

## 壳聚糖调节膜透性和能量代谢减缓沃柑果实采后品质劣变

刘帅民<sup>1</sup>, 王淋靓<sup>1</sup>, 冯春梅<sup>1\*</sup>, 黎新荣<sup>1</sup>, 刘港帅<sup>2</sup>, 黄燕婷<sup>1</sup>, 陈蕊蕊<sup>1</sup>, 檀业维<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>广西壮族自治区亚热带作物研究所 广西南宁 530001

<sup>2</sup>中国农业大学食品科学与营养工程学院 北京 100083)

**摘要** 壳聚糖是一种具有多重生物活性的天然多糖,可参与生物体多种生理活动。本文研究了 2%壳聚糖涂膜处理,对采后沃柑果实在 25 °C 贮藏期间,果实贮藏和营养品质、膜透性及能量代谢的影响。结果显示:壳聚糖有效延缓了采后沃柑果实在贮藏期间可溶性固形物含量、总可滴定酸含量的下降,失重率和固酸比的上升;有效抑制了类胡萝卜素、抗坏血酸、总酚和类黄酮含量的下降。研究表明,壳聚糖显著抑制了膜透性上升,表现为贮藏期间果实组织更低的相对电导率和丙二醛含量。此外,壳聚糖通过诱导 H<sup>+</sup>-ATPase、Ca<sup>2+</sup>-ATPase、琥珀酸脱氢酶、细胞色素 C 氧化酶活性,使沃柑果实在贮藏期间维持较高的能量状态,表现为三磷酸腺苷和能荷水平上升。结论:壳聚糖能通过调节膜透性和能量代谢,有效维持采后沃柑果实贮藏和营养品质,延缓其采后衰老进程。

**关键词** 壳聚糖;沃柑果实;采后品质;膜透性;能量代谢

**文章编号** 1009-7848(2023)01-0250-09 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2023.01.024

柑桔属芸香科柑桔亚科植物,广泛栽培于温暖湿润的热带和亚热带地区,是全球水果产业中最重要的水果之一,因色香味兼优,且富含有机酸、维生素、多糖、类胡萝卜素和柠檬苦素等营养成分而深受人们喜爱<sup>[1-4]</sup>。此外,柑桔果实中还含有酚酸和类黄酮等功能性物质,在抗炎、抗癌、抗氧化、抗过敏方面也具有重要作用<sup>[5-6]</sup>。柑桔果实采后由于呼吸代谢、蒸腾作用等生理活动仍在进行,因此贮藏过程中会出现失重、软化、风味变化等品质劣变情况,且极易受微生物侵染出现腐烂,造成严重的食物浪费和经济损失<sup>[3,7-8]</sup>。为了延长采后柑桔果实货架期,多种物理、化学和生物处理方法被应用于柑桔果实采后保鲜,包括气调包装<sup>[9]</sup>、热激<sup>[10]</sup>、壳寡糖<sup>[11]</sup>、抗菌酵母处理<sup>[12]</sup>以及各类复合处理等<sup>[8,13]</sup>都取得了一定的成效。然而,随着人们的健康和环保意识增强,开发更加安全且操作简便的保鲜技术仍是柑桔产业中需要重点关注的问题。

壳聚糖是一种从甲壳类动物壳或某些真菌细胞壁中提取的天然多糖,其骨架上具有的 3 个官

能团(C2 上的氨基、C3 与 C6 上的伯羟基和仲羟基)使之具有多重生物活性<sup>[14]</sup>,如优异的成膜性、生物相容性、生物安全性、抗氧化性和广谱抗菌性等<sup>[7,15-16]</sup>。壳聚糖优异的生物学性能使其在果蔬采后保鲜领域一直受到广泛的关注与应用,例如:壳聚糖处理可通过调节采后油桃果实呼吸代谢改变果实氧化还原状态,从而延缓果实衰老<sup>[17]</sup>。Jiang 等<sup>[18]</sup>应用壳聚糖处理荔枝果实发现,1%壳聚糖处理能有效抑制果皮细胞膜通透性增加,维持果皮中花色苷和类黄酮含量,保持荔枝果实采后贮藏品质。李婷等<sup>[19]</sup>用魔芋葡甘露聚糖-壳聚糖复合处理北碚 447 锦橙果实,发现复合处理可较好地维持果实采后品质,有效延缓果实总糖、总可滴定酸(Total titratable acidity,TTA)、抗坏血酸(Ascorbic acid,AsA)、总黄酮、总酚(Total phenolics,TP)含量下降,并抑制果实丙二醛(Malondialdehyde,MDA)积累。Chen 等<sup>[7]</sup>发现壳聚糖涂膜处理(1.5%)可有效减轻红柚果实低温贮藏条件下汁囊分化和粒化发展,并通过活化三羧酸循环来提高能量供应以延缓果实衰老。这些研究表明壳聚糖作为天然提取物,在调节采后果蔬生理活动中发挥重要作用。然而,壳聚糖涂膜处理对杂交柑桔品种沃柑(坦普尔桔橙与丹西红桔的杂交品种)果实的采后品质调控尚未见报道。

本研究调查了壳聚糖涂膜处理采后沃柑果实

收稿日期:2022-01-05

基金项目:广西重点研发计划项目(桂科 AB21196056);广西农业科学院基本科研业务专项资助项目(桂科农 2021YT142)

第一作者:刘帅民,男,硕士生

通信作者:冯春梅 E-mail:516249910@qq.com

在常温贮藏条件下对感官和营养品质的影响,分析了壳聚糖减缓沃柑果实采后衰老的潜在机制。以期为壳聚糖应用于沃柑果实采后贮藏保鲜提供理论依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 果实材料与试剂

供试沃柑(渝审柑桔 2012002)采摘于广西武鸣区一个商业种植园(108°40'E、23°26'N),果实运抵实验室后(20±1)℃、相对湿度 85%±5%贮藏过夜消除田间热,之后用二氧化氯溶液(100 mg/L)对果实进行清洗,自然晾干后选择颜色、形状、大小一致且无机械伤和病虫害的果实进行下一步试验。

β-胡萝卜素、叶黄素、抗坏血酸、乙腈、甲醇和四氢呋喃,北京索莱宝科技有限公司,纯度均为色谱级;三磷酸腺苷(Adenosine triphosphate,ATP)、二磷酸腺苷(Adenosine diphosphate,ADP)、单磷酸腺苷(Adenosine monophosphate,AMP),上海源叶生物科技有限公司,纯度为色谱级;腺苷三磷酸酶试剂盒(YX-W-A700,YX-W-A701)、细胞色素 C 氧化酶(Cytochrome C oxidase,CCO)分析试剂盒(YX-W-C304)、琥珀酸脱氢酶(Succinate dehydrogenase,SDH)分析试剂盒(YX-W-B102),合肥莱尔生物科技有限公司;其它所用试剂皆为分析纯级。

### 1.2 仪器与设备

FJ200-S 数显高速分散均质机,上海标本模型厂;TG16-W 微量高速离心机,湖南湘仪仪器有限公司;手持式折光仪,上海淋誉贸易有限公司;Agilent 1260 高效液相色谱仪(High performance liquid chromatography,HPLC),美国 Agilent 科技有限公司;SpectraMax 190 全波长酶标仪,美国 MD 分子仪器公司。

### 1.3 方法

1.3.1 果实处理 自然晾干后的沃柑果实随机分成 2 组,每组 120 个果实。处理组用 2%壳聚糖溶液(m/v,用 1%乙酸制备,该处理浓度经预试验优化获得)浸泡 2 min,另一组沃柑果实在 1%乙酸溶液中浸泡相同时间作为对照。处理组和对照组果实自然晾干后,每 4 个果实分装在 1 个聚乙烯

薄膜袋中(厚度:0.01 mm,长宽规格:30 cm×20 cm)。所有果实置于(25±1)℃、相对湿度 85%±5%条件下贮藏 20 d,在贮藏第 0,5,10,15,20 天分别测定处理组和对照组的果实失重率、相对电导率、可溶性固形物含量(Soluble solid content,SSC)和 TTA,以上指标每个处理的每个测定时间点设 3 组生物学重复,每个生物学重复为 4 个果实(1 袋)。与此同时,对处理组和对照组果实进行果肉取样,用液氮速冻并捣碎,贮存于-80℃冰箱中以供后续生化指标测定。

1.3.2 贮藏品质分析 在每个测定时间点对沃柑果实进行称重。失重率根据以下公式计算:失重率=(初始果实质量(0 d)-测定时间点果实质量)/初始果实质量(0 d)×100%。SSC 利用手持折光仪进行测定:取 10 g 果汁在 8 000×g 条件下离心 15 min,取一滴上清液滴于手持折光仪,测定其 SSC,单位为°Brix。TTA 测定:取上述上清液 2 mL,用蒸馏水稀释至 20 mL,然后用 0.01 mol/L NaOH 溶液滴定至 pH 8.1,TTA 以柠檬酸质量分数计算,表示为果肉中柠檬酸的百分含量(%),固酸比表示为 SSC 含量与 TTA 含量的比值。

1.3.3 营养品质分析 类胡萝卜素和 AsA 含量根据课题组先前建立的 HPLC 方法进行测定<sup>[20]</sup>;TP 含量参照 Fan 等<sup>[21]</sup>的方法进行测定,用没食子酸标准品制作标准曲线,TP 含量以没食子酸质量分数计算;类黄酮含量参照 Li 等<sup>[22]</sup>的方法进行测定。用芦丁绘制标准曲线,类黄酮含量以芦丁质量分数计算。以上指标单位均表示为 g/kg 鲜重(Fresh weight,FW)。

1.3.4 膜通透性分析 细胞膜通透性根据果肉组织的相对电导率进行评估<sup>[7]</sup>,取自 4 个果实的 12 片果瓣组织,用蒸馏水漂洗干净。随后将果瓣转移至含 300 mL 蒸馏水的锥形瓶中,在 25℃条件下静置 20 min 后,用电导率仪测量初始电导率( $P_0$ )。然后将果瓣样品溶液煮沸 20 min,迅速冷却至 25℃并测定果瓣样品溶液最终电导率( $P_1$ )。相对电导率(%)的计算公式为:相对电导率= $P_0/P_1 \times 100\%$ 。MDA 含量根据 Zhang 等<sup>[23]</sup>的方法进行测定,单位为  $\mu\text{mol/kg FW}$ 。

1.3.5 能量水平分析 ATP、ADP 和 AMP 含量参照 Liu 等<sup>[24]</sup>的方法进行测定,通过 HPLC 进行分

析,配备分析柱 ZORBAX Extend-C18 (4.6 mm × 250 mm, 5 μm),进样量 10 μL,流动相磷酸盐缓冲液(0.2 mol/L,pH 7.0),流速为 1.2 mL/min,洗脱时间 20 min。通过可变波长紫外(UV)检测器在 254 nm 波长处测定吸光度,通过与标准品峰面积和保留时间进行比较,计算沃柑果实样品中 ATP、ADP 和 AMP 的含量,单位为 mg/kg FW。能荷(Energy charge,EC)根据以下公式计算:EC = ([ATP] + 0.5 × [ADP])/([ATP] + [ADP] + [AMP])。

1.3.6 能量代谢相关酶活性分析 粗线粒体的提取参照 Chumyam 等<sup>[25]</sup>的方法,粗线粒体提取液置于 4 °C 保存,以供后续能量代谢相关酶活性测定。线粒体膜 H<sup>+</sup>-ATPase、Ca<sup>2+</sup>-ATPase 活性测定根据腺苷三磷酸酶试剂盒(YX-W-A700,YX-W-A701)操作说明进行。1 个酶活力单位(U)定义为每 h 每 g 组织分解 ATP 产生 1 μmol 无机磷。SDH 通过 SDH 分析试剂盒(YX-W-B102)进行活性测定,1 个酶活力单位(U)定义为在每 g 组织在反应体系中每 min 消耗 1 nmol 2,6-二氯酚靛酚。CCO 活性根据 CCO 活性测定试剂盒(YX-W-C304)操作说明进行,1 个酶活力单位(U)定义每 g 组织每 min 产生 1 nmol 无机磷。H<sup>+</sup>-ATPase、

Ca<sup>2+</sup>-ATPase、CCO 和 SDH 活性单位均表示为 U/g FW。

#### 1.4 数据统计与分析

用 SPSS 26.0 软件对试验数据进行单因素方差分析,用 Sigmaplot 14.0 软件进行图表绘制。\*表示在  $P < 0.05$  水平上差异显著,\*\*表示在  $P < 0.01$  水平上差异显著。

## 2 结果与分析

### 2.1 壳聚糖涂膜处理对采后沃柑果实贮藏品质的影响

壳聚糖涂膜处理显著抑制了沃柑果实采后失重,随着贮藏时间的延长,对照组和处理组果实失重率持续升高。整个贮藏期间,壳聚糖处理果实的失重率平均低于对照果实的 19.30%(图 1a)。壳聚糖作为一种可食半透性防腐膜,可以通过抑制果实采后蒸腾作用,减少贮藏期间水分损失<sup>[7,14]</sup>。这在壳聚糖应用于其它柑桔类果实,如锦橙、金桔和红柚的研究中都得到证实<sup>[7,16,19]</sup>。SSC 和 TTA 是柑橘类果实重要的风味指标,分别反映果实的甜度和酸度<sup>[26]</sup>。在本研究中,SSC 和 TTA 在贮藏期间均呈现不断下降的趋势,与对照组果实相比,壳聚糖

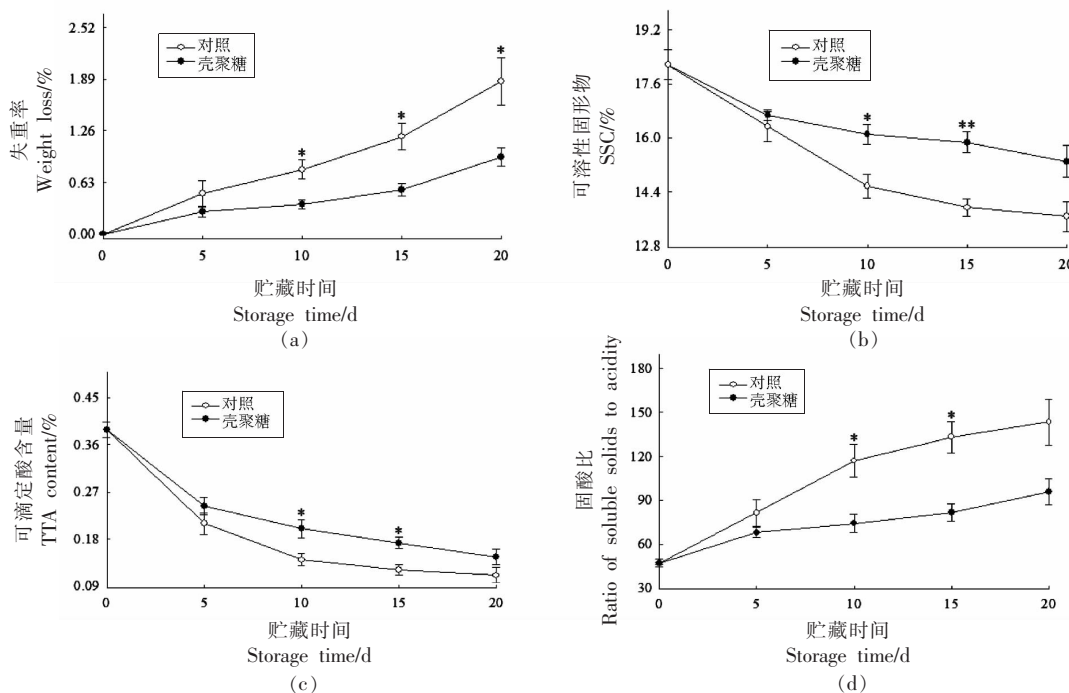


图 1 壳聚糖涂膜处理对采后沃柑果实感官品质的影响

Fig.1 Effect of chitosan coating treatment on the sensory quality of postharvest fertile orange fruit

涂膜处理有效延缓了沃柑果实贮藏期间 SSC 和 TTA 下降(图 1b,1c)。以上结果表明,壳聚糖涂膜处理可以有效减缓沃柑果实在采后贮藏过程中由于呼吸代谢等造成的糖类和有机酸损耗,延缓果实衰老,维持果实品质。这与壳聚糖处理油桃<sup>[17]</sup>、番木瓜<sup>[15]</sup>果实得到的结论一致。固酸比是决定果实口感和风味的重要评价指标<sup>[27]</sup>,与对照组果实相比,壳聚糖涂膜处理有效延缓了沃柑果实贮藏期间固酸比上升(图 1d),这在一定程度上保留了沃柑果实的特有风味。

## 2.2 壳聚糖涂膜处理对采后沃柑果实营养品质的影响

类胡萝卜素是构成柑桔类果实色泽的主要色素,其不仅在果实外观品质的形成中起到重要作用,同时也具备重要的营养价值,例如:其可作为维生素 A 的生物合成前体,对心血管疾病和致癌性慢性疾病等有一定的预防作用<sup>[5,28]</sup>。如图 2a 所示,对照组和处理组果实类胡萝卜素含量在整个贮藏期间呈先上升后下降的趋势,然而从贮藏第 10 天起,壳聚糖处理组类胡萝卜素含量开始显著高于对照组,这表明壳聚糖涂膜处理可以减缓类

胡萝卜素分解,从而维持沃柑果实采后贮藏期间的营养品质。AsA 是柑桔类果实中重要的营养成分,在人体中可预防皮肤及其他组织衰老,还可促进铁吸收,预防缺铁性贫血,同时是果实中高效的抗氧化成分,能与果实中其它抗氧化因子协同作用,有效清除多种活性氧,维持果实品质<sup>[2,5,26]</sup>。对照组和壳聚糖处理组果实在贮藏过程中,AsA 含量整体呈下降趋势,然而经壳聚糖涂膜处理的沃柑果实从贮藏第 10 天起,AsA 含量开始显著高于对照组(图 2b),说明壳聚糖涂膜处理可有效减缓沃柑果实在贮藏期间 AsA 的降解,这与壳聚糖处理采后番木瓜<sup>[15]</sup>和番石榴<sup>[29]</sup>获得的效果一致。果蔬中酚类和类黄酮化合物可以调节人体免疫力,对心血管和肿瘤类疾病都具有一定的预防和辅助治疗作用,此外,酚类化合物和类黄酮类化合物结构中的酚羟基赋予其强大的抗氧化能力,可以通过直接清除活性氧或与 AsA、维生素 E 等协同作用维持果实内部抗氧化活性,延缓果实衰老<sup>[19-21]</sup>。如图 2c 所示,沃柑果实 TP 含量在整个贮藏期间呈先上升后下降的趋势,然而从贮藏第 10 天开始,壳聚糖涂膜处理果实的 TP 含量显著高于对照果实

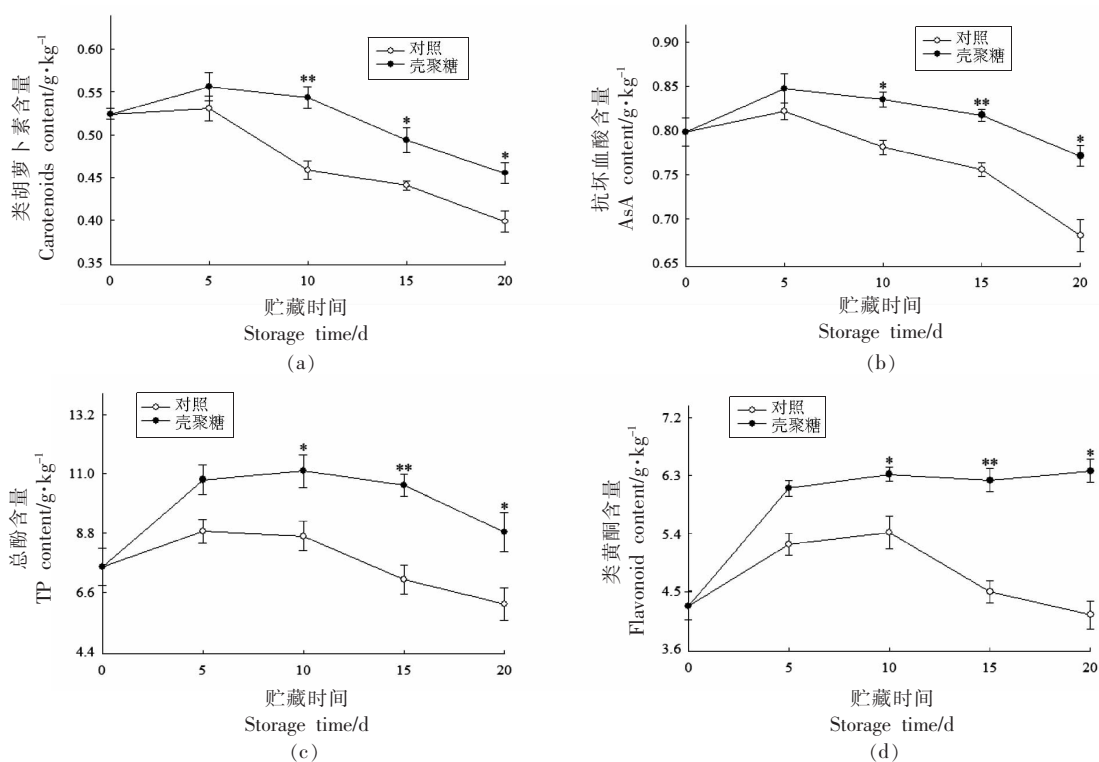


图 2 壳聚糖涂膜处理对采后沃柑果实营养品质的影响

Fig.2 Effect of chitosan coating treatment on the nutritional quality of postharvest fertile orange fruit

(图2c)。沃柑果实中类黄酮化合物含量在贮藏初期均呈上升趋势,然而从贮藏第10天开始,壳聚糖处理果实的类黄酮化合物含量显著高于对照组果实,且直到贮藏结束一直维持在较高水平,而对照组果实的类黄酮含量从贮藏第10天后开始下降(图2d)。以上结果表明,壳聚糖涂膜处理能够在一定程度上促进沃柑果实贮藏期间总酚和类黄酮的积累,从而维持果实较好的抗氧化活性和营养品质。

### 2.3 壳聚糖涂膜处理对采后沃柑果实膜透性的影响

采后果实衰老的关键因素之一是细胞膜完整性和功能性的丧失,这将导致细胞的去区室化和生理代谢紊乱,进而导致果实衰老<sup>[23]</sup>。膜损伤是由于活性氧等自由基靶向膜脂不饱和脂肪酸侧链,

造成细胞膜透性的增加和末端氧化产物MDA的积累<sup>[23,30]</sup>。相对电导率可以反映果实组织的膜透性,而MDA含量则通常作为衡量膜脂过氧化程度的指标。对照果实的相对电导率从贮藏初始值 $18.8\% \pm 6\%$ 持续上升至贮藏20d时的 $48.6\% \pm 5\%$ ,而壳聚糖涂膜处理显著抑制了贮藏期间果实组织相对电导率的增加(图3a)。对照和壳聚糖处理果实MDA含量在贮藏过程中呈现不断上升的趋势,然而从贮藏第10天开始,对照果实的MDA积累量显著高于壳聚糖处理果实(图3b)。在本研究中,壳聚糖涂膜处理显著抑制沃柑果实在贮藏期间相对电导率增加和MDA积累,这表明壳聚糖涂膜处理可通过减少膜的氧化损伤来延缓沃柑果实衰老,这与壳聚糖处理红柚<sup>[7]</sup>、油桃<sup>[17]</sup>和龙眼<sup>[30]</sup>果实的研究结果一致。

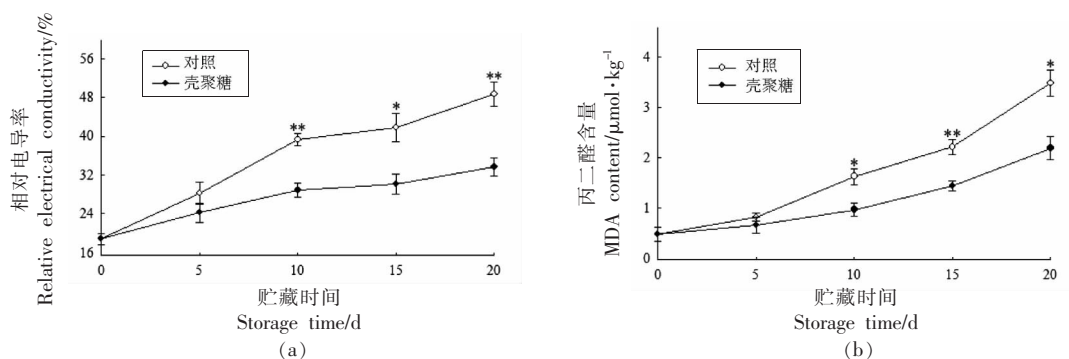


图3 壳聚糖涂膜处理对采后沃柑果实膜透性的影响

Fig.3 Effect of chitosan coating treatment on the membrane permeability of postharvest fertile orange fruit

### 2.4 壳聚糖涂膜处理对沃柑果实能量水平的影响

在整个贮藏期间,对照和壳聚糖处理果实ATP和ADP含量都呈不断下降的趋势(图4a,4b)。然而相比于对照果实,壳聚糖处理显著抑制了果实贮藏期间ATP和ADP含量的降低(图4a,4b)。对照组和处理组果实AMP含量在贮藏期间持续上升,而对照果实AMP含量在贮藏过程中始终高于壳聚糖处理组果实(图4c)。对照组和处理组果实EC值在整个贮藏过程中呈不断下降的趋势,然而从贮藏第5天开始,壳聚糖处理果实EC值显著高于对照果实并直至贮藏结束(图4d)。当前已有大量研究表明,采后园艺作物能量水平与其衰老进程和抗逆能力密切相关,果实能量供应不足会限制膜脂生物合成,导致膜脂合成和降解

代谢失衡,最终导致细胞膜的完整性丧失和果实衰老<sup>[24,31]</sup>。Romero等<sup>[32]</sup>发现,利用外源ATP处理柑桔果实可诱导提高其内源ATP水平,且较高的细胞能量水平能减轻膜脂和膜蛋白氧化损伤所导致的细胞膜完整性丧失。此外,许多采后处理技术可通过提高采后果蔬的能量水平延缓其衰老,例如:褪黑素处理荔枝<sup>[33]</sup>,1-MCP处理油桃<sup>[34]</sup>,纳米包装应用于金针菇<sup>[35]</sup>等。在本研究中,壳聚糖涂膜处理可有效延缓沃柑果实在常温贮藏期间ATP含量和EC值的下降,使果实维持较高的能量状态,这有助于维持细胞膜的完整性。类似地,Chen等<sup>[7]</sup>用壳聚糖处理红柚果实发现,壳聚糖处理可通过维持红柚果实能量供应水平保护其膜系统完整性,进而延缓红柚果实衰老。

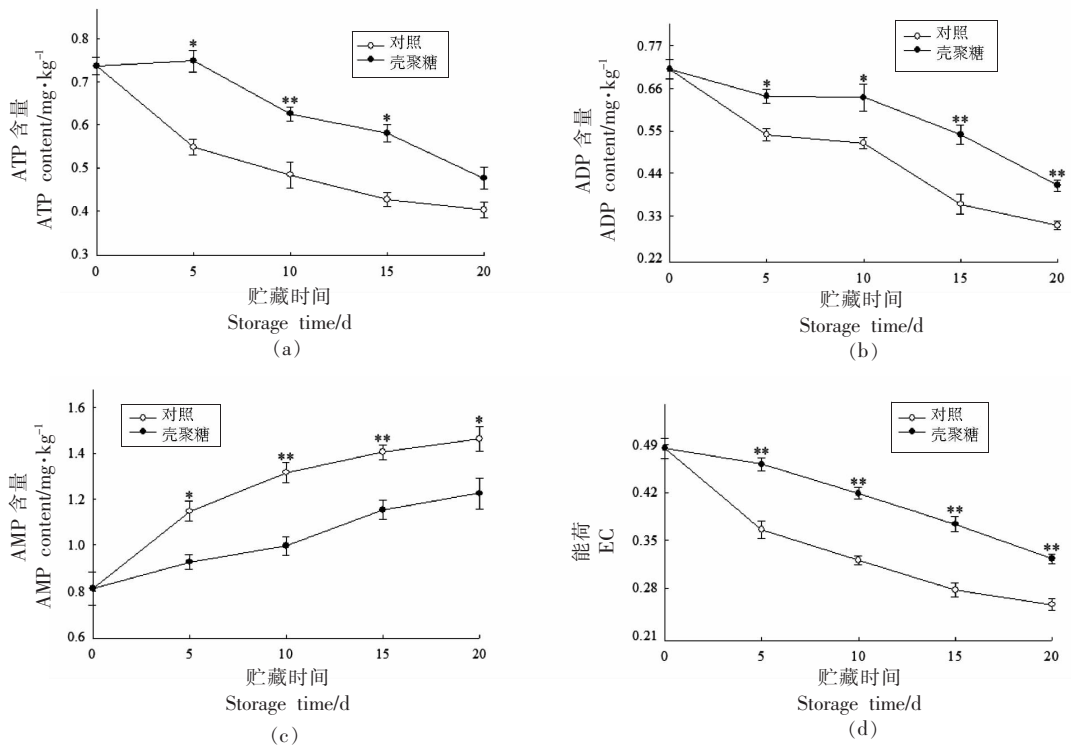


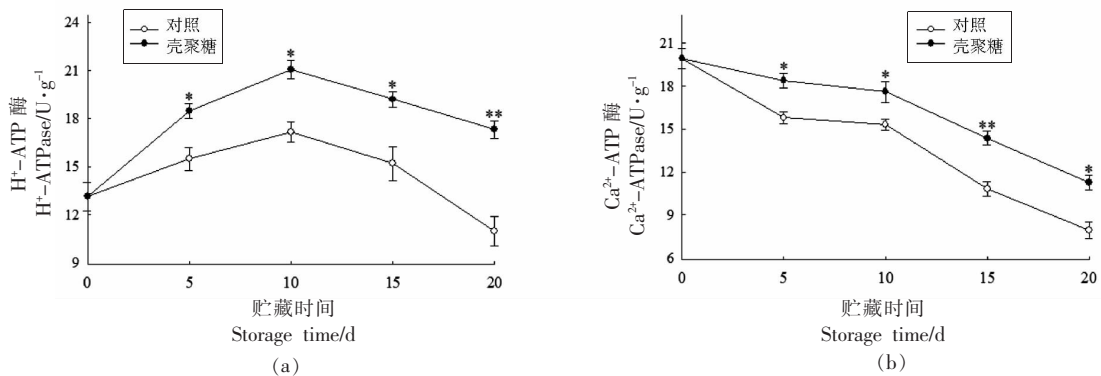
图 4 壳聚糖涂膜处理对采后沃柑果实能量水平的影响

Fig.4 Effect of chitosan coating treatment on the energy status of postharvest fertile orange fruit

### 2.5 壳聚糖涂膜处理对采后沃柑果实能量代谢相关酶活性的影响

$H^+$ -ATPase 和  $Ca^{2+}$ -ATPase 可分别将  $H^+$  和  $Ca^{2+}$  转运到细胞外, 维持细胞稳态和正常生理功能, 同时偶联 ATP 水解释放能量, 为细胞内的耗能反应维持能量供应<sup>[33-35]</sup>。SDH 在三羧酸循环中催化琥珀酸脱氢转化为富马酸, 同时偶联 ATP 生成, 其活性通常作为评价三羧酸循环效率的标志<sup>[7,33]</sup>。CCO 位于线粒体内膜, 是一种重要的电子传递链末端氧化酶, 通过细胞色素系统将呼吸底物的电

子直接传递给分子氧, 并通过氧化磷酸化产生 ATP<sup>[7,35]</sup>。以上能量代谢关键酶的失活可能导致线粒体功能障碍和 ATP 供应不足, 最终导致细胞衰老和死亡<sup>[24-25]</sup>。在本研究中, 对照和壳聚糖处理果实的  $H^+$ -ATPase 和 CCO 活性在贮藏过程中呈现先上升后下降的趋势,  $Ca^{2+}$ -ATPase 和 SDH 活性在整个贮藏过程中则呈现不断下降趋势 (图 5a~5d)。然而壳聚糖涂膜处理显著诱导提高了沃柑果实贮藏期间  $H^+$ -ATPase、 $Ca^{2+}$ -ATPase、SDH、CCO 活性, 这表明壳聚糖涂膜处理可能通过活化能量



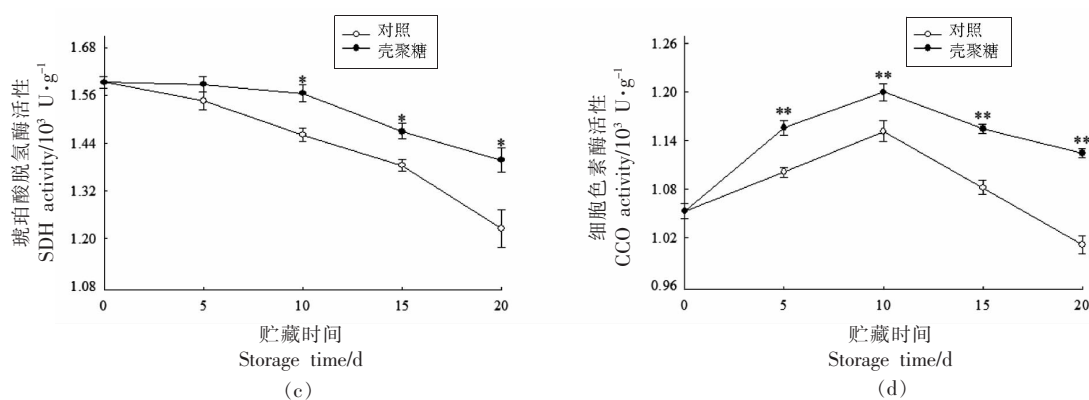


图5 壳聚糖涂膜处理对采后沃柑果实能量代谢相关酶活性的影响

Fig.5 Effect of chitosan coating treatment on the energy metabolism-related enzyme activities of postharvest fertile orange fruit

代谢途径关键酶来提高沃柑果实能量水平,从而延缓沃柑果实衰老,提高其耐贮性。这与壳聚糖处理可通过活化采后红柚<sup>[7]</sup>和油桃<sup>[7]</sup>果实的能量代谢途径以增强其耐贮性的研究结果一致。

### 3 结论

2%壳聚糖涂膜处理可以通过提高果实能量水平维持膜系统完整性,进而延缓沃柑果实衰老,有效减缓沃柑果实在 25 °C 贮藏期间的品质劣变。

### 参 考 文 献

- [1] 叶兴乾, 徐贵华, 方忠祥, 等. 柑橘属类黄酮及其生理活性[J]. 中国食品学报, 2008, 8(5): 1-7.  
YE X Q, XU G H, FANG Z X, et al. Citrus flavonoids and their physiological activity[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2008, 8(5): 1-7.
- [2] SHENG L, SHEN D D, LUO Y, et al. Exogenous  $\gamma$ -aminobutyric acid treatment affects citrate and amino acid accumulation to improve fruit quality and storage performance of postharvest citrus fruit [J]. Food Chemistry, 2017, 216(3), 138-145.
- [3] DING Y D, CHANG J W, MA Q L, et al. Network analysis of postharvest senescence process in citrus fruits revealed by transcriptomic and metabolomic profiling [J]. Plant Physiology, 2015, 168(1): 357-376.
- [4] 李涛, 李绮丽, 张群, 等. 低温连续杀菌对柑橘罐头品质的影响[J]. 中国食品学报, 2020, 20(11): 176-184.
- [5] ZOU Z, XI W P, HU Y, et al. Antioxidant activity of citrus fruits[J]. Food Chemistry, 2016, 196(7): 885-896.
- [6] MUHAMMAD N S, TUSNEEM K, SAQIB J, et al. Extraction and quantification of polyphenols from kinnow (*Citrus reticulata* L.) peel using ultrasound and maceration techniques[J]. Journal of Food and Drug Analysis, 2017, 25(3): 488-500.
- [7] CHEN C Y, PENG X, CHEN J Y, et al. Mitigating effects of chitosan coating on postharvest senescence and energy depletion of harvested pummelo fruit response to granulation stress[J]. Food Chemistry, 2021, 348(15): e129113.
- [8] WANG S P, ZHOU Y H, LUO W, et al. Primary metabolites analysis of induced citrus fruit disease resistance upon treatment with oligochitosan, salicylic acid and *Pichia membranaefaciens*[J]. Biological Control, 2020, 148(9): e104289.
- [9] PORAT R, WEISS B, COHEN L, et al. Reduction of postharvest rind disorders in citrus fruit by modified atmosphere packaging[J]. Postharvest Biology and Technology, 2004, 33(1): 35-43.
- [10] PORAT R, DAUS A, WEISS B, et al. Reduction of postharvest decay in organic citrus fruit by a short hot water brushing treatment[J]. Postharvest Biology

- and Technology, 2000, 18(2): 151-157.
- [11] DENG L L, ZENG K F, ZHOU Y H, et al. Effects of postharvest oligochitosan treatment on anthracnose disease in citrus (*Citrus sinensis* L. Osbeck) fruit[J]. European Food Research and Technology, 2015, 240(4): 795-804.
- [12] TERAO D, KATIA D L N, PONTE M S, et al. Physical postharvest treatments combined with antagonistic yeast on the control of orange green mold[J]. Scientia Horticulturae, 2017, 224(11): 317-323.
- [13] HAO W N, ZHONG G H, HU M Y, et al. Control of citrus postharvest green and blue mold and sour rot by tea saponin combined with imazalil and prochloraz[J]. Postharvest Biology and Technology, 2009, 56(1): 39-43.
- [14] NAIR M S, TOMAR M, PUNIA S, et al. Enhancing the functionality of chitosan- and alginate-based active edible coatings/films for the preservation of fruits and vegetables: A review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 164(23): 304-320.
- [15] ALI A, MUHAMMAD M T M, SIJAM K, et al. Effect of chitosan coatings on the physicochemical characteristics of Eksotika II papaya (*Carica papaya* L.) fruit during cold storage[J]. Food Chemistry, 2011, 124(2): 620-626.
- [16] 余易琳, 徐丹, 任丹, 等. 纳米纤维素/壳聚糖复合涂膜在红桔保鲜中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(2): 135-141.
- YU Y L, XU D, REN D, et al. Effects of nanocrystal cellulose/chitosan composite coatings on red tangerine preservation[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(2): 135-141.
- [17] ZHANG W L, ZHAO H D, ZHANG J, et al. Different molecular weights chitosan coatings delay the senescence of postharvest nectarine fruit in relation to changes of redox state and respiratory pathway metabolism [J]. Food Chemistry, 2019, 289(11): 160-168.
- [18] JIANG X J, LIN H T, SHI J, et al. Effects of a novel chitosan formulation treatment on quality attributes and storage behavior of harvested litchi fruit [J]. Food Chemistry, 2018, 252(17): 134-141.
- [19] 李婷, 李道亮, 黄威, 等. 魔芋葡甘露聚糖-壳聚糖复合涂膜对北碚 447 锦橙贮藏品质的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(8): 241-246.
- LI T, LI D L, HUANG W, et al. Effect of konjac glucomannan combined chitosan coating on storage quality of Beibei 447[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(8): 241-246.
- [20] 刘帅民, 胡康琦, 刘港帅, 等. 外源褪黑素处理对鲜切芒果贮藏品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(21): 160-166.
- LIU S M, HU K Q, LIU G S, et al. Effect of exogenous melatonin treatment on storage quality of fresh-cut mango[J]. Food Science, 2020, 41(21): 160-166.
- [21] FAN P H, HUBER D J, SU Z H, et al. Effect of postharvest spray of apple polyphenols on the quality of fresh-cut red pitaya fruit during shelf life[J]. Food Chemistry, 2018, 243(6): 19-25.
- [22] LI W D, LI O, ZHANG A R, et al. Genotypic diversity of phenolic compounds and antioxidant capacity of Chinese dwarf cherry (*Cerasus humilis* (Bge.) Sok.) in China [J]. Scientia Horticulturae, 2014, 175(11): 208-213.
- [23] ZHANG Y Y, HUBER D J, HU M J, et al. Delay of postharvest browning in litchi fruit by melatonin via the enhancing of antioxidative processes and oxidation repair[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(28): 7475-7484.
- [24] LIU H, SONG L L, YOU Y L, et al. Cold storage duration affects litchi fruit quality, membrane permeability, enzyme activities and energy charge during shelf time at ambient temperature[J]. Postharvest Biology and Technology, 2011, 60(1): 24-30.
- [25] CHUMYAM A, SHANK L, UTHAIBUTRA J, et al. Effects of chlorine dioxide on mitochondrial energy levels and redox status of 'Daw' longan pericarp during storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 116(6): 26-35.
- [26] LAFUENTE M T, ZACARIAS L. Postharvest physiological disorders in citrus fruit[J]. Stewart Postharvest Review, 2006, 2(1): 1-9.
- [27] LEE S K, KADER A A. Preharvest and postharvest factors influencing vitamin C content of horticultural crops[J]. Postharvest Biology and Technology, 2000, 20(3): 207-220.
- [28] MATSUMOTO H, IKOMA Y, KATO M, et al. Effect of postharvest temperature and ethylene on carotenoid accumulation in the Flavedo and juice sacs of Satsuma Mandarin (*Citrus unshiu* Marc.)



- fruit[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57(11): 4724–4732.
- [29] HONG K Q, XIE J H, ZHANG L B, et al. Effects of chitosan coating on postharvest life and quality of guava (*Psidium guajava* L.) fruit during cold storage [J]. *Scientia Horticulturae*, 2012, 144(12): 172–178.
- [30] LIN Y Z, GUO C, LIN H T, 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(24): 601–608.
- [31] AGHDAM M S, JANNATIZADEH A, LUO Z, et al. Ensuring sufficient intracellular ATP supplying and friendly extracellular ATP signaling attenuates stresses, delays senescence and maintains quality in horticultural crops during postharvest life[J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2018, 76(6): 67–81.
- [32] ROMERO P, ALFEREZ F, ESTABLES O B, et al. Insights into the regulation of molecular mechanisms involved in energy shortage in detached citrus fruit [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): e1109.
- [33] WANG T, HU M J, YUAN D B, et al. Melatonin alleviates pericarp browning in litchi fruit by regulating membrane lipid and energy metabolisms [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 160(2): e111066.
- [34] ZHANG W L, ZHAO H D, JIANG H T, et al. Multiple 1-MCP treatment more effectively alleviated postharvest nectarine chilling injury than conventional one-time 1-MCP treatment by regulating ROS and energy metabolism[J]. *Food Chemistry*, 2020, 330(21): e127256.
- [35] YANG W J, SHI C, HU Q H, et al. Nanocomposite packaging regulate respiration and energy metabolism in *Flammulina velutipes* [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 151(5): 119–126.

### Chitosan Alleviates Postharvest Quality Deterioration in Fertile Orange Fruit by Regulating Membrane Permeability and Energy Metabolism

Liu Shuaimin<sup>1</sup>, Wang Linliang<sup>1</sup>, Feng Chunmei<sup>1\*</sup>, Li Xinrong<sup>1</sup>, Liu Gangshuai<sup>2</sup>,  
Huang Yanting<sup>1</sup>, Chen Ruirui<sup>1</sup>, Tan Yewei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Guangxi Subtropical Crops Research Institute, Nanning 530001, Guangxi

<sup>2</sup>College of Food Science & Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083)

**Abstract** Chitosan is a natural polysaccharide with multiple biological activities, which can participate in various physiological processes in organisms. The present study investigated the effects of 2% chitosan coating on the storage and nutritional quality, membrane permeability, energy metabolism in fertile orange fruit during storage at 25 °C. The results revealed that chitosan effectively delayed the decrease of soluble solids and total titratable acid and the increase of weight loss and ratio of soluble solids to acidity, and inhibited the decrease of carotenoids, ascorbic acid, total phenol and flavonoid contents in fertile orange fruit. Further investigation presented that chitosan significantly inhibit the increase of membrane permeability, which is reflected in the lower relative electrical conductivity and malondialdehyde content in fruit tissues. In addition, chitosan maintained a higher energy status, as demonstrated by enhancing adenosine triphosphate content and energy charge, which could be attributed to improve the activities of H<sup>+</sup>-ATPase, Ca<sup>2+</sup>-ATPase, succinate dehydrogenase, cytochrome C oxidase during storage. In summary, chitosan can effectively maintain the storage and nutritional quality and delay senescence of postharvest fertile orange fruit by regulating membrane permeability and energy metabolism.

**Keywords** chitosan; fertile orange fruit; postharvest quality; membrane permeability; energy metabolism