



天津科技大学学报

Journal of Tianjin University of Science & Technology

ISSN 1672-6510, CN 12-1355/N

《天津科技大学学报》网络首发论文

题目: PE/PBAT 气调膜对油桃采后贮藏保鲜效果的影响
作者: 孙影, 孙晴, 孙凤霞, 寇润蕾, 王世卓, 刘霞
DOI: 10.13364/j.issn.1672-6510.20250176
收稿日期: 2025-11-17
网络首发日期: 2026-09-03
引用格式: 孙影, 孙晴, 孙凤霞, 寇润蕾, 王世卓, 刘霞. PE/PBAT 气调膜对油桃采后贮藏保鲜效果的影响[J/OL]. 天津科技大学学报.
<https://doi.org/10.13364/j.issn.1672-6510.20250176>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。



DOI: 10.13364/j.issn.1672-6510.20250176

PE/PBAT 气调膜对油桃采后贮藏保鲜效果的影响

孙 影, 孙 晴, 孙风霞, 寇润蕾, 王世卓, 刘 霞
(天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300457)

摘 要: 油桃 (*Prunus persica* var. *nectarina*) 采后易衰老、软化、腐烂变质, 导致其商品价值和经济价值降低。自发气调(MA)作为果蔬保鲜的重要方法, 可通过调节保鲜膜 O_2 、 CO_2 透过率适应不同果蔬采后呼吸模式。以聚乙烯(PE)、聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯(PBAT)为基材, 通过调节 PBAT 添加量, 制备具有不同 O_2 、 CO_2 透过率的气调保鲜膜, 研究油桃采后的呼吸模式, 应用 PE/PBAT 膜对油桃进行贮藏保鲜。结果表明: 油桃的呼吸模式与添加 25% PBAT 的气调膜(75PE/25PBAT)适配度最佳, 当 O_2 维持在 2.3%~3.6%、 CO_2 保持在 3.4%~3.8%时, 油桃贮藏时间延长至 42 d, 失重率、腐烂率显著降低, 丙二醛(MDA)含量、脂氧合酶(LOX)活性降低, 抑制膜脂过氧化程度; 提高过氧化氢酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)、超氧化物歧化酶(SOD)活性, 增强果实抗氧化能力; 有效抑制多聚半乳糖醛酸酶(PG)活性, 减少原果胶分解并抑制了可溶性果胶含量上升, 延缓油桃软化进程。75PE/25PBAT 气调膜通过多重机制有效保持了油桃采后品质, 在果蔬保鲜领域具有良好的应用前景。

关键词: 油桃; 气调包装; 聚乙烯(PE); 聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯(PBAT)

中图分类号: TS255.3

文献标志码: A

Effect of PE/PBAT Modified Atmosphere Films on the Freshness Retention of *Prunus persica* var. *nectarina* During Post-Harvest Storage

SUN Ying, SUN Qing, SUN Fengxia, KOU Runlei, WANG Shihzuo, LIU Xia

(1. College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: *Prunus persica* var. *nectarina* are prone to senescence, softening, and spoilage after harvest, leading to a decrease in their commercial value and economic benefits. Modified atmosphere (MA) packaging serves as an important method for preserving fruits and vegetables by adjusting the permeabilities of O_2 and CO_2 in the packaging film to accommodate the differing post-harvest respiration patterns of various produce. Using polyethylene (PE) and polybutylene adipate/terephthalate (PBAT) as the base materials, modified-atmosphere packaging films with varying O_2 and CO_2 transmission rates were prepared by adjusting the PBAT content. The post-harvest respiratory patterns of *Prunus persica* var. *nectarina* were studied, and PE/PBAT films were applied for the storage and preservation of *Prunus persica* var. *nectarina*. Results indicated that the respiration pattern of *Prunus persica* var. *nectarina* was best matched with the modified atmosphere film consisting of 25% PBAT (75PE/25PBAT). When O_2 levels were maintained between 2.3% and 3.6% and CO_2 levels between 3.4% and 3.8%, the rates of weight loss and decay in *Prunus persica* var. *nectarina* significantly decreased. Furthermore, malondialdehyde (MDA) content and lipoxygenase (LOX) activity decreased, indicating a reduction in lipid peroxidation. The activities of peroxidase (POD), catalase (CAT), ascorbate peroxidase (APX), and superoxide dismutase (SOD) were enhanced, which improved the antioxidant capacity of the fruit. Moreover, the activity of polygalacturonase (PG) was effectively inhibited, reducing the decomposition of protopectin and suppressing the increase of soluble pectin content, thereby delaying the

收稿日期: 2025-11-17; 修回日期: 2026-03-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFD2100800); 泰山领军人才项目资金支持(项目编号: 25012712)

作者简介: 孙影(2002—), 女, 河北保定人, 硕士研究生; 通信作者: 刘 霞, 教授, liuxia831930@163.com

softening process of *Prunus persica* var. *nectarina*. The 75PE/25PBAT gas-permeable film effectively maintained the post-harvest quality of *Prunus persica* var. *nectarina* through multiple mechanisms, demonstrating promising application prospects in the field of fruit and vegetable preservation.

Key words: *Prunus persica* var. *nectarina*; modified atmosphere packaging; polyethylene (PE); polybutylene adipate/terephthalate (PBAT)

油桃 (*Prunus persica* var. *nectarina*) 以其独特的风味特性和浓郁的芳香物质而著称, 各类营养物质含量丰富, 受到消费者的喜爱^[1-2]。然而, 油桃采后常温贮藏寿命仅为 3~4 d, 低温贮藏可延长至 15~18 d。油桃的采后损失率普遍较高, 约为 25%~30%, 其主要原因是采后机械损伤^[3]。作为一种呼吸跃变型水果, 油桃采收期通常在夏秋高温高湿季节, 此时果实采后生理活动旺盛, 更易衰老、软化及品质劣变, 降低果实的商品价值和经济价值, 因此探究有效的保鲜方法延长油桃采后贮藏时间和减少损失至关重要。在采后保鲜领域, 气调贮藏技术因其显著的保鲜效果而成为研究热点。该技术通过调控贮藏环境气体组分, 可有效延缓果实成熟衰老进程^[4-5]。然而, 针对油桃这一特定品种的气调包装参数优化研究相对匮乏, 系统建立其气调保鲜技术体系将有助于完善核果类水果的保鲜研究, 并为产业应用提供科学指导。

聚乙烯 (PE) 因其成本低、机械强度高、易于加工等优点被广泛用于食品包装领域, 但它会产生不可降解的塑料废弃物, 对环境造成严重污染^[6]。聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯 (PBAT) 是一种可降解的生物高分子材料, 具备优良的气体渗透性能和良好的延展性能。PE 难降解、气体渗透性差, 而加入 PBAT 共混则可以调节气体透过性能, 增加共混材料整体的降解性。相容剂的加入能够进一步改良 PE/PBAT 共混材料性能^[7]。

本实验以 PE 和 PBAT 为基材, 加入相容剂, 熔融共混吹塑制备新型高效的油桃专属气调保鲜包装膜, 将制备的气调薄膜应用于油桃采后贮藏, 探究其在延缓衰老、抑制软化及抗氧化方面的保鲜效果, 以期开发高效、环保的气调包装材料提供思路依据与技术支持, 同时推动可降解材料在果蔬保鲜领域的产业化应用。

1 材料与方法

1.1 材料

PE, 中国石化上海石油化工股份有限公司;

PE-g-MAH, 东莞市滔滔塑胶原料有限公司; PBAT TH801T, 新疆蓝山屯河科技股份有限公司。油桃, 购买于天津市滨海新区金元宝农贸市场。

草酸、抗坏血酸、甲醇、磷酸钠、四硼酸钠, 天津市津科精细化工研究所; 2, 6-二氯酚靛酚、硫代巴比妥酸、PVP、PVPP、乙二胺四乙酸、L-苯丙氨酸、L-蛋氨酸, 上海源叶生物科技有限公司; 愈创木酚、冰醋酸、无水醋酸钠、过氧化氢, 天津市光复精细化工研究所; 聚乙二醇 6000、咪唑、半乳糖醛酸, 上海麦克林生化科技有限公司; 核黄素, 天津市江天化工技术股份有限公司。上述试剂除 L-苯丙氨酸、L-蛋氨酸为生物技术级外, 其余试剂全部为分析级。

SJSZ 型系列锥形螺旋杆挤出机, 武汉怡杨塑料机械有限公司; 微型单螺杆挤出吹膜机, 宝轮精密检测仪器有限公司; 万能材料试验机, 美国 Instron 公司; SU1510 型扫描电子显微镜, 日本日立公司; 水蒸气透过率测试仪 (杯式法)、气体透过率测试仪, 广州西唐机电科技有限公司。

1.2 PE/PBAT 共混膜的制备及表征

1.2.1 PE/PBAT 膜的制备

将 PE 颗粒、PBAT 颗粒、PE-g-MAH 颗粒按比例混合均匀, PBAT 的添加量依次为 0%、5%、15%、25%、35%, 相容剂在共混料中的添加量为 5%, 最终制得厚度均匀的 30 μm 复合包装薄膜。

1.2.2 薄膜的阻隔性能

透气性能: 根据 GB/T1038.1—2022《塑料制品薄膜和薄片 气体透过性试验方法 第1部分: 差压法》及 GB/T 6672—2001《塑料薄膜和薄片厚度测定 机械测量法》, 采用标准取样器将样品切割为直径 120 mm 的圆形测试样片。选取 5 个样本点测定厚度, 取平均值。

透湿性能: 根据 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》, 反应杯 105 $^{\circ}\text{C}$ 烘干处理 24 h。使用标准取样器将样品切割为直径 6.5 cm 的圆形薄膜, 随机选取 5 个位点测量厚度, 取平均值。采用减重法进行测定, 测试腔环境控制为 23 $^{\circ}\text{C}$ 、10%相对湿度, 有效测试面积为

33 cm²; 系统平衡时间 2 h, 数据采集间隔 5 s, 每 15 min 更换测试位点。

1.2.3 薄膜的微观形态

利用扫描电子显微镜 (SEM) 观察薄膜表面和断面微观形貌, 加速电压设置为 5 kV。

1.2.4 薄膜的力学性能

将薄膜切割成规格为 150 mm×10 mm 的条状试样。每个样品随机选取 3 个不同位置测量其厚度。采用 250 mm/min 恒定拉伸速度进行测试, 夹具初始间距设定为 50 mm。各组试样测定 5 次。

1.3 油桃保鲜实验

1.3.1 样品预处理

基于气调保鲜数学模型, 优化确定油桃包装的最佳参数为 0 °C、2% O₂、4% CO₂、CO₂/O₂ 透过比 (β 值) 为 4.94, 此时油桃的呼吸系数为 1.04, 与本研究制备的复合膜气体透过特性进行对比分析, 筛选出 PBAT 添加量为 25% 75PE/25PBAT 共混膜最适合作为油桃的气调包装。

选取成熟度一致、无生理缺陷的优质油桃, 用 100 mg/L 自制 NaClO 溶液浸泡 2 min, 离子水漂洗 3 次, 在室温条件下自然晾干水分, 0 °C 低温预冷 24 h。完成预处理后, 将样品随机分成 3 个组: CK 组, 无包装, 不做任何处理; PE 组, 将 PE 保鲜膜制作成 15 cm×18 cm 的保鲜袋, 装入 0.23 kg 油桃, 用包装机进行封袋; 75PE/25PBAT 组, 将制备的 PBAT 添加量为 25% 的共混薄膜裁成 15 cm×18 cm 的保鲜袋, 装入 0.23 kg 油桃, 用包装机进行封袋。

将每组油桃放置在 (0±1) °C 冷藏柜中, 观察其品质变化, 实验设置贮藏周期为 42 d, 每隔 7 d 随机采集样品, 测定相关生理生化参数。

1.3.2 气体浓度变化分析

将专用硅胶密封垫紧密贴合于包装膜表面, 使用无菌采样针穿透密封垫插入包装顶空部位, 待仪器读数达到稳定状态后, 记录 O₂ 和 CO₂ 的体积分数。

1.3.3 呼吸速率的测定

参考 Du 等^[8]方法进行测定不同贮藏时期果实的呼吸速率, 先提前打开仪器预热 1 h, 待仪器稳定调零后即可进行测定。称量 50 g 果实, 缓慢递送置空气室底部, 密封气室, 记录 1 min 气室 CO₂ 浓度的变化。呼吸强度按照式 (1) 计算。

$$Q = \frac{(\rho - \rho_0) \times V \times M}{V_m \times m \times t} \times 1000 \quad (1)$$

式中: Q 为呼吸强度, mg/(kg h); ρ_0 为密闭容器初始 CO₂ 质量浓度, mg/L; ρ 为测定后密闭容器中 CO₂ 质量浓度, mg/L; V 为容器总体积, L; V_m 为常温下 CO₂ 摩尔体积, 22.4 L/mol; M 为 CO₂ 的摩尔质量, 44 g/mol; m 为样品质量, kg; t 为测定时间, h。

1.3.4 腐烂率、失重率、可滴定酸和可溶性固形物的测定

随机选取不同处理组中的油桃进行观察, 以发生腐败、霉烂或大面积干缩作为腐烂的认定标准, 统计腐烂油桃数量, 按照式 (2) 计算腐烂率 ($R_{\text{腐烂}}$)。

$$R_{\text{腐烂}} = \frac{N}{N_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: N 为腐烂个数, N_0 为测定总数。

运用称量法测试失重率, 以 7 d 为间隔周期, 用电子天平称取果蔬质量, 失重率 ($R_{\text{失重}}$) 按照式 (3) 计算。

$$R_{\text{失重}} = \frac{m_0 - m}{m_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: m_0 为贮藏前质量, g; m 为贮藏后质量, g。

可滴定酸含量采用酸碱中和滴定法测定^[2]。取 10.0 g 油桃样品, 研磨均匀再定容至 100 mL, 静待 30 min 后过滤。取 20 mL 滤液加入酚酞指示剂, 用 NaOH 标准溶液滴定至呈微红色, 稳定 30 s 不变色。可滴定酸含量按照式 (4) 计算。

$$X = \frac{V \times c \times (V_1 - V_0) \times f}{V_s \times m} \times 100\% \quad (4)$$

式中: X 为可滴定酸含量, %; V 为样品提取液总体积, mL; V_s 为滴定时所取滤液体积, mL; c 为 NaOH 滴定液浓度, mol/L; V_1 为滴定滤液的 NaOH 溶液体积, mL; V_0 为滴定蒸馏水 NaOH 溶液体积, mL; m 为样品质量, g; f 为折算系数, g/mmol, 油桃苹果酸为 0.067 g/mmol。

可溶性固形物含量的测定: 从不同的包装处理组中随机选择果实, 将其捣碎榨汁, 将样品汁液经双层医用纱布过滤后, 均匀滴加至便携式糖度计的检测区域进行测定。

1.3.5 丙二醛 (MDA)、脂氧合酶 (LOX) 活性的测定

丙二醛 (MDA) 参照 Zhang 等^[9]的方法进行测定。脂氧合酶 (LOX) 参考袁晓等^[10]的方法进行测定。

1.3.6 抗氧化酶活性的测定

过氧化物酶 (POD) 参考 Zhang 等^[11]的方法进行

测定。过氧化氢酶 (CAT) 参考 Xu 等^[12]的方法进行测定。抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 参考 Gouda 等^[13]的方法进行测定。超氧化物歧化酶 (SOD) 参考 Jiang 等^[14]的方法进行测定。

1.3.7 硬度、果胶、果胶酶活性的测定

硬度的测定：在油桃表面等距取 5 个点，GY-4 硬度计调零后将探针垂直插入油桃内部，深度控制在 2~4 mm。

果胶的测定：用咔唑比色法测定果胶物质含量^[15]。

果胶酶 (PG) 活性的测定：采用 DNS 法，参考于振林等^[16]的方法测定果胶酶活性。

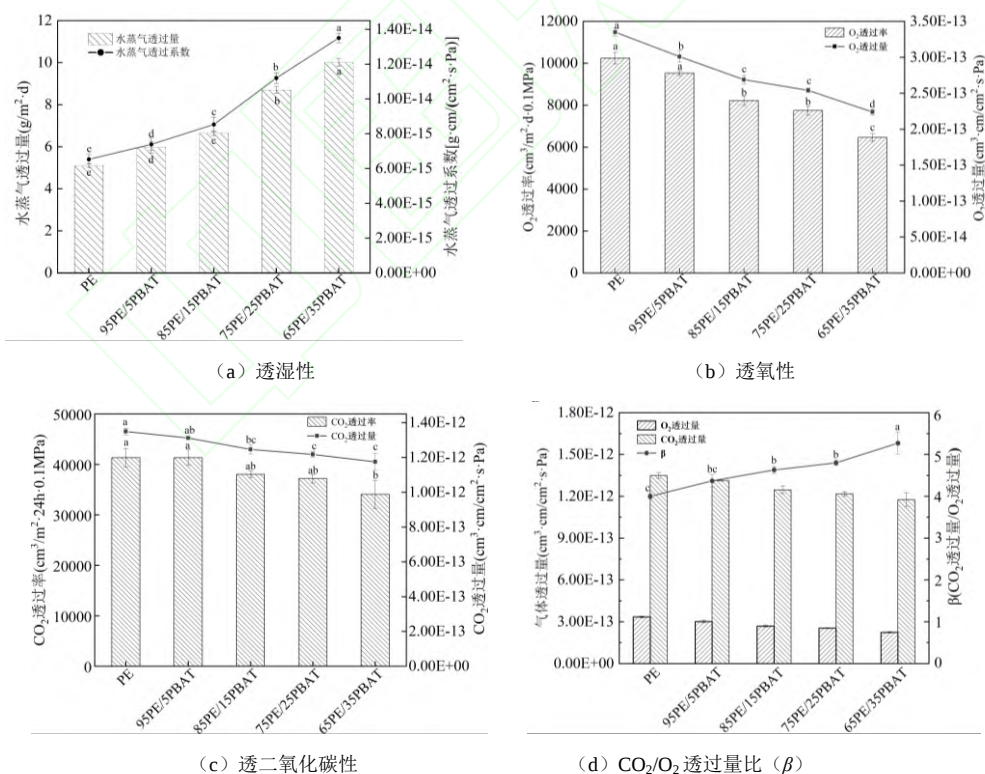
1.4 数据处理

所有的指标测定均设置 3 个平行，数据结果以“平均值±标准差”表示，使用 SPSS 27.0 软件对实验数据进行统计和显著性分析 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 PE/PBAT 共混膜的表征

2.1.1 阻隔性能



注：不同字母表示相同测定指标条件下不同薄膜处理组之间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 1 5 种薄膜透湿性、透氧性、透二氧化碳性和 CO_2/O_2 透过量比 (β) 的变化

Fig. 1 Changes in moisture permeability, oxygen permeability, carbon dioxide and β of five films

2.1.2 微观形态

5 种薄膜透湿性、透氧性、透二氧化碳性和 CO_2/O_2 透过量比 (β) 的变化如图 1 所示。由图 1 可知，随着 PBAT 含量的上升，水蒸气透过量 (WVT) 和水蒸气透过系数 (P_v) 显著增加，75PE/25PBAT 膜的水蒸气透过量上升了 8.2%。共混薄膜对 O_2 和 CO_2 的渗透性能呈下降趋势， O_2 透过率下降了 37%， CO_2 透过率下降了 17.6%。同时，薄膜的 CO_2/O_2 选择性透过比 (β 值) 显著升高， CO_2/O_2 透过比由纯 PE 膜的 4.0 上升到 75PE/25PBAT 膜的 4.9，气体调节范围变广，薄膜的选择渗透性增加。

上述结果表明，引入 PBAT 组分可显著提升聚乙烯薄膜的水蒸气透过性能。这可能是由于 PBAT 链中的极性官能团通过氢键和偶极-偶极相互作用与水蒸气分子形成分子间键合，具有更亲水的特性，也可能是由于 PE-g-MAH 相容剂的加入，由于在 PE-g-MAH 链中含有马来酸酐基团，导致共混体系极性增加^[17-18]。 CO_2/O_2 透过比增大，这可能主要是 PBAT 在 PE 基体中的分散更加均匀，PE 与 PBAT 相之间的界面附着力更好，限制了 O_2 和 CO_2 分子的扩散路径，形成了更长的、更曲折的路径，以致降低了气体通过共混膜的渗透性^[19]。

5 种薄膜表面和断面的 SEM 图如图 2 所示。纯

PE 膜呈现典型的光滑表面形貌, 其断面结构致密且均一。随着 PBAT 组分比例提升, 复合材料表面粗糙度逐渐增加, 出现少量颗粒团聚, 断面形态变为轻微褶皱状。这可能是由于 PE-g-MAH 的引入显著

改善了相界面结合状况, 增强了界面结合力, 这一现象与 Koker 等^[20]报道的 PE-g-MA 改性体系具有相似的作用机制。

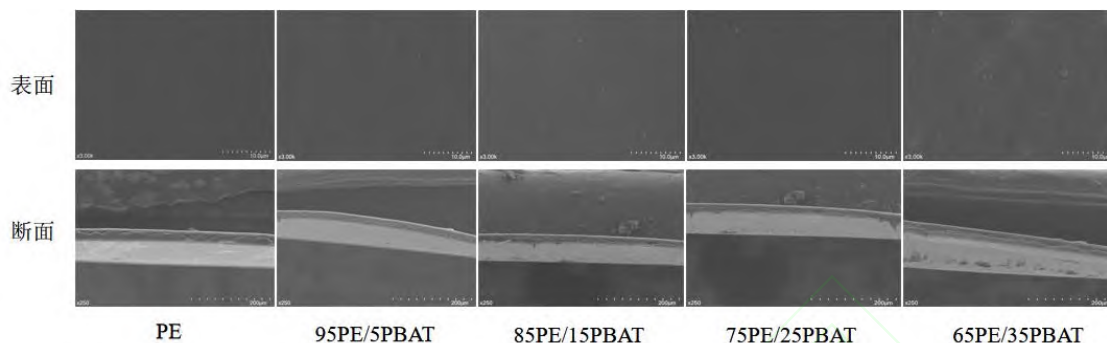


图 2 5 种薄膜表面和断面的 SEM 图

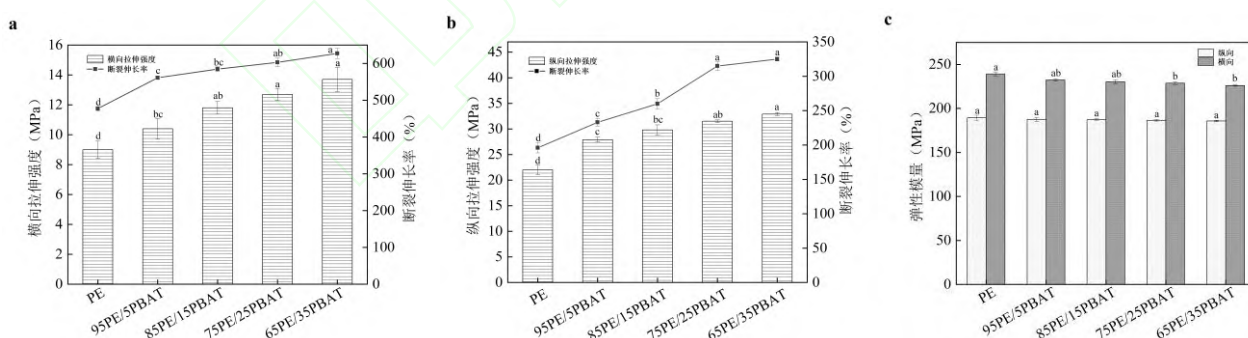
Fig. 2 SEM images of the surface and cross-section of the five films

2.1.3 力学性能

与纯 PE 膜相比, PE/PBAT 复合膜随 PBAT 含量的增加, 薄膜材料在横向和纵向两个维度上的断裂伸长率与拉伸强度均表现出显著提升 (图 3)。横向拉伸结果表明, 当 PBAT 含量增加至 25% 时, 拉伸强度增长了 41.1%, 断裂伸长率增长了 26.3%, 弹性模量呈现略微降低的趋势。纵向拉伸结果显示, 对于 75PE/25PBAT 而言, 拉伸强度增长了 43.2%, 断裂伸长率增长了 60.7%, 弹性模量降低。这是由于 PBAT 是一种无规嵌段共聚物, 在聚合物结构中结晶程度小, 因此相对于 PE 具有低弹性模量、较高的韧性、延展性及抗冲击强度。PE-g-MA 相容剂的加入

增强了 PE 基质与 PBAT 相间的界面黏附导致了增容 PE/PBAT 共混薄膜力学性能的改善^[21]。

综上所述, PBAT 的加入改善了力学性能, 薄膜横纵向的拉伸强度和断裂伸长率显著上升; 提高了气体的渗透性能, 水蒸气透过率提升了近 1 倍, 亲水性提高, CO₂/O₂ 透过比由原来的 4.0 上升到 5.2, 扩大了气体调节范围。其中, 75PE/25PBAT 膜的机械性能和阻隔性能均优于纯 PE 膜, 且 75PE/25PBAT 膜的 CO₂/O₂ 透过比为 4.9, 与油桃最佳贮藏环境参数中 CO₂/O₂ 透过比 (β 值) 4.94 最为接近, 因此选用 75PE/25PBAT 膜作为油桃的气调包装。



注: 不同字母表示相同测定指标条件下不同薄膜处理组之间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 3 5 种薄膜的机械性能的变化

Fig. 3 Changes in mechanical properties of five films

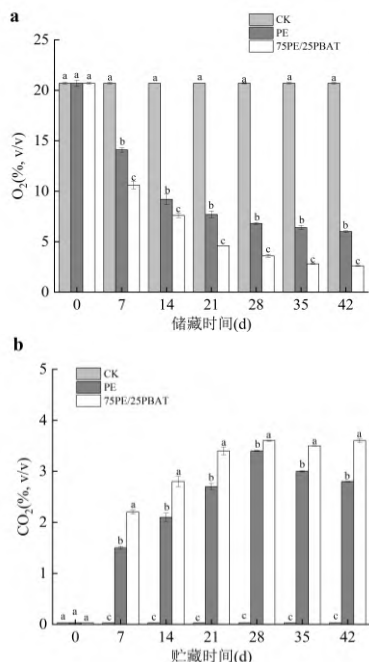
2.2 PE/PBAT 气调膜应用于油桃保鲜

2.2.1 不同薄膜袋内气体含量变化

保持包装袋内合适的气体组成对于避免果蔬发生无氧呼吸、限制果蔬呼吸强度、延缓果蔬衰老具

有重要意义^[22]。不同薄膜袋内气体含量变化如图 4 所示。在贮藏期间, PE 包装体系 O₂ 含量稳定在 6.8%~9.4%, 75PE/25PBAT 气调组袋内的 O₂ 浓度在贮藏 21 d 内由初始的 20.7% 快速降至 4.6%, 在贮藏

后期, 维持在 2.3%~3.6% 之间直至贮藏结束。CO₂ 浓度在 1.6%~3.3%, 在 21 d 时由开始的 0.03% 上升到 3.4%, 之后保持在 3.4%~3.8% 范围内。O₂、CO₂ 浓度处于动态平衡, 与油桃呼吸特性能够较好地匹配, 延缓其衰老和品质的下降。



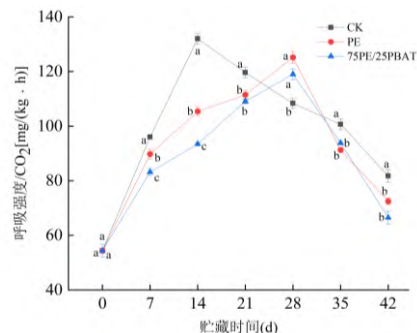
注: 不同字母表示相同贮藏时间不同处理组之间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 4 不同薄膜袋内气体含量的变化

Fig. 4 Changes in gas contents of different films

2.2.2 不同薄膜对油桃呼吸速率的影响

油桃果实呼吸速率在贮藏过程中呈现典型的呼吸跃变特征, 表现为先升高后降低的单峰曲线 (图 5)。CK 组在 14 d 达到呼吸高峰, 75PE/25PBAT 组在 21 d 出现呼吸峰值, 为 119 mg/(kg h), 推迟出现 7 d 且峰值低于另外两组, 与同时期 CK 组相比降低 9.85%。这可能是因为 75PE/25PBAT 气调组具有较低的 CO₂ 透过率, 可减少袋内由呼吸作用产生的 CO₂ 往外扩散, 形成的高 CO₂ 低 O₂ 气氛条件在一定程度上能够很好地抑制油桃在贮藏期的呼吸速率, 延缓呼吸跃变峰值的出现, 减少果实养分消耗, 更好地维持其营养品质^[23]。



注: 不同字母表示相同贮藏时间不同处理组之间差异显著 ($P < 0.05$)。

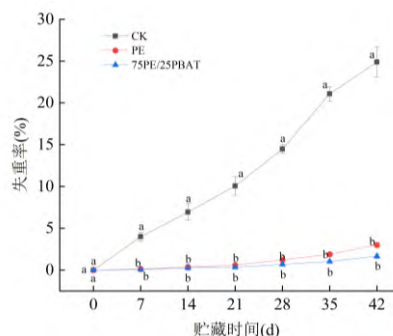
图 5 不同薄膜对油桃呼吸速率的影响

Fig. 5 Effect of different films on the respiration rate of

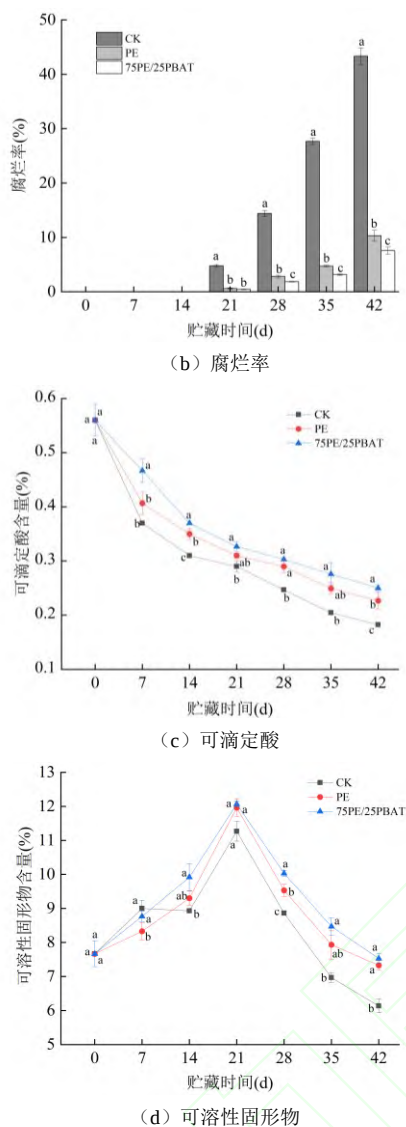
Prunus persica var. *nectarina*.

2.2.3 不同薄膜对油桃生理损耗和营养品质的影响

不同薄膜对油桃失重率、腐烂率、可滴定酸和可溶性固形物的影响如图 6 所示。75PE/25PBAT 气调组的失重率显著低于 CK 组, 贮藏 42 d 时, 75PE/25PBAT 组的失重率为 1.65%, 比 CK 组失重率低 23.22%。前 14 d 各组都未出现果实腐烂现象, 在 42 d 时, PE 组和 75PE/25PBAT 组的腐烂率分别比 CK 组低 76.23% 和 82.53%。贮藏前 7 d 可滴定酸 (TA) 含量下降速率快, 在后续阶段, 呈缓慢递减趋势; 42 d 时, 75PE/25PBAT 组效果最好, 约为 CK 组和 PE 组的 1.39 倍和 1.13 倍, 延缓了油桃果实的衰老。可溶性固形物 (TSS) 含量在 21 d 达到峰值, 后期营养物质可能被大量的微生物以及呼吸作用消耗, 导致含量下降; 42 d 时, 75PE/25PBAT 组的 TSS 含量是 CK 组的 1.29 倍。



(a) 失重率



注: 不同字母表示相同贮藏时间不同处理组之间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 6 不同薄膜对油桃失重率、腐烂率、可滴定酸和可溶性固形物的影响

Fig. 6 Effect of different films on weight loss rate, rotting rate, translatable acid and soluble solids content rate of *Prunus persica* var. *nectarina* during storage

75PE/25PBAT 气调组的失重率和腐烂率最低, 表明其减少水分和营养物质的消耗, 有效延缓油桃果实腐烂进程^[24]。这可能是由于 75PE/25PBAT 组能够抑制果实呼吸、蒸腾作用产生的水分, 保持贮藏环境的干燥, 从而减少微生物感染的可能性^[25]。贮藏期间, 各处理组 TA 含量呈下降趋势, 这与 TA 作为呼吸作用的主要代谢底物被持续消耗有关^[26]。贮藏初期, 所有组别的 TSS 含量均表现出上升趋势, 可能与油桃中淀粉、果胶及纤维素等大分子物质在

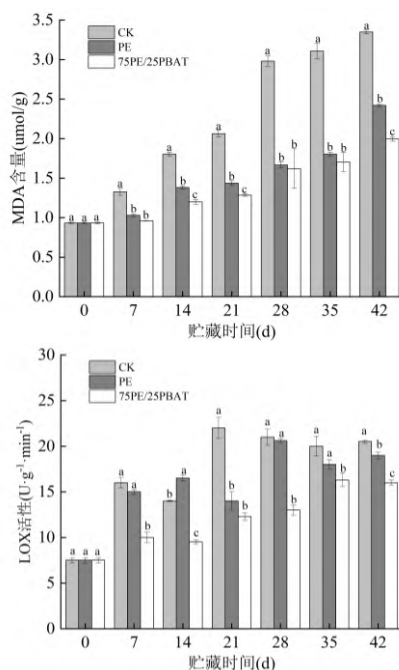
采后初期水解作用增强有关, 导致果实中的糖分不断积累^[27]。其中, 75PE/25PBAT 组的 TSS 保持效果最好, 这可能是 75PE/25PBAT 的应用抑制了 TSS 作为呼吸代谢底物的消耗速率, 促进了油桃中糖分的保存与积累^[28-29]。

2.2.4 不同薄膜对油桃膜脂损伤的影响

不同薄膜对油桃 MDA 含量和 LOX 活性的影响如图 7 所示。丙二醛 (MDA) 是细胞内膜脂发生过氧化过程的产物, 含量越高表示果蔬膜脂伤害越严重^[30]。不同处理组的 MDA 含量都随着贮藏时间增加而持续上升。CK 组果实的 MDA 含量增加得最快, 75PE/25PBAT 组上升得最缓慢。42 d 时, 75PE/25PBAT 组 MDA 含量为 $1.99 \mu\text{mol g}^{-1}$, 低于另两组, 分别是 CK 组含量和 PE 组的 59.58% 和 82.57%。

脂氧合酶 (LOX) 通过催化不饱和脂肪酸生成氢过氧化物, 进而引发膜脂过氧化链式反应, 导致果实细胞膜系统损伤^[31]。随着贮藏时间的增加, 油桃的脂氧合酶 LOX 活性处于波动状态, 整体表现出上升的趋势。75PE/25PBAT 组上升趋势相较其他两组更为缓慢且整体最低。在 42 d 时, 75PE/25PBAT 组的 LOX 活性较 CK 组降低了 28.51%。

75PE/25PBAT 气调组通过调节包装内 O_2 和 CO_2 降低油桃的呼吸强度, 更好地维持了细胞膜的透性, 保护了细胞的完整性, 有效抑制 MDA 含量和 LOX 活性的上升, 降低油桃在贮藏过程中的膜损伤和活性氧对细胞的伤害, 减缓果实的衰老, 延长其贮藏时间^[32]。



注：不同字母表示相同贮藏时间不同处理组之间差异显著 ($P<0.05$)。

图7 不同薄膜对油桃MDA含量和LOX活性的影响

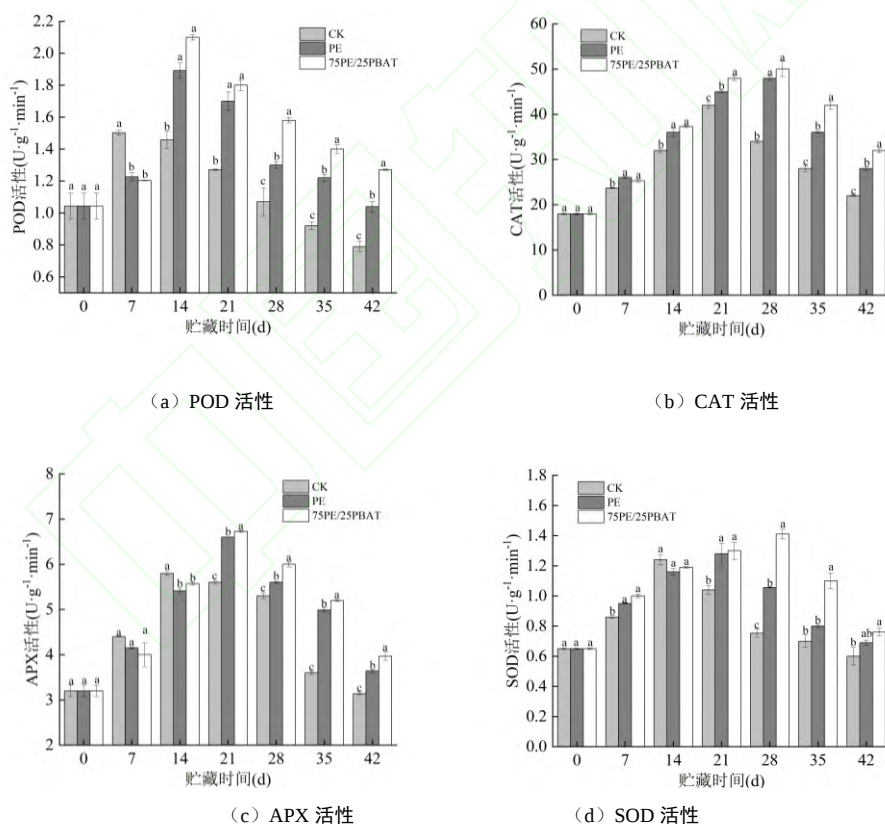
Fig. 7 Effect of different films on MDA content and LOX activity of *Prunus persica* var. *nectarina*.

2.2.5 不同薄膜对油桃抗氧化酶活性的影响

贮藏期间, 各处理组油桃果实的四种抗氧化酶活性均呈现先升后降的变化趋势, 且 75PE/25PBAT 组基本上保持最高活性 (图8)。随着贮藏时间的延长, 各组 POD 活性开始下降, 21 d 之后, 75PE/25PBAT 组保持较高的活性且显著高于其他两组。贮藏期间, 75PE/25PBAT 组的 CAT 活性普遍高于对照组, 在贮藏末期, 各组差异显著, 与 CK 组相比, 75PE/25PBAT 组提高 45.45%。42 d 时, 75PE/25PBAT 组的 APX 活性为 CK 组酶活性的 1.26 倍。75PE/25PBAT 组 APX 在果实贮藏后期活性显著

高于 CK 组和 PE 组。75PE/25PBAT 组的 SOD 峰值则在第 28 d 出现, 且其相较于其他组始终处在较高的水平。贮藏 42 d 时, PE 组和 75PE/25PBAT 组的酶活性比 CK 组提升 15.00%、26.67%。

75PE/25PBAT 气调处理可显著提升油桃果实的抗氧化性能, 其机制可能与该气调环境下诱导了相关抗氧化酶活性的提高, SOD 通过催化超氧阴离子自由基的歧化反应, 生成过氧化氢 (H_2O_2)^[33], 随后 POD、CAT、APX 协同作用, 清除 H_2O_2 , 将其分解为 H_2O 和 O_2 , 显著增强了活性氧 (ROS) 清除效率^[34-35], 更有效地减轻果实贮藏期间的氧化损伤, 增强油桃的抗氧化能力, 进而延缓油桃衰老进程^[36-37]。通过上述机制显著抑制了 MDA 的积累, 有助于维持线粒体正常功能, 从而支持更稳定的呼吸代谢, 与安容慧等^[38]自发气调包装保鲜草莓具有相似的作用机制。



注：不同字母表示相同贮藏时间不同处理组之间差异显著 ($P<0.05$)。

图8 不同薄膜对油桃 POD 活性、CAT 活性、APX 活性和 SOD 活性的影响

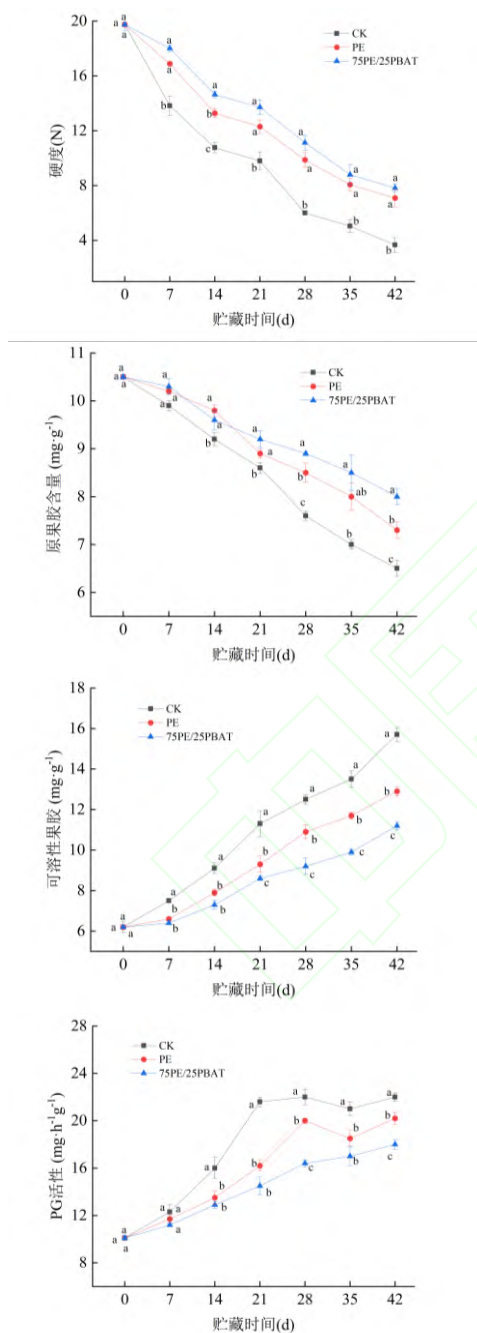
Fig. 8 Effect of different films on POD activity, CAT activity, APX activity and SOD activity (d) of *Prunus persica* var. *nectarina*.

2.2.6 不同薄膜对油桃软化的影响

不同薄膜对油桃硬度、原果胶、可溶性果胶、PG 活性的影响如图 9 所示。油桃果实硬度呈逐步下降的趋势; 在 42 d 时, 75PE/25PBAT 硬度为 0 d 的

39.67%, 与 CK 组存在显著性差异。随着贮藏期的增加, 原果胶含量逐渐下降而可溶性果胶含量逐渐上升; 在 42 d 时, CK 组原果胶含量较 0 d 下降 38.10%, 而 PE 组和 75PE/25PBAT 组降低 30.47%和

23.81%, 气调组原果胶含量为 CK 组的 1.23 倍。75PE/25PBAT 组可溶性果胶含量在中后期明显低于其他两组; 贮藏末期, 75PE/25PBAT 组的可溶性果胶含量是 CK 组的 71%。油桃在贮藏期内的 PG 活性整体呈上升趋势; 75PE/25PBAT 组 PG 活性在贮藏末期达到峰值, 比 CK 组低 18.18%, 气调组抑制 PG 活性的上升效果明显; 在 28 d 和 42 d, 75PE/25PBAT 组 PG 活性显著低于其他两组 ($P<0.05$)。



注: 不同字母表示相同贮藏时间不同处理组之间差异显著 ($P<0.05$)。

图9 不同薄膜对油桃硬度、原果胶、可溶性果胶、PG活性的影响

Fig. 9 Effect of different films on firmness, PP and SP and PG activity of *Prunus persica* var. *nectarina*.

75PE/25PBAT 气调组油桃的硬度最高, 且能够显著抑制原果胶的下降和可溶性果胶的增加, 并对 PG 活性具有显著抑制作用。从细胞壁代谢的角度考虑, PG 是催化果胶多糖水解、导致细胞壁结构解体的关键酶^[39]。75PE/25PBAT 气调组的低氧环境降低了油桃的呼吸代谢强度, 从而减少能量(ATP)的生成, 而 PG 合成与激活依赖能量的供给, 从而有效抑制了 PG 活性, 减缓了原果胶向可溶性果胶的转化进程^[40], 从而有助于维持细胞壁结构和组成的完整性, 最终延缓了果实的软化进程^[41-42]。

3 结论

本研究以 PE、PBAT 为原料, 并以 PE-g-MAH 为相容剂, 开发了一种气调保鲜包装薄膜。PBAT 的加入显著提升了薄膜的机械性能和气体阻隔性能等。以油桃为实验对象, 根据油桃特性, 设计适合油桃贮藏的气调包装的各项参数, 筛选出综合性能优异的 PE/PBAT 气调膜应用到油桃的保鲜中, 根据贮藏期间各指标的变化, 75PE/25PBAT 的气调膜能有效减缓油桃营养品质的下降, 抑制 ROS 的积累, 提高油桃的抗氧化能力, 并通过缓解细胞壁结构的解体延缓果实的软化进程。综上所述, 75PE/25PBAT 气调膜可以显著提升油桃采后保鲜品质, 为延长油桃贮藏时间提供有效的技术方案, 同时也为功能性气调薄膜在农产品保鲜中的应用奠定了理论基础。

参考文献:

- [1] Zhao Handong, Shu Chang, Fan Xinguang, et al. Near-freezing temperature storage prolongs storage period and improves quality and antioxidant capacity of nectarines[J]. Scientia Horticulturae, 2018, 228: 196-203.
- [2] Lan Yusi, Liu Yu, Li Xiang, et al. Fucoidan-based coatings extend the shelf-life of nectarines[J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101479.
- [3] Jayarajan S, Sharma R R. Postharvest life and quality of 'Snow Queen' nectarine (*Prunus persica* var. *nucipersica*) as influenced by edible coatings during cold storage[J].

- Acta Physiologiae Plantarum, 2020, 42(7): 6919-6935.
- [4] Xu Ranran, Liu Wanqing, Zhou Jiahua, et al. Ectoine inhibits postharvest decay of nectarine fruit by strengthening fruit resistance[J]. Postharvest Biology and Technology, 2025, 223: 113458.
- [5] 李京春, 王立仙, 郭衍银. 主动自发气调对油桃常温保鲜效果的影响[J]. 中国果菜, 2023, 43(5): 4-10.
- [6] Karaki A, Hammoud A, Masad E, et al. A review on material extrusion (MEX) of polyethylene: challenges, opportunities, and future prospects[J]. Polymer, 2024, 307: 127333.
- [7] Swarup R, Tabli G, Wanli Z, et al. Recent progress in PBAT-based films and food packaging applications: A mini-review[J]. Food chemistry, 2023, 437(P1): 137822.
- [8] Du Meijun, Liu Zitian, Zhang Xiantao, et al. Effect of pulsed controlled atmosphere with CO₂ on the quality of watercored apple during storage[J]. Scientia Horticulturae, 2021, 278: 109854.
- [9] Zhang Rui, Miao Ze, Xie Shuang, et al. 1-Methylcyclopropene delays browning and maintains aroma in fresh-cut nectarines[J]. Foods, 2025, 14(2): 185.
- [10] 袁晓, 易景怡, 付龙威, 等. 真空包装结合低温贮藏对鲜切芋头的保鲜效果[J]. 食品工业科技, 2024, 45(11): 280-288.
- [11] Zhang Teng, Zhang Qianru, Lei Yushan, et al. Plasma activated water on improving the quality of fresh-cut banana slices[J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, 201: 112360.
- [12] Xu Dongying, Zuo Jinhua, Li Peiyun, et al. Effect of methyl jasmonate on the quality of harvested broccoli after simulated transport[J]. Food Chemistry, 2020, 319: 126561.
- [13] Gouda M H B, Zhang Chunjie, Peng Sijia, et al. Combination of sodium alginate-based coating with L-cysteine and citric acid extends the shelf-life of fresh-cut lotus root slices by inhibiting browning and microbial growth[J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 175: 111502.
- [14] Jiang Fenghua, Zhou Lei, Zhou Wei, et al. Effect of modified atmosphere packaging combined with plant essential oils on preservation of fresh-cut lily bulbs[J]. LWT- Food Science and Technology, 2022, 162: 113513.
- [15] Gerschenson L N, Fissore E N, Rojas A M, et al. Pectins obtained by ultrasound from agroindustrial by-products[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 118: 106799.
- [16] 于振林, 刘亚琼, 王颀, 等. 白地霉红枣果胶酶的分离纯化及酶学性质的研究[J]. 食品科技, 2017, 42(10): 253-261.
- [17] 李响, 吴兰兰, 邓清晨, 等. PPC 对 PBAT/PLA 材料的加工及其薄膜性能研究[J]. 塑料助剂, 2025, 29(5): 19-24+42.
- [18] Hemsri S, Puttiwanit K, Saeang K, et al. Low density polyethylene/poly(butylene adipate-co-terephthalate) films: effect of a compatibilizer on morphology and properties[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 965(1): 012020.
- [19] 云雪艳, 陈文锦, 许兵, 等. PE/PBAT 共混薄膜的性能及对迷你黄瓜的保鲜效果[J]. 包装工程, 2022, 43(03): 69-77.
- [20] Koker H S, Ersan H Y, Aytac A. Effects of PE-g-MA on tensile, thermal, surface, barrier properties, and morphology of plasticized LDPE/chitosan films[J]. Iranian Polymer Journal, 2023, 32(3): 263-273.
- [21] Ge Jiu, Lu Wenyi, Zhang Heng, et al. Exploring sustainable food packaging: nanocellulose composite films with enhanced mechanical strength, antibacterial performance, and biodegradability[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 259(2): 129200.
- [22] Makino Y, Nishizaka A, Yoshimura M, et al. Influence of low O₂ and high CO₂ environment on changes in metabolite concentrations in harvested vegetable soybeans[J]. Food Chemistry, 2020, 317: 126380.
- [23] 秦艺璇, 史馥毓, 黎治伶, 等. PBAT 气调保鲜膜的制备及其在血橙保鲜中的应用[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(6): 90-101.
- [24] Hajiesmaeili E, Danaee E. Evaluation of the effect of postharvest salicylic acid and calcium chloride treatment on the quality and storage life of nectarine fruit (*Prunus persica* L. Batsch)[J]. Applied Fruit Science, 2023, 66(2): 495-503.
- [25] 袁越, 王一钰, 马杨欣, 等. 果蔬贮藏保鲜技术研究现状综述[J]. 农业科技与装备, 2023, 45(5): 56-59.
- [26] 郝浩然, 刘思含, 周宏胜, 等. 1-MCP 结合 ClO₂ 处理对水蜜桃保鲜效果的影响[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(5): 1-9.
- [27] Shi Yanna, Li Baijun, Su Guanqing, et al. Transcriptional regulation of fleshy fruit texture[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2022, 64(9): 1649-1672.
- [28] Suo Jiangtao, Li Hua, Ban Qiuyan, et al. Characteristics of

- chilling injury-induced lignification in kiwifruit with different sensitivities to low temperatures[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2018, 135: 8-18.
- [29] 孙灵湘, 全鑫瑶, 邵千朔, 等. 低压静电场协同冰温对水蜜桃的保鲜效果分析[J]. *现代食品科技*, 2025, 41(09): 173-183.
- [30] Li Dandan, Li Lu, Liu Tao, et al. Combination of pure oxygen pretreatment and near-freezing temperature storage inhibits browning, maintains antioxidant and physicochemical quality of fresh-cut nectarines[J]. *Journal of Food Safety*, 2024, 44(2): 13122.
- [31] Priyanka S, Yamshi A, Edyta M, et al. Specific roles of lipoxygenases in development and responses to stress in plants[J]. *Plants*, 2022, 11(7): 979.
- [32] 马佳佳, 隋思瑶, 孙灵湘, 等. 微孔自发气调包装对冠玉枇杷的保鲜效果[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(11): 137-146.
- [33] Wei Meilin, Ge Yonghong, Li Canying, et al. G6PDH regulated NADPH production and reactive oxygen species metabolism to enhance disease resistance against blue mold in apple fruit by acibenzolar-S-methyl[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2018, 148: 228-235.
- [34] Wei Tianjiao, Li Guang, Wang Mingming, et al. Physiological and transcriptomic analyses reveal novel insights into the cultivar-specific response to alkaline stress in alfalfa (*Medicago sativa* L.)[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 228: 113017.
- [35] 李江阔, 田振家, 张鹏, 等. 微环境气调对黄花菜贮藏品质和生理变化情况的分析[J/OL]. *现代食品科技*, 1-12[2026-02-12].<https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.1.1358>.
- [36] 夏乐晗, 黄振宇, 陈龙, 等. 杏果实成熟后果肉硬度及软化相关酶活性的变化[J]. *中国南方果树*, 2022, 51(5): 130-134.
- [37] 罗卢弟, 陆承锐, 邓云丹, 等. 不同保鲜处理对红托竹荪采后贮藏品质的影响[J]. *北方园艺*, 2025, 49(13): 89-99.
- [38] 安容慧, 姚莉, 邓秀丽, 等. 自发气调包装对草莓货架期品质的影响[J]. *中国果菜*, 2025, 45(11): 10-19.
- [39] Shi Lieqin, Liu Qin, Qiao Qinghua, et al. Exploring the effects of pectate and pectate lyase on the fruit softening and transcription profiling of *Solanum lycopersicum*[J]. *Food Control*, 2022, 133(PB): 108636.
- [40] Posé S, Paniagua C, Matas A J, et al. A nanostructural view of the cell wall disassembly process during fruit ripening and postharvest storage by atomic force microscopy[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 87: 47-58.
- [41] 熊子璇, 吴志蒙, 黄华, 等. 不同保鲜袋包装对采后油桃果实贮藏品质的影响[J]. *包装工程*, 2022, 43(3): 78-86.
- [42] 方馨, 屈文丹, 王昭源, 等. 采前喷施海藻寡糖对甜樱桃贮藏品质及果实软化的影响[J/OL]. *食品工业科技*, 1-16[2026-02-12].<https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025050053>.