

方馨, 屈文丹, 王昭源, 等. 采前喷施海藻寡糖对甜樱桃贮藏品质及果实软化的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(9): 353-362. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050053

FANG Xin, QU Wendan, WANG Zhaoyuan, et al. Effects of Pre-harvest Spraying of Alginate Oligosaccharides on Storage Quality and Fruit Softening in Sweet Cherry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(9): 353-362. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050053

· 贮运保鲜 ·

# 采前喷施海藻寡糖对甜樱桃贮藏品质及果实软化的影响

方馨<sup>1,2</sup>, 屈文丹<sup>1</sup>, 王昭源<sup>1</sup>, 陆玉卓<sup>2</sup>, 姜永峰<sup>2</sup>, 郝义<sup>2,\*</sup>, 李灿婴<sup>1</sup>, 葛永红<sup>1</sup>

(1.渤海大学食品科学与工程学院, 辽宁锦州 121013;

2.辽宁省果树科学研究所, 辽宁营口 115009)

**摘要:**甜樱桃采后在贮藏和运输过程中极易出现果肉软化、腐烂变质等现象, 降低其商业价值。为保持果实采后贮藏品质并延长其货架期, 本研究以‘萨米脱’甜樱桃为试材, 采前用 50、100 和 200 mg/L 海藻寡糖喷洒, 分析采后低温贮藏期间果实品质相关指标及细胞壁降解酶活性的变化。结果表明, 与对照组相比, 采前喷施不同浓度的海藻寡糖均延缓了果实可溶性固形物含量、可滴定酸度和硬度的下降, 同时降低了果实失重率; 海藻寡糖处理还延缓了  $L^*$ 、 $a^*$  和  $b^*$  值及色彩饱和度的下降, 抑制了果胶裂解酶、果胶甲酯酶、聚半乳糖醛酸酶、纤维素酶、 $\beta$ -半乳糖苷酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶、果胶甲基反式消除酶和多聚半乳糖醛酸反式消除酶的活性, 其中以 200 mg/L 海藻寡糖处理效果最佳。相关性分析表明, 可滴定酸度与  $\beta$ -半乳糖苷酶、果胶甲酯酶呈显著正相关, 与多聚半乳糖醛酸酶、纤维素酶呈显著负相关; 可溶性固形物含量与多聚半乳糖醛酸酶、纤维素酶、多聚半乳糖醛酸反式消除酶、果胶裂解酶、 $\beta$ -半乳糖苷酶呈显著负相关; 果实硬度与多聚半乳糖醛酸酶、纤维素酶、果胶裂解酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶呈显著负相关; 失重率与多聚半乳糖醛酸酶和纤维素酶呈显著正相关, 与果胶甲基反式消除酶、多聚半乳糖醛酸反式消除酶、果胶裂解酶、 $\beta$ -半乳糖苷酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶和果胶甲酯酶呈显著负相关。由此表明, 采前喷洒海藻寡糖通过抑制果实细胞壁降解相关酶活性, 从而延缓果实软化并保持贮藏品质。

**关键词:**甜樱桃, 海藻寡糖, 贮藏品质, 软化, 细胞壁降解酶

中图分类号: S662.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2026)09-0353-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050053



本文网刊:

## Effects of Pre-harvest Spraying of Alginate Oligosaccharides on Storage Quality and Fruit Softening in Sweet Cherry

FANG Xin<sup>1,2</sup>, QU Wendan<sup>1</sup>, WANG Zhaoyuan<sup>1</sup>, LU Yuzhuo<sup>2</sup>, JIANG Yongfeng<sup>2</sup>, HAO Yi<sup>2,\*</sup>, LI Canying<sup>1</sup>, GE Yonghong<sup>1</sup>

(1.College of Food Science and Engineering, Bohai University, Jinzhou 121013, China;

2.Liaoning Institute of Pomology, Yingkou 115009, China)

**Abstract:** Sweet cherries are susceptible to quality deterioration during postharvest storage and transportation, including flesh softening and spoilage, which greatly reduce their commercial value. In order to preserve postharvest quality and extend the shelf life of the fruit, this study utilized 'Samituo' sweet cherries as the experimental material to investigate the effects of pre-harvest spraying with alginate oligosaccharides at concentrations of 50, 100, and 200 mg/L on fruit quality-related parameters and the activities of cell wall degrading enzymes during low-temperature storage. The results indicated that the pre-harvest application of alginate oligosaccharides at various concentrations effectively delayed the decline in soluble solids content, titratable acidity, and fruit firmness, while also reducing the rate of fruit weight loss, as compared to

收稿日期: 2025-05-08

基金项目: 基本科研业务费计划项目学科建设 (2025XKJS8550)。

作者简介: 方馨 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬采后生物学与技术, E-mail: 1223312450@qq.com。

\* 通信作者: 郝义 (1969-), 男, 硕士, 研究员, 研究方向: 果蔬贮藏保鲜, E-mail: lnhy7849023@163.com。

the control group. Treatment with alginate oligosaccharides delayed the decline of  $L^*$ ,  $a^*$ , and  $b^*$  values and color saturation, while also inhibiting the activities of pectate lyase, pectin methylesterase, polygalacturonase, cellulase,  $\beta$ -galactosidase,  $\beta$ -glucosidase, pectin methylesterase and polygalacturonic acid transeliminase. Among the treatments, 200 mg/L alginate oligosaccharides exhibited the most pronounced effect. The correlation analysis reveals that titratable acidity was significantly and positively correlated with the activities of  $\beta$ -galactosidase and pectin methylesterase, while was distinctly negatively correlated with the activities of polygalacturonase and cellulase. In contrast, soluble solids content exhibited a significant negative correlation with polygalacturonase, cellulase, polygalacturonic acid transeliminase, pectate lyase, and  $\beta$ -galactosidase activities. Furthermore, fruit hardness showed a significant negative correlation with the activities of polygalacturonase, cellulase, pectate lyase, and  $\beta$ -glucosidase. Weight loss was significantly positively correlated with polygalacturonase and cellulase activities, whereas it was significantly negatively correlated with the activities of polygalacturonic acid transeliminase, pectin methylesterase, pectate lyase,  $\beta$ -glucosidase,  $\beta$ -galactosidase, and pectin methylesterase. These findings suggest that pre-harvest application of alginate oligosaccharides can delay fruit softening and maintain storage quality by suppressing the activity of enzymes related to fruit cell wall degradation.

**Key words:** sweet cherry; alginate oligosaccharides; storage quality; softening; cell wall degrading enzymes

甜樱桃(*Prunus avium* L.)属于蔷薇科樱桃属,在北方落叶果树中属于成熟最早的树种,被誉为“早春第一果”<sup>[1]</sup>。果实色泽鲜艳、风味独特,富含抗坏血酸、花青素、槲皮素、膳食纤维等功能成分,具有抗氧化、抗过敏、保护肝脏和心血管等作用<sup>[2]</sup>。然而,甜樱桃在贮藏和运输过程中易出现机械损伤、果柄脱落、果肉软化、腐烂等现象,不仅降低果实品质、缩短货架期,而且阻碍了产业的可持续发展<sup>[3]</sup>。其中,果实软化是甜樱桃果实成熟和衰老的重要标志之一,取决于细胞壁的结构和成分的变化<sup>[4]</sup>。因此,开发绿色、安全的延缓果实软化、提高贮藏品质的保鲜技术对樱桃产业的健康发展至关重要。

樱桃采后常用贮藏保鲜技术包括物理技术(气调、辐照、低温等)、化学方法(1-甲基环丙烯、油菜素内酯、山梨酸钾、多酚类等)、涂膜保鲜(壳聚糖、纳米材料)等<sup>[5]</sup>。然而,樱桃采后的腐烂损失仍然十分严重,从果园到餐桌每年损失率高达20%<sup>[6]</sup>。采用采前诱抗剂处理结合采后低温贮藏来提高果实贮藏品质是当前的研究热点之一。研究发现,采前喷洒0.2 mmol/L水杨酸甲酯通过调节糖代谢来提高杏果实耐冷性并改善贮藏品质<sup>[7]</sup>;采前喷施2.0 mmol/L茉莉酸甲酯能够提高酚类物质含量,降低树莓低温贮藏的脂质过氧化损伤并维持细胞结构的完整性<sup>[8]</sup>;采前喷施2.0 mg/L氯化钙结合低温贮藏可以降低金柑果实腐烂率,延缓可溶性固形物和抗坏血酸含量的下降<sup>[9]</sup>。此外,甜瓜果实生长期喷施8.0 mmol/L苯丙氨酸可以激活采后果实中抗坏血酸-谷胱甘肽循环,降低活性氧的过量积累,从而保持细胞膜的完整性并减轻果实冷害<sup>[10]</sup>;采前喷施2.0 mL/L壳寡糖通过促进膜脂代谢并提高抗氧化酶的活性缓解甜瓜果实的冷害<sup>[11]</sup>。由此可知,采前诱抗剂处理不仅能够提高果实的抗病性,还能保持果实的贮藏品质和延长货架期。

海藻寡糖,又叫海藻酸钠寡糖,是将海藻植物通过化学、酶解或物理方法降解后得到的低分子聚合

物,具有促进植物生长,抵抗生物或非生物胁迫的作用,已在农业生产中用作植物免疫激活剂<sup>[12-14]</sup>。研究发现,海藻寡糖能够增强植物的防御机制,促进种子萌发,加速小麦中柱细胞的分裂与分化,并显著提升莴苣、水稻和胡萝卜幼苗的伸长生长<sup>[15-16]</sup>。采后3.0 mg/L海藻寡糖处理可有效维持马铃薯块茎中总酚、淀粉以及总可溶性固形物含量<sup>[17]</sup>。此外,采用100 mg/L海藻寡糖处理草莓,能够显著抑制细胞壁降解相关酶的活性,从而保持细胞结构的完整性,还有效抑制脱落酸信号通路中*FaNCED1*、*FaASR*、*FaPYR1*和*FaCHLH*的表达<sup>[18]</sup>。还有研究发现,在猕猴桃幼果期采用100 mg/L海藻寡糖沾果处理,不仅可以减缓采后果肉硬度的下降、维持果实可滴定酸、可溶性糖和抗坏血酸含量,而且还能降低果实采后黑腐病、青霉病和灰霉病的发生<sup>[19]</sup>。由此说明,采前或采后使用海藻寡糖处理都能够诱导提高果实的抗病性和耐贮性,并且保持较高的品质。然而,尚未见采前海藻寡糖处理对甜樱桃果实贮藏品质及软化相关的研究报道。

本研究以‘萨米脱’甜樱桃为材料,采前用不同浓度海藻寡糖喷洒处理,分析采后低温贮藏期间果实品质指标和细胞壁降解相关酶活性的变化,为采后甜樱桃果实绿色保鲜技术的开发提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

甜樱桃 品种为‘萨米脱’采自辽宁省大连市旅顺区水师营镇寺沟村果园;海藻寡糖(有效浓度100%) 中国科学院大连物理化学研究所;考马斯亮蓝 北京瑞尔欣德科技有限公司产品;冰乙酸、无水乙酸钠、柠檬酸、柠檬酸钠、水杨苷、多聚半乳糖醛酸 上海阿拉丁生化科技股份有限公司;氯化钠、果胶、甘氨酸、三羟甲基氨基甲烷、羟甲基纤维素钠、3,5-二硝基水杨酸 北京索莱宝生物科技有限公司;对硝基- $\beta$ -D-吡喃半乳糖苷 上海麦克林生化科技股份有限公司。

H1650R 台式高速冷冻离心机 湖南湘仪实验

室仪器开发有限公司; PAL-1 数显手持折光仪 广州市爱宕科学仪器有限公司; GY-4 型数显式水果硬度计 北京阳光易事达科技有限公司; CS-520 分光测色仪 杭州彩谱科技有限公司; Evolution 201 紫外可见光分光光度计 赛默飞世尔科技有限公司。

## 1.2 实验方法

1.2.1 采前处理和取样 参考刘同梅等<sup>[19]</sup>方法并修改, 将海藻寡糖溶于蒸馏水中配制浓度为 50、100 和 200 mg/L 的溶液(内含 10 μL/L 的吐温 80)。在樱桃树开花后 45 d, 果实转色期用不同浓度海藻寡糖对植株和果实进行喷洒, 以蒸馏水同样处理为对照, 每个处理喷洒两颗果树<sup>[20]</sup>。在果实花后 60 d 采收海藻寡糖喷洒处理和对照果实, 选择大小和颜色均匀, 无机械损伤和病虫害的果实, 用泡沫箱(每箱 5 kg)包装后 2 h 内常温运至辽宁省果树研究所并在 1±0.5 °C 预冷 24 h 后进行实验, 随后于 1±0.5 °C 和 65%±5% 相对湿度的冷库中贮藏。

取样参考 Wang 等<sup>[21]</sup>的方法并修改。每处理挑选 800 个果实, 其中 80 个果实用于测定失重率和色差, 720 个果实用于取样测定其它相关指标, 分别于贮藏第 0、7、14、21、28 和 35 d 取对照及 50、100 和 200 mg/L 海藻寡糖处理果实 30 个, 去除果核后切成碎块, 液氮冷冻后放入-80 °C 保存。

1.2.2 总可溶性固形物(total soluble solids, TSS)含量、可滴定酸度(titratable acidity, TA)和果实硬度测定 TSS 含量测定参考 Ge 等<sup>[22]</sup>的方法, 用手持折光仪测定。分别取对照组及处理组果实 30 个, 切开后将果汁挤出进行测定, 单位用 % 表示。TA 测定参考 Zhang 等<sup>[23]</sup>的方法, 称取 1.0 g 冷冻果肉组织, 加入 3.0 mL 蒸馏水研磨成均浆, 在 4 °C 和 10000×g 下离心 25 min 保留上清液。然后采用酸碱滴定法测定 TA, 单位用 % 表示。果实硬度测定参考 Fan 等<sup>[24]</sup>的方法, 在果实腹缝线的两端使用数显式水果硬度计(探头直径为 4 mm)测定果实硬度, 每处理每次用果实 30 个, 单位用牛顿(N)表示。

1.2.3 失重率测定 参考 Xu 等<sup>[25]</sup>的方法, 采用称量法测定并计算。分别称重第 0 d 对照组及 50、100 和 200 mg/L 海藻寡糖处理组果实的原始重量, 将贮藏第 7、14、21、28 和 35 d 果实的重量记为每次称重量。按照下列公式计算果实失重率。每次每处理用果实 20 个, 重复 3 次。

$$\text{失重率}(\%) = \frac{\text{原始重量} - \text{每次称重量}}{\text{原始重量}} \times 100$$

1.2.4 色差测定 参照 Chen 等<sup>[26]</sup>的方法, 使用分光测色仪在果实腹缝线两侧赤道部位取 2 点测定  $L^*$  值、 $a^*$  值、 $b^*$  值,  $C^*$  反映果实的色彩饱和度, 计算公式如下:

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$$

## 1.2.5 细胞壁降解酶活性测定

1.2.5.1 多聚半乳糖醛酸酶(polygalacturonase, PG)、果胶甲酯酶(pectin methylesterase, PME)、果胶裂解酶(pectate lyase, PL)活性测定 粗酶液的提取和酶活性测定均参照 Gao 等<sup>[27]</sup>的方法并进行修改。称取 1.0 g 冷冻果肉组织于研钵中用液氮研磨成粉末, 然后加入 2.0 mL 的 95% 乙醇研磨成匀浆后转至离心管中, 在 4 °C 放置 20 min 后于 4 °C 和 10000×g 条件下离心 10 min, 弃去上清液; 向沉淀物中再加入 2.0 mL 预冷的 80% 乙醇, 振荡、混匀后低温放置 10 min, 在相同条件下离心, 再次弃去上清液; 向沉淀物中加入 3.0 mL 的 1.8 mol/L 氯化钠溶液, 于 4 °C 条件下放置 20 min, 再次离心并收集上清液。上清液即为粗酶液, 用于测定 PG、PME、Cx 和  $\beta$ -glu 活性。

PG 和 PME 反应体系, 取 20 mL 刻度试管, 向其中加入 1.0 mL 的 50 mmol/L 乙酸钠缓冲液(pH5.5)与 0.5 mL 的 10 g/L 底物(PG 的底物为多聚半乳糖醛酸, PME 的底物为果胶)和 0.5 mL 粗酶液混合, 在 37 °C 条件下水浴 1 h, 加入 1.5 mL 的 3,5-二硝基水杨酸溶液, 混匀后煮沸 5 min 并冷却至室温, 测定反应混合物在 540 nm 处的吸光值。PG 和 PME 活性表示为 U/mg 蛋白质, 其中 U 定义为在 37 °C 每分钟催化多聚半乳糖醛酸和果胶水解产生 1.0 mg 半乳糖醛酸所需要的酶量。

参照 Cheng 等<sup>[28]</sup>的方法并修改。称取 1.0 g 冷冻果肉组织加入 3.0 mL 的 88 g/L 氯化钠研磨成匀浆, 然后在 4 °C 和 10000×g 下离心 25 min, 上清液即为粗酶液。取 0.5 mL 粗酶液和 2.0 mL 的 5.0 g/L 果胶溶液混合, 40 °C 水浴保温 10 min 后取混合物 0.5 mL, 加入 3.0 mL 的 10 mmol/L 盐酸终止反应。最后测定混合液在 235 nm 处的吸光值。PL 活性用 U/mg 蛋白质表示, 其中 U 定义为 235 nm 处每分钟吸光值变化 0.01。

1.2.5.2 纤维素酶(cellulase, Cx)和  $\beta$ -葡萄糖苷酶( $\beta$ -glucosidase,  $\beta$ -glu)活性测定 粗酶液的提取和酶活性测定均参照 Gao 等<sup>[27]</sup>的方法并进行修改。称取 1.0 g 冷冻果肉组织于研钵中用液氮研磨成粉末, 然后加入 2.0 mL 的 95% 乙醇研磨成匀浆后转至离心管中, 在 4 °C 放置 20 min 后于 4 °C 和 10000×g 条件下离心 10 min, 弃去上清液; 向沉淀物中再加入 2.0 mL 预冷的 80% 乙醇, 振荡、混匀后低温放置 10 min, 在相同条件下离心, 再次弃去上清液; 向沉淀物中加入 3.0 mL 的 1.8 mol/L 氯化钠溶液, 于 4 °C 条件下放置 20 min, 再次离心并收集上清液。上清液即为粗酶液, 用于测定 Cx 和  $\beta$ -glu 活性。

Cx 和  $\beta$ -glu 反应体系为 1.5 mL 的 10 g/L 底物(Cx 的底物为羧甲基纤维素钠,  $\beta$ -glu 的底物为水杨苷)和 0.5 mL 粗酶液。充分混匀后置于 37 °C 水浴中保温 1 h, 然后加入 1.5 mL 的 3,5-二硝基水杨酸

溶液,煮沸 5 min 后冷却至室温。最后测定反应混合液在 540 nm 处吸光度值。Cx 和  $\beta$ -glu 活性表示为 U/mg 蛋白质,U 定义为每分钟催化水杨苷和羧甲基纤维素水解产生 1.0 mg 葡萄糖所需的酶量。

1.2.5.3  $\beta$ -半乳糖苷酶( $\beta$ -galactosidase, $\beta$ -gal)活性测定 参照曲淋鸿等<sup>[29]</sup>的方法并修改。称取 1.0 g 冷冻果实组织加入 3.0 mL 的 pH8.0 三羟甲基氨基甲烷-盐酸(50 mmol/L,内含 1.0 mol/L 氯化钠)研磨成匀浆,然后在 4 ℃ 和 10000×g 下离心 25 min 留上清液,即为粗酶液。在刻度试管中加入 2.0 mL 的 5.0 mmol/L 对硝基苯- $\beta$ -吡喃半乳糖苷溶液和 200  $\mu$ L 粗酶液,37 ℃ 水浴保温 30 min。将试管取出后立即加入 1.0 mol/L 碳酸钠溶液 2.0 mL 终止酶促反应。摇匀并冷却至室温后,于波长 400 nm 处测定混合液的吸光值。 $\beta$ -gal 活性用 U/mg 蛋白质表示,其中 U 定义为在 37 ℃ 每分钟催化对硝基苯- $\beta$ -吡喃半乳糖苷水解产生 1.0 mg 葡萄糖所需要的酶量。

1.2.5.4 多聚半乳糖醛酸反式消除酶(polygalacturonic acid transeliminase, PGTE)和果胶甲基反式消除酶(pectin methylranseliminase, PMTE)活性测定 参照 Mohebbi 等<sup>[30]</sup>的方法提取 PGTE 和 PMTE 的粗酶液。称取冷冻果肉组织 1.0 g 于研钵中,加入 3.0 mL 经预冷的含有 0.1 mol/L 氯化钠的 50 mmol/L Tris-HCl 缓冲液研磨成匀浆,然后在 4 ℃ 和 1000×g 条件下离心 10 min,上清液即为粗酶液。

PGTE 和 PMTE 活性测定参照 Ge 等<sup>[22]</sup>方法并改进。PGTE 和 PMTE 反应体系包括 4.0 mL 的 50 mmol/L 甘氨酸-氢氧化钠溶液(pH9.0)、1.0 mL 的 3.0 mmol/L 氯化钙溶液、0.3 mL 反应底物(PGTE 反应底物为 1.0 g/L 多聚半乳糖醛酸,PMTE 反应底物为 1.0 g/L 果胶)和 0.1 mL 粗酶液。反应混合物在 30 ℃ 水浴保温 10 min,待冷却后测定在 232 nm 处吸光值。PGTE 和 PMTE 活性用 U/mg 蛋白质表示,其中 U 定义为在 37 ℃ 每分钟催化多聚半乳糖醛酸和果胶水解产生 1.0 mg 半乳糖醛酸所需要的酶量。

### 1.3 数据处理

所有指标测定均进行 3 次生物学重复,将 3 次重复数据用 Excel 2017 计算标准误差和平均值。使用 SPSS 26.0 进行最小显著性差异分析( $P<0.05$ ),用 Origin 2021 软件作图并对数据进行相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 海藻寡糖处理对果实 TSS 含量、TA 和硬度的影响

TSS 含量、TA 和果实硬度是衡量甜樱桃果实商品价值和感官品质的重要指标,直接反映果实的成熟和衰老。其中,TSS 主要为葡萄糖、果糖、山梨醇和蔗糖等糖类,而 TA 主要为苹果酸、柠檬酸等有机酸,其含量的变化对果实风味、口感及重量影响较大<sup>[31]</sup>。

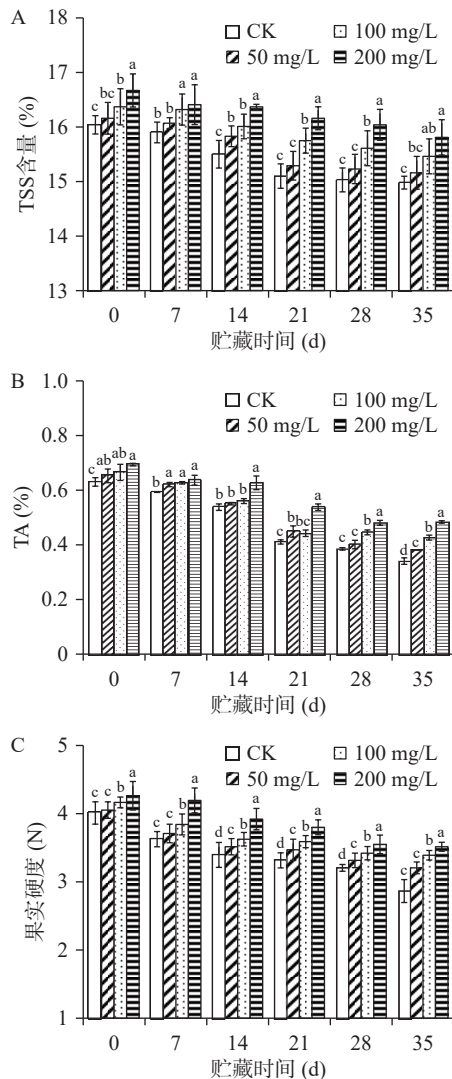


图 1 不同浓度海藻寡糖处理对甜樱桃果实 TSS 含量(A)、TA(B)和硬度(C)的影响

Fig.1 Effects of different concentrations of alginate oligosaccharides treatment on TSS content (A), TA (B) and firmness (C) of sweet cherry fruits

注:不同字母代表同一贮藏时间不同处理间具有显著性差异( $P<0.05$ ),图 2~图 6 同。

由图 1A 可知,在整个贮藏期间各浓度海藻寡糖处理均提高了果实 TSS 含量,在贮藏第 35 d 时 200 mg/L 海藻寡糖处理组果实的 TSS 含量是对照组、50 mg/L 和 100 mg/L 海藻寡糖处理组果实的 1.06、1.04 和 1.02 倍。由图 1B 可知,甜樱桃果实在贮藏期间 TA 呈现下降趋势,对照组 TA 在贮藏期间显著低于海藻寡糖处理组( $P<0.05$ )。在贮藏 35 d 时,50、100 和 200 mg/L 海藻寡糖处理组果实的 TA 比对照组果实分别提高了 18.3%、20.1%、29.1%。甜樱桃果实贮藏过程中易发生果肉软化,如图 1C 所示,在整个贮藏期间,对照组和各浓度海藻寡糖处理组的果实硬度整体呈下降趋势,但 50、100 和 200 mg/L 海藻寡糖处理均有效延缓了果实硬度的下降;其中 100 mg/L 和 200 mg/L 海藻寡糖处理的果实与对照组果实存在显著差异( $P<0.05$ ),如贮藏第 35 d 时,200 mg/L

海藻寡糖处理组果实硬度比对照和其他处理组果实分别高 18.5%、8.8% 和 3.6%。由此说明, 采前不同浓度的海藻寡糖喷洒处理均能够延缓贮藏期间甜樱桃果实 TSS 含量和果实硬度的下降, 并且表现出一定的浓度依赖性。

### 2.2 海藻寡糖处理对果实失重率的影响

失重率反映了甜樱桃果实在采后贮藏期间水分流失和物质消耗的程度。由图 2 可知, 甜樱桃果实在贮藏期间的失重率逐渐上升, 但海藻寡糖处理均抑制了果实失重率的上升, 在贮藏第 21、28 和 35 d 时, 各处理组与对照之间均有显著差异 ( $P < 0.05$ )。在贮藏第 35 d 时, 50、100 和 200 mg/L 海藻寡糖处理组果实的失重率比对照组果实分别下降了 6.5%、16.8% 和 19%。由此可见, 不同浓度海藻寡糖处理均能降低果实失重率, 其中以 200 mg/L 海藻寡糖处理的效果最好。

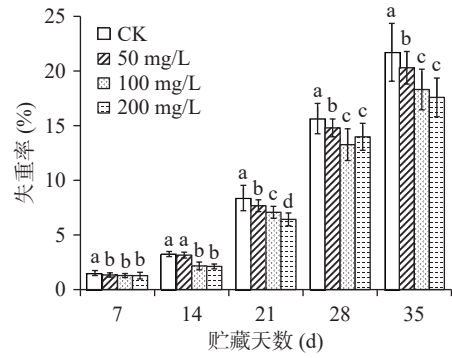


图 2 不同浓度海藻寡糖处理对甜樱桃果实失重率的影响

Fig.2 Effects of different concentrations of alginate oligo-saccharides treatment on weight loss of sweet cherry fruit

### 2.3 海藻寡糖处理对果实色泽的影响

色泽是衡量果实贮藏品质的关键指标之一, 反映了果实的新鲜程度, 通常用  $L^*$ 、 $a^*$  和  $b^*$  值表示, 分别表示果实的亮度、红绿度及黄蓝度, 而  $C^*$  值是色彩

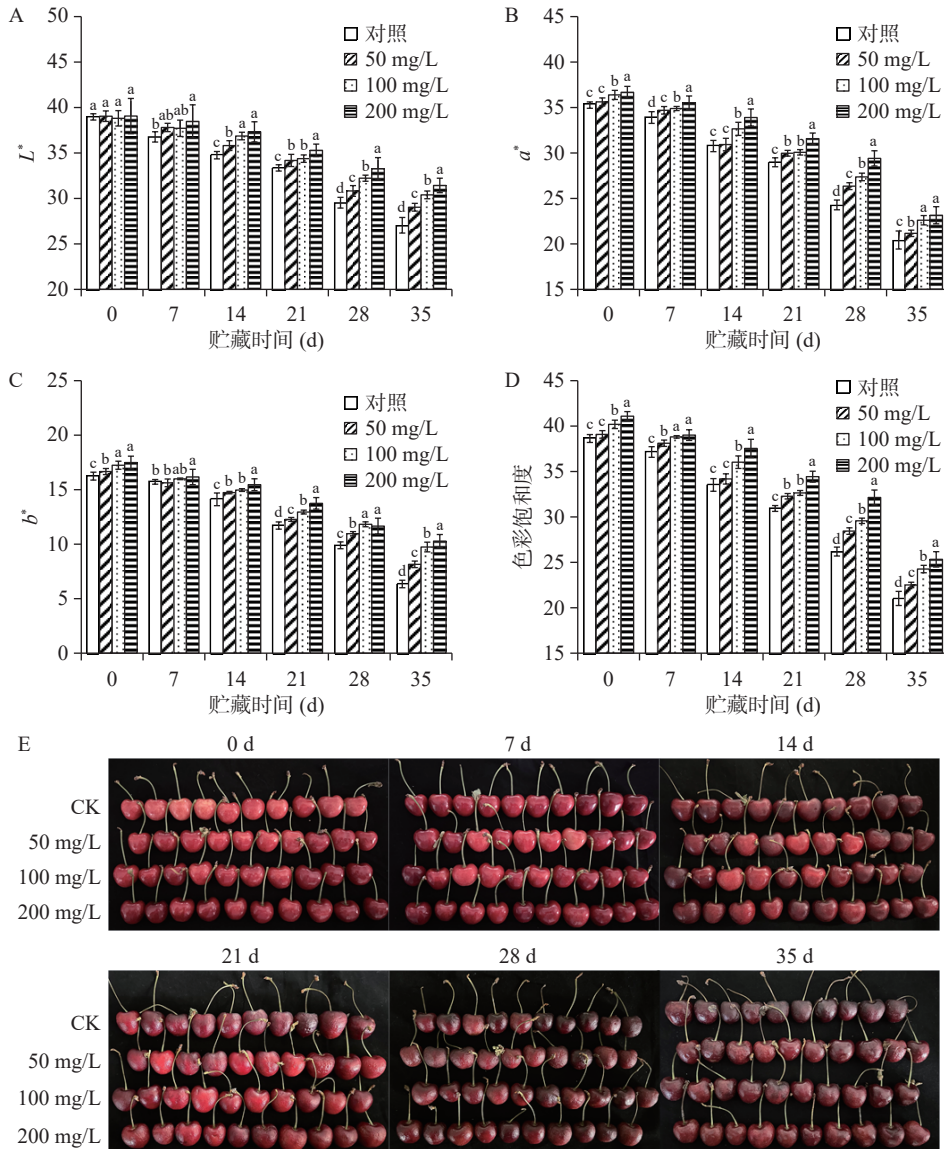


图 3 不同浓度海藻寡糖处理对甜樱桃果实  $L^*$  (A)、 $a^*$  (B)、 $b^*$  (C)、色彩饱和度 (D) 及外观 (E) 的影响

Fig.3 Effects of different concentrations of alginate oligo-saccharides treatment on  $L^*$  (A),  $a^*$  (B),  $b^*$  (C), color saturation (D) and appearance (E) of sweet cherry fruit

饱和度,反映果皮的鲜艳度<sup>[32]</sup>。如图 3A~图 3E 所示,随着贮藏时间的延长果实的颜色也呈现较大的变化, $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 和色彩饱和度在整个贮藏过程中均呈现下降趋势。 $L^*$ 值在贮藏第 7 d 时,对照组和海藻寡糖处理组之间开始出现显著性差异( $P<0.05$ );在贮藏第 35 d 时,50、100 和 200 mg/L 海藻寡糖处理组果实  $L^*$ 值比对照组分别高 7.3%、12.3% 和 16.2% (图 3A)。由图 3B~图 3C 可知,海藻寡糖处理后甜樱桃果实的  $a^*$ 值和  $b^*$ 值下降趋势比较缓慢;在贮藏第 35 d 时,50、100 和 200 mg/L 海藻寡糖处理组果实  $a^*$ 值比对照组高 3.6%、10.7% 和 13.3%(图 3B),而  $b^*$ 值比对照组高 28.4%、53.4% 和 62.0%(图 3C)。由图 3D 可以看出,在贮藏第 7、14、21、28 和 35 d 时各浓度海藻寡糖处理均提高了果实色彩饱和度,其中 100 mg/L 和 200 mg/L 海藻寡糖处理在整个贮藏期内均显著提高了果实色彩饱和度,以 200 mg/L 海藻寡糖处理对果实色彩饱和度的维持效果最佳。如图 3E 所示,各组甜樱桃果实在贮藏期间外观品质均呈现不同程度劣变,具体表现为果皮失水皱缩、果柄干枯、果皮颜色变为深红色,亮度逐渐变暗等现象。在贮藏第 35 d 时,50、100、200 mg/L 海藻寡糖处理组果皮表面仍较为光滑,而对照组出现果柄干枯、果皮表面皱缩、果皮亮度变暗等现象。其中 200 mg/L 处理组较好地保持了甜樱桃果实的色泽。

### 2.4 海藻寡糖处理对果实 PG、PME 和 PL 活性的影响

甜樱桃果实软化是其品质劣变的表现之一,其中 PG、PME、PL 等细胞壁降解酶在软化过程中具有重要作用<sup>[27]</sup>。如图 4A 所示,对照组和海藻寡糖处理组果实 PG 活性在整个贮藏过程中均呈现先上升后下降的趋势,在贮藏第 21 d 时达到峰值;不同浓度海藻寡糖处理均显著降低了果实 PG 活性( $P<0.05$ ),其中以 200 mg/L 海藻寡糖处理效果最优,在贮藏第 14 d 时分别比对照组、50 mg/L 和 100 mg/L 海藻寡糖处理组果实低 36.9%、23.8% 和 14.5%。由图 4B 可知,对照组和海藻寡糖处理组果实的 PL 活性均在贮藏 14 d 达到峰值,不同浓度海藻寡糖处理组果实 PL 活性始终显著低于对照组( $P<0.05$ );在贮藏第 14 d 时,50、100 和 200 mg/L 海藻寡糖处理组果实 PL 活性比对照组分别降低了 1.1%、12.5% 和 14.9%。PME 活性的变化趋势与 PL 活性类似,100 mg/L 和 200 mg/L 海藻寡糖处理组果实 PME 活性在整个贮藏期均显著低于对照组果实( $P<0.05$ );在贮藏第 35 d 时,三个处理组 PME 活性分别比对照组果实低 3.9%、6.1% 和 9.7%(图 4C)。

### 2.5 海藻寡糖处理对果实 Cx、 $\beta$ -glu 和 $\beta$ -gal 活性的影响

随着贮藏时间的增加,对照组和不同浓度海藻寡糖处理组果实 Cx 活性均呈先上升后下降的趋势,对照组和 50 mg/L 海藻寡糖处理组在第 21 d 达到峰

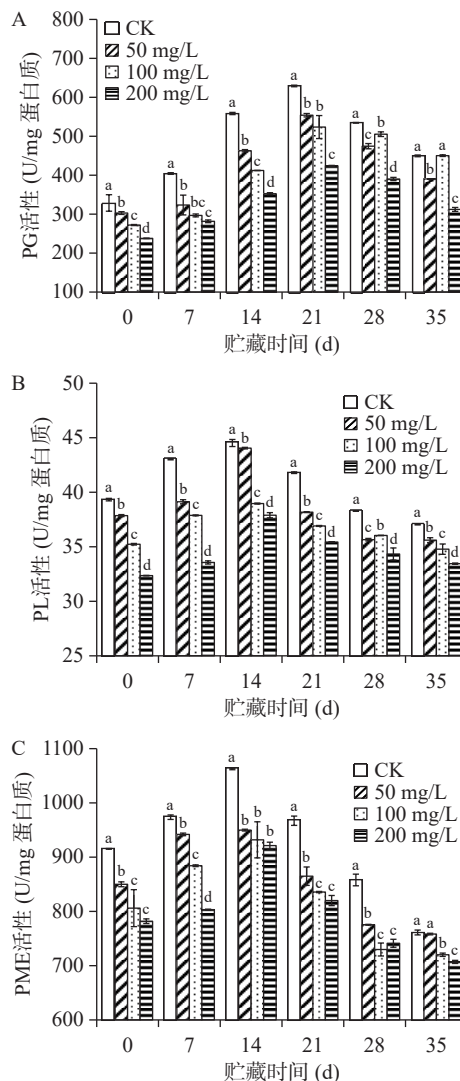


图 4 不同浓度海藻寡糖处理对甜樱桃果实 PG(A)、PL(B) 和 PME(C)活性的影响

Fig.4 Effects of different concentrations of alginate oligosaccharides treatment on PG (A), PL (B) and PME (C) activities of sweet cherry fruit

值,而 100 mg/L 和 200 mg/L 海藻寡糖处理组在第 28 d 达到峰值,并且在整个贮藏过程中处理组果实的 Cx 活性均显著低于对照组;200 mg/L 海藻寡糖处理组果实 Cx 活性在贮藏第 21~35 d 比对照组下降了 37.1%、25.5% 和 26.4%(图 5A)。由图 5B 和图 5C 可知,对照组和不同浓度海藻寡糖处理组果实  $\beta$ -glu 和  $\beta$ -gal 活性在贮藏第 14 d 达到峰值,且不同浓度海藻寡糖处理均抑制了  $\beta$ -glu 和  $\beta$ -gal 活性;在贮藏第 35 d 时 50 mg/L 和 100 mg/L 海藻寡糖处理组  $\beta$ -gal 活性无显著差异,而 200 mg/L 海藻寡糖处理在贮藏过程中均显著低于对照和其它浓度处理组( $P<0.05$ )。与对照组相比,贮藏第 14 d 时,50、100 和 200 mg/L 海藻寡糖处理组果实的  $\beta$ -glu 活性分别下降了 12.1%、14.9% 和 21.3%(图 5B)。在贮藏第 14 d 时,50、100 和 200 mg/L 海藻寡糖处理组果实  $\beta$ -gal 活性分别比对照组下降了 5.3%、7.2% 和 9.6% (图 5C)。

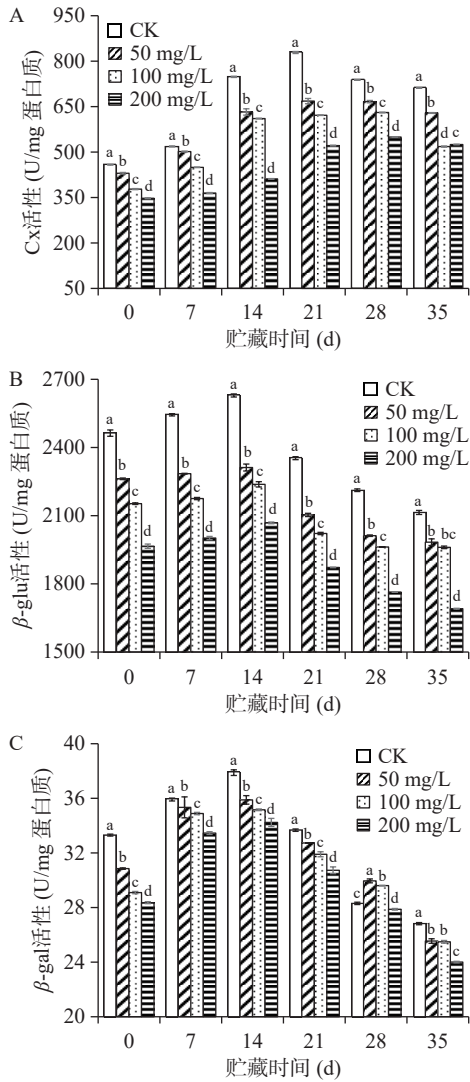


图 5 不同浓度海藻寡糖处理对甜樱桃果实 Cx(A)、 $\beta$ -glu(B)和  $\beta$ -gal(C)活性的影响

Fig.5 Effects of different concentrations of alginate oligo-saccharides treatment on Cx (A),  $\beta$ -glu (B) and  $\beta$ -gal (C) activities of sweet cherry fruit

### 2.6 海藻寡糖处理对果实 PGTE 和 PMTE 活性的影响

PMTE 和 PGTE 可以裂解果胶及聚半乳糖醛酸分子中的糖苷键, 产生不饱和半乳糖醛酸产物, 进而引发细胞壁结构松弛、组织膨大导致果实软化<sup>[33-34]</sup>。随着贮藏时间的延长, 对照组果实的 PGTE 活性呈上升趋势, 在第 14 d 达到峰值后开始下降; 而不同浓度海藻寡糖处理明显抑制了果实 PGTE 活性且推迟了峰值的出现; 其中, 200 mg/L 海藻寡糖处理组果实的 PGTE 活性在贮藏第 7~35 d 显著低于对照组 ( $P < 0.05$ ), 仅为对照组的 9.1%、13.1%、10.5%、7.3% 和 6.8%(图 6A)。PMTE 活性在贮藏过程中呈现先上升后下降的趋势, 且对照组果实的活性在贮藏期间显著高于 200 mg/L 海藻寡糖处理组果实; 在贮藏第 14 d 时, 50、100 和 200 mg/L 海藻寡糖处理组果实 PMTE 活性与对照组相比分别下降了 2.8%、4.6% 和 10.3%(图 6B)。

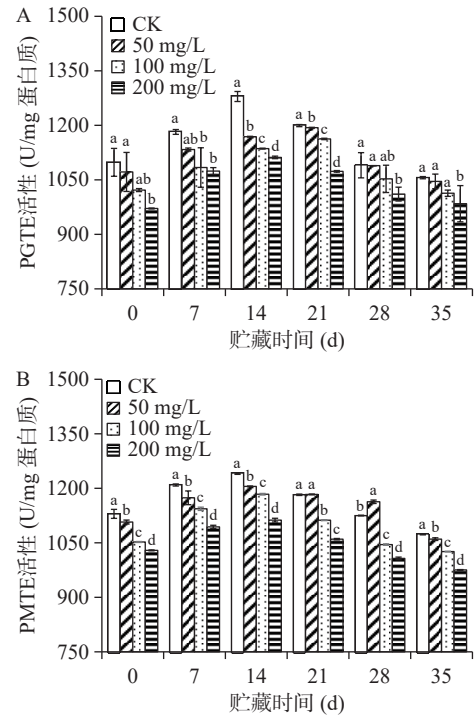


图 6 不同浓度海藻寡糖处理对甜樱桃果实 PGTE(A)和 PMTE(B)活性的影响

Fig.6 Effects of different concentrations of alginate oligo-saccharides treatment on PGTE (A) and PMTE (B) activities of sweet cherry fruit

### 2.7 品质指标与软化相关指标的相关性分析

为进一步探究海藻寡糖处理甜樱桃果实贮藏期间各指标之间的关系, 对品质和细胞壁降解酶活性进行相关性分析(图 7)。甜樱桃在贮藏期间失重率与 PG 和 Cx 活性呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 与 PGTE、PMTE、PL、 $\beta$ -gal、 $\beta$ -glu 和 PME 活性呈显著负相关 ( $P < 0.05$ )。TSS 含量与 PG、Cx、PGTE、 $\beta$ -gal 和 PL 活性呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ), 而 TA 与  $\beta$ -glu 和 PME

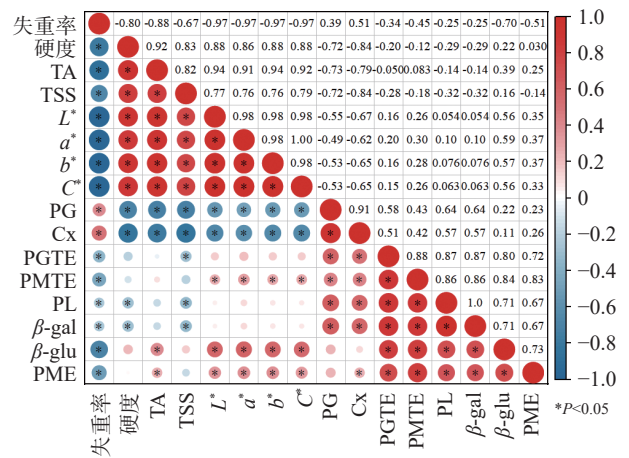


图 7 不同浓度海藻寡糖处理对甜樱桃果实各指标的相关性分析热图

Fig.7 Heat map of correlation analysis among various indexes of sweet cherry fruit treated with different concentrations of alginate oligosaccharides

注: 红色代表正相关, 蓝色代表负相关, \*代表在同一贮藏期间品质指标与软化之间的相关性 ( $P < 0.05$ )。

活性呈显著正相关,与 PG 和 Cx 活性呈显著负相关 ( $P < 0.05$ )。果实硬度与 PG、Cx、 $\beta$ -gal 和 PL 活性呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ),与 PGTE、PMTE、 $\beta$ -glu 和 PME 未表现出显著相关性。

### 3 讨论

本研究发现,采前喷施海藻寡糖显著抑制了甜樱桃果实  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 、 $C^*$  值的下降,说明海藻寡糖处理能够维持果皮的亮度和鲜艳度。研究证明果实色泽的变化与叶绿素降解、类胡萝卜素代谢及花青素等的降解相关,而甜樱桃果实的主要色素是花青素<sup>[35]</sup>。因此,本文推测采前海藻寡糖处理可能通过影响花青素的生物合成,从而保持果实的颜色,具体机理尚需进一步研究。呼吸消耗和水分蒸腾是引起果实贮藏期间重量损失的关键因素。本研究发现,采前海藻寡糖处理显著降低了低温贮藏期间甜樱桃果实失重率。研究发现,羧甲基壳聚糖和明胶可食性涂膜处理甜樱桃果实降低了果实水分损失和呼吸速率,有效降低了果实失重率<sup>[36]</sup>。甜樱桃果实属于非呼吸跃变型果实,贮藏期间呼吸作用会消耗果实体内营养物质,由此引起果实 TSS 含量和 TA 的降低<sup>[37]</sup>。本研究结果表明,采前不同浓度海藻寡糖处理均延缓了甜樱桃果实 TSS 含量和 TA 的下降。因此,采前喷施海藻寡糖通过抑制甜樱桃果实采后贮藏期间碳水化合物和有机酸等营养物质的消耗,从而延缓 TSS 含量和 TA 的下降。

由果胶物质、纤维素、半纤维素等的降解引起的甜樱桃果实的软化是影响果实贮藏的主要因素<sup>[38-39]</sup>。果实软化过程中,PME 催化果胶的去甲基化产生脱甲基化果胶,加速中胶层的破坏,并为 PG 和 PL 的催化降解提供底物,通过破坏聚半乳糖醛酸的糖苷键将果胶水解为半乳糖醛酸或半乳糖醛酸低聚物,从而加速果实软化;PL 通过  $\beta$ -消除反应来催化果胶中  $\alpha$ -1,4-半乳糖苷键的裂解<sup>[27,33,39]</sup>。本研究发现,采前喷施海藻寡糖抑制了甜樱桃果实中 PG、PME 和 PL 活性。相关性分析表明,果实硬度与 PG 和 PL 活性呈显著负相关。已有研究表明,*PaPME2* 参与调控甜樱桃果实成熟软化过程<sup>[40]</sup>。此外,采前 10 d 喷施海藻寡糖可以抑制甜樱桃果实 PME、PG 和 PL 活性并下调其基因的相对表达,从而抑制果实开裂并提高品质<sup>[39]</sup>。本研究还发现,采前喷施海藻寡糖可以抑制甜樱桃果实 Cx、 $\beta$ -gal、 $\beta$ -glu、PGTE 和 PMTE 的活性,而且果实硬度与 Cx 和 PG 活性呈显著负相关,与 PGTE、PMTE 和  $\beta$ -glu 活性不具有显著相关性。Cx 是纤维素水解酶,使果胶-纤维素-半纤维素的结构被破坏<sup>[41]</sup>, $\beta$ -gal 通过破坏细胞壁的半乳糖苷键和半乳糖残基,从而水解果胶和半纤维素导致进一步软化<sup>[42]</sup>。 $\beta$ -glu 属于纤维素酶类,特异性水解纤维二糖或纤维寡糖中  $\beta$ -glu,将纤维素彻底分解为葡萄糖,对果实细胞壁的降解与稳定产生重要影响<sup>[43]</sup>。研究发现,5.0 g/L 肉桂酸钾和

5.0 g/L 海藻酸钠的混合溶液涂膜处理降低了甜樱桃果实 Cx、 $\beta$ -Glu 和  $\beta$ -Gal 活性,从而延缓了果实的软化<sup>[44]</sup>。这些结果表明,果肉软化与细胞壁物质代谢密切相关。因此,海藻寡糖处理通过抑制细胞壁降解相关酶的活性维持果皮细胞间的黏度和细胞壁的机械强度,最终延缓果肉硬度下降及软化。

### 4 结论

采前喷施不同浓度海藻寡糖均能够延缓甜樱桃果实 TSS 含量和 TA 的下降,降低果实失重率,有效保持了果实外观色泽,抑制了营养物质消耗,提高了果实的贮藏品质,其中以 200 mg/L 海藻寡糖处理效果最佳。同时,海藻寡糖处理抑制 PG、PL、PME、Cx、 $\beta$ -gal、 $\beta$ -glu、PGTE 和 PMTE 活性,从而延缓细胞壁物质的代谢,保持果实的硬度,最终延缓甜樱桃果实的软化进程。由此说明,采前海藻寡糖处理是一种潜在的果蔬绿色保鲜技术,不仅能够保持果实的外观品质,还能够延缓果实的软化。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

### 参考文献

- [1] 刘庆忠,朱东姿,王甲威,等.山东省甜樱桃产业现状及发展展望[J].落叶果树,2022,54(2):1-4,103. [LIU Q Z, ZHU D Z, WANG J W, et al. Development status and suggestions of sweet cherry industry in Shandong Province[J]. Deciduous Fruits, 2022, 54(2): 1-4,103.]
- [2] 李斌斌,吴忠红,张锦强,等.采前喷施氯化钙结合采后水杨酸处理对甜樱桃贮藏品质及果实软化的影响[J].食品工业科技,46(17):363-372. [LI B B, WU Z H, ZHANG J Q, et al. Effect of pre-harvest calcium chloride spray combined with post-harvest salicylic acid treatment on storage quality and fruit softening of sweet cherries[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(17): 363-372.]
- [3] 段树华,罗皓,兰林,等.壳寡糖处理对甜樱桃采后贮藏品质的影响[J].北方园艺,2023(6):87-95. [DUAN S H, LUO H, LAN L, et al. Effects of chitosan oligosaccharide treatment on the quality of sweet cherries after harvest storage[J]. Northern Horticulture, 2023(6): 87-95.]
- [4] 陈瑶,艾佳音,何明莉,等.甜樱桃果实软化研究进展[J].沈阳农业大学学报,2024,55(2):240-246. [CHEN Y, AI J Y, HE M L, et al. Research progress of sweet cherry fruit softening[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2024, 55(2): 240-246.]
- [5] 卫琳.大樱桃保鲜技术研究进展[J].中国果菜,2025,45(3):1-5. [WEI L. A review on preservation technologies for sweet cherry[J]. China Fruit & Vegetable, 2025, 45(3): 1-5.]
- [6] 张帅奇,徐冉冉,王宝刚,等.四氢嘧啶对甜樱桃果实采后贮藏品质的影响[J].保鲜与加工,2025,25(2):62-69. [ZHANG S Q, XU R R, WANG B G, et al. Effects of ectoine treatment on storage quality of postharvest sweet cherry fruits[J]. Storage and Process, 2025, 25(2): 62-69.]
- [7] FAN X G, DU Z L, CUI X Z, et al. Preharvest methyl salicy-

- late treatment enhance the chilling tolerance and improve the postharvest quality of apricot during low temperature storage[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 177: 111535.
- [ 8 ] SHAH H M S, SINGH Z, HASAN M U, et al. Preharvest methyl jasmonate application delays cell wall degradation and up-regulates phenolic metabolism and antioxidant activities in cold stored raspberries[J]. *Food Chemistry*, 2025, 462: 141020.
- [ 9 ] 李明娟, 何新华, 刘根华, 等. 采前喷钙结合低温处理对金桔果实贮藏品质的影响[J]. *西南农业学报*, 2012, 25(2): 630-634. [ LI M J, HE X H, LIU G H, et al. Effect of preharvest calcium sprays and low temperature treatment on storage quality of *Fortunella crassifolia* fruits[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 25(2): 630-634. ]
- [ 10 ] XIE P D, YANG Y Y, LI Y, et al. Preharvest phenylalanine spraying alleviates chilling injury in harvested muskmelons by maintaining reactive oxygen species homeostasis[J]. *Food Chemistry*, 2025, 466: 142198.
- [ 11 ] HAN Z D, LI B J, GONG D, et al. Preharvest chitooligosaccharide spray alleviates chilling injury in harvested muskmelon fruit by regulating membrane lipid metabolism and activating antioxidant enzyme activity[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2023, 204: 112452.
- [ 12 ] 宋思捷, 刘晓奇, 徐守俊, 等. 海藻寡糖与钾肥及控水耦合技术对柑橘果实产量和品质的影响[J]. *广东农业科学*, 2025, 52(3): 75-88. [ SONG S J, LIU X Q, XU S J, et al. Effects of alginate oligosaccharides, potassium fertilizer and water management coupling technology on the yield and quality of citrus fruits[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2025, 52(3): 75-88. ]
- [ 13 ] BOSE S K, HOWLADER P, WANG W, et al. Oligosaccharide is a promising natural preservative for improving postharvest preservation of fruit: A review[J]. *Food Chemistry*, 2021, 341: 128178.
- [ 14 ] 张春光. 不同结构的海藻酸钠寡糖诱导植物抗病作用和机理的初步研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2020: 2-5. [ ZHANG C G. Preliminary study on the alginate oligosaccharide with different structure induced-resistance and its mechanisms[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2020: 2-5. ]
- [ 15 ] ZHANG Y H, LIU H, YIN H, et al. Nitric oxide mediates alginate oligosaccharides-induced root development in wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2013, 71: 49-56.
- [ 16 ] IWASAKI K, MATSUBARA Y. Purification of alginate oligosaccharides with root growth-promoting activity toward lettuce[J]. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 2000, 64(5): 1067-1070.
- [ 17 ] HE Y, BOSE S K, WANG W, et al. Pre-harvest treatment of chitosan oligosaccharides improved strawberry fruit quality[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2018, 19(8): 2194.
- [ 18 ] BOSE S K, HOWLADER P, JIA X C, et al. Alginate oligosaccharide postharvest treatment preserve fruit quality and increase storage life via abscisic acid signaling in strawberry[J]. *Food Chemistry*, 2019, 283: 665-674.
- [ 19 ] 刘同梅, 王文霞, 胡建恩, 等. 海藻酸钠寡糖采前处理对猕猴桃贮藏品质的影响[J]. *辽宁农业科学*, 2017(6): 6-10. [ LIU T M, WANG W X, HU J E, et al. Effects of alginate oligosaccharide preharvest treatment on the storage quality of kiwifruit[J]. *Liaoning Agricultural Sciences*, 2017(6): 6-10. ]
- [ 20 ] 秦新惠, 张涛, 张永久. 甜樱桃果实发育中糖酸组分及组织结构的变化规律[J]. *经济林研究*, 2020, 38(3): 68-75. [ QIN X H, ZHANG T, ZHANG Y J, et al. The changing patterns of sugar and acid components as well as tissue structure during the development of sweet cherry fruits[J]. *Non-wood Forest Research*, 2020, 38(3): 68-75. ]
- [ 21 ] WANG Y J, MIN S, GAO T, et al. Atomized fumigation with basil essential oil regulated reactive oxygen metabolism and respiratory metabolism to maintain storage quality of blueberry fruit[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2025, 223: 113418.
- [ 22 ] GE Y H, CHEN Y R, LI C Y, et al. Effect of trisodium phosphate dipping treatment on the quality and energy metabolism of apples[J]. *Food Chemistry*, 2019, 274: 324-329.
- [ 23 ] ZHANG S R, LI C Y, WANG M, et al. Phenyllactic acid maintains the storage quality of 'Zaosu' pears by regulating respiration and energy metabolism[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2024, 207: 112607.
- [ 24 ] FAN Y T, LI C Y, LI Y H, et al. Postharvest melatonin dipping maintains quality of apples by mediating sucrose metabolism[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2022, 174: 43-50.
- [ 25 ] XU H P, LIU J Q, JIN Y R X, et al. Phenyllactic acid maintains the postharvest quality of winter jujube fruit via activating ascorbic acid metabolism[J]. *Scientia Horticulturae*, 2023, 322: 112443.
- [ 26 ] CHEN Y R, GE Y H, ZHAO J R, et al. Postharvest sodium nitroprusside treatment maintains storage quality of apple fruit by regulating sucrose metabolism[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 154: 115-120.
- [ 27 ] GAO T, QU L H, LI C Y, et al. Effects of glycine betaine on the postharvest quality and cell wall metabolism of *Malus domestica* fruit[J]. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 2025, 100(1): 103-113.
- [ 28 ] CHENG Y, LI C Y, HOU J B, et al. Effect of postharvest sodium nitroprusside treatment on the storage quality and cell wall degrading enzymes of Nanguo pears[J]. *Food Science*, 2020, 41(1): 252-257.
- [ 29 ] 曲淋鸿. 甜菜碱‘秋锦’苹果采后青酶病及贮藏品质的影响[D]. 锦州: 渤海大学, 2023. [ QU L H. Effects of glycine betaine on postharvest blue mold and storage quality of 'Qiujin' apple fruit[D]. Jingzhou: Bohai University, 2023. ]
- [ 30 ] MOHEBBI S, BABALAR M, ZAMANI Z, et al. Influence of early season boron spraying and postharvest calcium dip treatment on cell-wall degrading enzymes and fruit firmness in 'Starking Delicious' apple during storage[J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 259: 108822.
- [ 31 ] 刁俊明, 曾宪录, 朱远平, 等. 脐橙果实大小对果实感官品质和可溶性固形物含量的影响[J]. *广东农业科学*, 2015, 42(23): 82-85. [ DIAO J M, CENG X L, ZHU Y P, et al. Effects of fruit size on sensory quality and soluble solid content of citrus sinensis[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2015, 42(23): 82-85. ]
- [ 32 ] LIU J Q, LI C Y, JIN Y, R X, et al. Repression of cell wall metabolism by calcium lactate enhances the postharvest quality maintenance of Jinfeng pear fruit[J]. *Scientia Horticulturae*, 2023, 322: 112460.
- [ 33 ] GE Y H, DUAN B, LI C Y, et al. Application of sodium sili-

- cate retards apple softening by suppressing the activity of enzymes related to cell wall degradation[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(4): 1828–1833.
- [34] 李敏, 高兆银, 胡美姣, 等. 可可球二孢(*Botryodiplodia theobromae*)细胞壁降解酶对杧果果实致病作用[J]. *果树学报*, 2011, 28(6): 1054–1058. [LI M, GAO Z Y, HU M J, et al. Pathogenicity of cell wall degrading enzymes produced by *Botryodiplodia theobromae* against mango fruit[J]. *Journal of Fruit Science*, 2011, 28(6): 1054–1058.]
- [35] WANG N Y, ZHANG X M, GUO Q Q, et al. Effects of different rootstocks on fruit quality and non-volatile flavor-related compounds of sweet cherry 'summit'[J]. *Food Chemistry*, 2025, 463: 141512.
- [36] 张玉蕾. 基于甜樱桃特性的可食性涂膜制备及其保鲜性能试验[D]. 太原: 山西农业大学, 2021. [ZHANG Y L. Preparation and preservation properties of edible coating based on the characteristics of sweet cherry[D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2021.]
- [37] DUAN B, GE Y H, LI C Y, et al. Effect of exogenous ATP treatment on sucrose metabolism and quality of nanguo pear fruit[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 249: 71–76.
- [38] 张强. 钙与 1-MCP 调控甜瓜后熟软化机理及近冰温贮藏技术研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2020. [ZHANG Q. Mechanism of calcium and 1-MCP regulating post-ripening softening and near freezing temperature storage technology of melon[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2020.]
- [39] XIE J N, WANG M Y, JIA A L, et al. Effects of preharvest alginate oligosaccharides treatment on water stress-induced cracking of sweet cherry fruit[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2025, 223: 113430.
- [40] 齐希梁, 李明, 刘聪利, 等. 甜樱桃 PaPME1 与 PaPME2 在果实成熟软化中的功能分析[J]. *果树学报*, 2020, 37(10): 1455–1463. [QI X L, LI M, LIU C L, et al. Functional characterization of sweet cherry PaPME1 and PaPME2 during fruit ripening and softening[J]. *Journal of Fruit Science*, 2020, 37(10): 1455–1463.]
- [41] CARVAJAL F, PALMA F, JAMILENA M, et al. Cell wall metabolism and chilling injury during postharvest cold storage in zucchini fruit[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2015, 108: 68–77.
- [42] LIN Y, LIN H, WANG H, et al. Effects of hydrogen peroxide treatment on pule breakdown, softening, and cell wall polysaccharide metabolism in fresh Longan fruit[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 242: 116427.
- [43] 李乾. NO 处理对冷藏枸杞活性氧、细胞壁及糖代谢的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2021. [LI Q. Effects of NO treatment on reactive oxygen species, cell wall and glucose metabolism of *Lycium barbarum* during cold storage[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2021.]
- [44] 张雪. 不同厚度的 PE 保鲜袋对甜樱桃贮藏效果的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023. [ZHANG X. Effect of different thicknesses of PE preservation bags on the storage effect of sweet cherries[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2023.]