

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202308034



## 壳聚糖纳米乳剂对火龙果保鲜效果分析

郎丹<sup>1</sup>, 夏秀红<sup>2</sup>, 张彩云<sup>1</sup>, 陈思妤<sup>2</sup>, 杨润雨<sup>2</sup>,  
马宁<sup>1</sup>, 牛荣丽<sup>2</sup>, 唐健红<sup>1</sup>, 杜志棍<sup>3</sup>

- (1. 华侨大学 化工学院, 福建 厦门 361021;  
2. 华侨大学 医学院, 福建 泉州 362021;  
3. 泉州市绿谷生态农业有限公司, 福建 泉州 362011)

**摘要:** 为了检测实验室自制壳聚糖纳米乳剂的保鲜效果,测定其保鲜的火龙果在贮藏期生理生化等指标。结果表明:壳聚糖纳米乳剂能维持可溶性糖和可滴定酸的质量分数,壳聚糖纳米乳剂(CS)组可溶性糖和可滴定酸的质量分数始终高于空白对照(CK)组( $P<0.05$ );壳聚糖纳米乳剂能减慢 Vc 的氧化分解,贮藏 3~7 d 时,CS 组的 Vc 质量分数明显高于 CK 组( $P<0.05$ );壳聚糖纳米乳剂可增强 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)自由基清除能力,贮藏 9 d 时,CS 组 DPPH 自由基清除率达到最大值 19.69%,显著高于 CK 组的 6.15% ( $P<0.05$ );在可溶性固形物质量分数、pH 值和抑菌等方面,CS 组与 CK 组具有不同程度的差异,贮藏 11 d 时,CK 组腐烂率为 93.33%,而 CS 组为 66.67%。

**关键词:** 壳聚糖; 纳米乳剂; 火龙果; 保鲜

中图分类号: TS 255.36

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2024)03-0339-12

Analysis of Preservation Effect of Chitosan  
Nanoemulsion on PitayaLANG Dan<sup>1</sup>, XIA Xiuhong<sup>2</sup>, ZHANG Caiyun<sup>1</sup>,  
CHEN Siyu<sup>2</sup>, YANG Runyu<sup>2</sup>, MA Ning<sup>1</sup>,  
NIU Rongli<sup>2</sup>, TANG Jianhong<sup>1</sup>, DU Zhigun<sup>3</sup>

- (1. College of Chemical Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;  
2. School of Medicine, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;  
3. Quanzhou Green Valley Ecological Agriculture Limited Company, Quanzhou 362011, China)

**Abstract:** In order to test the preservation effect of self-made chitosan nanoemulsion in the laboratory, the physiological and biochemical indicators of the preserved pitaya during storage were determined. The results showed that chitosan nanoemulsion could maintain the mass fraction of soluble sugar and titratable acid, and the mass fraction of soluble sugar and titratable acid in the chitosan nanoemulsion (CS) group were consistently higher than those in the blank control (CK) group ( $P<0.05$ ). Chitosan nanoemulsion could slow down the oxidative decomposition of Vc, and the mass fraction of Vc in the CS group was significantly higher than that in the CK group ( $P<0.05$ ) when stored for 3-7 d. Chitosan nanoemulsion could enhance free radical scavenging ability of 1,1-diphenyl-2-trinitrophenylhydrazine (DPPH), and the DPPH free radical scavenging rate in the CS

收稿日期: 2023-08-29

通信作者: 牛荣丽(1971-),女,副研究员,博士,主要从事海洋生物资源再利用的研究。E-mail: niurongli@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省个人/团队特派员项目(2023 年度); 华侨大学人才引进项目(600005-12B0087)

group reached its maximum value of 19.69% when stored for 9 d, significantly higher than that of 6.15% in the CK group ( $P<0.05$ ). There were varying degrees of differences between the CS group and the CK group in terms of soluble solid mass fraction, pH value and antibacterial activity. When stored for 11 d, the decay rate in the CK group was 93.33%, while the CS group was 66.67%.

**Keywords:** chitosan; nanoemulsion; pitaya; preservation

火龙果(*Hylocereusundatus*)又名情人果,广泛种植于热带和亚热带地区。火龙果是维生素、膳食纤维、甜菜素、有机酸、氨基酸和糖类的良好来源,其果皮可用于开发新兴食品和回收高增值原料<sup>[1-5]</sup>。火龙果在贮藏期间,由于果实呼吸代谢旺盛,随着存放时间延长会发生腐败,还会发生果肉褐变、病虫害侵染、鳞片劣变、营养损失和低温冷害等品质劣变现象,这对火龙果采后销售产生严重的影响<sup>[6]</sup>。因此,如何延长火龙果的贮藏时间,提高保鲜效果一直是火龙果产业面临的挑战。目前,无毒无害的生物保鲜剂(微生物代谢产物、生物酶和生物天然提取物等)成为近年来果蔬保鲜的热点。

壳聚糖(CS)是一种从蟹壳中提取的天然聚合物,也是第一个被欧盟批准用于植物保护、有机农业和病虫害综合治理的基本物质<sup>[7]</sup>,其有效性的3种机制是成膜、抗菌活性和引发宿主防御。Azevedo等<sup>[8]</sup>发现单独使用或与植物精油结合使用的可食用壳聚糖涂层对食源性病原体具有较强的抗菌活性,如铜绿假单胞菌、金黄色葡萄球菌、芽孢杆菌、粘质沙雷氏菌、大肠杆菌、粪肠球菌和肠炎沙门氏菌等。Landi等<sup>[9]</sup>报道壳聚糖可用于植物防御机制诱导剂,这有利于避免采后微生物污染和果实腐败。精油是植物的次级代谢产物,安全且具有抗氧化和抗微生物等活性<sup>[10]</sup>,可用于延长食品保质期和改善食品的感官特性(香气和味道)。丁香精油(CEO)由于含有大量酚类和萜类活性物质,具有较强的抗菌抗氧化能力<sup>[11]</sup>。已有报道将精油应用于蔬菜的保鲜中,如生菜、胡萝卜丝、黄瓜片和西兰花等,并取得较好的结果<sup>[11]</sup>。然而,CEO难溶于水、易挥发、稳定性差且易受环境影响,在保鲜过程中易与果蔬发生反应产生药害<sup>[12]</sup>。单一的CS膜的润湿性和透气性较弱,机械强度较差,抗菌能力和抗氧化能力都有限,保鲜效果有待提高<sup>[13]</sup>。因此,利用离子交联法向CS中添加CEO制备纳米乳剂,既可改善膜的机械性能,提高膜的抗菌和抗氧化能力,又能弥补CEO难溶、易挥发和稳定性差的不足,使CEO能够更持久地发挥作用,从而达到协同增效的保鲜效果<sup>[14]</sup>。目前,有关火龙果的生物保鲜方法报道尚少,探索安全、有效、经济的生物保鲜方法是当下的研究热点<sup>[15]</sup>。基于此,本文通过自制生物保鲜剂壳聚糖纳米乳剂保鲜火龙果,并分析其保鲜效果。

## 1 试剂与材料

壳聚糖(脱乙酰度95%,山东省圣嘉德生物科技有限公司);丁香精油(上海市憬椿生物科技有限公司);平板计数琼脂培养基(上海市博微生物科技有限公司);孟加拉红琼脂(上海市国药集团化学试剂有限公司);考马斯亮蓝G-250(上海市国药集团化学试剂有限公司);其他化学试剂(上海市国药集团化学试剂有限公司)。

红麒麟红心火龙果由福建省泉州市绿谷生态农业有限公司提供。挑选颜色均匀、大小均一、无病虫害、无机械损伤的火龙果作为实验材料,于干燥通风处室温保存24 h待用。

## 2 实验方法

### 2.1 乳剂的制备

参照文献[16]的方法,首先,将适量的CS粉加入体积分数为1%的乙酸溶液中,于60℃下搅拌溶解2 h,得到澄清溶液,用0.45 μm的滤膜过滤,以除去大分子不溶物。然后,加入适量聚氧乙烯硬脂酸酯(Tween-80),于60℃下搅拌1 h,用1 mol·L<sup>-1</sup>的NaOH溶液调节pH值至4.0。最后,将0.4 g丁香精油滴加到上述溶液中,室温搅拌30 min,并逐滴滴加适量体积分数为0.3%的磷酸三苯酯(TPP)溶液,常温搅拌1 h,即可获得壳聚糖-丁香精油(CS-CEO)纳米乳剂(简称壳聚糖纳米乳剂)。

### 2.2 火龙果的预处理

设2个实验组,即空白对照(CK)组(火龙果经清水浸泡2 min)和壳聚糖纳米乳剂(CS)组(火龙果

经壳聚糖纳米乳剂浸泡 2 min)。每组用果 20 kg,共 36 个火龙果,其中,15 个用于失重率和腐烂率的测定,21 个用于其余指标的测定。将处理好的火龙果自然晾干,室温储存。贮藏 0,1,3,5,7,9,11 d 时,从每组分别取 3 个火龙果,将果皮和果肉切成小块分别混合,于 -80 ℃ 保存,用于后续指标的测定。

2.3 失重率的测定

参照文献[17]的方法,分别在每个取样时间称取各组火龙果果实的质量并统计失重率。失重率( $\eta_q$ )的计算公式为

$$\eta_q = \frac{m_0 - m_i}{m_0} \times 100\%。$$
(1)

式(1)中: $m_0$  为贮藏 0 d 的果实质量; $m_i$  为贮藏  $i$  d 的果实质量。

2.4 腐烂率的测定

参照文献[18]的方法,观察贮藏后果实的腐烂情况,并统计实腐烂个数(果皮表面出现的褐斑或水腐斑大于 1 cm<sup>2</sup> 的果实定义为腐烂果)。腐烂率( $\delta_d$ )的计算公式为

$$\delta_d = \frac{n}{n_t} \times 100\%。$$
(2)

式(2)中: $n$  为贮藏后腐烂果实的数量; $n_t$  为贮藏前果实的总数。

2.5 可溶性固形物(TSS)质量分数的测定

参照文献[19]的方法,在每个取样时间,分别从 CK 组和 CS 组中各取 2 个果,每个果各取 20 g 果肉,将两个果的果肉混合榨汁,于 12 000 r · min<sup>-1</sup>,4 ℃ 下离心 10 min,取上清液,用手持式数字折光仪分别测定 CK 组和 CS 组的 TSS 质量分数,重复 3 次,取平均值。

2.6 可溶性糖质量分数的测定

参照文献[20]的方法,采用蒽酮试剂法测定火龙果果肉中可溶性糖的质量分数。

2.7 pH 值的测定

参照文献[20]的方法,测定节 2.5 得到的剩余上清液的 pH 值,重复 3 次,取平均值。

2.8 可滴定酸质量分数的测定

参照文献[20]的方法,用氢氧化钠溶液进行滴定。

2.9 微生物定性实验分析

参照文献[21]的方法,从各组分别取火龙果样品,用生理盐水清洗,吸取清洗液各 10 mL 作为原液备用,用无菌生理盐水进行梯度稀释,随着天数的增加,按情况进行 10 倍梯度稀释,每个样品 1 mL 转移到含有平板计数琼脂的培养皿中,用孟加拉红培养基进行霉菌培养,于 28 ℃ 下孵育 3 d;用平板计数琼脂培养基进行细菌培养,于 37 ℃ 下培养 48 h。每组 3 个平行对照。

2.10 细胞膜通透性的测定

参照文献[22]的方法,首先,取火龙果赤道上 3 个不同位置的果皮,共 3.0 g,将每块果皮切成大小约为 1.0 cm×0.5 cm 的小块,加去离子水 25 mL,于 25 ℃,100 r · min<sup>-1</sup>下摇床振荡 1 h,搅拌均匀,通过 DDS-IIA 型电导仪(上海市仪昕科学仪器有限公司)测定浸出液的电导率( $C_1, \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ );然后,将果皮及浸出液煮沸 10 min,冷却后加蒸馏水至 25 mL,搅拌均匀后测定果皮浸出液电导率( $C_2, \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ ),重复 3 次。果皮细胞膜通透性用相对电导率( $C_r$ )表示,其计算公式为

$$C_r = \frac{C_1 - C_0}{C_2 - C_0} \times 100\%。$$
(3)

式(3)中: $C_0$  为蒸馏水的电导率, $\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。

2.11 丙二醛(MDA)质量摩尔浓度的测定

参照文献[16]的方法,称取 1.0 g 火龙果果皮样品,研磨,加入 15.0 mL 的三氯乙酸(TCA,100 g · L<sup>-1</sup>)溶液,混匀,于 4 ℃,12 000 r · min<sup>-1</sup>下离心 5 min,收集上清液,备用。取 2.0 mL 上清液与 2.0 mL 的硫代巴比妥酸(TBA,质量分数为 0.67%)充分混合,煮沸 20 min,冷却,再次离心。分别测定上清液在 450,532,600 nm 波长处的吸光度值( $A_{450}, A_{532}, A_{600}$ )。空白管以 TCA 溶液代替提取液。重复 3 次,取平均值。样品中丙二醛质量摩尔浓度  $b(\text{MDA})(\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}, \text{鲜质量})$  的计算公式为

$$b(\text{MDA})=\frac{c\times V\times V_{\text{TBA}}}{1\,000\times V_{\text{s}}\times m_{\text{s}}}。$$

(4)

式(4)中: $c$ 为反应混合液中的丙二醛浓度, $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , $c=6.45\times(A_{532}-A_{600})-0.56\times A_{450}$ ;  $V$ 为样品提取液的总体积,mL; $V_{\text{TBA}}$ 为加入的 TBA 的体积,mL; $V_{\text{s}}$ 为测定时所取样品提取液的体积,mL; $m_{\text{s}}$ 为样品质量,g。

2.12 Vc 质量分数的测定

参照文献[23]中的 2,6-二氯酚法测定 Vc 的质量分数。

2.13 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)自由基清除率的测定

参照文献[20]的方法,将 2 g 冷冻火龙果样品与 5 mL 乙醇(体积分数为 50%)混合后研磨成匀浆,于 10 000 r $\cdot$ min $^{-1}$ ,4 ℃离心 20 min,取上清备用。取 300  $\mu\text{L}$  上清液加入 5.7 mL 的 DPPH-乙醇溶液中,混匀,室温避光放置 30 min,空白组以体积分数为 50%的乙醇代替样液。于 517 nm 波长处测定吸光度值。

自由基清除率( $\gamma_{\text{DPPH}}$ )计算公式为

$$\gamma_{\text{DPPH}}=\frac{A_0-A_{\text{s}}}{A_0}\times 100\%。$$

(5)

式(5)中: $A_0$ , $A_{\text{s}}$ 分别为空白组和样品的吸光度值。

2.14 类黄酮质量分数的测定

参照文献[20]的方法,将 1.1 g 冷冻火龙果样品与 10 mL 甲醇溶液(体积分数为 80%)混合后研磨成匀浆,超声 5 min,室温避光放置 20 min 后进行抽滤,吸取滤液,加入蒸馏水至 30 mL,混匀后测定 325 nm 波长处的吸光度值。重复 3 次,取平均值。

2.15 数据处理与分析

采用 Excel 2019 进行数据处理,采用 SPSS(IBM SPSS Statistics 27.0.1)进行显著性差异分析。“\*”表示与 CK 组相比,差异具有统计学意义( $P<0.05$ );“\*\*”表示与 CK 组相比,差异具有高度统计学意义( $P<0.01$ )。

3 实验结果与分析

3.1 壳聚糖纳米乳剂对火龙果失重率、腐烂率的影响

果蔬的呼吸过程和蒸腾作用会造成采后水分流失,引起生理生化变化,进而导致保鲜效果不佳<sup>[6]</sup>。贮藏期间火龙果失重率的变化,如图 1 所示。

由图 1 可知:贮藏 1~11 d 时,CS 组和 CK 组的失重率均缓慢升高,但 CS 组始终低于 CK 组,这与文献报导一致。Chit 等<sup>[22]</sup>用壳聚糖/海藻酸钠复合凝胶保鲜紫薯,贮藏 16 d 后,质量损失值小于对照组。Sánchez-gonzález 等<sup>[24]</sup>认为将壳聚糖-精油保鲜剂用于芒果能延缓果实释放乙烯速度,抑制呼吸,减少芒果失重。文献[25-26]认为壳聚糖涂层可以作为保护层,阻碍水果的蒸腾作用,从而减少水分散失。连欢等<sup>[27]</sup>认为壳聚糖和抗坏血酸制成的可食用涂膜液能在蓝莓表面形成一层选择性屏障,阻塞果实表面的皮孔,从而延缓果实的呼吸速率。因此,壳聚糖-丁香精油纳米乳剂降低火龙果失重率的原因可能在于其能形成保护膜,在一定程度上抑制了果蔬水分流失,延长保鲜期。

腐烂率是评价火龙果品质的重要指标<sup>[28]</sup>,贮藏期间火龙果腐烂率的变化,如图 2 所示。

由图 2 可知:随着存放时间的延长,腐烂率逐渐升高,贮藏 3 d 时,两组均出现腐烂;贮藏 5 d 时,两组的腐烂率出现差别,贮藏 7~9 d 时,CK 组的腐烂率从 20.00%增至 40.00%(增幅为 50.00%),CS 组的腐烂率从 13.33%增至 20.00%(增幅为 33.36%);贮藏 11 d 时,CK 组的腐烂率已达 93.33%,而 CS

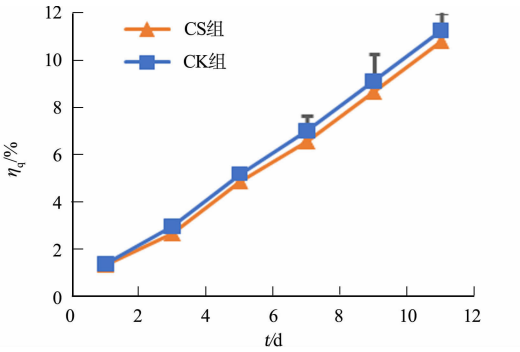


图 1 贮藏期间火龙果失重率的变化  
Fig. 1 Changes of weight loss rate of pitaya during storage

组的腐烂率为 66.67%, 这说明壳聚糖-丁香精油纳米乳剂具有良好的抑菌效果, 能够降低火龙果的腐烂率, 延长货架时间。

Xing 等<sup>[29]</sup>用壳聚糖-肉桂精油处理枣, 在第 60 d 的腐烂率仅为 13.83%, 明显低于对照组 (54.78%), 得出类似的结果, 故认为壳聚糖-肉桂精油能够降低果实的腐烂率, 减少腐败, 起到保鲜作用。李元政等<sup>[30]</sup>认为壳聚糖纳米乳剂可以在果实表面形成一层膜, 阻止微生物的侵染, 而且壳聚糖、精油都有很好的抑菌效果, 可抑制果实表面微生物的生长。车雨晴等<sup>[31]</sup>的研究表明, 贮藏 9 d 时, 壳聚糖组草莓的腐烂率达到 27.78%, 明显高于玫瑰精油-壳聚糖组 (15.69%), 说明壳聚糖与精油复合处理能够降低果实的腐烂率。

3.2 壳聚糖纳米乳剂对火龙果 TSS 和可溶性糖质量分数的影响

TSS 由糖、酸、可溶性果胶、可溶性蛋白和维生素等组成<sup>[32]</sup>, 在一定程度上反映了贮藏过程中果实营养物质含量 (质量分数) 的变化<sup>[33]</sup>。贮藏期间火龙果 TSS 质量分数 ( $w(\text{TSS})$ ) 的变化, 如图 3 所示。

由图 3 可知: 从整体趋势上看, CS 组的 TSS 质量分数略低于 CK 组, TSS 质量分数呈现上升趋势, 可能在贮藏期间果实还未完全成熟, TSS 还处于合成期, 这与文献报导不完全一致, Chen 等<sup>[34]</sup>用壳聚糖复合保鲜剂涂膜橘子, 果实的 TSS 质量分数在贮藏期间先升高后下降, TSS 质量分数下降是因为橘子在储存过程中会进行呼吸作用, 同时有微生物生长繁殖的情况出现, 这些生理生化变化过程都要依靠糖类物质的消耗才能进行<sup>[35]</sup>; 贮藏 7 d 时, 两组开始出现差异, CK 组的 TSS 质量分数为 10.87%, 显著高于 CS 组的 10.10% ( $P < 0.05$ ); 贮藏 7 d 后, CS 组的 TSS 质量分数上升趋势大于 CK 组, 贮藏 9 d 时, CS 组的 TSS 质量分数为 10.70%, 显著高于 CK 组的 9.27% ( $P < 0.05$ ), 但仍然低于贮藏 7 d 的 CK 组 (10.87%), 这说明壳聚糖纳米乳剂在火龙果表面形成一层半透膜, 抑制火龙果的呼吸和养分消耗, TSS 质量分数上升速度晚于且低于 CK 组, 即延缓 TSS 质量分数的升高, 从而延缓火龙果的后熟。这与冯学梅等<sup>[36]</sup>的实验结果类似, 在壳聚糖涂膜对金冠苹果保鲜贮藏初期, TSS 质量分数也是先上升后下降, 但是无论上升还是下降的速度, CS 组明显低于 CK 组, 贮藏 84 d 时, CK 组的 TSS 质量分数为 11.3%, 而 CS 组为 12.3%; 刘括等<sup>[37]</sup>的实验表明, 贮藏 29 d 后, 单壳聚糖组火龙果的 TSS 质量分数下降了 6%, 高于氧化石墨烯/壳聚糖复合保鲜剂组, 这说明氧化石墨烯/壳聚糖复合保鲜剂抑制了火龙果果实中的 TSS 的分解, 减缓了火龙果的衰老, 比单壳聚糖的保鲜效果更理想。

糖作为呼吸作用的基质, 为细胞生命活动提供能量, 其质量分数的变化反映了果蔬中营养物质的消耗程度, 直接影响果实采后的品质和口感<sup>[38-39]</sup>。贮藏期间火龙果可溶性糖质量分数 ( $w_s$ ) 的变化, 如图 4 所示。

由图 4 可知: 总体趋势上, CS 组的可溶性糖质量分数高于 CK 组; 贮藏 0 d 时, 由于火龙果自身的代谢差异, CK 组的可溶性糖质量分数高于 CS 组; 贮藏 1~11 d 时, 可溶性糖质量分数呈先上升后下降的趋势, 说明前期火龙果还未完全成熟, 自身还在合成营养

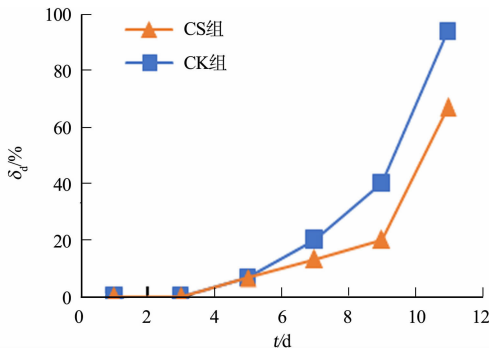


图 2 贮藏期间火龙果腐烂率的变化  
Fig. 2 Changes of decay rate of pitaya during storage

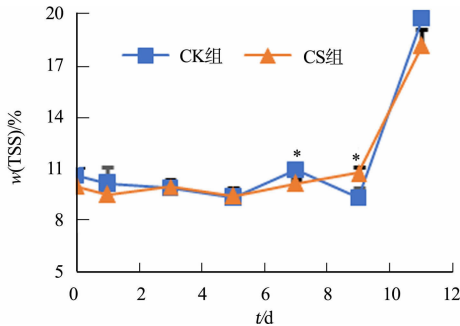


图 3 贮藏期间火龙果 TSS 质量分数的变化  
Fig. 3 Changes of TSS mass fraction of pitaya during storage

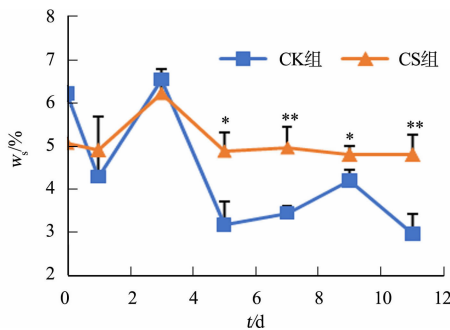


图 4 贮藏期间火龙果可溶性糖质量分数的变化  
Fig. 4 Changes of soluble sugar mass fraction of pitaya during storage



物质,这与文献[40]的结论一致;贮藏 3 d 后,可溶性糖质量分数整体呈下降趋势,但 CS 组可溶性糖质量分数始终高于 CK 组( $P<0.05$ ),说明壳聚糖-丁香精油纳米乳剂能够维持火龙果较高的可溶性糖质量分数,从而保持果实的品质和口感,这与文献报道一致,Wang 等<sup>[41]</sup>认为壳聚糖-肉桂精油有助于保留较高的可溶性糖质量分数,减少多糖和蔗糖向还原糖的转化,从而稳定芒果的风味和营养属性,起到保鲜效果,费湘伟<sup>[42]</sup>认为相较于单壳聚糖组及空白对照组,壳聚糖-芥末油处理组蜜桔的可溶性糖质量分数分别增高了 8.63%,15.33%,说明壳聚糖与芥末油复配保鲜剂的保鲜效果优于单壳聚糖。

3.3 壳聚糖纳米乳剂对火龙果 pH 值、可滴定酸质量分数的影响

pH 值与多糖的利用有关,在成熟的过程中,葡萄糖分质量分数逐渐增加,酸度逐步下降,pH 值随之上升;后期果实呼吸代谢消耗有机酸,pH 值上升。因此,pH 值是判断火龙果生理变化的指标之一<sup>[43]</sup>。贮藏期间火龙果 pH 值的变化,如图 5 所示。

由图 5 可知:在整体趋势上,前期两组的 pH 值缓慢上升,酸度逐渐降低,说明火龙果未完全成熟,后期 pH 值迅速上升,火龙果腐烂速度加快,pH 值的升高可能会加速品质的劣变,这与文献[44]的研究一致;贮藏 3,9 d 时,CK 组的 pH 值比 CS 组更高;贮藏 0~11 d 时,CK 组的 pH 值从 4.81 增至 10.81,增大了 6.00,CS 组从 4.90 增至 10.61,增大了 5.71,CS 组的 pH 值增幅小于 CK 组,说明壳聚糖-丁香精油纳米乳剂能抑制 pH 值上升,即抑制火龙果成熟。这与 Ghafoor 等<sup>[45]</sup>的实验结果类似,壳聚糖-精油涂膜的黄瓜的 pH 值在贮藏期间不断增大,贮藏 14 d 时,增至最大值 10.68。龚晟兰等<sup>[46]</sup>认为在贮藏期间板栗还未完全成熟,淀粉转化为可溶性糖,为果实提供能量,pH 值升高。Wang 等<sup>[41]</sup>发现壳聚糖纳米乳液组的 pH 值为 6.8,百里香精油-壳聚糖纳米乳液组的猪肉 pH 值更小(5.9),说明壳聚糖与精油起到协同增效的作用,保鲜效果更好。

果实中有机酸含量(质量分数)会在贮藏过程中被呼吸等作用消耗而降低,可以作为判断果实成熟度和贮藏环境是否适宜的一个指标<sup>[47]</sup>。贮藏期间火龙果可滴定酸质量分数( $w_a$ )的变化,如图 6 所示。

由图 6 可知:在贮藏期间,两组可滴定酸质量分数呈缓慢下降的趋势,且 CS 组可滴定酸质量分数均高于 CK 组,说明壳聚糖-丁香精油纳米乳剂能通过抑制呼吸作用消耗有机酸而维持可滴定酸质量分数,从而保持了火龙果的风味,起到保鲜作用,这个结论与前面 pH 值逐渐升高,且 CS 组的 pH 值低于 CK 组的研究结论一致。

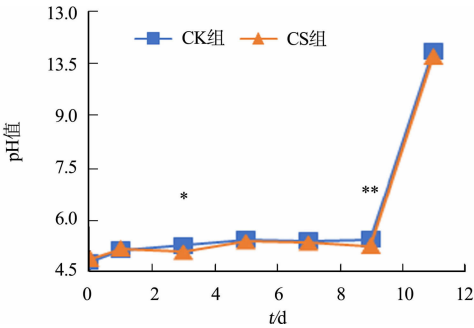


图 5 贮藏期间火龙果 pH 值变化

Fig. 5 Changes of pH value of pitaya during storage

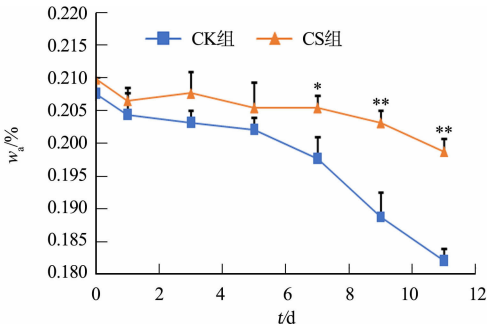


图 6 贮藏期间火龙果可滴定酸质量分数的变化

Fig. 6 Changes of titratable acid mass fraction in pitaya during storage

Xing 等<sup>[25]</sup>也得到一致的结果,随着贮藏时间延长,壳聚糖-肉桂精油处理的枣可滴定酸质量分数从 0.486%下降到 0.342%。李涵等<sup>[48]</sup>认为百香果开始腐败后,营养物质在流失,可滴定酸一部分被果实的呼吸作用消耗,另一部分则转化为糖类。车雨晴等<sup>[31]</sup>的实验结果表明,壳聚糖结合精油形成的壳聚糖食用性薄膜抑制可滴定酸下降的能力比单壳聚糖更好。

3.4 壳聚糖纳米乳剂对火龙果微生物数目的影响

新鲜果蔬在运输及储存过程中容易受到碰撞而造成组织破损,导致微生物入侵而腐烂。因此,微生物数目成为判断果蔬品质的一个重要指标<sup>[6]</sup>。贮藏期间火龙果细菌数目和霉菌数目的变化,分别如图 7,8 所示。图 7,8 中:同一列稀释倍数相同。

由图 7,8 可知:随着时间的延长,两组的细菌和霉菌数目变化趋势一致,随着天数的增加,CS 组和

CK 组的细菌和霉菌数目均呈现上升趋势；贮藏 0 d 时，CS 组的细菌数和霉菌数目均比 CK 组多，此时保鲜剂还未发挥作用，可能是火龙果个体差异引起的；随着贮藏时间延长，CS 组的细菌数和霉菌数目均与 CK 组相当或者比 CK 组少，说明壳聚糖-丁香精油纳米乳剂能够抑制菌落生长，延缓火龙果腐败，其原因可能是壳聚糖和丁香精油都有抑菌作用<sup>[49]</sup>。

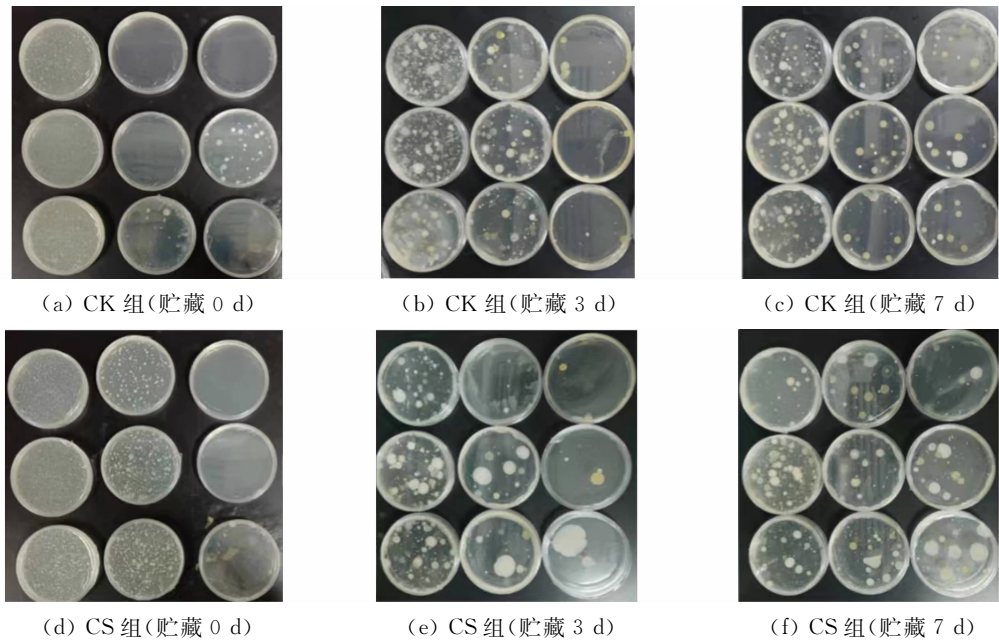


图 7 贮藏期间火龙果细菌数目的变化

Fig. 7 Changes of bacterial count of pitaya during storage

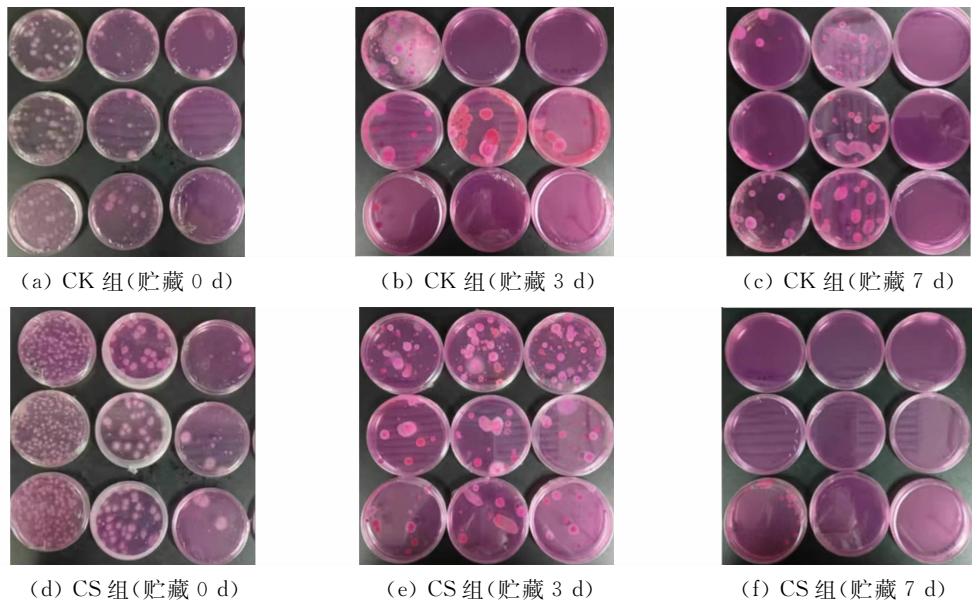


图 8 贮藏期间火龙果霉菌数目的变化

Fig. 8 Changes of mold count of pitaya during storage

3.5 壳聚糖纳米乳剂对火龙果细胞膜通透性、MDA 质量摩尔浓度的影响

涂膜保鲜在果蔬表面形成透气薄膜，不仅能阻碍微生物的侵染，还能调节果蔬与外界气体交换，降低呼吸和蒸腾代谢，从而延缓果蔬的衰老进程<sup>[50]</sup>。贮藏期间火龙果细胞膜通透性的变化，如图 9 所示。

由图 9 可知：贮藏期间细胞膜通透性整体趋势升高，且 CS 组大多低于 CK 组，仅贮藏 9 d 时 CS 组略高于 CK 组，说明壳聚糖-丁香精油纳米乳剂能降低火龙果的细胞膜通透性，这可能是因为它能形成一层薄膜有效抑制呼吸作用，同时能阻止外界氧气接触组织细胞，降低细胞膜的脂过氧化，此外，壳聚糖和精油都具有抑菌性，能降低微生物对组织细胞的侵害。这与刘容等<sup>[51]</sup>的实验结果一致，在贮藏期间，

细胞膜透性不断升高,CS 组细胞膜透性低于 CK 组,当鲜切淮山贮藏 12 d 时,CS 组的细胞膜通透性比 CK 组降低了 17.8%,因为当果蔬受到机械损伤或者化学伤害时,细胞膜会遭到破坏,使膜透性增加,发生电解质外泄,导致膜相对电导率升高。Lee 等<sup>[52]</sup>的实验表明,用壳聚糖-有机精油(CS-OEO)和单壳聚糖处理草莓,贮藏 12 d 时,壳聚糖-有机精油组的相对电导率比单壳聚糖组增大了 39.291%,说明 CS-OEO 的保鲜效果更好,这与文中实验结果一致。

丙二醛(MDA)是膜质过氧化的产物,可反映果蔬细胞膜质过氧化的程度,MDA 质量摩尔浓度可评价果实衰老状态,以及细胞膜受伤害的严重程度<sup>[34]</sup>。贮藏期间火龙果 MDA 质量摩尔浓度的变化,如图 10 所示。

由图 10 可知:MDA 质量摩尔浓度逐渐增加,但 CS 组的 MDA 质量摩尔浓度整体上多低于 CK 组,说明壳聚糖-丁香精油纳米乳剂能减少 MDA 积累,减慢火龙果衰老,这与文献结论一致。Xu 等<sup>[53]</sup>用葡萄柚籽提取物处理的果实中,壳聚糖-精油组的 MDA 质量摩尔浓度增加速度慢于对照组。Wang 等<sup>[41]</sup>认为壳聚糖-肉桂精油能延缓 MDA 的积累,减少氧化损伤,减慢火龙果的衰老,起到保鲜效果。Lee 等<sup>[52]</sup>用 CS-OEO 和单壳聚糖处理草莓时,贮藏 12 d 时,CS-OEO 组的 MDA 质量摩尔浓度比单壳聚糖组降低了 23.5%,说明 CS-OEO 的保鲜效果优于单壳聚糖,推测 CS-OEO 能增加膜的韧性,增强膜阻隔空气的能力,进而提高保鲜效果。

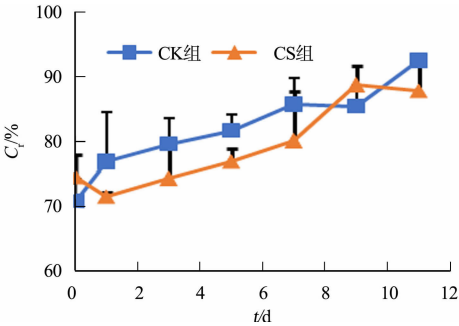


图 9 贮藏期间火龙果细胞膜通透性的变化  
Fig. 9 Changes of cell membrane permeability of pitaya during storage

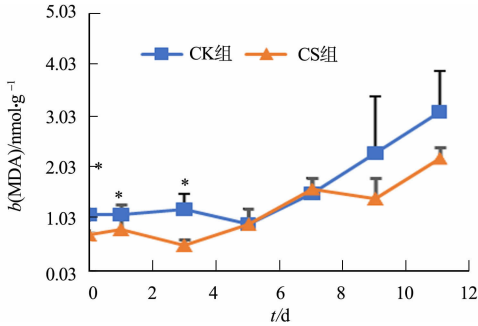


图 10 贮藏期间火龙果丙二醛质量摩尔浓度的变化  
Fig. 10 Changes of MDA molality of pitaya during storage

3.6 壳聚糖纳米乳剂对火龙果 Vc 质量分数、DPPH 自由基清除率的影响

Vc 是火龙果中重要的抗氧化剂,可在一定程度上清除活性氧,减缓果实衰老变质的速度<sup>[27]</sup>。贮藏期间火龙果 Vc 质量分数( $w(Vc)$ )的变化,如图 11 所示。

由图 11 可知:Vc 质量分数整体呈上升趋势,说明在贮藏期内两组火龙果还未完全成熟,即 Vc 的合成大于消耗,这与文献报导略有差异。黎晓媚等<sup>[54]</sup>用复配保鲜剂处理火龙果时,Vc 质量分数呈现下降趋势,原因是随着贮藏时间延长,果实自身代谢会消耗 Vc 质量分数,贮藏 3,5,7,11 d 时,CS 组的 Vc 质量分数明显高于 CK 组( $P<0.01$ ),说明 CS-CEO 在火龙果表面形成保护膜,能够减慢 Vc 的氧化分解,从而减缓果实的衰老,防止营养物质流失<sup>[55]</sup>。这与 Bian 等<sup>[56]</sup>实验结果类似,用 CS 保鲜草莓时,CS 组的 Vc 质量分数始终高于对照组。Khan 等<sup>[57]</sup>认为水果保鲜是一个复合调节的过程,CS-CEO 充当保护层并控制  $O_2$ ,  $CO_2$  的渗透性,从而降低果实的被氧化,避免抗坏血酸的进一步消耗。车雨晴等<sup>[31]</sup>的实验表明,精油与壳聚糖复合涂膜液的保鲜效果比单壳聚糖的效果更好。

DPPH 自由基作为客观评估生物抗氧化特性的指标之一,可以反映生物清除自由基的能力<sup>[58]</sup>。贮藏期间火龙果 DPPH 自由基清除率的变化,如图 12 所示。

由图 12 可知:两组的 DPPH 自由基清除率均呈下降趋势,说明火龙果的抗氧化性能逐渐减弱;贮藏 1~7 d 时,CK 组的 DPPH 自由基清除率从 28.21%降至 2.65%,其降幅为 90.61%,CS 组的 DPPH 自由基清除率从 15.5%降至 6.56%,其降幅为 57.68%,故 CS 组的 DPPH 自由基清除率下降得较慢;贮藏 9 d 时,CS 组的 DPPH 自由基清除率达到最大值 19.69%,且显著高于 CK 组( $P<0.05$ ),说明 CS-CEO 涂膜处理提高了水果在贮藏过程中的抗氧化性能,延长了水果贮藏期<sup>[59-60]</sup>。这与 Ghafoor 等<sup>[45]</sup>的实验结果类似,壳聚糖-精油处理黄瓜的抗氧化活性贮藏 14 d 时达到最大值(31.65%),然后,随着时间



推移再次下降。刘容等<sup>[51]</sup>发现贮藏 12 d 时,与对照组相比较,壳聚糖涂膜组鲜切淮山的 DPPH 自由基清除率增大了 9.6%,这是因为 CS 涂膜处理会使淮山的总酚和类黄酮质量分数增加,从而提高 DPPH 自由基清除率。Mouhoub 等<sup>[61]</sup>研究发现壳聚糖-丁香精油的 DPPH 自由基清除率比单用精油的高 86.26%,说明壳聚糖-丁香精油的抗氧化能力强于单丁香精油,对果蔬的保鲜效果更佳。

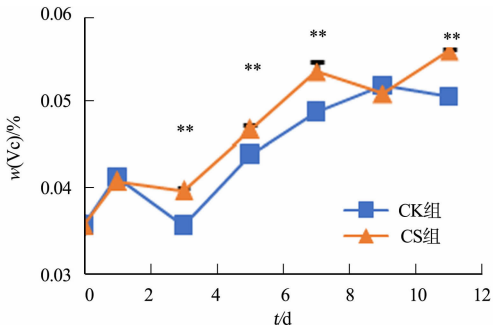


图 11 贮藏期间火龙果 Vc 质量分数的变化

Fig. 11 Changes of Vc mass fraction of pitaya during storage

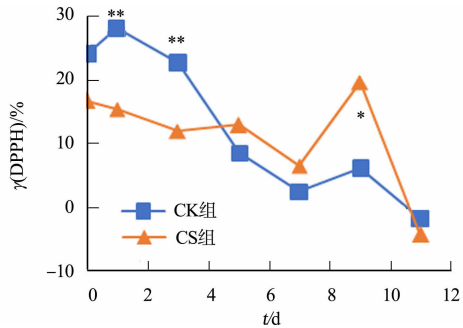


图 12 贮藏期间火龙果 DPPH 自由基清除率的变化

Fig. 12 Changes of DPPH free radical clearance rate of pitaya during storage

### 3.7 壳聚糖纳米乳剂对火龙果类黄酮质量分数的影响

黄酮类化合物是火龙果中重要的功能活性物质<sup>[62]</sup>。贮藏期间火龙果类黄酮质量分数( $w_f$ )的变化,如图 13 所示。

由图 13 可知:CS 组和 CK 组的类黄酮质量分数整体呈先上升后下降的趋势,这与文献<sup>[63]</sup>的研究结果相一致;贮藏 0 d 时,CK 组和 CS 组的类黄酮质量分数出现显著性差异,可能是火龙果自身的代谢差异引起的;贮藏 5 d 时,CK 组类黄酮质量分数达到最高值(0.000 31%),到成熟期后质量分数下降;而贮藏 9 d 时,CS 组类黄酮质量分数才达到最高值(0.000 34%),这说明壳聚糖-丁香精油纳米乳剂可以延缓果实的成熟,这与文献<sup>[51-52]</sup>的实验结果类似。

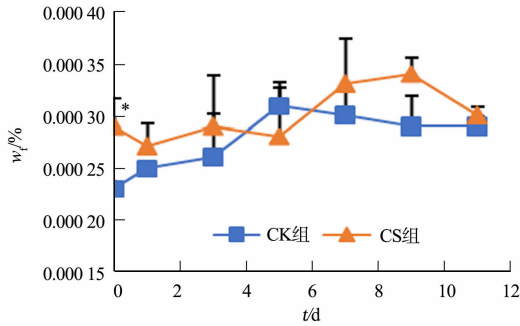


图 13 贮藏期间火龙果类黄酮质量分数的变化

Fig. 13 Changes of flavonoid mass fraction of pitaya during storage

## 4 结论

CS 组果实中 TSS、类黄酮等质量分数均晚于 CK 组达到最大值,说明壳聚糖-丁香精油纳米乳剂可以抑制火龙果成熟;pH 值与 Vc 质量分数的结果也解释了保鲜剂可能通过抑制果实呼吸代谢、氧化分解等作用,导致 CS 组果实成熟晚于 CK 组。此外,CS 组的可溶性糖和可滴定酸质量分数均高于 CK 组,证实保鲜剂可抑制火龙果的分解代谢而降低糖酸的消耗,从而保持了水果贮藏期间较好的风味。

CS 组的细胞膜通透性多低于 CK 组,说明保鲜剂可减轻细胞膜的损伤,维持其完整性和功能性,从而有效减缓果实衰老进程。CS 组 DPPH 自由基清除率和 Vc 质量分数高于 CK 组,证明了 CS 组果实的抗氧化性能高于 CK 组,即保鲜剂可减缓果实衰老进程。此外,壳聚糖-丁香精油乳剂能够抑制菌落生长。MDA 的变化证实保鲜剂一定程度上抑制了果实腐败的速度,对应实验结果贮藏至 11 d,CK 组的腐烂率已达 93.33%,而 CS 组的腐烂率为 66.67%。CS 组的腐烂率远远低于 CK 组,且保鲜效果显著,延长了火龙果的货架期。

综上所述,壳聚糖-丁香精油纳米乳剂在火龙果表面形成一层半透膜,通过抑制火龙果的呼吸代谢和养分消耗等途径抑制果实成熟,同时又通过抑制微生物生长,降低细胞膜损伤和提高抗氧化性能等途径达到抑制腐败、延缓果实衰老,从而延长货架期的保鲜目的。

### 参考文献:

[1] ORTIZ T A, TAKAHASHI L S A. Physical and chemical characteristics of pitaya fruits at physiological maturity

[J]. *Genetics and Molecular Research*, 2015, 14(4): 142-149. DOI: 10. 4238/2015. November. 18. 5.

[2] RAJ G V S B, DASH K K. Ultrasound-assisted extraction of phytochemicals from dragon fruit peel: Optimization, kinetics and thermodynamic studies[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 68: 105180. DOI: 10. 1016/j. ultsonch. 2020. 105180.

[3] RENAN K C, VIRGINIA C, WAGNER V. Dragon fruit farming by-products as an important source of several glycosylated flavonoids[J]. *Food Research International*, 2023, 173: 113400. DOI: 10. 1016/j. foodres. 2023. 113400.

[4] 胡炎婷, 黄炫强, 覃薇儒, 等. 低糖型桂花-红心火龙果复合花果酱的研制[J]. *农产品加工*, 2019(12): 6-10. DOI: 10. 16693/j. cnki. 1671-9646(X). 2019. 12. 040.

[5] JERONIMO M C, ORSINE J V C, NOVAES M R C G. Nutritional pharmacological and toxicological characteristics of pitaya (*Hylocereus undatus*): A review of the literature[J]. *African Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 2017, 11(27): 300-304. DOI: 10. 5897/AJPP2016. 4582.

[6] LI Dong, LIMWACHIRANON J, LI Li, *et al.* Involvement of energy metabolism to chilling tolerance induced by hydrogen sulfide in cold-stored banana fruit[J]. *Food Chemistry*, 2016, 208: 272-278. DOI: 10. 1016/j. foodchem. 2016. 03. 113.

[7] ROMANAZZI G, FELIZIANI E, SIVAKUMAR D. Chitosan, a biopolymer with triple action on postharvest decay of fruit and vegetables: Eliciting, antimicrobial and film-forming properties[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9: 2745. DOI: 10. 3389/fmicb. 2018. 02745.

[8] AZEVEDO A N, BUARQUE P R, CRUZ E M O, *et al.* Response surface methodology for optimisation of edible chitosan coating formulations incorporating essential oil against several foodborne pathogenic bacteria[J]. *Food Control*, 2014, 43: 1-9. DOI: 10. 1016/j. foodcont. 2014. 02. 033.

[9] LANDI L, DE MICCOLIS A R M, POLLASTRO S, *et al.* Global transcriptome analysis and identification of differentially expressed genes in strawberry after preharvest application of benzothiadiazole and chitosan[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 235. DOI: 10. 3389/fpls. 2017. 00235.

[10] YUAN Gaofeng, CHEN Xiaoe, LI Duo. Chitosan films and coatings containing essential oils: The antioxidant and antimicrobial activity, and application in food systems[J]. *Food Research International*, 2016, 89: 117-128. DOI: 10. 1016/j. foodres. 2016. 10. 004.

[11] SIROLI L, PATRIGNANI F, SERRAZANETTI D I, *et al.* Natural antimicrobials to prolong the shelf-life of minimally processed lamb's lettuce[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2015, 103: 35-44. DOI: 10. 1016/j. postharvbio. 2015. 02. 016.

[12] CHEN Xiaochen, YANG Hongying, LI Changzhu, *et al.* Enhancing the targeting performance and prolonging the antibacterial effects of clove essential oil liposomes to *Campylobacter jejuni* by antibody modification[J]. *Food Research International*, 2023, 167: 1-22. DOI: 10. 1016/j. foodres. 2023. 112736.

[13] GABRIELA O D M, MARIANELLY E, ROBERTO J V, *et al.* Development of nanocomposite chitosan films with antimicrobial activity from agave bagasse and shrimp shells[J]. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2023, 14: 100759. DOI: 10. 1016/J. JAFR. 2023. 100759.

[14] CHEN Jiaxuan, SABIR I A, QIN Yonghua. From challenges to opportunities: Unveiling the secrets of pitaya through omics studies[J]. *Scientia Horticulturae*, 2023, 321: 112357. DOI: 10. 1016/J. SCIENTA. 2023. 112357.

[15] 黄顺官, 黄月婷, 唐杰, 等. 保鲜纸处理改善采后火龙果贮藏品质的研究[J]. *食品安全导刊*, 2023, 5: 109-112. DOI: 10. 16043/j. cnki. cfs. 2023. 05. 035.

[16] 李保祥, 马鑫, 谢思旋, 等. 壳聚糖-肉桂精油复合涂膜的制备及其对核桃贮藏品质的影响[J]. *包装工程*, 2023, 14: 1-12. DOI: 10. 1094. TB. 20230519. 1423. 002.

[17] 李远颂, 朱莉, 邱月丰. 壳聚糖-植物精油复合保鲜液对圣女果保鲜效果的影响[J]. *食品工业*, 2017, 38(8): 10-13.

[18] HE Yanqiu, BOSE S K, WANG Mengyu, *et al.* Effects of chitosan oligosaccharides postharvest treatment on the quality and ripening related gene expression of cultivated strawberry fruits[J]. *Journal of Berry Research*, 2019, 9(1): 11-25. DOI: 10. 3233/JBR-180307.

[19] 牛英, 范七君, 刘冰浩, 等. 柑桔果汁可溶性固形物含量测定的影响因素及优化[J]. *现代园艺*, 2021, 44(7): 3-6. DOI: 10. 14051/j. cnki. xdy. 2021. 07. 001.

[20] 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.

[21] 毕文慧, 李丽, 姚健, 等. 复配抑菌剂对青椒细菌性软腐病防治及保鲜效果研究[J]. *保鲜与加工*, 2019, 19(6): 8-14.

- DOI:10.3969/j.issn.1009-6221.2019.06.002.
- [22] CHIT C S,OLAWUYI I F,PARK J J,*et al.* Effect of composite chitosan/sodium alginate gel coatings on the quality of fresh-cut purple-flesh sweet potato[J]. *Gels*,2022,17,8(11):747-749. DOI:10.3390/gels8110747.
- [23] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准食品中抗坏血酸的测定: GB 5009.86—2016[S]. 北京:中国标准出版社,2016.
- [24] SÁNCHEZ-GONZÁLEZ L,VARGAS M,GONZÁLEZ-MARTÍNEZ C,*et al.* Use of essential oils in bioactive edible coatings: A review[J]. *Food Engineering Reviews*,2011,3:1-16. DOI:10.1007/s12393-010-9031-3.
- [25] XING Yage,LI Xihong,XU Qinglian,*et al.* Effects of chitosan coating enriched with cinnamon oil on qualitative properties of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) [J]. *Food Chemistry*,2011,124:1443-1450. DOI:10.1016/j.foodchem.2010.07.105.
- [26] SRINIVASA P,BASKARAN R,RAMESH M,*et al.* Storage studies of mango packed using biodegradable chitosan film[J]. *European Food Research and Technology*,2002,215:504-508. DOI:10.1007/s00217-002-0591-1.
- [27] 连欢,孙占新,杨相政. 壳聚糖抑菌复合膜对蓝莓贮藏保鲜效果的影响[J]. *中国果菜*,2023,43(9):29-34. DOI:10.19590/j.cnki.1008-1038.2023.09.006.
- [28] 何靖柳,刘继,杜小琴,等. 植物精油对‘红阳’猕猴桃低温贮藏保鲜效果的影响[J]. *食品工业科技*,2015,36(9):320-326. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2015.09.061.
- [29] XING Yage,LIN Hongbin,CAO Dong,*et al.* Effect of chitosan coating with cinnamon oil on the quality and physiological attributes of China jujube fruits[J]. *BioMed Research International*,2015,2015:835151. DOI:10.1155/2015/835151.
- [30] 李元政,胡文忠. 天然植物提取物的抑菌机理及其在果蔬保鲜中的应用[J]. *食品与发酵工业*,2019,45(14):239-244. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.020026.
- [31] 车雨晴,张红,赵屹,等. 玫瑰精油和壳聚糖复合涂膜对草莓保鲜效果的影响[J]. *中国果菜*,2021,41(6):61-66. DOI:10.19590/j.cnki.1008-1038.2021.06.012.
- [32] TEERACHAICHAYUT S,HO H T. Non-destructive prediction of total soluble solids, titratable acidity and maturity index of limes by near infrared hyperspectral imaging[J]. *Postharvest Biology and Technology*,2017,133:20-25. DOI:10.1016/j.postharvbio.2017.07.005.
- [33] HU Yue,LING Yuxi,QIN Zhouyi,*et al.* Isolation, identification, and synergistic mechanism of a novel antimicrobial peptide and phenolic compound from fermented walnut meal and their application in *Rosa roxburghii* Tratt spoilage fungus[J]. *Food Chemistry*,2023,33:433-437. DOI:10.1016/j.foodchem.2023.137333.
- [34] CHEN Chuying,NIE Zhengpeng,WAN Chunpeng,*et al.* Preservation of Xinyu tangerines with an edible coating using *Ficus hirta* Vahl fruits extract-incorporated chitosan[J]. *Biomolecules*,2019,9(2):46-53. DOI:10.3390/biom9020046.
- [35] 曹立好,陈澄,周治,等. 羧甲基壳聚糖/氧化羧甲基纤维素/姜黄素复合膜的制备及其在草莓涂膜保鲜中的应用[J]. *现代食品科技*,2022,38(12):247-254. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.12.0101.
- [36] 冯学梅,王春良,梁玉文,等. 壳聚糖涂膜对金冠苹果保鲜效果研究[J]. *宁夏农林科技*,2011,52(12):115-116. DOI:10.3969/j.issn.1002-204X.2011.12.052.
- [37] 刘括,王成国,聂国朝. 氧化石墨烯-壳聚糖复合保鲜剂对‘六月红’荔枝保鲜性能的研究[J]. *食品科技*,2019,44(7):62-67. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2019.07.010.
- [38] 欧阳锐,盛潇潇,王燕珈,等. 生物可降解壳聚糖复合膜的制备及其在鸡胸肉中的保鲜应用[J]. *食品研究与开发*,2020,41(21):123-128. DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2020.21.021.
- [39] 黄婵婵,何业懿,陈慧敏,等. 七种植物精油对火龙果采后保鲜效果的初步研究[J]. *保鲜与加工*,2020,20(3):7-11. DOI:10.3969/j.issn.1009-6221.2020.03.002.
- [40] 玉新爱. 涂膜保鲜剂对火龙果贮藏品质及生理生化变化的影响[D]. 南宁:广西大学,2015.
- [41] WANG Tao,YANG Zhikun,ZHANG Changcai,*et al.* Chitosan-cinnamon essential oil/sodium alginate-TiO<sub>2</sub> bilayer films with enhanced bioactive retention property: Application for mango preservation[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*,2022,222:2843-2854. DOI:10.1016/J.IJBIOMAC.2022.10.063.
- [42] 费湘伟. 芥末油壳聚糖复配对蜜桔采后贮藏的保鲜研究[D]. 宁波:宁波大学,2014.
- [43] OLAWUYI I F,LEE W. Influence of chitosan coating and packaging materials on the quality characteristics of fresh-cut cucumber[J]. *Korean Journal of Food Preservation*,2019,26(4):371-380.

[44] 朱博,艾麦提·巴热提,孙睿. 1-MCP 处理对苹果采后品质的影响[J]. 现代食品,2018(6):192-193. DOI:10.16736/j.cnki.cn41-1434/ts.2018.06.055.

[45] GHAFOOR K,AL-JUHAIMI F Y,MOHAMED A I A,*et al.* Effects of functional coatings containing chitosan, orange peel and olive cake extracts on thequality attributes of cucumber during cold storage[J]. Plants,2022,11(14):1895-1899. DOI:10.3390/PLANTS11141895.

[46] 龚晟兰,杨治华,吴富敏,等. 植物精油结合壳聚糖涂膜对板栗采后的保鲜效果[J]. 食品工业科技,2021,42(22):316-322. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2021030151.

[47] 任红,商宪库,曹兵,等. 羧甲基壳聚糖涂膜在草莓保鲜中的应用研究[J]. 食品科技,2007,32(4):211-213. DOI:10.3969/j.issn.1005-9989.2007.04.064.

[48] 李涵,杨雪莲,贾凯杰,等. 褪黑素处理对百香果采后贮藏品质的影响[J]. 食品工业科技,2021,42(20):294-300. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2021010068.

[49] 马永亮. 丁香精油纳米乳壳聚糖复合涂膜的制备及对鲜银耳抑菌保鲜研究[D]. 长春:吉林大学,2022.

[50] 曹前荣,孙建明,李林林,等. 壳聚糖基涂膜技术在草莓贮藏保鲜中的应用[J]. 食品安全质量检测学报,2023,14(2):75-82. DOI:10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.2023.02.011.

[51] 刘容,崔媛媛. UV-C 照射与壳聚糖涂膜对鲜切淮山的保鲜效果[J]. 食品科学,2021,42(3):289-295. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200213-137.

[52] LEE D,SHAYAN M,GWON J,*et al.* Effectiveness of cellulose and chitosan nanomaterial coatings with essential oil on postharvest strawberry quality[J]. Carbohydrate Polymers,2022,298:120101. DOI:10.1016/J.CARBPOL.2022.120101.

[53] XU Wentao,PENG Xiaoli,LUO Yunbo,*et al.* Physiological and biochemical responsesof grapefruit seed extract dip on ‘Redglobe’ grape[J]. LWT-Food Science and Technology,2009,42(2):471-476. DOI:10.1016/j.lwt.2008.09.002.

[54] 黎晓媚,何雪梅,李静,等. 复配保鲜剂与美极梅奇酵母处理对火龙果品质的影响[J]. 食品与发酵工业,2023,49(21):183-189. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.034867.

[55] 任文彬,黎铭慧. L-半胱氨酸与壳聚糖复合处理对鲜切火龙果贮藏效果的影响[J]. 食品科学,2013,34(18):317-320. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201318065.

[56] BIAN Luyao,SUN Huigang,ZHOU Ying,*et al.* Enhancement of antioxidant property of N-carboxymethyl chitosan and its application in strawberry preservation[J]. Molecules,2022,27(23):8496-8499.

[57] KHAN S A,KHAN S B,KAMAL,*et al.* Antibacterial nanocomposites basedon chitosan/Co-MCM as a selective and efficient adsorbent for organic dyes[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2016,91:744-751. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2016.06.018.

[58] TOGRUL H,ARSLAN N. Carboxymethyl cellulose from sugar beet pulp cellulose as a hydrophilic polymer in coating of mandarin[J]. Journal of Food Engineering,2004,62(3):271-279.

[59] 王毅豪. 壳聚糖-埃洛石-茶多酚复合膜制备及其 3D 打印对蓝莓保鲜研究[D]. 雅安:四川农业大学,2023.

[60] KOU Xiaohong,HE Yulong,LI Yunfei,*et al.* Effect of abscisic acid (ABA) and chitosan/nano-silica/sodium alginate composite film on the color development and quality of postharvest Chinese winter jujube[J]. Food Chemistry,2019,270:385-394. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.06.151.

[61] MOUHOUB A,GUENDOOUZ A,BELKAMEL A,*et al.* Assessment of the antioxidant, antimicrobial and antibiofilm activities of essential oils for potential application of active chitosan films in food preservation[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology,2022,38(10):179. DOI:10.1007/s11274-022-03363-9.

[62] 祁建宏,董芳旭. 黄酮类化合物药理作用研究进展[J]. 北京联合大学学报,2020,34(3):89-92. DOI:10.16255/j.cnki.ldxbz.2020.03.014.

[63] HUA Qingzhu,CHEN Canbin,ZUR N T,*et al.* Metabolomic characterization of pitaya fruit from three red-skinned cultivars with different pulp colors[J]. Plant Physiology and Biochemistry,2018,126:117-125. DOI:10.1016/j.plaphy.2018.02.027.

(责任编辑: 钱筠      英文审校: 刘源岗)