DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260602003
引用格式: 王峰, 魏秋妍, 祁霖, 等. pH 敏感型明胶/琼脂基复合凝胶型包装膜的开发与应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(14): 247–255.
Wang Feng, Wei Qiuyan, Qi Lin, et al. Development and application of pH-sensitive gelatin/agar-based composite gel packaging films [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(14): 247–255. (in Chinese with English abstract).

pH 敏感型明胶/琼脂基复合凝胶型包装膜的开发与应用

王 峰[1*], 魏秋妍[2], 祁 霖[2], 刘 柳[2], 田凯乐[1], 郭王钊[1], 夏 飞[1]
(1. 西安市产品质量监督检验院, 西安 710068; 2. 陕西师范大学食品工程与营养科学学院, 西安 710119)

摘 要: 目的 开发一种能够保鲜且可以对新鲜度进行可视化监测的新型复合凝胶型包装膜。**方法** 利用碳二亚胺法将阿魏酸共价接枝到羧甲基壳聚糖(carboxymethyl chitosan, CMCS)骨架上, 合成羧甲基壳聚糖/阿魏酸接枝共聚物(carboxymethyl chitosan-graft-ferulic acid copolymer, CMCS-*g*-FA), 以明胶和琼脂为成膜基质, 在低于 40 ℃条件下引入 CMCS-*g*-FA 及花青素, 通过流延法制备复合膜。采用傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)分析膜的化学结构, 利用质构仪测定其物理机械性能, 并通过测定挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)、菌落总数、pH、汁液流失率及感官评价, 评估其在鸡肉保鲜中的应用效果。**结果** FTIR 分析表明 CMCS 与阿魏酸接枝成功, CMCS-*g*-FA 和花青素能够与明胶/琼脂基质形成稳定的复合膜结构。添加 CMCS-*g*-FA 和花青素的复合膜综合性能最佳, 其抗拉强度显著提升至 10.410 MPa, 断裂伸长率为 35.367%, 水分含量和水溶解性分别为 13.21%和 39.67%, 此组抑制了鸡肉中微生物的生长及 TVB-N 的积累, 随着贮藏时间延长, 鸡肉 TVB-N 由初始的 4.3 mg/100 g 上升至第 6 d 的 23.36 mg/100 g, 但对比未做保鲜措施的对照组 TVB-N 低 18.83 mg/100 g, 并且 pH 同时也发生相应变化, 表现了鸡肉从新鲜到腐败的各个阶段。**结论** 本研究成功开发了一种具有增强机械性能和保鲜功能的智能包装膜, 该膜不仅能实现对禽肉类食品新鲜度的可视化监测, 还能有效延长货架期, 为复合凝胶型包装材料的开发提供了新思路。

关键词: 智能包装膜; 鸡肉保鲜; 羧甲基壳聚糖; 阿魏酸; 花青素
中图分类号: R155.5 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)14–0247–09

Development and application of pH-sensitive gelatin/agar-based composite gel packaging films

WANG Feng[1*], WEI Qiu-Yan[2], QI Lin[2], LIU Liu[2], TIAN Kai-Le[1], GUO Wang-Zhao[1], XIA Fei[1]
(1. *Xi'an Supervision & Inspection Institute of Product Quality*, *Xi'an* 710068, *China*; 2. *College of Food Engineering and Nutritional Science*, *Shaanxi Normal University*, *Xi'an* 710119, *China*)

ABSTRACT: Objective To develop a novel composite gel packaging film capable of food preservation and visual freshness monitoring. **Methods** Ferulic acid was covalently grafted onto the backbone of carboxymethyl chitosan

收稿日期: 2026-06-02
基金项目: 西安市科技计划项目(24NYGG0111)
第一作者/*通信作者: 王峰(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为食品安全分析技术。E-mail: 50263841@qq.com

(CMCS) using the carbodiimide method to synthesize a carboxymethyl chitosan-graft-ferulic acid copolymer (CMCS-*g*-FA). Gelatin and agar were used as the film-forming matrix, and CMCS-*g*-FA together with anthocyanins was incorporated into the matrix at temperatures below 40 ℃. Finally, the composite film was prepared by the solution casting method. The chemical structure of the films was characterized by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and their mechanical properties were determined using a texture analyzer. Furthermore, its application efficacy in chicken preservation was evaluated by measuring total volatile basic nitrogen (TVB-N), total viable count, pH , drip loss and conducting sensory evaluation. **Results** FTIR analysis indicated the successful grafting of CMCS with ferulic acid, and CMCS-*g*-FA together with anthocyanins could form a stable composite film structure with the gelatin/agar matrix. The composite film incorporated with CMCS-*g*-FA and anthocyanins exhibited optimal comprehensive properties. Specifically, its tensile strength significantly increased to 10.410 MPa, the elongation at break was 35.367%, and the moisture content and water solubility were 13.21% and 39.67%, respectively. Moreover, this film effectively inhibited microbial growth and TVB-N accumulation in chicken meat. With prolonged storage time, the TVB-N value of the treated chicken increased from the initial 4.3 mg/100 g to 23.36 mg/100 g on the 6th day, which was 18.83 mg/100 g lower than that of the blank control group without preservation measures. Additionally, the pH also showed corresponding changes, reflecting the various stages of chicken meat from freshness to spoilage. **Conclusion** This study successfully develops an intelligent packaging film with enhanced mechanical properties and preservation functions. The film can not only visually monitor the freshness of poultry meat products but also effectively extend their shelf life, providing a novel approach for the development of composite gel-type packaging materials.

KEY WORDS: intelligent packaging film; chicken preservation; carboxymethyl chitosan; ferulic acid; anthocyanins

0 引 言

随着公众对食品的安全意识及对绿色无添加食品需求的提升，传统包装已难以匹配现代食品工业的发展预期。鸡肉是全球消耗量最大的肉类之一，而我国作为鸡肉的重要生产国和消费国[1]，实现生鲜鸡肉的保鲜包装与安全控制是食品行业关注的重点。在此背景下，能够兼具保鲜与指示功能的肉类智能包装材料逐渐成为研究热点，被视为实现绿色包装转型的关键路径。明胶/琼脂成膜体系凭借出色的生物相容性及结构稳定性，在食品包装膜中常作为成膜基质出现，但由于抗菌抗氧化等性能有限，需要进一步引入功能性组分进行改性。其中，花青素作为一种广泛分布于植物界的水溶性天然色素，凭借其卓越的抗氧化活性、自由基清除能力及抗突变特性，不仅能够作为 pH 敏感型指示剂监测食品新鲜度，还具备延缓食品腐败的作用，所以被广泛用于食品新鲜度监测研究中[2−5]。此外，已有研究将花青素与明胶、壳聚糖、琼脂、聚乙烯醇、玉米醇溶蛋白等成膜基材复合，用于构建pH敏感型智能指示膜，并在一定程度上实现了食品新鲜度的可视化监测[6−8]。尽管如此，现有的添加花青素的智能包装膜仍存在一些不足，例如花青素在膜基质中的稳定性和分散性有限，部分膜材料机械性能和耐水性不足。因此，在明胶/琼脂成膜体系中引入具有良好水溶性和功能活性的改性组分，是提升复合膜综合性能的重要途径。有研究显示，与普通壳聚糖相比，羧甲基壳聚糖(carboxymethyl chitosan, CMCS)具有较好的水溶性，便于在水相体系中进行改性及成膜应用，可以改善复合膜的结构稳定性[9]，CMCS 和阿魏酸接枝后可进一步增强抗氧化和抑菌能力，提高复合膜的保鲜性能[10]。因此，以明胶/琼脂为基质结合花青素、CMCS 和阿魏酸构建复合凝胶型包装膜，有望实现保鲜功能与新鲜度可视化监测功能的协同提升。

基于上述现有研究不足，本研究选择生鲜鸡肉为研究对象，以明胶/琼脂作为主要成膜基质，引入羧甲基壳聚糖/阿魏酸接枝共聚物(carboxymethyl chitosan-graft-ferulic acid copolymer, CMCS-*g*-FA)和花青素，通过流延法制备复合膜，构建一种兼具保鲜与可视化监测功能的 pH 敏感型复合凝胶型包装膜，并对其结构特征、机械性能、颜色响应以及鸡肉贮藏过程中的保鲜和新鲜度监测能力进行评价，为禽肉类食品复合凝胶型包装材料的开发提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

鸡胸肉购于陕西省西安市长安区朱雀农产品批发市场。

花青素(5%~25%，上海麦克林生化科技股份有限公司)；羧甲基壳聚糖(羧甲基化≥80%)、2-(N-吗啉)乙磺酸(纯度≥99%)、N-羟基琥珀酰亚胺(纯度≥98%)、1-(3-二甲氨基丙基)-3-乙基碳二亚胺盐酸盐(纯度≥98%)、N,N-二甲基甲酰胺(纯度≥97%)、磷酸盐缓冲液(pH 6.5)[阿拉丁试剂

(上海)有限公司]; 阿魏酸(纯度为 98%, 上海阿达玛斯试剂有限公司); 无水碳酸钾、明胶(分析纯, 天津市鑫铂特化工有限公司); 琼脂粉(北京奥博星生物技术有限责任公司); 福林酚(分析纯, 西格玛奥德里奇公司); 氯化钾、无水碳酸钠(分析纯, 天津市天力化学试剂有限公司); 甘油(分析纯, 天津市富宇精细化工有限公司)。

1.2　仪器与设备

AX224ZH/E 分析天平[精密度为 0.1 mg, 奥豪斯仪器(常州)有限公司]; 79-2 双向磁力加热搅拌器(金坛市富华仪器有限公司); FD-1A-50 冷冻干燥机(北京博医康实验仪器有限公司); FD-1A-50 高速冷冻离心机(天美仪拓实验室设备有限公司); BCD-578WPU9CX 风冷冰箱(长虹美菱股份有限公司); Vortex-1 旋涡混匀仪(上海沪析实业有限公司); Tensor 27 傅里叶红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)仪(德国布鲁克公司); UV300 紫外分光光度计(上海仪迈仪器科技有限公司); TMS-Pro 纹理分析仪(美国食品技术公司); FiveEasy Plus pH 计[梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司]; NH310 便携式色差仪(广东三恩时科技有限公司); QQ-UP40-W 启沁纯水机(湖南启沁环保科技有限公司)。

1.3　实验方法

1.3.1　接枝共聚物的制备

采用碳二亚胺法合成 CMCS-*g*-FA。首先在冰水浴环境下把溶入适量乙醇的 5 mmol 阿魏酸与 10 mL N,N-二甲基甲酰胺/2-(N-吗啉)乙磺酸(1:9, *V*:*V*)混合均匀, 再向混合溶液中先后加入 5 mmol 1-(3-二甲氨基丙基)-3-乙基碳二亚胺盐酸盐和 5 mmol N-羟基琥珀酰亚胺, 在避光环境下持续活化反应 1 h。然后将得到的活化液加入到提前准备好的用 pH 6.5 磷酸盐缓冲液溶解后的 10 mmol CMCS 中, 继续保持在避光环境下连续磁力搅拌 18 h。最后将反应得到的混合液转移至透析袋中持续透析 72 h, 在 4 ℃、5000×*g* 条件下离心 5 min 达到去除不溶物目的, 将离心结束得到的上清液冷冻干燥后得到 CMCS-*g*-FA。

1.3.2　接枝共聚物接枝率测定

将上述制备的CMCS-*g*-FA溶于蒸馏水中配制成1 mg/mL的溶液, 取1.0 mL与2.5 mL福林酚试剂混匀后黑暗静置5 min。随后, 向反应液中加入 4 mL 7.5%的碳酸钠溶液, 用蒸馏水定容至 10 mL 后放置于 30 °C 环境 2 h。最后使用分光光度计在 760 nm 波长处测定反应液的吸光度值, 以阿魏酸为标准品建立标准曲线, 计算 CMCS-*g*-FA 的接枝率[11]。

1.3.3　复合凝胶型薄膜的制备

使用流延法制备薄膜, 首先分别配制 1 mg/mL 的 CMCS-*g*-FA 溶液和花青素溶液。将 1:1 (*m*:*m*)混合均匀的明胶与琼脂在 95 ℃纯水(1:50, *w*:*V*)中溶解, 再加入 30%甘油后搅拌。待溶液冷却至 40 ℃以下, 将上述配好的花青素溶液和 CMCS-*g*-FA 溶液加入上述溶液搅拌, 其中, 花青素溶液与 CMCS-*g*-FA 溶液的添加量分别占最终总溶剂体积的 5% (*V*:*V*)和 3% (*V*:*V*), 其余 92% (*V*:*V*)为水。将制得的膜溶液取 10 mL 倾倒于培养皿中干燥成膜, 膜凝固后将其剥离储存在 20 ℃、含饱和 K_2CO_3 溶液的干燥器中湿处理 48 h 后进行进一步实验。

1.3.4　复合凝胶型薄膜的性能测试

(1) CMCS-*g*-FA 和复合凝胶型薄膜的 FIRT 检测

使用红外光谱仪全反射模式进行 FIRT 检测, 在室温下进行扫描, 扫描范围 4000~400 cm^{-1}, 分辨率 4 cm^{-1}。

(2)复合凝胶型薄膜的机械性能

采用纹理分析仪测定薄膜的抗拉强度和断裂伸长率。薄膜样品夹地分离 4 cm, 变形速度 1 mm/s。使用千分尺对样品表面随机选择 6 个点测量厚度, 最终结果取平均值。首先, 将膜样品分别裁剪为 25 mm×25 mm 的正方形称重, 质量记为 m_1。然后, 将样品置于 105 ℃烘箱中脱水 24 h 后称重, 质量记为 m_2。最后, 将干燥后的膜样品完全浸没于蒸馏水中持续 24 h 后取出, 擦干膜样品表面水分后再次称重, 此时质量记为 m_3。水分含量和水溶解性计算如公式(1)和(2)所示:

$$\text{水分含量}/\% = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{水溶解性}/\% = \frac{m_2 - m_3}{m_2} \times 100\% \quad (2)$$

式中: m_1 为膜样品初始质量, g; m_2 为膜样品脱水后质量, g; m_3 为膜样品再次烘干后最终质量, g。

(3)复合凝胶型薄膜的颜色测定

利用便携式色差仪评估薄膜颜色参数。对色差仪进行黑白校准后, 在空白背景下分别对薄膜上、中、下、左、右 5 点的颜色参数进行测定。

1.3.5　鸡肉新鲜度监测

(1)样品处理

将购买的鸡胸肉剔除表面筋膜, 统一切割成约 20 g 形状相似的小块。新鲜鸡肉根据相同处理后随机分为 4 组, 单纯放在保鲜盒里的鸡肉为对照组 Co, 使用明胶/琼脂薄膜完全包裹的基质膜组为 Ga, 使用添加了花青素的明胶/琼脂膜完全包裹的组为 Ag, 使用添加了 CMCS-*g*-FA 和花青素的明胶/琼脂膜完全包裹的组为 Ng。将鸡肉样品储存在 4 ℃冰箱中, 分别于 0、2、4、6、8 d 取样, 对 3 组冷藏鸡胸肉的品质作出评价。

(2)鸡肉汁液流失率测定

将当天购买的新鲜鸡肉切成 2 cm×2 cm×2 cm 后进行称重, 放置一段时间后, 用滤纸吸干鸡肉表面水分, 进行二次称重。汁液流失率计算如公式(3)所示:

$$M/\% = \frac{w_1 - w_2}{w_1} \times 100\% \quad (3)$$

式中: M 为鸡肉汁液流失率, %; w_1 为鸡肉初始质量, g; w_2

为放置一段时间后的鸡肉质量, g。

(3)鸡肉 pH 测定

按 GB 5009.237—2016《食品安全国家标准 食品 pH 值的测定》方法, 取鸡肉将其切碎后放置烧杯中加入 0.1 mol/L 氯化钾溶液(1:10, *w*:*V*)使鸡肉均质化, 进行 pH 测定。

(4)鸡肉挥发性盐基氮测定

参考 GB 5009.228—2016《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》中的微量扩散法进行测定鸡肉挥发性盐基氮值(total volatile basic nitrogen, TVB-N)。

(5)鸡肉菌落总数测定

参考 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》中的方法进行测定。

(6)鸡肉感官评价

选择 10 名具有专业背景的人员从鸡肉的色泽、气味、黏度及质地等角度进行感官评价并打分, 满分 10 分, 具体感官特征描述以及品质等级划分见表 1。

1.3.6 花青素溶液光谱测定

取 1 mL 1 mg/mL 花青素溶液, 分别加入 9 mL pH 1~13 的缓冲溶液中, 混匀后静置 10 min, 观察颜色变化, 并用相机记录颜色差异。使用紫外-可见光光谱扫描, 波长范围为 400~700 nm 进行扫描分析。

1.4 数据处理

所有数据采用 WPS 12.1.0.23542-release、Graphpad Prism 9.5.1 和 Origin 2019 进行计算、制表和绘图, 实验结果均采用 3 次平行实验的平均值±标准偏差表示, 以 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 CMCS-*g*-FA 接枝化 FTIR 分析

图 1 展示了 CMCS 及 CMCS-*g*-FA 的红外光谱图。在 CMCS 的光谱中可以看到在 3438 cm^{-1} 处存在一个宽峰为-OH 的伸缩振动, 在 2925 cm^{-1} 处存在一个弱峰为-CH 的伸缩振动, 在 1604 cm^{-1} 和 1416 cm^{-1} 处存在吸收峰分别为羰基的不对称和对称伸缩振动, 1328 cm^{-1} 处则为-OH 的弯曲振动, 在 1069 cm^{-1} 处存在的强峰则为壳聚糖分子骨架一特征, 这些特征峰皆是 CMCS 的典型标识[12]。两光谱对比可知, CMCS-*g*-FA 整体骨架峰形与 CMCS 相似, 表明 CMCS 的大分子结构在反应中保持完整。但是, CMCS-*g*-FA 出现了几个新峰, 在 2740 cm^{-1} 的附近出现了-CH 的伸缩振动, 这可能与阿魏酸中的甲氧基有关。在 1578 cm^{-1} 和 1690 cm^{-1} 的附近出现两个类似的肩峰, 可能分别为二级酰胺键中羰基的伸缩振动和变形振动。综上所述, 基本证明了阿魏酸已成功接枝到 CMCS 分子链上, 并根据标准曲线可计算得到接枝率为(35.4±1.3) mg/g[13]。

表 1 鸡肉样品的感官评分表

Table 1 Sensory evaluation form of chicken samples

评分	感官特征描述	品质等级
9~10	色泽鲜亮呈粉红色, 无异味, 表面微干或湿润但不黏手, 肉质紧致, 按压后凹陷立即恢复, 弹性极佳	优秀
7~8	色泽略微变暗, 无明显异味, 表面微有水分析出, 按压后凹陷恢复较慢, 弹性良好	良好
5~6	色泽明显变暗, 有轻微的腥味或氨味, 表面略带黏性, 失去部分肉质弹性	尚可
3~4	色泽暗淡, 产生明显的酸败味或轻微腐臭味, 表面黏手, 肉质松散, 按压后凹陷难以恢复	较差
1~2	颜色严重劣变, 散发强烈的恶臭/刺鼻氨味, 表面覆有黏液, 肉质糜烂完全失去弹性, 汁液流失严重	极差

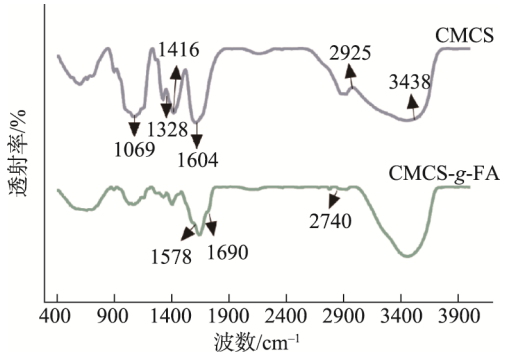


图 1 CMCS 与 CMCS-*g*-FA 的 FTIR

Fig.1 FTIR of CMCS and CMCS-*g*-FA

2.2 复合凝胶型包装膜的 FTIR 分析

图 2 中展示了 Ga、Ag、Ng 组的 FTIR。在 3300 cm^{-1} 附近的宽峰为膜内游离-OH 和明胶酰胺 A 带的-NH 的伸缩振动, 这反映了体系中丰富的大分子间氢键作用。1630 cm^{-1} 附近的峰为明胶酰胺 I 带-C=O 的伸缩振动, 随两活性物质的加入, 吸收峰略微减弱, 根据相关文献推测是由于在薄膜中引入花青素后酚羟基与肽键羰键形成氢键, 改变原本分布, 使羰键伸缩振动减弱[14–15]。Ag 组的光谱形状与 Ga 组大致相似, 表明加入花青素后并没有破坏明胶琼脂的化学骨架。Ng 组的光谱叠加了上述各组分的特征, 但整体形状仍与 Ga 组相似, 这说明在多组分体系中, 各物质具有良好的生物相容性。CMCS-*g*-FA 和花青素可能协同作用, 通

过氢键、静电引力及疏水相互作用与明胶-琼脂网络交联，从而形成致密且稳定的复合膜结构。综上所述，各组添加的不同成分均能通过氢键或是静电作用与基质更好地结合，光谱中无明显的新化学键特征峰出现[16]。

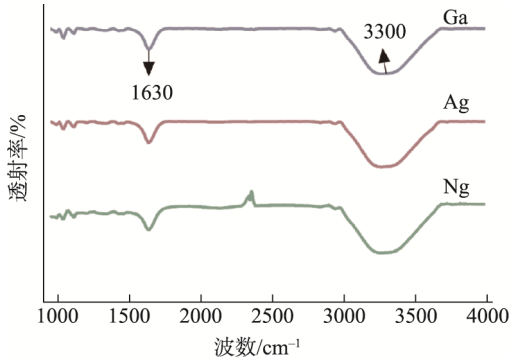


图 2　复合凝胶型包装膜的 FTIR

Fig.2　FTIR of the composite gel packaging films

2.3　复合凝胶型薄膜的机械性能

表 2 中展示了 Ga、Ag 和 Ng 组膜的抗拉强度、断裂伸长率、厚度、水分含量及水溶解性。单独添加花青素后，膜的抗拉强度和断裂伸长率大幅降低。结合之前的分析，这很大可能是因为花青素作为一种富含羟基的小分子物质，插入到明胶和琼脂的大分子链之间，破坏了基质原本紧密的网络结构，导致分子间相互作用减弱，从而使膜的机械强度和柔韧性下降[17]。然而 Ng 组的机械性能得到了极大改善，其抗拉强度显著提升至 10.410 MPa，断裂伸长率为 35.367%，水分含量和水溶解性分别为 13.21%和 39.67%，显著优于 Ga 组(P<0.05)，表明 CMCS-g-FA 的加入成功交联并强化了膜的网络结构。在厚度方面，Ag 组单独添加花青素导致膜厚度轻微下降，但 Ng 组膜厚度显著增加(P<0.05)，这主要是由于成膜基质中固体总量的增加以及大分子聚合物在膜内部占据了更多空间。水分含量和水溶解性的变化则与添加物的亲水性和结构致密性密切相关。单独添加花青素可能破坏了成膜基质的锁水网络，导致水分含量显著降低(P<0.05)。而在 Ng 组在 CMCS-g-FA 与花青素的共同作用下羟基、羧基的引入使膜的水溶解性显著提高，并通过强氢键作用有效锁住了水分，使其水分含量与 Ga 组的膜无显著差异(P<0.05)。综上所述，Ng 组的膜展现出了最优的机械性能。

2.4　花青素在不同 pH 下颜色变化

由图 3 可以观察到花青素添加物在不同 pH 下的颜色变化，颜色先是由红色逐渐转为浅紫色，再随碱性增加紫色逐渐加深，最后为暗黄棕色，结合紫外吸收光谱图可以看到吸收峰集中在 510~560 nm 区间，随碱性增强吸收峰逐渐减弱，对酸碱性变化较为敏感，表明花青素可以作为 pH 指示剂加入膜中，可以达到通过观察膜外观监测食品新鲜度的目的[18–19]。

表 2　复合凝胶型薄膜的机械性能

Table 2　Mechanical properties of the composite gel packaging films

组名	抗拉强度/MPa	断裂伸长率/%	厚度/mm	水分含量/%	水溶解性/%
Ga	6.080±0.036^{b}	11.900±0.600^{b}	3.133±0.005^{b}	13.747±0.709^{a}	36.273±0.440^{c}
Ag	2.607±0.066^{c}	9.627±0.055^{c}	3.115±0.002^{c}	8.457±0.455^{b}	43.240±0.315^{a}
Ng	10.410±0.030^{a}	35.367±1.332^{a}	3.302±0.001^{a}	13.210±0.230^{a}	39.670±0.921^{b}

注：同列不同小写字母表示组间具有显著性差异(P<0.05)。

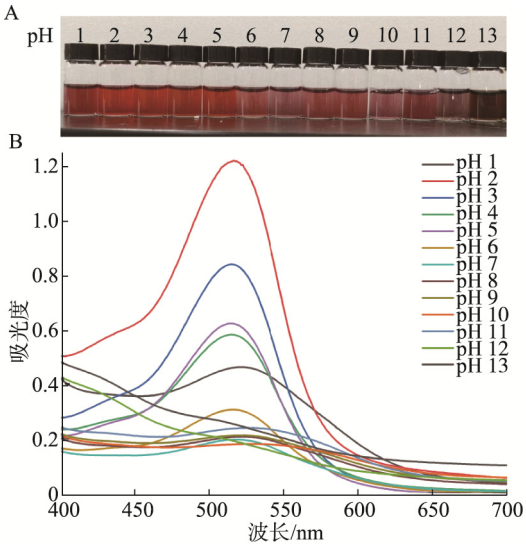


图 3　花青素溶液在不同 pH 下的颜色变化(A)及紫外-可见吸收光谱(B)

Fig.3　Changes in color (A) and ultraviolet-visible absorption spectrum (B) of anthocyanin solutions at different pH

2.5　不同贮藏时间下的鸡肉颜色变化

颜色是判断肉类变质最直观的指标之一，图 4 是鸡肉在不同贮藏时间下色差值的变化。为突出核心活性成分 CMCS-g-FA 对肉色氧化劣变的延缓作用，主要对比了 Co、Ga 与 Ng 组。亮度(L^*)和红绿度(a^*) 3 组整体上均呈下降趋势，黄蓝度(b^*)呈上增趋势，Ng 组变化幅度最小。鸡肉的亮度在第 2 d 达到最高值随后下降原因可能是前 2 d 汁液流失率较大，肉类表面折光率增加从而使亮度增高[20]。在贮藏中后期，Co 组由于肉质逐渐腐败、组织结构塌陷，L^*呈现断崖式下降，而 Ng 组得益于复合薄膜优异性能，其L^*在各时间点均显著高于另外两组(P<0.05)。鸡肉红绿度主要受肌红蛋白影响，而肌红蛋白与氧反应改变颜色，影响 a^*[21]。由图 4 可知，3 组鸡肉的 a^*整体呈降低趋势，Ga 和 Ng 组展现

出了明显的保护作用, 后期显著高于 Co 组(P<0.05), 表明薄膜的物理包裹有效阻隔了氧气渗入, 减缓了肌红蛋白的氧化。而黄蓝度变化主要与脂质氧化有关, 氧化过程所产生的颜色代谢物影响 b^*[22]。从第 8 d 开始, Co 组由于脂质严重氧化, 其 b^*急剧升高, 显著高于两包装组, 而 Ng 组在贮藏期内变化幅度最小, 有效抑制了大幅度黄变的发生。这充分证实了引入 CMCS-*g*-FA 的 Ng 组复合膜具备卓越的抗氧化活性, 能够显著抑制鸡肉在冷藏过程中的脂质氧化和颜色劣变。

2.6 不同贮藏时间下的鸡肉汁液流失率变化

汁液流失率是衡量肉类新鲜度的重要指标之一, 数值越高表明肉越不新鲜[17]。由图 5 可知, 4 组鸡肉汁液流失率均随贮藏时间增加而递增, 对照组 Co 的汁液流失率增长速率最快, Ag 组较 Ga 组增长速率更慢表明花青素具有一定抗氧化能力能够减少一定的水分流失, Ng 组较 Ag 组增长速率更缓慢, 表明双重活性成分的添加可能增加了了膜的抗菌效果, 对微生物的生长起到抑制从而减缓了水分流失, 使鸡肉腐败速度变慢[23–24]。

2.7 不同贮藏时间下的鸡肉 pH 变化

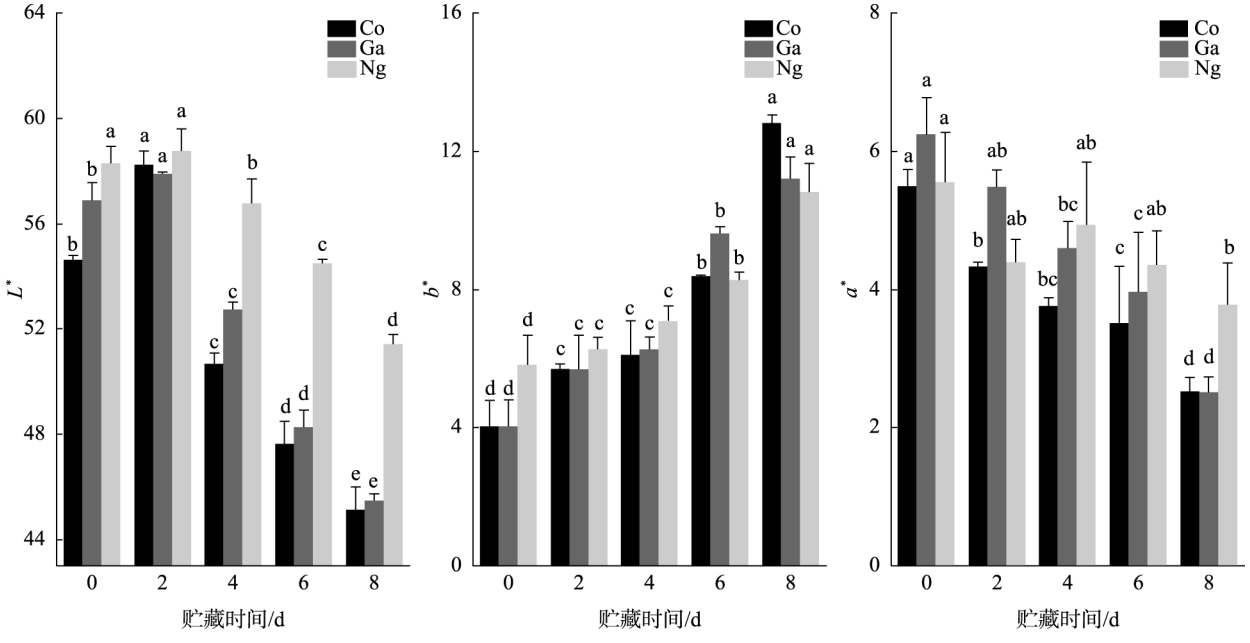
有研究表明[25–26], 新鲜鸡肉的 pH 在 5.5~6.0 之间, 刚宰杀后的鸡肉由于乳酸积累, 短时间内 pH 甚至会出现下降趋势, 之后随贮藏时间增加, 从图 6 可以观察到鸡肉的 pH 呈现上升趋势, 其内在机制主要归因于蛋白质在内源酶与微生物蛋白酶的协同催化下发生降解, 加之微生物的代谢活动, 共同促成了挥发性碱性物质的积累[27–29]。与其他组相比, Ng 组上升幅度最小, 这表明 CMCS-*g*-FA 和花青素可以减缓微生物生长速度, 从而一定程度上抑制鸡肉腐败。

2.8 不同贮藏时间下的鸡肉 TVB-N 变化

鸡肉在贮藏过程中由于蛋白质分解产生碱性挥发性氮化物, 导致 TVB-N 含量显著升高, TVB-N 值的高低能够反映鸡肉的腐败程度, GB 2707—2016 中表明符合食品安全国家标准的禽产品 TVB-N 含量不应高于 15 mg/100 g。由图 7 可知, 鸡肉 TVB-N 由初始的 4.3 mg/100 g 上升至第 6 d 的 23.36 mg/100 g, 但对比未做保鲜措施的对照组 TVB-N 低 18.83 mg/100 g, Co 和 Ga 组在第 3 d 时 TVB-N 含量已超过 15 mg/100 g, 处于次新鲜阶段, 第 4 d 开始完全腐败, 而添加了活性成分的 Ag 和 Ng 组上升幅度明显更低, 腐败变质速度更慢, Ng 组第 6 d 才进入腐败阶段, 说明 CMCS-*g*-FA 和花青素可以延缓 TVB-N 含量增长, 抑制微生物生长, 提高鸡肉品质, 有一定程度的抑菌保鲜效果[30]。

2.9 不同贮藏时间下的鸡肉菌落总数变化

菌落总数的变化直观反映了鸡肉中微生物的生长动态。由于鸡肉具有高水分活度和丰富的含氮营养底物, 为微生物的繁殖提供了理想环境。随着贮藏时间的延长, 在 20 ℃的贮藏环境下, 假单胞菌属和肠杆菌科快速增殖, 逐渐竞争性抑制其他菌群, 成为导致鸡肉腐败的优势菌群, 这两类细菌的协同生长导致菌落总数在短时间内呈对数级增加, 加速了鸡肉的腐败进程。根据 GB 16869—2005 和相关文献可知, 鲜禽产品菌落总数不应高于 6.0 log CFU/g[31]。由图 8 可知, Co 和 Ga 组在第 3 d 就超过菌落总数新鲜鸡肉标准, 分别达到 7.5 log CFU/g 和 6.9 log CFU/g, 鸡肉已经变质, 而 Ag 和 Ng 组分别在第 4 d 和第 5 d 突破菌落总数阈值, 再次验证了 CMCS-*g*-FA 和花青素加入后薄膜的抑菌效果。



注: 不同小写字母表示组间具有显著性差异(P<0.05)。

图 4 不同贮藏时间下的鸡肉颜色变化

Fig.4 Color changes of chicken meat at different storage times

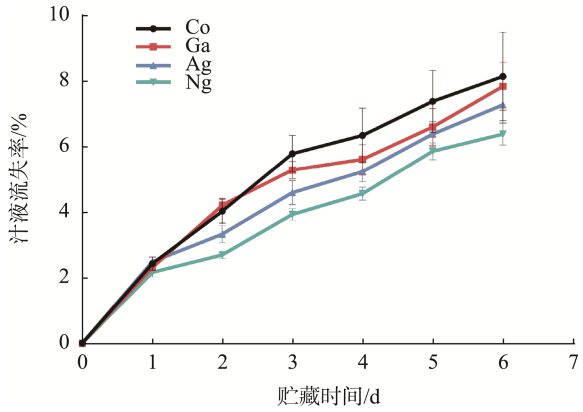


图 5　不同贮藏时间下的鸡肉汁液流失率变化

Fig.5　Changes in drip loss of chicken meat at different storage times

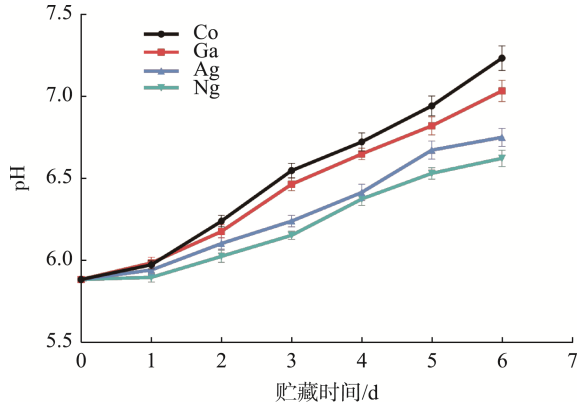


图 6　不同贮藏时间下的鸡肉 pH 变化

Fig.6　Changes in pH of chicken meat at different storage times

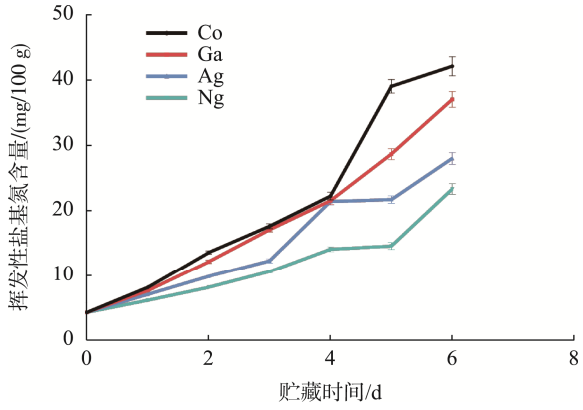


图 7　不同贮藏时间下的鸡肉 TVB-N 变化

Fig.7　Changes in TVB-N of chicken meat at different storage times

2.10　不同贮藏时间下的复合凝胶型薄膜颜色变化

结合图 9 和表 3 可以看到，随着贮藏时间增长，膜的颜色会根据鸡肉新鲜度变化而发生改变。Ga 组的膜由于没有添加其他成分，所以在外观上不能观察出明显区别，几乎无法根据膜颜色判断鸡肉新鲜度。Ag 和 Ng 组可以观察出明显颜色变化，随时间增长膜色泽变淡，呈现暗黄色，结合 pH、TVB-N 以及菌落总数等指标可知，鸡肉在贮藏过程中逐渐腐败，腐败产生的挥发性碱性物质及 pH 变化可能引起花青素结构转变，从而导致膜颜色变化。Ng 组根据色差值数据可以看到 L^*逐渐增大，这可能与鸡肉贮藏期间汁液流失被膜吸收将花青素稀释从而导致 L^*增大，在微生物与挥发性盐基氮的影响下 a^*红度降低，b^*出现先降后升趋势，这与鸡肉 pH 变化有关，随贮藏时间增加鸡肉逐渐呈碱性导致花青素中成分发生转变，蓝度增大。需要说明的是，图 9 膜颜色变化照片主要用于展示外观变化趋势，其拍摄时间与理化及微生物指标的检测时间并非完全对应，相关腐败程度判断仍以 pH、TVB-N 和菌落总数结果为依据。

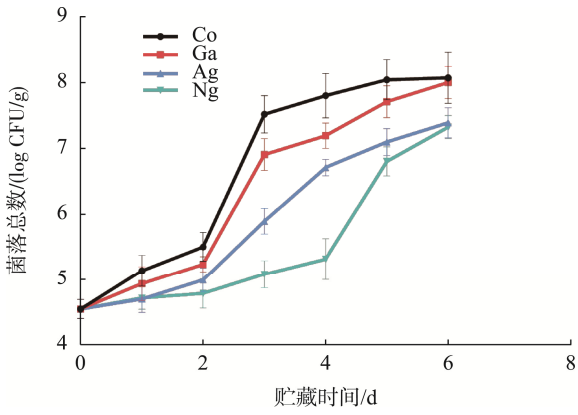


图 8　不同贮藏时间下的鸡肉菌落总数变化

Fig.8　Changes in total viable count of chicken meat at different storage times

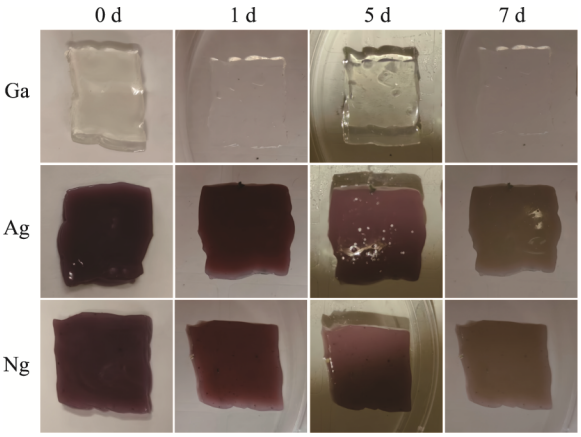


图 9　不同贮藏时间下的复合凝胶型薄膜颜色变化

Fig.9　Changes in color of the composite gel film at different storage times

表 3 不同贮藏时间下的 Ng 组薄膜色差值变化

Table 3 Changes in color difference of the Ng group film at different storage times

色差值	第 0 d	第 2 d	第 4 d	第 6 d	第 8 d
L^*	30.39±0.29^{b}	32.69±0.78^{a}	33.06±0.21^{a}	33.67±1.85^{a}	33.85±0.86^{a}
a^*	12.33±0.56^{a}	11.77±0.23^{ab}	11.07±0.66^{b}	10.84±0.56^{b}	8.24±0.53^{c}
b^*	–1.40±0.47^{a}	–1.55±0.36^{a}	–1.76±0.38^{a}	–1.85±0.23^{a}	–1.69±0.29^{a}

注：同行中不同的小写字母表示不同贮藏时间下具有显著性差异(P<0.05)。

2.11 不同贮藏时间下的鸡肉感官评分变化

感官品质在消费者的购买决策过程中起着决定性的作用，鸡肉样品在贮藏过程中的感官评分如图 10 所示。4 组均呈下降趋势，前 2 d 4 组评分接近，样品的感官品质均保持良好，肉色鲜红且肌肉组织紧致、回弹迅速。但从第 3 d 开始评分出现明显差距，Co 和 Ga 两组明显低于 Ag 和 Ng 组，Co 组样品率先出现褐变现象并伴有轻微异味，而 Ng 组感官特征依然稳定。随着贮藏期的延长，第 5 d 时 Co 组已表现出典型腐败特征，表面分泌黏液，散发浓郁胺味且弹性丧失，蛋白酶对鸡肉肌原纤维结构破坏导致质地发生改变[32–33]，相比之下，Ng 组的品质劣变被显著延缓，直至第 7 d 才呈现出类似的色泽灰暗、体表产黏及明显异味。货架期的延长说明复合薄膜可以延缓鸡肉腐败，提高鸡肉品质。

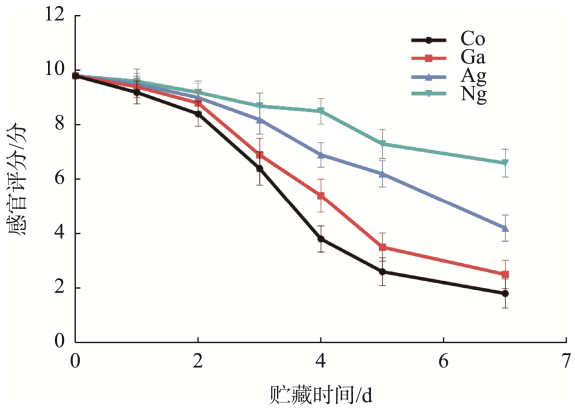


图 10 不同贮藏时间下的鸡肉感官评分变化

Fig.10 Changes in sensory scores of chicken meat at different storage times

3 结 论

本研究以明胶/琼脂作为成膜基质，引入 CMCS-*g*-FA 与花青素，制备出一种兼具活性保鲜与新鲜度可视化监测功能的复合凝胶型包装膜。结果表明，CMCS-*g*-FA 的引入改善了花青素在明胶/琼脂膜体系中的分散性，并通过氢键、静电作用及分子间相互作用参与膜网络结构的形成，从而提高复合膜的结构稳定性和机械性能。同时，CMCS-*g*-FA 赋予复合膜一定的抗氧化和抑菌活性，改善了膜材料的综合功能性能。花青素对酸碱环境具有明显颜色响应，可随鸡肉贮藏过程中挥发性碱性物质积累及 pH 升高而发生颜色变化，因此该类天然色素指示体系在肉类、水产品等易腐食品新鲜度监测中具有一定应用潜力。

与前人研究相比，本研究引入 CMCS-*g*-FA 作为功能性改性组分，提高了复合膜的保鲜作用。从鸡肉应用结果可以得知，含 CMCS-*g*-FA 和花青素的复合膜能够延缓 pH、TVB-N、菌落总数及汁液流失率的上升，并在贮藏过程中可观察到颜色的变化，可与鸡肉品质变化进行关联，表明该复合凝胶型薄膜在禽肉类保鲜和新鲜度监测方面具有应用价值。后续落实实际应用中应进一步统一检测时间点，并结合数字图像分析、色差模型或智能手机识别系统等，从而实现真正的可视化监测。

综上，本研究为天然色素基智能活性包装膜的构建提供了一种可行思路。未来可围绕 CMCS-*g*-FA 添加量优化、颜色响应定量化以及实际包装场景验证等方面开展研究，以推动该类复合膜在食品保鲜与新鲜度快速监测领域的实际应用。

参考文献

[1] 汪熳晴. 全球鸡肉贸易格局演变及肉类安全问题研究[J]. 中国食品工业, 2025(19): 60–63.
Wang Manqing. A study on the evolution of global chicken trade patterns and meat safety issues [J]. China Food Industry, 2025(19): 60–63.

[2] He Hongmei, Wang Luwei, Huang Hui, et al. A novel gallic acid-based anthocyanin electrospun sensor for monitoring shrimp freshness [J]. Food Analytical Methods, 2024(17): 689–700.

[3] Liu Danfei, Cui Zijie, Shang Mi, et al. A colorimetric film based on polyvinyl alcohol/sodium carboxymethyl cellulose incorporated with red cabbage anthocyanin for monitoring pork freshness [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2021, 28: 100641.

[4] Zhang Junjun, Yang Yan, Zhang Jianing, et al. High-stability bi-layer films incorporated with liposomes@anthocyanin/carrageenan/agar for shrimp freshness monitoring [J]. Foods, 2023, 12(4): 732.

[5] Liu Danfei, Zhang Changfan, Pu Yumei, et al. Recent advances in ph-responsive freshness indicators using natural food colorants to monitor food freshness [J]. Foods, 2022, 11(13): 1884.

[6] Li Rui, Wang Shancan, Feng Haoyu, et al. An intelligent chitosan/gelatin film via improving the anthocyanin-induced color recognition accuracy for beef sub-freshness differentiation monitoring [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 146: 109219.

[7] Yu Deyang, Cheng Shasha, Li Yu, et al. Recent advances on natural

colorants-based intelligent colorimetric food freshness indicators: fabrication, multifunctional applications and optimization strategies [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 33(64): 1–25.

[8] 赵文鹏, 刘雅楠, 张迅, 等. 负载花青素的玉米醇溶蛋白纳米纤维膜监测猪肉新鲜度[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(2): 83–90.
Zhao Wenpeng, Liu Yanan, Zhang Xun, et al. Monitoring pork freshness using zein nanofibrous film loadedwith anthocyanin [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(2): 83–90.

[9] 刘绪, 曾晨阳, 张承燚, 等. 羧甲基壳聚糖负载复合精油膜延长牛肉货架期研究[J]. 食品与发酵工业, 2026, 52(6): 238–245.
Liu Xu, Zeng Chenyang, Zhang Chengyi, et al. Research on extending shelf life of beef by carboxymethyl chitosan composite essential oil film [J]. Food and Fermentation Industries, 2026, 52(6): 238–245.

[10] 陶言磊. 低取代度醋酸细菌纤维素和细菌纤维素-阿魏酸抗氧化复合膜的制备研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019: 44–54.
Tao Yanlei. Preparation of bacterial cellulose acetate with low degree of substituent and bacterial cellulose-ferulic acid antioxidant composite membrane [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019: 44–54.

[11] Zhang Xin, Liu Jun, Qian Chunlu, et al. Effect of grafting method on the physical property and antioxidant potential of chitosan film functionalized with gallic acid [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89: 1–10.

[12] Liu Jun, Lu Jianfeng, Kan Juan, et al. Preparation, characterization and antioxidant activity of phenolic acids grafted carboxymethyl chitosan [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2013, 62: 85–93.

[13] Chatterjee N S, Anandan R, Navitha M, et al. Development of thiamine and pyridoxine loaded ferulic acid-grafted chitosan microspheres for dietary supplementation [J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 53(1): 551–60.

[14] Roy S, Rhim J W. Preparation of gelatin/carrageenan-based color-indicator film integrated with shikonin and propolis for smart food packaging applications [J]. ACS Applied Bio Materials, 2021, 4(1): 770–779.

[15] 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.

[16] Liang Jin, Yan Hua, Zhang Jiuya, et al. Preparation and characterization of antioxidant edible chitosan films incorporated with epigallocatechin gallate nanocapsules [J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 171: 300–306.

[17] 宋雪盈. 芳樟醇对福氏志贺菌生长的抑制作用及其复合保鲜膜的探究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2022: 54–57.
Song Xueying. Inhibitory effect of linalool on the growth of shigella flexneri and exploration of its composite packaging film [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2022: 54–57.

[18] Janseerat, Kolekar M, Reddy C S, et al. Anthocyanin-based natural color induced intelligent food packaging sensor: a review [J]. Current Food Science and Technology Reports, 2024, 2(2): 157–167.

[19] 赵娅敏, 范荣亮, 柴琰, 等. 基于不同成膜基材的花青素智能 pH 复合膜的研究进展[J/OL]. 食品与发酵工业, 2026-03-18. https://link.cnki.net/doi/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.044970.
Zhao Yamin, Fan Rongliang, Chai Yan, et al. Research progress on anthocyanin-based intelligent ph composite films from different film-forming substrates [J/OL]. Food and Fermentation Industries, 2026-03-18. https://link.cnki.net/doi/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.044970.

[20] Li Xin, Zhang Yan, Li Zheng, et al. The effect of temperature in the range of −0. 8 to 4 ℃ on lamb meat color stability [J]. Meat Science, 2017, 134: 28–33.

[21] 黄文权, 阚启鑫, 刘果, 等. 冷冻及冻藏过程中鸡肉的食用品质及化学质量属性变化研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(6): 326–336.
Huang Wenquan, Kan Qixin, Liu Guo, et al. Research progress on changes in eating quality and chemical quality attributes of chicken meat during freezing and frozen storage [J]. Food Science, 2024, 45(6): 326–336.

[22] Augustyńska-Prejsnar A, Ormian M, Sokołowicz Z. Physicochemical and sensory properties of broiler chicken breast meat stored frozen and thawed using various methods [J]. Journal of Food Quality, 2018, 2018: 1–9.

[23] Wang Guotian, Liu Yunpeng, Yong Huimin, et al. Effect of ferulic acid-grafted-chitosan coating on the quality of pork during refrigerated storage [J]. Foods, 2021, 10(6). https://doi.org/10.3390/foods10061374.

[24] Yong Huimin, Liu Yunpeng, Yun Dawei, et al. Chitosan films functionalized with different hydroxycinnamic acids: preparation, characterization and application for pork preservation [J]. Foods, 2021, 10(3). https://doi.org/10.3390/foods10030536.

[25] 何薇. 基于代谢组学和扩增子测序揭示兔肉和鸡肉贮藏中品质劣变差异[D]. 成都: 成都大学, 2025: 16.
He Wei. Revealing differences in quality deterioration between rabbit and chicken meat during storage using metabolomics and amplicon sequencing [D]. Chengdu: Chengdu University, 2025: 16.

[26] Yaghoubi M, Ayaseh A, Alirezalu K, et al. Effect of chitosan coating incorporated with artemisia fragrans essential oil on fresh chicken meat during refrigerated storage [J]. Polymers, 2021, 13(5): 716.

[27] Zhou Xi, Zong Xinxiang, Zhang Min, et al. Effect of konjac glucomannan/carrageenan-based edible emulsion coatings with camellia oil on quality and shelf-life of chicken meat [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 183: 331–339.

[28] Khan S, Wang Han, Shu Ying, et al. Characterization of a novel bioactive film based on *Artemisia sphaerocephala Krasch*. Gum (ASKG) complexed with *β*-cyclodextrin/curcumin (*β*-CD/CUR) inclusion complex and its application in meat preservation [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 136: 108296.

[29] Wu Yumin, Ma Ying, Gao Yiliang, et al. Poly (lactic acid)-based pH responsive membrane combined with chitosan and alizarin for food packaging [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 214: 348–359.

[30] Mu Lu, Bi Jingran, Zhao Haixin, et al. Intelligent pH-responsive films based on natural blueberry anthocyanins: a non-destructive monitoring system for the freshness of aquatic products with prospective smartphone compatibility [J]. Food Chemistry: X, 2025, 28: 102587.

[31] 张宁, 盘华英, 邢思颖, 等. 大豆种皮纳米纤维素复合膜的制备、表征及其对冷鲜鸡肉的保鲜作用[J]. 农业工程学报, 2025, 41(11): 305–314.
Zhang Ning, Pan Huaying, Xing Siying, et al. Preparation and characterization of soybean hull nanocellulose composite films and their preservation effect on chilled chicken meat [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(11): 305–314.

[32] Liu Silu, Shao Liangting, Dong Yang, et al. Hydrolysis of myofibrillar proteins by protease *AprA* secreted from *Pseudomonas fragi*: preference for degrading ala-linked peptide bonds [J]. Food Chemistry, 2025, 479: 143756.

[33] Yong Huimin, Liu Jun. Active packaging films and edible coatings based on polyphenol-rich propolis extract: a review [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(2): 2106–2145.

(责任编辑: 曹岱琳　蔡世佳)