

PLA/PHA 活性抗菌薄膜对蓝莓 低温保鲜效果的影响

Effect of PLA/PHA active films on preservation of blueberries during cold storage

沈春华^{1,2} 李立^{1,2} 杜云飞^{1,2}

SHEN Chun-hua^{1,2} LI Li^{1,2} DU Yun-fei^{1,2}

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学食品热加工工程中心, 上海 201306)

(1. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Engineering Research Center of Food Thermal-Processing Technology, Shanghai 201306, China)

摘要:采用流延成膜工艺,分别添加质量分数为5%的茶树精油和尤加利精油,制备聚乳酸/聚羟基脂肪酸酯(PLA/PHA)可降解活性抗菌薄膜。以蓝莓为研究对象,在(4±1)℃贮藏条件下,分别采用PLA/PHA保鲜膜包装、茶树精油/PLA/PHA保鲜膜包装、尤加利精油/PLA/PHA保鲜膜包装处理。通过测定3种薄膜的基本性能,袋内氧气和二氧化碳体积分数,蓝莓的烂果率、失重、硬度、可溶性固形物含量、总酚、花色苷和V_C含量等指标,探讨不同活性抗菌薄膜对蓝莓低温贮藏品质的影响。结果表明:含有精油的活性抗菌薄膜能有效降低蓝莓果实的烂果率、失重率,延缓果实花色苷和V_C含量的降低,一定程度上保持了果实的硬度。其中,尤加利精油/PLA/PHA保鲜膜包装对维持蓝莓果实新鲜度,降低果实水分蒸发,维持总酚含量效果最佳。

关键词:蓝莓; PLA; 茶树精油; 尤加利精油; 活性包装

Abstract: The degradable active antibacterial PLA/PHA films were prepared with 5% tea tree oil and 5% eucalyptus essential oil, respectively by extrusion-casting method. Fresh blueberries were stored at (4±1)℃ and then packaged in PLA/PHA cling film, tea tree oil/PLA/PHA cling film and eucalyptus oil/PLA/PHA cling film, respectively. The basic properties of the three films were measured. The content of oxygen and carbon dioxide in the bags, decay rate, weight loss rate, firmness, total soluble solids content, total phenol, anthocyanin, and vitamin C content of blueberries were measured every 7 days. The quality of blueberries with different films were compared during storage time. The results showed that the active antibacterial film containing essential oils could effectively reduce

the rate of fruit rotting and weight loss of blueberry and delayed the decrease of anthocyanins and vitamin C content of fruits compared with the control group, while maintaining the firmness of fruits. Eucalyptus oil/PLA/PHA cling film packaging is better for maintaining blueberry fruit freshness, reducing fruit moisture evaporation, and maintaining total phenolic content.

Keywords: Blueberries; PLA; Tea tree oil; eucalyptus oil; active packaging

由于蓝莓属于浆果类,含水率非常高,高温会促进其呼吸作用,加快新陈代谢,所以采摘几小时后水分流失较快,果肉绵软,果皮容易被外力擦伤,导致品质下降,商品价值降低,从而限制了蓝莓产业的发展。

植物精油来源广,是芳香植物体内具有挥发性的次生代谢产物^[1]。因其具有低毒、优异的抗菌活性、抗癌和抗氧化作用且对环境污染小等特点,近年来被广泛用作天然的食品保鲜剂。茶树精油(Tea tree oil, TTO)为淡黄色或无色油状液体,是天然的抗菌剂,主要抗菌成分为松油烯-4-醇、 α -松油烯和1,8-桉油醇^[2],对真菌和霉菌具有很好抑制作用^[3],是一种具有发展潜力的绿色保鲜剂。GB 2760—2014中已经允许使用茶树精油作为天然食品添加剂。尤加利精油(Eucalyptus oil)主要成分为桉油萜、桉油醇、茴香萜等,具有优异的抗菌性^[3]。尤加利精油也是GB 2760—2014中允许使用的食品添加剂,日本将其用作食品抗氧化剂^[4]。近年来,精油在食品保鲜上的应用已经受到越来越多的关注^[1]。

目前,精油的保鲜研究主要集中在熏蒸和浸泡处理上^[2-5]。Wei等^[6]将茶树精油结合热风处理对草莓进行保鲜,发现茶树精油结合热风处理的协同作用比单独使用茶树精油或热风处理更能有效降低草莓灰霉病,从而抑制腐烂。

作者简介:沈春华,男,上海海洋大学在读硕士研究生。

通信作者:李立(1977—),男,上海海洋大学教授,博士。

E-mail: l-li@shou.edu.cn

收稿日期:2018-03-30

静玮等^[7]研究表明茶树油熏蒸处理香蕉可有效控制炭疽病菌丝的生长,降低橡胶果实的腐败。Lu等^[8]研究了尤加利精油对体外假单胞菌的影响和在猪肉中的应用,发现尤加利精油可控制猪肉变质并延长冷藏猪肉的保质期。关于尤加利精油应用在果蔬保鲜上的报道较少,将茶树精油和尤加利精油作为活性包装的研究也不多见。基于此,本试验拟以茶树精油和尤加利精油为天然抗菌剂,PLA/PHA共混树脂为基材,制备可降解活性抗菌包装薄膜。通过活性包装结合(4±1)℃低温贮藏,测定包装袋内蓝莓果实在贮藏期间各生理指标的变化,分析可降解活性抗菌包装对蓝莓品质的影响,为寻求天然绿色保鲜包装提供一定的理论支持。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

新鲜蓝莓:蓝香,采摘于上海市松江区浦江蓝果园,挑选大小适中,表面无病虫害,成熟度一致的果实,采后立即低温运回实验室预冷留待备用;

茶树精油、尤加利精油:广州汉佰斯日化科技发展有限公司;

草酸、NaHCO₃、抗坏血酸:国药集团化学试剂有限公司;

2,6-二氯酚靛酚钠:生工生物工程(上海)有限公司;

手持式糖度测定仪:LH-T32型,郑州南北有限公司;

冷冻型台式大容量高速离心机:5810型,艾本德中国有限公司;

果实硬度计:GY-2型,艾德堡仪器有限公司;

双螺杆挤出机:LSSL-20型,上海科创像塑机械设备有限公司;

流延机装置:LYJ型,上海科创像塑机械设备有限公司;

智能电子拉力实验机:XLW型,济南兰光机电技术有限公司;

透光率/雾度测定仪:WGT-S型,上海精科仪器有限公司;

电子数显螺旋测微器:211-101F型,桂林广陆数字测控有限责任公司;

气体渗透仪:G2/132型,济南兰光机电技术有限公司;

顶空气体分析仪:CheckMate 9900型,丹圣(上海)贸易有限公司。

1.2 方 法

1.2.1 活性保鲜膜的制备 按照质量比例准确称量70.5%的PLA树脂和23.5%PHA树脂,并向其中添加质量分数1%的加工助剂TMP6000,将茶树精油和尤加利精油分别以5%的比例添加到以上混合基料中,高速充分搅拌,将混合均匀的物料再分别通过双螺杆挤出机进行剪切造粒,得到2种改性母粒。另外,将PLA、PHA和TMP6000按照质量比为74.25%,24.75%,1.00%直接共混造粒,作为空白对照组。双螺杆挤出机的1~7区加工温度分别为145,155,160,165,165,155,150℃;设置双螺杆转速为45 r/min。

将上述3种不同配方的母粒于烘箱烘干后,分别通过单

螺杆流延机进料进行流延,制备空白、5%茶树精油和5%尤加利精油3种PLA/PHA可降解薄膜,控制膜厚在45 μm。单螺杆挤出机各区温度加工参数分别为145,155,165,180,175,175,175℃,设置单螺杆转速为45 r/min。

使用热封机调节最佳热封温度,然后对3种薄膜样品进行热封制袋。袋子规格为10 cm×25 cm,三面封口,另一个侧面留作蓝莓样品充填口。

给上述袋子编号:A组保鲜袋,为空白PLA/PHA制备;B组保鲜袋,为含5%茶树精油的PLA/PHA共混薄膜制备;C组保鲜袋,为含5%尤加利精油的PLA/PHA共混薄膜制备。

1.2.2 蓝莓样品的处理 将蓝莓称重后分别装入A、B、C3种保鲜袋中,每袋装入80 g左右的蓝莓,每种袋子分别做3个平行,准确记录蓝莓样品重量,装好蓝莓样品后及时用热封机封口。将封口后的样品置于(4±1)℃环境中贮藏保鲜。每隔7 d,取出进行理化指标的检测。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 保鲜膜的基本性能

(1) 厚度:采用电子数显螺旋测微器测定。

(2) 抗拉强度:采用智能电子拉力实验机测定。

(3) 雾度和透光率:采用透光率/雾度测定仪测定。

(4) 透气性能:采用压差法气体渗透仪测定。

1.3.2 保鲜袋内氧气和二氧化碳体积分数 采用顶空气体分析仪测定。

1.3.3 烂果率 果实表面一旦有表皮损坏、汁液外流、严重绵软或者开始腐烂便为烂果。烂果率按式(1)计算:

$$c = \frac{n_1}{n_2} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

c——烂果率,%;

n₁——烂果个数;

n₂——袋内总蓝莓数。

1.3.4 失重率 采用称重法计算。失重率按式(2)计算:

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

式中:

WL——失重率,%;

m₀——蓝莓贮前初始质量,g;

m₁——蓝莓贮后质量,g。

1.3.5 硬度 采用果实硬度计测定。削去蓝莓表皮约1 mm厚,硬度计垂直于被削处,压头均匀压入至10 mm刻度线处,读数,取3次平均值。

1.3.6 可溶性固形物含量 采用手持式糖度测定仪测定。于棱镜玻璃面上滴2滴蓝莓汁,读数,取3次平均值。

1.3.7 总酚含量的测定 参考Huang等^[9]的方法,略有改动。将1 mL蓝莓提取物,1 mL Folin-Ciocalteu试剂和1 mL 20%的碳酸钠室温混合,然后定容至15 mL。将上述混合液在20℃下放置1 h。使用紫外分光光度计测量混合液在765 nm处的吸光度值。以不同浓度的没食子酸制作标准曲

线,从标准曲线中计算总酚的含量,单位为 mg/100 g。

1.3.8 花色苷含量的测定 参照文献[10]。

1.3.9 V_c 含量的测定 采用 2,6-二氯酚酚滴定法^[11]。

1.4 数据分析

每种蓝莓生理指标平行测试 3 次,计算平均值,将数据录入 Origin 8.0 软件绘制曲线。使用 SPSS 19.0 软件进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 保鲜膜的基本性能

表 1 中,薄膜的力学性能由抗拉强度表示,光学性能由雾度和透光率表示,气体阻隔性能由氧气透过率和二氧化碳透过率表示,包装袋内氧气和二氧化碳内外扩散直接影响包装内部气体的动态平衡^[12]。5%茶树精油和 5%尤加利精油

的加入对 PLA/PHA 共混薄膜的雾度有显著影响($P < 0.05$),但对透光率的影响不显著($P > 0.05$)。从抗拉强度的数值可以看出 B、C 组差别不大,但是和对照组薄膜相比略有降低,可能是 2 种精油的加入在薄膜中形成弱的网络结构,导致材料结晶度发生不同程度的改变^[13]。

从表 1 还可以看出,B、C 组薄膜的氧气透过率显著低于 A 组的($P < 0.05$),而 B 组二氧化碳的透过率显著高于 A 组的($P < 0.05$)。这可能是精油的加入填补了树脂薄膜的内部空间结构,阻隔了氧气分子进入聚合物链间的空隙。由于二氧化碳的动力学直径比氧气小,5%茶树精油的加入影响树脂的结晶性能,使得二氧化碳分子更能够顺利地通过聚合物分子间隙,从而提高了二氧化碳的透过率。由于茶树精油和尤加利精油的组成成分差异非常大,所以在不同程度上影响 B、C 组薄膜的二氧化碳透过率。具体机理有待进一步研究。

表 1 薄膜的基本性能

Table 1 The thickness, tensile strength, haze, light transmittance and gas barrier properties of films

编号	膜厚/ μm	抗拉强度/ MPa	雾度/%	透光率/%	氧气透过率/ $(\text{cm}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1})$	二氧化碳透过率/ $(\text{cm}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1})$
A	45	41.20±1.61	11.31±0.43	78.3±0.54	5 138.9±1.4	12 732.3±1.1
B	45	35.63±1.36	5.89±0.37	82.2±0.33	2 976.3±1.5	45 032.5±1.6
C	45	36.89±1.58	6.37±0.14	84.0±0.43	3 652.5±1.6	14 277.7±1.7

2.2 不同活性包装内部气体含量变化

由于蓝莓采后仍进行呼吸作用,低温贮藏时会导致抗菌包装袋内氧气和二氧化碳的体积发生变化,制备的抗菌包装袋对不同气体的阻隔性能存在差异,从而维持了包装内部气体交换的动态平衡^[14]。合理的气体比例可以明显降低果蔬的呼吸作用。从图 1 中可以看出,随着贮藏时间的延长,氧气的含量逐渐降低。对照 A 组氧气的含量从 21.1%下降到 5.2%,而 B、C 组差别不大。A 组包装袋内氧气含量始终高于 B、C 组,可能是 A 组薄膜的氧气透过率最高,蓝莓在进行有氧呼吸的同时,袋内氧气含量减少,外部氧气透过薄膜进入内包装,补充部分氧气,自发进行调节^[15]。图 2 显示,二氧化碳浓度随贮藏时间的延长而上升,最后达到平衡。在第 28 天,A 组包装袋内二氧化碳浓度显著高于其他组,二氧化

碳浓度上升至 13.9%。由于 A 组薄膜二氧化碳的透过率较小,这使得蓝莓呼吸放出的二氧化碳在包装内部无法及时排除,因此浓度较高。

2.3 不同活性包装袋对蓝莓烂果率和失重率的影响

烂果率可以用来判断蓝莓是否具有商业价值。从图 3 可以看出,随着时间的延长,烂果率都有不同程度的上升。不同包装对蓝莓腐烂程度影响很大,前 7 d 3 种包装蓝莓的烂果率几乎为 0,7 d 后差异明显拉大($P < 0.05$)。A 组空白对照包装在第 28 天后,烂果率快速上升,腐烂程度远远超过另外 2 种包装,而且第 35 天时蓝莓发霉。

图 4 表示包装对蓝莓失重率变化的影响。蓝莓发生失重的原因:①呼吸作用消耗内部有机物,产生水和二氧化碳^[16];②自身的蒸腾作用造成水分损失。由图 4 可以看出,

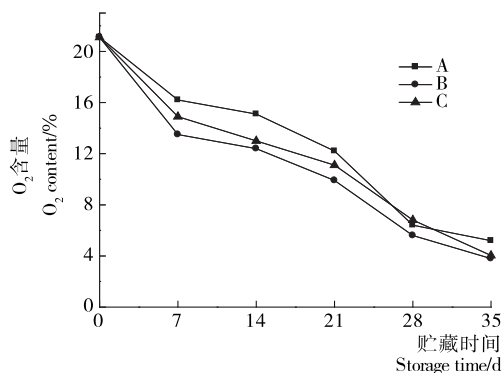


图 1 不同包装袋内氧气的含量

Figure 1 Oxygen content in different films

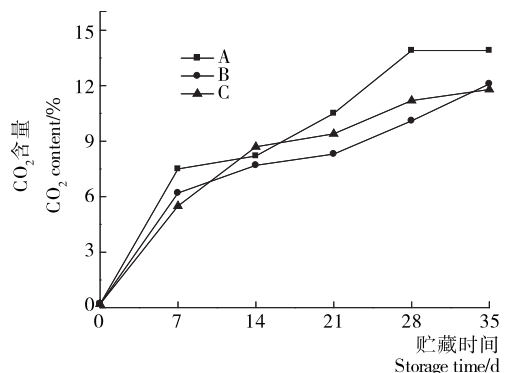


图 2 不同包装袋内二氧化碳的含量

Figure 2 Carbon dioxide content in different films

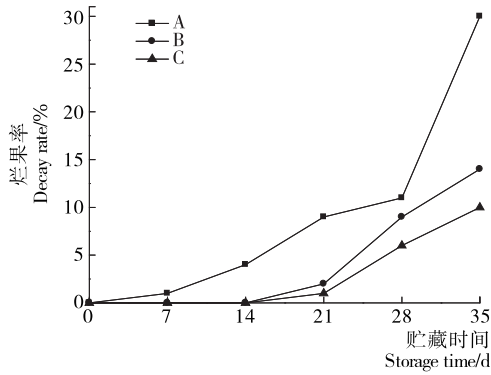


图3 包装对蓝莓烂果率变化的影响

Figure 3 Changes of decay rate in the blueberries packed by different films

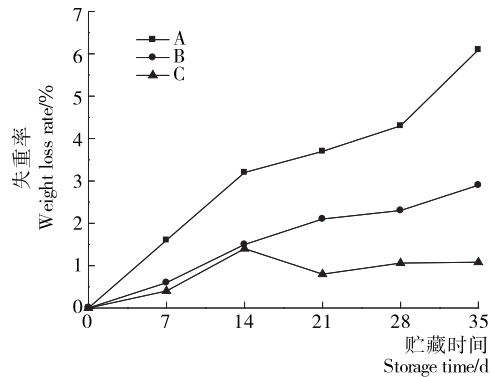


图4 包装对蓝莓失重率变化的影响

Figure 4 Changes of weight loss rate of the blueberries packed by different films

蓝莓的失重率随着时间的延长而增加, A组水分损失最严重,第35天失重率为6.10%,已经远大于B、C组。B、C组在贮藏28 d后,失重率分别为2.30%和1.06%,说明2种精油抗菌包装均有效降低了微生物对蓝莓表皮纤维素的破坏,防止了水分流失^[17]。其中含有5%尤加利精油的薄膜对延缓蓝莓的衰老,延长货架期有很大前景。

2.4 不同活性包装袋对蓝莓硬度和总可溶性固形物的影响

硬度和总可溶性固形物含量与蓝莓的成熟度密切相关。在贮藏过程中,随着时间的延长,初生细胞壁和中胶层的多糖降解,使细胞壁分离、变薄,引起细胞软化^[18]。随着成熟度的增加,在果胶水解酶的作用下果胶被水解,造成了中胶层的溶解,导致细胞间聚合力的丧失^[19]。从图5可以看出,贮藏期间蓝莓硬度均呈整体下降趋势。A组包装蓝莓硬度下降较快,B组包装的蓝莓起初硬度下降趋势并不明显,但到后期急速下降,3种不同包装方式的蓝莓在保存35 d后硬度下降率分别为60.71%,55.56%,41.82%。说明茶树和尤加利精油对延缓蓝莓果实硬度降低具有积极作用。含有5%尤加利精油的C组蓝莓表现最好,整体下降趋势平稳,即使在保存长达35 d后,硬度仍然高达1.6 kg/cm。

由图6可知,在贮藏前期,蓝莓果实TSS含量的先上升并且大约在第14~21天达到峰值,之后缓慢下降。原因可

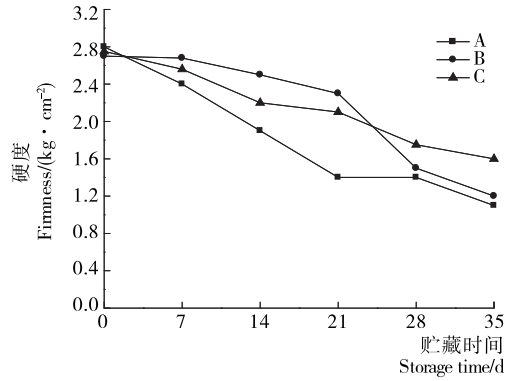


图5 包装对蓝莓硬度变化的影响

Figure 5 Changes of the firmness of the blueberries packed by different films

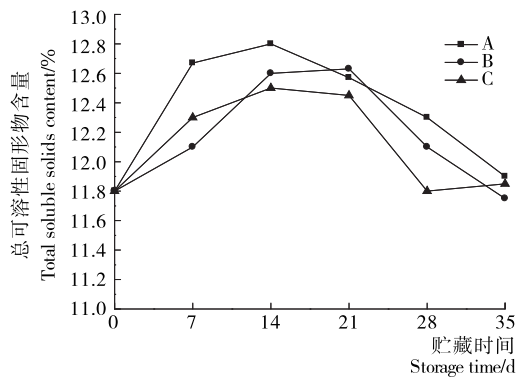


图6 包装对蓝莓TSS变化的影响

Figure 6 Changes of TSS content of blueberries packed by different films

能是蓝莓自身需要能量维持必要的生命活动,体内由于呼吸代谢作用,产生可溶性糖和可溶性果胶等物质,导致含量上升^[20],而在后期果实的生理活动增加了对糖分的消耗^[21]。B、C组在不同程度上延缓了果实TSS含量的上升速度,但是差异并不显著($P>0.05$)。C组TSS含量下降显著低于对照组($P<0.05$)。

2.5 不同活性包装袋对蓝莓总酚和花色苷含量的影响

总酚和花色苷含量与蓝莓的抗氧化和清除自由基能力相关。根据图7,在贮藏期间,3种包装的蓝莓总酚含量均先上升后下降。分别在第21、28天达到峰值,A、B、C组中蓝莓总酚含量分别上升了108.4%,103.3%,115.4%,之后逐渐降低,可能是抗菌包装协同低温贮藏有利于总酚的合成^[22],在贮藏后期酚类物质由于酶的缓慢氧化,含量逐渐降低^[23]。贮藏到第28天,B、C组蓝莓果实总酚含量显著高于对照组A($P<0.05$),其中B组总酚下降最缓慢,表明B组活性包装在贮藏后期能有效减缓蓝莓总酚含量的下降。

如图8所示,在 $(4\pm 1)^\circ\text{C}$ 低温下贮藏35 d蓝莓花色苷含量的变化,3组蓝莓的花色苷总体呈现先上升后下降的趋势,可能是蓝莓采后低温包装贮藏仍然进行生命代谢,内部合成花色苷,随着贮藏时间的延长,果实的腐败,花色苷逐渐分解^[24]。A、C组包装的蓝莓在第14天出现峰值,B组包装

的蓝莓在第 21 天才出现峰值且花色苷含量最高。贮藏 7 d 后, B、C 组蓝莓花色苷含量差异显著($P < 0.05$), A、C 组花色苷含量无差异($P > 0.05$)。可见对于蓝莓花色苷而言, B、C 组包装明显优于对照 A 组。说明茶树精油和尤加利精油可有效延缓花色苷的分解。

2.6 不同活性包装袋对蓝莓 V_C 含量的影响

V_C 是蓝莓重要的营养成分之一, 其含量下降得越快, 营养价值就越低^[25]。由图 9 可知, 蓝莓 V_C 含量随着时间的推

移不断降低, 表现出前后期下降慢, 中期下降得快。A 组下降速度最快, 贮藏后期急剧下降。在第 14 天后, A 组蓝莓 V_C 含量显著低于 B、C 组($P < 0.05$)。这可能是茶树精油和尤加利精油对抑制 V_C 的氧化分解起积极作用。B、C 组蓝莓贮藏 35 d 时 V_C 含量下降相当($P > 0.05$)。第 35 天, B、C 组 V_C 含量分别是对照组的 3.5、3.16 倍。试验证明, 采用精油包装的蓝莓能够有效抑制 V_C 的氧化分解, 可能是精油通过薄膜向包装内部环境挥发, 延缓蓝莓 V_C 的降解。

3 结论

通过分析 3 种抗菌薄膜对蓝莓保鲜的效果可知, 与对照组相比, 含有精油的抗菌薄膜包装能够有效延长蓝莓的货架期, 减缓果实衰老变质。从烂果率、硬度、失重等指标来看, 含 5% 尤加利精油的抗菌薄膜能有效地保持蓝莓中重要的营养成分, 减少营养物质的流失, 保持蓝莓的品质, 比含 5% 茶树精油的抗菌包装效果好。从 V_C 含量的变化来看, 茶树精油抗菌薄膜和尤加利精油抗菌薄膜的保鲜效果相当, 均能有效延缓 V_C 的氧化分解。因此含 5% 尤加利精油的可降解抗菌薄膜对蓝莓的保鲜效果较为突出, 而含 5% 茶树精油的抗菌包装效果其次, 最后是对照组包装。由于精油组分十分复杂, 本研究尚缺乏精油中单一组分或多种组分的抗菌机理分析, 另外精油的易挥发性进一步限制了其在食品保鲜上的应用。将精油微囊化不但可以达到持久缓释的效果, 还能降低部分精油的刺激性气味。因此选用天然植物精油作为抗菌抗氧化剂, 研究可固载精油的微胶囊, 开发环境友好型可降解抗菌包装用于食品保鲜, 极具广阔前景。

参考文献

- [1] 李殿鑫, 江琳琳, 朱娜, 等. 植物精油在食品保鲜中的研究进展[J]. 食品工业科技, 2012, 33(12): 396-400.
- [2] 余丹丹, 邵兴锋, 许凤, 等. 茶树精油在果实采后保鲜中的作用及其机制研究进展[J]. 果树学报, 2014, 31(2): 313-319.
- [3] ÂNGELO Luis, ANDREIA Duarte, JORGE Gominho, et al. Chemical composition, antioxidant, antibacterial and anti-quorum sensing activities of Eucalyptus globulus and Eucalyptus radiata essential oils[J]. Industrial Crops and Products, 2016, 79: 274-282.
- [4] AMIT Kumar Tyagi, ANUSHREE Malik. Antimicrobial potential and chemical composition of Eucalyptus globulus oil in liquid and vapour phase against food spoilage microorganisms[J]. Food Chemistry, 2011, 126(1): 228-235.
- [5] 葛永红, 李灿婴, 吕静玮, 等. 植物精油在果蔬采后病害控制中的研究进展[J]. 食品工业科技, 2017, 38(2): 370-373.
- [6] WEI Yan-zhen, WEI Ying-ying, XU Feng, et al. The combined effects of tea tree oil and hot air treatment on the quality and sensory characteristics and decay of strawberry[J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 136: 139-144.
- [7] 静玮, 苏子鹏, 朱德明, 等. 茶树油熏蒸处理对香蕉采后炭疽病害的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 378-384.

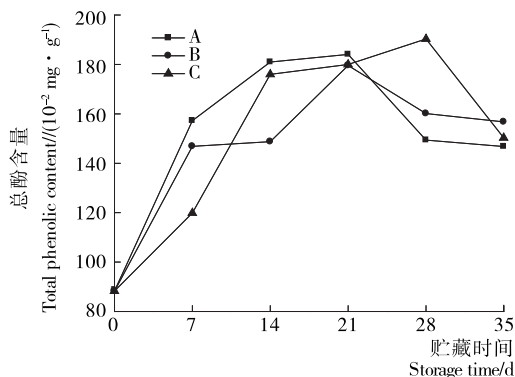


图 7 包装对蓝莓总酚含量变化的影响

Figure 7 Changes of total phenolic content of blueberries packed by different films

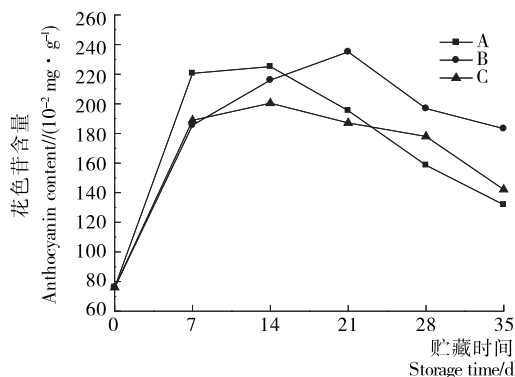


图 8 包装对蓝莓花色苷含量变化的影响

Figure 8 Changes of anthocyanin content of blueberries packed by different films

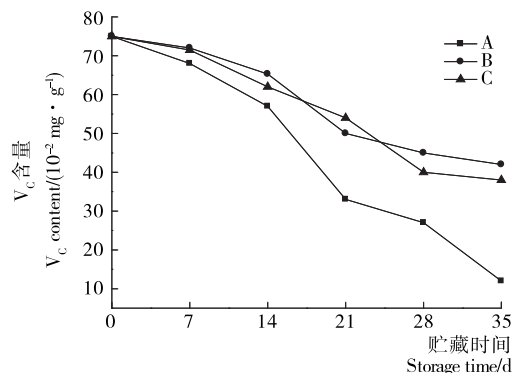


图 9 包装对蓝莓 V_C 含量变化的影响

Figure 9 Changes of V_C content of blueberries packed by different films

[8] LU Hao, SHAO Xing-feng, CAO Jin-xun, et al. Antimicrobial activity of eucalyptus essential oil against *Pseudomonas* in vitro and potential application in refrigerated storage of pork meat[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2016, 51(4): 994-1 001.

[9] HUANG Xiao-jie, LI Jing, SHANG Hong-li. Effect of methyl jasmonate on the anthocyanin content and antioxidant activity of blueberries during cold storage[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2015, 95(2): 337-343.

[10] 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: 44-46.

[11] ADIL Gani, WAQAS N Baba, MUDASIR Ahmad, et al. Effect of ultrasound treatment on physico-chemical, nutraceutical and microbial quality of strawberry[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 66: 496-502.

[12] 孝培培. 微孔包装膜在三种耐二氧化碳果蔬保鲜上的应用[D]. 天津: 天津科技大学, 2016: 1-6.

[13] MARWA Yahyaoui, OIHANA Gordobil, RENÉ Herrera Díaz, et al. Development of novel antimicrobial films based on poly (lactic acid) and essential oils[J]. *Reactive and Functional Polymers*, 2016, 9: 1-8.

[14] 李家政, 毕大鹏. 不同保鲜膜包装对蜜柚冷藏效果和货架品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(S1): 315-319.

[15] 王羽, 梁敏, 齐小晶, 等. 包装材料对樱桃番茄气调保鲜效果的影响[J]. *包装工程*, 2016, 37(19): 91-96.

[16] 于悦, 徐莹, 汪东风, 等. 含茉莉酸甲酯的生物活性膜对蓝莓采后保鲜效果的研究[J]. *保鲜与加工*, 2016, 16(1): 16-20.

[17] 王磊明, 李洋, 张茜, 等. 壳聚糖-肉桂精油复合膜对蓝莓保鲜效果的影响[J]. *食品科技*, 2017, 42(9): 14-21.

[18] SUAREZ B, ALVAREZ A L, GARCIA Y D, et al. Phenolic profiles antioxidant activity and in vitro antiviral properties of apple Oomace[J]. *Food Chemistry*, 2010, 120(1): 339-342.

[19] 李志刚, 袁慧蓉, 石建春. 鲜切冬瓜贮藏过程中质构品质变化分析[J]. *山西农业大学学报: 自然科学版*, 2010, 30(3): 270-273.

[20] 姜燕, 柳佳齐, 尤婷婷, 等. 壳聚糖-甲氧基果胶涂膜在蓝莓冷藏保鲜中的应用[J]. *食品工业*, 2015, 36(7): 151-155.

[21] 韩斯, 孟宪军, 汪艳群, 等. 氯化钙处理对速冻蓝莓冻藏期品质的影响[J]. *食品科学*, 2014, 35(22): 310-314.

[22] 王瑞, 胡旭林, 谢国芳, 等. 生长期喷施有机钙对蓝莓鲜果的保鲜作用研究[J]. *现代食品科技*, 2015, 31(6): 211-218.

[23] 于军香, 郑亚琴, 房克艳. 壳聚糖涂膜结合冰温贮藏对蓝莓活性成分及抗氧化活性的影响[J]. *食品科学*, 2015, 36(14): 271-275.

[24] 陈云霞, 田密霞, 胡文忠, 等. 蓝莓花色苷提取工艺及其抗氧化性研究[J]. *保鲜与加工*, 2015, 15(2): 34-39.

[25] 张一妹. 壳聚糖可食膜的制备及其对蓝莓的保鲜作用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013: 33-35.

(上接第92页)

核桃重量与核桃实际重量线性拟合的 r^2 为 0.85, 平均绝对误差为 1.67 g, 相对误差为 13.21%, 说明试验装置可较为准确地实现核桃在线称重。

4 结论

本研究设计了一种带式输送方式的核桃在线称重系统。利用支持向量回归的方法实现了加速度传感器信号对称重传感器信号的动态补偿。通过对比不同运输速度下采用不同核函数的支持向量回归的预测结果, 得到了最佳的运输速度与核函数分别为 0.03 m/s 与线性核函数。以 200 枚核桃在线测试的结果与实际质量进行线性拟合的 r^2 为 0.85, 平均绝对误差为 1.67 g。结果表明, 该系统可较为准确地实现核桃重量在线测试。

参考文献

[1] 张剑一. 动态称重数据处理算法及其在禽蛋和类球形水果分选中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017: 27-34.

[2] 李光梅, 魏新华, 李法德, 等. 水果机器视觉质量综合分选机的设计[J]. *农机化研究*, 2008(11): 124-126.

[3] 吴晓强, 黄云战, 赵永杰. 基于运动控制器的苹果质量分级系统[J]. *食品与机械*, 2015, 31(5): 114-116.

[4] SUN Li, YUAN Lei-ming, CAI Jian-rong, et al. Egg freshness on-line estimation using machine vision and dynamic weighing[J]. *Food Analytical Methods*, 2015, 8(4): 922-928.

[5] ZHANG Jiang-yi, YING Yi-bin, JIANG Huan-yu, et al. Application of optimized digital filters and asymmetrically trimmed mean to improve the accuracy of dynamic egg weighing[J]. *Transactions of the ASABE*, 2017, 60(4): 1 099-1 111.

[6] LIU Tong-liang, ZHENG Xue-hai, LI Chen. Design of fresh sea cucumber weighing sorting machine [C]// *International Conference on Advanced Information Technology and Sensor Application*. New York: IEEE, 2015: 16-19.

[7] 韩乔生, 芦金石, 陶学恒, 等. 高效高精度动态静态组合块状食品称重分选系统[J]. *食品与机械*, 2016, 32(10): 89-93.

[8] 毛建东. 动态称重系统的动态补偿和校正[J]. *食品与机械*, 2006, 22(2): 84-86.

[9] 杜冬冬. 履带自走式甘蓝收获机研究及称重系统开发[D]. 杭州: 浙江大学, 2017: 11-17.

[10] PAWLOWSKI A, RODRIGUEZ F, SANCHEZ-HERMOSILLA J, et al. Fast nonstationary filtering for adaptive weighing system[C]// *IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation*. New York: IEEE, 2015: 1-6.

[11] 李殿起, 张艳珠. 永磁电动机转子非线性动力特性[J]. *机械强度*, 2004, 26(2): 127-131.

[12] SMOLA A J, SCH LKOPF B. A tutorial on support vector regression[J]. *Statistics & Computing*, 2004, 14(3): 199-222.

[13] 田英杰. 支持向量回归机及其应用研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005: 22-24.