

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2024.02.013

闫兴梅, 董健羽, 郭娜, 等. 结冷胶-黑米花青素-二氧化钛复合膜在蓝莓涂膜保鲜中的应用研究[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(2): 106-113.

YAN X M, DONG J Y, GUO N, et al. Application of gellan gum-black rice anthocyanin-titanium dioxide composite film in the coating preservation of blueberry[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(2): 106-113.

结冷胶-黑米花青素-二氧化钛复合膜 在蓝莓涂膜保鲜中的应用研究

闫兴梅, 董健羽, 郭娜, 朱桂兰✉

(合肥师范学院 生物与食品工程学院, 安徽 合肥 230000)

摘要: 以结冷胶、黑米花青素、二氧化钛为原料制备了可食性复合膜液, 并利用复合膜液对蓝莓进行涂膜保鲜实验, 研究新型复合膜对蓝莓的保鲜效果。首先, 扫描电子显微镜发现结冷胶膜 (GG)、结冷胶-黑米花青素复合膜 (GG-BRA) 和结冷胶-黑米花青素-二氧化钛复合膜 (GG-BRA-TiO₂) 的横截面无明显裂缝、无分层现象, 傅里叶红外光谱进一步表明结冷胶可以通过非共价键与黑米花青素和二氧化钛进行相互作用。抑菌实验发现结冷胶-黑米花青素-二氧化钛复合膜 (GG-BRA-TiO₂) 具有良好的抑菌性, 其中对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌和面包酵母的抑菌圈分别为 4.14、2.77 和 3.55mm。其次, 利用复合膜液对蓝莓进行涂膜保鲜实验, 结果表明 GG-BRA 和 GG-BRA-TiO₂ 涂膜组能减缓蓝莓果实贮藏过程中的物理化学性质的变化速率, 其中 GG-BRA-TiO₂ 的延缓效果优于 GG-BRA。经贮藏 10 d, GG-BRA-TiO₂ 膜组的蓝莓失重率、硬度、花色苷、总酚、多酚氧化酶活力的下降分别较空白对照减少了 1.56%、23.69%、18.44%、12.71%、14.00%, 因此 GG-BRA-TiO₂ 复合膜可作为良好的涂膜保鲜材料应用于食品包装材料中。

关键词: 蓝莓; 涂膜保鲜; 结冷胶; 黑米花青素; 二氧化钛

中图分类号: TS255.3 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2024)02-0106-08

网络首发时间: 2024-03-05 18:53:05

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.ts.20240229.1913.002>

Application of Gellan Gum-black Rice Anthocyanin-titanium Dioxide Composite Film in the Coating Preservation of Blueberry

YAN Xing-mei, DONG Jian-yu, GUO Na, ZHU Gui-lan✉

(School of Biology and Food Engineering, Hefei Normal University, Hefei, Anhui 230000, China)

Abstract: An edible film using gellan gum, black rice anthocyanins, and titanium dioxide as raw materials were prepared. The effect of edible film on blueberries coating preservation was investigated. Firstly, scanning

收稿日期: 2023-08-17

基金项目: 安徽省高校自然科学基金研究项目(2022AH040288; 2022AH052147); 安徽省教学研究重点项目(2022jyxm1301); 安徽省绿色食品乡村振兴协同技术服务中心(GXXT-2023-041; GXXT-2022-078)

Supported by: Anhui Provincial University Natural Science Foundation Research Project (No. 2022AH040288; 2022AH052147); Teaching and Research Key Project of Anhui Province (No. 2022jyxm1301); Anhui Province Green Food Collaborative Technology Service Center for Rural Revitalization (No. GXXT-2023-041; GXXT-2022-078)

作者简介: 闫兴梅, 女, 2001 年出生, 在读本科生, 研究方向为食品科学。E-mail: 3516397851@qq.com

通讯作者: 朱桂兰, 女, 1980 年出生, 博士, 教授, 研究方向为碳水化合物资源开发与利用。E-mail: zhuguilan13@126.com

electron microscopy revealed that there were no obvious cracks or delamination in the cross sections of the gellan gum film (GG), gellan gum, and black rice anthocyanin, composite film (GG-BRA), and gellan gum, black rice anthocyanin, and titanium dioxide composite film (GG-BRA-TiO₂). Fourier transform infrared spectroscopy further showed that gellan gum was interacted with black rice anthocyanin and titanium dioxide through non covalent bond. The antibacterial experiment indicated that the GG-BRA-TiO₂ composite film had a good antibacterial activity, in which size of the antibacterial circle for *Staphylococcus aureus*, *E. coli* and bread's yeast were 4.14, 2.77 and 3.55 (mm), respectively. Secondly, the composite film was used for the preservation of blueberries. The results showed that the GG-BRA and GG-BRA-TiO₂ coating groups could slow down the rate of physicochemical properties changes during blueberry fruit storage. Among them, the preservation effect of GG-BRA-TiO₂ composite film was better than that of GG-BRA composite film. After 10 days of storage, the weight loss rate, hardness, anthocyanins, total phenols, and the activity of polyphenol oxidase were decreased by 1.56%, 23.69%, 18.44%, 12.71%, and 14.00% compared to the control group, respectively. Therefore, GG-BRA-TiO₂ composite film showed good water resistance and antibacterial properties and could be used as a promising coating and preservation material in food packaging.

Key words: blueberry; edible coating; gellan gum; black rice anthocyanin; titanium dioxide

蓝莓因其外观, 酸甜的口感和富含黄酮、单宁和花青素等多酚类营养物质而受到广大消费者的喜爱^[1]。然而蓝莓在高温的夏季成熟, 采摘后极易发生失水、变软、褐变甚至腐烂等不良变化, 严重限制了蓝莓产业的发展, 也是蓝莓保鲜领域需要解决的问题之一。

蓝莓的保鲜方法主要有化学保鲜、物理保鲜和生物保鲜三类。化学保鲜主要是使用防腐剂、杀虫剂等化学试剂来达到延长蓝莓储藏期, 具有成本低、效果好、操作简便等优点, 但化学成分不易降解, 容易对环境产生污染。物理保鲜是指用气调、低温、辐照等处理方式对蓝莓进行保鲜, 而我国蓝莓的保鲜以低温冷藏为主, 具有耗能大、储藏时间短、蓝莓口感不佳等缺点。生物保鲜是指从生物体内提取出某些具有杀菌、抑菌等作用的物质应用于食品保鲜或利用生物技术获得安全性高的保鲜剂, 主要有微生物保鲜和涂膜保鲜, 这是目前果蔬保鲜研究的热点。涂膜保鲜技术最大优点是食用膜材料在消费过程中可以和食品一起被食用, 不需要对其进行额外的处理, 不仅有效地节约了能源, 同时也避免了环境污染, 具有提高果蔬贮藏期品质、安全、可降解、成本低等优点^[2]。

多糖具有良好的成膜性、可降解性和可食性等优点, 所以多糖可以作为可食性膜的原料应用

于保鲜领域。但由于多糖膜机械强度低, 容易发生断裂, 可以向多糖中添加功能因子形成复合膜, 弥补这一缺陷。如 Sagawa^[3]等用硫酸软骨素与壳聚糖进行复配形成复合膜, 制备出一种可用于食品包装的新型复合膜, 其机械性能和阻隔性能都有所提高。结冷胶具有良好的成膜性, 但由于结冷胶膜脆性大, 容易发生断裂, 所以向结冷胶中添加黑米花青素和二氧化钛形成复合膜, 去弥补这一缺陷。黑米花青素具有较强的清除自由基和抗氧化能力, 可作为功能因子与多糖复配形成复合膜, 能有效提高复合膜的抗氧化功能活性^[4]。二氧化钛是一种可食用、抑菌性好的固体粉末, 与多糖复合成膜, 可降低水蒸气扩散速率, 提高复合膜结构的机械强度, 提高复合膜的抑菌性, 被认为是具有广泛应用潜力的食品添加剂^[5]。

为了开发一种可应用于食品工业的功能性多糖复合膜, 本研究将具有良好的抗氧化、抑菌活性的黑米花青素和二氧化钛与结冷胶复配形成可食性复合膜, 并分析了黑米花青素、二氧化钛对复合膜性能、抑菌性的影响。其次用复合膜液对蓝莓进行涂膜保鲜实验, 测试了复合膜对蓝莓的保鲜效果。目前没有研究报道结冷胶-黑米花青素-二氧化钛复合膜的性能及其在蓝莓保鲜中的应用, 故本论文可以为黑米花青素、二氧化钛在多糖复合膜的研究提供参考。同时复合膜能有有效的

维持蓝莓果实品质, 延长货架期, 也为我国蓝莓产业的健康发展提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 实验材料

结冷胶(食品级): 河南安锐生物科技有限公司; 25%黑米花青素(食品级): 河南奇泓生物科技有限公司; 金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、面包酵母: 安徽合肥师范学院生命科学院微生物实验室; 秘鲁蓝莓(14mm+): 安徽蓝莓工程技术研究中心; 甘油: 济南泰旺化工; 二氧化钛: 广东翁江化学试剂有限公司。

1.2 实验设备

150×0.01 mm 型游标卡尺: 上海量刃工具有限公司; TA-XTplus 型物性测试仪: 英国 Stable Micro Systems 公司; 傅里叶变换红外光谱仪: 美国 ThermoNicolet 公司; 扫描电子显微镜: 德国卡尔·蔡司股份公司; UV1800 紫外分光光度计: 日本岛津公司; 冷冻离心机: 美国 ThermoElectronLED 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 复合膜的制备

取 1.5 g 的结冷胶于 100 mL 的蒸馏水中, 配制 1.5% 的结冷胶溶液, 添加 0.5 g 的甘油混合均匀作为结冷胶膜液; 向结冷胶膜液添加 0.5 g 的黑米花青素, 作为结冷胶-黑米花青素复合膜液; 向结冷胶-黑米花青素复合膜液添加 0.5 g 的二氧化钛, 作为结冷胶-黑米花青素-二氧化钛复合膜液。将制备好的复合膜液均匀铺在 PAI 塑料模板上, 置于 45 °C 的电热鼓风干燥箱中干燥 24 h, 置于含饱和硝酸镁溶液的平衡器内平衡 48 h。

1.3.2 复合膜的性能测定

1.3.2.1 傅里叶红外光谱扫描 将结冷胶膜(GG)、结冷胶-黑米花青素复合膜(GG-BRA)和结冷胶-黑米花青素-二氧化钛复合膜(GG-BRA-TiO₂)于 900~4 000 cm⁻¹ 的波长范围内进行扫描, 扫描的速率为 4 cm⁻¹, 利用 origin 作图分析^[6]。

1.3.2.2 扫描电子显微镜 用扫描电镜在 20 kV 加速电压下放大 2 000 倍, 观测 GG、GG-BRA 和 GG-BRA-TiO₂ 表面形态。

1.3.2.3 抑菌性 将菌种金黄色葡萄球菌和大肠

杆菌分别加入牛肉膏蛋白胨液体培养基, 面包酵母加入马铃薯蔗糖液体培养基中, 置于 37 °C、200 r/min 的摇床中进行菌种活化 15 h。在无菌操作台上, 吸取 100 uL 已活化过的液体菌种于固体培养基中, 均匀涂抹, 将样品膜裁剪成直径为 6 mm 的小圆圈, 置于上述培养皿中央, 于 37 °C 条件下培养 48 h, 用游标卡尺对抑菌圈宽度进行测量, 用公式(1)对抑菌圈宽度进行计算。

$$D = \frac{D_1 - D_2}{2} \quad \text{式(1)}$$

式中: D: 抑菌圈宽度, mm; D₁: 抑菌圈外径, mm; D₂: 抗菌膜直径, mm。

1.3.3 复合膜涂膜保鲜蓝莓实验

1.3.3.1 涂膜 挑选大小均匀, 成熟度一致的蓝莓 80 颗平均分成四组, 将第一组(T₁)的蓝莓分别浸入结冷胶膜液中 30 s, 放于不锈钢筛网上, 在 28 °C 的室温下风干 30 min; 将第二组(T₂)、第三组(T₃)蓝莓分别置于结冷胶-黑米花青素复合膜液、结冷胶-黑米花青素-二氧化钛复合膜液中, 参照第一组蓝莓进行涂膜风干; 第四组(CK)蓝莓不作涂膜处理作为空白对照。之后将四组蓝莓放在 28 °C 室温进行储藏, 储藏期为 10 d, 每 2 d 测试一次, 每次重复三遍取平均值。

1.3.3.2 蓝莓储藏期理化性质测定 感官评价: 记录蓝莓储藏期间的图片, 观察果实饱满程度。失重率: 测定数据, 根据公式(2)进行计算

$$A = \frac{m_0 - m_t}{m_0} \quad \text{式(2)}$$

式中: A: 失重率, %; m₀: 贮藏前质量, g; m_t: 贮藏后测定质量, g。硬度测定: 参考 Bejaei^[7] 等的方法, 采用质构仪测定蓝莓硬度。花色苷测定: 参考邹小波^[2] 等的方法, 采用 pH 示差法测定蓝莓中的花色苷含量。总酚测定: 参考 Enny^[8] 等的方法, 采用比色法测定。多酚氧化酶活力测定参考王世敏^[9] 等的方法, 采用福林酚法测定。

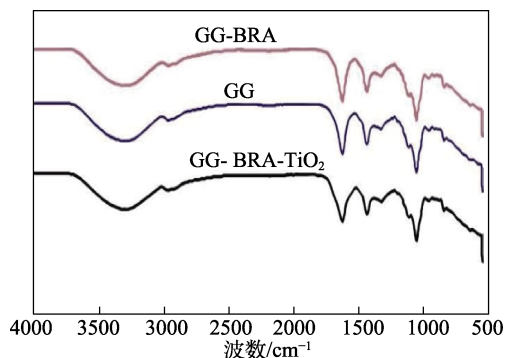
2 结果与分析

2.1 复合膜性能

2.1.1 复合膜的红外光谱

如图 1 所示, 结冷胶膜在 1 600 cm⁻¹ 和 1 410 cm⁻¹ 处有 2 条特征条带, 分别属于羧基的不对称拉伸

峰和对称拉伸峰^[10]。此特征峰在结冷胶-黑米花青素-二氧化钛复合膜 (GG-BRA-TiO₂) 中分别偏移至 1 590 cm⁻¹ 处和 1 408 cm⁻¹, 分析原因可能是结冷胶与二氧化钛和黑米花青素产生了分子间作用力^[4]。Zhang^[11]等把二氧化钛添加入壳聚糖-黑李子皮花青素中形成复合膜, 与未添加二氧化钛的复合膜红外光谱相比, 羟基吸收峰位置也发生了紫移, 本实验结果与其类似。



注: GG: 结冷胶膜; GG-BRA: 结冷胶-黑米花青素复合膜; GG-BRA-TiO₂: 结冷胶-黑米花青素-二氧化钛复合膜, 下同。

Note: GG: Cold glue film; GG-BRA: Cold gel-black rice anthocyanin composite film; GG-BRA-TiO₂: Cold gel-black rice anthocyanins-titanium dioxide composite film. Same as below.

图 1 复合膜的红外光谱

Fig.1 Fourier transform infrared spectrum of composite films

2.1.2 复合膜的扫描电镜

如图 2 所示, 结冷胶膜 (GG) 和结冷胶-黑米花青素复合膜 (GG-BRA) 的横截面光滑平坦、连续均匀, 结果表明, 黑米花青素能很好的分布在结冷胶基质中。结冷胶膜和结冷胶-黑米花青素-二氧化钛复合膜 (GG-BRA-TiO₂) 表面衔接良好、无明显裂缝、无分层现象, 但会出现微小颗粒凸起, 分析原因可能是二氧化钛的添加导致颗粒自团聚^[12]。研究结果表明黑米花青素和二氧化钛能较好的溶于结冷胶基质中。

2.1.3 复合膜抑菌性

评估结冷胶复合膜的抗菌活性, 是探究复合膜活性包装的重要一步^[13]。如表 1 所示, 结冷胶膜 (GG) 无抑菌性, 结冷胶-黑米花青素复合膜 (GG-BRA)、结冷胶-黑米花青素-二氧化钛复合膜 (GG-BRA-TiO₂) 都有一定的抑菌性, 但是结冷胶-黑米花青素复合膜 (GG-BRA) 抑菌圈较小, 抑菌性较弱。结冷胶-黑米花青素-二氧化钛复合膜 (GG-BRA-TiO₂) 抑菌圈较大, 抑菌效果最好。实验结果表明, 二氧化钛对微生物具有明显的抑菌效果。

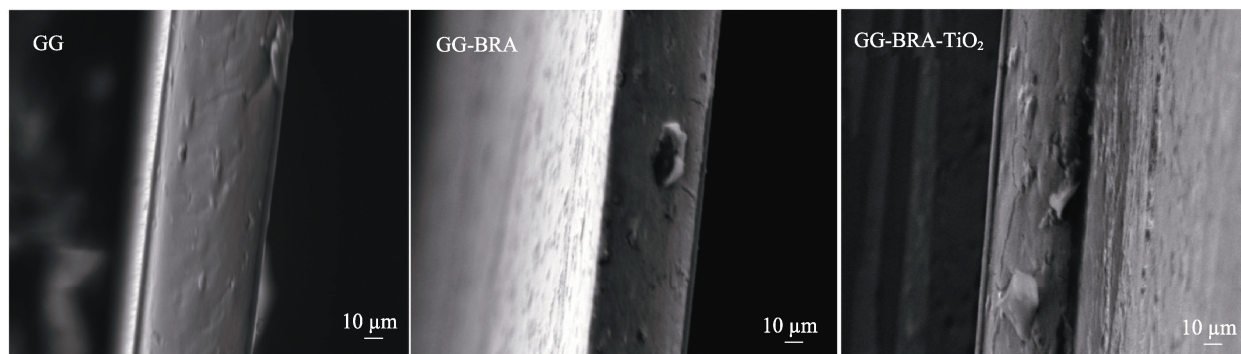


图 2 复合膜的扫描电镜

Fig.2 SEM of composite films

同时, 表 1 还显示, 结冷胶-黑米花青素-二氧化钛复合膜 (GG-BRA-TiO₂) 对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌以及面包酵母 3 种菌的抑菌效果不同。研究表明, 其对革兰氏阳性菌的抑菌效果要强于革兰氏阴性菌和真菌的抑菌效果。Xing^[14]等报道了二氧化钛-壳聚糖复合膜对微生物的抑制作用, 本实验研究结果与其相似。分析原因可能是由于

不同菌的细胞壁组成以及生理活性不同, 且黑米花青素和二氧化钛与结冷胶的相互作用能增加微生物细胞膜的通透性, 使得复合膜的抗菌活性增强^[15]。通过研究结冷胶复合膜对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌以及面包酵母的抗菌性能, 表明结冷胶-黑米花青素-二氧化钛复合膜 (GG-BRA-TiO₂) 具有作为抗菌包装膜的潜力。

表 1 复合膜抑菌性
Table 1 Antibacterial properties of composite films

菌种名称	复合膜名称	抑菌圈直径/mm
金黄色葡萄球菌	GG	0±0.01 ^a
	GG-BRA	0.99±0.57 ^b
	GG-BRA-TiO ₂	4.14±0.27 ^c
大肠杆菌	GG	0±0.02 ^a
	GG-BRA	0.47±0.425 ^b
	GG-BRA-TiO ₂	2.77±0.67 ^c
面包酵母	GG	0±0.01 ^a
	GG-BRA	0.35±0.13 ^b
	GG-BRA-TiO ₂	3.55±0.82 ^c

注：同列不同上标字母表示相关性差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different letters of the shoulder mark in the same column numbers indicate the significance of the difference in the correlation analysis ($P<0.05$).

2.2 复合膜涂膜保鲜对蓝莓品质的影响

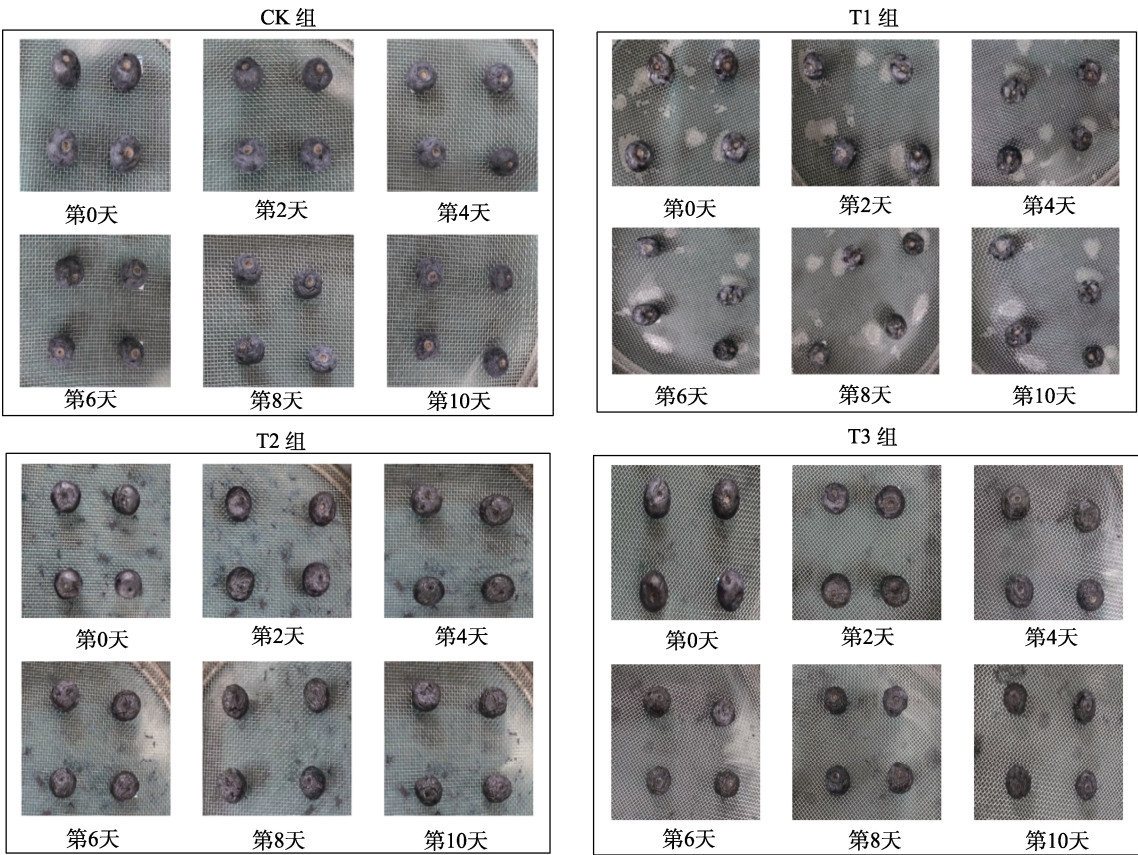
2.2.1 感官评价

如图 3 所示，在贮藏初期，蓝莓果实饱满，色泽良好，随着时间的推移，蓝莓呈现皱缩、腐烂等现象。结冷胶组（T1）蓝莓皱缩、腐烂率大，因为结冷胶单层膜没有较好的阻水性和抑菌性。

结冷胶-黑米花青素（T2）和结冷胶-黑米花青素-二氧化钛（T3）与对照组（CK）相比，蓝莓果实更饱满，腐烂率更小，分析原因可能是因为两者有更好的水蒸气阻隔性和抑菌性，延缓了蓝莓果实水蒸气的扩散速率，抑制了微生物的繁殖，延缓了蓝莓果实的腐烂^[5]。

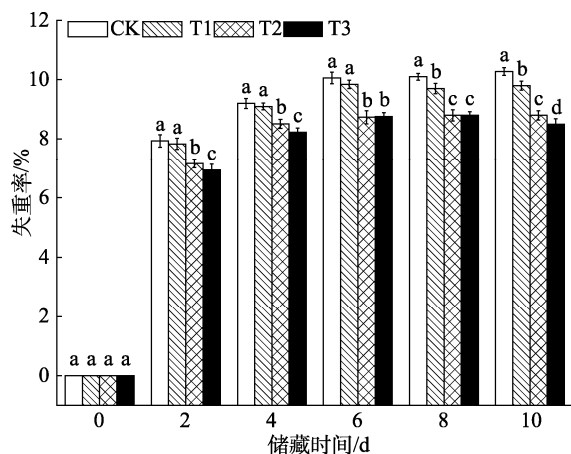
2.2.2 失重率

果实的质量损失率反映果实的商品价值，质量损失率越大，表明果实的水分和营养成分流失越多，即保鲜效果越差^[16]。由图 4 可以看出，随着贮藏时间增加，蓝莓果实失重率整体呈现上升趋势。结冷胶-黑米花青素膜组（T2）、结冷胶-黑米花青素-二氧化钛膜组（T3）的蓝莓失重率比对照组（CK）要低（ $P<0.05$ ），且随着时间的增加，质量损失的差距逐渐变大。在第 4 d 结冷胶-黑米花青素-二氧化钛膜组（T3）蓝莓果实的失重率为 $8.22\%\pm0.15\%$ ，对照组（CK）蓝莓失重率为 $9.2\%\pm0.17\%$ ，具有极显著的差别（ $P<0.01$ ）。



注：CK：空白对照；T1：结冷胶膜；T2：结冷胶-黑米花青素复合膜；T3：结冷胶-黑米花青素-二氧化钛复合膜，下同。
Note: CK: placebo-treated group; T1: Cold glue film; T2: Cold gel-black rice anthocyanin composite film; T3: Cold gel-black rice anthocyanins-titanium dioxide composite film. Same as below.

图 3 贮藏期间蓝莓外观的变化情况
Fig.3 The appearance of blueberries during storage



注：标注字母表示同一贮藏时间不同处理之间的差异显著性，字母相同差异不显著，字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: The marked letters indicate the significance of differences between different treatments for the same storage time, no significant differences, and different letters indicate significant differences ($P < 0.05$). The figure below is the same.

图 4 蓝莓贮藏期间失重率的变化

Fig.4 The weight loss rate of blueberries during storage

从总体来看，结冷胶-黑米花青素-二氧化钛膜组 (T3) 的蓝莓失重率要低于结冷胶膜组 (T1)、结冷胶-黑米花青素膜组 (T2) ($P < 0.05$)。这是因为多糖复合膜对水蒸气扩散有阻碍作用，且二氧化钛可以增加这种阻隔的能力，当水蒸气透过薄膜时，先在湿度较高的一面吸收水蒸气，然后水分子在膜基体组织中扩散传递到另一面挥发出去，二氧化钛和多糖作用，一方面削弱了复合膜吸收水蒸气的能力，另一方面加强了复合膜结构的完整致密程度，降低了水蒸气分子在薄膜中的扩散系数^[17]。

2.2.3 硬度

硬度是一个反映蓝莓品质的重要物理指标，硬度越大，说明果实的成熟度较低，可贮藏的时间越长，保鲜效果越好。如图 5 所示，随着贮藏时间的延长，蓝莓果实的硬度总体呈下降趋势。从第 2 d 开始，结冷胶膜组 (T1)、结冷胶-黑米花青素膜组 (T2)、结冷胶-黑米花青素-二氧化钛膜组 (T3) 的蓝莓硬度显著高于对照组 (CK) ($P < 0.05$)。其中结冷胶-黑米花青素-二氧化钛膜组 (T3) 的蓝莓硬度最高。Abugo^[18]等分析认为水分消耗是蓝莓采后硬度降低的重要原因。而涂膜组在蓝莓果实表面附着了一层薄膜，很好地降低了水分的蒸发，且复合膜的效果更为明显。

Xing^[14]等用壳聚糖-纳米 TiO_2 复合膜对储藏期间蓝莓进行涂膜保鲜，处理组蓝莓果实硬度变化与本实验的结果相似。

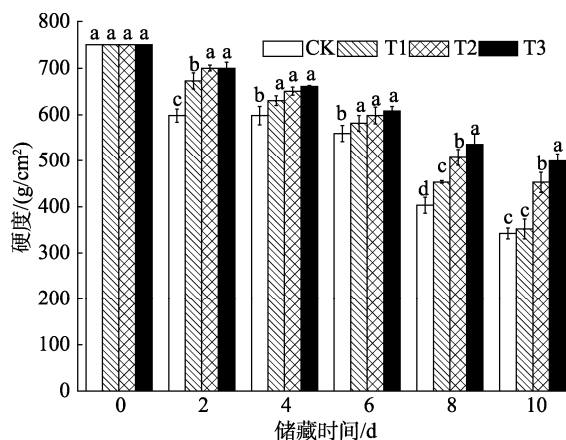


图 5 蓝莓贮藏期间硬度的变化

Fig.5 Hardness of blueberry during storage

2.2.4 花色苷

蓝莓果实在成熟的过程中花色苷含量会不断增加，所以花色苷含量变化可以间接反映果实的成熟程度^[19]。由图 6 可以看出，花色苷含量整体呈先上升后下降的趋势。具体来说，花色苷含量从贮藏第 2 d 开始增加，到第 8 d 是达到峰值。在蓝莓贮藏过程中，刚开始花色苷的降解速度小于合成速度，所以，整体花色苷含量上升，到蓝莓成熟后期后，花色苷的降解速度大于合成速度，因此整体花色苷含量下降^[20]。结冷胶-黑米花青素膜组 (T2) 和结冷胶-黑米花青素-二氧化钛膜组 (T3) 的变化趋势较缓慢，显示良好的保鲜效果 ($P < 0.05$)，这说明这两组处理具有一定的延缓蓝

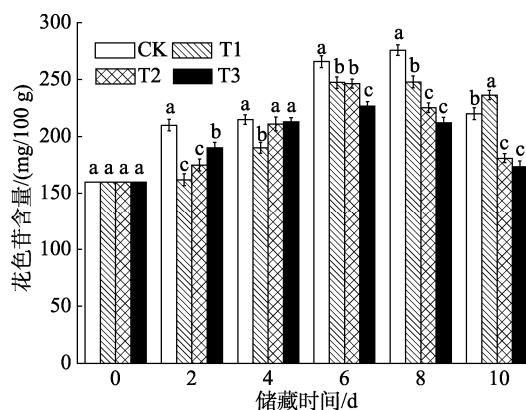


图 6 蓝莓贮藏期间花色苷含量的变化

Fig.6 The anthocyanin content of blueberry during storage

莓衰老的作用。Zhou^[21]等用壳聚糖-菊芋复合膜对蓝莓进行涂膜保鲜, 蓝莓的花色苷变化趋势与本实验结果相似。

2.2.5 总酚

蓝莓的抗氧化能力可以根据总酚含量来反映, 一般总酚含量越高, 抗氧化能力就越强^[22]。如图 7 所示, 总酚含量总体呈下降趋势。结冷胶膜组 (T1)、结冷胶-黑米花青素膜组 (T2) 和结冷胶-黑米花青素-二氧化钛膜组 (T3) 蓝莓的总酚含量均高于对照组 (CK) ($P<0.05$)。在储藏第 4 d 结冷胶-黑米花青素膜组 (T2) 和结冷胶-黑米花青素-二氧化钛膜组 (T3) 蓝莓的总酚含量比对照组 (CK) 高很多 ($P<0.01$)。白宇皓^[23]等研究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多酚氧化酶的底物被消耗, 因此, 结冷胶-黑米花青素膜组 (T2)、结冷胶-黑米花青素-二氧化钛膜组 (T3) 蓝莓有较高的总酚含量可能是归因于复合膜中添加的黑米花青素、二氧化钛有效地抑制了多酚氧化酶活力, 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。

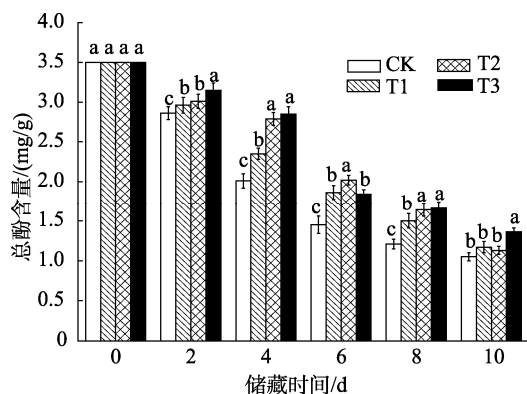


图 7 蓝莓贮藏期间总酚含量的变化

Fig.7 The total phenol content in blueberry during storage

2.2.6 多酚氧化酶

多酚氧化酶对蓝莓储藏有负面作用, 它会引起蓝莓果实发生褐变, 造成变质和腐烂, 降低蓝莓的营养价值。由图 8 可以看出, 随着储藏时间的增加, 多酚氧化酶活力呈现先上升后下降的趋势, 在第 6 d 多酚氧化酶的活性达到了峰值, 三组处理组的多酚氧化酶活性比对照组 (CK) 要低 ($P<0.05$)。在 6~10 d, 多酚氧化酶的活性明显受

到抑制, 其中结冷胶-黑米花青素膜组 (T2)、结冷胶-黑米花青素-二氧化钛膜组 (T3) 蓝莓的多酚氧化酶活性与对照组产生了极显著的差别 ($P<0.01$)。分析原因, 结冷胶膜 (GG)、结冷胶-黑米花青素复合膜 (GG-BRA)、结冷胶-黑米花青素-二氧化钛复合膜 (GG-BRA-TiO₂), 有效的阻隔了蓝莓与外界氧气的接触, 多酚氧化酶的活性被抑制, 延缓了蓝莓的褐变速率^[24]。

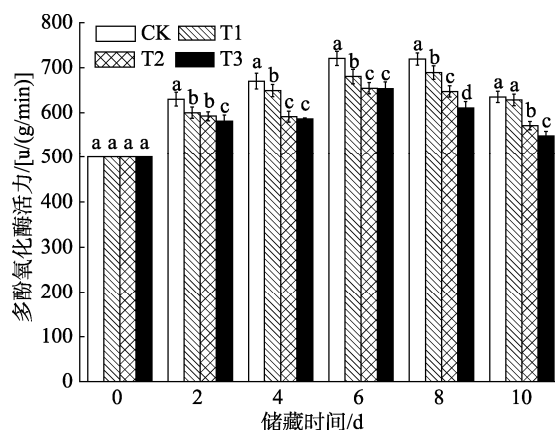


图 8 蓝莓贮藏期间多酚氧化酶活力的变化

Fig.8 The polyphenol oxidase activity of blueberries during storage

3 结论

扫描电子显微镜表明结冷胶-黑米花青素-二氧化钛复合膜 (GG-BRA-TiO₂) 表面衔接良好、无明显裂缝、无分层现象, 傅里叶红外光谱表明结冷胶、黑米花青素和二氧化钛产生分子间作用力, 这表明结冷胶、黑米花青素、二氧化钛 3 种成分相容性良好, 具备良好成膜性能。通过复合膜的抑菌实验发现, 结冷胶-黑米花青素-二氧化钛复合膜 (GG-BRA-TiO₂) 复合膜抑菌性良好, 并且结冷胶-黑米花青素-二氧化钛复合膜 (GG-BRA-TiO₂) 对革兰氏阳性菌的抑菌效果强于革兰氏阴性菌和真菌, 这与以往学者的研究相符合, 表明二氧化钛具备良好的抑菌活性。

蓝莓的涂膜保鲜实验表明结冷胶-黑米花青素-二氧化钛复合膜 (GG-BRA-TiO₂) 具有一定的抑菌性和阻水性, 延长了蓝莓的腐烂时间, 且储藏期间蓝莓的总酚下降速率明显被抑制, 说明复合膜具有良好的抗氧化性。同时结冷胶-黑米花青素-二氧化钛复合膜 (GG-BRA-TiO₂) 延缓失重率、

硬度、花色苷下降速率,抑制多酚氧化酶的活性,提高了蓝莓贮藏期间的品质,有效延长了蓝莓的贮藏期。本研究可为蓝莓新型保鲜技术奠定基础,有利于蓝莓产业发展。

参考文献:

- [1] JUNG Y, KWAK I, LEE S, et al. Influence of production systems on phenolic characteristics and antioxidant capacity of highbush blueberry cultivars[J]. *Journal of food*, 2021, 86(7): 2949-2961.
- [2] 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.
ZOU X, YANG Z, SHI J, 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.
- [3] SAGAWA T, NIKAIIDO Y, IJIMA K. Preparation of mechanically anisotropic polysaccharide composite films using roll-press techniques[J]. *ACS omega*, 2023, 8(6): 5607-5616.
- [4] 郭娜, 朱桂兰, 张方艳, 等. 结冷胶-沙蒿胶-蓝莓花青素可食性膜的制备及其性能分析[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(1): 172-176.
GUO N, ZHU G, ZHANG F, et al. Preparation and characteristics analysis of gellan gum-Artemisia sphaerocephala Krasch gum-blueberry anthocyanin edible film[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(1): 172-176.
- [5] AKHTER P, ARSHAD A, SALEEM A. Development in non-metal-doped titanium dioxide photocatalysts for different dyes degradation and the study of their strategic factors: a review[J]. *Catalysts*, 2022, 12(11): 1331-1335.
- [6] BARBOSA A I, COSTA, YOUSEF I. Evaluating the skin interactions and permeation of alginate/fucoidan hydrogels per se and associated with different essential oils[J]. *Pharmaceutics*, 2023, 15(1): 190-193.
- [7] BEJAEI M, STANICH K, CLIFF M A. Modelling and classification of apple textural attributes using sensory, instrumental and compositional analyses[J]. *Foods*, 2021, 10(2): 384-384.
- [8] ENNY F, DEWI K, IFAN B H, et al. Determination of total phenol, total flavonoids and antioxidant activity of ethanol extract of moringa leaves (moringa oleifera lam)[J]. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, 2020, 23(8): 290-294.
- [9] 王世敏, 刘健君, 程金朋, 等. 西南凉爽高地不同品种马铃薯多酚氧化酶学特性及其抑制剂的研究[J]. *中国食品添加剂*, 2021, 32(8): 101-106.
WANG S, LIU J, CHEN J, et al. Study on the enzymatic characteristics and inhibitors of polyphenol oxidase from different potato varieties in cold highland of Southwest China[J]. *China Food Additives*, 2021, 32(8): 101-106.
- [10] 李宏雨, 施旭, 詹晓北, 等. 毕赤酵母发酵耦合多糖酶解一步法制备结冷胶寡糖[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 11(8): 1-8.
LI H, SHI X, ZHAN X, et al. Dicyl oligosaccharides were prepared by one-step lysis of Pichia yeast[J]. *Food and fermentation industry*, 2023, 11(8): 1-8.
- [11] ZHANG X, LIU Y, YONG H, et al. Development of multifunctional food packaging films based on chitosan, TiO₂ nanoparticles and anthocyanin-rich black plum peel extract[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 94(3): 80-92.
- [12] VLAD B T, HAMCIUC C, RÎMBU C M, et al. Fabrication of poly(vinyl alcohol)/chitosan composite films strengthened with titanium dioxide and polyphosphonate additives for packaging applications[J]. *Gels*, 2022, 8(8): 450-474.
- [13] SRIVASTAVA V, SINGH S, DAS D. Rice husk fiber-reinforced starch antimicrobial biocomposite film for active food packaging[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 421.
- [14] XING Y, YANG S, XU Q, et al. Effect of Chitosan/Nano-TiO₂ composite coating on the postharvest quality of blueberry fruit[J]. *Coatings*, 2021, 11(5): 512.
- [15] VENU S S, PAROLA A, THAYUMANI V, et al. Efficient nitrate reduction in water using an integrated photocatalyst adsorbent based on chitosan-titanium dioxide nanocomposite[J]. *Environmental science and pollution research international*, 2022, 30(13): 14-30.
- [16] 孟晓曼, 孙亚男, 程儒杨, 等. 低压静电场-真空协同保鲜对白玉菇采后品质和抗氧化代谢的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(23): 72-81.
MENG X, SUN Y, CHENG R, et al. Effect of low-voltage electrostatic field-assisted vacuum storage on postharvest quality and antioxidant metabolism of white hysizygus marmoreus[J]. *Food Science*, 2022, 43(23): 72-81.
- [17] 高奇奇, 郝艳玲. 玉米淀粉/TiO₂ 纳米复合薄膜制备与性能[J]. *中国塑料*, 2023, 37(2): 45-50.
GAO Q, HAO Y. Preparation and performance of corn starch/TiO₂ nanocomposite films[J]. *China Plastics*, 2023, 37(2): 45-50.
- [18] ABUGOCH L, TAPLA A 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.
- [19] MAGRI A, PETRICCIONE M. Melatonin treatment reduces qualitative decay and improves antioxidant system in highbush blueberry fruit during cold storage[J]. *Journal of the science of food and agriculture*, 2022, 102(10): 9.
- [20] ANA C G, ANA R N, SARA M, et al. Exploring the antioxidant, antidiabetic, and antimicrobial capacity of phenolics from blueberries and sweet cherries[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(10).
- [21] ZHOU X, LIU L, LI J, et al. Extraction and characterization of cellulose from jerusalem artichoke residue and its application in blueberry preservation[J]. *Foods*, 2022, 11(8): 385.
- [22] ARKSI, DAESCHEL M. ZHO Y. Functional properties of antimicrobial lysozyme-chitosan composite films[J]. *Journal of Food Science*, 2004, 69(8): 215-221.
- [23] 白宇皓, 李超, 杨志国, 等. 梨多酚氧化酶特性与酶促褐变抑制研究进展[J]. *食品科技*, 2022, 47(2): 75-81.
BAI Y, LI C, YANG L, et al. Research progress on polyphenol oxidase characteristics and inhibition of enzymatic browning in pea-r[J]. *Food technology*, 2022, 47(2): 75-81.
- [24] LI Y, SUN Y, BAI J, et al. Catechol detection based on a two-dimensional copper-based metal-organic framework with high polyp henol oxidase activity[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2023, 51(2): 24-30. ㉞

备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。