

PLA/PBSA 纳米活性包装薄膜的性能研究

许耀之^{1a}, 李硕^{1a}, 林肯^{1a}, 杜蓉², 蒋金勇^{1b}, 李立^{1a,1b,2}

(1.上海海洋大学 a.食品学院 b.食品热加工工程中心, 上海 201306;

2.上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心, 上海 201306)

摘要: **目的** 研究可降解材料聚乳酸(PLA)/聚丁二酸丁二醇酯-聚己二酸丁二醇酯共聚物(PBSA)薄膜在添加有机纳米蒙脱土(MMT)和精油后的抗氧化性和保鲜性能。**方法** 采用挤出共混改性和挤出流延法加工制备出 PLA/PBSA/MMT/精油纳米复合薄膜, 对其力学性能、透湿性、透气性、抗氧化性等进行探讨, 并研究对樱桃的保鲜作用。**结果** 添加了 DK4 型号 MMT 的 PLA/PBSA 薄膜的抗拉强度得到提高, 薄膜的水蒸气透过率、透气率得到降低, 但是对樱桃保鲜的各项指标与对照组无明显差异。在此基础上添加丁香精油后, 力学性能得到提升, 抗氧化作用明显, 并且对改善樱桃的保鲜效果显著增加。**结论** 添加了 DK4 型 MMT 和丁香精油的 PLA/PBSA 薄膜有着较好的改性效果, 并且有良好的保鲜效果。

关键词: 可降解; 聚乳酸; 蒙脱土; 丁香精油; 纳米复合薄膜; 樱桃

中图分类号: TS206.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)15-0076-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.15.011

Properties of PLA/PBSA Active Packaging Nanofilm

XU Yao-zhi^{1a}, LI Shuo^{1a}, LIN Ken^{1a}, DU Rong², JIANG Jin-yong^{1b}, LI Li^{1a,1b,2}

(1a. College of Food Sciences & Technology b. Research & Development Center of Food Thermal-Processing Technologies (Asia), Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Aquatic-Product Processing & Preservation, Shanghai 201306, China)

ABSTRACT: The work aims to study the oxidation resistance and fresh-keeping performance of the biodegradable polylactic acid (PLA)/poly(butylensuccinate adipate) (PBSA) film added with organic nano montmorillonite (MMT) and clove essential oil. PLA/PBSA/MMT/essential oil nanocomposite films were prepared through extrusion blending modification and extrusion casting method. The mechanical property, moisture permeability, air permeability and oxidation resistance, etc. of the films were discussed; moreover, the preservation effect of cherries was studied. The PLA/PBSA film added with DK4 MMT not only increased its tensile strength, but also decreased the WVP and OP. However, there was no significant difference from the control indexes in the preservation of cherries. On this basis, after the addition of clove essential oil, mechanical property was improved, the antioxidation was obvious and the preservative effect of cherries was significantly improved. PLA/PBSA film added with DK4 MMT and clove essential oil has better modification effect and good preservative effect.

KEY WORDS: biodegradable; PLA; montmorillonite; clove essential oil; nanocomposite film; cherry

聚乳酸(PLA)是一种热塑性聚酯,具有强度高、透明性好和化学稳定性强等特点,但脆性高、伸长率低、生物降解速率较低^[1-2]。丁二酸丁二醇酯-己二酸丁二醇酯共聚物(PBSA)也是一种热塑性聚酯,具

有可生物降解性、可加工性、耐热性和耐化学腐蚀性,但其力学强度不高^[3]。将PLA与PBSA两种聚酯共混,会得到性能优异的生物降解材料^[4]。因为聚乳酸(PLA)分子链支链数量少、耐热性差,且加工过程

收稿日期: 2018-02-08

作者简介: 许耀之(1998—),男,上海海洋大学本科生,主攻食品包装技术。

通信作者: 李立(1977—),男,上海海洋大学教授,主要研究方向为食品包装材料。

中存在热降解和氧化等现象,容易造成分子链断裂。为了解决这个问题,使用扩链剂对其进行熔融改性,可以使其与 PLA 分子链之间发生轻度交联反应,生成一定的交联网状结构^[5-6]。

纳米蒙脱土(MMT)是一类由纳米厚度的、表面带负电的硅酸盐片层,依靠层间的静电作用而堆积在一起构成的土状矿物。在聚合物基体中添加少量的蒙脱土就可较大幅度地提高复合材料的力学性能及耐热性^[7]。丁香精油具有明显的抑菌作用,研究表明,丁香精油能有效抑制一些植物病原真菌和食品中的病原真菌,同时还具有一定的抗氧化作用,是天然的食品保鲜剂^[8-9]。文中通过 MMT 与丁香精油对聚乳酸(PLA)/聚丁二酸丁二醇酯-聚己二酸丁二醇酯共聚物(PBSA)薄膜进行改性,并用于樱桃的保鲜,从果实贮藏过程中的质量损失率、果实硬度、可溶性固形物、果实汁液 pH 值、丙二醛含量和感官评价等方面进行初步评价。

1 实验

1.1 材料与试剂

材料与试剂:聚乳酸(PLA, 2003D),美国 Nature Works; 丁二酸丁二醇酯-己二酸丁二醇酯共聚物(PBSA),昭和电工株式会社;扩链剂 TMP6000,杭州曦茂科技有限公司;DK4 型蒙脱土,浙江丰虹粘土化工有限公司;丁香精油,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;樱桃,购于大润发超市上海市泥城店。

1.2 仪器与设备

仪器与设备:XSS-300 转矩流变仪、LSSHJ-20 双螺杆挤出装置、LYJ-流延机装置,上海科创橡塑机械设备有限公司;L-0305 电子数显螺旋测微仪,桂林广陆数字测控有限责任公司;H2050R-1 高速冷冻离心机,湘仪离心机仪器有限公司 BSM-220.3 分析天平,上海卓精电子科技有限公司;GXZGF101 恒温鼓风干燥箱,上海贺德实验设备有限公司;XLW 智能电子拉力试验机、PERME G2/132 透气率测试仪,济南兰光机电技术有限公司;PERMATRAN-W MODEL1/50 水蒸气透过率测试仪,美国膜康 MOCON;PBI-Dansensor checkmate 3 微量残氧仪,丹麦丹圣;GY-4 型果实硬度计;LH-T32 手持式糖度计;PHSJ-4F 实验室 pH 计,上海仪电科学仪器股份有限公司;Labconco 超净工作台,美国 Labconco 公司。

1.3 方法

1.3.1 薄膜的制备

根据前期预实验结果设计 3 种不同类型的薄膜, A: PLA 原料树脂+PBSA 原料树脂+扩链剂

TMP6000(0.2%); B: PLA+PBSA+TMP6000(0.2%)+DK4 型蒙脱土(1%); C: PLA+PBSA+TMP6000(0.2%)+DK4 型蒙脱土(1%)+丁香精油(3%)。

薄膜制备参考户帅锋^[10]的方法且略有修改,具体过程:将扩链剂 TMP6000(质量分数为 0.2%)、DK4 型蒙脱土(质量分数为 1%)和丁香精油(质量分数为 3%)以相应质量比分别添加到预先混合好的 PLA/PBSA 树脂颗粒中,经充分搅拌后,通过双螺杆挤出共混改性造粒,再通过单螺杆挤出流延设备制备包装薄膜。双螺杆挤出机的 1—7 区温度分别为 150, 155, 165, 175, 175, 175, 165 °C, 双螺杆转速为 30 r/min。单螺杆挤出机各区温度为 100, 130, 160, 175 °C, 单螺杆转速为 20 r/min。

1.3.2 薄膜拉伸强度测试

根据 GB/T 1040.3—2006,使用电子万能材料试验机测定薄膜的(纵向)拉伸强度。试样尺寸为 15 mm×150 mm,设定标距为 100 mm,拉伸速率为 10 mm/min。

1.3.3 薄膜的水蒸气透过率和氧气透过率

通过 PERMATRAN-W model1/50 透湿仪,在相对湿度为 100%,温度为 37.8 °C 条件下测定,每个样品测定 3 次,取平均值。

将薄膜样品裁成 $\phi 97$ mm 圆形试样,采用 PERME G2/132 压差法气体渗透仪,设置试验温度为 23 °C 进行实验,参考 GB/T 1038—2000,测样品氧气透气率。

1.3.4 抗氧化性能测试

采用分光光度计法^[11],将 6 片(每片面积为 12 cm²)样品薄膜加入装有 100 mL 的乙醇(95%)的锥形瓶内;然后将锥形瓶置于温度为 65 °C 条件下的烘箱内提取 4 h。将 10 mL 样品溶液及 10 mL 的 0.1 mmol/L DPPH 溶液加入同一试管中,振荡摇匀,室温条件避光反应 30 min 后测定其吸光度 A_{sample} 。同时测定 10 mL 的 0.1 mmol/L 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)溶液与 10 mL 的乙醇(95%)混合液的吸光度 A_{control} ,以及 10 mL 样品溶液与 10 mL 的乙醇(95%)混合液的吸光度 A_{blank} 。自由基清除率公式如下:自由基清除率=[1-($A_{\text{sample}}-A_{\text{blank}}$)/ A_{control}] $\times$ 100%。式中: A_{control} 为 DPPH 与乙醇(95%)混合液的吸光度; A_{sample} 为 DPPH 与样品溶液反应后的吸光度; A_{blank} 为样品溶液与乙醇(95%)混合液的吸光度。

1.3.5 薄膜对樱桃的保鲜效果

选择成熟度、颜色、果粒均匀一致,无病虫害和机械损伤的果实,装入预先由薄膜经过热封制备的袋中,并置于 24 °C 的环境中贮藏。每袋装果质量约为 50 g,每隔 1 天测定 1 次感官品质与生理指标。

1) 樱桃贮藏过程中的质量损失率。参考宋贤良

等^[12]的测试方法,在樱桃贮藏过程中,测定初始实体质量与每日实体质量,以质量差与初始质量的比值作为质量损失率。

2) 果实硬度的测定。在樱桃的赤道部位等距取3处,各削去一小块薄薄的果皮(厚约1 mm),使用GY-4型果实硬度计切换到峰值模式进行测试。

3) 可溶性固形物含量的测定。使用LH-T32便携式手持式糖度计进行测定。

4) 果实汁液pH的测定。将樱桃用研钵捣碎后吸取其汁液,并使用雷磁PHSJ-4F型pH计测定pH值。

5) 果实中丙二醛含量的测定。采用硫代巴比妥酸(TBA)法测定^[13]。

6) 感官评价。感官评定由6人组成感官评定小组,通过对樱桃的外观、气味、质地、腐烂程度综合打分后取平均值。评定标准,5分:果粒饱满,果面光滑,有特殊果香,硬度大,无腐烂;4分:果粒较饱满,外形好,有淡淡果香,硬度较大,无腐烂;3分:果实部分软化,外形较好;2分:果实表皮褶皱,部分霉变,有轻微异味;1分:果实较烂,有较重腐烂气味^[14]。

2 结果与分析

2.1 薄膜的力学性能

用螺旋测微仪测得3组薄膜的厚度见表1。

表1 薄膜的厚度
Tab.1 Film thickness

组别	厚度/ μm
A	61 $\pm$ 3
B	59 $\pm$ 5
C	60 $\pm$ 3

3种薄膜的拉伸强度见图1,通过对A、B、C等3种薄膜进行横纵向对比不难看出,蒙脱土的加入使薄膜B横纵向的拉伸强度较薄膜A有一定的提升,

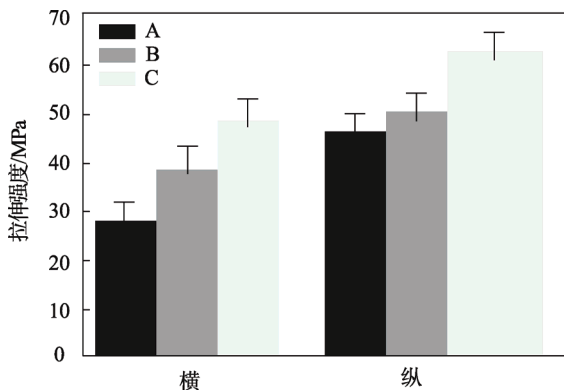


图1 薄膜的拉伸强度

Fig.1 Tensile strength of the films

原因可能在于蒙脱土作为纳米添加剂以纳米尺度分散在聚合物基体中,起到了应力分散作用,从而改善了聚合物的强度。丁香精油的加入进一步改善了力学性能,较薄膜B也有可观的性能提升,可能是丁香精油均匀分散于PLA/PBSA基材中,同时精油中的主要成分丁香酚与基材中的羰基形成氢键,加强了薄膜分子链间的作用力,使其拉伸强度有所提升。

2.2 薄膜的水蒸气透过率及氧气透过率

在表2中3组薄膜的水蒸气透过率从小到大的顺序是:A<B<C,对水蒸气的阻隔性依次增强。这是因为PLA是疏水性聚合物,而蒙脱土的层状结构使得水分子在PLA/PBSA材料中的扩散更为困难,从而降低了B组薄膜的透湿性^[15]。C组薄膜中加入了丁香精油,其透湿率显著下降,也即阻湿性明显提高,可能是因为丁香精油中的酚类成分含有大量羟基基团,与水结合后阻止了水蒸气的进一步扩散^[16]。

由表2可知,加入蒙脱土的B组相较于A组的薄膜氧气透过率有一定的下降。这是因为蒙脱土是极性小分子,在挤出共混过程中,相对均匀地分散到聚合物基体中,阻挡了O₂的透过通道。加入丁香精油的C组薄膜的氧气透过率得到明显提高,原因可能是丁香精油不利于PLA/PBSA薄膜的结晶,使得改性PLA膜体内部分子排列不够紧密,从而使得透气率较高。

表2 薄膜的水蒸气透过率和氧气透过率

Tab.2 The water vapor permeability and oxygen permeability of the films

组别	水蒸气透过率/ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)	氧气透过率/ ($\text{cm}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot(24\text{ h})^{-1}\cdot(0.1\text{ MPa})^{-1}$)
A	187.23 $\pm$ 9.97	355.35 $\pm$ 21.74
B	176.76 $\pm$ 10.03	297.06 $\pm$ 6.17
C	147.60 $\pm$ 5.03	400.21 $\pm$ 34.38

2.3 薄膜的抗氧化能力

3组薄膜的抗氧化性能通过在体积分数为95%乙醇中的提取液对DPPH自由基的清除率来体现,见图2。A组薄膜和B组薄膜有较低的DPPH自由基清除能力,这可能是聚合树脂在生产过程中为便于后期加工防止氧化而添加抗氧化剂的结果。添加有丁香精油的C组薄膜的提取液对DPPH自由基的清除率高达43.56%,这表明丁香精油中的丁香酚通过提供活性基团,作为供氢体与DPPH自由基反应,从而终止了自由基的链式反应^[17]。

2.4 樱桃贮藏过程中质量损失率的变化

从图3可直观地看到,C组樱桃的质量损失率比A组和B组低,而A组樱桃和B组樱桃的质量损失

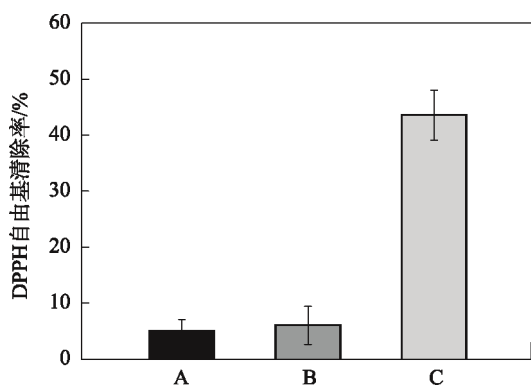


图 2 薄膜的 DPPH 自由基清除能力
Fig.2 DPPH radical scavenging ability of the films

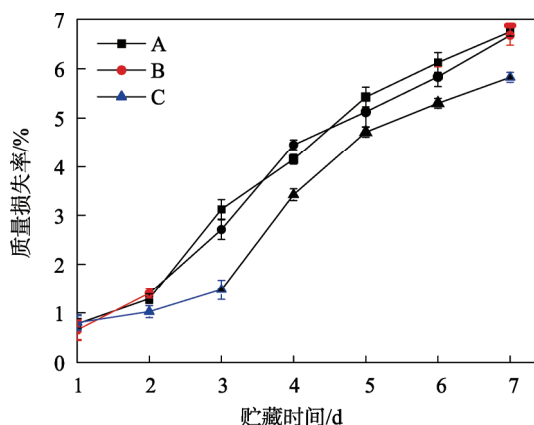


图 3 薄膜对樱桃质量损失率的影响
Fig.3 Effect of films on mass loss rate of cherry

率相近, 差异不显著。对于樱桃而言, 其质量损失包含了水分的减少和营养成分的消耗。贮藏期间, C 组薄膜包装的樱桃果实质量损失相对较少, 说明丁香精油中酚类物质的羟基和 PLA/PBSA 纳米薄膜的分子链形成氢键, 使薄膜的阻湿性增强, 从而减缓了水果水分的损失, 质量损失率降低。此外也可能由于丁香精油中丁香酚的作用, 抑制了微生物的繁殖, 降低了樱桃果实病理上的水分损失^[17]。

2.5 果实硬度的变化

贮藏期间樱桃的硬度变化见图 4。影响硬度变化的因素主要是果实中的水分含量及组织结构的完整程度。由图 4 可知, 3 组樱桃果实的硬度均有下降的趋势, 而 C 组薄膜包装樱桃果实的硬度显著高于 A 组和 B 组果实的硬度; A 组和 B 组果实的硬度值较低, 且 2 组无显著差异。这是因为水分的流失和微生物的影响使得组织结构被破坏, 也间接说明了 C 组薄膜中丁香精油的添加抑制了樱桃果实细胞壁果胶质的转化, 减缓了有机质的代谢和转化速度, 从而保证了樱桃果实的硬度。

2.6 可溶性固形物的变化

可溶性固形物含量是反映果实营养价值和判断

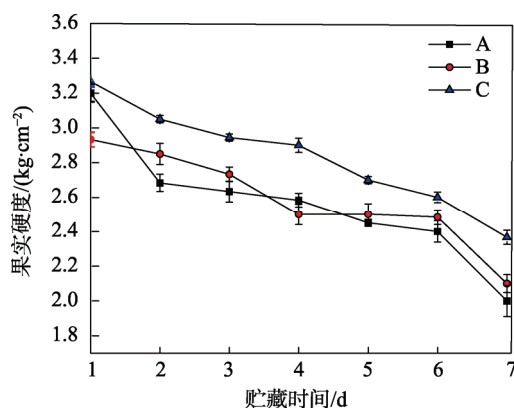


图 4 薄膜对樱桃硬度的影响
Fig.4 Effect of films on hardness of cherry

果实耐贮藏能力的重要指标。由图 5 可以看出, 在贮藏初期, 樱桃可溶性固形物含量增加, 原因可能跟果实中的淀粉转化为糖、呼吸作用减缓和细胞壁多糖的水解等有关^[18], 随着贮藏时间的延长, 樱桃的呼吸作用不断消耗自身的营养成分, 导致可溶性固形物含量持续下降。对比 3 组数据可以发现, C 组樱桃果实的可溶性固形物含量始终高于 A 组和 B 组, 说明丁香精油的添加能显著抑制可溶性固形物含量的下降。

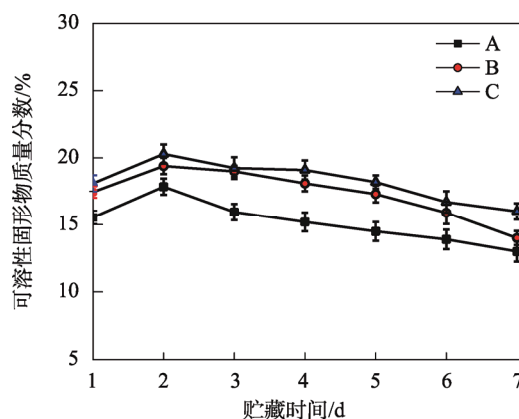


图 5 薄膜对樱桃可溶性固形物含量的影响
Fig.5 Effect of films on soluble solids contents of cherry

2.7 果实汁液 pH 的变化

pH 反映了已解离的酸的浓度, 对于确定产品的感官和保质期有很大影响。由图 6 可知, 在贮藏期内, 3 组薄膜包装的樱桃 pH 值均持续增加。贮藏第 3 天时, A、B、C 组樱桃的 pH 值变化明显, C 组樱桃的 pH 值显著低于 A 组和 B 组, 说明添加了丁香精油的 C 组薄膜能有效遏制樱桃 pH 的升高, 维持樱桃的口感, 延长保质期。

2.8 果实中丙二醛含量的变化

丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 的含量通常作为脂质过氧化指标, 反映细胞膜脂过氧化的程度。MDA 会抑制蛋白质的合成, 因此, MDA 的积累能对果蔬

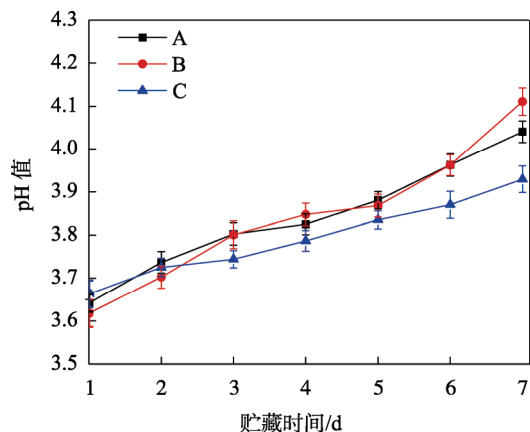


图6 薄膜对樱桃汁液 pH 的影响

Fig.6 Effect of films on pH of cherry juice

细胞质膜和细胞器造成伤害^[19]。在贮藏期间,樱桃的MDA含量变化见图7,可以看出,初始阶段的MDA含量异常高可能是因为冷链途中樱桃在低温胁迫下的应对反应所致,随后樱桃逐渐适应24℃的室温。随着樱桃的衰老,各组包裹樱桃的MDA含量均呈上升趋势。C组包裹樱桃的MDA含量始终小于A组和B组,并且B组的MDA含量小于A组。说明添加丁香精油的C组薄膜对氧化反应有一定的抑制作用,丁香精油中的主要成分丁香酚也会缓慢地释放到樱桃所在环境中,对于延缓樱桃衰老有较好效果。

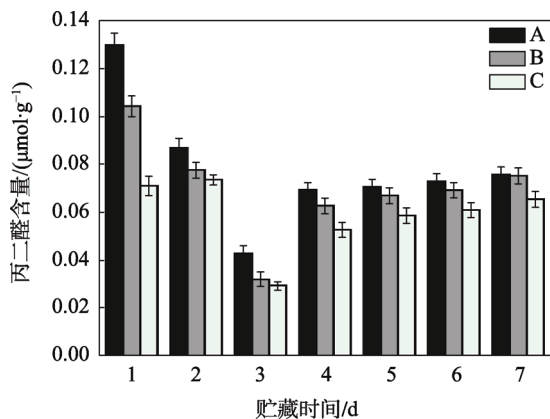


图7 薄膜对樱桃丙二醛含量的影响

Fig.7 Effect of films on MDA contents of cherry

2.9 感官评价

感官评价是通过视觉、听觉、嗅觉、味觉、触觉等方面对食品的各项指标及可接受程度的评价,在食品评价中占有很大地位。文中实验通过气味、外观、色泽等方面对樱桃进行评价。由表3可知,A组和B组的樱桃品质相似且下降速度快,而添加了丁香精油的C组的樱桃感官品质下降较为缓慢,与A组和B组有显著差异。樱桃在贮藏到第3天时,C组樱桃样品的感官评分最高,样品袋中樱桃饱满,外形较为完好;A组和B组的感官品质出现了一定程度的降低,

樱桃硬度下降,部分表皮出现褶皱。贮藏到第5天时,对A组和B组樱桃样品的感官评分已经低于2分。第7天时,A组和B组的果实褶皱严重,无果香,并伴有异味,C组样品中仅有部分樱桃出现褶皱,无异味。

表3 薄膜包装后樱桃的感官评价

Tab.3 Sensory evaluation on cherry packaged in the films

组别	贮藏时间/d			
	1	3	5	7
A	4.99±0.22	3.97±0.36	1.60±0.13	1.12±0.36
B	5.00±0.00	4.04±0.12	1.91±0.30	1.30±0.32
C	5.00±0.00	4.42±0.20	3.31±0.26	2.35±0.28

3 结语

实验研究了以PLA/PBSA为基材的3种改性薄膜的基本物理性质及对于樱桃常温贮藏的保鲜效果。结果表明,添加了蒙脱土的PLA/PBSA薄膜的物理性能优于对照组的薄膜,但是添加了蒙脱土的改性PLA薄膜与对照组的薄膜在樱桃保鲜方面没有明显的区别。添加丁香精油的PLA/PBSA薄膜不仅有优良的力学性能、阻隔性能和抗氧化性能,还对樱桃的感官维持有一定效果,并且降低了贮藏过程中樱桃MDA的含量。这种活性包装膜在果蔬保鲜上具有较大的应用潜力。

参考文献:

- [1] FURUKAWA T, SATO H, MURAKAMI R, et al. Comparison of Miscibility and Structure of PHBH/PLA Blends with Those of PHB/PLA Blends Studied by Wide Angle X-ray Diffraction, DSC and FT-IR Microspectroscopy[J]. Polymer, 2007, 48: 1749—1755.
 - [2] MIZUNO W, SANO M, SONG C J, et al. Evaluation of Biodegradability of Several Biodegradable Plastics in Natural Environments[J]. Kobunshi Ronbunshu, 2003, 60(11): 622—628.
 - [3] HE Y, NAOIKI A, MASUDA T, et al. The Miscibility and Biodegradability of PHB Blends with PBSA and PBS-CL[J]. Eur Polym J, 2000, 36(10): 2221—2229.
 - [4] 宋存江, 陶剑, 胡丹, 等. 生物降解聚酯 PLA/PBSA 共混体系的制备与结构性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2009, 25(7): 137—140.
- SONG Cun-jiang, TAO Jian, HU Dan, et al. Structure and Properties of Biodegradable Poly(Lactic Acid) Poly(Butylene Succinate Adipate) Blends[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2009, 38(7): 137—140.

- [5] RAFAEL A, BRUCE H, SUSAN S. An Overview of Polylactides as Packaging Materials[J]. *Macromolecular Bioscience*, 2004, 4(9): 835—864.
- [6] 孙静, 韦良强, 徐国敏, 等. 扩链剂改性聚乳酸性能[J]. *塑料*, 2015, 44(6): 1—4.
SUN Jing, WEI Liang-qiang, XU Guo-min, et al. Properties of Chain Extender Modified Poly(lactic acid)[J]. *Plastics*, 2015, 44(6): 1—4.
- [7] 谢友利, 张猛, 周永红. 蒙脱土的有机改性研究进展[J]. *化工进展*, 2012, 31(4): 844—851.
XIE You-li, ZHANG Meng, ZHOU Yong-hong. Progress in the Organic Modification of Montmorillonite[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2012, 31(4): 844—851.
- [8] 顾仁勇, 汪果利. 丁香精油抑菌及抗氧化作用研究[J]. *食品工业科技*, 2007(6): 80—81.
GU Ren-yong, WANG Guo-li. Study on Antibacterial and Antioxidant Effects of Clove Essential Oil[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2007(6): 80—81.
- [9] 关文强, 李淑芬. 丁香精油对果蔬采后病原菌抑制效应研究[J]. *食品科学*, 2005(12): 227—230.
GUAN Wen-qiang, LI Shu-fen. Inhibitory Effect of Clove Essential Oils on Growth of Postharvest Pathogen of Fruits and Vegetables[J]. *Food Science*, 2005(12): 227—230.
- [10] 户帅锋, 于洁, 赵碧洁, 等. 负载山梨酸的壳聚糖微囊-EVOH 抗菌薄膜对黑鱼鱼肉保鲜的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(15): 237—243.
HU Shuai-feng, YU Jie, ZHAO Bi-jie, et al. Effect of Antimicrobial Ethylene-Vinyl Alcohol(EVOH) Copolymer Film Based on Sorbic Acid-Loaded Chitosan Microcapsules on the Preservation of Snakehead[J]. *Food Science*, 2017, 38(15): 237—243.
- [11] 韦献雅, 殷丽琴, 钟成, 等. DPPH 法评价抗氧化活性研究进展[J]. *食品科学*, 2014, 35(9): 317—322.
WEI Xian-ya, YIN Li-qin, ZHONG Cheng, et al. Advances in the DPPH Radical Scavenging Assay for Antioxidant Activity Evaluation[J]. *Food Science*, 2014, 35(9): 317—322.
- [12] 宋贤良, 叶盛英, 黄苇, 等. 纳米 TiO_2 /玉米淀粉复合涂膜对圣女果保鲜效果的研究[J]. *食品科学*, 2010, 31(12): 255—259.
SONG Xian-liang, YE Sheng-ying, HUANG Wei, et al. Fresh-keeping Effect of Nano-Titanium Dioxide/Corn Starch Compound Coating on Cherry Tomato[J]. *Food Science*, 2010, 31(12): 255—259.
- [13] 赵世杰, 许长成, 邹琦, 等. 植物组织中丙二醛测定方法的改进[J]. *植物生理学通讯*, 1994(3): 207—210.
ZHAO Shi-jie, XU Chang-cheng, ZOU Qi, et al. Improvements of Method for Measurement of Malondialdehyde in Plant Tissues[J]. *Plant Physiology Communications*, 1994(3): 207—210.
- [14] 胡晓亮, 周国燕. 海藻酸钠和溶菌酶复合涂膜对马陆葡萄贮藏的保鲜效果[J]. *食品科学*, 2011, 32(20): 271—276.
HU Xiao-liang, ZHOU Guo-yan. Fresh-keeping Effect of Compound Sodium Alginate-lysozyme Coating on Malu Grapes[J]. *Food Science*, 2011, 32(20): 271—276.
- [15] 陈斌艺, 黄岸, 王元盛, 等. 聚乳酸/蒙脱土纳米复合材料的制备及其微孔发泡性能[J]. *塑料*, 2013, 42(2): 19—22.
CHEN Bin-yi, HUANG An, WANG Yuan-sheng, et al. Preparation and Microcellular Foaming of PLA/OMMT Nanocomposite[J]. *Plastics*, 2013, 42(2): 19—22.
- [16] 陆漓, 刘鸿, 梁俊, 等. 丁香精油等改性 PE 膜及其对抑菌保鲜性能的影响[J]. *包装工程*, 2017, 38(9): 31—35.
LU Li, LIU Hong, LIANG Jun, et al. PE Film Modified by Clove Essential Oil and Its Effect on Antibacterial and Preservation Performances[J]. *Packaging Engineering*, 2017, 38(9): 31—35.
- [17] 杨辉. 植物精油-EVOH 活性包装薄膜的研制及其保鲜效果的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.
YANG Hui. The Preparation and Preservation Performance of Essential Oils-EVOH Active Packaging Films[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015.
- [18] PETRICCIONE M, DE S F, PASQUARIELLO M S, et al. The Effect of Chitosan Coating on the Quality and Nutraceutical Traits of Sweet Cherry during Postharvest Life[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2015, 8(2): 394—408.
- [19] 张平, 张鹏, 刘辉, 等. 不同低温处理对樱桃冷害发生的影响[J]. *食品科学*, 2012, 33(12): 303—308.
ZHANG Ping, ZHANG Peng, LIU Hui, et al. Effect of Low-temperature Treatment on Chilling Injury in Cherry Fruits[J]. *Food Science*, 2012, 33(12): 303—308.