



天津科技大学学报

Journal of Tianjin University of Science & Technology

ISSN 1672-6510,CN 12-1355/N

## 《天津科技大学学报》网络首发论文

题目: 壳聚糖-马齿苋涂膜对青皮无花果贮藏品质的影响  
作者: 王巧琳, 何宛宸, 代理响, 郑家轩, 侯双迪, 刘霞  
DOI: 10.13364/j.issn.1672-6510.20250021  
网络首发日期: 2025-06-20  
引用格式: 王巧琳, 何宛宸, 代理响, 郑家轩, 侯双迪, 刘霞. 壳聚糖-马齿苋涂膜对青皮无花果贮藏品质的影响[J/OL]. 天津科技大学学报.  
<https://doi.org/10.13364/j.issn.1672-6510.20250021>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。



## 壳聚糖-马齿苋涂膜对青皮无花果贮藏品质的影响

王巧琳<sup>1</sup>, 何宛宸<sup>1</sup>, 代理响<sup>1</sup>, 郑家轩<sup>1</sup>, 侯双迪<sup>3,4</sup>, 刘霞<sup>1,2</sup>

- (1. 天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300457; 2. 天津鲜食原品生物科技有限公司, 天津 300450;  
3. 天津市农业科学院农产品保鲜与加工技术研究所, 国家农产品保鲜工程技术研究中心(天津), 农业农村部农产品贮藏保鲜重点实验室, 天津市农产品采后生理与贮藏保鲜重点实验室, 天津 300384;  
4. 中国包装科研测试中心, 天津 300457)

**摘要:**以山东威海文登青皮无花果为研究对象, 针对无花果采后呼吸代谢易发生软化、褐变等问题, 分别研究了单一壳聚糖(CS)处理、壳聚糖/马齿苋提取物复合(CSPO)涂膜处理对采后无花果品质和活性氧代谢的影响。结果表明, 与对照组(CK)相比, 两个处理组均可提高采后无花果的贮藏品质, 抑制无花果的活性氧代谢, 延长无花果货架期。其中 CSPO 处理组果实的腐烂率、失重率显著降低; 硬度和色泽得到有效保持; 活性氧代谢中 Redox 系统中关键酶超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化物酶(CAT)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)酶活性分别上升 11.23%、71.31%、90.48%、70.59%。本研究明确了可食性涂膜对无花果品质和活性氧代谢的影响, 为开发无花果采后生物涂膜剂提供了理论依据。

**关键词:**壳聚糖; 马齿苋; 无花果; 品质; 活性氧代谢; 涂膜

中图分类号: TS255.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(0000)00-0000-00

### Effects of Chitosan/Purslane Treatment on Quality of *Ficus carica* L.

WANG Qiaolin<sup>1</sup>, HE Wanchen<sup>1</sup>, DAI Lixiang<sup>1</sup>, ZHENG Jiaxuan<sup>1</sup>, HOU Shuangdi<sup>3,4</sup>, LIU Xia<sup>1,2</sup>

- (1. College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China;  
2. Tianjin Fresh Food Original Biological Technology Co., Ltd., Tianjin 300450, China;  
3. Institute of Agricultural Products Preservation and Processing Technology, Tianjin Academy of Agricultural Sciences, National Agricultural Products Preservation Engineering Technology Research Center(Tianjin), Key Laboratory of Postharvest Physiology and Storage of Agricultural Products, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin Key Laboratory of Postharvest Physiology and Storage of Agricultural Products, Tianjin 300384, China;  
4. China Packaging Research and Test Center, Tianjin 300457, China)

**Abstract:** In this study, the effects of single chitosan treatment (CS) and compound chitosan/Purslane extract treatment (CSPO) on postharvest *Ficus carica* L. quality and active oxygen metabolism were studied in Wendeng District of Weihai, Shandong Province. According to respiration and metabolism of FIG after harvest, it is easy to soften and brown. The results showed that compared with the control group (CK), both treatments could improve the quality of postharvest *Ficus carica* L., inhibit the metabolism of *Ficus carica* L. and prolong the shelf life of *Ficus carica* L (figs). The compound treatment of chitosan/purslane extract (CSPO) had a more significant effect, and the decay rate and weight loss rate were significantly reduced compared with the control group (CK). Maintain a high level of hardness and color; The activity of SOD, POD, CAT and APX in Redox system increased by 11.23%, 71.31%, 90.48% and 70.59%, respectively. This study clarified the effects of edible coating on fig quality and active oxygen metabolism, and provided a theoretical basis for the development of postharvest biological coating agents for figs.

**Key words:** chitosan; purslane; *Ficus carica* L.; quality; active oxygen metabolism; coating film

无花果(*Ficus carica* L.)属于桑科植物, 其颜色通常为绿色、黄褐色、紫色或黑色, 作为营养密集型

水果,其含有丰富的维生素、矿物质以及优质脂质成分,钙质和膳食纤维含量在果品中居于前列<sup>[1]</sup>。威海青皮无花果,果实采收后其呼吸作用显著增强,生理活性处于较高水平,导致贮藏运输难度增大。在自然存放环境中,鲜果在 24~48 h 内即出现质地软化现象,表皮逐渐转为棕褐色,特有香气物质快速逸散。与此同时,果肉组织逐渐发生酶促褐变,最终引发微生物侵染而腐败。这种快速劣变过程不仅造成果品失去商品价值,更给相关产业带来经济损失。无花果果皮褐变可能是由于果实衰老和其他应激条件,包括致病性感染、低温损伤、热应激、机械损伤、干燥和活性氧代谢(ROS)的过量积累<sup>[2]</sup>。

研究发现,采后活性氧(ROS)代谢是研究果实保鲜的重要影响因素,在新鲜农产品的贮藏性和质量属性中发挥关键作用。ROS 主要包括超氧自由基( $O_2^-$ )、过氧化氢( $H_2O_2$ )和羟基自由基( $OH^\cdot$ )<sup>[3]</sup>,它们是代谢过程中各种反应的副产物,包括呼吸作用、光合作用和各种其他细胞过程<sup>[4]</sup>。在 ROS 较低浓度下,可作为信号分子发挥着重要的作用,并有助于植物的防御机制<sup>[5]</sup>,然而,果蔬采后体系中 ROS 的异常蓄积将诱发氧化应激级联反应,进而对细胞关键组分产生渐进式损伤。该进程涉及遗传物质异常、功能蛋白构想畸变及膜脂过氧化等病理现象<sup>[6]</sup>,这些分子层面的损伤通过级联放大效应,最终引发采后生理紊乱并加速腐败变质。

马齿苋是一种分布广泛的“杂草”,是世界上第八大常见植物,更可作为药用植物具有许多生物活性,包括抗氧化性<sup>[7]</sup>、镇痛、抗炎<sup>[8]</sup>、抗菌<sup>[9]</sup>、防病毒<sup>[10]</sup>。壳聚糖是一种由几丁质<sup>[11]</sup>部分去乙酰化作用产生的天然碱性多糖。壳聚糖涂膜是一种涂在产品表面的薄膜<sup>[12]</sup>,其作用是形成一层屏障,控制/减少水分流失。壳聚糖涂膜具有抗微生物、抗真菌、抗氧化性能的优点。在水果或蔬菜上涂上壳聚糖涂膜的技术多种多样,如可将其浸在壳聚糖溶液中,喷涂,刷涂或淘洗<sup>[13]</sup>。将壳聚糖作为保鲜材料,可以提高 ROS 代谢酶的活性,有效调控其异常代谢水平,阻断自由基对细胞膜系统的持续性攻击,从而维持采后生理稳态,实现果蔬商品价值的延长<sup>[14-16]</sup>。因此,在壳聚糖涂膜中加入马齿苋提取物作为抗氧化剂可以保持产品品质并延长其保质期<sup>[17-18]</sup>。

本研究以青皮无花果为试材,研究 CS 及 CSPO 处理对果实采后贮藏品质和活性氧代谢的影响,为开发无花果采后生物涂膜剂提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

青皮无花果,2023 年 9 月 5 日采摘于威海文登区果园,采后即刻放于泡沫保鲜箱,经冷藏车运输次日陆运抵达进行保鲜实验。随机挑取八成熟(果实较硬,表皮成均匀的绿色或浅绿色)、大小均匀、无虫害、无机械损伤的无花果。

果蔬保鲜专用 PE 袋(40 cm×45 cm,厚度 0.16 mm)、马齿苋提取物,南京普怡生物科技有限公司;壳聚糖,北京浩赛科技有限公司。

三氯乙酸(分析纯)、PEG 600(分析纯)、Triton X-100(生物技术级),上海麦克林生化科技有限公司;硫代巴比妥酸(分析纯)、聚乙烯吡咯烷酮(分析纯)、L-蛋氨酸(生物技术级)、氯化硝基四氮唑蓝(分析纯)、乙二胺四乙酸(分析纯)、PVPP(分析纯),上海源叶生物科技有限公司;丙酮(分析纯),天津渤化化学试剂有限公司;硫酸(分析纯),天津市化学试剂供销公司;磷酸氢二钾(分析纯),天津市津科精细化工研究所;磷酸二氢钾(分析纯),天津市津东天正精细化学试剂厂;30%过氧化氢(分析纯),天津市光复精细化工研究所。

TGL-16M 型冷冻离心机,长沙湘仪离心机仪器有限公司;PL203 型电子天平,梅特勒-托利多仪器有限公司(上海)有限公司;GY-4 型数显果实硬度计,浙江托普仪器有限公司;WR-18 型精密色差仪,深圳市威福光电科技有限公司;EPOCH-1908028 型酶标仪,美国伯腾仪器有限公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 膜的制备

量取 100 mL 2%冰醋酸溶液作为溶剂基质,加入 1.58 g 壳聚糖,60 °C 恒温水浴至溶解,再加入壳聚糖质量 50%的甘油,将混合溶液置于在 60 °C 恒温水浴反应 3 h,随后转移至超声反应器进行 30 min 分散处理,获得均质化壳聚糖成膜溶液。定量移取 25 mL 复合成膜溶液注入直径 9 cm 的一次性平板上,置于 30 °C 烘干设备中持续脱水 16 h,浸泡在 0.02 mol/L NaOH 溶液中 30 min,蒸馏水冲净后常温烘干膜片,制成单壳聚糖膜(CS 膜)。

采用同样的技术,加入 0.8%马齿苋菜可以获得复合膜液(CSPO 膜)。

#### 1.2.2 样品处理

将样品置于(1±1)°C 预冷 24 h,然后分为 3 组处理:对照组(CK)、壳聚糖处理组(CS)和壳聚

糖/马齿苋提取物处理组(CSPO)。CS组和CSPO组分别将试样进行壳聚糖溶液浸渍5~10 s、壳聚糖/马齿苋提取物复合溶液浸渍5~10 s,取出置于通风装置内进行干燥,形成功能性表面涂膜。将每组200颗无花果平均分为3小组进行平行实验,装入果蔬保鲜专用PE袋(将袋子四角和中间打0.5 cm的圆孔),放于(1±1)℃的冰柜中,每4 d取样,贮藏24 d。

### 1.2.3 腐烂率的测定

参照Villalobos等<sup>[19]</sup>的方法,主要依据表皮微生物侵染性褐斑、果目结构完整性破坏及挥发性有机酸阈值超标等三阶段劣变特征。该标准综合考察病理学表征及生化指标变化,形成多维度的采后品质衰退评价体系。

### 1.2.4 色差的测定

使用色差仪测量无花果表面的亮度(L)、红绿色度(a)、黄蓝色度(b),用纯白色、纯黑色作为对照,按照式(1)计算色差(ΔE)。

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (1)$$

### 1.2.5 失重率和硬度的测定

采用称量法测定失重率,称量无花果贮藏前的质量( $m_0$ )和贮藏后的质量( $m$ )变化,失重率(R)按照式(2)计算。

$$R = \frac{m_0 - m}{m_0} \times 100\% \quad (2)$$

在无花果果实表面等距取5个点,使用GY-4型果实硬度计对果实硬度进行测定。

### 1.2.6 丙二醛和过氧化氢的测定

参照曹建康等<sup>[20]</sup>的方法测定丙二醛(MDA)。称该反应体系由2.0 mL酶液和2.0 mL 6.7 g/L硫代巴比妥酸(TBA)溶液,混合后在沸水浴中煮沸20 min,冷却、离心,分别在450、532、600 nm波长处测定吸光度(TCA溶液为空白对照)。

参照陈莲等<sup>[21]</sup>的方法测定过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)。称取3.0 g样品加入3.0 mL预冷的丙酮,在通风橱中冰浴条件下研磨、离心,吸取1.0 mL上清液,依次加入0.1 mL 10%四氯化钛-盐酸溶液和0.2 mL浓氨水,混匀反应5 min后,离心,保留沉淀,用-20℃丙酮去除沉淀中的色素,用3.0 mL 2 mol/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶解沉淀,测定412 nm处吸光度。

### 1.2.7 超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶、抗坏血酸过氧化物酶的测定

参照曹建康等<sup>[20]</sup>的方法测定超氧化物歧化酶(SOD)。称取5 g果实,加入5 mL提取缓冲液(含5 mmol/L二硫素糖醇和5%聚乙烯吡咯烷酮),研磨成浆,离心30 min,收集上清液。

过氧化物酶(POD)活性的测定参照Kochba等<sup>[22]</sup>的方法,并稍作修改。该反应体系由3.0 mL 25 mmol/L愈创木酚和0.1 mL酶液组成,再迅速加入200 μL 0.5 mmol/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>溶液启动反应(蒸馏水为参比)。在反应15 s时开始记录反应体系在470 nm处的吸光度,每隔1 min记录1次,至少测定6次。

参照曹建康等<sup>[20]</sup>的方法测定过氧化氢酶(CAT)。该反应体系由2.9 mL 20 mmol/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>和100 μL的酶液组成。反应体系开始15 s时记录在240 nm波长处的吸光度(蒸馏水参比),每隔30 s记录一次,至少测定6次。

参照曹建康等<sup>[20]</sup>的方法测定抗坏血酸过氧化物酶(APX)。该反应体系由2.6 mL反应缓冲液(含0.1 mmol/L EDTA和0.5 mmol/L抗坏血酸)和0.1 mL酶液,最后加入0.3 mL 2 mmol/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>迅速启动反应。反应体系开始15 s时记录在290 nm波长处的吸光度,每隔30 s记录一次,至少测定6次。

## 1.3 数据处理

使用SPSS 22.0软件进行实验数据统计及显著性分析,差异显著性检验采用邓肯多重比较法,不同字母表示组间差异显著(P<0.05)。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对无花果腐烂率的影响

不同处理对无花果外观品质的影响如图1所示。CK组在贮藏12 d开始出现褐变斑,至20 d时出现大面积褐变斑,果皮呈现皱缩状态,果实整体失绿黄化,失去商品价值。CSPO对果实腐烂褐变的发生起到明显的抑制作用,CSPO组果实贮藏24 d基本无褐变斑出现,呈现出良好的可食用、可售卖状态。

不同处理对无花果腐烂率的影响见表1。CK组在贮藏8 d检测到初始腐败特征,相较而言,处理组的可见腐败症状延迟至12 d才显现。贮藏28 d后,CS、CSPO组的腐败率分别为5.9%、3.5%,而CK组腐烂率高达65%。因此,CSPO能抑制无花果果实的腐烂变质,进而延长果实的贮藏时间。

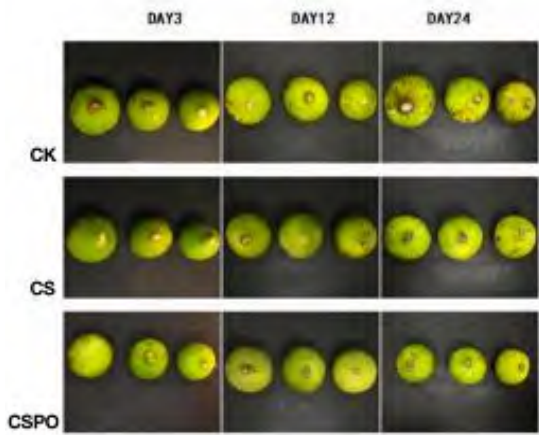


图 1 不同处理对无花果外观品质的影响

Fig. 1 Effects of different treatments on appearance quality of *Ficus carica* L.

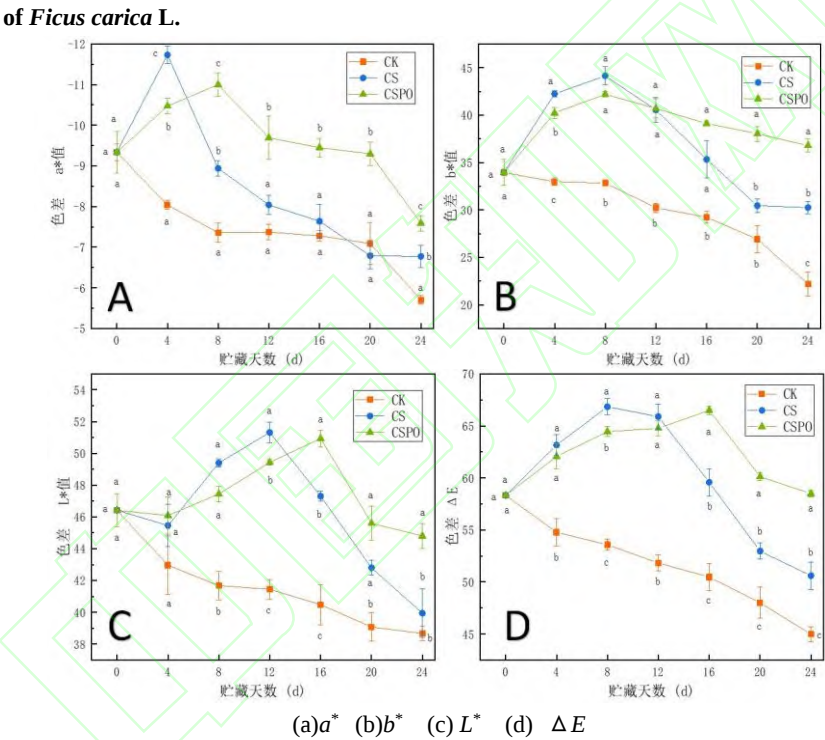
表 1 不同处理对无花果腐烂率的影响

Tab. 1 Effects of different treatments on decay rate of *Ficus carica* L.

| 处理组  | 腐烂率/% |    |     |     |     |     |
|------|-------|----|-----|-----|-----|-----|
|      | 8     | 12 | 16  | 20  | 24  | 28  |
| CK   | 2     | 7  | 19  | 26  | 42  | 65  |
| CS   | 0     | 0  | 1.1 | 2.1 | 3.2 | 5.9 |
| CSPO | 0     | 0  | 0.6 | 1.7 | 2.1 | 3.5 |

2.2 不同处理对无花果色差的影响

色差能够数据化的反映出果实外观的失绿黄化情况，不同处理对果实色差的影响如图 2 所示。



(a)  $a^*$  (b)  $b^*$  (c)  $L^*$  (d)  $\Delta E$

图 2 不同处理对果实色差的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on fruit color difference

由图 2 可知，贮藏周期延长导致 CK 组无花果表皮亮度逐渐下降，逐渐褪去绿色，变成暗黄色。CS 组和 CSPO 组均维持无花果较高的亮度，且马齿苋可以有效延长色差下降的时间，能更好保持无花果的绿色。从色差来看，无花果整体呈下降趋势，处理组的无花果色差分别在贮藏 8 d 和 16 d 之前呈上升和下降状态。马齿苋可以有效延长色差下降的时间，使无花果较长时间维持明亮的绿色水平。无花果果皮颜色主要由于花青素的积累<sup>[23]</sup>，CSPO 组可以减轻花青素的含量，有效维持无花果果实的色泽。

2.3 不同处理对无花果失重率和硬度的影响

不同处理对无花果失重率和硬度的影响如图 3 所示。在贮藏期间，由于水分和糖分等营养物质的损失<sup>[24]</sup>，果实质量随着贮藏时间的延长而减少，其减少量可看作果实营养损失。CK 组失重率上升最快，趋势最陡；CS 组失重率也呈不断上升的趋势；CSPO 组失重率较为平缓。CS、CSPO 能有效抑制失重率的上升。在贮藏 12 d 时，处理组较 CK 组均有显著性差异；贮藏 24 d 时，CSPO 组抑制失重率效果显著 ( $P < 0.05$ )。这说明 CS、CSPO 处理都能有效缓解失重率的上升，CSPO 处理的效果更佳。

无花果的硬度能够最直接反映出果实的成熟度、

口感度等贮藏品质。随着贮藏时间的增加,无花果由于细胞壁物质的降解,无花果的硬度逐渐下降。通过CK组的数据可知,在冷藏初期,细胞壁中原果胶含量大幅减少<sup>[25]</sup>,其硬度急剧下降;而CS组、CSPO组均在无花果表面形成一层多糖膜,风干后在贮藏初

期提高了无花果硬度,后期逐渐降低。贮藏24 d时,CK组的硬度为0.67 N,CS组与CSPO组的硬度分别为2.97 N、3.24 N,与CK组相比具有显著性差异( $P < 0.05$ )。

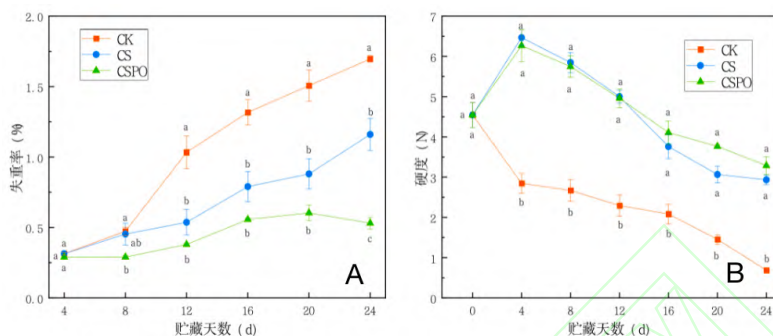


图3 不同处理对无花果失重率和硬度的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on weightlessness rate, hardness

## 2.4 不同处理对无花果 $H_2O_2$ 、MDA 的影响

$H_2O_2$  的异常蓄积会引发氧化还原稳态失衡,启动膜脂过氧化级联反应,促使MDA生物合成量显著提升<sup>[26]</sup>,破坏膜系统完整性,引发采后生理紊乱,表现为商品价值折损率上升与感官品质指标同步劣化。MDA是一种低分子质量细胞膜脂质过氧化的有毒最终产物,破坏细胞膜的结构完整性<sup>[27]</sup>,被认为是评估膜损伤程度或膜脂质过氧化程度的直接指标<sup>[28]</sup>。不同处理对无花果  $H_2O_2$ 、MDA 的影响如图4所示。

由图4(a)可知,CK组的  $H_2O_2$  的含量为同期最高。贮藏24 d时,CK的  $H_2O_2$  含量高达0.97 mol/g,

显著高于CSPO组  $H_2O_2$  含量0.82 mol/g,而CS组并无显著性差异。由图4(b)可以看出,在贮藏期间,CS组、CSPO组的MDA含量在同一时间始终低于CK组。在贮藏4 d时达到最小值,整体呈现先下降后上升的趋势;CK组则呈现相反趋势。在贮藏24 d时,相较于CK组,CS组、CSPO组分别下降16.78%、22.82%。结果表明,处理组均能有效调控果实组织内MDA生物合成速率,通过维持膜脂双分子层结构稳定性,显著延缓酶促褐变反应进程,同时能有效调控组织内  $H_2O_2$  的生物合成,通过抑制氧化应激级联反应,显著延缓采后生理系统的衰老进程。

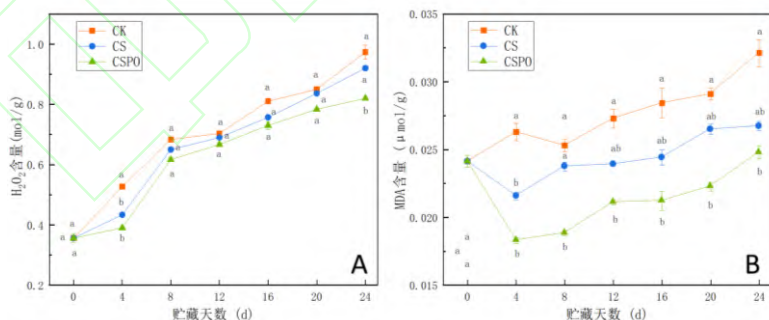


图4 不同处理对无花果  $H_2O_2$ 、MDA 的影响

Fig. 4 Effects of different treatments on  $H_2O_2$ 、MDA

## 2.5 不同处理对无花果 SOD、POD、CAT、APX 的影响

不同处理对无花果 SOD(A)、POD(B)、CAT(C)、APX(D)的影响如图5所示。

SOD 作为生物体内关键的抗氧化防御酶,能够催化超氧阴离子自由基生成氧和过氧化氢,在维持氧化还原稳态中发挥核心作用。如图5(a)所示,果实

的SOD活性表现出先增后降的变化规律,且CS组、CSPO组的峰值均出现在贮藏12 d,但CK组的峰值出现在贮藏8 d,相较于处理组峰值早4 d。值得注意的是,CSPO组一直处于较高的水平。在贮藏24 d时,CS组、CSPO组的SOD活性比CK组分别提高8.57%、11.23%,且具有显著性差异( $P < 0.05$ )。这说明处理组显著提升了果实SOD的活性,延缓峰值的到来,

增强无花果果实抗氧化活性, 延缓衰老。

POD 作为植物应激响应系统的关键组分, 其活性在采后贮藏参数波动、机械损伤或氧化胁迫、病原微生物侵染中显著增强, 通过催化过氧化氢, 氧化酚类物质产生化合物。如图 5 (b) 所示, POD 变化趋势与 SOD 一致。CSPO 组在贮藏 8 d 出现峰值, CK、CS 处理组在贮藏 12 d 出现峰值。在贮藏 24 d 时, 各组之间存在显著差异 ( $P<0.05$ ), CS 组和 CSPO 组的 POD 活性分别为 1.79 U/g、2.70 U/g, 较 CK 组活性 (1.57 U/g) 上升 13.41%、71.31%, 结果表明, 涂膜处理可以提高果实 POD 活性, 抑制酶促褐变, 减少果实表面褐斑的出现。

CAT 能够催化  $H_2O_2$  分解成  $H_2O$  和  $O_2$  进而减少  $H_2O_2$  的积累。果实组织内  $H_2O_2$  的过量蓄积会触发膜脂过氧化反应, 通过破坏氧化还原稳态, 进而促使细胞程序性死亡进程提前激活, 最终引发组织结构解体, 该生化机制是采后果实品质劣变的重要诱因。由图 5 (c) 可知, 无花果果实中 CAT 活性呈现先上升后下降的趋势, CK 组的活性为同期最低, CSPO 组为同期最高。处理组 CAT 活性均在贮藏 8 d 时达到最

大值。在贮藏 24 d 时, CS 组和 CSPO 组的 CAT 活性分别为 9.67 U/g、13.33 U/g, 较 CK 组活性 (7 U/g) 上升 38.1%、90.48% ( $P<0.05$ )。

APX 可以减少活性氧的积累, 延缓果实的衰老, 对  $H_2O_2$  清除具有关键作用。如图 5 (d) 所示, 随着贮藏周期延长, APX 活性发生规律性波动, CK 组、CS 组、CSPO 组分别在贮藏 4、8、12 d 达到峰值。贮藏 24 d 时, CS 组、CSPO 组的 APX 活性为 1.87 U/g、2.58 U/g, 较 CK 组 APX 活性 (1.51 U/g) 上升 23.53%、70.59% ( $P<0.05$ )。因此, CSPO 处理组的活性最高, 分解  $H_2O_2$  速率最快, 从而有效降低组织细胞受到过氧化氢的伤害。

总体来看, CS、CSPO 处理可以提高无花果 SOD、POD、CAT 和 APX 的活性, CSPO 处理效果更好。Satti 等<sup>[29]</sup>研究表明, 辣木叶提取物处理小麦可以使 POD、CAT、APX 和 SOD 等酶的活性上调。CSPO 复合处理有助于提高新鲜无花果对 ROS 的清除水平, 有效避免活性氧积累对果实造成的损伤, 提升果实抗氧化能力和增强果实的抗逆性, 从而维持无花果良好的生理状态。

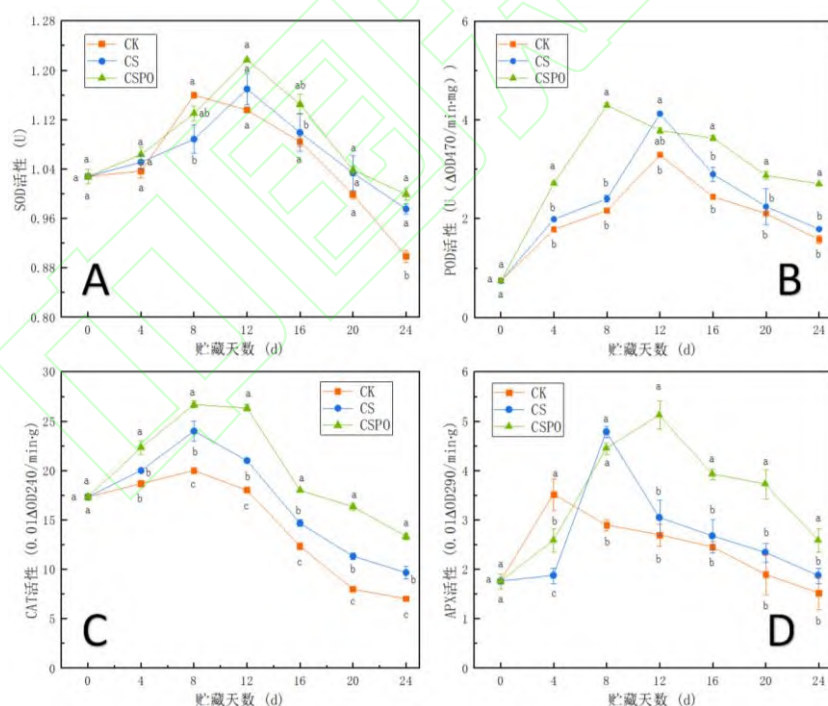


图5 不同处理对无花果 SOD(A)、POD(B)、CAT(C)、APX(D)的影响

Fig. 5 Effects of different treatments on SOD(A)、POD(B)、CAT(C)、APX(D)

## 2.6 相关性分析

为了更直观的分析无花果果实品质之间的相互影响关系, 对腐烂率、色差、失重率、硬度及生理指标 ( $H_2O_2$ 、MDA、SOD、CAT、POD、APX) 间的关系进行详细分析, 结果如图 6 所示。腐烂率与

色差各个参数及失重均呈显著正相关关系, 表明腐烂率增加会导致颜色差异和失重的增加; 与硬度则呈显著负相关, 表明硬度随腐烂率的增加而显著下降。腐烂率与  $H_2O_2$ 、MDA 呈正相关, 显示腐烂率与氧化应激产物水平的增加相关; 与 SOD、CAT、

POD、APX 呈负相关, 表明腐烂加重伴随抗氧化酶活性的下降。此外, 色差参数间呈显著正相关, SOD、CAT、POD、APX 等抗氧化酶间多呈正相关, 显示协同抵抗氧化应激的趋势。

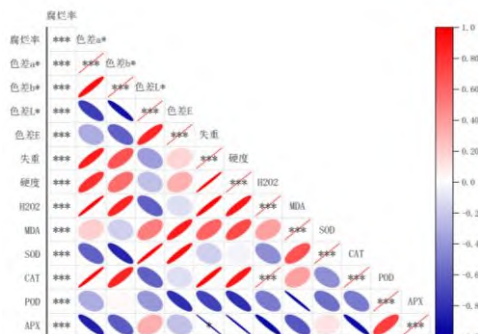


图6 样品相关性分析

Fig. 6 Sample correlation analysis

本研究通过多维度指标关联分析, 揭示了果实腐烂进程中物理品质劣变与氧化应激的互相机制, 其中抗氧化酶系统在抑制腐烂过程中的关键作用尤为显著, 这为靶向调控氧化还原平衡的精准保鲜技术提供了理论依据。

### 3 结 语

本研究以威海青皮无花果为材料, 分别研究壳聚糖处理 (CS)、壳聚糖-马齿苋提取物 (CSPO) 涂膜对果实采后品质和活性氧代谢的影响。结果表明, CS、CSPO 涂膜均对无花果保鲜具有积极作用, 有效延缓了无花果的腐烂率、失重率, 减缓了无花果的软化速度, 保持良好的硬度; 同时, 更好地维持了无花果的色泽。CSPO 组可能由于马齿苋提取物组成中含有具有抗氧化活性的酚类化合物, 有效提高 ROS 代谢相关酶 (SOD、POD、CAT、APX) 的活性, 降低了氧化损伤及活性氧产生水平、MDA 含量, 也减少了膜伤害、膜脂过氧化反应。经马齿苋提取物处理显著提高了无花果的抗氧化能力和抗氧化物质的积累, 诱导果实较好的抗逆境、抗胁迫能力, 维持活性氧代谢平衡, 从而延长无花果的保鲜时间。壳聚糖协同马齿苋涂膜对青皮无花果采后保鲜品质具重要的调控作用, 为无花果贮藏保鲜技术提供了新的思路。

### 参考文献:

[1] SEMWAL A, KUMAR R, TEOTIA U V S, et al.

Pharmacognostical evaluation of medicinally important *Ficus retusa* (leaves and bark)[J]. Journal of acute disease, 2013, 2(4): 300-303.

[2] SUN J, LIN H, ZHANG S, et al. The roles of ROS production-scavenging system in *Lasiodiplodia theobromae* (Pat.) Griff. & Maubl. induced pericarp browning and disease development of harvested longan fruit[J]. Food chemistry, 2018, 247: 16-22.

[3] TIAN S P, QIN G Z, LI B Q. Reactive oxygen species involved in regulating fruit senescence and fungal pathogenicity[J]. Plant molecular biology, 2013, 82(6): 593-602.

[4] MAQSOOD M F, SHAHBAZ M, KHALID F, et al. Biogenic nanoparticles application in agriculture for ROS mitigation and abiotic stress tolerance: a review[J]. Plant stress, 2023, 10: 100281.

[5] TAVANTI T R, DE MELO A A, MOREIRA L D, et al. Micronutrient fertilization enhances ROS scavenging system for alleviation of abiotic stresses in plants[J]. Plant physiology and biochemistry, 2021, 160: 386-396.

[6] RAJA V, MAJEED U, KANG H, et al. Abiotic stress: interplay between ROS, hormones and MAPKs[J]. Environmental and experimental botany, 2017, 137: 142-157.

[7] 梁啸, 李亚楠, 王志娜, 等. 马齿苋物质基础及其药理活性研究进展[J]. 辽宁大学学报(自然科学版), 2023, 50(4): 373-384.

[8] LI K, XIA T, JIANG Y, et al. A review on ethnopharmacology, phytochemistry, pharmacology and potential uses of *Portulaca oleracea* L.[J]. Journal of ethnopharmacology, 2024, 319: 117211.

[9] HAN Q, HUANG L, WANG Y, et al. Platinum (II)-coordinated *Portulaca oleracea* polysaccharides as metal-drug based polymers for anticancer study[J]. Colloids and surfaces B: biointerfaces, 2021, 201: 111628.

[10] CHEN M, LI D, MENG X, et al. Review of isolation, purification, structural characteristics and bioactivities of polysaccharides from *Portulaca oleracea* L.[J]. International journal of biological macromolecules, 2024, 257: 128565.

[11] LIN Y, LI N, LIN H, et al. Effects of chitosan treatment on the storability and quality properties of longan fruit during storage[J]. Food chemistry, 2020, 306: 125627.

- [12] PAZ S M D L, JULIA S, BELEM G A, et al. Chitosan as a coating for biocontrol in postharvest products: a bibliometric review[J]. *Membranes*, 2021, 11(6):421.
- [13] ROOHALLAH S R, MASOUMEH V, MOHADESEH H, et al. Advancements in coating technologies: unveiling the potential of chitosan for the preservation of fruits and vegetables[J]. *International journal of biological macromolecules*, 2024, 254(P1): 127677.
- [14] JIANG X, LIN H, LIN M, et al. A novel chitosan formulation treatment induces disease resistance of harvested litchi fruit to *Peronophythora litchii* in association with ROS metabolism[J]. *Food chemistry*, 2018, 266: 299-308.
- [15] LIN Y, CHEN G, LIN H, et al. Chitosan postharvest treatment suppresses the pulp breakdown development of longan fruit through regulating ROS metabolism[J]. *International journal of biological macromolecules*, 2020, 165: 601-608.
- [16] 郭欣, 林育钊, 邓礼艳, 等. 壳聚糖处理对采后西番莲果实贮藏期间果皮活性氧代谢[J]. *热带作物学报*, 2020, 41(12): 2526-2533.
- [17] ISNADIAN Y P, ARI S, ARTINI P. Incorporation of purslane extract (*Portulaca oleracea*) to chitosan edible film as a packaging material to prevent damage of mozzarella cheese during storage[J]. *IOP Conference series: earth and environmental science*, 2021, 828(1): 012026.
- [18] FAN X, ZHANG B, ZHANG X, et al. Incorporating *Portulaca oleracea* extract endows the chitosan-starch film with antioxidant capacity for chilled meat preservation[J]. *Food chemistry: X*, 2023, 18: 100662.
- [19] VILLALOBOS M D, SEERRADILLA M J, MAT ÍN A, et al. Use of equilibrium modified atmosphere packaging for preservation of 'San Antonio' and 'Banane' breba crops[J]. *Postharvest biology and technology*, 2014, 98: 14-22.
- [20] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后活性氧生理生化实验指导[M]. 北京:中国轻工业出版社, 2017: 120-154.
- [21] 陈莲, 陈梦茵, 林河通, 等. 解偶联剂 DNP 处理对采后龙眼果实果皮褐变和活性氧代谢的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(11): 4019-4026.
- [22] KOCHBA J, LAVEE S, SPIEGEL-ROY P, et al. Differences in peroxidase activity and isoenzymes in embryogenic and non-embryogenic "Shamouti" orange ovular callus lines[J]. *Plant and cell physiology*, 1976, 18(2):463-467.
- [23] DUEÑAS M, PÉREZ-ALONSO J J, SANTOS-BUELGA C, et al. Anthocyanin composition in fig (*Ficus carica* L.)[J]. *Journal of food composition and analysis*, 2007, 21(2): 107-115.
- [24] POKHREL S, SHAH S, ADHIKARI H S, et al. Synthesis and characterization of chitosan from prawn shells and study of its effects on weight loss of *Myrica esculenta* fruits[J]. *Asian journal of chemistry*, 2021, 33(2): 299-306.
- [25] 李宁, 阎瑞香, 王步江. 不同包装方式对白灵菇低温保鲜效果的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(7): 377-382.
- [26] YANG H, WU F, CHENG J, et al. Reduced chilling injury in cucumber by nitric oxide and the antioxidant response[J]. *Food chemistry*, 2011, 127(3): 1237-1242.
- [27] ROMANAZZI G, FELIZIANI E, SANTINI M, et al. Effectiveness of postharvest treatment with chitosan and other resistance inducers in the control of storage decay of strawberry[J]. *Postharvest biology and technology*, 2013, 75: 24-27.
- [28] JIANG Y, YU L, HU Y, et al. Electrostatic spraying of chitosan coating with different deacetylation degree for strawberry preservation[J]. *International journal of biological macromolecules*, 2019, 139: 1232-1238.
- [29] SATTI S H, RAJA N I, IKRAM M, et al. Plant-based titanium dioxide nanoparticles trigger biochemical and proteome modifications in *Triticum aestivum* L. under biotic stress of *Puccinia striiformis*[J]. *Molecules*, 2022, 27(13): 4274.