

全降解 PLA/PBAT/ESO 保鲜膜在草莓保鲜中的应用研究

李结瑶^{1,2,3}, 罗文翰^{1,2,3}, 翟万京^{1,2,3}, 蓝碧锋⁴, 缪承杜⁴,
肖更生^{2,3}, 肖乃玉^{1,2,3}

(1.仲恺农业工程学院 包装工程系, 广州, 510225; 2.广东省岭南特色食品科学与技术重点实验室, 广州, 510225; 3.广东省普通高校中央厨房岭南特色食品绿色制造工程技术开发中心, 广州, 510225; 4.广州辐锐高能技术有限公司, 广州 511458)

摘要: **目的** 采用全生物降解材料 PLA/PBAT/ESO 复合膜替代 PE 保鲜膜, 并应用于水果保鲜包装。**方法** 测定市购 PE 膜和实验室自制 PLA/PBAT/ESO 保鲜膜的透湿性、透气性及力学性能, 并以新鲜草莓为保鲜对象, 以无包装防护为空白对照, 研究 PE 保鲜膜、全降解 PLA/PBAT/ESO 保鲜膜在贮藏温度 4 °C 下对草莓果实的保鲜效果。**结果** 相较于 PE 保鲜膜, 全降解 PLA/PBAT/ESO 保鲜膜的效果更佳, 其透湿透气性和力学性能更优, 能够有效抑制果实贮藏过程中可溶性固形物含量、硬度、可滴定酸含量、维生素 C 含量的下降, 保持草莓的口感、风味和营养成分。**结论** 由于全降解 PLA/PBAT/ESO 保鲜膜的透气性和透湿性高于 PE 保鲜膜, 减少了结露现象, 减缓了微生物的滋长, 能够有效地延缓草莓这类湿敏性水果产品的腐败变质进程, 维持果实的贮藏品质。

关键词: 草莓; 保鲜; PLA/PBAT/ESO; 可降解

中图分类号: TS255.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)05-0090-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.05.012

Application of Fully Biodegradable PLA/PBAT/ESO Films in Strawberry Preservation

LI Jie-yao^{1,2,3}, LUO Wen-han^{1,2,3}, ZHAI Wan-jing^{1,2,3}, LAN Bi-feng⁴,
MIAO Cheng-du⁴, XIAO Geng-sheng^{2,3}, XIAO Nai-yu^{1,2,3}

(1. Packaging Engineering Department, Zhongkai University of Agricultural and Engineering, Guangzhou 510225, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Lingnan Specialty Food Science and Technology, Guangzhou 510225, China; 3. Central Kitchen Lingnan Specialty Food Green Manufacture College Engineering Technology Development Center of Guangdong Province, Guangzhou 510225, China; 4. Guangzhou Furui High Energy Technology Co., Ltd., Guangzhou 511458, China)

ABSTRACT: The work aims to replace PE plastic wraps with fully biodegradable PLA/PBAT/ESO composite films and apply them in fruit preservation packaging. The moisture permeability, air permeability and mechanical properties of commercial PE films and laboratory-made PLA/PBAT/ESO composite films were measured. With fresh strawberries as the preservation objects and unpackaged strawberries as the blank control, the preservation effects of PE plastic wraps and degradable PLA/PBAT/ESO films on strawberries were studied at 4 °C. The results showed that compared with PE plastic wraps, fully degradable PLA/PBAT/ESO films had better preservation effect, moisture permeability, air permeability and

收稿日期: 2022-06-15

基金项目: 广州市科创委民生科技项目 (202002020080); 广州市南沙区民生科技计划 (2021MSO12); 茂名市科技计划 (2021S0007); 校教改项目 (KA200190323)

作者简介: 李结瑶 (1998—), 女, 硕士生, 主攻高分子材料。

通信作者: 罗文翰 (1990—), 男, 博士, 特聘副教授, 主要研究方向为功能高分子材料。

mechanical properties. It could effectively inhibit the decline of soluble solids, hardness, titratable acid and vitamin C content of fruits and maintain the taste, flavor and nutrients of strawberries during storage. Due to the higher air and moisture permeability, PLA/PBAT/ESO films can reduce the condensation phenomenon and the growth of microorganisms, which effectively delay the deterioration of moisture sensitive fruit products such as strawberries and maintain the storage quality of fruits.

KEY WORDS: strawberry; preservation; PLA/PBAT/ESO; biodegradable

草莓属蔷薇科植物, 果实柔嫩多汁, 富含多种维生素及人体必需的矿物质(包括钙、磷、铁、钾等元素)^[1]。草莓的表皮极薄, 是典型的易腐水果^[2]。针对新鲜草莓在贮藏过程中易腐败变质等问题, 目前草莓保鲜常用的方法包括辐照、气调、热处理、涂膜、冷藏等保鲜技术^[3]。Barkaoui 等^[4]探索了伽马射线辐照剂量对草莓的影响, 研究发现, 伽马射线辐照可以减少微生物的繁殖, 保持草莓的品质。另外, 辐照可以通过刺激苯丙氨酸解氨酶, 促进酚类化合物的生物合成, 在贮藏 7 d 后仍可提高草莓中酚类和黄酮类化合物的总含量, 具有较高的生物活性。Zhao 等^[5]采用冷藏和气调包装对草莓进行保鲜, 在贮藏期间, 草莓的硬度、可溶性固形物含量均显著高于对照组, 能够有效延缓草莓的衰老进程。陈建中等^[6]采用壳聚糖、TiO₂ 为成膜剂, 以中药提取物为抑菌剂, 对草莓进行了复合涂膜处理, 实验表明, 将中药提取物作为抑菌剂, 可显著抑制草莓致病菌的生长和繁殖, 结合复合涂膜处理可有效降低草莓的质量损失率, 维持其维生素 C 含量, 贮藏至第 8 天时果实的维生素 C 含量仍高达 20 mg/100 g。然而, 以上手段的成本较高, 存在损伤产品或食品安全等风险。

现阶段, 利用包装保鲜是有效且安全的手段。传统聚乙烯、聚丙烯、聚氯乙烯等常用包装薄膜经一次性使用后被废弃, 往往难以降解, 对水土资源构成了巨大的威胁。此外, 传统包装材料存在透气性差、透水性差、易结露、加速微生物滋长等缺点, 不利于草莓这类湿敏性商品的贮藏^[7]。聚乳酸(Polylactic acid, PLA)是一种绿色环保的可生物降解高分子材料, 具有优良的力学性能、透气性及二氧化碳透过性^[8-9]。聚己二酸/对苯二甲酸丁二醇酯(PBAT)是一种热塑性可生物降解塑料, 具有优异的延展性、抗冲击性和成膜性, 是增韧 PLA 的绝佳材料^[10]。文中以 PLA 和 PBAT 为主要原材料, 添加含有环氧基团的增容剂环氧大豆油(ESO)、扩链剂 ADR4468、增塑剂乙酰基柠檬酸三正丁酯(Tributyl O-acetylcitrate, ATBC), 以提升其界面黏结力, 实现共混物的平衡性能^[11-12]。通过熔融共混造粒挤出吹膜, 制备具有优异的力学性能、透气性能的全降解保鲜包装材料。对比市购 PE 保鲜膜与实验室自制 PLA/PBAT/ESO 全降解保鲜膜对草莓的保鲜效果, 测定 2 种保鲜膜的力学性能、透气性能及透湿性能, 研究其对草莓质量损失率、总色

差、硬度、可溶性固形物含量、可滴定酸含量、维生素 C 含量及感官评价的影响。

1 实验

1.1 材料与仪器

主要材料: 奶油草莓, 采摘于广州白云区人和大巷中北街的草莓园, 并挑选大小一致、形状正常、无缺陷、无任何物理损伤、颜色饱和的草莓进行保鲜实验; PLA 4032D, 美国 NatureWorks; PBAT C1200, 珠海万通化工有限公司; ESO EBSO-6.6、ATBC T819551, 山东优索化工科技有限公司; ADR 4468, 德国巴斯夫公司; Glad 佳能食品 PE 保鲜膜, RP20 厚度为 0.01 mm, 广州家亮化工有限公司; 草酸、氢氧化钠、L-抗坏血酸、酚酞, 分析纯, 上海麦克林生化科技有限公司。

主要仪器: HTGD-20 小型同向平行双螺杆挤出机, 广州哈尔机械有限公司; XH-423-25 吹膜流延一体机, 东莞市锡华检测仪器有限公司; GY-1 果实硬度计, 上海禾仕仪器家居站; 手持折光仪, 浙江力辰科学仪器有限公司; CR-400 色彩色差计, 柯尼卡美能达中国有限公司; N500 气体透过率测定仪、W301 水汽透过率测定仪、GBH-1 电子万能材料试验机, 广州标际包装设备有限公司; LC-298(D) 华美药品冷藏柜, 298 L, 浙江华美电器制造有限公司。

1.2 方法

1.2.1 PLA/PBAT/ESO 全降解保鲜膜的制备

将原料 PLA/PBAT/ESO/ADR/ATBC(质量比为 20:80:0.5:0.5:2)放入双螺杆中, 共混挤出长条成型, 经过水—冷却—切粒—干燥后, 得到共混复合材料。其中, 从进料至出料的温度分别设置为 170、180、190、190、180 °C, 螺杆转速为 150 r/min。共混材料采用吹膜—流延一体机吹塑成膜, 吹塑温度为 160~170 °C。

1.2.2 草莓果实的保鲜处理

将所选草莓随机分成 3 组, 以未做任何处理的草莓为空白对照, 置于玻璃托盘上。使用 PE 保鲜膜(200 mm×200 mm×0.01 mm)和全降解 PLA/PBAT/ESO 保鲜膜(200 mm×200 mm×0.015 mm)包裹草莓, 每个袋子装入 10 个果实。采用三边热封, 热封功率为 290 W, 热

封时间为 2 s, 另一边用密封夹子封口后分开存放于冰箱(温度 4 ℃, 相对湿度 75%)中。每隔 24 h 采集样品, 并测定草莓的营养成分和生理生化指标, 以研究草莓在保鲜过程中的变化情况。每个处理重复 3 次, 取其平均值。每天开关冰箱的频率为 2 次, 用于取样做检测分析及放样。

1.3 测试项目

1.3.1 保鲜膜力学性能的测定

根据 ISO 1184—1983^[13], 采用 GBH-1 电子万能材料试验机对薄膜进行力学性能测定。将保鲜膜切成 150 mm×10 mm 的矩形条, 实验测试速度为 50 mm/min, 测试夹距为 50 mm。测试 7 个样品, 除掉最高值和最低值, 取其余数值的平均值。

1.3.2 保鲜膜透湿透气性能的测定

依照 GB/T 1037—2021^[14], 采用透湿杯法, 通过水汽透过率测定仪测定保鲜膜的透湿性能。根据 GB/T 1038—2000^[15], 采用压差法, 通过气体透过率测定仪测定保鲜膜的透气性能。

1.3.3 草莓质量损失率的测定

将草莓的初始质量与每天确定的同一组质量之差定义为草莓的质量损失, 按初始质量损失的百分比计算, 实验重复 3 次^[16]。质量损失率(%)的计算见式(1)。

$$\text{质量损失率} = \frac{m_0 - m_n}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_0 为草莓的初始质量; m_n 为草莓第 n 天的质量。

1.3.4 草莓硬度的测定

使用 GY-1 果实硬度计测试草莓的硬度, 选择草莓厚实的地方为测试部位, 每组测试 3 次, 取其平均值。

1.3.5 草莓色差的测定

根据傅佳等^[17]的方法测试草莓的色差。

1.3.6 草莓可溶性固形物含量的测定

用研钵将草莓研磨成匀浆后, 使用手持折光仪测定草莓的可溶性固形物含量, 均重复测定 3 次, 取其平均值^[16]。

1.3.7 草莓可滴定酸含量的测定

采用酸碱滴定法^[18]测定草莓的可滴定酸含量。

1.3.8 草莓维生素 C 含量的测定

采用 2,6-二氯酚酚钠法^[19]测定草莓的维生素 C 含量。

1.3.9 草莓在保鲜过程中感官的变化

选择 10 人(按 GB/T 10220—2012 进行专业培训), 根据感官评价标准^[20](如表 1 所示)对贮藏期间草莓的感官品质进行评分, 取其平均值。

表 1 草莓感官评价标准
Tab.1 Strawberry sensory evaluation criteria

评分	色泽	气味	饱满度	口感	腐烂程度
8~10	鲜红	有清新香味	果实饱满	酸甜多汁	无腐烂
6~8	较红	有较淡香味	较饱满	酸中带甜, 果汁减少	基本无腐烂
4~6	暗红	稍有香味	有一些饱满	不酸不甜, 果汁偏少	有轻微腐烂
2~4	黑红	稍有异味	基本不饱满	果体开始霉变, 果汁明显不足	基本腐烂
0~2	变黑	有明显腐烂味	不饱满	果体已完全霉变, 不可食用	腐烂

1.3.10 数据处理与分析

采用 Origin 2019 作图。采用 SPSS 25.0 软件进行显著性差异分析, $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 力学性能

在果蔬包装材料中, 优异的力学性能是提高内容物稳定性及包装载体耐用性的关键因素。测试数据如表 2 所示, 在 PLA/PBAT/ESO 复合体系中, 由于 PLA 组分的强度较高, 复合材料的抗拉强度较大, 该值为 (13.0 ± 1.69) MPa。PLA/PBAT/ESO 复合膜的断裂伸长率为 $(369 \pm 23.5)\%$, 与 PE 膜相近。总体而言, PLA/PBAT/ESO 全降解膜表现出优良的力学性能, 符合优质高效的保鲜膜材料要求^[21]。

2.2 透湿透气性能

水蒸气透过性和气体透过性是食品包装的基本特性。由于草莓这类水果的水分含量较高, 新陈代谢较快, 呼吸作用产生的水蒸气易在包装袋上凝结, 这会加速微生物的滋长, 使得草莓加剧腐烂^[22]。根据水蒸气性能测试结果(如表 2 所示), PLA/PBAT/ESO 全降解膜的透湿性能较佳, 水蒸气透过系数为 $(52 \pm 2.5) \times 10^{-16} \text{ g} \cdot \text{cm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$, 远高于 PE 膜, 是草莓、樱桃、黑莓等蔷薇科湿敏性水果的理想包装材料。此外, 包装材料的透气性是影响果蔬品质的重要因素之一, 合适的气体透过量可有效降低果实的腐烂率。草莓的呼吸作用较旺盛, 若在较高的阻隔环境中容易导致厌氧发酵, 产生异味, 助长微生物的繁殖。如表 2 所示, PLA/PBAT/ESO 全降解膜的高选择渗透性能不仅可以避免草莓在保鲜过程中发生厌氧发酵反应, 还可作为其他代谢气体的屏障, 有利于延长草莓的货架期^[23]。

表 2 保鲜膜的力学性能和透湿透气性能测定结果
Tab.2 Determination of mechanical properties, moisture and air permeability of films

薄膜	抗拉强度/MPa	断裂伸长率/%	水蒸气透过系数/ ($10^{-16} \text{ g} \cdot \text{cm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$)	氧气透过系数/ ($10^{-12} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$)
PE 膜	18.7±0.57	382±17.3	7.5±1.0	9.1±0.65
PLA/PBAT/ESO 全降解膜	13.0±1.69	369±23.5	52±2.5	278±11

2.3 质量损失率

草莓的质量损失率整体呈现上升趋势,如图 1 所示。当贮藏至第 6 天时,PLA/PBAT/ESO 全降解膜组的质量损失率明显小于空白对照组的质量损失率 ($P < 0.05$),PLA/PBAT/ESO 全降解膜组的质量损失率为 12.5%,与 PE 组相当。在贮藏过程中,由于 PLA/PBAT/ESO 全降解膜的透湿性优于 PE 膜,草莓在正常代谢中产生的水分能透过 PLA/PBAT/ESO 膜,并排到外界。由于 PE 膜较致密,所包裹的草莓释放出来的水分无法及时排出膜外,导致水分聚集在草莓表面,因此 PE 膜组的质量损失率低于 PLA/PBAT/ESO 全降解膜组的质量损失率^[24]。

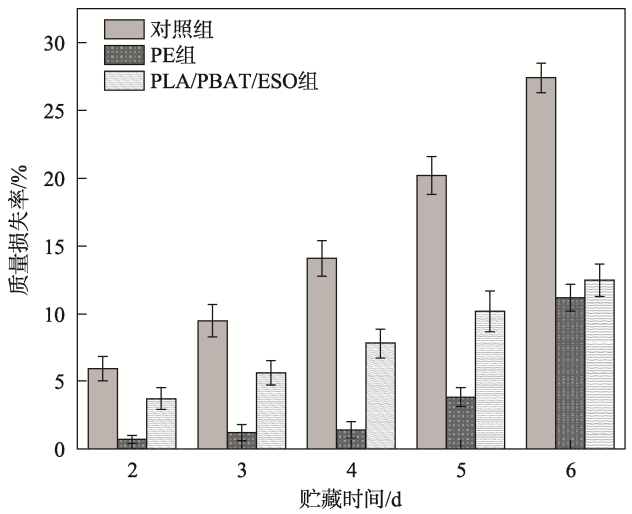


图 1 贮藏期间草莓质量损失率的变化情况
Fig.1 Changes in weight loss rate of strawberries during storage

2.4 硬度

硬度是新鲜草莓贮藏期间主要的物理品质特征之一,与贮藏期密切相关,偏软的草莓易受到微生物的侵染,使其货架期变短。贮藏期间草莓硬度的变化情况如图 2 所示,可以看出,草莓在贮藏过程中发生了软化,使其硬度均显著降低。其中,对照组的硬度下降得最明显 ($P < 0.05$),第 6 天时其硬度为 1.9 kg/cm^2 。PLA/PBAT/ESO 全降解膜组的硬度下降得最为缓慢,第 6 天时其硬度为 2.23 kg/cm^2 。这是由于 PLA/PBAT/ESO 膜具有优异的透气性、透湿性能,使草莓代谢产

生的水蒸气能及时被排出,减少了因微生物侵染产生的病理性失水,这有利于草莓硬度的保持^[25]。

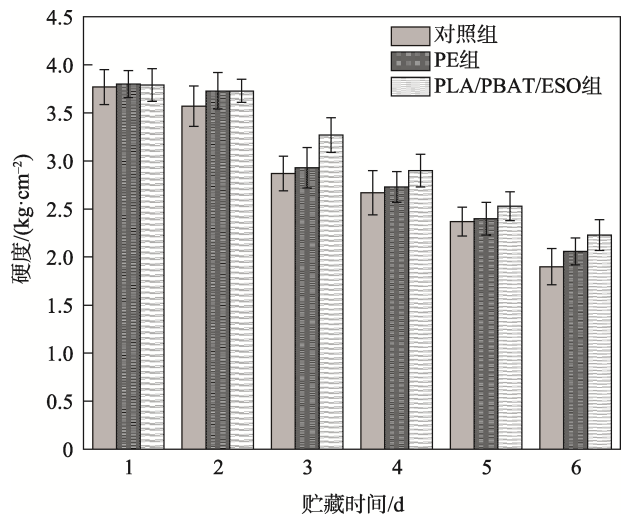


图 2 贮藏期间草莓硬度的变化情况
Fig.2 Changes in hardness of strawberries during storage

2.5 总色差

颜色反映了草莓理化性质及营养成分的改变,是影响草莓销售的一项重要指标,也是消费者接受产品的关键因素。由图 3 可以看出,随着贮藏时间的延长,草莓的色差呈现上升的趋势,其中对照组色差的变化最为明显,差异显著 ($P < 0.05$),而 PLA/PBAT/ESO 保鲜膜的色差变化最小。说明 PLA/PBAT/ESO 全降解膜具有较高的气体透过量,有利于乙烯的释放,减缓了草莓中花色苷含量的下降,较好地维持了果实的光泽度,有利于水果的贮藏保鲜^[26]。

2.6 可溶性固形物含量

可溶性固形物指草莓在正常代谢过程中分解的主要产物,可溶性固形物含量对水果的风味具有重要的影响^[27]。如图 4 所示,随着贮藏时间的延长,草莓果实的可溶性固形物含量持续下降。与对照组对比,PLA/PBAT/ESO 全降解膜能够显著抑制草莓可溶性固形物含量的降低,与 PE 膜的效果接近 ($P > 0.05$)。由此可知,2 种保鲜膜均可以延缓草莓果实可溶性固形物的流失,减少呼吸过程中对糖和酸这 2 种物质的消耗,从而提高草莓的贮藏保鲜效果。

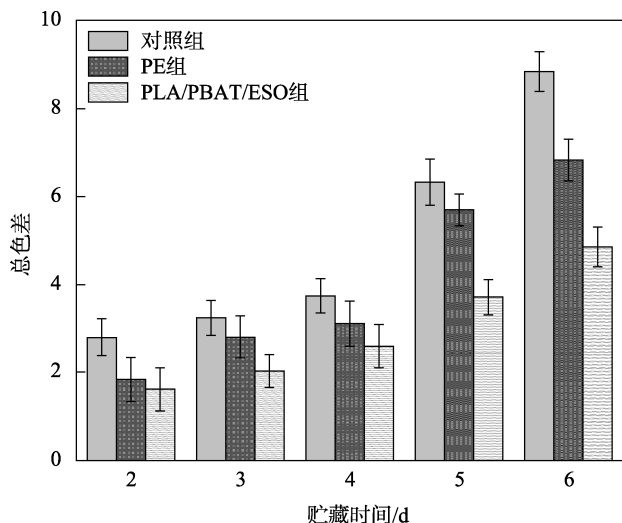


图3 贮藏期间草莓总色差的变化情况
Fig.3 Changes in total color difference of strawberries during storage

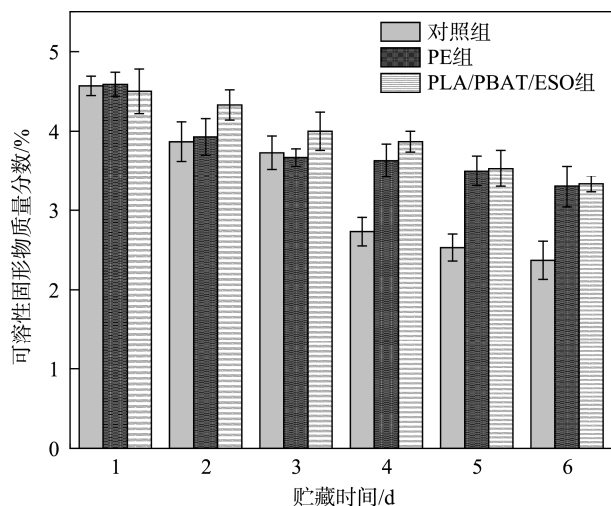


图4 贮藏期间草莓可溶性固形物含量的变化
Fig.4 Changes in soluble solids content of strawberries during storage

2.7 可滴定酸含量

可滴定酸含量的变化可以反映贮藏期间草莓营养物质的消耗程度,在果实采后贮藏过程中,有机酸作为呼吸代谢的底物不断被消耗,其含量在很大程度上决定了草莓的风味品质^[28]。从图5可以看出,每组草莓的可滴定酸值均随着贮藏时间的延长而降低,PLA/PBAT/ESO组的可滴定酸含量的下降速度低于PE组和对照组($P < 0.05$)。说明低气体透过性的PE保鲜膜导致 O_2 快速消耗和 CO_2 积累,可能使有氧呼吸转变为厌氧呼吸,这会加速呼吸底物的消耗,而PLA/PBAT/ESO全降解膜基于优异的透气性,维持了贮藏空间内气体的平衡,有效地抑制了草莓中有机酸的代谢,减缓了可滴定酸的消耗。

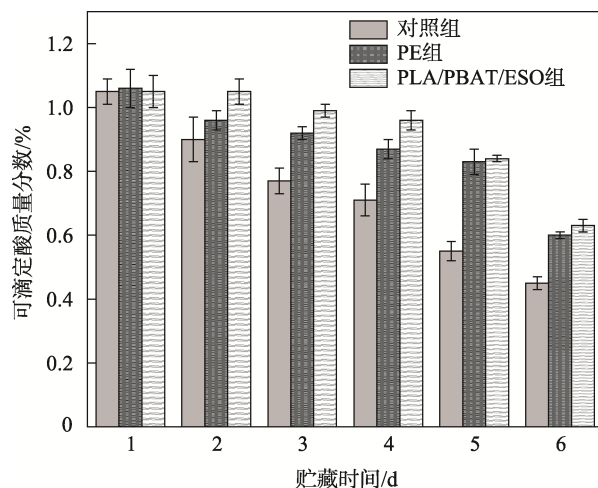


图5 贮藏期间草莓可滴定酸含量的变化
Fig.5 Changes in titratable acid content of strawberries during storage

2.8 维生素C含量

维生素C含量是反映草莓新鲜程度的重要指标。如图6所示,随着贮藏时间的延长,各处理组的初始维生素C含量均有所降低,维生素C含量降低的速度由高到低依次为对照组、PE组、PLA/PBAT/ESO组。其中,PLA/PBAT/ESO组样品在第6天时其维生素C含量仍高达30.0 mg/100 g,与对照组差异显著($P < 0.05$)。说明PLA/PBAT/ESO全降解膜可有效抑制抗坏血酸氧化酶活性的升高,以及抗坏血酸的自氧化程度,有效地降低了抗坏血酸的流失,保持了草莓的品质^[29]。

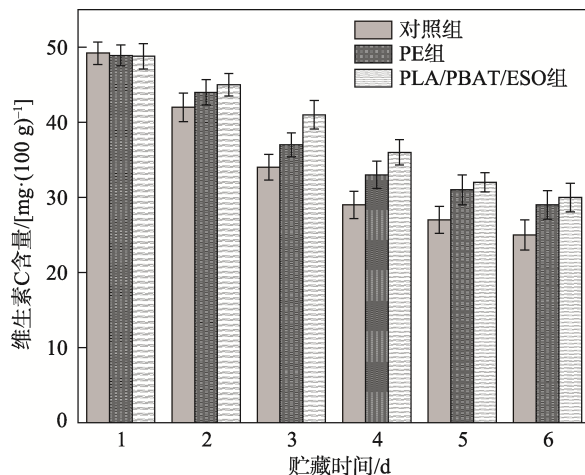


图6 贮藏期间草莓维生素C含量的变化情况
Fig.6 Changes in vitamin C content of strawberries during storage

2.9 感官评价

在贮藏初期,草莓的果肉组织坚硬、光泽度好、鲜嫩多汁。如图7所示,草莓的感官评分随着贮藏时间的延长总体呈下降趋势,从第3天开始,3组的感官评分差异显著($P < 0.05$)。其中,PLA/PBAT/ESO

全降解膜组的总体评分最高, 其色泽、硬度、气味均优于对照组和 PE 组。在贮藏第 3 天时, 对照组果实的组织软化、颜色逐渐加深。从贮藏第 5 天开始, 对照组和 PE 组果实逐渐腐烂, 产生斑点, 发出明显的酒精味。在贮藏第 6 天时, 对照组和 PE 组果实已腐烂 (如图 8 所示), 出现了不同程度的微生物侵染, 失去了经济价值。PLA/PBAT/ESO 保鲜膜组果实在贮藏第 6 天时依然保持较好的硬度水平和色泽, 无酒精异味, 同时有效抑制了霉菌的侵染, 更好地将草莓的感官品质维持在较高水平。

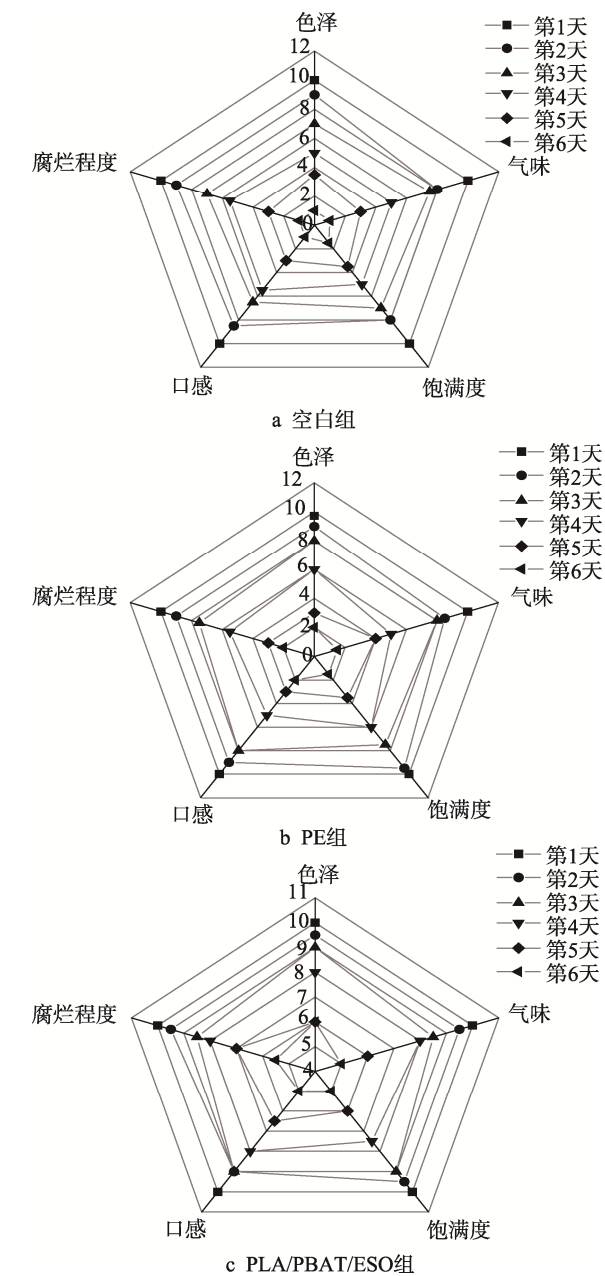


图 7 贮藏期间空白组、PE 组、PLA/PBAT/ESO 组草莓感官评分的变化情况
Fig.7 Changes in sensory evaluation of strawberries in blank, PE and PLA/PBAT/ESO groups during storage, respectively

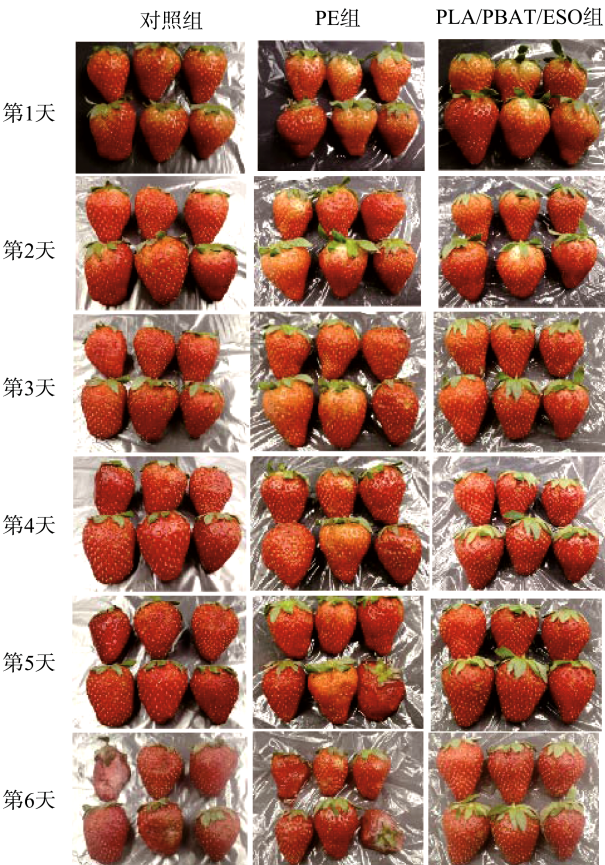


图 8 贮藏期间草莓外观的变化情况
Fig.8 Changes in appearance of strawberries during storage

3 结语

主要探究全生物降解材料 PLA/PBAT/ESO 复合膜替代 PE 保鲜膜的实际应用, 以草莓为保鲜对象, 研究了 2 种保鲜膜对果实的保鲜效果, 分析了实验室自制 PLA/PBAT/ESO 全降解膜与市购 PE 保鲜膜的力学性能、透气透湿性。与 PE 保鲜膜相比, PLA/PBAT/ESO 全降解膜表现出优异的力学性能, 其抗拉强度为 (13.0±1.69) MPa, 断裂伸长率为 (369±23.5) %, 符合果蔬包装材料的要求。除此之外, PLA/PBAT/ESO 全降解膜的透气透湿性能优于 PE 保鲜膜的透气透湿性能。PLA/PBAT/ESO 全降解膜的水蒸气透过系数为 (52±2.5) ×10⁻¹⁶ g·cm/(cm²·s·Pa), 可将草莓正常代谢产生的水分及时排出, 避免了结露现象, 抑制了微生物的滋长, 有利于减少营养物质的消耗, 延缓果实的衰老进程。草莓保鲜的理化指标测试结果表明, PLA/PBAT/ESO 全降解保鲜膜和 PE 保鲜膜均能有效提高草莓的贮藏品质, 能够抑制草莓果实在贮藏过程中色差、硬度、可溶性固形物含量、可滴定酸含量、维生素 C 含量的下降。其中, PLA/PBAT/ESO 全降解保鲜膜对草莓的保鲜效果最好。综上所述, 实验室制备的 PLA/PBAT/ESO 全降解膜是一种

综合性能良好的绿色新材料,对于草莓具有理想的保鲜效果,应用前景可期。

参考文献:

- [1] 唐甜甜,解新方,任雪,等.草莓贮藏保鲜技术的研究进展[J].食品工业科技,2020,41(5):332-339.
TANG Tian-tian, XIE Xin-fang, REN Xue, et al. Research Progress on Storage and Preservation Technology of Strawberry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(5): 332-339.
- [2] 胡可.壳聚糖-直链玉米淀粉-肉桂醛复合薄膜制备及对草莓保鲜效果的研究[D].雅安:四川农业大学,2018:14-15.
HU Ke. Study on the Effect of Chitosan Straight Chain Cornstarch Cinnamaldehyde Composite Film on Strawberry Preservation[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2018: 14-15.
- [3] 申晓蕊,韩爱云.草莓贮藏保鲜技术的研究进展[J].农产品加工,2021(3):87-89.
SHEN Xiao-rui, HAN Ai-yun. Research Progress on Storage and Preservation Technology of Strawberry[J]. Farm Products Processing, 2021(3): 87-89.
- [4] BARKAOUI S, MANKAI M, MILOUD N B, et al. Effect of Gamma Radiation Coupled to Refrigeration on Antioxidant Capacity, Sensory Properties and Shelf Life of Strawberries[J]. LWT, 2021, 150: 112088.
- [5] ZHAO Xiao-xiao, XIA Ming, WEI Xiao-peng, et al. Consolidated Cold and Modified Atmosphere Package System for Fresh Strawberry Supply Chains[J]. LWT, 2019, 109: 207-215.
- [6] 陈建中,葛水莲,李丹花,等.纳米TiO₂壳聚糖复方涂膜对草莓保鲜效果的研究[J].食品科技,2016,41(9):65-70.
CHEN Jian-zhong, GE Shui-lian, LI Dan-hua, et al. Effects of Nano TiO₂ Chitosan Composite Films on Preservation of Strawberry[J]. Food Science and Technology, 2016, 41(9): 65-70.
- [7] WANG Jin-wu, GARDNER D J, STARK N M, et al. Moisture and Oxygen Barrier Properties of Cellulose Nanomaterial-Based Films[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6(1): 49-70.
- [8] 王鑫,石敏,余晓磊,等.聚己二酸对苯二甲酸丁二酯(PBAT)共混改性聚乳酸(PLA)高性能全生物降解复合材料研究进展[J].材料导报,2019,33(11):1897-1909.
WANG Xin, SHI Min, YU Xiao-lei, et al. High Performance and Fully Biodegradable Poly(lactic acid) (PLA) Composites Modified by Poly(Butylene Adipate-co-Terephthalate) (PBAT): A Review[J]. Materials Reports, 2019, 33(11): 1897-1909.
- [9] 程赤云,马骏,阎瑞香.改性聚乳酸的性能特点及其在果蔬保鲜中的应用[J].包装工程,2021,42(19):136-145.
CHENG Chi-yun, MA Jun, YAN Rui-xiang. Performance Characteristics of Modified Polylactic Acid and Its Application in Fruit and Vegetable Preservation[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(19): 136-145.
- [10] 范少华. PBAT/PLA可降解地膜老化性能研究[D].泰安:山东农业大学,2020:17-18.
FAN Shao-hua. Study on Aging Behavior of PBAT/PLA Degradable Mulch[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2020: 17-18.
- [11] HAN Yi, SHI Jin-wei, MAO Li-xin, et al. Improvement of Compatibility and Mechanical Performances of PLA/PBAT Composites with Epoxidized Soybean Oil as Compatibilizer[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59(50): 21779-21790.
- [12] ALIOTTA L, VANNOZZI A, PANARIELLO L, et al. Sustainable Micro and Nano Additives for Controlling the Migration of a Biobased Plasticizer from PLA-Based Flexible Films[J]. Polymers, 2020, 12(6): 1366.
- [13] ISO 1184—1983, 塑料 塑料薄膜抗拉性能的测定[S]. ISO 1184—1983, Plastics-Determination of Tensile Properties[S].
- [14] 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[S].
GB/T 1037—2021, Test Method for Water Vapor Transmission of Plastic Film and Sheet—Desiccant Method and Water Method[S].
- [15] GB/T 1038—2000, 塑料薄膜和薄片气体透过性试验方法 压差法[S].
GB/T 1038—2000, Plastics-Film and Sheeting- Determination of Gas Transmission-Differential-Pressure Method[S].
- [16] 王中伟,李云成,郑森心,等.魔芋葡甘聚糖/壳聚糖复合涂膜对草莓采后贮藏品质的影响[J].食品科技,2019,44(3):46-50.
WANG Zhong-wei, LI Yun-cheng, ZHENG Miao-xin, et al. Effects of Konjac Glucomannan/Chitosan Composite Coating on the Qualities of Postharvest Strawberry Storages[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(3): 46-50.
- [17] 傅佳,平凡,沈超怡,等.等离子体气体连续处理对草莓采后保鲜效果的研究[J].中国果菜,2021,41(5):1-6.
FU Jia, PING Fan, SHEN Chao-yi, et al. Study on Pre-

- servation of Strawberry by Plasma-Processed Air Continuous Treatment[J]. *China Fruit & Vegetable*, 2021, 41(5): 1-6.
- [18] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007: 34-35.
- CAO Jian-kang, JIANG Wei-bo, ZHAO Yu-mei. Guidance on Postharvest Physiological and Biochemical Experiments of Fruits and Vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007: 34-35.
- [19] 李书静, 李可, 姚新建, 等. 2, 6-二氯靛酚钠法测定果汁饮料中的维生素 C[J]. *光谱实验室*, 2011, 28(5): 2391-2394.
- LI Shu-jing, LI Ke, YAO Xin-jian, et al. Determination of Vitamin C in the Fruit-Juices by 2, 6-Dichlorindophenol Sodium Method[J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 2011, 28(5): 2391-2394.
- [20] GB/T 10220—2012, 感官分析 方法学 总论[S]. GB/T 10220—2012, Sensory Analysis-Methodology-General Guidance[S].
- [21] AL-ITRY R, LAMNAWAR K, MAAZOUZ A. Improvement of Thermal Stability, Rheological and Mechanical Properties of PLA, PBAT and Their Blends by Reactive Extrusion with Functionalized Epoxy[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2012, 97(10): 1898-1914.
- [22] YUE Tian-tian, LI Xiao, WANG Xiao-xiong, et al. Electrospinning of Carboxymethyl Chitosan/Polyoxyethylene Oxide Nanofibers for Fruit Fresh-Keeping[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2018, 13(1): 239.
- [23] SUN Ying, HUANG Yan, WANG Xing-yu, et al. Kinetic Analysis of PGA/PBAT Plastic Films for Strawberry Fruit Preservation Quality and Enzyme Activity[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2022, 108: 104439.
- [24] WANG Yue, LI Rui, LU Rui, et al. Preparation of Chitosan/Corn Starch/Cinnamaldehyde Films for Strawberry Preservation[J]. *Foods (Basel, Switzerland)*, 2019, 8(9): 423.
- [25] DING Jie, ZHANG Rong, AHMED S, et al. Effect of Sonication Duration in the Performance of Polyvinyl Alcohol/Chitosan Bilayer Films and Their Effect on Strawberry Preservation[J]. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 2019, 24(7): 1408.
- [26] KIM D, THANAKKASARANEE S, LEE K, et al. Smart Packaging with Temperature-Dependent Gas Permeability Maintains the Quality of Cherry Tomatoes[J]. *Food Bioscience*, 2021, 41: 100997.
- [27] 黎汉清, 罗文翰, 肖更生, 等. 丁香精油微胶囊的制备及其对草莓保鲜效果的研究[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(21): 191-196.
- LI Han-qing, LUO Wen-han, XIAO Geng-sheng, et al. Preparation of Microcapsule of Clove Essential Oil and Preservation Effect on Strawberry[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(21): 191-196.
- [28] 吉宁, 王瑞, 曹森, 等. 1-MCP 结合臭氧处理对水晶葡萄采后贮藏品质的影响[J]. *包装工程*, 2021, 42(9): 56-63.
- JI Ning, WANG Rui, CAO Sen, et al. Effects of 1-MCP Combined with Ozone Treat on Postharvest Storage Quality of Crystal Grapes[J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(9): 56-63.
- [29] 张婷婷, 凡婷婷, 彭舒, 等. 不同包装材料对‘紫秋’葡萄贮藏理化指标的影响[J]. *包装工程*, 2020, 41(15): 25-33.
- ZHANG Ting-ting, FAN Ting-ting, PENG Shu, et al. Effect of Different Packaging Materials on Storage Physicochemical Indexes of Ziqiu Vitis Daviaii Grape[J]. *Packaging Engineering*, 2020, 41(15): 25-33.

责任编辑: 彭颀