

含花青素双层指示薄膜的贮藏稳定性

Storage stability of bilayer indicator films containing anthocyanin

王文艳¹ 周希^{2,3} 魏贞¹ 喻惜珍^{2,3} 熊国远^{2,3}

WANG Wen-yan¹ ZHOU Xi^{2,3} WEI Zhen¹ YU Xi-zheng^{2,3} XIONG Guo-yuan^{2,3}

(1. 河南农业职业学院食品工程学院, 河南 郑州 451450; 2. 安徽农业大学茶与食品科技学院, 安徽 合肥 230036; 3. 安徽省农产品加工工程实验室, 安徽 合肥 230036)

(1. School of Food Engineering, Henan Vocational College of Agriculture, Zhengzhou, Henan 451450, China; 2. School of Tea and Food Science & Technology, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230036, China; 3. Anhui Engineering Laboratory for Agro-products Processing, Hefei, Anhui 230036, China)

摘要:目的:探索花青素指示薄膜的最佳贮藏条件。方法:以含花青素的双层指示薄膜为研究对象,测定其在不同贮藏时间(0,7,14,21,28,35 d)和温度(25,4,-18 °C)下的机械性能(抗拉强度和断裂伸长率)、厚度、颜色和抗氧化性能(总酚含量、DPPH 自由基清除能力和 ABTS 自由基清除能力)。结果:指示薄膜的厚度总体稳定保持在 0.15 mm 左右,-18 °C 条件下贮藏的薄膜颜色变化最小。抗氧化活性试验表明,25 °C 贮藏的指示薄膜比 4 °C 和 -18 °C 贮藏的抗氧化活性更高,尤其是清除 DPPH 自由基能力。结论:含花青素双层指示薄膜的最佳贮藏温度为 25 °C,最佳贮藏时间为 28 d。

关键词:魔芋葡甘聚糖;山茶油;花青素;贮藏温度;稳定性;指示膜

Abstract: Objective: This study aimed to investigate the best storage conditions for anthocyanin indicator films. Methods: The double-layer indicator films containing anthocyanins were investigated. The mechanical properties (tensile strength and elongation at break), thickness, color and antioxidant properties (DPPH free radical scavenging ability, total phenol content and ABTS free radical scavenging ability) of double-layer indicator films containing anthocyanins were determined at different storage time (0, 7, 14, 21, 28 and 35 d) and temperature (25, 4 and -18 °C). Results: The results showed that the thickness of the indicator films was generally maintained at about 0.15 mm, and the color change of the film stored at -18 °C was the smallest.

基金项目:河南农业职业学院科技创新人才项目(编号:HNACS-RHR-2021-10);安徽省科技重大专项项目(编号:202203a06020006)

作者简介:王文艳,女,河南农业职业学院副教授,硕士。

通信作者:熊国远(1975—),男,安徽农业大学教授,博士。

E-mail: guoyuanx@ahau.edu.cn

收稿日期:2022-05-08 **改回日期:**2022-08-04

The antioxidant activities of the films stored at 25 °C were higher than those stored at 4 and -18 °C, especially the DPPH free radical scavenging ability was the highest. **Conclusion:** The optimal storage temperature of the film is 25 °C, and the optimal storage time is 28 d.

Keywords: konjac glucomannan; camellia oil; anthocyanins; storage temperature; storage stability; indicator films

近年来,天然色素指示薄膜常用来检测食品的新鲜度,其作用机制是食品在由新鲜到腐败的过程中,微生物和蛋白氧化会释放出胺类物质,造成食品包装内的环境呈碱性,具有 pH 响应性的天然色素会产生可见的颜色变化,以此判断食品新鲜程度^[1-2]。该方法具有低成本、实时、可生物降解和方便安全等优点^[3]。目前,具有 pH 响应性的天然色素主要来源于植物提取物,如花青素^[4]、红萝卜提取物^[5]、姜黄素^[6]和马黛茶提取物^[7]等。但从植物中分离获取的花青素极不稳定,容易受温度、pH、光、氧气、酶和金属离子的影响,从而发生降解。因此,如何提高天然色素在薄膜基质中的稳定性是亟待解决的问题。Bakowska 等^[8]发现,紫外线对花青素稳定性的影响要大于高温和贮藏时间。Zhai 等^[9]采用含有 TiO₂ 的吉兰糖胶基的光阻隔层(外层)来保护由琼脂和花青素制成的指示层(内层)。He 等^[10]将玉米醇溶蛋白薄膜和指示薄膜复合,制备出高疏水性和高机械性能的双层指示膜。Zhou 等^[11]以卡拉胶基质作为内层,花青素、姜黄素和花青素-姜黄素(1:1)为指示剂,魔芋葡甘聚糖和山茶油作为疏水保护外层,制备指示薄膜并测定各薄膜的理化性能,结果表明疏水保护层的嵌入显著改善了指示薄膜的疏水性和抗紫外性能。上述研究均缺乏对指示薄膜贮藏稳定性的研究。

研究拟以卡拉胶为基质,花青素为指示层,魔芋葡甘

聚糖和山茶油混合而成的乳化层作为疏水外层,通过浇铸的方法制备双层指示薄膜,测定指示薄膜在室温、冷藏和冷冻条件下贮藏 35 d 的抗氧化性能、厚度、机械性能和水分等指标,评价该指示薄膜的贮存稳定性,以期为花青素指示薄膜的商业化应用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料与试剂

越橘花青素:纯度 35%,西安百川生物科技有限公司;

姜黄素:纯度 95%,北京索莱宝科技公司;

魔芋葡甘聚糖、 κ -卡拉胶:合肥博美生物科技有限公司;

山茶油:江西宝林天然香料有限公司;

甘油:西陇科学股份有限公司;

吐温 80、聚苯乙烯培养皿和无水硅胶:上海源叶生物科技有限公司;

其余试剂:分析纯,国药集团试剂有限公司。

1.2 试验设备

分析电子天平:JA503 型,常州幸运电子设备有限公司;

超声波细胞破碎仪:JY92-IIN 型,宁波新芝生物科技股份有限公司;

高速分散器:IKA 型,德国 IKA 科技有限公司;

智能薄膜拉伸力学试验仪:XLW 型,济南兰光光电技术有限公司;

全自动手持色差计:CR-400 型,上海沪粤明科学仪器有限公司;

紫外分光光度计:PE-Lambda 型,美国 PE 仪器有限公司。

1.3 花青素指示膜的制备与处理

参照文献[11]的方法制备出花青素指示膜,将双层指示膜放置在 25℃环境中干燥 72 h 后待测。将干燥后的花青素指示膜分别置于 25,4,-18℃下贮藏,每隔 1 周(0,7,14,21,28,35 d)取样在室温下平衡 6 h 后测定厚度、机械强度、色差和抗氧化性能等指标。

1.4 理化指标测量

1.4.1 机械性能 参考 Ruan 等[12]的方法并稍作修改。将花青素指示膜裁剪为 8 cm×2 cm 的矩形,使用薄膜拉伸仪测量断裂伸长率(EAB),初始夹具之间的距离设置为 60 mm,以 50 mm/min 的拉伸速度进行试验测量抗拉强度(TS)。

1.4.2 厚度 利用精度为 0.001 mm 的螺旋测微器进行测定,在每片薄膜上随机选取 5 个点进行测量。

1.4.3 薄膜颜色 使用色差计测量花青素指示膜的 L^* (亮度)、 a^* (+,红色;- ,绿色)和 b^* (+,黄色;- ,蓝色)。使用标准白板($L_0^*=92.91$; $a_0^*=-0.51$; $b_0^*=$

5.52)进行校准,在测量过程中,将指示膜内层朝上,放置在白板上,以标准白板为测量背景。随机选取指示膜上的 5 个点进行测量。

1.4.4 抗氧化性能

(1) 总酚含量测定:称取 25 mg 薄膜加入到 3 mL 乙醇溶液中混合均匀后得到提取液。总酚含量的测定参考 Balqis 等[13]的方法进行。量取 0.3 mL 提取液,加入 2.5 mL 福林酚试剂(体积分数 10%),再加入 2 mL 7.5 g/mL 碳酸钠溶液,50℃水浴 5 min 后于 600 nm 处测量吸光度值。用没食子酸溶液(0~1 000 mg/L)绘制标准曲线。结果以每克薄膜的微克没食子酸当量(GAE)表示。

(2) DPPH 自由基清除率测定:参照 Adilah 等[14]的方法。量取 3 mL 提取液并加入 1 mL 0.1 mmol/L 的 DPPH 溶液后混合均匀并在黑暗处室温静置 30 min。测量混合液和以未加提取液的 DPPH 溶液在 517 nm 处的吸光度值。DPPH 自由基清除率按式(1)计算:

$$S = \frac{A_2 - A_1}{A_2} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

S——DPPH 自由基清除率,%;

A_1 ——加入提取液的 DPPH 溶液的吸光度值;

A_2 ——未加提取液的 DPPH 溶液的吸光度值。

(3) ABTS 自由基清除率测定:参照文献[14]并略作修改。将 7 mmol/L ABTS 溶液与 2.45 mmol/L 过硫酸钾溶液以体积比 1:1 混合并静置 16 h。将所得混合液用乙醇稀释直至其在 734 nm 处的吸光度值在 0.70±0.02。同时,将 40 mL 薄膜乙醇提取液加入到 3 960 mL 稀释液中后静置 6 min,测定其在 734 nm 处的吸光度值。用没食子酸溶液(0~1 000 mg/L)绘制标准曲线。结果以每克薄膜的微克没食子酸当量(GAE)表示。

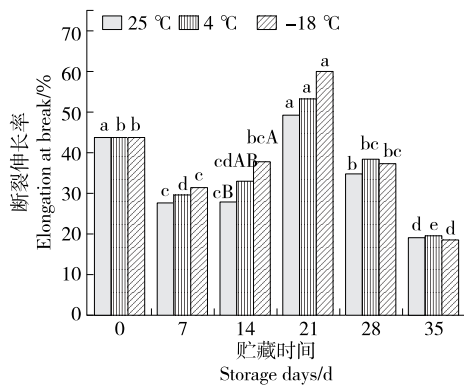
1.5 统计分析

用 SPSS 24.0 软件对数据进行统计分析,用单因素方差分析(ANOVA)进行差异显著性分析,多重比较采用 LSD 法,使用 Origin 2021 进行作图, $P<0.05$ 表示差异显著, $P<0.01$ 表示差异极其显著。结果用平均值±标准偏差表示。

2 结果与分析

2.1 机械性能

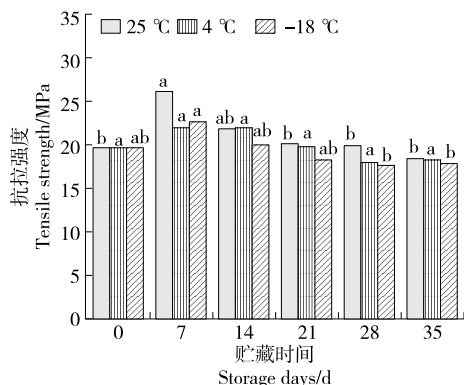
由图 1 可知,在 25,4,-18℃贮藏 35 d 后薄膜的断裂伸长率分别为(19.13±5.94)%,(19.56±3.64)%,(18.47±3.73)% ,相较于 0 d 的分别下降 55.28%,55.29%,57.81%($P<0.05$),且随着贮藏时间的延长,所有薄膜在贮藏期间的断裂伸长率总体呈先下降后上升再下降的趋势。贮藏第 14 天,25℃组的 EAB 显著低于-18℃组($P<0.05$),出现这种现象的原因可能是低温下



小写字母不同表示相同温度下不同贮藏时间的样品之间差异显著 ($P < 0.05$); 大写字母不同表示相同贮藏时间下不同贮藏温度的样品之间差异显著 ($P < 0.05$)

图1 指示薄膜在不同温度和时间下断裂伸长率的变化
Figure 1 The change of elongation at break of indicator films at different temperatures and time

薄膜中山茶油的均匀度保持较好,山茶油起到的增塑作用并未减弱,与文献[11]研究结果一致,适量山茶油的添加显著改善了薄膜的EAB。由图2可知,薄膜在25 °C下贮藏7 d时的TS值显著大于0 d的($P < 0.05$),与EAB的变化趋势相反,可能是以魔芋葡甘聚糖和卡拉胶为主要基质的薄膜在贮藏过程中发生了氧化,导致薄膜老化,且在老化过程中,水分和增塑剂迁移到周围环境,最终导致薄膜的TS值增大。此外,薄膜贮藏第7~35天TS无显著变化($P > 0.05$),但整体呈现下降的趋势,可能是由于山茶油的增塑作用导致EAB增大,EAB的增大往往导致TS降低。薄膜的EAB在贮藏35 d后相较于0 d的显著下降($P < 0.05$),结合水、自由水的损失、甘油的渗出以及在不同环境温度下薄膜的老化速度造成了EAB的下降。

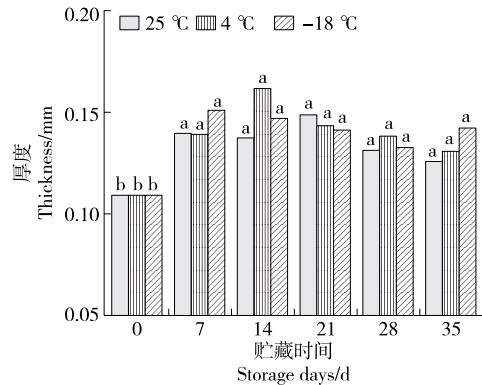


小写字母不同表示相同温度下不同贮藏时间的样品之间差异显著 ($P < 0.05$)

图2 指示薄膜在不同温度和时间下抗拉强度的变化
Figure 2 The change of tensile strength of the indicator films at different temperatures and time

2.2 厚度稳定性

由图3可知,在贮藏第7~35天指示薄膜的厚度保持稳定,薄膜的厚度范围为0.126~0.162。薄膜在第7天的厚度相较于0 d的显著增大($P < 0.05$),其原因可能是山茶油作为疏水性材料添加到亲水性KGM基质中后在不同的温度下贮藏时形成了不致密且较疏松的结构,导致指示膜厚度的增加,与Liu等^[15]研究结果一致。



小写字母不同表示相同温度下不同贮藏时间的样品之间差异显著 ($P < 0.05$)

图3 指示薄膜在不同温度和时间下厚度的变化
Figure 3 Thickness change of indicator films at different temperatures and time

2.3 颜色稳定性

由表1可知,指示薄膜在不同温度下贮藏 L^* 值呈先升高后下降的趋势,且贮藏35 d后,指示薄膜在25, 4, -18 °C的 L^* 值相较于贮藏0 d的分别下降2.4%, 13.13%, 26.80%,下降的原因可能与成膜基质化学构成有关,随着贮藏时间的延长,魔芋葡甘聚糖和卡拉胶分子结构可能发生变化和重排^[6],重排过程中基质结构变得更加紧凑,从而降低了薄膜的透明度,导致指示薄膜 L^* 降低。-18 °C下薄膜 L^* 值下降的速率要高于25 °C和4 °C下的,可能是由于低温下整体老化程度较低,且低温下自由水可形成冰晶,导致指示薄膜的不透明度升高,造成 L^* 下降。

由表2可知,25 °C贮藏下的薄膜 a^* 值总体比较稳定,只有贮藏第35天出现显著变化($P < 0.05$),原因在于薄膜在贮藏过程中,水和甘油从薄膜基质中发生迁移。指示薄膜在不同温度下 a^* 值的变化可能受花青素结构的转变和山茶油状态的影响。

由表3可知,随着贮藏时间的延长,25, 4, -18 °C贮藏指示薄膜的 b^* 值均显著增大($P < 0.05$)。色差的测定结果表明,指示薄膜在-18 °C贮藏时 a^* 和 b^* 的变化小于25 °C和4 °C下的,因此薄膜在-18 °C贮藏时具有良好的颜色稳定性。

2.4 抗氧化性能的变化

2.4.1 总酚含量的变化 由图4可知,贮藏7 d后薄膜的

表 1 指示薄膜在不同温度和时间下 L^* 值的变化[†]

Table 1 The change of L^* value of indicator films at different temperatures and time

温度/℃	贮存时间/d					
	0	7	14	21	28	35
25	41.66±2.39 ^b	45.39±1.08 ^a	46.21±1.09 ^a	47.97±1.21 ^{aA}	46.21±2.10 ^{aA}	40.65±3.54 ^{bA}
4	41.66±2.39 ^a	44.71±2.26 ^a	44.34±0.91 ^a	42.54±1.47 ^{aB}	42.91±1.51 ^{aB}	36.19±2.44 ^{bA}
-18	41.66±2.39 ^b	39.18±3.47 ^b	46.03±1.76 ^a	44.64±1.58 ^{aB}	41.17±1.64 ^{bB}	30.50±1.12 ^{bB}

† 小写字母不同表示相同温度下不同贮藏时间的样品之间差异显著 ($P < 0.05$); 大写字母不同表示相同贮藏时间下不同贮藏温度的样品之间差异显著 ($P < 0.05$)。

表 2 指示薄膜在不同温度和时间 a^* 值的变化[†]

Table 2 The change of a^* value of indicator films at different temperatures and time

温度/℃	贮存时间/d					
	0	7	14	21	28	35
25	22.07±1.07 ^a	21.92±0.53 ^{aA}	22.14±0.26 ^{aA}	20.92±0.84 ^{aA}	21.93±0.95 ^{aA}	17.89±0.43 ^{bA}
4	22.07±1.07 ^a	19.76±0.77 ^{bB}	17.90±0.42 ^{bB}	17.48±1.80 ^{bB}	15.48±0.84 ^{cC}	13.80±0.61 ^{dB}
-18	22.07±1.07 ^a	21.89±0.42 ^{aA}	18.27±0.62 ^{aB}	20.34±1.28 ^{aA}	19.81±0.68 ^{abB}	18.95±1.39 ^{abA}

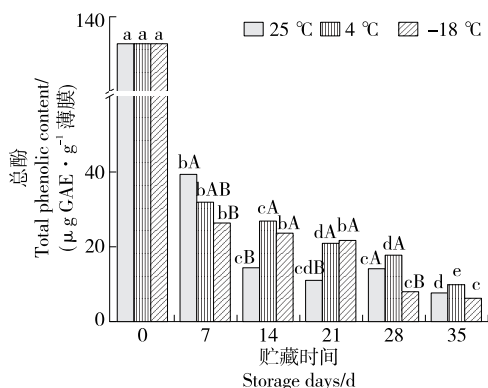
† 小写字母不同表示相同温度下不同贮藏时间的样品之间差异显著 ($P < 0.05$); 大写字母不同表示相同贮藏时间下不同贮藏温度的样品之间差异显著 ($P < 0.05$)。

表 3 指示薄膜在不同温度和时间下 b^* 值的变化[†]

Table 3 The change of b^* value of indicator films at different temperatures and time

温度/℃	贮存时间/d					
	0	7	14	21	28	35
25	-3.07±0.35 ^a	-1.01±0.24 ^{bA}	0.23±0.03 ^{cA}	0.87±0.24 ^{dA}	1.36±0.16 ^{eA}	2.09±0.10 ^{fA}
4	-3.07±0.35 ^a	-2.87±0.71 ^{aB}	-2.75±0.13 ^{aB}	-2.29±0.46 ^{aB}	-1.27±0.13 ^{bB}	-1.44±0.21 ^{bB}
-18	-3.07±0.35 ^a	-3.14±0.23 ^{aB}	-2.94±0.35 ^{aB}	-2.51±0.27 ^{aB}	-2.53±0.31 ^{aC}	-2.48±0.45 ^{aC}

† 小写字母不同表示相同温度下不同贮藏时间的样品之间差异显著 ($P < 0.05$); 大写字母不同表示相同贮藏时间下不同贮藏温度的样品之间差异显著 ($P < 0.05$)。



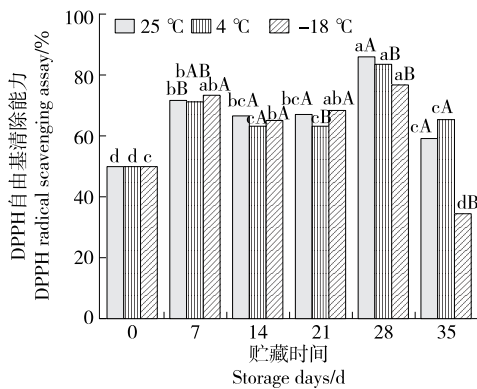
小写字母不同表示相同温度下不同贮藏时间的样品之间差异显著 ($P < 0.05$); 大写字母不同表示相同贮藏时间下不同贮藏温度的样品之间差异显著 ($P < 0.05$)

图 4 指示薄膜在不同温度和时间下总酚含量的变化
Figure 4 The change of total phenolic content of indicator films at different temperatures and time

总酚含量显著下降 ($P < 0.05$)。当贮藏温度不变时,随着贮藏时间的延长,薄膜的总酚含量呈显著下降趋势 ($P <$

0.05),且-18 °C 贮藏的薄膜总酚含量下降速率最大,可能是由于薄膜中的花青素和山茶油中的酚类物质与薄膜基质(KGM-CAR)结构通过氢键相连,导致其在抗氧化分析中不能与自由基相互作用,从而降低了花青素在低温下的抗氧化活性。薄膜在 25 °C 贮藏第 14 天和第 21 天时总酚含量下降速率显著快于 4 °C 和 8 °C 下的 ($P < 0.05$),这是由于花青素的热敏性,温度越高,花青素结构被破坏越严重,从而导致其总酚含量的快速降低。

2.4.2 DPPH 自由基清除能力 由图 5 可知,随着贮藏时间的延长,温度对指示薄膜的 DPPH 自由基清除能力的影响不显著 ($P > 0.05$),含有花青素的指示薄膜在不同温度下贮藏中前期(0~28 d)保持了比较好的抗氧化活性。此外,-18 °C 贮藏 35 d 后指示薄膜的 DPPH 自由基清除能力最低,与 Adilah 等^[14]发现的在大豆分离蛋白中添加芒果核提取物贮藏 90 d 后的结果一致。指示薄膜在贮藏 7 d 后对 DPPH 自由基清除能力逐渐升高,可能是由于山茶油中酚类物质的释放量增加引起的。这也从侧面说明薄膜的抗氧化活性主要是由酚类物质提供的。

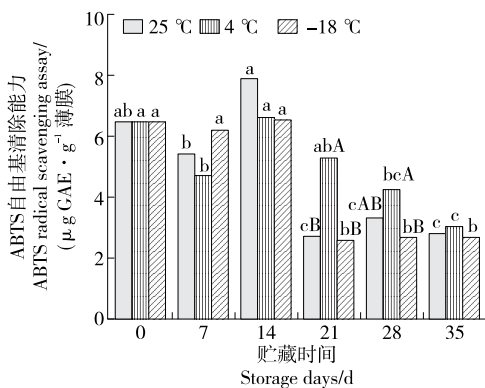


小写字母不同表示相同温度下不同贮藏时间的样品之间差异显著 ($P < 0.05$); 大写字母不同表示相同贮藏时间下不同贮藏温度的样品之间差异显著 ($P < 0.05$)

图5 指示薄膜在不同温度和时间下 DPPH 自由基清除能力的变化

Figure 5 The change of DPPH radical scavenging assay of indicator films at different temperatures and time

2.4.3 ABTS 自由基清除能力 由图 6 可知,随着贮藏时间的延长,薄膜在不同温度下贮藏的 ABTS 自由基清除能力总体呈下降的趋势。25 °C 条件下,贮藏第 14 天薄膜的 ABTS 自由基清除能力达到最高值,为 9.44 $\mu\text{g/g}$,比 4 °C 和 -18 °C 下的最高值高出 24.90% 和 21.08%。在成膜过程中,高温使魔芋葡甘聚糖和卡拉胶结构发生变化,成膜基质和其他化合物之间通过氢键键合,使成膜基质不能完全恢复到原来的结构,从而改善了成膜基质与花青素、水和甘油之间的相互作用,但在 25 °C 贮藏时,薄膜



小写字母不同表示相同温度下不同贮藏时间的样品之间差异显著 ($P < 0.05$); 大写字母不同表示相同贮藏时间下不同贮藏温度的样品之间差异显著 ($P < 0.05$)

图6 指示薄膜在不同温度和时间下 ABTS 自由基清除能力的变化

Figure 6 The change of ABTS radical scavenging assay of indicator film at different temperature and time

基质的结构发生改变,促使与薄膜结合的花青素和山茶油中的酚类物质的释放,从而使得薄膜在 25 °C 贮藏 14 d 有最高的 ABTS 自由基清除能力。此外,不同温度贮藏 35 d 后 ABTS 自由基清除能力相较于贮藏 14 d 的显著下降与结合水、增塑剂和山茶油的损失有关。

由于薄膜结构中山茶油、水和甘油的损失,贮藏时间越长薄膜的老化程度越高,薄膜结构的变化或重排影响了薄膜的抗氧化性能。从抗氧化能力的结果来看,随着贮藏时间的延长,薄膜的总酚含量和 ABTS 自由基清除能力下降,但 DPPH 自由基清除能力升高。这可能是由于薄膜中所含的花青素和山茶油中会与水和甘油一样从薄膜基质中迁移到外界环境中。此外,抗氧化性能的降低不仅是由于花青素的损失,很大程度上也归结于薄膜基质结构的变化。

3 结论

薄膜的贮藏稳定性随着贮藏时间和温度的变化而变化。薄膜在贮藏过程中机械性能、颜色和抗氧化性能的变化与结合水和甘油导致薄膜基质结构重排以及花青素和山茶油的损失有关。但研究仅从宏观层面分析了指示薄膜性能的变化,并未从机理上探讨变化发生的原因,未来可利用扫描电子显微镜和傅里叶变换红外光谱等技术手段从微观层面探讨各种变化发生的原因和机理。

参考文献

- [1] 王奎超. 基于挥发性盐基氮的冷鲜肉的新鲜度指示吸水垫的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2019: 10-11.
WANG K C. Research on the freshness-indicating absorbent pad of chilled meat based on volatile basenitrogen[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2019: 10-11.
- [2] ALIZADEH-SANI M, MOHAMMADIAN E, RHIM J, et al. pH-sensitive (halochromic) smart packaging films based on natural food colorants for the monitoring of food quality and safety[J]. Trends in Food Science and Technology, 2020, 105: 93-144.
- [3] 王圣. 花青素活性智能包装膜研制及其对猪肉的保鲜与新鲜度检测[D]. 镇江: 江苏大学, 2017: 12.
WANG S. Development of anthocyanin active intelligent packaging film and its preservation and freshness detection of pork[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017: 12.
- [4] YONG H M, LIU J. Recent advances in the preparation, physical and functional properties, and applications of anthocyanins-based active and intelligent packaging films[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2020, 26: 100550.
- [5] CHAYAVANICH K, THIRAPHIBUNDET P, IMYIM A. Biocompatible film sensors containing red radish extract for meat spoilage observation[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2020, 226: 117601.

(下转第 167 页)

- LIN X Y, SUN X. Research progress on anti-aging mechanism of *Rhodiola rosea*[J]. Chinese Journal of Gerontology, 2018, 38(13): 3 299-3 300.
- [12] 鞠霖杰, 温小花, 舒雯. 红景天苷对胰岛 β 细胞保护作用研究及机制探讨[J]. 南京中医药大学学报, 2016, 32(5): 456-460.
- JIU L J, WEN X H, SHU L. Study on protective effects of salidroside on pancreatic β -cell survival [J]. Journal of Nanjing University of Chinese Medicine, 2016, 32(5): 456-460.
- [13] KIM S H, HYUN S H, CHOUNG S Y. Antioxidative effects of *Cinnamomi cassiae* and *Rhodiola rosea* extracts in liver of diabetic mice[J]. Biofactors, 2010, 26(3): 209-219.
- [14] 邓超, 邹朝晖. 辐照对食品营养成分的影响研究[J]. 食品安全导刊, 2022(2): 128-130.
- DENG C, ZHOU C H. Study on the effect of irradiation on the nutrient composition of food[J]. China Food Safety Magazine, 2022(2): 128-130.
- [15] 耿建暖. 食品辐照技术及其食品中的应用[J]. 食品研究与开发, 2013, 34(15): 109-112.
- GENG J N. Food irradiation and its application in food processing[J]. Food Research and Development, 2013, 34(15): 109-112.
- [16] 齐仕博, 张露, 宋鑫洋, 等. 辐照对人参活性成分及其药理特性的影响研究进展[J]. 食品与机械, 2018, 34(11): 161-166, 199.
- QI S B, ZHANG L, SONG X P, et al. Research progress on the influence of irradiation on ginseng active components and pharmacological properties[J]. Food & Machinery, 2018, 34(11): 161-166, 199.
- [17] PESCHEL W, KUMP A, HORVÁTH A, et al. Age and harvest season affect the phenylpropanoid content in cultivated European *Rhodiola rosea* L.[J]. Industrial Crops and Products, 2016, 83: 787-802.
- [18] 张露, 姜欣, 金莉英, 等. 辐照处理对桦褐孔菌多糖降血糖作用的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(11): 143-147.
- ZHANG L, JIANG X, JIN L Y, et al. Effect of irradiation on the hypoglycemic effect of polysaccharide from *Foramen betulaeformis*[J]. Food & Machinery, 2020, 36(11): 143-147.
- [19] 刘素欣, 张露, 崔承弼. 红景天提取物的降血糖作用研究[J]. 延边大学农学学报, 2020, 42(2): 21-26.
- LIU S X, ZHANG L, CUI C B. Study on the hypoglycemic effect of *Rhodiola Rosea* extract[J]. Journal of Agricultural Science Yanbian University, 2020, 42(2): 21-26.
- [20] 王磊, 刘玮. 自拟大黄水蛭合剂对糖尿病患者 TG、TC、LDL-C 和 HDL-C 的影响[J]. 河北医药, 2016, 38(24): 3 776-3 778.
- WANG L, LIU W. Effect of self-made Rhubarb leech mixture on TG, TC, LDL-C and HDL-C in diabetic patients[J]. Hebei Medical Journal, 2016, 38(24): 3 776-3 778.
- [21] 张泽鹏, 徐兴军, 刘佳人, 等. 牡荆素对 1 型糖尿病小鼠体内抗氧化酶活性及相关基因表达的影响[J]. 天然产物研究与开发, 2022, 34(4): 623-629.
- ZHANG Z P, XU X J, LIU J R, et al. Effects of vitexin on activity of antioxidant enzymes and expression of related genes in type 1 diabetic mice[J]. Natural Product Research and Development, 2022, 34(4): 623-629.
- (上接第 129 页)
- [6] 任爽, 董文霞, 刘锦芳, 等. 食品运载体系包埋姜黄素的研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(9): 264-274.
- REN S, DONG W X, LIU J F, et al. Research progress on encapsulation of curcumin in food delivery system[J]. Food Science, 2021, 42(9): 264-274.
- [7] CEBALLOS R L, OCHOA-YEPES O, GOYANES S, et al. Effect of yerba mate extract on the performance of starch films obtained by extrusion and compression molding as active and smart packaging[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 244: 116495.
- [8] BAKOWSKA A, KUCHARSKA A Z, OSZMIANSKI J. The effects of heating, UV irradiation, and storage on stability of the anthocyanin-polyphenol copigment complex[J]. Food Chemistry, 2003, 81(3): 349-355.
- [9] ZHAI X D, ZOU X B, SHI J Y, et al. Amine-responsive bilayer films with improved illumination stability and electrochemical writing property for visual monitoring of meat spoilage[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2020, 302: 127130.
- [10] HE F, KONG Q, JIN Z H, et al. Developing a unidirectionally permeable edible film based on K-carrageenan and gelatin for visually detecting the freshness of grass carp fillets[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 241: 116336.
- [11] ZHOU X, YU X Z, XIE F, et al. pH-responsive double-layer indicator films based on konjac glucomannan/camellia oil and carrageenan/anthocyanin/curcumin for monitoring meat freshness [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 118: 106695.
- [12] RUAN C C, ZHANG Y M, WANG J J, et al. Preparation and antioxidant activity of sodium alginate and carboxymethyl cellulose edible films with epigallocatechin gallate[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 134: 1 038-1 044.
- [13] BALQIS A M I, KHAIZURA M A R N, RUSSLY A R, et al. Effects of plasticizers on the physicochemical properties of kappa-carrageenan films extracted from *Eucheuma cottonii* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 103: 721-732.
- [14] ADILAH Z A M, JAMILAH B, HANANI I A N. Functional and antioxidant properties of protein-based films incorporated with mango kernel extract for active packaging[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 74: 207-218.
- [15] LIU Z, LIN D H, SHEN R, et al. Characterizations of novel konjac glucomannan emulsion films incorporated with high internal phase Pickering emulsions[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 109: 106088.
- [16] NURIA B, FERNANDO F, PILAR M. Jumbo squid (*Dosidicus gigas*) myofibrillar protein concentrate for edible packaging films and storage stability[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 55(2): 543-550.