪(型号 C230H, 济南兰光机电技术有限公司产品);紫外-可见分光光度计(型号 E220, 美国赛默飞世尔科技公司产品)。

### 1.3 试验方法

1.3.1 纳米粒子的制备 参照 Zhang 等<sup>[9]</sup>的方法制备纳米粒子。具体步骤如下:称取 0.2 g 壳聚糖溶于 200 mL 1%(体积分数)乙酸溶液中,待壳聚糖完全溶解后加入 40 mg DL-3-苯乳酸,并用 10 mol/L NaOH 调节溶液 pH 至 5。随后,向溶液中滴加 30 mL 1 mg/mL 三聚磷酸钠溶液,同时剧烈搅拌 30 min。搅拌结束后,将壳聚糖纳米粒子悬浮液以 13 000 r/min 离心 30 min,弃去上清液,加入蒸馏水重复离心、洗涤 2 次。加入 10 mL 蒸馏水,混匀后冷冻干燥 48 h,制得负载有 DL-3-苯乳酸的纳米粒子(NP)。

1.3.2 明胶-纳米粒子复合膜(GE-NP)的制备 称取适量明胶加入 100 mL 蒸馏水中,室温静置 1 h 使其充分水化。加入 10%(质量分数)甘油,加热搅拌至完全溶解。称取适量壳聚糖纳米粒子分散于 60 mL 蒸馏水中,搅拌至完全分散。将明胶溶液和纳米粒子悬浮液按一定比例混合均匀后,倒入培养皿中干燥,得到明胶复合保鲜膜(GE-NP)。GE、GE-NP<sub>2%</sub>、GE-NP<sub>4%</sub>、GE-NP<sub>6%</sub>、GE-NP<sub>8%</sub>、GE-NP<sub>10%</sub> 分别表示复合膜中纳米粒子的添加量(质量分数)为 0、2%、4%、6%、8%、10%。

1.3.3 X 射线光电子能谱(XPS)分析 使用 X 射线光电子能谱仪,X 射线源采用单色 Al K $\alpha$  射线,入射角度为 30°,检测速度为 500 eV/min,扫描范围为 0~1 200 eV。

1.3.4 低场核磁共振分析 利用 NMI20 核磁共振成像分析仪研究 GE-NP 聚合物的网络交联强度。扫描次数(NS)为 16,回波时间(TE)为 0.2 ms,等待时间(TW)为 4 000 ms,回波计数(NECH)为 15 000。

1.3.5 变场核磁共振分析 使用 FFC2000 快速循环变场核磁共振仪研究 GE-NP 复合膜的自由体积,测定复合膜在不同磁场强度下的纵向弛豫时间( $T_1$ )<sup>[11]</sup>。测试条件如下:极化时间(TP)和延迟回收时间(RD)分别为 0.2 s 和 0.5 s,扫描次数为 2 次,衰减幅度(ATTR)为 2 db,磁场强度为 1~8 MHz,以 MnCl<sub>2</sub> 为标准样品进行校准。

1.3.6 复合膜力学性能测定 采用岛津 AGS-X 试验机在室温环境下(25 ℃,相对湿度 60%)测试复合

膜的力学性能,应变速率为 50 mm/min。测试前,在测试环境中平衡 48 h,每种复合膜测试 3 次,取平均值。

1.3.7 复合膜颜色及透光率测定 使用 CM-700d 分光测色仪测量 GE-NP 的颜色变化。用白板校准后,测量并记录 GE-NP 膜的  $L^*$ (亮度)、 $a^*$ (红绿值)和  $b^*$ (黄蓝值)。采用紫外-可见分光光度计测定复合膜在 200~800 nm 波长的透过率。短波紫外线(UVC)(200~280 nm)、中波紫外线(UVB)(280~320 nm)和长波紫外线(UVA)(320~400 nm)的阻隔率计算如下:

$$\text{UVC 阻隔率} = 1 - \frac{\int_{200}^{280} T(\lambda) d(\lambda)}{\int_{200}^{280} d(\lambda)} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{UVB 阻隔率} = 1 - \frac{\int_{280}^{320} T(\lambda) d(\lambda)}{\int_{280}^{320} d(\lambda)} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{UVA 阻隔率} = 1 - \frac{\int_{320}^{400} T(\lambda) d(\lambda)}{\int_{320}^{400} d(\lambda)} \times 100\% \quad (3)$$

式中, $T(\lambda)$ 为薄膜的平均透过率, $d(\lambda)$ 为带宽, $\lambda$ 为波长。

1.3.8 水蒸气透过率与氧气透过率测定 依据 GB/T 1037-2021,采用 C390H 水蒸气透过率测试系统测定复合膜的水蒸气透过量。测试条件如下:流程模式设置为循环模式,吹扫上下腔时间设为 30 s,预热时间为 2 h,以氮气作为载气,试验温度为 (23±2) ℃,湿度为 90%±2%。将待测膜切成直径为 10.5 cm 的圆片,每种复合膜测定 3 次,取平均值。

依据 GB/T 1038-2022,采用 C230H 氧气透过率测试系统测定复合膜的氧气透过量。测试条件如下:流程模式设置为循环模式,吹扫上下腔时间设为 30 s,预热时间为 2 h。以氮气作为载气,氧气作为渗透气体。试验温度设为 (23±2) ℃,湿度设为 50%±2%。将待测膜切成直径为 10.5 cm 的圆片,每种复合膜测定 3 次,取平均值。

1.3.9 抑菌率测定 参照 Roy 等<sup>[10]</sup>的方法并稍作修改,使用菌落计数法评估 GE-NP 的抗菌性能。将大肠杆菌和金黄色葡萄球菌在 37 ℃ 下振荡培养 18 h,梯度稀释至 1×10<sup>6</sup> CFU/mL。随后,将 50 mg 薄膜加入 50 mL 含有 1×10<sup>6</sup> CFU/mL 细菌的胰酪大豆胨液体培养基中,并在 37 ℃ 下振荡培养 24 h。将培养液梯度稀释,接种在琼脂平板上,计算菌落数量。以不加薄膜的培养液作为对照,检测 GE-NP 复合膜的

抗菌性能。薄膜的抑菌率计算公式如下:

$$\text{抑菌率} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \times 100\% \quad (4)$$

式中,  $n_1$  为不加薄膜培养液的菌落数, 单位 CFU/mL,  $n_2$  为添加薄膜的培养液的菌落数, 单位 CFU/mL。

1.3.10 鱼肉色泽测定 将鲜活草鱼击晕, 去头、去皮、去内脏, 用无菌水将鱼肉冲洗干净, 将鱼肉切成 3 cm×3 cm×2 cm 的鱼块并随机分为 4 组。在无菌操作台中, 分别用经过紫外线照射的聚乙烯膜 (PE)、明胶膜 (GE) 和明胶-8% 纳米粒子复合膜 (GE-NP<sub>8%</sub>) 包裹鱼肉, 以无膜包裹的鱼肉作为对照。将鱼肉置于培养皿中, 4 °C 保存, 每 2 d 取 1 次鱼肉。用白板校准后, 利用 CM-700d 分光测色仪测量鱼肉的  $L^*$  值、 $b^*$  值和  $c^*$  值。

1.3.11 鱼肉 pH 值测定 参照缪函霖等<sup>[12]</sup>的方法, 称取 2 g 鱼肉, 加入 20 mL 蒸馏水, 用分散均质机搅打均匀, 静置 30 min 后测定 pH。

1.3.12 鱼肉挥发性盐基氮含量 (TVB-N) 测定 参考郭全友等<sup>[13]</sup>和吴海虹等<sup>[14]</sup>的方法并稍作修改, 称取 4 g 鱼肉, 加入 20 mL 蒸馏水, 均质 1 min, 静置 30 min 后过滤。在玻璃扩散皿中滴加 1 mL 滤液、1 mL 饱和碳酸钾溶液、1 mL 硼酸吸收液和 1 滴混合指示剂, 用玻璃盖密封后放入恒温培养箱中, 37 °C 静置 2 h, 用 0.01 mol/L 盐酸滴定。计算公式如下:

$$\text{TVB-N} = \frac{(v_1 - v_2) \times c_1 \times 14 \times 20}{m_1 \times 100} \times 100\% \quad (5)$$

式中, TVB-N 为挥发性盐基氮含量, 单位 mg/g;  $v_1$  为试验组盐酸滴定消耗的体积, 单位 mL;  $v_2$  为空白组盐酸滴定消耗的体积, 单位 mL;  $c_1$  为盐酸浓度, 单位 mol/L;  $m_1$  为鱼肉重量, 单位 g。

1.3.13 硫代巴比妥酸含量 (TBA) 测定 参考杨晴晴等<sup>[15]</sup>的方法并稍作修改, 称取 2 g 鱼肉, 加入 20 mL 三氯乙酸, 剧烈搅拌 1 min 后, 在 50 °C 条件下振荡 30 min。过滤后吸取 5 mL 上清液, 加入 5 mL 硫代巴比妥酸溶液, 90 °C 水浴 30 min。冷却至室温后在波长 532 nm 处测定吸光度, 代入标准曲线计算。计算公式如下:

$$\text{TBA} = \frac{c_2 \times v_3 \times 1\ 000}{m_2 \times 1\ 000} \quad (6)$$

式中, TBA 为硫代巴比妥酸含量 (以丙二醛计), 单位 mg/kg;  $c_2$  为丙二醛质量浓度, 单位  $\mu\text{g/mL}$ ;  $v_3$  为

滤液体积, 单位 mL;  $m_2$  为鱼肉重量, 单位 g。

1.3.14 鱼肉菌落数测定 参照张曦鹏等<sup>[16]</sup>的方法并稍作修改, 称取 10 g 鱼肉置于无菌均质袋中, 加入 90 mL 无菌生理盐水, 均质拍打 2 min, 吸取上清液梯度稀释, 选取合适浓度的稀释液涂布平板, 于 37 °C 恒温培养箱中培养 48 h, 检测鱼肉中菌落数。

1.3.15 鱼肉质构分析 参考 Li 等<sup>[17]</sup>的方法并稍作修改, 采用 TMS-PRO 质构仪测定草鱼鱼肉的质构。测试条件如下: 选用直径为 7.5 cm、量程为 100 N 的探头, 速度为 1 mm/s, 形变程度为 50%, 触发力为 5 g。以硬度、胶黏性、弹性和咀嚼性作为鱼肉品质的评价指标。

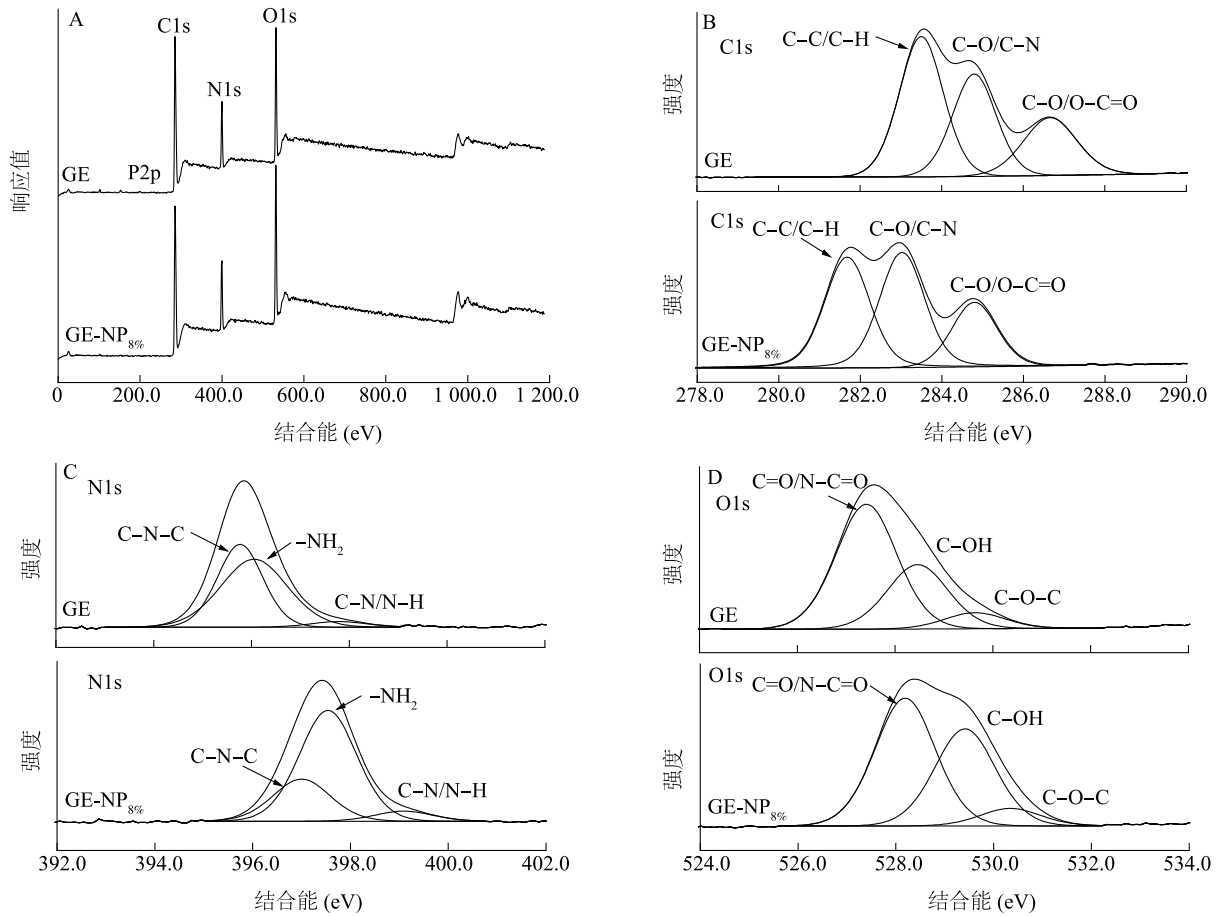
## 1.4 数据处理与分析

试验结果以平均值±标准误差表示, 利用 SPSS 26.0 软件进行显著性分析, 使用 Origin 64 软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 GE-NP 的 X 射线光电子能谱分析

X 射线光电子能谱 (XPS) 可用于分析复合膜中的元素组成、化学状态和分子间的相互作用<sup>[18]</sup>。如图 1A 所示, 明胶膜和 GE-NP<sub>8%</sub> 复合膜的 XPS 光谱主要标记峰为 C1s (284.9 eV)、N1s (399.9 eV) 和 O1s (531.9 eV)<sup>[19]</sup>。C1s 光谱图中, C<sub>1</sub> 峰 (283.0 eV) 代表 C-C 或者 C-H 之间的化学键, 具有这种化学键的基团在材料表面通常表现出疏水性; C<sub>2</sub> 峰 (284.8 eV) 代表 C-O 或者 C-N 之间的化学键, 与材料的交联程度相关; C<sub>3</sub> 峰 (286.7 eV) 代表 C=O 或者 O-C=O 结构, 含有这些官能团的材料表面通常具有亲水性<sup>[20]</sup>。如图 1B 所示, 添加 8% 纳米粒子后, GE-NP<sub>8%</sub> 复合膜的 C<sub>1</sub> 峰高度降低, C<sub>2</sub> 峰高度增加, C<sub>3</sub> 峰高度增加, 表明复合膜表面的亲水性增强和聚合物网络的交联强度提升, 这主要是因为复合膜中极性基团的暴露和氢键数量的增加<sup>[21]</sup>。明胶膜的 N1s 光谱图中, 位于 395.7 eV、396.0 eV 和 397.7 eV 的峰分别代表 C-N-C、-NH<sub>2</sub> 和 C-N/N-H (图 1C); 明胶膜的 O1s 光谱图中, 位于 527.4 eV、528.5 eV 和 529.6 eV 的峰分别代表 C=O/N-C=O、C-OH 和 C-O-C (图 1D)。加入纳米粒子后, GE-NP<sub>8%</sub> 复合膜的 N1s 和 O1s 光谱图中, 各个峰向右偏移, 表明结合能增加, 这主要是因为明胶分子和纳米粒子之间氢键相互作用<sup>[20]</sup>。



A 为 X 射线光电子能谱全谱;B 为 C1s 谱图;C 为 N1s 谱图;D 为 O1s 谱图。GE:明胶膜;GE-NP<sub>8%</sub>:明胶-8%纳米粒子复合膜。

图1 GE-NP<sub>8%</sub>复合膜的 X 射线光电子能谱

Fig.1 X-ray photoelectron spectroscopy of GE-NP<sub>8%</sub> composite film

## 2.2 GE-NP<sub>8%</sub>复合膜的低场核磁共振和变场核磁共振分析

横向弛豫时间( $T_2$ )可以反映 GE-NP 复合膜的氢键结合程度及分子网络交联强度<sup>[22]</sup>。 $T_2$ 值越小,表明复合膜中氢键的交联强度越高。如图 2A 所示,与明胶膜相比,GE-NP<sub>8%</sub>复合膜的横向弛豫时间减小,表明纳米粒子的加入提升了 GE-NP<sub>8%</sub>复合膜的物理交联强度。这主要是因为纳米粒子和明胶分子通过氢键产生相互作用,这种非共价键作用可以有效提高复合膜的交联密度和交联强度。

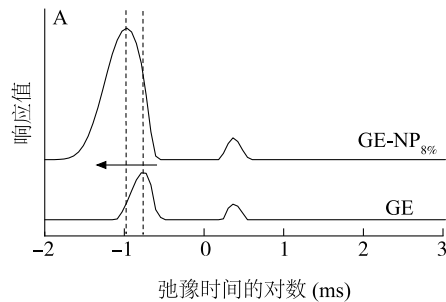
循环变场核磁共振可以测定薄膜纵向弛豫时间( $T_1$ ),进而评估复合膜的自由体积和阻隔性能。如图 2B 所示,随着磁场强度的增加,明胶膜和 GE-NP<sub>8%</sub>复合膜的纵向弛豫时间呈现降低趋势。此外,在1~8 MHz 的磁场强度下,GE-NP<sub>8%</sub>复合膜的纵向弛豫时间小于明胶膜,表明 GE-NP<sub>8%</sub>复合膜的自由

体积小于明胶膜<sup>[23]</sup>。这是因为纳米粒子占据了薄膜分子间的交互通道,且纳米离子和明胶分子之间的相互作用使 GE-NP<sub>8%</sub>复合膜更加致密,从而进一步减小其自由体积。

## 2.3 GE-NP 复合膜的力学性能分析

在室温环境和应变速率为 50 mm/min 的条件下,对 GE-NP 复合膜的力学性能进行测试。如表 1 所示,添加纳米粒子的 GE-NP<sub>2%</sub>、GE-NP<sub>4%</sub>、GE-NP<sub>6%</sub>、GE-NP<sub>8%</sub>、GE-NP<sub>10%</sub>复合膜的抗拉强度、断裂伸长率、杨氏模量、断裂韧性均显著高于明胶膜( $P < 0.05$ )。纳米粒子与明胶之间的相互作用能够耗散应力,从而实现复合膜的增强与增韧。GE-NP<sub>10%</sub>复合膜的抗拉强度最大,为(92.55±2.43) MPa,GE-NP<sub>10%</sub>复合膜抗拉强度是明胶膜的 1.98 倍;GE-NP<sub>8%</sub>复合膜的断裂伸长率最大,为8.13%±0.38%,GE-NP<sub>8%</sub>复合膜的断裂伸长率是明胶膜的 1.57 倍;

GE-NP<sub>10%</sub> 复合膜的杨氏模量最大,为(2.38±0.11) GPa,GE-NP<sub>10%</sub> 复合膜的杨氏模量为明胶膜的 1.65 倍;GE-NP<sub>8%</sub> 复合膜的断裂韧性最大,为(4.49±0.19) MJ/m<sup>3</sup>,GE-NP<sub>8%</sub> 复合膜的断裂韧性为明胶膜的 3.01



GE:明胶膜;GE-NP<sub>8%</sub>:明胶-8%纳米粒子复合膜。

图 2 GE-NP<sub>8%</sub> 复合膜的低场核磁共振图谱 (A) 和变场核磁共振图谱 (B)

倍。GE-NP<sub>10%</sub> 复合膜的断裂伸长率和断裂韧性显著低于 GE-NP<sub>8%</sub> 复合膜,这可能是因为纳米粒子添加量过多,导致局部纳米粒子堆积和过度物理交联。

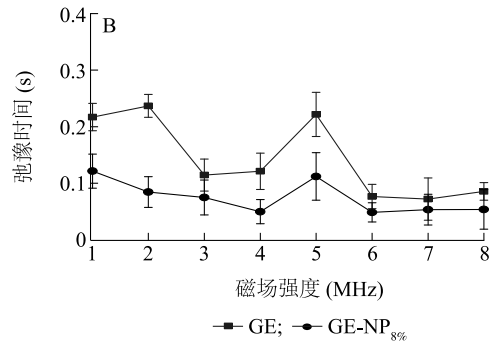


Fig.2 The low-field nuclear magnetic resonance spectrum (A) and variable-field nuclear magnetic resonance spectrum (B) of GE-NP<sub>8%</sub> composite film

表 1 明胶-纳米粒子 GE-NP 复合膜的力学性能

Table 1 The mechanical properties of gelatin-nanoparticle (GE-NP) composite films

膜	抗拉强度 (MPa)	断裂伸长率 (%)	杨氏模量 (GPa)	断裂韧性 (MJ/m <sup>3</sup> )
GE	46.78±2.13f	5.18±0.12e	1.44±0.09d	1.49±0.09e
GE-NP <sub>2%</sub>	54.81±1.35e	5.79±0.25d	1.73±0.18bc	2.04±0.15d
GE-NP <sub>4%</sub>	62.83±1.41d	6.47±0.13c	1.62±0.14c	2.53±0.09c
GE-NP <sub>6%</sub>	82.89±2.64c	6.85±0.21b	1.91±0.06b	3.43±0.12b
GE-NP <sub>8%</sub>	90.41±1.38b	8.13±0.38a	1.83±0.08bc	4.49±0.19a
GE-NP <sub>10%</sub>	92.55±2.43a	5.94±0.19d	2.38±0.11a	3.25±0.28b

GE:明胶膜;GE-NP<sub>2%</sub>:明胶-2%纳米粒子复合膜;GE-NP<sub>4%</sub>:明胶-4%纳米粒子复合膜;GE-NP<sub>6%</sub>:明胶-6%纳米粒子复合膜;GE-NP<sub>8%</sub>:明胶-8%纳米粒子复合膜;GE-NP<sub>10%</sub>:明胶-10%纳米粒子复合膜。同一列数据后不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

## 2.4 GE-NP 复合膜的颜色分析

颜色是食品包装膜的重要参数,直接影响食品包装的外观特征。色差仪参数中, $L^*$  为亮度; $a^*$  为红绿值, $a^*$  值越大,表明样品越红; $b^*$  为黄蓝值, $b^*$  值越大,表明样品越黄<sup>[24]</sup>。如图 3 所示,随着纳米离子添加量的增加,GE-NP 复合膜的  $L^*$  值和  $a^*$  值呈下降趋势,表明复合膜的亮度和红度降低;随着纳米离子添加量的增加,GE-NP 复合膜的  $b^*$  值呈上升趋势,表明复合膜的黄度增加。与明胶膜相比,GE-NP 复合膜颜色发生了轻微变化,但整体呈现均匀、透明的外观,可以用于食品包装。

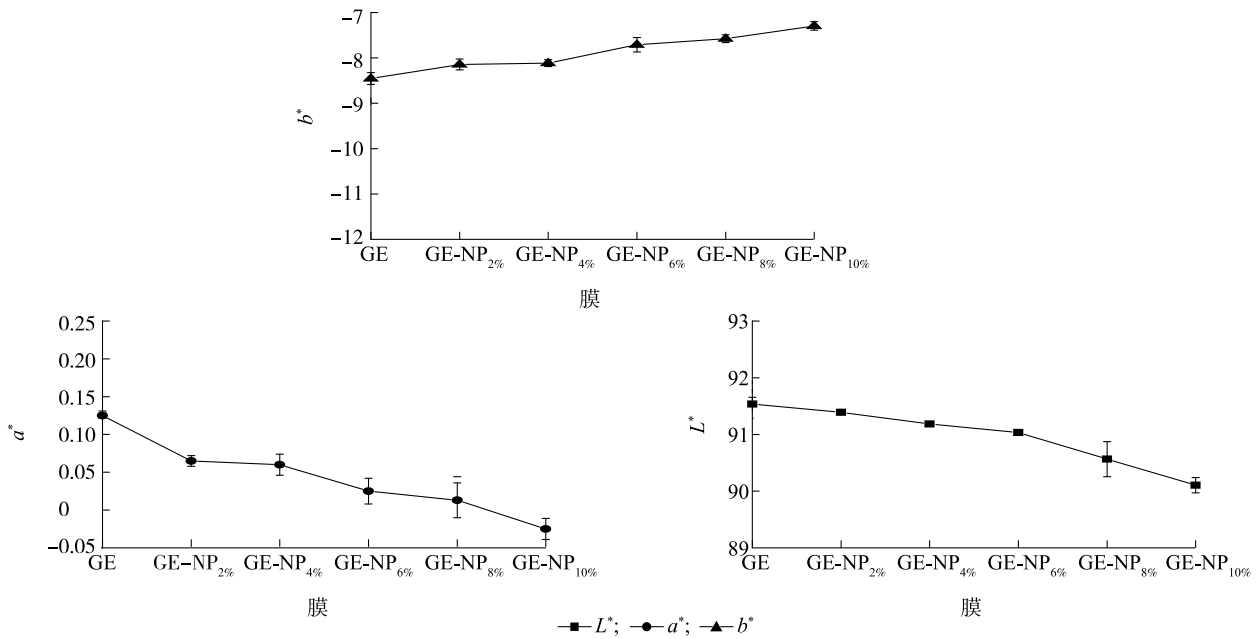
## 2.5 GE-NP 复合膜的可见光与紫外线阻隔性能分析

如图 4 所示,明胶膜、GE-NP<sub>2%</sub> 复合膜、GE-NP<sub>4%</sub>

复合膜、GE-NP<sub>6%</sub> 复合膜、GE-NP<sub>8%</sub> 复合膜、GE-NP<sub>10%</sub> 复合膜对紫外光(200~400 nm)和可见光(400~500 nm)的透过率差异较小,所有膜的可见光透过率均超过 85%。在紫外线照射下,食品容易发生脂质氧化和营养成分流失,因此阻隔紫外线是食品包装膜的重要功能。明胶膜、GE-NP<sub>2%</sub> 复合膜、GE-NP<sub>4%</sub> 复合膜、GE-NP<sub>6%</sub> 复合膜、GE-NP<sub>8%</sub> 复合膜、GE-NP<sub>10%</sub> 复合膜对 UVC 的阻隔率均无显著差异( $P > 0.05$ )。GE-NP<sub>4%</sub> 复合膜、GE-NP<sub>6%</sub> 复合膜、GE-NP<sub>8%</sub> 复合膜、GE-NP<sub>10%</sub> 复合膜对 UVB 和 UVA 的阻隔率均无显著差异( $P > 0.05$ )。

## 2.6 GE-NP 复合膜的氧气与水蒸气阻隔性能分析

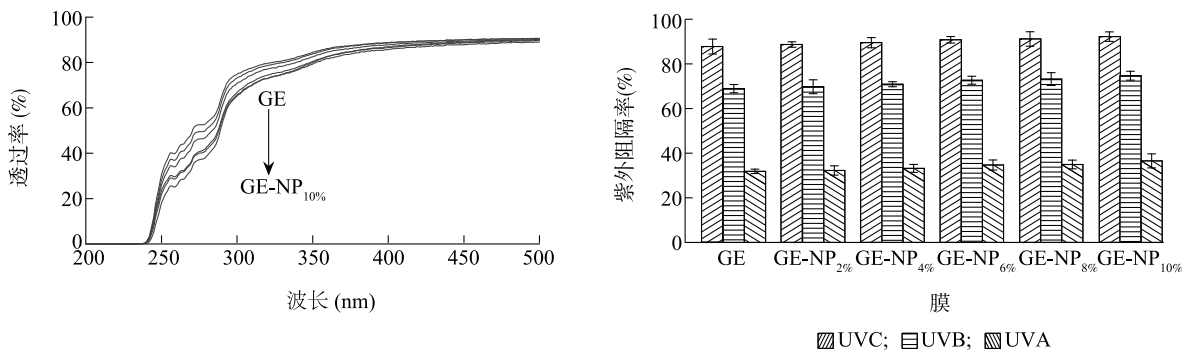
对氧气和水蒸气的阻隔性能是保鲜膜的重要性指标,保鲜膜良好的阻隔性能有助于抑制脂质氧化,延长食品货架期。如图 5A 所示,随着纳米粒子添加量的增加,GE-NP 复合膜的氧气透过率呈下降趋势。明胶膜的氧气透过率为  $6.45 \times 10^{-14} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ ,表明明胶膜对氧气的阻隔能力较弱。加入纳米离子的复合膜氧气透过率显著低于明胶膜( $P < 0.05$ )。GE-NP<sub>8%</sub> 复合膜的氧气透过率和 GE-NP<sub>10%</sub> 复合膜相比无显著差异。水蒸气透过率为单位时间通过单位面积薄膜的水蒸气量,常用于评价薄膜对水蒸气的阻隔性能。如图 5B 所示。随着纳米粒子添加量的增加,GE-NP 复合膜的水蒸气透过率呈下降趋势。明胶膜的水蒸气透过率为  $3.65 \times 10^{-12} \text{ g} \cdot \text{cm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ 。GE-NP<sub>8%</sub> 复合



GE:明胶膜;GE-NP<sub>2%</sub>:明胶-2%纳米粒子复合膜;GE-NP<sub>4%</sub>:明胶-4%纳米粒子复合膜;GE-NP<sub>6%</sub>:明胶-6%纳米粒子复合膜;GE-NP<sub>8%</sub>:明胶-8%纳米粒子复合膜;GE-NP<sub>10%</sub>:明胶-10%纳米粒子复合膜。 $L^*$ :亮度; $a^*$ :红绿值; $b^*$ :黄蓝值。

图3 GE-NP复合膜的色差仪参数

Fig.3 The colorimeter parameters of gelatin-nanoparticle (GE-NP) composite films



GE:明胶膜;GE-NP<sub>2%</sub>:明胶-2%纳米粒子复合膜;GE-NP<sub>4%</sub>:明胶-4%纳米粒子复合膜;GE-NP<sub>6%</sub>:明胶-6%纳米粒子复合膜;GE-NP<sub>8%</sub>:明胶-8%纳米粒子复合膜;GE-NP<sub>10%</sub>:明胶-10%纳米粒子复合膜。UVA:长波紫外线;UVB:中波紫外线;UVC:短波紫外线。同一波长紫外线柱柱上不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

图4 GE-NP复合膜的可见光与紫外线阻隔性能

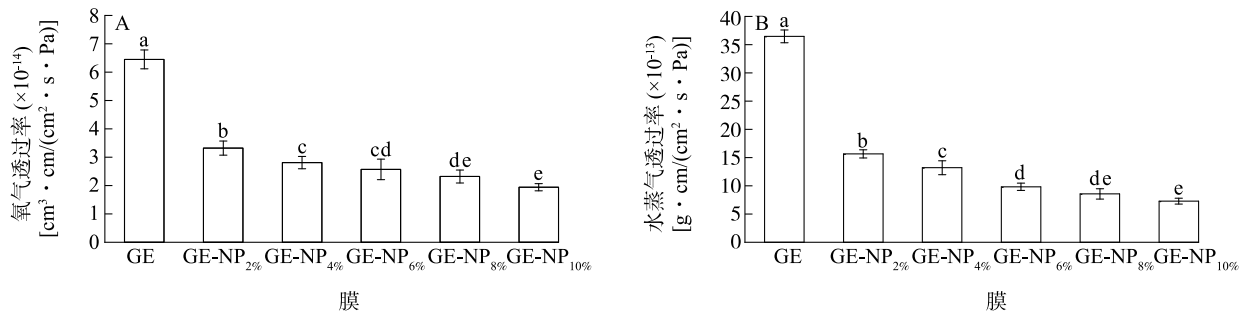
Fig.4 The visible light and ultraviolet barrier performance of gelatin-nanoparticle (GE-NP) composite films

膜的水蒸气透过率和 GE-NP<sub>10%</sub> 复合膜相比无显著差异。纳米离子改善了复合膜对氧气和水蒸气的阻隔性能,这主要是因为复合膜的自由体积降低,分子扩散路径减少<sup>[25]</sup>;聚合物网络物理交联密度的提升增强了网络强度,同时限制了聚合物分子链的运动,从而使分子扩散路径更为曲折<sup>[26]</sup>。

### 2.7 GE-NP 复合膜的抑菌性能分析

包装薄膜良好的抑菌效果能够延长食品保质期

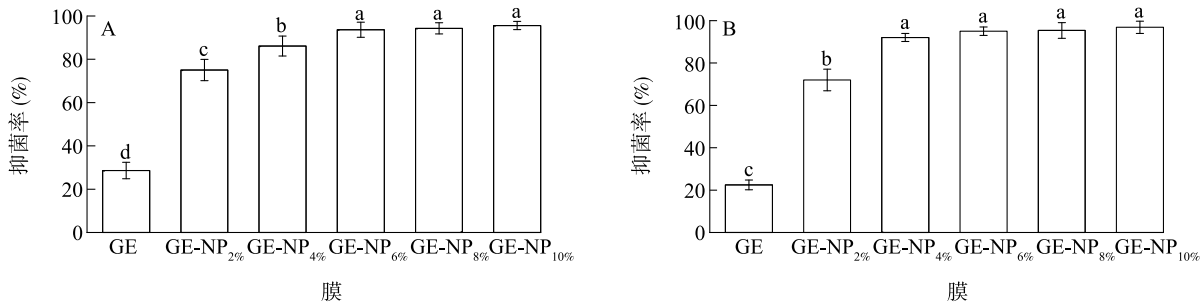
和货架期。如图 6 所示。随着纳米粒子添加量的增加,GE-NP 复合膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌率呈上升趋势。其中,GE-NP<sub>6%</sub> 复合膜、GE-NP<sub>8%</sub> 复合膜、GE-NP<sub>10%</sub> 复合膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌率均>90%。GE-NP<sub>6%</sub> 复合膜、GE-NP<sub>8%</sub> 复合膜、GE-NP<sub>10%</sub> 复合膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌率无显著差异( $P > 0.05$ )。GE-NP 复合膜的抑菌活性来源于纳米粒子中的活性物质



GE:明胶膜;GE-NP<sub>2%</sub>:明胶-2%纳米粒子复合膜;GE-NP<sub>4%</sub>:明胶-4%纳米粒子复合膜;GE-NP<sub>6%</sub>:明胶-6%纳米粒子复合膜;GE-NP<sub>8%</sub>:明胶-8%纳米粒子复合膜;GE-NP<sub>10%</sub>:明胶-10%纳米粒子复合膜。

图5 GE-NP复合膜的氧气透过率和水蒸气透过率

Fig.5 The oxygen permeability and water vapor permeability of gelatin-nanoparticle (GE-NP) composite films



A:大肠杆菌;B:金黄色葡萄球菌。GE:明胶膜;GE-NP<sub>2%</sub>:明胶-2%纳米粒子复合膜;GE-NP<sub>4%</sub>:明胶-4%纳米粒子复合膜;GE-NP<sub>6%</sub>:明胶-6%纳米粒子复合膜;GE-NP<sub>8%</sub>:明胶-8%纳米粒子复合膜;GE-NP<sub>10%</sub>:明胶-10%纳米粒子复合膜。

图6 GE-NP复合膜的抑菌率

Fig.6 The antibacterial rate of gelatin-nanoparticle (GE-NP) composite films

DL-3-苯乳酸,DL-3-苯乳酸能够干扰微生物的生理代谢活动,阻碍DNA复制,从而抑制微生物数量的增长<sup>[27]</sup>。综合考虑力学性能、阻隔性能、抑菌性能和颜色,选取明胶-8%纳米粒子作为最佳配比,进一步评估GE-NP<sub>8%</sub>复合膜对冷藏鱼肉的保鲜效果。

## 2.8 不同保鲜膜对鱼肉的保鲜作用分析

通过贮藏期鱼肉的色泽变化可以评估鱼肉的新鲜度。如表2所示,第0d,新鲜鱼肉的 $L^*$ 值为 $61.79 \pm 3.91$ 。贮藏10d后,对照和PE处理鱼肉 $L^*$ 值分别下降9.79%和13.80%,GE处理和GE-NP<sub>8%</sub>处理鱼肉 $L^*$ 值分别下降1.70%和3.20%。第0d新鲜鱼肉的 $a^*$ 值和 $b^*$ 值分别为 $-2.74 \pm 0.29$ 和 $1.21 \pm 0.16$ ,这表明新鲜鱼肉的色泽偏绿和偏黄。然而,贮藏10d后,GE-NP<sub>8%</sub>处理鱼肉 $a^*$ 值和 $b^*$ 值和新鲜鱼肉的差异较小,GE-NP<sub>8%</sub>处理鱼肉 $a^*$ 值和 $b^*$ 值均显著低于对照( $P < 0.05$ )。这是因为GE-NP<sub>8%</sub>复合膜具有一定的吸水性,能够吸收鱼肉周围

环境的水分,从而抑制微生物的活动,使鱼肉色泽保持较好。

贮藏过程中,由于微生物和内源酶的作用,蛋白质被逐步分解,鱼肉中碱性含氮化合物(氨、三甲胺、组胺等)不断积累<sup>[28-29]</sup>,导致鱼肉的pH值升高,因此pH值可以作为衡量鱼肉新鲜程度的重要指标。如图7A所示,新鲜鱼肉的pH值为 $6.62 \pm 0.03$ ,与Wu等<sup>[30]</sup>的研究结果相似。随着贮藏时间的延长,各处理鱼肉的pH均呈上升趋势。贮藏10d后,对照、PE处理、GE处理和GE-NP<sub>8%</sub>处理鱼肉pH值分别提高了0.91、0.70、0.62和0.41。GE-NP<sub>8%</sub>处理鱼肉的pH值显著低于对照、PE处理和GE处理,表明GE-NP<sub>8%</sub>复合膜能有效抑制微生物的生长,从而保持鱼肉的品质。

挥发性盐基氮含量(TVB-N)是评估水产品新鲜度的重要指标,其含量越高表明腐败程度越高。根据相关标准,水产品的挥发性盐基氮含量应≤

0.200 0 mg/g<sup>[31]</sup>。如图 7B 所示,新鲜草鱼的 TVB-N 约为 0.067 3 mg/g,各处理鱼肉的 TVB-N 随贮藏时间的延长呈上升趋势。随着贮藏时间的延长,对照鱼肉的 TVB-N 从(0.067 3±0.003 2) mg/g(第 0 d)上升到(0.526 8±0.022 1) mg/g(第 10 d)。在第 8 d 时,CK 处理、PE 处理和 GE 处理鱼肉的 TVB-N 均

超过 0.200 0 mg/g,表明鱼肉已经腐败变质。贮藏 10 d 后,GE-NP<sub>8%</sub> 处理鱼肉 TVB-N 为(0.172 9±0.016 2) mg/g,低于 0.200 0 mg/g。这是因为 GE-NP<sub>8%</sub> 复合膜贮藏时能够阻隔氧气,降低鱼肉中内源酶的活性<sup>[32]</sup>;同时 GE-NP<sub>8%</sub> 复合膜的抗菌活性可以有效抑制微生物的生长,从而延缓蛋白质的分解。

表 2 鱼肉在贮藏期间的颜色变化

Table 2 The color changes of fish meat during storage

项目	贮藏时间(d)	CK	PE	GE	GE-NP <sub>8%</sub>
<i>L</i> *	0	61.79±3.91a	61.79±3.91a	61.79±3.91a	61.79±3.91a
	10	55.74±6.47a	53.26±1.80a	60.74±3.56a	59.81±2.17a
<i>a</i> *	0	-2.74±0.29c	-2.74±0.29c	-2.74±0.29c	-2.74±0.29c
	10	3.08±1.02a	1.79±0.13ab	2.03±1.37a	-0.65±1.41bc
<i>b</i> *	0	1.21±0.16a	1.21±0.16a	1.21±0.16a	1.21±0.16a
	10	12.71±4.32a	9.76±3.07ab	7.28±2.68abc	5.16±1.09bc
$\Delta E$		14.24±2.94	12.89±3.18	7.71±2.09	3.77±1.87

CK:未使用保鲜膜,对照;PE:聚乙烯膜;GE:明胶膜;GE-NP<sub>8%</sub>:明胶-8%纳米粒子复合膜。*L*\*:亮度;*a*\*:红绿值;*b*\*:黄蓝值; $\Delta E$ :色差。同一列数据后不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

鱼肉中的脂质易氧化,导致风味变差和营养损失。自氧化是鱼类脂质氧化的主要形式,通过阻断氧气可以有效抑制这一过程<sup>[33]</sup>。此外,嗜冷菌也会导致游离脂肪酸增加,进而加剧脂质的氧化<sup>[34]</sup>。硫代巴比妥酸含量(*TBA*)是评估鱼类脂质氧化程度的重要指标<sup>[35-36]</sup>。如图 7C 所示,新鲜鱼肉的 *TBA* 为(0.19±0.01) mg/kg,表明其脂肪氧化程度极低。各处理鱼肉的 *TBA* 随贮藏时间延长呈上升趋势,GE-NP<sub>8%</sub> 处理鱼肉的 *TBA* 上升最为缓慢。贮藏第 10 d,GE-NP<sub>8%</sub> 处理鱼肉的 *TBA* 显著低于对照、PE 处理和 GE 处理( $P<0.05$ )。这主要是因为 GE-NP<sub>8%</sub> 复合膜具有优异的氧气阻隔性能,可以有效抑制鱼肉的自氧化;纳米粒子中负载的 DL-3-苯乳酸可以抑制嗜冷菌的生长,减少游离脂肪酸的产生,从而降低鱼肉的氧化程度。

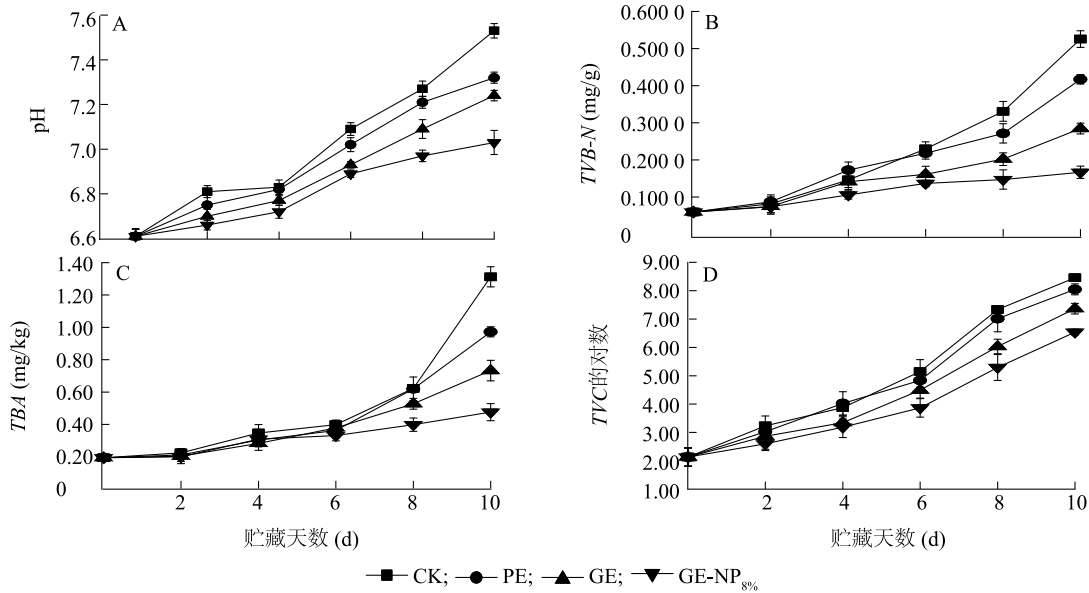
鱼肉中富含蛋白质和水分,极易滋生细菌导致鱼肉腐败变质。菌落总数(*TVC*)可以直接反映鱼肉的新鲜程度,是评价鱼肉品质安全的决定性指标<sup>[37]</sup>。根据国标 GB 4789.2-2022 要求,水产品中 *TVC* 的对数应 $<7.00$ 。如图 7D 所示,新鲜鱼肉的 *TVC* 的对数为 2.13±0.32,细菌主要来源于草鱼宰杀和切割过程中的污染。对照、PE 处理鱼肉 *TVC* 随贮藏时间延长呈上升趋势。贮藏第 10 d,对照、PE 处理、GE 处理鱼肉的 *TVC* 的对数分别达到 7.33±

0.12、7.01±0.46、7.37±0.18,均超过国家标准,表明鱼肉已腐败变质,不可食用。贮藏第 10 d,GE-NP<sub>8%</sub> 处理鱼肉的 *TVC* 的对数 $<7.00$ ,表明 GE-NP<sub>8%</sub> 处理可以将鱼肉的货架期延长至 10 d 以上。这是因为 GE-NP<sub>8%</sub> 复合膜阻隔性能较好,能够减少氧气和水蒸汽透过率,从而抑制微生物的生理活动<sup>[38]</sup>。此外,GE-NP<sub>8%</sub> 复合膜中的 DL-3-苯乳酸具有广谱抑菌活性,能够有效抑制腐败菌的生长,延缓鱼肉的腐败变质<sup>[39]</sup>。

质构参数是评价食品品质的重要指标。如图 8 所示,鱼肉硬度、弹性、胶黏性、咀嚼性等质构参数随贮藏时间的延长呈下降趋势。硬度是使鱼肉达到一定形变所需施加的力,能够直接反映鱼肉质量和口感。贮藏 10 d 后,对照、PE 处理和 GE 处理鱼肉的硬度分别下降 93.56%、87.02%、80.88%。然而,GE-NP<sub>8%</sub> 处理鱼肉的硬度仅下降 71.34%,表明 GE-NP<sub>8%</sub> 复合膜可以延缓鱼肉的腐败变质。弹性指去除外力后鱼肉的形变恢复能力,鱼肉的弹性与弹性蛋白、肌红蛋白的伸缩性有关<sup>[40]</sup>。新鲜鱼肉的弹性为(5.63±0.21) mm。贮藏 10 d 后,对照鱼肉的弹性降低至(0.76±0.26) mm,而 PE 处理、GE 处理和 GE-NP<sub>10%</sub> 处理鱼肉的弹性分别降低至(0.93±0.44) mm、(1.20±0.30) mm 和(1.46±0.15) mm。贮藏 10 d 后,对照、PE

处理、GE 处理和 GE-NP<sub>8%</sub> 处理鱼肉的胶黏性分别下降了 95.64%、88.84%、74.14%、69.45%。咀嚼性是指咀嚼食物至可吞咽状态时所需的能量,良好的咀嚼性能显著提升食用体验。咀嚼性与硬

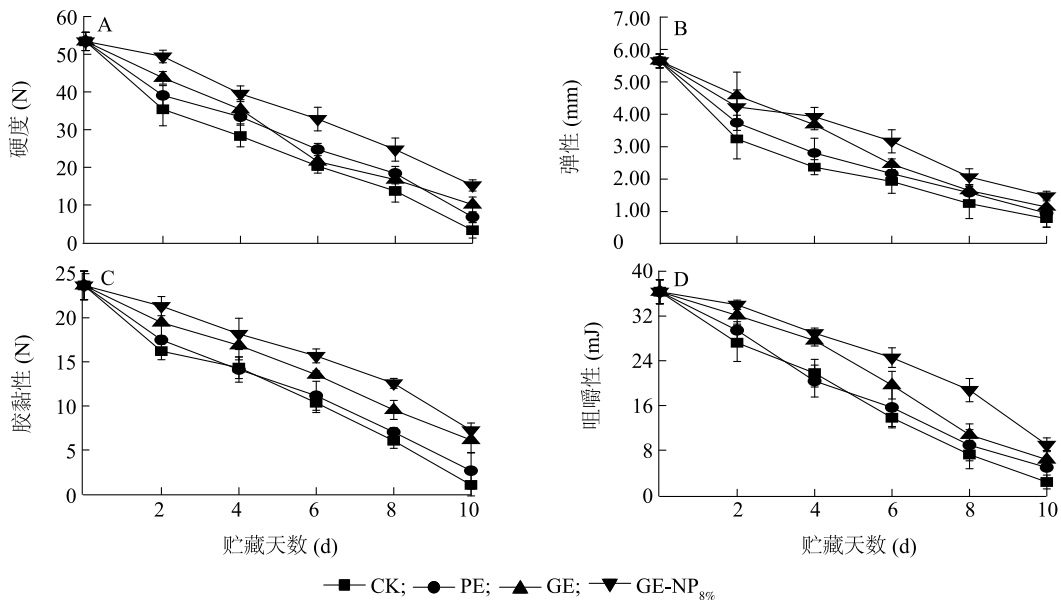
度、弹性呈正相关。随着贮藏时间的延长,CK、PE、GE 处理和 GE 处理鱼肉的咀嚼性迅速下降。而 GE-NP<sub>8%</sub> 复合膜能够有效延缓鱼肉咀嚼性的下降。



CK:未使用保鲜膜对照;PE:商用聚乙烯膜;GE:明胶膜;GE-NP<sub>8%</sub>:明胶-8%纳米粒子复合膜。TVB-N:挥发性盐基氮含量;TBA:硫代巴比妥酸含量;TVC:菌落总数。

图 7 贮藏期间草鱼鱼肉 pH 值 (A)、挥发性盐基氮含量 (B)、硫代巴比妥酸含量 (C) 和菌落总数 (D) 的变化

Fig.7 The changes in pH value (A), total volatile basic nitrogen content (B), thiobarbituric acid content (C), and total viable count (D) of grass carp fillets during storage



CK:未使用保鲜膜对照;PE:聚乙烯膜;GE:明胶膜;GE-NP<sub>8%</sub>:明胶-8%纳米粒子复合膜。

图 8 贮藏期间草鱼鱼肉硬度 (A)、弹性 (B)、胶黏性 (C) 和咀嚼性 (D) 的变化

Fig.8 The changes in hardness (A), springiness (B), cohesiveness (C), and chewiness (D) of grass carp fillets during storage

### 3 结 论

本研究将负载 DL-3-苯乳酸的壳聚糖纳米粒子 (NP) 添加至明胶 (GE) 基体中, 制成明胶-纳米粒子复合膜 (GE-NP), 其中, DL-3-苯乳酸具有抗菌活性, 可以提高明胶-纳米粒子复合膜的抑菌率。综合考虑力学性能、紫外线阻隔性能、氧气阻隔性能、水蒸气阻隔性和抑菌性能, 明胶-8% 纳米粒子复合膜 (GE-NP<sub>8%</sub>) 的性能最佳。通过低场核磁共振和变场核磁共振分析发现, 纳米粒子与明胶分子之间的相互作用增强了 GE-NP<sub>8%</sub> 复合膜的交联强度, 减小了自由体积, 使其结构更加致密。鱼肉保鲜试验中, 贮藏第 10 d, GE-NP<sub>8%</sub> 处理鱼肉红绿值 ( $a^*$ ) 和黄蓝值 ( $b^*$ ) 与新鲜鱼肉的差异较小。贮藏第 10 d, 与聚乙烯膜处理、明胶膜处理相比, GE-NP<sub>8%</sub> 处理鱼肉 pH 值、挥发性盐基氮含量 (TVB-N)、硫代巴比妥酸含量 (TBA)、菌落总数 (TVC) 上升幅度较小, 同时鱼肉硬度、弹性、胶黏性、咀嚼性等质构参数下降幅度较小。综上, GE-NP<sub>8%</sub> 复合膜可有效减缓鱼肉的品质劣变, 延长其货架期。本研究为延长水产品保质期及保持其品质提供理论依据和技术支持。

#### 参考文献:

- [1] YE B B, CHEN J, FU L L, et al. Application of nondestructive evaluation (NDE) technologies throughout cold chain logistics of seafood: classification, innovations and research trends [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 158: 113127.
- [2] 赵思琪, 张 浪, 刘 骞, 等. 天然抗菌剂纳米乳液的制备、抑菌机理及在肉类保鲜中的应用研究进展 [J]. *肉类研究*, 2022, 36(4): 48-56.
- [3] 郑科旺, 余晓华, 黄明军, 等. 可食性壳聚糖包装膜的制备及性能 [J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(21): 232-235.
- [4] 胡 燕, 邹 建, 袁晓晴. 响应面法优化脱乙酰魔芋葡甘聚糖/ $\kappa$ -卡拉胶可食性膜的制备工艺 [J]. *江苏农业学报*, 2020, 36(4): 1041-1048.
- [5] MOHAMED S A A, EL-SAKHAWY M, EL-SAKHAWY M A M. Polysaccharides, protein and lipid-based natural edible films in food packaging: a review [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 238: 116178.
- [6] CHEN J W, LI Y X, WANG Y F, et al. Active polylactic acid/ti-lapia fish gelatin-sodium alginate bilayer films: application in preservation of Japanese sea bass (*Lateolabrax japonicus*) [J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2022, 33: 100915.
- [7] LIU Y, KAI Y, YANG H S. Biodegradable fish gelatin/chitosan-based active films alter chill-stored golden pomfret (*Trachinotus blochii*) metabolites mainly through modulating four metabolic pathways [J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2023, 36: 101046.
- [8] 付瑞敏, 杨 雪, 夏铁骑, 等. 一种新型生物活性膜的制备及对鲜切苹果的保鲜效果 [J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(11): 182-189.
- [9] ZHANG Q, BU Q H, XIA J Y, et al. High-performance, degradable, self-healing bio-based nanocomposite coatings with antibacterial and antioxidant properties [J]. *Nanomaterials*, 2023, 13(7): 1220.
- [10] ROY S, RHIM J W, JAISWAL L. Bioactive agar-based functional composite film incorporated with copper sulfide nanoparticles [J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 93: 156-166.
- [11] LURIE D J, AIME S, BARONI S, et al. Fast field-cycling magnetic resonance imaging [J]. *Comptes Rendus Physique*, 2010, 11(2): 136-148.
- [12] 缪函霖, 包海蓉, 赵路漫. 金枪鱼肉冷藏过程中理化特性的变化 [J]. *江苏农业科学*, 2013, 41(8): 248-251.
- [13] 郭全友, 王锡昌, 姜朝军, 等. 养殖尼罗罗非鱼鲜度特征及动力学模型构建 [J]. *食品科学*, 2013, 34(4): 245-249.
- [14] 吴海虹, 金碧茹, 张新笑, 等. 烫漂后速冻和直接速冻对青虾品质的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(14): 164-168.
- [15] 杨晴晴, 陈 悦, 李 伟, 等. 菲律宾蛤仔凝集素在小黄鱼保鲜中的应用研究 [J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(20): 219-221.
- [16] 张曦鹏, 蒋中权, 郭全友, 等. 水分含量对轻腌大黄鱼贮藏期间细菌菌相和风味特征的影响 [J]. *食品科学*, 2024, 45(8): 210-217.
- [17] 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-x*, 2022, 13: 100256.
- [18] ALMESHARI M, SALLAM F H, THARWAT M, et al. Preparation and structure investigation of polyethylene terephthalate polyester reinforced Ni<sub>0.5</sub>Zn<sub>0.5</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles for gamma ray shielding performance [J]. *Physica Scripta*, 2024, 99(5): 055311.
- [19] WANG P K, WANG Y, HONG P Z, et al. Di-aldehyde starch crystal: a novel bio-crosslinker for strengthening the structure and physio-chemical properties of gelatin-based films [J]. *Food Bioscience*, 2021, 43: 101308.
- [20] HUANG X, ZHOU X, DAI Q Y, et al. Antibacterial, antioxidant, UV-blocking, and biodegradable soy protein isolate food packaging film with mangosteen peel extract and ZnO nanoparticles [J]. *Nanomaterials*, 2022, 11(12): 3337.
- [21] DENG L L, LI Y, ZHANG A P, et al. Characterization and physical properties of electrospun gelatin nanofibrous films by incorporation of nano-hydroxyapatite [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 103: 105640.
- [22] TIAN Z L, HOU L, FENG D D, et al. Modulating the coordination environment of lithium bonds for high performance polymer electrolyte batteries [J]. *ACS Nano*, 2023, 17(4): 3786-3796.
- [23] KUAI L Y, LIU F, MA Y, et al. Regulation of nano-encapsulated tea polyphenol release from gelatin films with different bloom val-

- ues[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 108: 106045.
- [24] 史强,周芳芳,潘铭楷,等. 没食子酸对豆腐柴果胶可食膜的影响研究[J]. *合肥工业大学学报*, 2023, 46(10): 1423-1429.
- [25] LIU S T, QIAO S H, ZHU J C, et al. Enhanced barrier and antioxidant properties of gelatin films by structural-colored bioactive materials for food packaging[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 150: 109744.
- [26] ZHANG L M, YU D W, GU Y L, et al. Green halochromic smart and active packaging materials based on chitosan film loading nanoparticles: functionality, physicochemical properties and application[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 150: 109667.
- [27] NING Y W, YAN A H, YANG K, et al. Antibacterial activity of phenyllactic acid against *Listeria monocytogenes* and *Escherichia coli* by dual mechanisms[J]. *Food Chemistry*, 2017, 228: 533-540.
- [28] 李超,王道营,卞欢,等. 肉鸭屠宰加工过程中色泽、剪切力、pH值及保水性的变化[J]. *江苏农业学报*, 2011, 27(4): 868-871.
- [29] 仪淑敏,张诗雯,叶贝贝,等. 复合生物保鲜剂对金线鱼鱼肉肠的保鲜作用[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(4): 226-231.
- [30] WU J L, SONG G J, HUANG R Y, et al. Fish gelatin films incorporated with cinnamaldehyde and its sulfobutyl ether- $\beta$ -cyclodextrin inclusion complex and their application in fish preservation[J]. *Food Chemistry*, 2023, 418: 135871.
- [31] 苗麒,曲映红,周惠敏,等. 不同贮藏温度下鳊鱼、南美白对虾和花蛤生物胺的比较分析[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(6): 63-71.
- [32] KANATT S R. Development of active/intelligent food packaging film containing *Amaranthus* leaf extract for shelf life extension of chicken/fish during chilled storage[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2020, 24: 100506.
- [33] NIE X B, ZHANG R C, CHENG L L, et al. Mechanisms underlying the deterioration of fish quality after harvest and methods of preservation[J]. *Food Control*, 2022, 135: 108805.
- [34] AHMAD M, BENJAKUL S, SUMPAPAPOL P, et al. Quality changes of sea bass slices wrapped with gelatin film incorporated with lemongrass essential oil[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2012, 155: 171-178.
- [35] 卞欢,张新笑,闫征,等. 不同高温杀菌条件对酱卤猪蹄品质的影响[J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(7): 184-188.
- [36] 杨辉,杨福馨,欧丽娟,等. 植物精油-EVOH活性包装膜对草鱼鱼肉保鲜效果的研究[J]. *食品科学*, 2014, 35(22): 320-324.
- [37] 李鹏,黄琴,东峰丽,等. 罗非鱼鱼鳞明胶涂膜对冷藏罗非鱼鱼片的保鲜[J]. *食品工业*, 2014, 35(2): 11-15.
- [38] 张玲,马月,罗永康,等. 鲢鱼皮改性明胶复合多肽锌对草鱼的保鲜作用[J]. *食品科学*, 2016, 37(14): 231-236.
- [39] 黄佳璐,李美锦,陈亚楠,等. EVOH-植酸复合活性包装膜对鲈鱼肉的保鲜效果[J]. *现代食品科技*, 2023, 39(4): 146-153.
- [40] 邓雅心,胡广地,孙翰昌,等. 山苍子精油/壳聚糖涂膜保鲜对黄颡鱼贮藏品质的影响[J]. *食品科技*, 2024, 49(3): 125-132.

(责任编辑:成纾寒)