

王春芳, 王娟紫, 柳洪入, 等. 酸性硫酸钙处理对采后鲜糯玉米贮藏品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(2): 300–306. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023030233

WANG Chunfang, WANG Juanzi, LIU Hongru, et al. Effect of Acid Calcium Sulfate Treatment on the Storage Quality of Fresh Waxy Corn after Harvest[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(2): 300–306. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023030233

· 贮运保鲜 ·

酸性硫酸钙处理对采后鲜糯玉米贮藏品质的影响

王春芳^{1,2}, 王娟紫^{1,3}, 柳洪入^{1,2}, 刘晨霞^{1,2}, 张 怡^{1,2}, 乔勇进^{1,2,*}, 韩 晴¹, 范晓华⁴

(1.上海市农业科学院作物育种栽培研究所, 上海 201403;

2.上海农产品保鲜加工工程技术研究中心, 上海 201403;

3.上海海洋大学食品学院, 上海 201306;

4.嘉定区农业技术推广服务中心, 上海 201800)

摘要: 为探究新型防腐杀菌保鲜剂酸性硫酸钙 (acidic calcium sulfate, ACS) 对鲜糯玉米的保鲜效果, 本文研究了 ACS 稀释液 (10^{-3} 倍) 浸泡处理对鲜糯玉米采后低温贮藏 (4°C) 期间营养品质及抗氧化活性的影响。结果表明, ACS 浸泡处理鲜糯玉米 10 min 能有效地抑制糯玉米失重率的上升, 显著减缓果皮硬度的增加 ($P<0.05$), 维持采后鲜糯玉米的水分、可溶性固形物、可溶性糖和次生代谢产物含量, 并通过保持非酶抗氧化物质 (总酚、类黄酮、花青素) 含量和较高的抗氧化酶活性, 提高超氧阴离子清除能力, 减少玉米籽粒 H_2O_2 含量的积累。综上所述, ACS 处理可在一定程度上保持鲜糯玉米的营养品质, 并通过维持玉米籽粒抗氧化活性减缓果实衰老。该研究旨在为鲜糯玉米的采后贮藏保鲜提供理论依据与技术借鉴, 为鲜糯玉米保鲜剂开发提供新思路。

关键词: 鲜糯玉米, 酸性硫酸钙, 低温贮藏, 营养品质, 抗氧化活性

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)02-0300-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023030233



本文网刊:

Effect of Acid Calcium Sulfate Treatment on the Storage Quality of Fresh Waxy Corn after Harvest

WANG Chunfang^{1,2}, WANG Juanzi^{1,3}, LIU Hongru^{1,2}, LIU Chenxia^{1,2}, ZHANG Yi^{1,2},

QIAO Yongjin^{1,2,*}, HAN Qing¹, FAN Xiaohua⁴

(1. Research Institute of Crop Breeding and Cultivation, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403, China;

2. Shanghai Engineering Technology Research Center of Agricultural Product Preservation & Processing, Shanghai 201403, China;

3. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

4. Jiading Agricultural Technology Extension Service Center, Shanghai 201800, China)

Abstract: In order to study the preservation effect of acidic calcium sulfate (ACS) on fresh waxy corn, the effects of diluted ACS (10^{-3}) treatment on the nutritional quality and antioxidant activity of fresh waxy corn during storage (4°C) were studied. The results showed that ACS treatment could inhibit the weight loss, significantly slow down the increase of fruit skin hardness ($P<0.05$) and maintain the content of moisture, soluble solids, soluble sugars and secondary metabolites of fresh waxy corn during storage. ACS samples had higher content of non-enzymatic antioxidant substances (total

收稿日期: 2023-03-15

基金项目: 上海市科技兴农项目 (沪农科推字 (2021) 第 4-1 号); 上海市农产品保鲜加工专业技术服务平台 (21DZ2292200)。

作者简介: 王春芳 (1989-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向: 农产品保鲜加工, E-mail: fhwcf@126.com。

* 通信作者: 乔勇进 (1967-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品保鲜加工, E-mail: yjqiao2002@126.com。

polyphenols, flavonoids, anthocyanins) and higher antioxidant enzyme activity than CK samples, which improved the superoxide anion scavenging ability and reduced the accumulation of H_2O_2 content in corn kernels. In conclusion, ACS treatment could maintain the quality of fresh waxy corn and slow down the senescence by maintaining the antioxidant activity of corn kernels. It can provide a theoretical basis and technical reference for the storage of postharvest fresh waxy corn. This research provides a new idea for the development of fresh waxy corn preservative.

Key words: fresh waxy corn; acidic calcium sulfate; cold storage; nutritional quality; antioxidant activity

糯玉米(*Zea mays* L. *sinensis* Kulesh), 又称蜡质玉米, 因其粘性、耐嚼的质地、味道和营养而在中国、韩国、越南、老挝、缅甸和泰国等国家被广泛消费^[1]。由于鲜糯玉米收获后籽粒呼吸依然旺盛, 易出现苞叶失绿变黄、籽粒失水皱缩等品质劣变问题, 对鲜糯玉米的食用价值、营养价值及商业价值等造成严重影响。为满足鲜糯玉米的消费需求, 寻找安全有效的鲜糯玉米采后保鲜技术显得尤为重要。

酸性硫酸钙(acidic calcium sulfate, ACS)是由一定比例的 $Ca(OH)_2$ 、 $CaSO_4$ 、 H_2SO_4 和 H_2O 混合制备的杀菌防腐保鲜产品, 兼具酸性强、易溶于水、低腐蚀、安全环保等优点^[2]。目前, ACS 在国外广泛应用于肉制品的保鲜及饮水杀菌等^[3], 也可用于新鲜果蔬的防腐保鲜。将 ACS 原液用蒸馏水稀释 10^3 倍后浸泡水蜜桃, 能有效地降低果实细胞膜脂质过氧化程度, 保持较高的过氧化物酶活性, 延缓水蜜桃软化衰老进程, 延长果实保鲜期^[4]。张恺洳等^[3]研究发现, 采用 pH5.45 的 ACS 喷洒处理葡萄 20 s, 可有效地控制果实失重和硬度下降, 减少营养物质损耗, 维持果实贮藏品质。Wang 等^[5]研究表明, 经 ACS 处理的荔枝果皮的总黄酮含量高于对照组, 果皮总酚和花青素含量随 ACS 处理浓度的增加而增加, 经 ACS 处理的样品可有效清除超氧阴离子等活性氧自由基, 增强果实贮藏期间的抗氧化酶活性, 从而维持荔枝果实品质。目前, 还未见将 ACS 用于采后鲜糯玉米的报道。

本研究以‘沪红糯 1 号’糯玉米为试材, 研究 ACS 处理对采后鲜糯玉米营养品质及抗氧化活性的影响, 以期鲜糯玉米采后贮藏保鲜、延长货架期提供理论参考和技术借鉴。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

‘沪红糯 1 号’糯玉米 采购自上海惠和南瓜种植合作社, 采收后的新鲜糯玉米整果穗 2 h 内运回实验室冷库, 预冷 10 h 后挑选苞衣颜色均一、玉米穗型大小一致, 无病虫害和机械损伤的玉米备用; 浓硫酸、丙酮、甲醇、浓盐酸、芦丁、没食子酸等 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; ACS 原液 美国 Mionix 公司; 芍药素 上海源叶生物科技有限公司; 过氧化氢(H_2O_2)含量试剂盒 北京盒子生工科技有限公司; 可溶性糖含量试剂盒、超氧阴离子清除能力试剂盒、过氧化氢酶(CAT)试剂盒 苏州梦犀生物医药科技有限公司。

TA.XT plus 型物性测试仪(质构仪) 英国 Stable Micro Systems 公司; WYA-ZT 型阿贝折射仪 上海仪电物理光学仪器有限公司; V20S 水分测定仪 瑞士梅特勒托利多公司; Osterode 型高速冷冻离心机 德国 Biofuge 公司; μ Quant 型酶标仪 美国 BIO-TEK 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品处理 实验设置对照组(CK)和 ACS 处理组, 两组分别将去除最外面两层苞衣的玉米穗充分浸入蒸馏水和 ACS 稀释液(pH 2.26±0.04)中, 浸泡 10 min 后倒立控水 30 min, 擦干表面残留水分, 放置于冷库(4±0.5 °C, 90%±5% RH)贮藏。ACS 稀释液为原液用蒸馏水稀释 10^3 倍^[4]。贮藏期间, 每组果实每 8 d 随机取 6 个玉米果穗, 取出后去除玉米苞衣, 测定果穗中部籽粒的质构特性(果皮硬度), 后用手动脱粒装置收集果穗中部玉米籽粒, 取一部分籽粒打浆后测定水分含量和可溶性固形物含量, 把其余籽粒用液氮速冻并粉碎成粉, 然后保存于-80 °C 冰箱, 用于后续实验。

1.2.2 测定指标和方法

1.2.2.1 失重率 采用称重法^[6]测定失重率, 按照下式计算:

$$\text{失重率}(\%) = (m_1 - m_2)/m_1 \times 100$$

式中: m_1 和 m_2 分别为贮藏前和贮藏不同时间后玉米的质量(g)。

1.2.2.2 水分含量 水分含量使用 V20S 水分测定仪测定, 结果以 % 表示。

1.2.2.3 果皮硬度 鲜糯玉米果穗去除苞衣后, 对其中心的玉米粒使用质构仪(圆柱形探头直径 2 mm)测定, 结果以 kg 表示^[7]。

1.2.2.4 可溶性固形物(soluble solids, TSS)含量 采用折光仪测定法^[8], 结果以 % 表示。

1.2.2.5 可溶性糖含量 精确称取 0.1 g 样品, 加入 1 mL 蒸馏水, 匀浆后 95 °C 水浴 10 min, 冷却后在 25 °C 条件下以 8000 r/min 离心 10 min, 收集上清液, 采用试剂盒测定可溶性糖含量。结果以 mg/g 表示。

1.2.2.6 花青素、类黄酮和总酚含量 参照曹建康等^[8]的方法稍作改动, 结果以 mg/g 表示。以不同浓度的没食子酸制作标准曲线, 为 $y=0.0256x+0.0657$ ($R^2=1$), 计算总酚物质含量; 以不同浓度的芦丁制作标准

曲线, 为 $y=0.0079x+0.0402$ ($R^2=0.9989$), 计算类黄酮含量; 以不同浓度的芍药素制作标准曲线, 为 $y=0.0522x+0.009$ ($R^2=0.9994$), 计算花青素含量。

1.2.2.7 过氧化氢(H_2O_2)含量 精确称取 0.1 g 样品, 加入 1 mL 经 4 ℃ 预冷的丙酮, 冰浴匀浆后于 4 ℃ 8000 r/min 离心 10 min, 取上清液, 采用试剂盒测定 H_2O_2 含量。结果以 $\mu\text{mol/g}$ 表示。

1.2.2.8 超氧阴离子自由基($O_2^{\cdot-}$)清除能力 精确称取 0.1 g 样品, 加入 1 mL 提取液, 冰浴匀浆后于 4 ℃、10 000 r/min 离心 10 min, 取上清液, 采用试剂盒测定 $O_2^{\cdot-}$ 清除能力。结果以 % 表示。

1.2.2.9 过氧化氢酶(catalase, CAT)、抗坏血酸过氧化物酶(ascorbate peroxidase, APX)活性 精确称取 0.1 g 样品, 加入 1 mL 提取液, 冰浴匀浆后于 12000 r/min, 4 ℃ 离心 10 min, 取上清液, 采用试剂盒测定 CAT 活性。结果以 $\mu\text{mol/min/g}$ 表示。

精确称取 1.0 g 样品, 加入 5.0 mL 经 4 ℃ 预冷的提取缓冲液(含 0.1 mol/L EDTA、1 mmol/L 抗坏血酸和 2% PVPP), 冰浴匀浆, 4 ℃、12000 r/min 离心 30 min, 收集上清液作为酶提取液, 测定 APX 活性^[8]。结果以 U/g 表示。

1.3 数据处理

每个指标测定重复 3 次。采用 Origin 2018 版软件绘图和主成分分析(Principal Component Analysis, PCA), 利用 SPSS 17.0 进行统计分析和显著性分析(独立样本 T 检验, 单因素方差分析), $P<0.05$ 表示差异显著, $P<0.01$ 表示差异极显著。

2 结果与分析

2.1 ACS 对鲜糯玉米水分含量、失重率和果皮硬度的影响

水分含量对果蔬品质有很大影响, 在一定范围内, 水分含量高的玉米籽粒鲜嫩多汁, 口感更好^[9]。如图 1A 所示, ACS 处理组的鲜糯玉米的水分含量始终高于同期贮藏的对照组, 且在第 16 和 40 d 二者间差异显著($P<0.05$)。CK 组样品从第 32 d 开始与贮藏第 0 d 的水分含量(58.05%)出现显著性差异($P<0.05$), 在第 40 d 时, 对照组的水分含量显著下降至 54.25%。而贮藏期间 ACS 处理组的水分含量未出现显著下降($P>0.05$)。这可能与果实内部结合水、不易流动水和自由水三种水分转变有关, 它们会在贮藏期间不断地发生转化和损失^[10]。在贮藏前期果实生命活动主要是大分子分解成小分子的化学反应, 这使得大分子物质与水分结合程度降低, 自由水含量升高, 但随着果实的持续性脱水以及一系列不可逆转的变化, 即果实走向衰老阶段, 水分含量下降^[11]。综上可知, ACS 处理可减缓鲜糯玉米籽粒在贮藏期间的水分流失。

鲜食果蔬在采后贮藏期间, 由于蒸腾作用和自身呼吸作用对有机物质的分解都会导致其质量的损

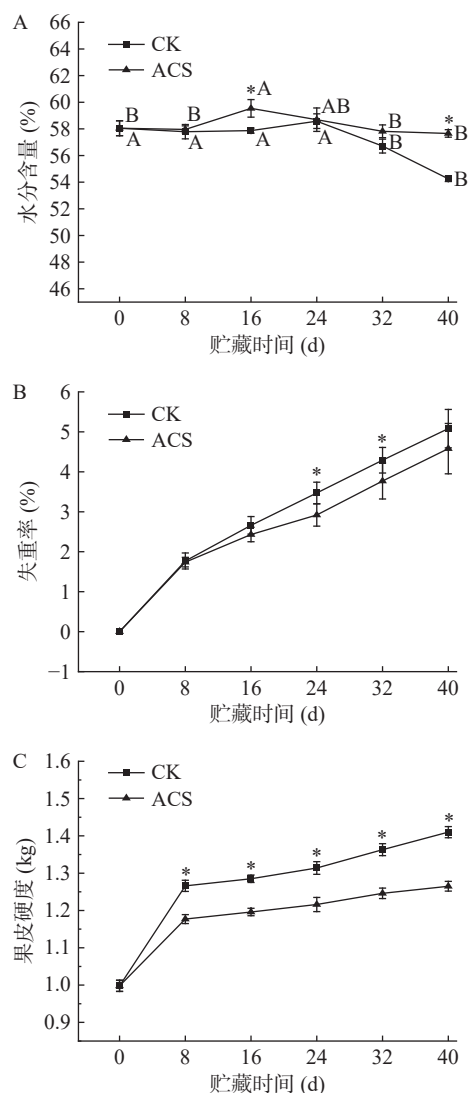


图1 ACS处理对鲜糯玉米水分含量(A)、失重率(B)和果皮硬度(C)的影响

Fig.1 Effects of ACS on moisture content (A), weight loss rate (B), and fruit skin hardness (C) of fresh waxy corn

注: 大写字母表示为两组分别在各贮藏时间的差异性; **表示同一天两组之间差异极显著($P<0.01$), *表示差异显著($P<0.05$); 图2~图6同。

失^[12], 因此, 失重率是评价鲜食果蔬新鲜度的重要指标。如图 1B 所示, 鲜糯玉米的失重率在整个采后贮藏期失重率持续上升。贮藏至第 8 d 时, 鲜糯玉米的失重率均有较大幅度的升高, 这可能是由于采后鲜食玉米呼吸强度较大, 生理代谢依然旺盛, 自身的有机物质易被分解, 这与司婉芳^[13]的研究一致。在整个贮藏过程中, CK 组的失重率始终高于 ACS 处理组, 并在第 24 和 32 d 时差异显著($P<0.05$)。说明 ACS 处理能有效抑制鲜糯玉米失重率的上升, 在一定程度上延缓玉米质量的损失。

鲜糯玉米贮藏过程中, 由于玉米组织木质化和纤维化过程的进行, 导致细胞壁硬化, 果皮硬度增加^[14]。而果皮硬度的变化直接反映采后玉米品质的变化。如图 1C 所示, 采后鲜糯玉米的果皮硬度呈逐渐上升趋势。第 0 d 时, 果皮硬度较低, 为 0.998 kg,

这是因为在乳熟期采收的玉米籽粒饱满,柔嫩适口,弹性较好。贮藏至第 8 d 时,CK 组和 ACS 处理组的果皮硬度显著增加($P<0.05$),分别为 1.266、1.177 kg,这表明鲜糯玉米采后初期的呼吸强度较高,生理代谢旺盛,籽粒果皮变硬,CK 组的果皮硬度增加速度明显大于 ACS 处理组。这与司婉芳^[13]的研究结果较一致,因鲜食玉米采后呼吸强度高,营养成分变化迅速,导致贮藏初期硬度上升迅速。在贮藏期间,ACS 处理组的果皮硬度均显著低于对照组($P<0.05$),说明 ACS 处理可有效延缓鲜糯玉米整个贮藏期间籽粒果皮硬度的增加。

2.2 ACS 处理对鲜糯玉米 TSS 和可溶性糖含量影响

随着贮藏时间的增加,TSS 含量会伴随着玉米籽粒内部可溶性糖和蛋白等营养物质的分解而下降,从而影响鲜食玉米的营养品质^[15]。可溶性糖是评价鲜食玉米食用品质的指标,与鲜食玉米的甜度密切相关,对果蔬的风味品质有较大影响^[16]。如图 2 所示,在整个贮藏期间,对照组和 ACS 组的 TSS 含量(图 2A)和可溶性糖含量(图 2B)均呈下降趋势,并在前 8 d 下降最为迅速。原因可能是采收时淀粉合成酶活性处于最强时期,可溶性糖向淀粉转化的代谢反应仍在进行,导致可溶性糖含量表现为较大程度的下降^[17]。在 8~32 d 贮藏期间,ACS 处理组的 TSS 含量和可溶性糖含量始终极显著高于 CK 组($P<0.01$)。贮藏至末期(第 40 d)时,CK 组 TSS 和可溶性糖含量出现小幅上升,二组间无显著差异($P>0.05$)。这可能与 CK 组失水较多有关^[18-19],贮藏末期 ACS 组仍

保持较高的水分含量,而 CK 组水分大量流失,从而导致 CK 组的可溶性固形物含量及可溶性糖含量上升,与 ACS 处理组间的差异减小。以上结果表明,ACS 处理可有效地抑制鲜糯玉米采后 TSS 含量及可溶性糖含量的下降。

2.3 ACS 处理对鲜糯玉米酚类、类黄酮类和花青素的影响

果蔬中的酚类、类黄酮类和花青素等是植物组织内的非酶抗氧化物质。酚类物质的积累可修复果蔬的组织伤害^[20]。类黄酮是极具代表的多酚类物质^[21],是果蔬中的重要代谢产物^[22]。花青素是存在于植物中的水溶性类黄酮色素^[23],具有较强的抗氧化作用^[24]。如图 3 所示,在贮藏前 24 d,两组鲜糯玉米中总酚、类黄酮和花青素含量均呈明显下降趋势,其中,ACS 处理组总酚在第 8 d 和 16 d 分别下降了 4.46% 和 11.74%,而对照组下降了 11.27% 和 16.43%,ACS 处理组类黄酮含量在第 16 d 时下降了 20.37%,而对

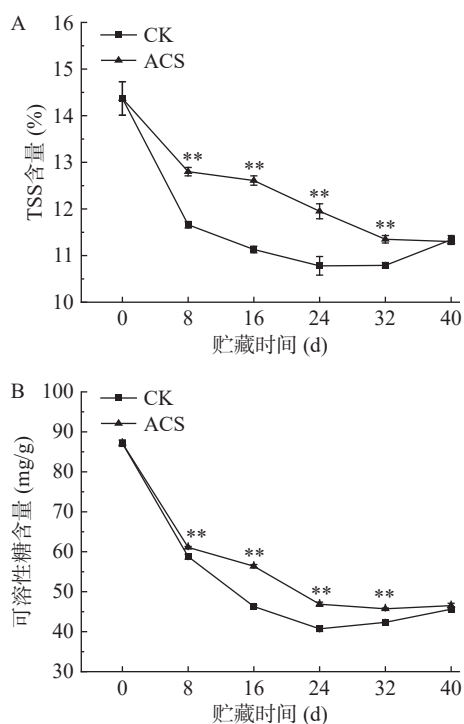


图 2 ACS 处理对鲜糯玉米 TSS(A)和可溶性糖(B)含量的影响

Fig.2 Effects of ACS on TSS (A) and soluble sugar (B) contents of fresh waxy corn

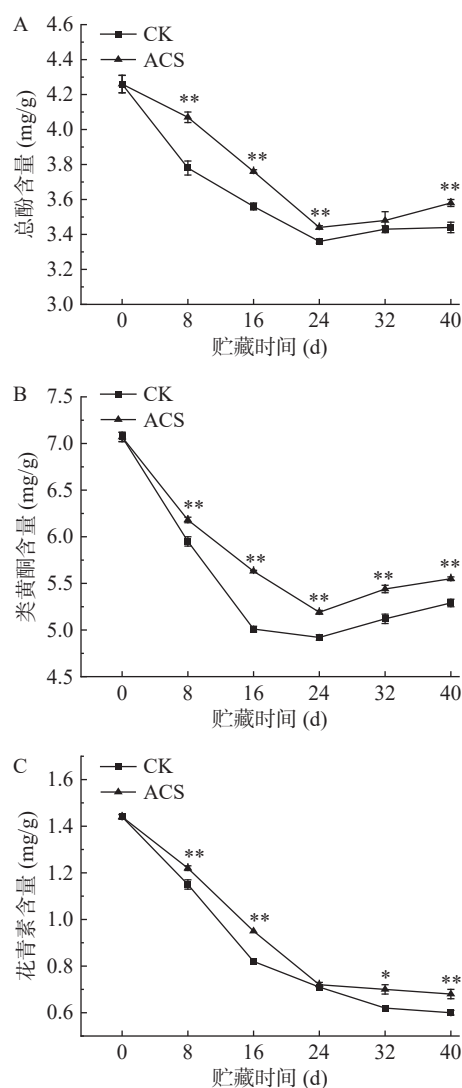


图 3 ACS 处理对鲜糯玉米总酚(A)、类黄酮(B)和花青素(C)含量的影响

Fig.3 Effects of ACS on total phenol (A), flavonoids (B) and anthocyanin (C) content in fresh waxy maize

照组下降了 29.14%。随后两组果实中总酚和类黄酮含量有所增加。而同期两组果实中花青素含量继续下降但明显趋缓。在整个贮藏过程中, ACS 处理组的总酚、类黄酮和花青素含量几乎均极显著高于对照组 ($P<0.01$)。这与 Wang 等^[5]的研究结果较一致, 经 ACS 处理的荔枝果皮的总黄酮、总酚和花青素含量均高于对照组, 说明 ACS 处理可在一定程度上抑制玉米籽粒总酚、类黄酮和花青素含量的下降, 从而保持较好的抗氧化能力。

2.4 ACS 处理对鲜糯玉米 H_2O_2 含量的影响

活性氧自由基(ROS)是植物代谢的正常产物^[25]。采后果蔬在维持生命代谢活动时均会产生 ROS, 当果蔬受到逆境胁迫时, ROS 的产生速率会增加, 低含量的 ROS 在调节果实衰老中起着至关重要的作用^[26], 而 ROS 的过量积累会破坏细胞内 ROS 代谢平衡, 造成果实细胞质膜的损伤^[27]。 H_2O_2 是果蔬采后新陈代谢过程中产生的 ROS 之一, 积累的 H_2O_2 可导致细胞膜脂质过氧化损害, 加速细胞衰老^[28]。如图 4 所示, 贮藏至第 8 d 时, CK 组和 ACS 处理组的 H_2O_2 含量分别为 3.14、2.03 $\mu\text{mol/g}$, ACS 处理组此时的 H_2O_2 含量仅为 CK 组的 64.65%, 至第 24 d 时才达到峰值(2.16 $\mu\text{mol/g}$), 这可能是由于采后损伤导致 CK 组玉米在贮藏初期 H_2O_2 含量迅速积累, 而 ACS 处理可以有效减缓 H_2O_2 含量的积累, 延缓 H_2O_2 含量峰值的出现, 从而有效减轻玉米籽粒细胞膜脂质过氧化损害, 延缓果实衰老。这与张恺洳等^[3]的研究结果相似, ACS 处理红地球葡萄可降低细胞膜破坏程度, 延缓葡萄果实衰老。贮藏 8 d 后, CK 组 H_2O_2 含量下降以及之后两组 H_2O_2 含量的波动变化, 可能是玉米果实逐渐衰老与玉米内部活性氧清除系统综合作用的结果, 但 ACS 处理组的 H_2O_2 含量始终低于对照组, 并在第 8、32 d 时存在极显著差异 ($P<0.01$), 第 16 d 时差异显著 ($P<0.05$)。上述结果表明, ACS 处理可有效减少 H_2O_2 含量的积累, 从而保持玉米贮藏品质。

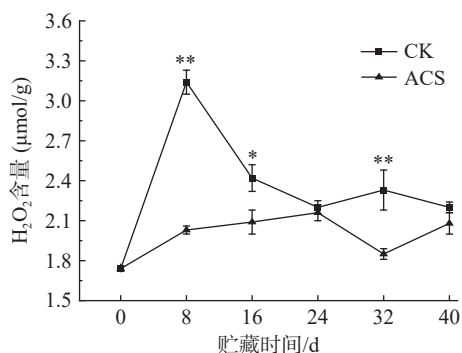


图 4 ACS 处理对鲜糯玉米 H_2O_2 含量影响
Fig.4 Effect of ACS on H_2O_2 content in fresh waxy corn

2.5 ACS 处理对鲜糯玉米 $O_2^{\cdot-}$ 清除率的影响

$O_2^{\cdot-}$ 在植物代谢过程中产生, $O_2^{\cdot-}$ 的过量积累会引起细胞结构和功能的破坏^[29]。如图 5 所示, 各处理组的 $O_2^{\cdot-}$ 清除率均呈上升趋势, ACS 处理组的 $O_2^{\cdot-}$ 清除率始终高于 CK 组, 在第 16 d 时差异显著 ($P<0.05$), 在第 40 d 时差异极显著 ($P<0.01$)。说明 ACS 处理对鲜糯玉米的 $O_2^{\cdot-}$ 清除作用明显, 具有较好的抗氧化效果, 从而延缓果蔬衰老。

理组的 $O_2^{\cdot-}$ 清除率均呈上升趋势, ACS 处理组的 $O_2^{\cdot-}$ 清除率始终高于 CK 组, 在第 16 d 时差异显著 ($P<0.05$), 在第 40 d 时差异极显著 ($P<0.01$)。说明 ACS 处理对鲜糯玉米的 $O_2^{\cdot-}$ 清除作用明显, 具有较好的抗氧化效果, 从而延缓果蔬衰老。

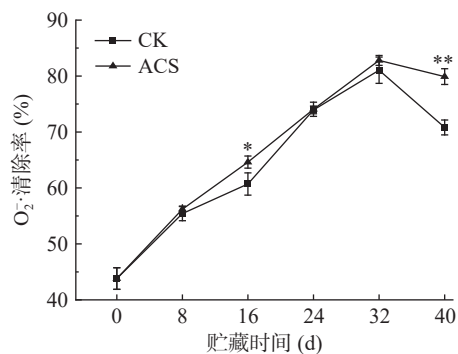


图 5 ACS 处理对鲜糯玉米 $O_2^{\cdot-}$ 清除率的影响
Fig.5 Effect of ACS on $O_2^{\cdot-}$ removal rate in fresh waxy corn

2.6 ACS 处理对鲜糯玉米抗氧化酶的影响

果蔬体内存在较完整的活性氧清除系统, CAT 和 APX 是果蔬体内重要的 ROS 清除酶^[30]。CAT 能够催化 H_2O_2 分解为水和分子氧, 维持细胞的 ROS 代谢平衡^[31]。APX 在催化抗坏血酸与 H_2O_2 发生氧化还原反应的过程中将 H_2O_2 分解清除^[32], 减缓植物细胞的过氧化作用^[33]。如图 6 所示, 各组 CAT 活性和 APX 活性均随贮藏时间的延长呈下降趋势。在 40 d 贮藏期间, ACS 处理组的 CAT 活性显著高于同一贮藏时间的对照组 ($P<0.05$), APX 活性也始终高于对照组, 并在贮藏第 8、40 d 时差异显著

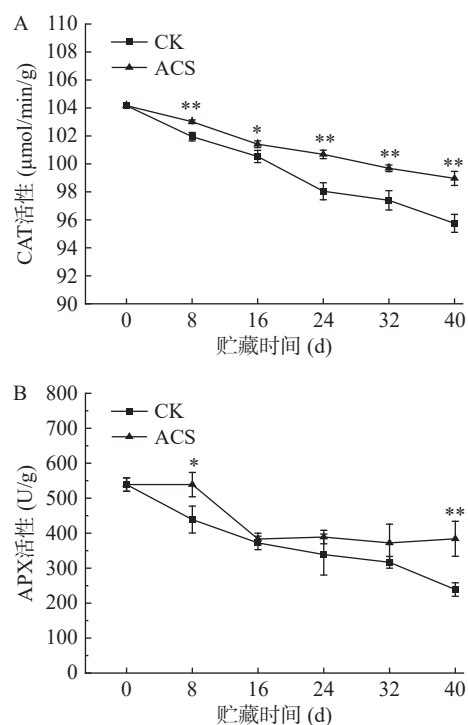


图 6 ACS 处理对鲜糯玉米 CAT 和 APX 活性的影响
Fig.6 Effects of ACS on CAT (A) and APX (B) activity in fresh waxy corn

($P<0.05$)。贮藏 40 d 时, ACS 处理组的 CAT 和 APX 酶活性分别下降了 4.99% 和 28.74%, 而 CK 组分别下降了 8.07% 和 55.67%。高抗氧化酶活性通常与减轻氧化损伤和减少果实品质劣变有关^[34]。Tang 等^[35]研究发现, 酸性电解水处理龙眼可以提高 CAT、APX 和超氧化物歧化酶等抗氧化酶活性, 这些酶在维持龙眼贮藏期间活性氧代谢和抑制果实病害方面发挥重要作用。上述结果说明 ACS 处理可有效地抑制采后鲜糯玉米 CAT 和 APX 活性的下降, 从而减缓玉米籽粒的过氧化作用, 延缓果实衰老。

2.7 PCA 综合分析鲜糯玉米品质变化

PCA 图可以直观表现不同处理对鲜糯玉米品质稳定性的影响, 置信圈越窄小, 表明各指标在贮藏期间的变化越小, 即品质越稳定, 保鲜效果越佳^[36]。采用 PCA 法综合分析不同处理后鲜糯玉米品质随贮藏时间的变化, 得出 PCA 图。由图 7 可知, ACS 处理组的置信圈比 CK 组窄小, 表明 ACS 处理组的鲜糯玉米各项指标在贮藏期间变化更小, 即 ACS 处理对鲜糯玉米有较好的保鲜效果。

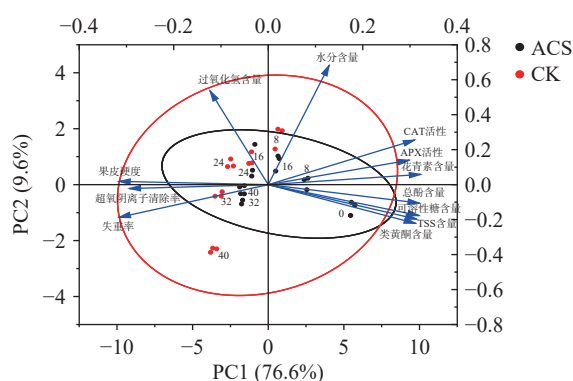


图 7 不同处理对鲜糯玉米贮藏期品质影响的主成分图
Fig.7 Principal component analysis of the effect of different treatments on the qualities of fresh waxy corn during storage

3 结论

鲜糯玉米籽粒含水率高, 采后呼吸作用依然旺盛, 其营养物质不断分解以维持采后鲜糯玉米的生理代谢进程, 导致鲜糯玉米的营养品质随贮藏时间的延长而下降。本试验结果表明, ACS 能有效延缓鲜糯玉米的水分流失; 抑制鲜糯玉米在贮藏期间失重率和果皮硬度的上升; 维持鲜糯玉米 TSS 和可溶性糖含量; 抑制非酶抗氧化物质(总酚、类黄酮、花青素)含量的下降, 并保持较高的鲜糯玉米 CAT 和 APX 活性, 加速超氧阴离子的清除速率, 有效减缓 H_2O_2 的积累, 进而提高鲜糯玉米的贮藏品质。本研究结果为 ACS 应用于鲜糯玉米采后保鲜及保鲜剂开发提供了理论依据, 但目前有关 ACS 的保鲜机制研究还不多, 还需从分子水平进一步深入研究。

参考文献

[1] SAIKAEW K, LERTRAT K, MEENUNE M, et al. Effect of

high-pressure processing on colour, phytochemical contents and antioxidant activities of purple waxy corn (*Zea mays* L. var. ceratina) kernels[J]. *Food Chemistry*, 2018, 243: 328–337.

[2] 刘晨霞, 乔勇进, 黄宇斐, 等. 酸性硫酸钙处理对水蜜桃采后菌枝根霉致病力的影响[J]. *核农学报*, 2019, 33(7): 1377–1385.

[LIU C X, QIAO Y J, HUANG Y F, et al. Effect of acidic calcium sulfate treatment on pathogenicity of postharvest *Rhizopus stolonifer* in honey peach[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, 33(7): 1377–1385.]

[3] 张恺洳, 翟荣臻, 米黑里巴, 等. 酸性硫酸钙对红地球葡萄采后灰霉病的抑制[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(8): 134–140, 353.

[ZHANG K R, ZHAI R Z, MIHEILIBA, et al. Inhibition of acid calcium sulfate on postharvest red globe grapes of *Botrytis cinerea*[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36(8): 134–140, 353.]

[4] 刘晨霞, 乔勇进, 黄宇斐, 等. 酸性硫酸钙对水蜜桃贮藏保鲜效果的研究[J]. *上海农业学报*, 2019, 35(1): 80–86. [LIU C X, QIAO Y J, HUANG Y F, et al. Effects of acid calcium sulfate on the storage and preservation of peach[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2019, 35(1): 80–86.]

[5] WANG C Y, CHEN H J, JIN P, et al. Maintaining quality of litchi fruit with acidified calcium sulfate[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(15): 8658–8666.

[6] 王娟紫, 王春芳, 乔勇进, 等. 近冰温贮藏对鲜糯玉米采后品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(14): 336–345. [WANG J Z, WANG C F, QIAO Y J, et al. Effect of near-freezing temperature storage on the quality of postharvest fresh waxy corn[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(14): 336–345.]

[7] YANG C, DUAN W Y, XIE K L, et al. Effect of salicylic acid treatment on sensory quality, flavor-related chemicals and gene expression in peach fruit after cold storage[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 161: 111089.]

[8] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2011: 44–46, 68–70, 131–132. [CAO J K, JIANG W B, ZHAO Y M. Postharvest physiological and biochemical guidance of fruits and vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2011: 44–46, 68–70, 131–132.]

[9] 徐瑞. 鲜糯玉米冻藏期间品质变化研究[D]. 重庆: 西南大学, 2019. [XU R. Study on quality changes of fresh waxy corn during freezing storage[D]. Chongqing: Southwest University, 2019.]

[10] 黄国中, 王琴, 刘东杰. 基于 LF-NMR 及其成像技术探究冬枣贮藏过程中的水分变化[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(21): 319–324. [HUANG G Z, WANG Q, LIU D J. Application of LF-NMR and its imaging technology in the study of winter jujube storage process[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(21): 319–324.]

[11] 罗洁莹, 汤梅, 丘苑新, 等. 利用 LF-NMR 技术研究鹰嘴蜜桃在贮藏过程中水分的变化[J]. *仲恺农业工程学院学报*, 2019, 32(1): 23–27, 34. [LUO J Y, TANG M, QIU Y X. Change of water status during olecranon peach storage by LF-NMR technique[J]. *Journal of Zhongkai University of Agriculture and Engineering*, 2019, 32(1): 23–27, 34.]

[12] 濮艳清, 卢立新, 潘嘹, 等. 预处理结合气调包装对混合鲜切果蔬品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(6): 114–120.

[PU Y Q, LU L X, PAN L, et al. Effect of pretreatment combined with modified atmosphere packaging on the quality of mixed fresh-cut fruits and vegetables[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(6): 114–120.]

[13] 司婉芳. 鲜食玉米保鲜包装技术及包装材料研究[D]. 上

- 海:上海海洋大学,2019. [SI W F. Study on fresh maize preservation packaging technology and packaging materials[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019.]
- [14] 张同颖,李永生,李玥,等.多胺氧化酶(PAO)调控光诱导玉米中胚轴伸长的生理机制[J].*作物学报*,2016,42(5):734-742. [ZHANG T Z, LI Y S, LI Y, et al. Physiological mechanism regulating light-induced mesocotyl elongation by polyamine oxidase (PAO) in maize[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(5): 734-742.]
- [15] 郭媛丽.硅窗气调膜结合不同保鲜剂对鲜蒜贮藏期间品质的影响[D].太原:山西农业大学,2019. [GUO Y L. Combination with different preservatives on the quality of fresh garlic during storage[D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2019.]
- [16] 时文林,赵雅琦,闫志成,等.不同预冷方式对甜玉米储藏品质的影响[J].*食品科学*,2022,43(15):218-226. [SHI W L, ZHAO Y Q, YAN Z C, et al. Effects of different precooling methods on storage quality of sweet corn[J]. *Food Science*, 2022, 43(15): 218-226.]
- [17] 方志军.鲜食玉米穗采收后保鲜技术研究[D].泰安:山东农业大学,2008. [FANG Z J. Study of fresh-maintaining technique of fresh-eating maize in post-harvesting[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2008.]
- [18] 刘瑶,左进华,高丽朴,等.流态冰预冷处理对甜玉米贮藏品质的影响[J].*制冷学报*,2020,41(3):83-90. [LIU Y, ZUO J H, GAO L P, et al. Effect of slurry ice precooling treatment on quality of sweet corn[J]. *Journal of Refrigeration*, 2020, 41(3): 83-90.]
- [19] 范新光,肖璐,张振富,等.减压冷藏和气调冷藏对鲜切西兰花保鲜效果的比较分析[J].*食品科学*,2014,35(2):277-281. [FAN X G, XIAO L, ZHANG Z F, et al. Comparative analysis between hypobaric storage and controlled atmosphere storage in the preservation of fresh-cut broccoli[J]. *Food Science*, 2014, 35(2): 277-281.]
- [20] 黄天姿,李瑞娟,杨淑霞,等.电子束辐照对不同品种猕猴桃品质的影响[J].*食品科学*,2022,43(17):297-305. [HUANG T Z, LI R J, YANG S X, et al. Effects of electron beam irradiation on the quality of different varieties kiwifruit[J]. *Food Science*, 2022, 43(17): 297-305.]
- [21] VALKO M, LEIBFRITZ D, MONCOL J, et al. Free radicals and antioxidants in normal physiological functions and human disease[J]. *International Journal of Biochemistry & Cell Biology*, 2007, 39(1): 44-84.
- [22] 董宗宗.臭氧对鲜食糯玉米保鲜及穗腐病菌抑制效果的研究[D].上海:上海师范大学,2019. [DONG Z Z. Study on the effect of ozone on the preservation of fresh waxy corn and the inhibition of ear rot[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2019.]
- [23] 曾茜茜,雷琳,赵国华,等.花青素加工贮藏稳定性的改善及应用研究进展[J].*食品科学*,2018,39(11):269-275. [ZENG X X, LEI L, ZHAO G H, et al. Improving the stability of anthocyanins during processing and storage: A review[J]. *Food Science*, 2018, 39(11): 269-275.]
- [24] 邹敏,王永清,杨洋,等.茄子果实植物学性状与品质性状相关分析[J].*江苏农业科学*,2019,47(13):171-174. [ZOU M, WANG Y Q, YANG Y, et al. Correlation analysis between botanical traits and quality traits of eggplant fruits[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(13): 171-174.]
- [25] LI Y, LU H Y, CHENG Q, et al. Changes of reactive oxygen species and scavenging enzymes of persimmon fruit treated with CO₂ deastringency and the effect of hydroxyl radicals on breakdown of cell wall polysaccharides *in vitro*[J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 199: 81-87.
- [26] LIN Y X, LIN H T, CHEN Y H, et al. The role of ROS-induced change of respiratory metabolism in pulp breakdown development of longan fruit during storage[J]. *Food Chemistry*, 2020, 305: 125439.
- [27] 唐金艳,孙钧政,李美玲,等.酸性电解水对采后龙眼果实贮藏期间活性氧代谢的影响[J].*食品科学*,2022,43(15):185-190. [TANG J Y, SUN J Z, LI M L, et al. Effect of acid electrolyzed water on reactive oxygen species metabolism of harvested longan fruit during storage[J]. *Food Science*, 2022, 43(15): 185-190.]
- [28] 董桂君,乔勇进,刘晨霞,等.氯化钙结合不同包装材料对茭白采后衰老及活性氧代谢的影响[J].*食品与发酵工业*,2022,48(18):168-176. [DONG G J, QIAO Y J, LIU C X, et al. Effect of calcium chloride combined with different packaging materials on postharvest senescence and active oxygen metabolism of *Zizania latifolia*[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(18): 168-176.]
- [29] CHEN Y H, HUNG Y C, CHEN M Y, et al. Enhanced storability of blueberries by acidic electrolyzed oxidizing water application may be mediated by regulating ROS metabolism[J]. *Food Chemistry*, 2019, 270: 229-235.
- [30] ZHAO H D, LIU B D, ZHANG W L, et al. Enhancement of quality and antioxidant metabolism of sweet cherry fruit by near-freezing temperature storage[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 147: 113-122.
- [31] 高名月,赵政阳,王燕,等.气调贮藏对瑞雪苹果的保鲜效果与果皮褐变机制的初探[J].*食品与发酵工业*,2023,49(4):123-129. [GAO M Y, ZHAO Z Y, WANG Y, et al. Effects of controlled atmosphere on preservation of Ruixue apples and preliminary study on pericarp browning mechanism[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(4): 123-129.]
- [32] CZARNOCKA W, KARPIŃSKI S. Friend or foe? Reactive oxygen species production, scavenging and signaling in plant response to environmental stresses[J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2018, 122: 4-20.
- [33] 胡均如,张敏.热处理提高采后果蔬低温贮藏期间活性氧清除能力的机制[J].*食品与发酵工业*,2021,47(12):269-276. [HU J R, ZHANG M. Mechanism of heat treatment to improve the active oxygen scavenging ability of postharvest vegetables during low temperature storage[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(12): 269-276.]
- [34] LIN Y F, CHEN M Y, LIN H T, et al. DNP and ATP induced alteration in disease development of *Phomopsis longanae* Chi-inoculated longan fruit by acting on energy status and reactive oxygen species production-scavenging system[J]. *Food Chemistry*, 2017, 228: 497-505.
- [35] TANG J Y, CHEN H B, LIN H T, et al. Acidic electrolyzed water treatment delayed fruit disease development of harvested longans through inducing the disease resistance and maintaining the ROS metabolism systems[J]. *Food Chemistry*, 2021, 17: 111349.
- [36] 梁钻好,林华兴,陈海强,等.贮藏温度对鲜毛豆贮藏期品质的影响[J].*食品工业科技*,2023,44(19):382-389. [LIANG Z H, LIN H X, CHEN H Q, et al. Influence of storage temperature on the qualities of fresh soybeans during storage[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(19): 382-389.]