

海藻涂膜剂的制备及其在芒果保鲜中的应用

成怡凡^{1,2,3}, 王长军², 孙碗晴^{2,3}, 黄玉婷^{2,3}, 严国富⁴, 汤洁⁴,
夏伊宁^{1,2,3*}, 林琼^{2,3*}

(1.山西农业大学 食品科学与工程学院, 山西 晋中 030801; 2.中国农业科学院农产品加工研究所, 北京 100193; 3.三亚中国农业科学院国家南繁研究院, 海南 三亚 572024;
4.北京雷力海洋生物新产业股份有限公司, 北京 100093)

摘要: **目的** 制备基于海藻提取物的涂膜剂, 表征其理化性质, 将其用于芒果涂膜保鲜并开展保鲜效果评价。**方法** 以可食用马尾藻为原料, 经热水辅助超声提取后加入水溶性壳聚糖, 得到海藻涂膜剂。通过溶剂蒸发法将海藻涂膜剂转化为海藻膜, 并表征其理化性质, 包括表面形貌、亲疏水性、拉伸强度、气体阻隔性等。使用不同稀释倍数(10、20、50)的海藻涂膜剂浸泡处理芒果, 室温下(23±1)℃贮藏12 d, 于第0、3、6、9、12天测定果实外观、色泽、质量损失率、硬度、可溶性固形物、可滴定酸等指标。**结果** 海藻膜结构致密均匀, 具有较高的力学强度、良好的亲水性、高透水率和低透氧率。海藻涂膜剂(稀释倍数为10)能有效降低果实的质量损失率, 维持果实硬度, 减少果实腐烂率, 抑制果实呼吸, 减少可溶性固形物和可滴定酸的消耗, 提高抗氧化酶活性。**结论** 以可食用马尾藻提取物为主要成分、水溶性壳聚糖为辅助成膜剂的海藻涂膜剂, 具有良好的成膜性和芒果保鲜效果, 为海藻提取物在水果保鲜领域的广泛应用提供了有益参考。

关键词: 海藻涂膜剂; 理化性质; 芒果保鲜; 果实品质

中图分类号: TS20.1/TS205.9

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2025)09-0142-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.09.016

Preparation of Seaweed Coating Agent and Its Application in Mango Preservation

CHENG Yifan^{1,2,3}, WANG Changjun², SUN Wanqing^{2,3}, HUANG Yuting^{2,3}, YAN Guofu⁴,
TANG Jie⁴, XIA Yining^{1,2,3*}, LIN Qiong^{2,3*}

(1. College of Food Science and Engineering, Shanxi Agricultural University, Shanxi Jinzhong 030801, China;
2. Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100193, China;
3. National Nanfan Research Institute (Sanya), Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hainan Sanya 572024, China; 4. Beijing Leili Marine Biology New Industry Co., Ltd., Beijing 100093, China)

ABSTRACT: The work aims to prepare a coating agent based on seaweed extract, characterize its physical and chemical properties, and use it for the preservation of mango coating preservation, to study its preservation effect. Edible Sargassum sargassum was subject to ultrasonic extraction with hot water, and water-soluble chitosan was added to prepare a seaweed coating agent. The seaweed coating agent was transformed into a seaweed film by solvent evaporation method, and its physical and chemical properties, including surface morphology, hydrophilicity, tensile strength and gas barrier property, were characterized. Mango was soaked with seaweed coating agents with different dilution times (10, 20, 50), and stored at room temperature (23±1) °C for 12 days. The fruit appearance, color, weight loss rate, hardness, soluble solid, titrable acid and other indicators were determined at day 0, 3, 6, 9, 12. The structure of the seaweed film was

收稿日期: 2025-01-06

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFE0107200); 三亚中国农业科学院南繁研究院“南繁专项”院院联合项目(YYLH2404)

*通信作者

compact and uniform, with high mechanical strength, good hydrophilicity, high water permeability and low oxygen permeability. The seaweed coating agent (dilution ratio 10) could effectively reduce the weight loss rate of fruit, maintain fruit hardness, reduce fruit decay rate, inhibit fruit respiration, reduce the consumption of soluble solids and titrable acids, and improve the activity of antioxidant enzymes. The seaweed coating agent with edible Sargassum extract as the main component and water-soluble chitosan as the auxiliary film forming agent has good film forming property and mango preservation effect, which provides a useful reference for the wide application of seaweed extract in the field of fruit preservation.

KEY WORDS: seaweed coating agent; physicochemical properties; mango preservation; fruit quality

芒果 (*Mangifera indica* L.) 因独特而浓郁的香气和营养价值, 深受消费者喜爱。作为一种呼吸跃变型水果, 芒果采后呼吸旺盛, 导致贮藏期间后熟软化, 加速果实衰老腐败过程^[1]; 同时, 芒果在采后易发生病原菌感染而腐烂, 致使货架期缩短。因此, 市场上需要一种绿色安全且成本低的保鲜剂, 有效调控芒果采后的生理病害, 提高芒果贮藏期品质, 延长货架期。涂膜保鲜是一种操作简便、成本低廉、安全环保的保鲜手段, 通过浸泡、涂布或喷洒等方法在水果表面包覆一层薄膜, 有效隔离气体和水分, 延缓水果变质, 达到保鲜的目的^[2]。采用天然产物开发涂膜材料既安全又环保, 因此得到广泛应用。这些天然产物包括多糖、蛋白质、脂类、果胶等, 其中以多糖为主要成分的涂膜材料具有较高的透明度、良好的阻隔性和抗氧化性, 在维持果实品质、延长保鲜期方面优势突出^[3]。

海藻提取物源自海洋中的褐藻、红藻、岩藻等藻类植物, 因其原料丰富、成本低、安全性高以及抑菌、抗氧化等特性, 成为保鲜领域的研究热点^[4]。海藻提取物主要成分为海藻多糖 (海藻淀粉、海藻酸钠、海藻酸钾等)、植物激素 (植物生长素、赤霉素、脱落酸等)、海藻蛋白等多种活性物质, 还包括陆生植物难以比拟的氮、磷、钾、钙、镁、铁、锰等多种有益元素, 这些物质使其具有独特的营养价值^[5]。海藻多糖可通过分子之间的相互交联, 在水果表面形成致密的网状结构, 具有易成膜的特点^[4]; 它还可与茶多酚、壳聚糖等成分复配, 形成复合涂膜剂, 用于各类水果保鲜。基于海藻多糖的涂膜保鲜剂已在杨梅^[6]、草莓^[7]、哈密瓜^[8]、香蕉^[9]等水果上应用, 实践证明其能有效降低果实质量损失率、呼吸速率, 提高果实硬度, 延缓果实褐变, 增强果实抗氧化能力, 还可抑制果实表面金黄色葡萄球菌滋生^[10], 从而更好地维持果实品质, 延长保鲜期。

涂膜保鲜技术已广泛应用于芒果采后贮藏, 涵盖多种不同的材料和配方, 如壳聚糖^[11]、羟丙基甲基纤维素^[12]、魔芋葡甘聚糖^[13]、玉米醇溶蛋白^[14], 但海藻提取物作为涂膜剂在芒果保鲜方面的研究较少, 其作用机制和效果尚不明确。本研究以海藻提取物为主体成分、水溶性壳聚糖为辅助成膜材料, 制备海藻涂膜剂, 通过溶剂蒸发法得到海藻膜并表征其理化性质, 并以芒果为代表性水果开展保鲜实验, 评价海藻

涂膜剂对芒果的保鲜效果。研究结果将有助于扩展以海藻为代表的海洋生物在农产品保鲜领域的应用, 丰富涂膜保鲜剂的产品选择。

1 实验

1.1 材料、试剂与仪器

主要材料: 芒果品种为“金煌芒”, 从网上购买, 产地发货, 挑选形状、颜色、大小基本一致且无物理损伤和病虫害的样品进行实验; 海藻提取物由北京雷力海洋生物新产业股份有限公司制备。

主要试剂: 水溶性壳聚糖 (壳聚糖盐酸盐, 分子量 30 000~60 000 u), 购自北京酷来搏科技有限公司; 超氧化物歧化酶、过氧化物酶以及过氧化氢酶活性检测试剂盒, 购自北京索莱宝科技有限公司。

主要仪器: SU8010 扫描电子显微镜, 日本日立公司; OCA25 接触角测量仪, 德国 Dataphysics 公司; TA.HD-Plus 物性测试仪 (配备 A/TG 拉伸装置), 英国 Stable Micro Systems 公司; W3/031 水蒸气透过率测定仪, 济南兰光机电技术有限公司; Brugger GDP-C 气体透过率测试仪, 德国 Bruker 公司; TS7700 色差仪, 深圳市三恩时科技有限公司; GY-4 水果硬度计, 浙江托普云农科技股份有限公司; PAL-BX ACID F5 糖酸度一体机, 北京巨华泰克科技有限公司; F-950 便携式 C₂H₄/O₂/CO₂ 分析仪, 美国 Felix 公司。

1.2 海藻涂膜剂的制备

海藻提取物以可食用马尾藻为原料, 经超声辅助热水 (碱性) 提取、离心、除渣、浓缩后得到海藻提取物 (固形物质量分数>20%)。向海藻提取物中加入 2% 水溶性壳聚糖以提升成膜性, 得到海藻涂膜剂。将制备的 20 mL 涂膜剂倒入 90 mm 培养皿, 在 40 °C 烘箱中烘干后揭膜, 得到厚度为 (25.3±3.2) μm 的复合膜, 用于后续理化性质表征。

1.3 海藻膜的表征

1.3.1 扫描电子显微镜 (SEM)

采用扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 观察海藻膜的结构和形貌。将海藻

膜在液氮中脆断后粘在导电的双面胶带上并置于 SEM, 在 5 kV 的加速电压下观察样品表面和截面。

1.3.2 水接触角

采用接触角测量仪测量室温 (25 °C) 下海藻膜样品的水接触角。将样品剪成 1 cm×8 cm 的矩形块, 将其固定在水平移动的样品台上, 从注射针管中挤出 5 μL 蒸馏水滴在薄膜表面, 测量水滴两侧的接触角。

1.3.3 拉伸测试

采用物性测试仪测量海藻膜样品的拉伸强度。使用裁纸刀将膜裁成 80 mm×15 mm 的矩形, 初始标距设为 40 mm, 以 10 mm/min 的速度移动至断裂, 测定 3 次记录结果取平均值。

1.3.4 水蒸气透过率和氧气透过率

采用水蒸气透过率 (WVTR) 测定仪测量海藻膜样品的水蒸气透过率, 将样品置于 38 °C 和 100% 相对湿度下进行测定。采用气体透过率测试仪测量海藻膜样品的氧气透过率 (OTR), 将样品置于 23 °C、0% 相对湿度和 100% 氧气浓度下进行测定。所有样品重复测量 3 次。

1.4 芒果保鲜实验

选择颜色、大小、形状和外观相近, 无明显机械损伤和真菌感染迹象的芒果, 将其分为 4 组, 1 组用去离子水浸泡 1 min 后自然晾干, 作为对照 (CK) 组; 另外 3 组使用不同稀释倍数 (10、20、50) 的海藻涂膜剂浸泡 1 min 后进行涂膜处理, 然后自然晾干。处理后的样品在室温 (23±1) °C 下贮藏 12 d, 并于第 0、3、6、9、12 天测定相关指标。

1.5 指标测定

1.5.1 外观保鲜效果

每组随机挑选 9 个芒果, 在室温下贮藏 12 d, 并于第 0、3、6、9、12 天定期拍照。

1.5.2 色泽测定

使用色差仪测量芒果样品的色差 L^* 、 a^* 和 b^* , 并观察颜色变化, 每个样品选 9 个不同位置进行检测, 重复 3 次。

1.5.3 腐烂率测定

果实的腐烂率采用计数法测定, 每组随机选取 28 个芒果, 记录果实的腐烂情况。腐烂率的计算见式 (1)。

$$R_{ot} = \frac{n}{N} \times 100\% \quad (1)$$

式中: n 为腐烂果实数; N 为总果实数。

1.5.4 质量损失率测定

在贮藏过程中, 每间隔一段时间对每组芒果进行

称重, 采用称重法测定质量损失率, 计算见式 (2)。

$$W_{loss} = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: m_0 为贮藏前每组芒果质量; m_1 为贮藏后每组芒果质量。

1.5.5 硬度测定

去除每个芒果最大横径处的表皮, 在两面均匀取 8 个点, 采用水果硬度计测量硬度, 探针直径为 5 mm。

1.5.6 可溶性固形物与可滴定酸含量测定

采用糖酸度一体机测定芒果果实可溶性固形物 (TSS) 与可滴定酸 (TA) 含量, 重复 3 次取平均值。

1.5.7 呼吸速率和乙烯释放速率测定

对照组和 3 组处理组各选 6 个果实, 每 2 个为一组放入 5 L 保鲜盒, 盖紧盖子密封 2 h 后, 采用便携式 $C_2H_4/O_2/CO_2$ 分析仪检测呼吸速率和乙烯释放速率, 取平均值。

1.5.8 CAT、SOD 和 POD 酶活性测定

CAT、SOD、POD 酶活性检测使用酶活性检测试剂盒, 取 0.1 g 冷冻芒果样品研磨成粉, 后续检测按照说明书操作。

1.6 数据处理和分析

使用 Excel 2020 进行数据的运算与统计处理, 采用 Origin 2021 软件进行绘图, 应用 SPSS 26.0 软件的单因素方差分析功能检验数据间的显著性差异。

2 结果与分析

2.1 海藻膜的特性分析

图 1a 为海藻膜截面的微观形貌, 呈相对光滑平坦的特征, 表明海藻膜材料中海藻多糖和水溶性壳聚糖具有良好的相容性; 截面中出现的细微褶皱, 可能是海藻膜样品在液氮中脆断时产生的裂纹。图 1b 为海藻膜表面的微观形貌, 无明显裂痕和孔隙, 展现出良好的结构完整性和致密性; 膜表面明显分布有颗粒状物质, 可能是海藻多糖在成膜过程中发生轻微团聚结晶所致^[15]。

表 1 为海藻膜的理化性质参数。水接触角是表征膜材料表面亲疏水性的重要指标, 当接触角 < 90° 时, 膜表面具有亲水性, 且接触角越小亲水性越强。海藻膜的水接触角为 71.82°, 说明其表面具有一定的亲水性, 这一特性主要归因于海藻多糖和壳聚糖分子中含有大量亲水性基团 (如羟基、氨基), 这些基团可与水分子形成氢键, 增强分子间作用力, 从而提高膜的亲水性^[16]。通过拉伸测试表征海藻膜样品的力学性能, 结果显示其拉伸强度为 (43.30±2.13) MPa, 断裂伸长率为 (11.25±0.39)%, 杨氏模量为 (384.88±14.03) MPa。

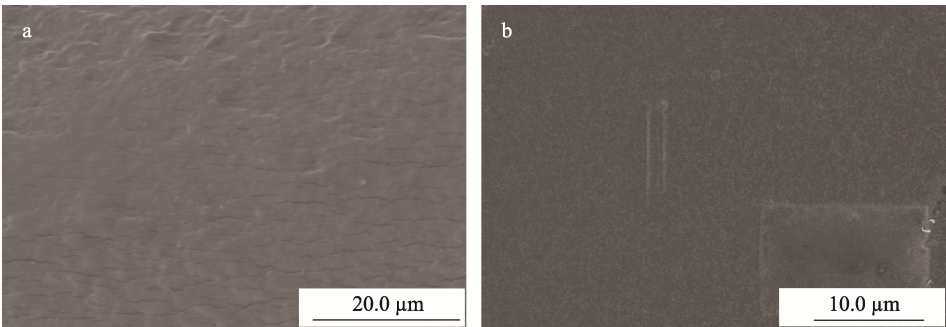


图 1 海藻膜截面 (a) 和表面 (b) 的 SEM 图片
Fig.1 SEM images of cross section (a) and surface (b) of seaweed film

海藻膜具有较高的拉伸强度和杨氏模量,原因是海藻多糖和壳聚糖中含有氨基、羧基、羟基等亲水性基团,基团之间形成氢键,这种分子间作用力提高了膜结构的致密性^[17]。断裂伸长率反映膜的塑性,展现拉伸断裂之前的延伸能力,较高的断裂伸长率表明海藻膜具有良好的延展性和柔韧性^[18]。海藻膜的阻隔性由水蒸气透过率和氧气透过率表示,其水蒸气透过率为 $(2\,007.00\pm163.87)\text{ g}/(\text{m}^2\cdot24\text{ h})$,较高的水蒸气透过率可能与海藻膜较强的亲水性有关,有利于水分子的吸收,从而增强膜的润湿性^[19];其氧气透过率为 $(3.31\pm0.16)\text{ cm}^3/(\text{m}^2\cdot24\text{ h}\cdot0.1\text{ MPa})$,较低的氧气透过率可归因于膜中广泛分布的结晶区域,这些区域有效限制氧气分子的扩散。良好的氧气阻隔性不仅能够减少水果表面的氧化反应,延缓果实色泽变化,还可以抑制需氧腐败微生物的生长繁殖,进而降低腐烂率。

表 1 海藻膜的理化性质
Tab.1 Physicochemical properties of seaweed film

序号	参数	数值
1	水接触角度/(°)	71.82
2	拉伸强度/MPa	43.30±2.13
3	断裂伸长率/%	11.25±0.39
4	杨氏模量/MPa	384.88±14.03
5	水蒸气透过率/[g·m ⁻² ·(24 h) ⁻¹]	2 007.00±163.87
6	氧气透过率/[cm ³ ·m ⁻² (24 h) ⁻¹ ·(0.1 MPa) ⁻¹]	3.31±0.16

2.2 海藻涂膜剂对芒果贮藏品质的影响

2.2.1 不同浓度海藻涂膜剂对外观的影响

在常温贮藏过程中,芒果的外观色泽和质地均会发生变化。研究表明,芒果表皮颜色通常从绿色到黄绿色,再到黄色,最终变为橙黄色^[20],不同浓度海藻涂膜剂对芒果外观的影响如图 2 所示。在 0~12 d, CK 组芒果表皮颜色变化速度快于海藻涂膜(稀释倍数为 10、20、50)处理组;第 6 天时,CK 组芒果表皮由绿色缓慢变为黄绿色,部分果实表面出现黑斑;第 9 天时,CK 组芒果变为黄色,表皮出现明显皱缩现象,这与果实中水分流失有关,同时部分果实表面的黑斑进一步扩

大,导致果实失去商业价值;第 12 天时,CK 组果实外观已超出消费者可接受范围,而处理组芒果(稀释倍数为 10)在整个贮藏期内外观品质保持良好,果实表皮相对光滑,颜色变化缓慢,鲜有黑斑出现,这表明海藻涂膜处理不仅能够延缓芒果外观色泽的变化,还能抑制果实表面黑斑的扩散,从而有效提高贮藏品质。

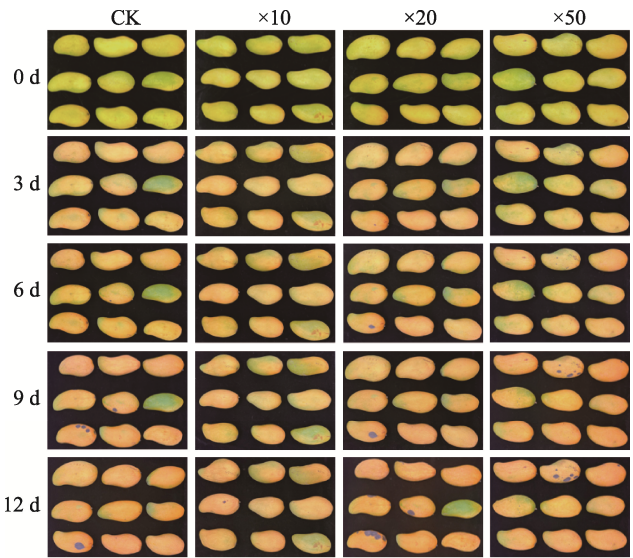
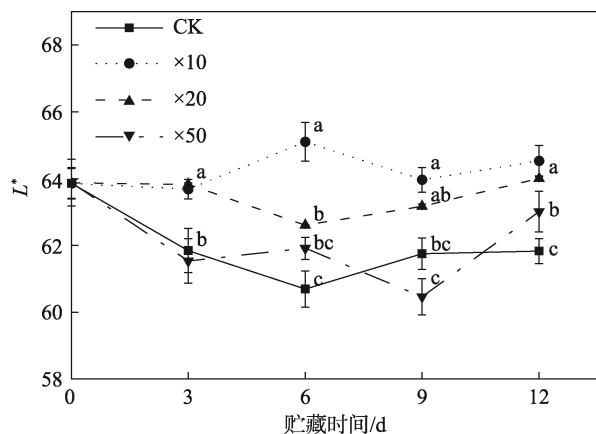
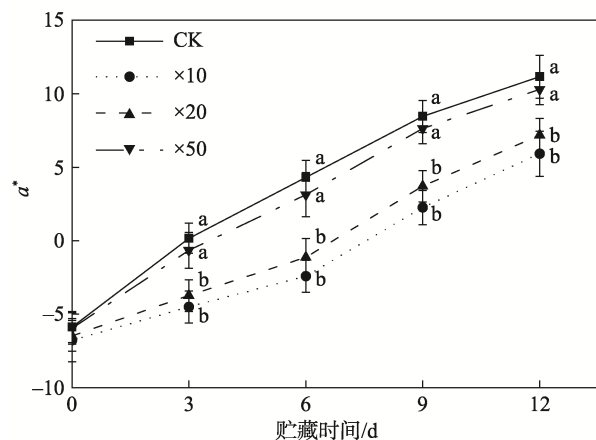
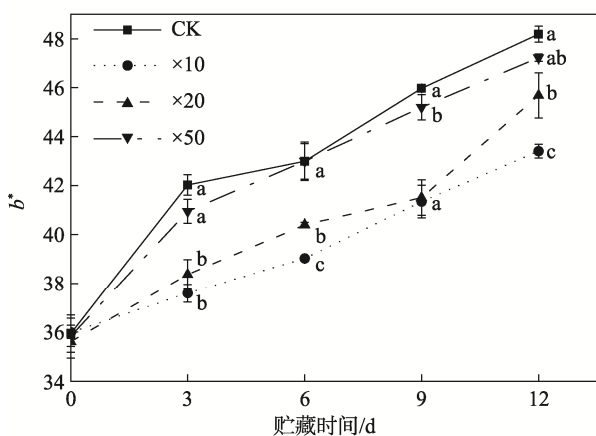


图 2 不同浓度海藻涂膜剂对芒果外观的影响
Fig.2 Effect of different concentrations of seaweed coating agent on appearance of mango

2.2.2 不同浓度海藻涂膜剂对色泽的影响

色泽是判断果实成熟度的重要指标,色泽变化能够直观反映芒果的成熟情况^[21]。 L^* 代表亮度,数值越大表示亮度越高, L^* 值变小则亮度变暗,不同浓度海藻涂膜剂对芒果 L^* 的影响见图 3a。第 6 天时,稀释倍数为 10、20、50 的处理组果实的 L^* 均显著高于 CK 组 ($P<0.05$),表明 CK 组果实成熟度较高,果实衰老速度较快。 a^* 代表红绿色,正值表示红色,负值表示绿色,不同浓度海藻涂膜剂对芒果 a^* 的影响见图 3b。在贮藏期间, a^* 呈持续增大趋势,说明随着成熟度的增加,果实红色程度逐渐增强。CK 组和处理组果实 a^* 变化趋势基本一致,在 3~12 d 快速增大,且 CK 组的 a^* 值显著高于稀释倍数为 10、20 的处理组

a 不同浓度海藻涂膜剂对芒果色泽 L^* 的影响b 不同浓度海藻涂膜剂对芒果色泽 a^* 的影响c 不同浓度海藻涂膜剂对芒果色泽 b^* 的影响

注：不同小写字母代表差异显著 ($P<0.05$)
 图3 不同浓度海藻涂膜剂对芒果色泽 L^* (a)、 a^* (b)、 b^* (c) 的影响

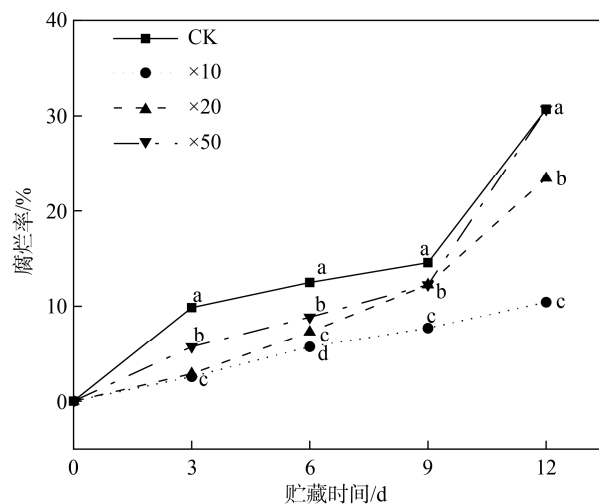
Fig.3 Effect of different concentration of seaweed coating agent on L^* value (a), a^* value (b) and b^* value (c) of mango color

($P<0.05$), 表明果实在 3~12 d 转红色; CK 组转红色的速度和程度均高于处理组, 表明 CK 组果实后熟进程更快。 b^* 代表黄蓝色, 正值表示黄色, 负值表示蓝色, 不同浓度海藻涂膜剂对芒果 b^* 的影响见图 3c。在贮藏期间, b^* 持续增大, 说明果实颜色随着成熟度增加逐渐向黄色转变。第 12 天时, CK 组果实的 b^* 达到

48.189, 而稀释倍数为 10、20 的处理组分别为 43.41、45.68, 且组间差异显著 ($P<0.05$), 说明果实在 3~12 d 转黄; CK 组果实的转黄色程度更深, 表明果实后熟程度更高。

2.2.3 不同浓度海藻涂膜剂对腐烂率的影响

腐烂率是评估果实品质的重要指标, 能够直观反映果实贮藏期间的病害发生情况。由图 4 可知, 在贮藏后期, 稀释倍数为 10、20 的处理组果实的腐烂率分别上升至 10.43%、23.43%, 而 CK 组和稀释倍数为 50 的处理组果实腐烂率更高, 第 12 天时均超过 30%, 这表明稀释倍数为 10、20 的海藻涂膜处理能更有效抑制果实的腐败变质。其作用机制可能源于 2 个方面: 一方面, 海藻涂膜剂本身具有一定的抑菌性; 另一方面, 涂膜处理在果实表面形成物理屏障, 有效减少芒果与外界有害微生物的直接接触^[22], 从而降低微生物侵染的风险。



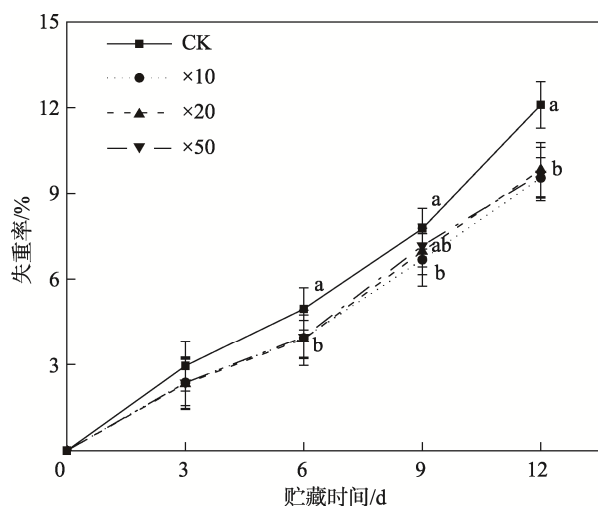
注：不同小写字母代表差异显著 ($P<0.05$)

图4 不同浓度海藻涂膜剂对芒果腐烂率的影响

Fig.4 Effect of different concentrations of seaweed coating agent on decay rate of mango

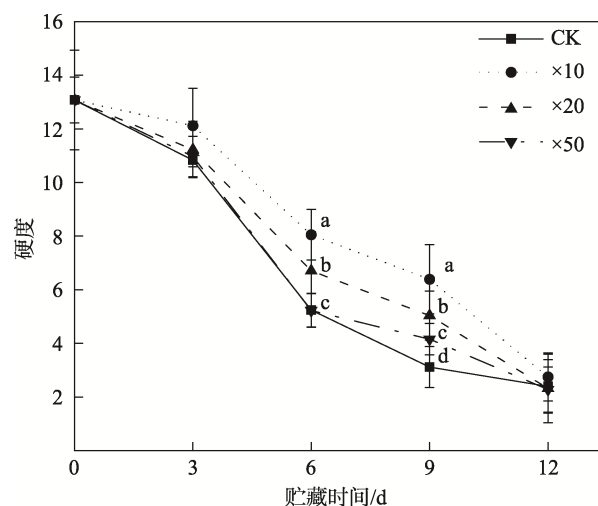
2.2.4 不同浓度海藻涂膜剂对质量损失率的影响

质量损失率是衡量芒果饱满度和新鲜度的重要指标, 其变化反映果实的失水情况, 而果实失水会导致组织萎缩、营养成分流失和口感品质下降。如图 5 所示, 在整个贮藏期内, 芒果的质量损失率呈持续上升趋势, 这是由于果实在采后维持生命活动的代谢过程中会不断蒸发水分, 导致质量减轻, 新鲜度下降, 进一步影响果实的正常呼吸作用^[23]。在 6~12 d, CK 组的质量损失率变化最大, 从 4.94% 升至 11.78%, 显著高于各处理组 ($P<0.05$), 这可能是由于 CK 组果实的呼吸速率较高, 加快了物质消耗; 稀释倍数为 10 的处理组的果实质量损失率最低, 稀释倍数为 20、50 的处理组与稀释倍数为 10 的处理组之间的质量损失率差异不显著, 说明不同浓度的涂膜处理在抑制果实失重方面具有相似的效果, 均能有效延缓果实的质量损失。



注: 不同小写字母代表差异显著 ($P<0.05$)
图 5 不同浓度海藻涂膜剂对芒果质量损失率的影响

Fig.5 Effect of different concentrations of seaweed coating agent on weight loss rate of mango



注: 不同小写字母代表差异显著 ($P<0.05$)
图 6 不同浓度海藻涂膜剂对芒果硬度的影响

Fig.6 Effect of different concentrations of seaweed coating agent on mango hardness

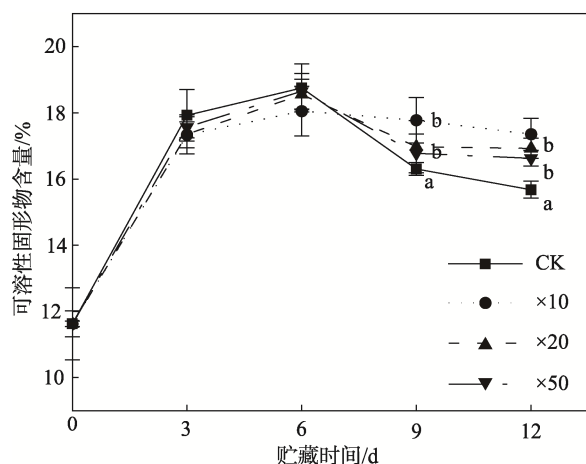
2.2.5 不同浓度海藻涂膜剂对硬度的影响

果实硬度是评估果实品质的关键因素,可直接影响消费者的消费欲望和商品价值。由图 6 可知,在 12 d 贮藏期内,各组芒果的硬度均呈下降趋势,且变化规律基本一致。在贮藏初期(3~6 d),果实硬度下降最快,主要是由于果实处于后熟阶段,原果胶和纤维素等成分被酶水解,导致细胞壁结构破坏,从而引发果实软化^[24]。稀释倍数为 10 的处理组硬度显著高于 CK 组及稀释倍数为 20、50 的处理组 ($P<0.05$),这可能是由于高浓度的涂膜处理进一步减缓果实的呼吸速率,抑制原果胶向可溶性果胶转化,同时通过维持果实水分含量来保持硬度。第 9 天时,CK 组硬度均显著低于稀释倍数为 10、20、50 的处理组 ($P<0.05$),表明海藻涂膜处

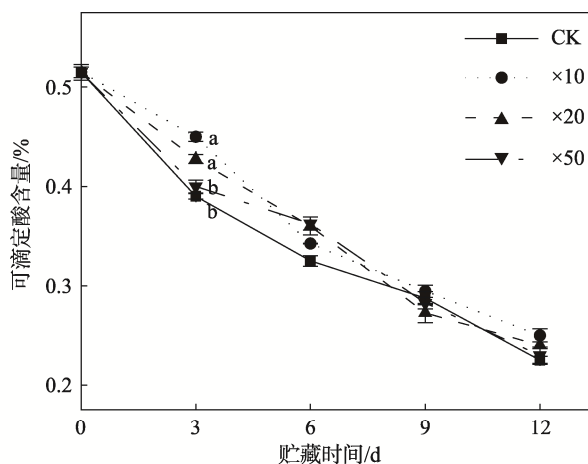
理可有效维持果实硬度,从而更好地保持果实品质。

2.2.6 不同浓度海藻涂膜剂对 TSS 和 TA 的影响

可溶性固形物(TSS)含量与果实成熟度密切相关。由图 7a 可知,芒果的 TSS 含量在贮藏期 0~6 d 呈上升趋势,在第 9 天开始快速下降,波动幅度较大。这是由于在芒果呼吸过程中,淀粉等大分子物质分解为小分子单糖等^[25],导致 TSS 含量增加;随着呼吸作用的持续进行,营养物质逐渐耗尽,最终导致 TSS 含量下降。在贮藏期 9~12 d,CK 组的 TSS 含量显著低于稀释倍数为 10、20、50 的处理组 ($P<0.05$),其中稀释倍数为 10 的处理组维持较高的 TSS 含量。这表明海藻涂膜处理可有效抑制芒果的呼吸作用,减少养分消耗,从而延缓 TSS 含量的下降。



a 不同浓度海藻涂膜剂对芒果可溶性固形物含量的影响



b 不同浓度海藻涂膜剂对芒果可滴定酸含量的影响

注: 不同小写字母代表差异显著 ($P<0.05$)

图 7 不同浓度海藻涂膜剂对芒果可溶性固形物含量(a)、可滴定酸含量(b)的影响
Fig.7 Effect of different concentration of seaweed coating agent on soluble solid content (a) and titratable acid content (b) of mango

可滴定酸 (TA) 含量是决定果实味道的主要因素,也是反映水果成熟度的重要指标^[26]。由图 7b 可知,在整个贮藏期间,芒果 TA 含量呈逐渐下降趋势,这主要由于水果的呼吸作用会消耗部分 TA。第 3 天时,各组的 TA 含量均下降,其中 CK 组的 TA 含量显著低于稀释倍数为 10、20 的处理组 ($P<0.05$),表明海藻涂膜处理可有效延缓 TA 含量的下降,从而有效保持芒果的营养品质和风味特性。

2.2.7 不同浓度海藻涂膜剂对呼吸速率和乙烯释放速率的影响

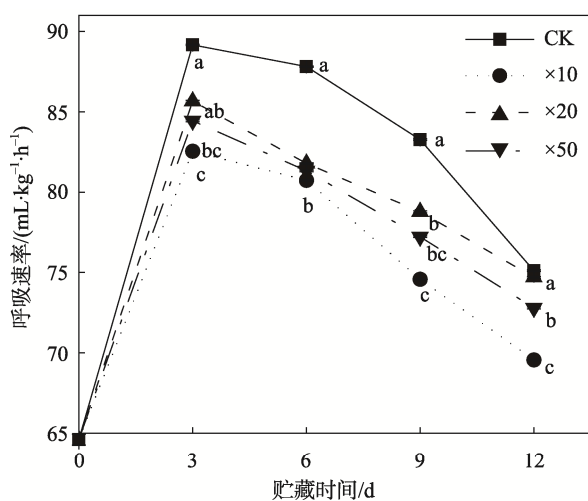
呼吸作用是植物消耗氧气将有机成分氧化分解为简单分子,同时释放能量的过程,它是引起植物成熟和衰老等生理现象的主要原因^[27]。芒果作为典型的呼吸跃变型果实,在贮藏期间会出现呼吸高峰。由图 8a 可知,CK 组及稀释倍数为 10、20、50 的处理组均在贮藏期第 3 天时出现呼吸高峰,但与 CK 组相比,处理组的峰值均有所降低。在整个贮藏过程中,各处理组的呼吸速率均低于 CK 组,且在第 3、6、9 和 12 天与 CK 组存在显著差异 ($P<0.05$),表明海藻涂膜处理能有效抑制芒果贮藏期间的呼吸作用,且高浓度处理组的抑制效果更明显。这可能与涂膜处理形成的低氧高二氧化碳微环境有关,有效抑制果实的代谢速率。

在芒果成熟过程中,乙烯的产量显著增加,并且在成熟开始时会出现呼吸作用的高峰^[28]。因此,乙烯释放量可以反映果实生命进程,且与其成熟程度密切相关。由图 8b 可知,在第 3 天时各组果实的乙烯释放量均达到峰值。与 CK 组相比,稀释倍数为 10、20、50 的处理组降低了乙烯释放速率。在整个贮藏期间,各处理组的乙烯释放速率始终低于 CK 组,且在第 3、6、12 天与 CK 组差异显著 ($P<0.05$),这表

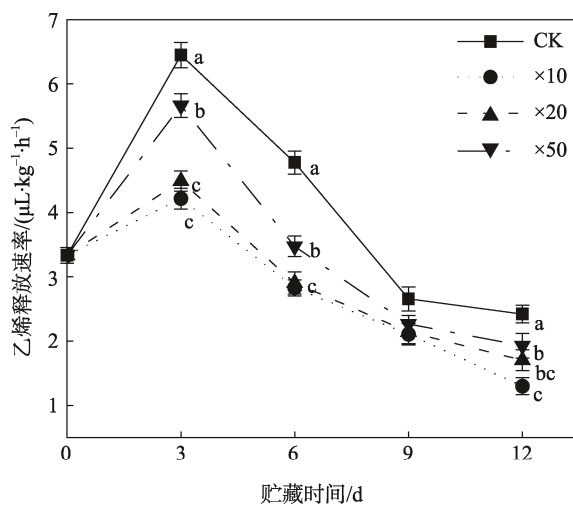
明海藻涂膜处理能够有效降低芒果的乙烯释放速率,从而延缓果实的成熟进程。

2.3 不同浓度海藻涂膜剂对抗氧化酶活性的影响

过氧化氢酶 (CAT)、超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 是植物天然防御机制中关键的抗氧化酶,能够有效清除逆境条件下产生的活性氧,保护细胞免受氧化损伤^[29]。CAT 通过催化分解过氧化氢为水和氧气,减少活性氧 (ROS) 的积累,保护细胞免受氧化损伤。由图 9a 可知, CAT 活性的变化呈先降低后上升,最后缓慢降低的波动趋势。第 6 天时,各组 CAT 活性达到峰值,CK 组 CAT 活性为 140.4 U/g,而稀释倍数为 10、20、50 的处理组的 CAT 活性分别比 CK 组高 100.8、58.1、46.1 U/g,且差异显著 ($P<0.05$),这表明海藻涂膜处理能够诱导芒果 CAT 活性的提升,增强果实的抗氧化能力。SOD 作为生物体内一种重要的抗氧化酶,通过歧化代谢超氧阴离子来保护细胞免受氧化损伤^[30]。由图 9b 可知, SOD 活性在贮藏期间呈先下降后上升的趋势,在第 6、12 天,稀释倍数为 10、20 的处理组的 SOD 活性显著高于 CK 组 ($P<0.05$),表明海藻涂膜处理能够有效促进果实 SOD 活性的提升,保护果实细胞免受氧化损伤,减少有害物质的积累,从而延缓果实的衰老过程。POD 是一种广泛存在于果蔬内的氧化还原酶,其活性与果实表面褐变、呼吸作用以及成熟衰老有关^[31],作为酶促防御系统中的关键酶之一, POD 能够清除植物体在逆境中产生的过氧化物。由图 9c 可知,在第 6 天,CK 组的 POD 活性达到峰值,为 339.56 U/g,而稀释倍数为 10、20、50 的处理组 POD 活性分别比



a 不同浓度海藻涂膜剂对芒果呼吸速率的影响



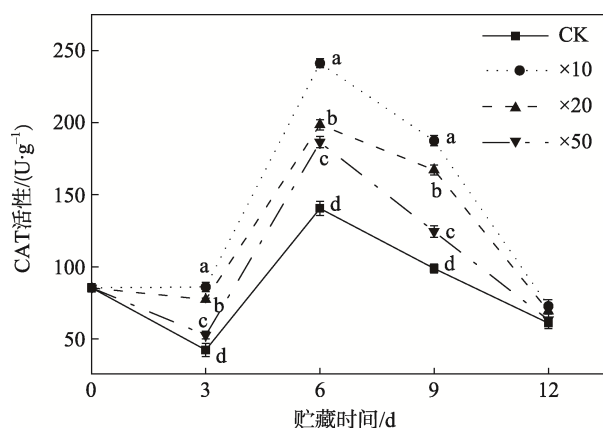
b 不同浓度海藻涂膜剂对芒果乙烯释放速率的影响

注: 不同小写字母代表差异显著 ($P<0.05$)

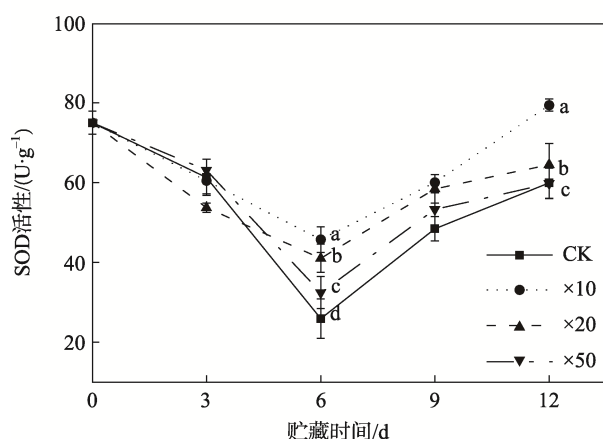
图 8 不同浓度海藻涂膜剂对芒果呼吸速率 (a) 和乙烯释放速率 (b) 的影响

Fig.8 Effect of different concentrations of seaweed coating agent on respiration rate (a) and ethylene release rate (b) of mango

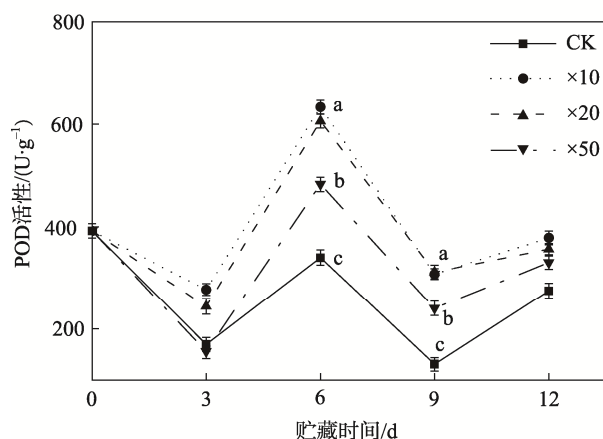
CK 组高 294.4、266.8、143.33 U/g, 且差异显著 ($P<0.05$)。第 9 天时, 稀释倍数为 10、20、50 的处理组的 POD 活性显著高于 CK 组 ($P<0.05$), 表明海藻涂膜处理可以促进果实 POD 活化, 延缓果实的衰老进程。



a 不同浓度海藻涂膜剂对芒果CAT抗氧化酶活性的影响



b 不同浓度海藻涂膜剂对芒果SOD抗氧化酶活性的影响



c 不同浓度海藻涂膜剂对芒果POD抗氧化酶活性的影响

注: 不同小写字母代表差异显著 ($P<0.05$)

图9 不同浓度海藻涂膜剂对芒果CAT (a)、SOD (b) 和 POD (c) 抗氧化酶活性的影响

Fig.9 Effect of different concentrations of seaweed coating agent on antioxidant enzyme activities of CAT (a), SOD (b) and POD (c) in mango

3 结语

基于海藻提取物制成的复合膜, 其表面相对光滑、致密均匀, 具有良好的延展性、柔韧性、水汽透过性和氧气阻隔性。在芒果涂膜保鲜方面, 海藻涂膜剂能够有效维持芒果果实品质, 其保鲜效果与涂膜剂浓度呈正相关。贮藏过程中, 海藻涂膜剂 (稀释倍数为 10) 能显著降低果实的质量损失率, 抑制水分流失, 维持果实硬度, 减少果实腐烂率, 有效减缓果实的呼吸速率及乙烯释放速率, 维持果实内可溶性固形物和可滴定酸含量, 同时提升 SOD、POD、CAT 的酶活性, 从而增强果实的抗氧化能力。本研究揭示海藻提取物在芒果品质调控和贮藏保鲜方面的可行性, 为海藻涂膜剂的产业化应用提供了技术支撑。未来需进一步拓展海藻涂膜剂在水果保鲜方面的应用, 并深入探究其在分子层面的品质调控机制, 更好地促进产品改进和保鲜效果提升。

参考文献:

- [1] 张清宇, 李晓如, 萧铭莹, 等. 果蔬包装用可生物降解材料的制备与应用研究进展[J]. 包装工程, 2022, 43(7): 75-86.
ZHANG Q Y, LI X R, XIAO N Y, et al. Research Progress on the Preparation and Application of Biodegradable Materials for Fruit and Vegetable Packaging[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(7): 75-86.
- [2] 姚依妮, 孙建明, 李昭, 等. 可食性涂膜在番茄贮藏保鲜中的研究进展[J]. 包装与食品机械, 2021, 39(5): 55-61.
YAO Y N, SUN J M, LI Z, et al. Progress in Research of Edible Coating in the Storage and Preservation of Tomato[J]. Packaging and Food Machinery, 2021, 39(5): 55-61.
- [3] 张晓冉, 许凯. 可食性涂膜保鲜技术在易腐食品中的研究进展[J]. 食品工业, 2022, 43(9): 244-248.
ZHANG X R, XU K. Research Progress on Edible Coating Preservation Technology in Perishable Foods[J]. Food Industry, 2022, 43(9): 244-248.
- [4] 陈芊如, 褚德朋, NAILA I, 等. 海藻提取物的农业应用研究进展[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(20): 49-56.
CHEN Q R, CHU D P, NAILA I, et al. Research Progress on Agricultural Application of Seaweed Extracts[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(20): 49-56.
- [5] 陈伙, 乔为仓, 杨宝雨, 等. 海藻深加工技术的研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2024(12): 231-241.
CHEN H, QIAO W C, YANG B Y, et al. Research Progress on Seaweed Deep Processing Technologies[J].

- China Food Additives, 2024(12): 231-241.
- [6] 郭守军, 叶文斌, 杨永利, 等. 蜈蚣藻多糖与卡拉胶复合涂膜保鲜剂对杨梅常温贮藏的影响[J]. 食品科学, 2010, 31(18): 394-400.
- GUO S J, YE W B, YANG Y L, et al. Preservation of *Myrica Rubra* Using Compound Coating Agent of Grateloupia Filicina Polysaccharide and Carrageenan at Room Temperature[J]. Food Science, 2010, 31(18): 394-400.
- [7] 安磊, 刘曼. 3 种多糖对草莓的保鲜作用[J]. 食品科学技术学报, 2015, 33(3): 64-69.
- AN L, LIU M. Quality and Shelf-Life Improvement of Three Polysaccharides on Strawberry Fruits[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 33(3): 64-69.
- [8] 周研, 曾媛媛, 王锡昌, 等. 2 种复合涂膜对哈密瓜的采后保鲜效果[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(1): 133-138.
- ZHOU Y, ZENG Y Y, WANG X C, et al. Effect of Two Compound Coatings on Storage Quality of Cantaloupe[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2016, 44(1): 133-138.
- [9] ELSHIKH M S, FARRAJ D A A. Postharvest Disease Control in Banana Using Organic Extract from the Brown Alga *Turbinaria Ornata*[J]. Physiological and Molecular Plant Pathology, 2024, 131: 102283.
- [10] 田鑫, 李秀霞, 吴科阳, 等. 海藻多糖提取纯化及生物活性的研究进展[J]. 食品与发酵科技, 2015, 51(6): 81-85.
- TIAN X, LI X X, WU K Y, et al. Research Progress of Extraction and Separation Method and Biological Activities of Polysaccharides from Sea Algae[J]. Food and Fermentation Science & Technology, 2015, 51(6): 81-85.
- [11] 李雪, 严雨欣, 李徐辉, 等. 玉米淀粉/壳聚糖/纳米 TiO_2 复合膜在蓝莓保鲜中的应用研究[J]. 中国食品添加剂, 2025, 36(3): 165-172.
- LI X, YAN Y X, LI X H, et al. Application of Corn Starch/Chitosan/Nano- TiO_2 Composite Film in Blueberry Preservation[J]. China Food Additives, 2025, 36(3): 165-172.
- [12] 史馥毓, 秦艺璇, 黎治伶, 等. 羟丙基甲基纤维素/木质素气调涂膜的制备及其对沙糖桔的保鲜效果[J/OL]. 食品科学, 1-13(2024-12-30)[2025-03-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20241227.1809.068.html>.
- SHI F Y, QIN Y X, LI Z L, et al. Preparation of Hydroxypropyl Methylcellulose/Lignin Controlled-Release Coating and Its Fresh-Keeping Effect on Shatangju Tangerines[J/OL]. Food Science, 1-13(2024-12-30)[2025-03-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20241227.1809.068.html>.
- [13] 杨晓仪, 刘浩, 庞杰. 魔芋葡甘聚糖复合涂膜在食品中的应用研究进展[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(9): 7-9.
- YANG X Y, LIU H, PANG J. Research Progress on the Application of Konjac Glucomannan Composite Coatings in Food[J]. Cereals & Oils, 2022, 35(9): 7-9.
- [14] 卫赛超, 谢晶. 复载纳他霉素的壳聚糖/玉米醇溶蛋白可食性涂膜对芒果低温保鲜效果的研究[J]. 热带作物学报, 2022, 43(9): 1907-1917.
- WEI S C, XIE J. Effect of Chitosan/Zein Edible Coating Compounded with Natamycin on the Low-Temperature Preservation of Mango(*Mangifera Indica* L.)[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2022, 43(9): 1907-1917.
- [15] 于晓慧, 庞一帆, 王梦阳, 等. 壳聚糖-海藻纳米纤维素协同强化海藻酸钠薄膜的制备及其在南美白对虾冷藏保鲜中的应用[J/OL]. 食品工业科技, 1-20(2024-11-05)[2025-03-01]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024060440>.
- YU X H, PANG Y F, WANG M Y, et al. Preparation of Chitosan-Seaweed Nanocellulose Synergistically Reinforced Sodium Alginate Films and Their Application in Cold Storage Preservation of Pacific White Shrimp[J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 1-20(2024-11-05)[2025-03-01]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024060440>.
- [16] 陈炳洁, 刘思思, 李力, 等. 木质素纳米颗粒/茶多酚/海藻酸钠复合膜性能及其在辣椒保鲜中的应用[J/OL]. 现代食品科技, 1-14(2025-02-25)[2025-03-01]. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.12.1386>.
- CHEN B J, LIU S S, LI L, et al. Properties of Lignin Nanoparticles/Tea Polyphenols/Sodium Alginate Composite Films and Their Application in Pepper Preservation[J/OL]. Modern Food Science and Technology, 1-14(2025-02-25)[2025-03-01]. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.12.1386>.
- [17] 郭婕, 付佳慧, 刘爱荣, 等. 海藻酸钠-壳聚糖-碳酸氢钠复合膜优化制备及性能表征[J]. 环境工程学报, 2024, 18(7): 2010-2018.
- GUO J, FU J H, LIU A R, et al. Optimization, Preparation, and Characterization of Sodium Alginate-Chitosan-Sodium Bicarbonate Composite Films[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2024, 18(7): 2010-2018.
- [18] 梁媛媛, 黄锴奇, 张乐, 等. 多糖基离子凝胶研究进展[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2024, 61(5): 181-192.

- LIANG Y Y, HUANG K Q, ZHANG L, et al. Recent Advances in Polysaccharide-Based Ionogels[J]. *Journal of Sichuan University (Natural Science Edition)*, 2024, 61(5): 181-192.
- [19] SEIDI F, YAZDI M K, JOUYANDEH M, et al. Crystalline Polysaccharides: A Review[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 275: 118624.
- [20] 杞廷美, 李艳娇, 赵兴东, 等. 1-甲基环丙烯结合气调处理对‘帕拉英达’和‘吉禄’芒果保鲜效果的影响[J]. *保鲜与加工*, 2024, 24(3): 1-13.
- QI T M, LI Y J, ZHAO X D, et al. Effects of 1-Methylcyclopropene Combined with Controlled Atmosphere Treatment on the Preservation of 'Parainda' and 'Jilu' Mangoes[J]. *Storage and Process*, 2024, 24(3): 1-13.
- [21] 孙宏图, 刘帮迪, 孙静, 等. 不同剂量红光和乙烯利处理对采后芒果成熟及活性氧代谢的影响[J]. *保鲜与加工*, 2025, 25(1): 42-54.
- SUN H T, LIU B D, SUN J, et al. Effects of Different Doses of Red Light and Ethephon Treatment on Post-harvest Mango Ripening and Reactive Oxygen Species Metabolism[J]. *Storage and Process*, 2025, 25(1): 42-54.
- [22] 杨宁, 李坤, 章真, 等. 紫球藻多糖涂膜处理对南湖菱的保鲜作用[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(24): 123-132.
- YANG N, LI K, ZHANG Z, et al. Preservation Effects of Porphyridium Polysaccharide Coating Treatment on Ling Nut[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2024, 50(24): 123-132.
- [23] 赵欢欢, 周宏胜, 胡花丽, 等. 不同包装材料对樱桃番茄果粒品质及果蒂保水护绿作用[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(9): 209-216.
- ZHAO H H, ZHOU H S, HU H L, et al. Effects of Different Packaging Materials on the Quality of Cherry Tomato, the Water Loss and Color of the Fruit Sepal[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(9): 209-216.
- [24] 李玉申, 张敏, 王玉婷, 等. 冷热温激处理对西葫芦贮藏生理特性的影响[J]. *安徽农业大学学报*, 2024, 51(5): 783-789.
- LI Y S, ZHANG M, WANG Y T, et al. The Effect of Cold and Hot Temperature Stimulation Treatment on the Physiological Characteristics of Zucchini Storage[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2024, 51(5): 783-789.
- [25] DING P, ZAINAL B, ISMAIL I S B, et al. Physico-Chemical and Microstructural Characteristics during Postharvest Storage of Hydrocooled Rock Melon[J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2019, 152: 89-99.
- [26] ALI S, ULLAH M A, NAWAZ A, et al. Carboxymethyl Cellulose Coating Regulates Cell Wall Polysaccharides Disassembly and Delays Ripening of Harvested Banana Fruit[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2022, 191: 111978.
- [27] LIU B D, XIN Q, ZHANG M, et al. Research Progress on Mango Post-Harvest Ripening Physiology and the Regulatory Technologies[J]. *Foods*, 2023, 12(1): 173.
- [28] SHINTARO O, DAISUKE Y, GAKU Y, et al. Closed Chamber System For Easily Measuring the Respiration Rate of Intact Fruits[J]. *Environment Control in Biology*, 2022, 60(1): 33-37.
- [29] 集贤, 王泽彬, 高元惠, 等. 二氧化氯对‘克瑞森无核’葡萄贮藏品质的影响[J]. *保鲜与加工*, 2025, 25(2): 30-37.
- JI X, WANG Z B, GAO Y H, et al. Effects of Chlorine Dioxide on the Storage Quality of 'Crimson Seedless' Grapes[J]. *Storage and Process*, 2025, 25(2): 30-37.
- [30] 李毅, 杨帅, 柳佳清, 等. 低温常压等离子体对树莓果实采后生理指标及贮藏品质的影响[J]. *食品科学*, 2025, 46(4): 227-236.
- LI Y, YANG S, LIU J Q, et al. Effects of Low-Temperature Atmospheric Plasma on Postharvest Physiological Indices and Storage Quality of Raspberry Fruits[J]. *Food Science*, 2025, 46(4): 227-236.
- [31] 王通, 王娟, 马晓艳, 等. 1-MCP 处理结合冷库预冷对黄花菜低温贮藏效果的影响[J]. *食品科技*, 2020, 45(12): 15-22.
- WANG T, WANG J, MA X Y, et al. Effect of 1-MCP Treatment Combined with Cold Storage Precooling on Low Temperature Storage of Daylily[J]. *Food Science and Technology*, 2020, 45(12): 15-22.