

贮藏温度对鲜切甜瓜品质和活性氧代谢的影响

涂明梅^{1,2}, 武张飞^{2,3}, 梅映雪¹, 石声琼¹, 郁志芳²

(1. 湄潭县农业农村局 贵州湄潭 564100; 2. 南京农业大学食品科学技术学院 南京 210095;
3. 廊坊师范学院生命科学学院 河北廊坊 065000)

摘要: 为探讨 5 和 15 ℃ 贮藏温度对鲜切甜瓜品质和活性氧代谢的影响, 以玉菇甜瓜为材料, 分别于贮藏 0~8 d 和 0~4 d 分时段测定相关生理指标。结果表明, 贮藏期间鲜切甜瓜呼吸速率逐渐升高, 与 15 ℃ 处理相比, 5 ℃ 低温维持了鲜切甜瓜的硬度、可溶性固形物含量、可滴定酸含量, 延缓了贮藏期间鲜切甜瓜丙二醛含量的升高, 贮藏期结束超氧化物歧化酶和过氧化物酶保持了较高的活性状态, 分别为 13.11、518.85 U·mg⁻¹, 同时抑制了超氧阴离子和过氧化氢的积累。以上结果表明, 与 15 ℃ 处理相比, 5 ℃ 低温贮藏显著抑制了鲜切甜瓜呼吸速率, 增强了其抗氧化系统活性, 降低了鲜切甜瓜贮藏期间的活性氧水平, 减轻了氧化应激, 保持了鲜切甜瓜较高的品质。研究结果为鲜切甜瓜低温贮藏的品质保持提供了科学依据。

关键词: 鲜切甜瓜; 温度; 贮藏; 品质; 抗氧化活性

中图分类号: S652

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2025)11-099-06

Effects of storage temperature on the quality and reactive oxygen metabolism of fresh-cut melon

TU Mingmei^{1,2}, WU Zhangfei^{2,3}, MEI Yingxue¹, SHI Shengqiong¹, YU Zhifang²

(1. Agriculture and Rural Affairs Bureau of Meitan County, Meitan 564100, Guizhou, China; 2. College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, Jiangsu, China; 3. College of Life Science, Langfang Normal University, Langfang 065000, Hebei, China)

Abstract: In order to investigate the effects of storage temperatures of 5 and 15 ℃ on the quality and active oxygen metabolism of fresh-cut melon, Yugu melon was used as the material. The results showed that the respiration rate of fresh-cut melon gradually increased during storage. The 5 ℃ treatment maintained the hardness, soluble solid content, and titratable acid content of fresh-cut melon, and delayed the increase in the malondialdehyde content of fresh-cut melon during storage compared with the 15 ℃ treatment. At the end of the storage period, superoxide dismutase and peroxidase maintained high activity levels, which were 13.11 and 518.85 U·mg⁻¹, respectively, and inhibited the accumulation of superoxide anions and hydrogen peroxide. The results showed that compared with the 15 ℃ treatment, 5 ℃ treatment significantly inhibited the respiration rate of fresh-cut melon, enhanced the activity of its antioxidant system, reduced the level of reactive oxygen species during the storage of fresh-cut melon, alleviated oxidative stress, and maintained the higher quality of fresh-cut melon. Which provided a scientific basis for maintaining the quality of fresh-cut melon stored at low temperature.

Key words: Fresh cut melon; Temperature; Storage; Quality; Antioxidant activity

甜瓜属葫芦科甜瓜属, 是人们最喜爱的瓜果之一。2022 年全国甜瓜栽培面积 38.08 万 hm², 产量达到 1 386.79 万 t^[1]。甜瓜有利于人体心脏、肝脏以及肠道系统的活动, 促进内分泌和造血性能; 中医

学认为甜瓜具有“消暑热, 解烦渴, 利小便”的功效^[2], 因而甜瓜产品越来越受到研究人员和消费者的关注。研究表明, 在甜瓜的常温运输中, 1-MCP 处理能够有效保持甜瓜货架期品质^[3]。鲜切甜瓜是

收稿日期: 2025-02-25; 修回日期: 2025-05-26

基金项目: 河北省自然科学基金(C2025408025); 河北省教育厅科学项目(QN2022174, BJ2025154)

作者简介: 涂明梅, 女, 农艺师, 研究方向为农产品贮藏与加工及农作物种植。E-mail: 1621021999@qq.com

通信作者: 武张飞, 男, 副教授, 主要研究方向为农产品贮藏与加工。E-mail: 358031880@qq.com

郁志芳, 男, 教授, 主要研究方向为农产品贮藏与加工及采后生理学。E-mail: yuzhifang@njau.edu.cn

指新鲜甜瓜经分级、清洗、整修、去皮、切分、包装等处理后可供直接食用的一种新式甜瓜产品^[4],具有新鲜、营养、卫生、方便等特点,在国内外深受广大消费者欢迎。Oms-Oliu 等^[5]研究发现,70 kPa O₂可减轻 Piel de Sapo 甜瓜贮藏期间的创伤应激。Aguayo 等^[6]研究表明,0.5% CaCl₂ 处理结合微孔薄膜包装鲜切甜瓜片,5 °C 可贮藏 8 d,而不同的钙盐类型会导致甜瓜切片贮藏期间的差异,其中弱有机酸盐对维持品质效果更好。目前,对国内甜瓜采后研究主要集中在感官评价、生理生化变化、保鲜处理方式和贮藏方法的应用等方面。成善汉等^[7]研究表明,4 °C 下食盐处理可维持鲜切甜瓜的外观品质,保持 SOD 高活性,维持 POD 低活性,有效防止果实褐变,而适宜的漂烫温度和时间可以改善鲜切产品货架期及外观品质^[8],精准控温后鲜切胡萝卜的保鲜效果明显^[9]。低温贮藏作为水果常见的贮藏方式,可以减缓果实可溶性固形物和有机酸含量下降,延缓果皮硬度、果肉硬度和咀嚼性等下降,并抑制果实软化,较好地维持果实品质^[10]。

鲜切产品作为一种新型消费品,目前鲜有报道,而低温贮藏是如何调节活性氧水平以维持鲜切甜瓜的品质还未见报道。鉴于此,笔者以玉菇甜瓜为对象,研究不同温度对贮藏期间鲜切甜瓜品质和活性氧代谢的影响,以期为鲜切甜瓜的贮藏保鲜提供理论依据和技术指导。

1 材料与方法

1.1 材料

选择商业成熟期的玉菇甜瓜,于 2018 年 5 月 2 日采自江苏省兴化市生态园,3 h 内运至南京农业大学果蔬实验室,20 °C 放置 24 h 充分散去田间热量,挑选成熟度和色泽基本一致、大小均匀、无机械损伤和病害的果实用于试验。

将挑选好的果实去掉果皮和子囊后,切分为 2.0 cm×2.0 cm×2.0 cm 的鲜切甜瓜立方块,用塑料透明保鲜盒包装(封盖,17.2 cm×12.0 cm×6.8 cm,每盒 110 g)。包装完整的鲜切甜瓜分为两组,分别贮藏于 5 °C 和 15 °C 环境条件下。5 °C 的鲜切甜瓜分别于第 0、1、2、4、8 天测定指标,15 °C 的鲜切甜瓜分别于第 0、1、2、3、4 天测定指标。试验为随机区组设计,设 3 个生物学重复,每个重复取 10 个完整甜瓜。

1.2 测定指标及方法

1.2.1 品质指标测定 呼吸速率:从贮藏的每个时

间点、每个生物学重复中随机选择 3 盒甜瓜。每个时间点的鲜切甜瓜用保鲜膜封至不透气,贮藏 1 h 后,通过 CO₂ 气体分析仪(Check Mate 3, Dansensor, Denmark)测定塑料盒中 CO₂ 相对含量(与空气相比)。呼吸速率表示为基于鲜质量的 mg·kg⁻¹·h⁻¹ 的 CO₂。

硬度:采用装置 5 mm 直径探头的 FHM-5 硬度计测定果肉内侧硬度,下压距离为 5 mm,重复取果肉测定 3 次,记录数据,取平均值,结果表示为牛顿(N)。

可溶性固形物(TSS)和可滴定酸(TA)含量:从每组样品取甜瓜组织 30 g,均匀研磨成汁后用 4 层纱布过滤,收集滤液。采用 PAL-BX/ACID 5 测定滤液中 TSS 和 TA 含量。采用 pH 计(TOLEDO FE 20)测定果实 pH。

1.2.2 生理指标测定 参考 Huan 等^[11]的方法测定相对电导率。参考 Huan 等^[11]的方法测定丙二醛(MDA)、过氧化氢(H₂O₂)和超氧阴离子(O₂^{·-})含量。参考 Luo 等^[12]的方法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性;参考 Wang 等^[13]的方法测定抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性;参考 Luo 等^[12]的方法测定过氧化物酶(POD)活性。

1.3 数据处理

所有数据均为 3 个生物学重复的平均值,表示为平均值±标准误差。采用 Excel 和 WPS 软件处理数据;采用 SPSS 17.0 进行差异显著性分析,采用 Origin Pro 2018 C-64-bit 软件作图。

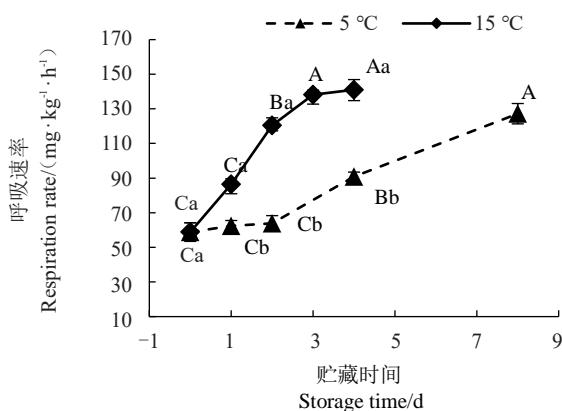
2 结果与分析

2.1 不同贮藏温度对呼吸速率的影响

呼吸作用是采后果蔬贮藏中重要的生理活动,可反映果蔬的贮藏性能。如图 1 所示,两个设定的贮藏温度下,鲜切甜瓜呼吸速率随贮藏时间延长逐渐上升,贮藏期结束时,低温下鲜切甜瓜呼吸速率为 127.20 mg·kg⁻¹·h⁻¹,提高了 1.16 倍,同一贮藏时间的呼吸速率一直显著低于 15 °C,表明贮藏温度对鲜切甜瓜的呼吸速率有显著影响,5 °C 低温可以抑制鲜切甜瓜的呼吸作用,降低呼吸消耗,有利于产品的品质保持。

2.2 不同贮藏温度对品质指标的影响

如图 2-A 所示,贮藏期间鲜切甜瓜的硬度随着贮藏期的延长逐渐下降;与贮藏 0 d 相比,贮藏期结束时,低温下鲜切甜瓜硬度的维持在初始值的 46.49%,而 15 °C 下鲜切甜瓜的硬度已降至初始值



注:不同大写字母表示同一处理的不同贮藏时间在0.05水平差异显著;不同小写字母表示同一贮藏时间的不同处理在0.05水平差异显著。下同。

Note: Different capital letters indicate significant difference among different storage time of the same treatment at 0.05 level; Different small letters indicate significant difference between different treatments of the same storage time at 0.05 level. The same below.

图1 贮藏温度对鲜切甜瓜呼吸速率的影响

Fig. 1 Effects of storage temperature on the respiration rate of fresh-cut melon

的37.72%,较同一贮藏时期的低温处理硬度显著降低27.78%,且整个贮藏期间5 °C低温下鲜切甜瓜的

硬度始终高于15 °C处理,表明贮藏期间鲜切甜瓜存在不同程度的软化,但低温可以有效地延缓软化发生。5 °C低温下鲜切甜瓜的可溶性固形物含量呈先下降后上升的趋势,而15 °C贮藏的鲜切甜瓜贮藏期间持续下降,贮藏4 d时,5 °C低温处理的鲜切甜瓜可溶性固形物含量则开始上升,贮藏期结束时,可溶性固形物含量较15 °C贮藏4 d时升高0.81百分点(图2-B),这可能与贮藏后期果蔬中淀粉等大分子物质在水解酶的作用下水解成单糖导致糖分的积累有关。与可溶性固形物含量变化不同,5 °C低温下鲜切甜瓜的可滴定酸含量逐渐上升,在贮藏4 d时急剧上升,后期保持较高含量,贮藏期结束时达7.87%,而15 °C贮藏的鲜切甜瓜可滴定酸含量呈先短暂上升后下降的趋势,在贮藏1 d时达到高峰,为9.40%,最终维持在6.00%,与5 °C低温相差1.87百分点;在贮藏1 d时,5 °C贮藏的可滴定酸含量显著低于15 °C,而贮藏4 d时,5 °C贮藏的可滴定酸含量显著高于15 °C(图2-C)。pH的变化则与可滴定酸含量变化相同,5 °C低温下逐渐上升,贮藏期结束时pH维持在6.27,而15 °C下呈先上升

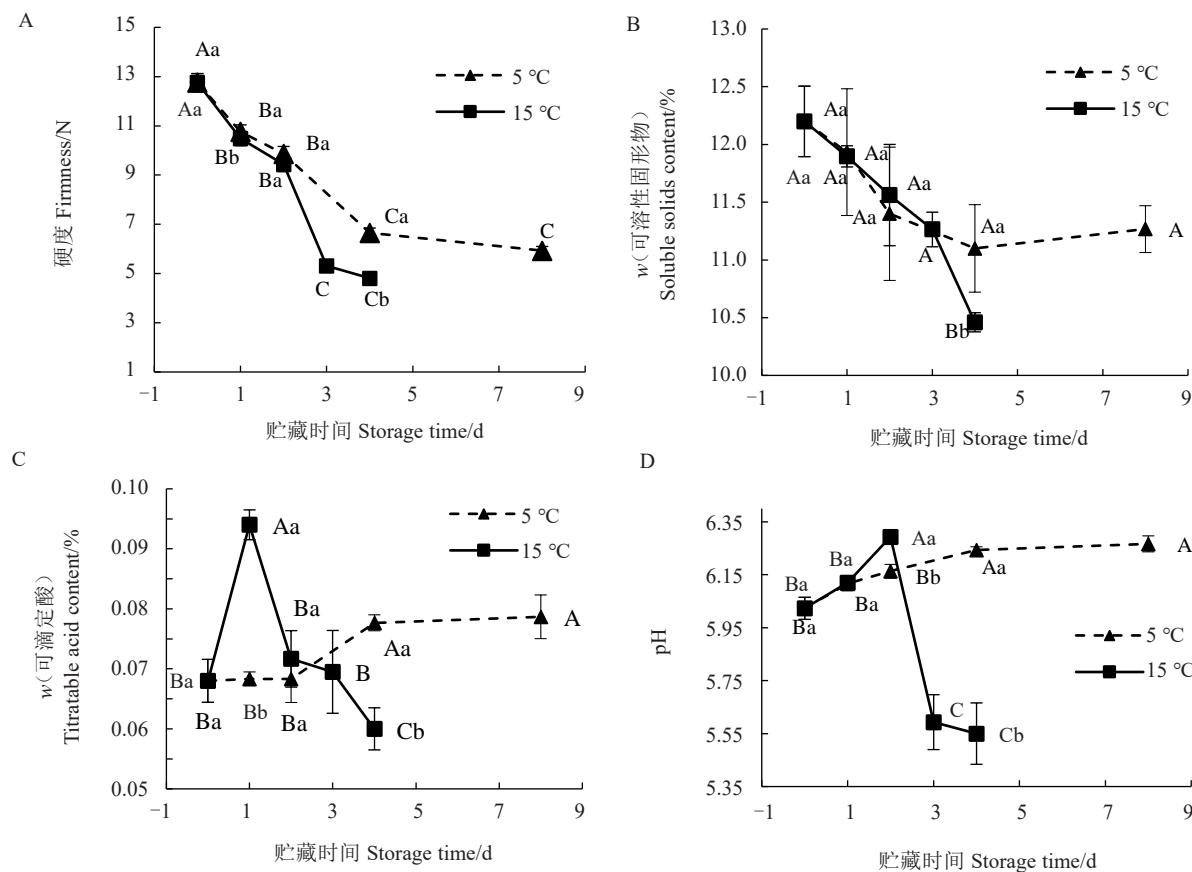


图2 贮藏温度对鲜切甜瓜硬度、可溶性固形物含量、可滴定酸含量、pH的影响

Fig. 2 Effects of storage temperature on the firmness, soluble solids content, titratable acid content, pH of fresh-cut melon

后下降的趋势,贮藏2 d时pH最高,为6.29,在贮藏期结束时下降至5.55,且在贮藏后期,低温下贮藏的鲜切甜瓜pH显著高于15 °C处理(图2-D)。以上数据表明,5 °C低温可延长鲜切甜瓜品质保持的时间。

2.3 不同贮藏温度对电导率和丙二醛含量的影响

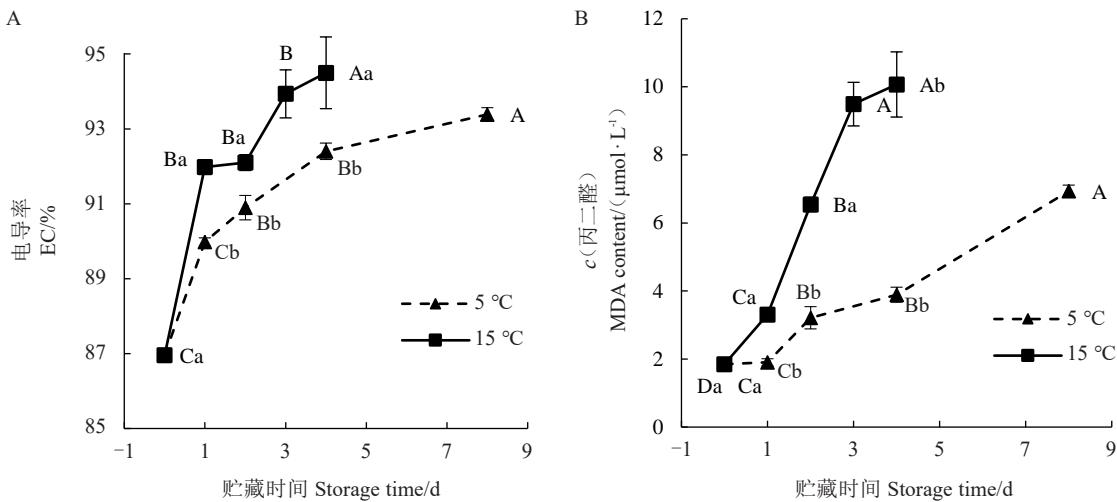


图3 贮藏温度对鲜切甜瓜电导率和MDA含量的影响

Fig. 3 Effects of storage temperature on the conductivity and MDA content of fresh-cut melon

两组鲜切甜瓜的MDA含量随着贮藏期的延长而上升。在贮藏第4天时,15 °C处理较第0天显著上升了4.45倍,在整个贮藏期一直维持较高水平且始终显著高于5 °C处理(图3-B)。以上结果表明,低温可以降低膜脂过氧化程度,维持细胞膜的完整性。

2.4 不同贮藏温度对H₂O₂和O₂^{·-}含量的影响

如图4所示,贮藏期间鲜切甜瓜中H₂O₂和O₂^{·-}含量整体上均呈上升趋势,但5 °C低温下始终保持在较低水平,且显著低于15 °C处理。贮藏第4天

如图3-A所示,15 °C贮藏鲜切甜瓜的电导率在第1天急剧上升,而5 °C贮藏的鲜切甜瓜电导率随着贮藏时间的延长逐渐升高,但在整个贮藏期间均显著低于15 °C处理。这表明低温可以抑制相对电导率的上升,维持细胞膜的完整性。MDA作为另一个细胞膜损伤程度的指标,与电导率变化类似,

时,15 °C处理的鲜切甜瓜H₂O₂和O₂^{·-}含量较5 °C处理分别显著提高32.53%和56.14%,这可能与贮藏4 d时膜脂过氧化作用加强、细胞透性加大有关。以上结果表明,低温抑制了鲜切甜瓜的氧化应激反应,减缓了ROS累积,保护了鲜切甜瓜的细胞膜完整性。结合图1可知,低温延缓了鲜切甜瓜的生理代谢活动,减少了氧化产物的累积,是造成两种贮藏温度下鲜切甜瓜氧化系统代谢差异的主要原因。

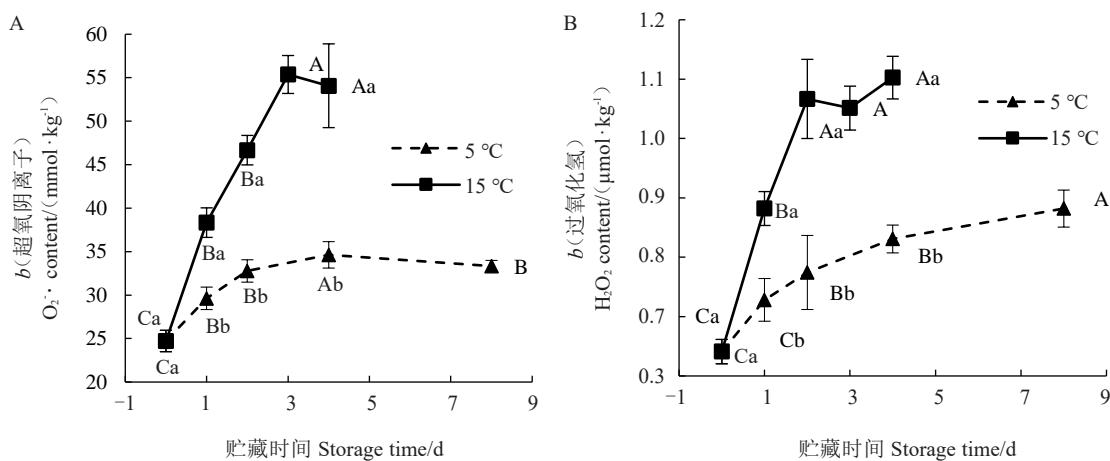


图4 贮藏温度对鲜切甜瓜H₂O₂和O₂^{·-}含量的影响

Fig. 4 Effects of storage temperature on the H₂O₂ and O₂^{·-} content of fresh-cut melon

2.5 不同贮藏温度对酶活性的影响

贮藏期间鲜切甜瓜的 SOD 活性如图 5-A 所示,贮藏期前 2 d,两组鲜切甜瓜的 SOD 活性不断下降,后期下降趋势平缓,但 5 °C 低温始终显著高于 15 °C 处理,贮藏期结束时是 15 °C 的 1.40 倍。APX 是植物清除 ROS 的重要抗氧化酶,可以调节细胞中的氧化还原信号,提高植物对非生物胁迫的耐受性。贮藏期间鲜切甜瓜的 APX 活性逐渐降低,贮藏第 1 天时差异不显著,第 2 天开始 5 °C 低温处理的 APX 活性始终显著低于 15 °C 处理(图 5-B),这可能与贮藏期间过氧化产物不断累积有关。POD 是果蔬内清除 H₂O₂的主要酶类,贮藏期间鲜切甜瓜的 POD 活性在贮藏期间呈先上升后下

降的趋势,在贮藏第 2 天时最高,然后逐渐下降,这主要与贮藏期间 H₂O₂含量的变化有关,但贮藏期间 5 °C 低温处理的 POD 活性始终显著高于 15 °C 处理(图 5-C),可能是因为低温作为一种逆境,激活了鲜切甜瓜的抗氧化系统,维持了较高水平的 POD 活性,及时清除 ROS,从而保持了鲜切甜瓜的品质。

3 讨论与结论

鲜切产品作为当下果蔬发展的主流趋势之一,即食、即用的特点受到广大消费者的青睐,但切分会对果蔬的生理代谢和品质造成损伤,引起果蔬呼吸速率上升、乙烯生成速率加快、脱水、风味和质地损失、异味产生、膜破裂、组织软化和营养水平降低等^[12-13];还会加速苹果中多酚氧化酶(PPO)活性的上升,导致贮藏期间 PPO 不断催化酚类物质氧化,醌类物质含量逐渐升高,加剧鲜切苹果组织褐变^[14]。切分还加速了鲜切果蔬表面微生物的生长和繁殖,容易引发食品安全事件^[15],因此探究鲜切果蔬有效的贮藏方法和保鲜技术是保障鲜切果蔬品质和微生物安全性的主要方式之一。低温贮藏作为果蔬经典贮藏的方法,在本次试验中主要用来研究甜瓜切分后 ROS 代谢与品质的关系。本研究结果表明,在贮藏期间,鲜切甜瓜的呼吸速率逐渐上升,H₂O₂和 O₂^{·-}含量迅速累积,加剧了果实膜脂过氧化作用,从而加大了对果实的氧化损伤,这种毒害作用主要表现为相对电导率和 MDA 含量上升,进而导致果实细胞内溶质流失,造成果实软化,引起硬度和可溶性固形物含量等品质指标下降。在正常情况下,植物体内 ROS 的产生与清除处于动态平衡之中,不会对机体产生损害,但切分作为鲜切果蔬不可缺少的加工工序,破坏了 ROS 平衡,扰乱了机体内 ROS 代谢系统^[16],破坏了细胞膜结构,导致细胞电导率增高,膜脂过氧化产物迅速积累,对机体造成氧化损伤,引起鲜切甜瓜品质下降。低温贮藏可抑制果蔬的呼吸作用与酶活性,降低各种生理生化反应速度,延缓衰老及抑制褐变^[17],维持较好的果实品质。本研究表明,低温抑制了呼吸作用,减缓了 H₂O₂和 O₂^{·-}的累积速度,减轻了对鲜切甜瓜的毒害作用,同时膜脂过氧化反应减弱,贮藏期间鲜切甜瓜硬度和可溶性固形物含量保持在较高水平,说明低温有利于保持鲜切甜瓜的品质。

低温可抑制鲜切甜瓜的呼吸速率,延缓果实中 ROS 的累积,激活氧化应激系统,减弱膜脂过氧化作用,这对延长鲜切产品货架期具有积极作用。对

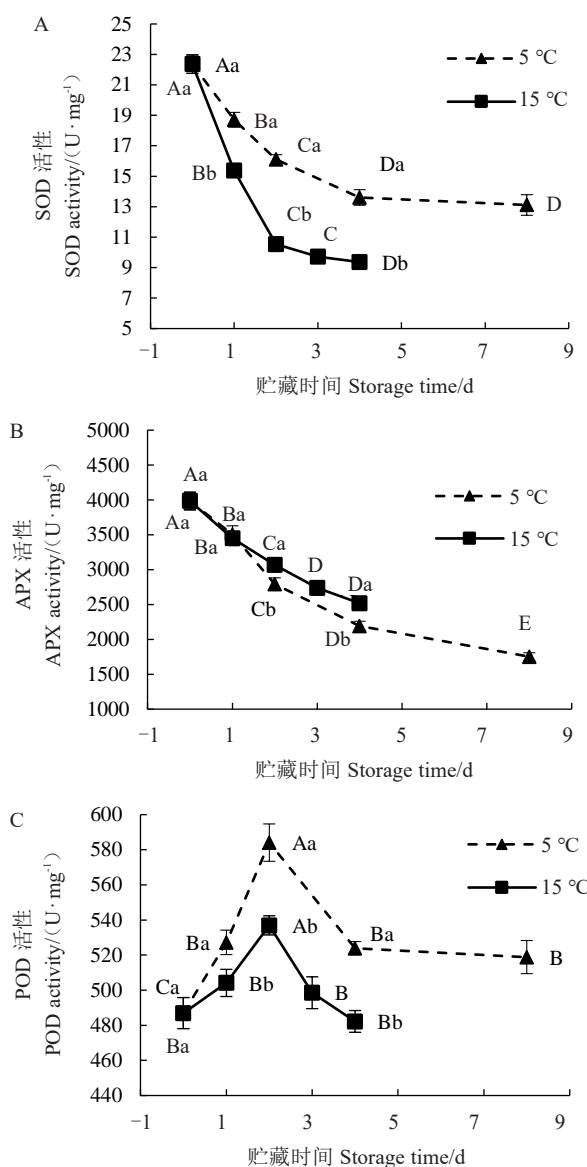


图 5 贮藏温度对鲜切甜瓜 SOD、APX、POD 活性的影响
Fig. 5 Effects of storage temperature on SOD、APX、POD activity of fresh-cut melon

于伴随呼吸过程中的活性氧爆发,果蔬自身通过维持CAT、SOD、APX和POD等酶活性,减轻了果蔬的氧化损伤。本试验结果表明,低温贮藏保持了鲜切甜瓜较高的SOD和POD活性,可有效清除鲜切甜瓜体内多余的ROS,减轻ROS对鲜切组织的损伤,有效降低了膜脂过氧化作用,延缓了果实的成熟衰老进程。Singh等^[18]研究1-MCP对芒果抗氧化活性的影响时,发现1-MCP处理可以降低H₂O₂和脂质过氧化水平,同时提高CAT和SOD活性及增加同工酶的数量,与本研究结果一致。本次试验只考虑了温度对鲜切甜瓜果实品质的影响,但贮藏期间微生物和气体组成等对鲜切果实品质也有不可忽视的作用,还需要进一步研究。

综上所述,5℃低温可抑制鲜切甜瓜的呼吸作用,抑制H₂O₂和O₂[·]的累积,维持较高的SOD、POD活性及抗氧化能力,减弱膜脂过氧化作用,保护细胞膜的完整性,从而延缓组织的品质劣变,维持鲜切甜瓜的品质,这说明低温作为果蔬的贮藏方式之一,对果蔬品质、营养、商品性的维持及货架期的延长均具有重要作用。

参考文献

- [1] 国家统计局. [EB/OL]. [2025-01-15]. <http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
- [2] 罗述博,张超,赵晓燕,等.不同品种甜瓜鲜切加工后贮藏期间的品质变化[J].农业工程技术(农产品加工业),2011(17):28-32.
- [3] 许建,姚军,徐畅,等.1-MCP处理对常温运输甜瓜货架期品质与生理代谢的影响[J].中国瓜菜,2014,27(3):17-19.
- [4] 成善汉,周超,林师森,等.不同鲜切形状和厚度对鲜切甜瓜贮藏特性的影响[J].食品科技,2012,37(5):36-41.
- [5] OMS-OLIU G, ODRIozOLA-SERRANO I, SOLIVA-FORTUNY R, et al. The role of peroxidase on the antioxidant potential of fresh-cut 'Piel de Sapo' melon packaged under different modified atmospheres[J]. Food Chemistry, 2008, 106 (3) : 1085-1092.
- [6] AGUAYO E, ESCALONA V H, ARTÉS F. Effect of hot water treatment and various calcium salts on quality of fresh-cut 'Ama-rillo' melon[J]. Postharvest Biology and Technology, 2008, 47 (3):397-406.
- [7] 成善汉,杨好伟,申海燕,等.不同温度和保鲜剂对鲜切甜瓜贮藏性状的影响[J].安徽农业科学,2011,39(7):4058-4061.
- [8] 罗静红,唐月明,罗芳耀,等.漂烫温度和时间对鲜切马铃薯产品外观品质的影响[J].四川农业科技,2025(1):89-93.
- [9] 宾宇淇,谢佳妮,王铭宇,等.精准控温对鲜切胡萝卜贮藏品质和抗氧化性的影响[J].包装工程,2024,45(5):46-55.
- [10] 刘聪,李亚珍,尹嘉敏,等.不同贮藏温度对磴口华莱士蜜瓜质构特性、理化指标、感官品质变化及相关性分析[J].中国瓜菜,2022,35(1):47-53.
- [11] HUAN C, HAN S, JIANG L, et al. Postharvest hot air and hot water treatments affect the antioxidant system in peach fruit during refrigerated storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2017, 126: 1-14.
- [12] LUO H B, JIANG L, ZHANG L, et al. Quality changes of whole and fresh-cut *zizania latifolia* during refrigerated (1 °C) storage[J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 5 (4) : 1411-1415.
- [13] WANG Y S, LUO Z S, KHAN Z U, et al. Effect of nitric oxide on energy metabolism in postharvest banana fruit in response to chilling stress[J]. Postharvest Biology and Technology, 2015, 108:321-27.
- [14] LOREDANA L, GALLEGUILLOS P, DIEZMA B, et al. A multispectral vision system to evaluate enzymatic browning in fresh-cut apple slices[J]. Postharvest Biology and Technology, 2011, 60(3):225-234.
- [15] LUNA-GUZMAN I, CANTWELL M, BARRETT D W, et al. Fresh-cut cantaloupe: Effects of CaCl₂ dips and heat treatments on firmness and metabolic activity[J]. Postharvest Biology and Technology, 1999, 17(3):201-213.
- [16] HODGES D M, Toivonen P M A. Quality of fresh-cut fruits and vegetables as affected by exposure to abiotic stress[J]. Postharvest Biology and Technology, 2008, 48(2):155-162.
- [17] 程丽林,吴波,袁海君,等.鲜切果蔬贮藏保鲜技术研究进展[J].保鲜与加工,2019,19(1):147-152.
- [18] SINGH R, DWIVEDI U N. Effect of Ethrel and 1-methylcyclopropene (1-MCP) on antioxidants in mango (*Mangifera indica* var. *Dashehari*) during fruit ripening[J]. Food Chemistry, 2008, 111(4):951-956.