

阿拉伯胶/白色玫瑰茄提取物复合涂膜对低温贮藏蓝莓保鲜效果的影响

邹小波, 杨志坤, 石吉勇, 黄晓玮, 张 文, Haroon Elrasheid TAHIR

(江苏大学食品与生物工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘 要: 为改善低温贮藏蓝莓果实易于腐败的问题, 探讨一种可以改善蓝莓贮藏品质的保鲜处理方法。实验以‘兔眼’蓝莓品种为试材, 在 $(4.0 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 、相对湿度75%的贮藏条件下, 采用100 mg/mL阿拉伯胶+体积分数1.5%甘油(M1)、100 mg/mL阿拉伯胶+体积分数1.5%甘油+体积分数1.5%白色玫瑰茄提取物(white roselle extract, WRE)(M2)、100 mg/mL阿拉伯胶+体积分数1.5%甘油+体积分数2.5% WRE(M3) 3种可食性涂膜液对蓝莓样品进行涂膜处理, 通过分析果实理化性质、抗氧化酶活力和抗氧化物质含量等指标的变化, 探讨复合涂膜对低温贮藏蓝莓保鲜效果的影响。结果表明: 在低温贮藏的条件下, 阿拉伯胶复合涂膜可以显著减缓蓝莓果实质量损失、降低腐烂率和延缓硬度降低($P < 0.05$), 并能维持果实较高的总酚、花色苷含量和较好的感官品质, 显著抑制多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)活力和降低果实表面褐变程度($P < 0.05$); 且M3涂膜剂在抑制低温贮藏蓝莓果实PPO活力、维持果实总酚和花色苷含量、改善感官品质方面具有最佳效果。综合分析各项指标可得出, M3涂膜剂对低温贮藏蓝莓的保鲜效果最好。

关键词: 兔眼蓝莓; 可食性复合涂膜; 保鲜效果; 低温贮藏

Preservation Effect of Gum Arabic Edible Coating Incorporated with White Roselle Extract (*Hibiscus sabdariffa* L.) on Cold-Stored Blueberries

ZOU Xiaobo, YANG Zhikun, SHI Jiyong, HUANG Xiaowei, ZHANG Wen, Haroon Elrasheid TAHIR

(School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: A new edible coating was developed to improve the quality of cold-stored blueberries since they are easy to deteriorate. Rabbiteye blueberries coated with three edible coating solutions, named M1, M2 and M3, were stored at $(4.0 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ with 75% relative humidity. M1 was composed of 100 mg/mL gum arabic (GA) and 1.5% (V/V) glycerol; M2 was composed of 100 mg/mL GA, 1.5% (V/V) glycerol and 1.5% (V/V) white roselle extract (WRE); M3 was composed of 100 mg/mL GA, 1.5% (V/V) glycerol and 2.5% (V/V) WRE. The effect of edible coatings on the quality of blueberries was evaluated by detecting the physicochemical properties, the activity of antioxidant enzymes and the contents of antioxidants. The results showed that all GA edible coatings could significantly delay water loss, reduce decay incidence and slow down the decrease in hardness of blueberries. The treated samples maintained high total polyphenol content (TPC) and total anthocyanin content (TAC) and good sensory quality ($P < 0.05$) and showed significantly inhibited polyphenol oxidase (PPO) activity and reduced surface browning ($P < 0.05$). Edible coating M3 was the most effective in inhibiting PPO activity, maintaining TPC and TAC, improving the sensory quality of cold-stored blueberries. Based on all quality parameters, edible coating M3 was the most effective in preserving the quality of cold-stored blueberries.

Keywords: rabbiteye blueberry; edible composite coating; preservative effect; cold storage

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180305-032

中图分类号: TS255.36

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2019)07-0204-08

收稿日期: 2018-03-05

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2018YFD0400803); 国家自然科学基金面上项目(31671844);

国家自然科学基金青年科学基金项目(31601543; 31801631);

江苏省自然科学基金项目(BK20160506; BK20180865)

第一作者简介: 邹小波(1974—)(ORCID: 0000-0001-5719-7025), 男, 教授, 博士, 研究方向为食品、农产品品质无损检测。

E-mail: zou_xiaobo@ujs.edu.cn

引文格式:

邹小波, 杨志坤, 石吉勇, 等. 阿拉伯胶/白色玫瑰茄提取物复合涂膜对低温贮藏蓝莓保鲜效果的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(7): 204-211. DOI:10.7506/spkx.1002-6630-20180305-032. <http://www.spkx.net.cn>

ZOU Xiaobo, YANG Zhikun, SHI Jiyong, et al. Preservation effect of gum arabic edible coating incorporated with white roselle extract (*Hibiscus sabdariffa* L.) on cold-stored blueberries[J]. Food Science, 2019, 40(7): 204-211. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx.1002-6630-20180305-032. <http://www.spkx.net.cn>

蓝莓又称越橘, 杜鹃花科越橘属, 原产北美, 是近些年中国新兴的一种柔软多汁的小浆果。蓝莓果实因甜酸适宜、营养丰富、风味独特、功能多样而入选世界第三代水果, 亦是联合国粮食及农业组织推荐的五大健康食品之一^[1]。近年来, 随着人们对蓝莓保健功能的逐步认识, 蓝莓加工产业在国内得到快速发展。然而蓝莓果实在夏季高温气候条件下成熟, 采收后极易发生失水、变软、褐变甚至腐烂等不良变化^[2-3]。许多研究采用气调^[4-8]、高压静电场^[9-10]、辐照^[11]、熏蒸处理^[12-13]等对蓝莓进行保鲜, 虽然有一定效果, 但是成本较高, 限制了其广泛应用。低温贮藏是目前蓝莓采收后贮藏保鲜的最常用且最直接的方法^[3], 然而单一的低温保藏技术仍然具有一定的不足, 例如蓝莓仍易失水、硬度下降较快、表面易产生褐变等。为了进一步延长货架期, 满足市场需求, 往往需要在低温贮藏的基础上结合其他保鲜技术, 其中可食性涂膜保鲜是一种有效的方法^[14-15]。可食性涂膜通过建立半渗透膜来延缓果实脱水, 提供选择性屏障, 抑制呼吸, 从而起到延缓腐败和延长贮藏期的效果^[16-17]。目前, 可食性涂膜主要以糖类(如壳聚糖、魔芋葡甘聚糖)、蛋白质类(如大豆分离蛋白膜、小麦面筋蛋白膜)、脂类(如植物精油、天然蜡质)等作为基质与其他天然活性物质混合^[18-21]。已经有可食性涂膜用于新鲜番茄、番茄干、香蕉、芒果等保鲜的研究^[22-26], 且这些研究结果表明可食性涂膜具有延缓果实衰老、减少腐烂、延长果蔬贮藏期等效果。

阿拉伯胶是非洲豆科类植物的天然分泌产物, 其主要成分为高分子多糖类及其钙、镁和钾盐。阿拉伯树胶已经被联合国粮食及农业组织/世界卫生组织食品添加剂专家委员会认定为安全添加剂^[27]。阿拉伯胶是目前国际上较为廉价而又广泛应用的亲水胶体之一, 是工业上用途颇广的水溶性胶, 广泛用作乳化剂、稳定剂、悬浮剂、黏合剂、成膜剂等。目前, 已有研究以阿拉伯树胶为基质制作可食性涂膜用于保鲜土豆、草莓等^[28]。研究表明其不仅具有较好的抗氧化活性, 而且可以有效地维持果实的贮藏品质、延长果实保质期; 然而阿拉伯胶的保鲜效果仍有待提高。在成膜基质中添加其他天然植物提取物, 如茶多酚、植物精油等可以显著提高保鲜效果^[29]。苏丹白色玫瑰茄含有丰富的抗坏血酸、多酚和类黄酮类物质, 具有较高抗氧化活性, 因此被广泛应用于生产香料和饮料^[30]。目前国内外鲜有以阿拉伯胶和白色玫瑰茄

提取物(white roselle extract, WRE)为基质制作可食性涂膜用于果实贮藏的相关研究。因此, 本研究旨在探讨阿拉伯胶与WRE混合制成的可食性复合涂膜对低温贮藏条件下蓝莓的保鲜效果, 开发一种可以改善蓝莓贮藏品质和延长蓝莓货架期的保鲜处理方法。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

供试蓝莓品种为兔眼蓝莓(*Vaccinium ashei* Reade), 于2017年7月26日采自江苏省南京市。果实采收后当天运回实验室, 于4℃冰箱中预冷12 h。选取无病虫害、无机械损伤、表面干爽、果粉基本完整、成熟度相对一致的果实作为实验材料。

阿拉伯胶来源于原产地苏丹, 胶研磨前需要放在60℃下干燥2 h。白色玫瑰茄产于苏丹, 玫瑰茄研磨前需晾干。次氯酸钠、聚乙二醇辛基苯基(2-(2-[4-(1,1,3,3-tetramethylbutyl)phenoxy]ethoxy)ethanol, Triton X-100)、儿茶酚(纯度≥98%)、愈创木酚(纯度≥99%)、乙醇(纯度≥99.7%)、甲醇(纯度≥99.7%)、磷酸钠(纯度≥98%)、无水碳酸钠、福林-酚试剂、没食子酸(纯度≥99%)、磷酸二氢钠(纯度≥99%)、磷酸氢二钠(纯度≥99%)、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)、甘油(纯度≥99%) 国药(上海)集团化学试剂有限公司; 聚乙烯吡咯烷酮 阿拉丁(上海)工业公司。

1.2 仪器与设备

4500 TA.XT Plus质构仪 美国英斯特朗公司; WYT-4型阿贝折光仪、card-分光测色仪 上海仪电分析仪器有限公司; GTR16-2型高速台式冷冻离心机 北京时代北利离心机有限公司; T6-新世纪型紫外-可见分光光度计 北京普析通用仪器有限责任公司。

1.3 方法

1.3.1 可食性复合涂膜液的制备

配制3种可食性涂膜液: M1: 100 mg/mL阿拉伯胶+体积分数1.5%甘油; M2: 100 mg/mL阿拉伯胶+体积分数1.5%甘油+体积分数1.5% WRE; M3: 100 mg/mL阿拉伯胶+体积分数1.5%甘油+体积分数2.5% WRE, 具体制备方法如下。

取10 g的阿拉伯胶粉溶解于100 mL蒸馏水中制成100 mg/mL的阿拉伯胶溶液,于40 ℃下磁力搅拌60 min,制得溶液,经真空抽滤去除杂质。在100 mL阿拉伯胶溶液中,添加1.5 mL甘油为增塑剂,然后在40 ℃下搅拌均匀并冷却至室温,即得到M1组;取10 g白色玫瑰茄粉溶于100 mL、体积分数60%甲醇中制成0.1 g/mL WRE溶液,并旋转蒸发去除杂质,在100 mL阿拉伯胶溶液中添加1.5 mL甘油和1.5 mL WRE溶液,40 ℃下搅拌均匀后,冷却至室温,即得到M2溶液;M3溶液的制备同M2溶液的制备,只是将其中WRE溶液的添加量改为2.5 mL。

1.3.2 涂膜流程

挑选800个蓝莓样品放于10 g/L的次氯酸钠溶液中浸泡3 min,于纯净水中洗净,室温下风干后,将蓝莓样品分为4组,每组200个,取3组样品分别放于1.3.1节配制的M1、M2和M3涂膜液中浸泡3 min,剩下1组不做涂膜处理,作为对照组。最后将4组样品各分为5份,每份40个装入塑料托盒中,用保鲜膜封口并于(4.0±0.5)℃、相对湿度75%的恒温箱中贮藏,每隔4 d取样测定各项指标,数据取3次平行测定的平均值。

1.3.3 指标测定

1.3.3.1 涂膜液色泽和抗氧化活性的测定

使用card-分光测色仪测定M1、M2和M3涂膜液的 L^* 、 a^* 、 b^* 值,并肉眼观察颜色;参照任艳芳等^[31]的方法测定涂膜液的DPPH自由基清除率。

1.3.3.2 WRE溶液中抗坏血酸、总酚和类黄酮含量及抗氧化活性的测定

将白色玫瑰茄果粉与体积分数60%的甲醇溶液以料液比1:50 (m/V)混合,于25 ℃下磁力搅拌60 min,得到WRE溶液。参照叶世柏^[32]的方法,对抗坏血酸、总酚、类黄酮含量和DPPH自由基清除率进行测定。

1.3.3.3 质量损失率的测定

质量损失率采用称质量法测定^[33],计算方法见式(1)。

$$\text{质量损失率}/\% = \frac{\text{贮藏前质量/g} - \text{贮藏后质量/g}}{\text{贮藏前质量/g}} \times 100 \quad (1)$$

1.3.3.4 腐烂率的测定

腐烂果实以表面出现明显的破溃流汁或腐烂为准,腐烂率计算方法见式(2)。

$$\text{腐烂率}/\% = \frac{\text{腐烂果数}}{\text{总果数}} \times 100 \quad (2)$$

1.3.3.5 表面色泽的测定

使用手持式测色仪测定 L^* 、 a^* 、 b^* 值。褐变指数的计算见式(3)^[34]。

$$\text{褐变指数} = \frac{100 \times (x - 0.31)}{0.17} \quad (3)$$

$$\text{式中: } x = \frac{a^* + 1.75L^*}{5.645L^* + a^* - 3.012b^*}。$$

1.3.3.6 硬度、可溶性固形物质量分数的测定

果实的硬度和可溶性固形物质量分数(soluble solids content, SSC)的测定均参照Tahir等^[35]的方法。

1.3.3.7 多酚氧化酶活力的测定

多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)活力的测定参照González-Aguilar等^[36]的方法略作修改。取适量样品搅拌成果肉,准确称取2.5 g果肉,加入5 mL 0.2 mol/L磷酸盐缓冲液(pH 6.5),7 500 r/min、4 ℃冷冻离心15 min,提取上清液。取50 μL上清液,加入1 mL 0.1 mol/L苯邻二酚溶液和1.95 mL 0.2 mol/L磷酸盐缓冲液(pH 6.5),摇匀后静置。对照用蒸馏水代替上清液,迅速放于紫外-可见分光光度计内,测定6 min内在410 nm波长处的吸光度变化,每20 s记录一次。以每分钟吸光度变化0.001表示一个酶活力单位(U)。

1.3.3.8 过氧化物酶活力的测定

参照Garcia-Palazon等^[37]的方法测定过氧化物酶(peroxidase, POD)活力,取适量样品搅拌成果肉,准确称取2.5 g果肉,加入5 mL磷酸缓冲液(0.2 mol/L, pH 6.5),7 500 r/min、4 ℃冷冻离心15 min,提取上清液。取50 μL上清液,加入0.15 mL 10 g/L愈创木酚、0.15 mL 体积分数1% H₂O₂、2.66 mL磷酸缓冲液(0.2 mol/L, pH 6.5)。对照用蒸馏水代替上清液,迅速放于紫外-可见分光光度计内,测定6 min内在470 nm波长处的吸光度变化,每20 s记录一次。以每分钟吸光度变化0.001表示一个酶活力单位(U)。

1.3.3.9 花色苷含量的测定

花色苷含量的测定参照Rodriguez等^[38]的pH示差法略作修改,取适量样品搅拌成果肉,准确称取5 g果肉,加入10 mL、体积分数0.1% HCl(溶剂为甲醇),混合摇匀后于4 ℃下避光1~2 h,然后于12 000 r/min、4 ℃冷冻离心10 min,提取上清液。然后分别使用氯化钾缓冲液(pH 1.0)和醋酸钠缓冲液(pH 4.5)测定。简而言之,0.2 mL上清液与3.6 mL醋酸钠缓冲液(pH 4.5)或氯化钾缓冲液(pH 1.0)混合摇匀,室温下放置5 min,对照用蒸馏水代替提取液,分别于510 nm和700 nm波长处测定吸光度。花色苷含量计算参考公式(4)。

$$\text{花色苷含量}/(\text{mg}/100 \text{ g}) = \frac{A \times M_w \times D_f \times V \times 100}{\epsilon \times m \times d} \quad (4)$$

式中: $A = (A_{510 \text{ nm}} - A_{700 \text{ nm}})_{\text{pH} 1.0} - (A_{510 \text{ nm}} - A_{700 \text{ nm}})_{\text{pH} 4.5}$; M_w 为矢车菊素-3-葡萄糖苷的摩尔分子质量(449.2 g/mol); D_f 为样品的稀释倍数; V 为样液体积/mL; ϵ 为矢车菊素-3-葡萄糖苷的摩尔吸光系数(26 900 L/(mol·cm)); d 表示比色皿厚度(1 cm); m 为样品的质量/g。

1.3.3.10 多酚含量的测定

多酚含量的测定参照Tahir等^[39]的方法,取1.3.3.8节

中的上清液0.1 mL, 与2 mL福林-酚试剂混合摇匀, 静置5 min后加入2 mL 100 g/L的 Na_2CO_3 溶液, 于室温下避光1 h。对照组用蒸馏水代替提取液, 于640 nm波长处测定吸光度。

1.3.3.11 感官评价及表观品质

参照Ali等^[40]的方法略作改进, 对贮藏12 d后的所有蓝莓样品进行了感官分析。感官评价由10位经过训练的成员组成的味觉小组来完成, 小组成员在感官评价表中对每组蓝莓进行评分。蓝莓果实的感官属性由外观、颜色、气味、口感、购买意愿以及总感官评分来评定。其中5分表示非常喜欢, 4分表示喜欢, 3分表示既不喜欢也不讨厌, 2分表示讨厌, 1分表示非常讨厌。

取贮藏0 d和贮藏结束(12 d)时的各组样品, 放置于安装有固定光源的光箱内, 用数码相机获其表观照片。

1.4 数据分析

采用Excel 2007软件进行数据处理, 用SPSS 16.0统计软件的多重比较法进行差异显著性分析, $P<0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 复合涂膜溶液的基本特性

WRE溶液中抗坏血酸、总酚、类黄酮含量和DPPH自由基清除率分别为 $(3\ 059\pm17)$ 、 $(54\ 500\pm16)$ 、 $(8\ 410\pm20)$ mg/kg和 $(74.2\pm0.6)\%$ 。由表1可知, 复合涂膜液抗氧化活性从大到小依次为: $\text{M3}>\text{M2}>\text{M1}$, 且不同组之间差异显著($P<0.05$)。复合涂膜液的抗氧化活性可以归因于白色玫瑰茄中的生物活性化合物的存在, 如抗坏血酸、酚类化合物和类黄酮类化合物。可食用涂层的颜色特征对消费者可接受的蓝莓果实也很重要, M1 、 M2 、 M3 3组涂膜液的颜色分别为淡白色、淡黄色、黄色。3种不同涂层的 a^* 值和 b^* 值差异显著($P<0.05$)。其中 M2 组涂膜液的 L^* 值最大, 亮度最大。

表1 不同涂膜液的颜色及DPPH自由基清除率

Table 1 Color and DPPH radical scavenging activity of different coatings

| 组别 | DPPH自由基清除率/% | L^* | a^* | b^* |
|----|------------------|------------------|------------------|------------------|
| M1 | 16.76 ± 0.14^c | 90.71 ± 0.01^b | -0.14 ± 0.01^c | 7.04 ± 0.02^c |
| M2 | 43.20 ± 0.66^b | 92.02 ± 0.01^a | 0.20 ± 0.01^b | 12.26 ± 0.02^b |
| M3 | 88.16 ± 0.34^a | 90.78 ± 0.02^b | 0.38 ± 0.03^a | 16.26 ± 0.05^a |

注: 同列肩标字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

2.2 可食性复合涂膜对蓝莓低温贮藏过程中PPO、POD活力及花色苷、总酚含量的影响

PPO是植物体内普遍存在的一种末端氧化酶, 基于酶系的催化反应的主要特征是果实颜色的变化, 因

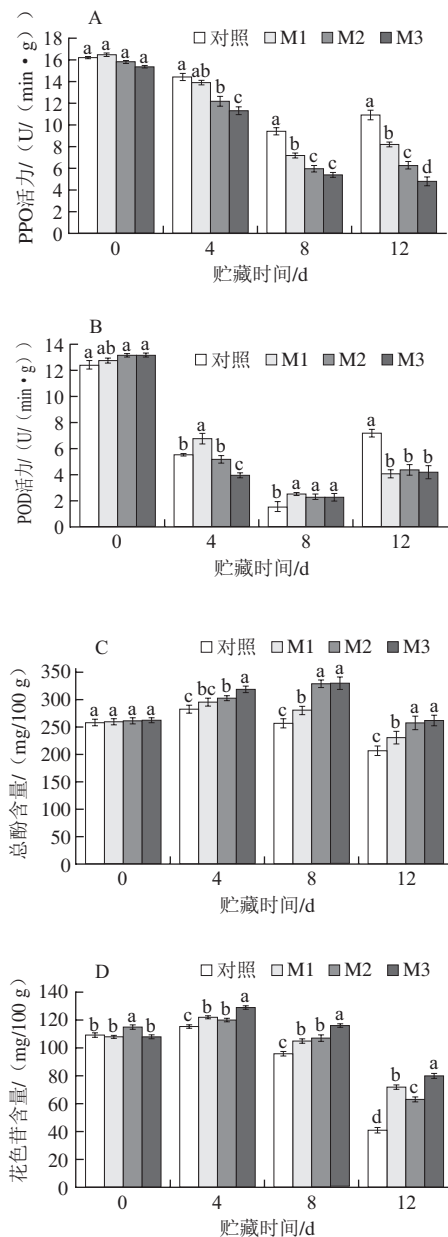
此PPO活力的变化可以作为果实品质变化的指标^[18]。

由图1A知, 贮藏期间, 所有蓝莓样品的PPO活力呈先下降再上升的趋势。Wang等^[12]的研究表明, 果实贮藏后期可能发生活性氧代谢失调, 诱导PPO活力的升高。贮藏0 d时, 涂膜组与对照组PPO活力差异并不显著($P>0.05$)。贮藏12 d后, 涂膜组与对照组的PPO活力差异显著($P<0.05$), 其中对照组PPO活力最高, 为 $10.8\text{ U}/(\text{min}\cdot\text{g})$, M1 组和 M2 组分别为 8.18 、 $6.28\text{ U}/(\text{min}\cdot\text{g})$, 而 M3 组最低, 为 $4.79\text{ U}/(\text{min}\cdot\text{g})$ 。复合涂膜 M2 和 M3 组的果实表现出较低的PPO活力, 可能是由于WRE中含有丰富的抗坏血酸、多酚和类黄酮类物质。并且, Wang等^[12]研究表明抗坏血酸、酚类和类黄酮类物质可以抑制水果和蔬菜中的PPO活力。研究表明阿拉伯胶涂膜处理均可以一定程度上抑制蓝莓果实的PPO活力, 进而达到延缓果实褐变的效果, 而WRE的添加可以有效增强阿拉伯胶涂膜抑制蓝莓果实PPO活力的能力。

POD是植物活性氧清除系统中的一种重要酶, 其活力的变化与果实成熟衰老密切相关^[40]。如图1B所示, 蓝莓的POD活力变化也呈现出与PPO类似的趋势, 贮藏前8 d呈下降趋势, 随后上升。尽管在贮藏8 d时, 与对照组相比, 所有涂膜组的蓝莓均表现出较高的POD活性, 与Ali等^[40]发现阿拉伯胶涂膜会诱导草莓中POD活力上升的结果类似。但是在贮藏期结束后, 涂膜组蓝莓样品的POD活力均显著低于对照组($P<0.05$), 而涂膜组之间并无显著差异($P>0.05$)。

由图1C可知, 在整个贮藏期间, 所有组的蓝莓果实中总酚含量呈先升高后下降的变化趋势。其中对照组和 M1 组蓝莓的总酚含量在贮藏4 d时达到峰值, 随后迅速下降, 而 M2 和 M3 组总酚含量峰值稍晚出现, 在贮藏第8天达到峰值, 随后迅速下降, 在贮藏期结束后, 涂膜组和对照组差异显著($P<0.05$), M2 和 M3 组蓝莓样品维持了较高的总酚含量。Park等^[41]报道表明果实中总酚含量的减少可能是由于酚类物质在褐变反应中作为PPO的底物被消耗。因此, M2 、 M3 组蓝莓样品较高的总酚含量可以归因于复合涂膜组 M2 、 M3 中添加的WRE有效地抑制了PPO活力, 减缓了酚类物质的消耗速度, 从而维持了蓝莓果实贮藏后期较高的总酚含量。

花色苷是蓝莓果皮中的天然水溶性色素物质, 它具有促进视红素再合成、提高免疫力、清除自由基和延缓衰老等多种生理活性功能, 其含量是蓝莓贮藏品质的重要参考指标^[38]。由图1D可知, 贮藏期间所有蓝莓样品的花色苷含量呈先上升后下降的趋势, 均在贮藏的第4天达到峰值。随着贮藏时间延长, 涂膜组蓝莓的花色苷含量明显高于对照组($P<0.05$)。贮藏12 d后, 对照组蓝莓的花色苷含量为 $41\text{ mg}/100\text{ g}$, 分别为 M1 、 M2 、 M3 组花色苷含量的56.5%、63.4%、51.2%。



相同贮藏时间, 小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

图1 可食性复合涂膜对低温贮藏蓝莓PPO (A)、POD (B) 活力和总酚 (C)、花色苷 (D) 含量的影响

Fig. 1 PPO activity (A), POD activity (B), TPC (C) and TAC (D) of cold-stored blueberries as affected by composite edible coatings

2.3 可食性复合涂膜对蓝莓低温贮藏过程中质量损失率和腐烂率的影响

质量损失是影响蓝莓贮藏品质的主要因素之一, 主要表现为果实失水发生皱缩, 并且失去光泽。研究表明, 蓝莓果实的质量损失主要由蒸腾作用失水造成^[13]; 此外, 果实的有氧呼吸作用也会使一部分有机物转化为 CO_2 和 H_2O , 从而造成一定的质量损失^[29]。由图2A可知, 随着贮藏时间的延长, 蓝莓果实的质量损失率逐渐升高。经涂膜处理的蓝莓质量损失率上升的幅度低于对照

组, 主要是因为具有较高憎水性的阿拉伯胶涂膜能够在水果表面形成水蒸气屏障, 从而减少水分蒸发^[42]、降低质量损失率。整个贮藏期间涂膜组之间质量损失率差异并不显著 ($P > 0.05$), 其中M3组的质量损失率上升幅度最小。

由图2B可知, 所有蓝莓样品的腐烂率也表现出与蓝莓质量损失率相似的趋势, 在4 d后, 对照组蓝莓的腐烂率为6.5%, 涂膜组基本上没有果实腐烂; 贮藏12 d后, 对照组18.2%的蓝莓腐烂, 涂膜组腐烂率维持在较低水平, 且涂膜组之间差异不显著 ($P > 0.05$)。

因此, 相比于对照, 涂膜处理有效降低了果实质量损失率和腐烂率, 这可归因于可食性涂膜在蓝莓果实表面形成了保护性屏障, 一定程度上抵御了微生物对果实的分解作用^[2], 并且WRE的添加可能使果实表面的涂膜结构更加紧密, 从而更有效地抑制与呼吸作用相关的代谢活动, 维持果实较好的贮藏品质。

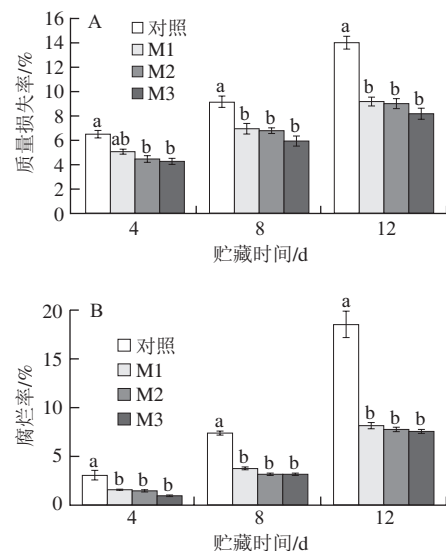


图2 可食性复合涂膜对低温贮藏蓝莓质量损失率 (A) 和腐烂率 (B) 的影响

Fig. 2 Mass loss rate (A) and decay incidence (B) of cold-stored blueberries as affected by composite edible coatings

2.4 可食性复合涂膜对蓝莓低温贮藏过程中理化指标的影响

果实硬度是反映耐贮性的重要指标, 软化是果实成熟的一个重要特征。果实软化时在细胞壁中发生的最显著变化是果胶物质溶化, 同时伴随着细胞壁中胶层的溶解和初生壁的破坏^[42]。低温贮藏期间蓝莓果实的硬度呈下降趋势 (图3A)。贮藏后期对照组软化程度明显高于涂膜组, 涂膜组的差异并不显著 ($P > 0.05$), 贮藏12 d时, M3组硬度最大, 为110.2 g, M1组和M2组分别为108.6 g和107.0 g。对照组硬度为94.2 g, 为涂膜组平均硬度的87%。整个贮藏期间, 涂膜延缓了果实硬度下降

速度并且维持了贮藏后期果实的较高硬度,这可归因于涂膜在果实表面形成均匀薄膜,抑制了蒸腾作用,延缓了果实硬度的降低^[15]。

由图3B可知,所有蓝莓样品的SSC在贮藏期间都呈上升趋势,并且所有涂膜组的蓝莓SSC变化无显著差异;但贮藏结束时,涂膜组蓝莓果实的SSC高于对照组。该结果与Mosquera等^[43]的研究结果一致,他们观察到壳聚糖涂层可以增加草莓果实SSC。

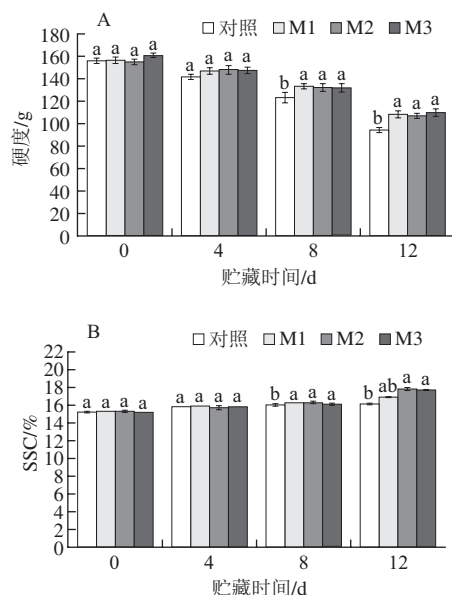


图3 可食性复合涂膜对低温贮藏蓝莓硬度(A)、SSC(B)的影响

Fig. 3 Firmness (A) and soluble solids content (B) of cold-stored blueberries as affected by composite edible coatings

2.5 可食性复合涂膜对蓝莓低温贮藏过程中色泽和褐变指数的影响

颜色是果实重要的外观特征之一,果实颜色的变化与贮藏品质密切相关^[44]。而果实的色泽变化与果实褐变密切相关^[45], L^* 值表示果实色泽的明暗程度, L^* 值越大表示亮度越大,表面越有光泽;由图4A知,贮藏期间果实的 L^* 值呈下降的趋势,贮藏后期下降趋势趋于平缓。贮藏期间,对照组的 L^* 值显著低于涂膜组($P < 0.05$),而涂膜组之间 L^* 差异不显著($P > 0.05$),贮藏12 d后, M2组蓝莓果实的 L^* 值最大。 a^* 值表示红绿程度, a^* 值越大说明色泽越红。由图4B可知,贮藏期间所有蓝莓果实的 a^* 值呈上升趋势。贮藏8 d后,涂膜组的上升趋势较对照组更缓慢。贮藏12 d时,对照组、M1、M2组 a^* 值分别为2.62、1.75和1.63, M3组的 a^* 值最低(1.43),仅为对照组的54.6%。

由图4C可知,贮藏前期,所有蓝莓的褐变指数变化较平缓,对照组与涂膜组差异并不显著($P > 0.05$),贮藏4 d后,对照组蓝莓的褐变指数的上升速度高于涂膜组,在贮藏12 d后,涂膜组和对照组蓝莓的褐变指数差异显著($P < 0.05$)。可能是可食性复合涂膜通过在果实表

明形成透明薄膜,阻止了蓝莓果实与氧气接触,抑制了褐变发生^[26]。

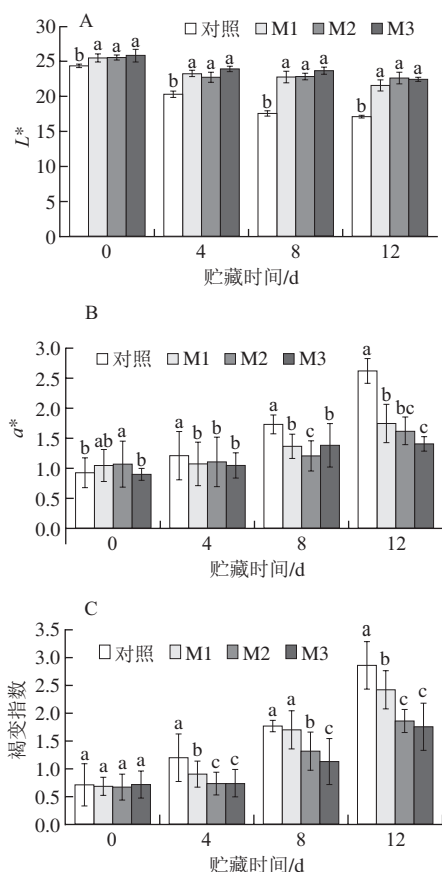


图4 可食性复合涂膜对低温贮藏蓝莓 L^* 值(A)、 a^* 值(B)和褐变指数(C)的影响

Fig. 4 L^* (A), a^* (B) and browning index (C) of cold-stored blueberries as affected by composite edible coatings

2.6 可食性复合涂膜对低温贮藏蓝莓感官评价和表观品质的影响

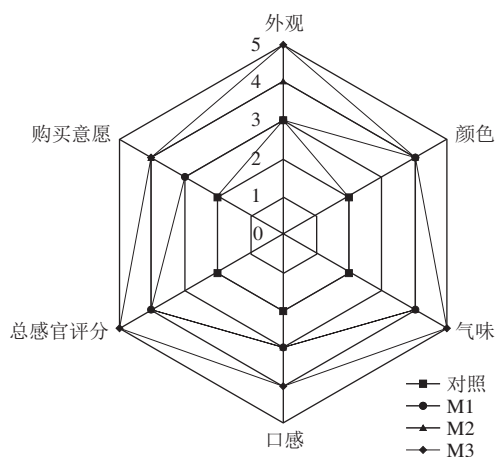
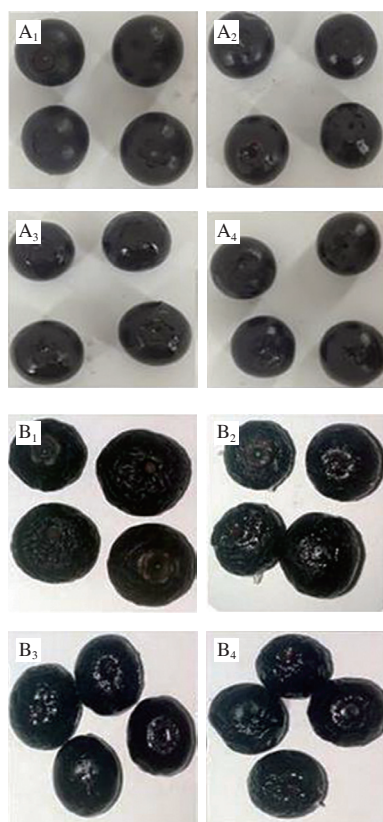


图5 可食性复合涂膜对低温贮藏蓝莓感官评分的影响

Fig. 5 Sensory evaluation of cold-stored blueberries as affected by composite edible coatings



A、B. 分别表示贮藏前、贮藏12 d后；下标1~4. 分别表示对照组和M1、M2、M3组。

图6 不同可食性复合涂膜对低温贮藏蓝莓表面品质的影响

Fig. 6 Surface appearance of cold-stored blueberries as affected by composite edible coatings

从图5、6可知，与对照组相比，涂膜处理明显改善了蓝莓的风味、口感和颜色等感官指标，并且具有更好的表现，更易于被消费者接受，相比于其他涂膜组，M3组具有更佳的气味、口感、外观和总感官评分。贮藏后对照组蓝莓果实皱缩严重，果实变软，并且略有异味，风味口感较差，而涂膜处理后果实相对饱满，硬度相对于对照组较好，口感更佳，其中以M3组蓝莓的总感官品质最好。

3 结论

本实验以阿拉伯胶为基质，通过添加WRE制作可食性复合涂膜用于对低温贮藏蓝莓保鲜效果的研究，结果表明阿拉伯胶作为可食性涂膜有效地降低了蓝莓果实低温贮藏过程中的质量损失率和腐烂率，延缓了果实硬度下降，抑制了果实的PPO和POD活力，维持了蓝莓果实较高的总酚和花色苷含量。相比于单一的阿拉伯胶涂膜，添加了WRE的复合涂膜在抑制低温贮藏蓝莓果实的PPO活力、降低褐变指数、维持总酚和花色苷含量以及改善蓝莓的感官品质等方面表现出更好的效果，这可能

是WRE中存在生物活性化合物（如抗坏血酸、酚类化合物和黄酮类化合物），它们通过抑制PPO、POD活力有效降低了蓝莓果实的自由基积累速率，减轻了自由基对组织的伤害，并通过抑制抗氧化酶活力减缓了作为褐变反应底物的酚类物质的消耗速度；因此维持了蓝莓果实贮藏后期较高的总酚含量和降低了果实表面褐变程度（ $P<0.05$ ），进而维持了蓝莓果实较好的贮藏品质。

综合分析表明，阿拉伯胶和WRE复合涂膜对低温贮藏蓝莓的保鲜效果较好，其中M3涂膜剂在抑制低温贮藏蓝莓果实PPO活力、维持果实总酚和花色苷含量、改善果实感官品质方面具有最佳效果。

参考文献：

- [1] CHU W J, GAO H Y, CHEN H J, et al. Effects of cuticular wax on the postharvest quality of blueberry fruit[J]. Food Chemistry, 2018, 239: 68-74. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.06.024.
- [2] MANNOZZI C, TYLEWICZ U, CHINNICI F, et al. Effects of chitosan based coatings enriched with procyanidin by-product on quality of fresh blueberries during storage[J]. Food Chemistry, 2018, 251: 18-24. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.01.015.
- [3] 于继男, 薛璐, 鲁晓翔, 等. 温度驯化对蓝莓冰温贮藏期间生理品质变化的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(22): 265-269. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201422052.
- [4] 姜爱丽, 孟宪军, 胡文忠, 等. 高CO₂冲击处理对采后蓝莓生理代谢及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 362-368. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2011.03.066.
- [5] 郑永华. 高氧处理对蓝莓和草莓果实采后呼吸速率和乙烯释放速率的影响[J]. 园艺学报, 2005, 32(5): 866-868. DOI:10.3321/j.issn:0513-353X.2005.05.020.
- [6] ROSENFELD H J, MEBERG K R, HAFFNER K, et al. MAP of highbush blueberries: sensory quality in relation to storage temperature, film type and initial high oxygen atmosphere[J]. Postharvest Biology and Technology, 1999, 16(1): 27-36. DOI:10.1016/S0925-5214(98)00102-1.
- [7] 曾文兵. 可食性复合涂膜保鲜剂对延长鲜切苹果货架期的研究[J]. 食品科学, 2006, 27(2): 262-265. DOI:10.3321/j.issn:1002-6630.2006.02.062.
- [8] 孙贵宝. 高压静电场长期贮藏保鲜蓝莓果的试验研究[J]. 农机化研究, 2003(1): 121-123. DOI:10.3969/j.issn.1003-188X.2003.01.050.
- [9] WANG S Y, ZHOU Q, ZHOU X, et al. The effect of ethylene absorbent treatment on the softening of blueberry fruit[J]. Food Chemistry, 2018, 246: 286-294. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.11.004.
- [10] WU Yue, HAN Yongbin, TAO Yang, et al. Ultrasound assisted adsorption and desorption of blueberry anthocyanins using macroporous resins[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 48: 311-320. DOI:10.1016/j.ultsonch.2018.06.016.
- [11] DUAN J R, WU R Y, STRIK B C, et al. Effect of edible coatings on the quality of fresh blueberries (Duke and Elliott) under commercial storage conditions[J]. Postharvest Biology and Technology, 2011, 59(1): 71-79. DOI:10.1016/j.postharvbio.2010.08.006.
- [12] WANG S Y, CHEN C T, YIN J J. Effect of allyl isothiocyanate on antioxidants and fruit decay of blueberries[J]. Food Chemistry, 2010, 120(1): 199-204. DOI:10.1016/j.foodchem.2009.10.007.
- [13] 纪淑娟, 周倩, 马超, 等. 1-MCP处理对蓝莓常温货架品质变化的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(2): 322-327. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201402063.

- [14] LIMA G, CASTORIA R, DE CURTIS F, et al. Integrated control of blue mould using new fungicides and biocontrol yeasts lowers levels of fungicide residues and patulin contamination in apples[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2011, 60(2): 164-172. DOI:10.1016/j.postharvbio.2010.12.010.
- [15] MANNOZZI C, CECCHINI J P, TYLEWICZ U, et al. Study on the efficacy of edible coatings on quality of blueberry fruits during shelf-life[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 85: 440-444. DOI:10.1016/j.lwt.2016.12.056.
- [16] PATEL S, GOYAL A. Applications of natural polymer gum arabic: a review[J]. *International Journal of Food Properties*, 2015, 18(5): 986-998. DOI:10.1080/10942912.2013.809541.
- [17] MOTLAGH S, RAVINES P, KARAMALLAH K A, et al. The analysis of Acacia gums using electrophoresis[J]. *Food Hydrocolloids*, 2006, 20(6): 848-854. DOI:10.1016/j.foodhyd.2005.08.007.
- [18] 戴文婧, 尹明安, 沈建鹏, 等. 魔芋葡甘聚糖涂膜对牛角椒保鲜效果的影响[J]. *食品科学*, 2013, 34(20): 329-333. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201320068.
- [19] 黄杨敏, 孙晔, 耿思翌, 等. 魔芋葡甘聚糖复合涂膜对鲜切莲藕保鲜效果的影响[J]. *食品科学*, 2016, 37(8): 266-271. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201608048.
- [20] 李国秀, 李建科, 吴晓霞, 等. 魔芋葡甘聚糖-壳聚糖-大豆分离蛋白复合涂膜保鲜剂的研究[J]. *陕西农业科学*, 2007(2): 46-49. DOI:10.3969/j.issn.0488-5368.2007.02.020.
- [21] GOL N B, PATEL P R, RAO T V R. Improvement of quality and shelf-life of strawberries with edible coatings enriched with chitosan[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2013, 85: 185-195. DOI:10.1016/j.postharvbio.2013.06.008.
- [22] KHALIQ G, MOHAMED M T M, ALI A, et al. Effect of gum arabic coating combined with calcium chloride on physico-chemical and qualitative properties of mango (*Mangifera indica* L.) fruit during low temperature storage[J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, 190: 187-194. DOI:10.1016/j.scienta.2015.04.020.
- [23] ELTOUM Y A I, BABIKER E E. Changes in antioxidant content, rehydration ratio and browning index during storage of edible surface coated and dehydrated tomato slices[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2014, 38(3): 1135-1144. DOI:10.1111/jfpp.12073.
- [24] AL-JUHAIMI F Y. Physicochemical and sensory characteristics of arabic gum-coated tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruits during storage[J]. *Journal of Food Processing & Preservation*, 2014, 38(3): 971-979. DOI:10.1151/jfpp.10247.
- [25] HASHEMI S M B, KHANEGHAH A M, GHAHFARROKHI M G, et al. Basil-seed gum containing *Origanum vulgare* subsp. *viride* essential oil as edible coating for fresh cut apricots[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2017, 125: 26-34. DOI:10.1016/j.postharvbio.2016.11.003.
- [26] 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: 17-25. DOI:10.7666/d.D327989.
- [27] PATEL S, GOYAL A. Applications of natural polymer gum arabic: a review[J]. *International Journal of Food Properties*, 2015, 18(5): 986-998. DOI:10.1080/10942912.2013.809541.
- [28] SOGVAR O B, SABA M K, EMAMIFAR A. *Aloe vera* and ascorbic acid coatings maintain postharvest quality and reduce microbial load of strawberry fruit[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 114: 29-35. DOI:10.1016/j.postharvbio.2015.11.019.
- [29] 张美芳, 何玲, 冯金霞, 等. 银杏叶提取液复合涂膜对鲜切苹果品质的影响[J]. *食品科学*, 2014, 35(10): 263-267. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201410049.
- [30] TAHIR H E, ZOU X B, MARIOD A A, et al. Assessment of antioxidant properties, instrumental and sensory aroma profile of red and white Karkade/Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.)[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2017, 11(4): 1559-1568. DOI:10.1007/s11694-017-9535-0.
- [31] 任艳芳, 刘畅, 何俊瑜, 等. 黄连壳聚糖复合涂膜保鲜剂对夏橙保鲜效果的研究[J]. *食品科学*, 2012, 33(16): 291-296.
- [32] 叶世柏. 食品理化检验方法指南[M]. 北京: 北京大学出版社, 1991: 57-59.
- [33] MASKAN M. Production of pomegranate (*Punica granatum* L.) juice concentrate by various heating methods: colour degradation and kinetics[J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 72(3): 218-224. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2004.11.012.
- [34] DEL-VALLE V, HERNÁNDEZ-MUÑOZ P, GUARDA A, et al. Development of a cactus-mucilage edible coating (*Opuntia ficus indica*) and its application to extend strawberry (*Fragaria ananassa*) shelf-life[J]. *Food Chemistry*, 2005, 91(4): 751-756. DOI:10.1016/j.foodchem.2004.07.002.
- [35] TAHIR H E, ZOU X B, SHI J Y, et al. Quality and postharvest-shelf life of cold-stored strawberry fruit as affected by gum arabic (*Acacia senegal*) edible coating[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2018, 42(3): e12527. DOI:10.1111/jfbc.12527(0).
- [36] GONZÁLEZ-AGUILAR G A, RUIZ-CRUZ S, SOTO-VALDEZ H, et al. Biochemical changes of fresh-cut pineapple slices treated with antibrowning agents[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2005, 40(4): 377-383. DOI:10.1111/j.1365-2621.2004.00940.x.
- [37] GARCIA-PALAZON A, SUTHANTHANGJAI W, KAJDA P, et al. The effects of high hydrostatic pressure on β -glucosidase, peroxidase and polyphenoloxidase in red raspberry (*Rubus idaeus*) and strawberry (*Fragaria* \times *ananassa*)[J]. *Food Chemistry*, 2004, 88(1): 7-10. DOI:10.1016/j.foodchem.2004.01.019.
- [38] RODRIGUEZ J, ZOFFOLI J P. Effect of sulfur dioxide and modified atmosphere packaging on blueberry postharvest quality[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 117: 230-238. DOI:10.1016/j.postharvbio.2016.03.008.
- [39] TAHIR H E, ZOU X B, LI Z H, et al. Comprehensive evaluation of antioxidant properties and volatile compounds of sudanese honeys[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2015, 39(4): 349-359. DOI:10.1111/jfbc.12135.
- [40] ALI A, MAQBOOL M, ALDERSON P G, et al. Effect of gum Arabic as an edible coating on antioxidant capacity of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit during storage[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2013, 76: 119-124. DOI:10.1016/j.postharvbio.2012.09.011.
- [41] PARK S I, DAESCHEL M A, ZHAO Y. Functional properties of antimicrobial lysozyme-chitosan composite films[J]. *Journal of Food Science*, 2004, 69(8): 215-221. DOI:10.1111/j.1365-2621.2004.tb09890.x.
- [42] MOON K M, LEE B, CHO W K, et al. Swertiajaponin as an anti-browning and antioxidant flavonoid[J]. *Food Chemistry*, 2018, 252: 207-214. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.01.053.
- [43] MOSQUERA L H, MORAGA G, MARTÍNEZ-NAVARRETE N. Critical water activity and critical water content of freeze-dried strawberry powder as affected by maltodextrin and arabic gum[J]. *Food Research International*, 2012, 47(2): 201-206. DOI:10.1016/j.foodres.2011.05.019.
- [44] AYALA-ZAVALA J F, WANG S Y, WANG C Y, et al. Methyl jasmonate in conjunction with ethanol treatment increases antioxidant capacity, volatile compounds and postharvest life of strawberry fruit[J]. *European Food Research and Technology*, 2005, 221(6): 731-738. DOI:10.1007/s00217-005-0069-z.
- [45] ABUGOCH L, TAPIA C, PLASENCIA D, et al. Shelf-life of fresh blueberries coated with quinoa protein/chitosan/sunflower oil edible film[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2016, 96(2): 619-626. DOI:10.1002/jsfa.7132.