

DOI: 10.12161/j.issn.1005-6521.2024.07.012

褪黑素对鲜切马铃薯过冷贮藏期间褐变的影响

刘岳¹, 李学进¹, 王晓冉¹, 马笑巍¹, 王晓东¹, 姜瑜倩¹, 李喜宏^{1*}, 杨相政^{2,3*}

(1. 天津科技大学 食品科学与工程学院, 天津 300457; 2. 浙江大学 农业与生物技术学院, 浙江 杭州 310058; 3. 中华全国供销合作总社 济南果品研究院, 山东 济南 250200)

摘要: 酶促褐变是影响鲜切果蔬品质及商业价值的关键问题之一。该研究采用褪黑素(melatonin treatment, MT)增强过冷(supercooled, SC)贮藏的抗褐变效果, 并减少低温造成的伤害。结果表明, 联合处理(MT+SC)比单独使用SC贮藏具有更好的抗褐变和抗寒效果。在鲜切马铃薯贮藏期间, MT+SC处理可降低相关褐变酶的活性, 减少活性氧含量和膜脂过氧化程度, 并保持较高的抗氧化水平, 从而有效抑制鲜切马铃薯的褐变, 并增强抗冷害效果。此外, MT+SC处理增加防御酶与攻击酶的比率。综上所述, MT+SC处理的保鲜方法可以延长鲜切马铃薯的货架期。

关键词: 鲜切马铃薯; 酶促褐变; 褪黑素处理; 过冷贮藏; 抗氧化; 酶活力比

Effects of Melatonin Treatment on Browning of Fresh-cut Potatoes During Supercooled Storage

LIU Yue¹, LI Xuejin¹, WANG Xiaoran¹, MA Xiaowei¹, WANG Xiaodong¹,
JIANG Yuqian¹, LI Xihong^{1*}, YANG Xiangzheng^{2,3*}

(1. School of Food Engineering and Biotechnology, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China; 2. College of Agriculture & Biotechnology, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China; 3. Jinan Fruit Research Institute, All China Federation of Supply and Marketing Cooperatives, Jinan 250200, Shandong, China)

Abstract: Enzymatic browning is one of the key problems affecting the quality and commercial value of fresh-cut fruits and vegetables. This study used melatonin treatment (MT) to enhance the anti-browning effect of supercooled (SC) storage and reduce the damage caused by low temperatures. The results showed that combined treatment (MT+SC) had better anti-browning and anti-cold effects than SC storage alone. During the storage period of fresh-cut potatoes, MT+SC treatment could reduce the activity of related browning enzymes, reduce the content of reactive oxygen species and the degree of membrane lipid peroxidation, and maintain a high antioxidant level, thereby effectively inhibiting the browning of fresh-cut potatoes and enhancing the cold resistance. In addition, MT+SC treatment increased the ratio of defense enzymes to attack enzymes. In summary, the preservation method of MT+SC treatment can extend the shelf life of fresh-cut potatoes.

Key words: fresh-cut potatoes; enzymatic browning; melatonin treatment; supercooled storage; anti-oxidation; enzyme activity ratio

引文格式:

刘岳, 李学进, 王晓冉, 等. 褪黑素对鲜切马铃薯过冷贮藏期间褐变的影响[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(7): 81-87.

LIU Yue, LI Xuejin, WANG Xiaoran, et al. Effects of Melatonin Treatment on Browning of Fresh-cut Potatoes During Supercooled Storage[J]. Food Research and Development, 2024, 45(7): 81-87.

近年来, 全球经济发展促进了人们对方便食品的需求, 因而鲜切果蔬受到了广泛的关注^[1]。马铃薯作

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2021CXGC010809)

作者简介: 刘岳(1998—), 男(汉), 硕士研究生, 研究方向: 食品保鲜与物流加工。

*通信作者: 李喜宏(1960—), 男(汉), 教授, 博士, 研究方向: 农产品物流保鲜与加工; 杨相政(1988—), 男(汉), 副研究员, 在读博士。

为最重要的农产品,含有丰富的碳水化合物、蛋白质、维生素C、微量元素和氨基酸^[2],常被用于餐饮业。然而,鲜切马铃薯在制备过程中的机械损伤会导致其在贮藏过程中的品质恶化,其中褐变是鲜切马铃薯品质恶化的主要原因^[3]。褐变会导致其颜色和光泽度、口感、气味甚至硬度等品质恶化。因此,在保持新鲜马铃薯风味和延长保质期的同时防止褐变是很重要的。

褪黑素(melatonin treatment, MT)是一种多效性分子,在生物体中具有许多不同的作用^[4]。在植物中,褪黑素被当作种子萌发、根系增殖、开花、坐果和果实成熟的植物生长调节剂^[5-7]。此外,褪黑素可以延长保质期并保持采后水果的品质^[8-9]。过冷(supercooled, SC)贮藏是指存储温度降至冰点以下但不结冰的贮藏方法^[10]。据报道,SC贮藏可将大蒜、青葱、鲜切苹果和鲜切卷心菜的保质期延长1.0~2.5倍^[11-12]。鲜切马铃薯的SC贮藏是可行的,因为它可以降低酶活性^[13]。但过冷的环境会刺激膜脂质相关的酶活性,产生更多的丙二醛(malondialdehyde, MDA),并加速储存过程中的褐变^[14]。然而褪黑素除了影响这些正常的生理功能外,还具有抗氧化剂的功能,可以抑制酚类化合物的氧化并在清除活性氮和活性氧方面具有重要作用^[15]。它通过调节抗氧化酶活性来维持活性氧(reactive oxygen species, ROS)代谢的平衡,从而减少膜脂质氧化,提高果蔬对冷胁迫的耐受性^[16-17]。

褪黑素处理结合过冷贮藏有望对鲜切马铃薯的品质维持起到协同作用。因此,本研究对褪黑素处理过的鲜切马铃薯在8 d过冷贮藏期间的理化变化和质量评价进行观察和分析。具体研究SC贮藏前褪黑素处理对鲜切马铃薯的抗褐变和抗冷害的影响,利用酶活性比,探究褪黑素处理是否可以抵消SC对鲜切马铃薯的冷损伤,提高鲜切马铃薯的品质变质抵抗力,延长鲜切马铃薯的货架期。

1 材料和方法

1.1 材料与试剂

马铃薯:市售;聚乙烯吡咯烷酮、 β -巯基乙醇、L-苯丙氨酸、邻苯二酚、三氯乙酸、乙二胺四乙酸、愈创木酚、硫代巴比妥酸、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl radical, DPPH)、无水乙醇(均为分析纯)、褪黑素(食品级):天津百奥泰科技发展有限公司;过氧化氢试剂盒:北京索莱宝科技有限公司;超氧阴离子检测试剂盒:上海源叶生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

冰箱(BC-142FQD):TCL科技集团股份有限公司;温度记录仪(FLUKE2638A):美国福禄克电子仪器公司;超声仪(SB-6000DT)、真空干燥机(SCIENTZ-12N/A型)、精密色差仪(WR-18):宁波新芝生物科技股份有

限公司;摇床(HY-60):武汉汇成生物科技有限公司;离心机(TGL-16):四川舒科仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 冰点和过冷点的测定

鲜切马铃薯的初始冰点和过冷点的测定参考 Koide 等^[18]的方法并稍加修改。将T型热电偶固定在每个马铃薯样品(2 cm×2 cm×2 cm)的几何中心,后将其放入聚丙烯盒后,置于-40℃冰箱中。采用温度记录仪以3 s的间隔记录温度,直到样品冷却至-20℃。建立鲜切马铃薯的时间温度曲线($n=10$)用于确定冰点和过冷点。

1.3.2 样品处理

选择大小均匀、成熟度相同的马铃薯清洗后,用已杀菌的去皮器和切片器将马铃薯去皮并切成厚度约4 mm的马铃薯鲜切片,根据预试验所得结论,将马铃薯鲜切片用浓度为250 $\mu\text{mol/L}$ 的MT溶液浸泡15 min,另取一组用蒸馏水浸泡15 min作为对照。将处理过的马铃薯鲜切片晾干表面水分后放入食品自封袋(聚乙烯材质,厚度0.7 mm),分别置于-2℃(SC贮藏)和4℃条件下贮藏8 d,分别在第0、2、4、6、8天评价分析3组样品:1)对照组(CK组,4℃);2)过冷贮藏组(SC组,-2℃);3)褪黑素+过冷贮藏组(MT+SC组,250 $\mu\text{mol/L}$ MT,-2℃)。

1.3.3 褐变指数测定

马铃薯鲜切片表面颜色采用便携式精密色差仪进行测定,根据以下公式计算褐变指数(browning index, BI)。

$$B = \frac{100 \times \left(\frac{a^* + 1.75L^*}{5.64L^* + a^* - 3.012b^*} - 0.31 \right)}{0.172}$$

式中: B 为褐变指数; L^* 为亮度值; a^* 为红绿值; b^* 为黄蓝值。

1.3.4 丙二醛含量的测定

参考 Li 等^[19]的方法测定MDA含量。

1.3.5 抗氧化能力测定

马铃薯中的酚类物质提取参考 Tang 等^[20]的方法并稍加修改。将冷冻马铃薯样品在真空干燥机冻干24 h,然后磨成粉末。将马铃薯干粉(1 g)和含有体积分数0.1%冰醋酸(5 mL)的70%甲醇混合均匀,室温下用摇床以400 r/min避光提取2 h,然后175 W超声处理30 min。将混合物用离心机以10 000 $\times g$ 离心15 min。收集上清液,再提取剩余物2次,合并上清液,补充提取液至15 mL。以上清液为粗提取物待用。

DPPH自由基清除能力测定参考 Tang 等^[20]的方法并稍加修改。将样品或水溶性维生素E(Trolox)溶液(25、62.5、125、250、500、750、1 000 $\mu\text{mol/L}$)加入到200 μL DPPH溶液中。将混合物在室温、避光条件下反应4 h,测定517 nm处吸光值。以200 μL DPPH溶

液(350 μmol/L)为空白。DPPH 自由基清除能力表示为每克马铃薯干重的 μmol Trolox 当量(μmol TE/g)($y = -0.0009x + 0.0555, r^2 = 0.9999$)。

总酚含量(total phenolic content, TPC)通过福林-酚法测定。TPC 表示为每克干马铃薯质量(mg GAE/g)的没食子酸当量毫克数($y = 0.0049x + 0.0736, r^2 = 0.9999$)。

1.3.6 活性氧的测定

过氧化氢的含量由过氧化氢试剂盒测定;超氧阴离子自由基产生速率由超氧阴离子检测试剂盒测定。

1.3.7 相关酶活性的测定

参考 Li 等^[19]方法测定多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)、过氧化物酶(peroxidase, POD)、苯丙氨酸解氨酶(phenylalanine ammonia-lyase, PAL)、过氧化氢酶(catalase, CAT)和脂氧合酶(lipoxygenase, LOX)活性,并按比例缩小而适用于 96 孔板。

1.3.8 酶活比

酶活比的定义参考 Li 等^[19],即贮藏期间防御酶(POD、CAT)和攻击酶(PPO、LOX)的比值,反映不同处理的马铃薯鲜切片对外界不利环境的抵抗能力,以此来评估外冷害造成的褐变防御能力,计算公式如下。

$$R_1 = \frac{D_n - D_0}{P_n - P_0} \quad R_2 = \frac{C_n - C_0}{P_n - P_0}$$

$$R_3 = \frac{D_n - D_0}{L_n - L_0} \quad R_4 = \frac{C_n - C_0}{L_n - L_0}$$

式中: $R_1 \sim R_4$ 分别为 POD 和 PPO、CAT 和 PPO、POD 和 LOX 以及 CAT 和 LOX 酶活比; P_0 为贮藏初期多酚氧化酶活性, U/g; P_n 为贮藏末期多酚氧化酶活性, U/g; D_0 为贮藏初期过氧化物酶活性, U/g; D_n 为贮藏末期过氧化物酶活性, U/g; C_0 为贮藏初期过氧化氢酶活性, U/g; C_n 为贮藏末期过氧化氢酶活性, U/g; L_0 为贮藏初期脂氧合酶活性, U/g; L_n 为贮藏后期脂氧合酶活性, U/g。

1.4 数据处理

所有数据采用 Excel 365 进行数据统计及标准偏差的计算;SPASS 19.0 软件进行单因素方差分析;Origin 8.0 绘图。每组试验均重复 3 次。

2 结果与分析

2.1 初始冰点和过冷点

马铃薯鲜切片的初始冰点和过冷点如表 1 所示。

表 1 马铃薯鲜切片初始冰点和过冷点

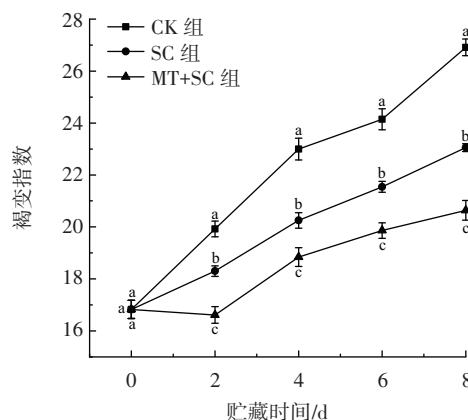
Table 1 Initial freezing point and supercooling point of fresh-cut potatoes

| 项目 | 初始冰点/°C | 过冷点/°C |
|------|---------|--------|
| 平均值 | -1.7 | -3.4 |
| 标准偏差 | 0.6 | 0.8 |
| 标准误差 | 0.2 | 0.1 |
| 最小值 | -2.5 | -5.0 |
| 最大值 | -1.2 | -2.5 |

由表 1 可知,马铃薯鲜切片平均初始冰点为(-1.7±0.2) °C,且与 Comandini 等^[21]的研究结果相近。马铃薯鲜切片的过冷点范围为-2.5~-5.0 °C,这表明其贮藏于-2 °C条件下不会结冰。因此,本研究采用的 SC 温度为(-2.0±0.1) °C。

2.2 MT+SC 处理对褐变指数的影响

颜色变化是评价鲜切马铃薯品质的关键指标之一,BI 越大说明褐变越严重。MT+SC 处理对褐变指数影响如图 1 所示。



不同字母表示组间差异显著, $P < 0.05$ 。

图 1 MT+SC 处理对褐变指数的影响

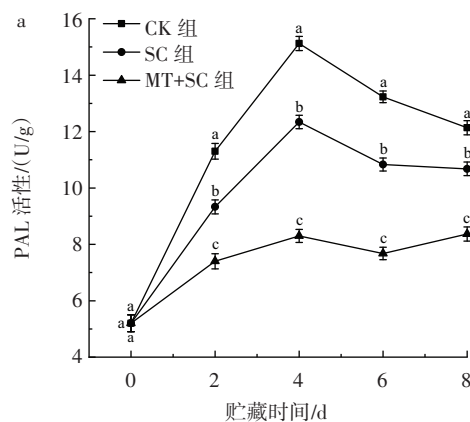
Fig.1 Effect of MT+SC treatment on the browning index

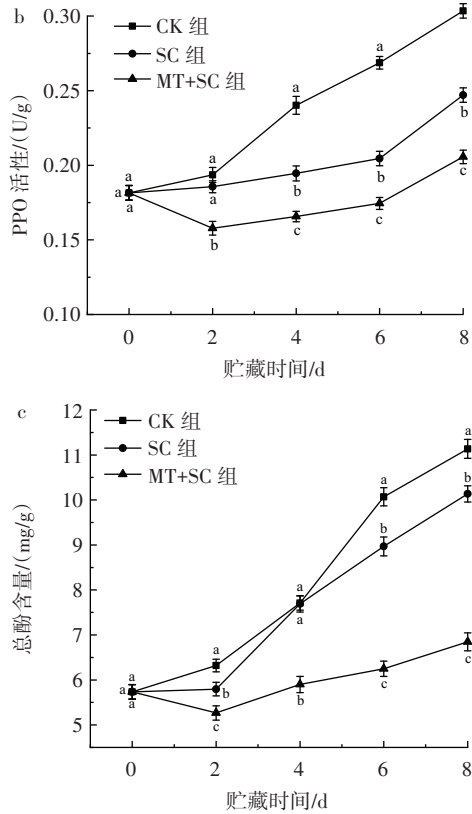
由图 1 可知,在贮藏期间各组马铃薯的褐变指数都呈上升趋势,但两个处理组的 BI 值显著低于对照组果实($P < 0.05$),其中 MT+SC 处理组的 BI 值最低,约为对照组的 37.8%,表明 MT+SC 处理组在维持鲜切马铃薯颜色方面具有较高的潜在价值。

2.3 MT+SC 处理对褐变相关酶活性和总酚含量的影响

鲜切果蔬的褐变系统很复杂,并受到多种因素影响,其中包括底物含量、细胞损伤和相关酶活性^[19]。MT+SC 处理对 PPO、PAL 活性以及总酚含量的影响如图 2 所示。

PPO 和 PAL 都与酶促褐变直接相关,PAL 则是参





a. PAL 活性; b. PPO 活性; c. 总酚含量。不同字母表示组间差异显著 ($P < 0.05$)。

图2 MT+SC处理对褐变相关酶活性和总酚含量的影响

Fig.2 Effects of MT+SC treatment on browning-related enzyme activities and the total phenolic content

与控制酚类物质的合成。如图2a所示, PAL的活性在贮藏8 d内整体先增加后下降, 且MT+SC组PAL活性显著低于其余两组 ($P < 0.05$)。马铃薯切片后, PPO从细胞膜中释放出来, 并在氧气存在下与液泡中的酚类物质反应生成醌, 醌进一步脱水并聚合形成深色物质。如图2b所示, 除前2 d外, SC组PPO活性显著低于CK组 ($P < 0.05$); MT+SC组在贮藏期间的PPO活性显著低于其余两组 ($P < 0.05$)。SC组两种酶活性的变化可能是由于低温抑制了酶的活性, 进而延缓了鲜切马铃薯的褐变。而MC+SC组对鲜切马铃薯的抑制褐变效果更佳。Li等^[22]的研究证明外源褪黑素处理降低了鲜切甘薯中PAL和PPO的活性。

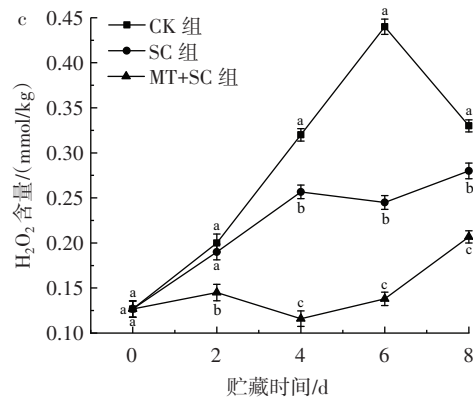
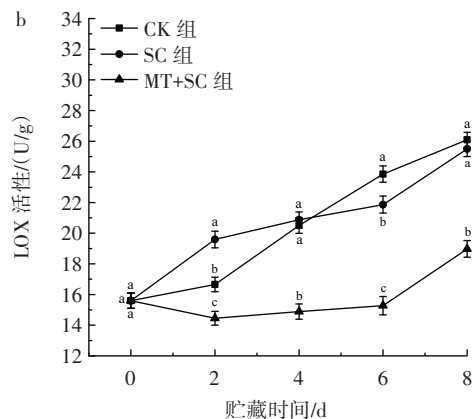
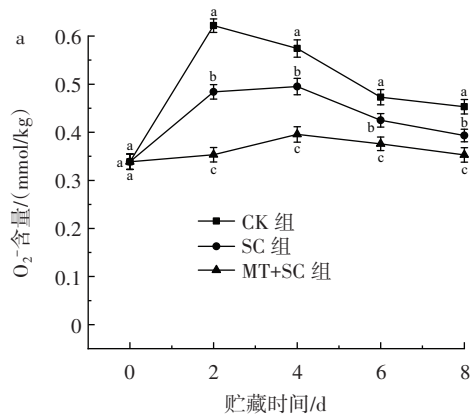
酚类物质作为植物防御系统中重要的次生代谢产物具有较好的抗氧化作用, 除了防止氢过氧化物成为活性氧自由基外, 还可以螯合金属离子。如图2c所示, 在整个贮藏过程中各处理组的总酚含量整体上呈升高趋势。CK组在贮藏最后一天的总酚含量高达11.13 mg/g, 相比于初期增长了94%, 而MT+SC组相比于初期只增长19%。因此, 在本研究中, 联合处理有助于将总酚含量维持在更低水平。这可能是联合处理抑

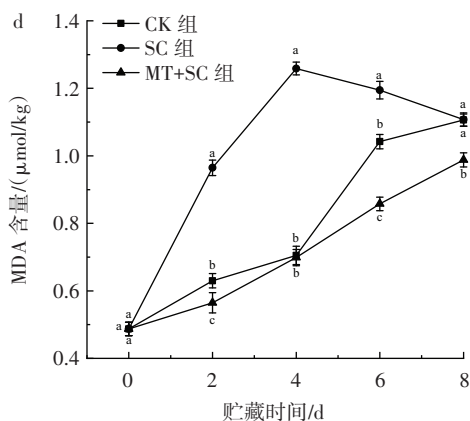
制了PAL活性, 进而抑制马铃薯鲜切片中酚类物质在贮藏期的积累。

2.4 MT+SC处理对 O_2^- 、 H_2O_2 和MDA含量以及LOX活性的影响

通过测定 O_2^- 、 H_2O_2 和MDA含量以及LOX活性, 研究SC结合MT处理对鲜切马铃薯的氧化水平的影响, 结果见图3。

膜脂过氧化被认为是细胞损伤和组织老化的特征, 这是由ROS或脂质氧化酶(如LOX)触发的。过量的ROS被LOX催化, 不饱和脂肪酸被氧化形成共轭的过氧脂肪酸, 最终导致脂质过氧化的连锁反应。由图3a、图3b可知, MT+SC组的 O_2^- 含量和LOX活性都显著低于SC组和CK组 ($P < 0.05$)。SC组 O_2^- 含量又显





a. O_2^- 含量; b. LOX活性; c. H_2O_2 含量; d. MDA含量。不同字母表示组间差异显著($P<0.05$)。

图3 MT+SC处理对 H_2O_2 、 O_2^- 和MDA含量以及LOX活性的影响

Fig.3 Effects of MT+SC treatment on H_2O_2 , O_2^- and MDA contents and LOX activity

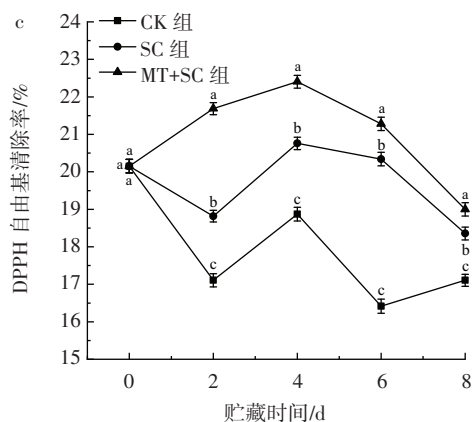
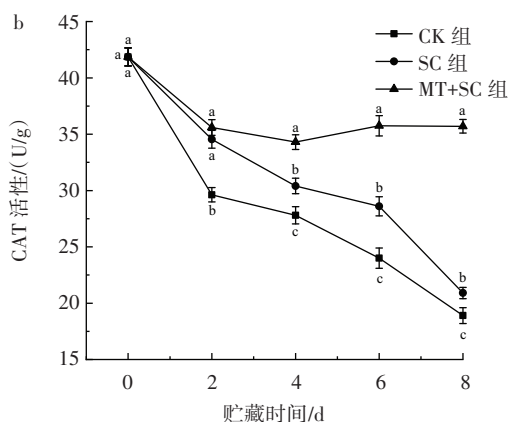
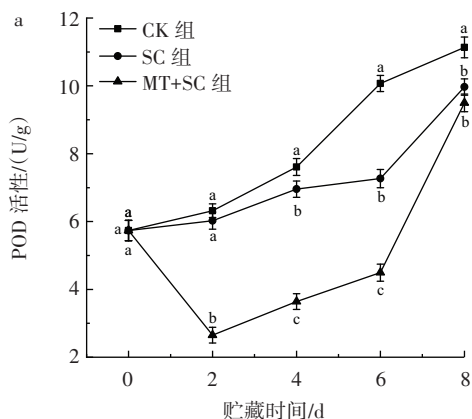
著低于CK组($P<0.05$),而SC组和CK组的LOX活性没有明显趋势。这可能是低温造成冷害,积累的大量 O_2^- 加速了膜脂过氧化,进而加剧了组织的冻伤和褐变,而MT具有良好的抗氧化作用,在清除ROS方面具有重要作用^[15],所以MT+SC组可有效地降低膜脂过氧化水平。

H_2O_2 和MDA被认为是植物细胞膜中脂质过氧化的产物。 H_2O_2 和MDA的积累可以破坏细胞膜,从而促进棕色聚合物的积累,并导致果实褐变。如图3c所示,CK组 H_2O_2 积累量增加迅速且明显高于其余两组;而MT+SC组上升缓慢且显著低于其余两组($P<0.05$)。同时Li等^[22]、Liu等^[23]、Zheng等^[24]的研究发现MT处理在延缓 H_2O_2 积累方面具有显著效果。因此SC结合MT处理有效地提高了鲜切马铃薯的抗氧化能力,减少了 H_2O_2 的积累。由图3d可知,SC组的MDA积累量在贮藏的第2~6天显著高于其余两组($P<0.05$);MT+SC组在贮藏期间MDA积累量低于CK组。这可能是由于过冷处理温度过低造成了冷害,有研究显示,褪黑素可以通过抑制MDA含量来减少冷害的发生^[25]。因此,MT+SC处理可以有效抑制冷害造成的MDA的积累,进而降低膜脂过氧化水平。

2.5 MT+SC处理对抗氧化能力的影响

通过测定POD和CAT活性以及DPPH自由基清除能力,研究SC结合MT处理对鲜切马铃薯的抗氧化能力的影响,结果见图4。

POD和CAT是清除自由基最重要的酶。由图4a可知,贮藏第2~6天MT+SC处理组POD活性显著低于CK组($P<0.05$)。这可能是由于CK组和SC组产生更多的 H_2O_2 ,进而诱导POD活性升高。在整个贮藏期间,MT+SC组的POD活性最低,这表明MT+SC组



a. POD活性; b. CAT活性; c. DPPH自由基清除率。不同字母表示组间差异显著($P<0.05$)。

图4 MT+SC处理对抗氧化能力的影响

Fig.4 Effect of MT+SC treatment on antioxidant capacity

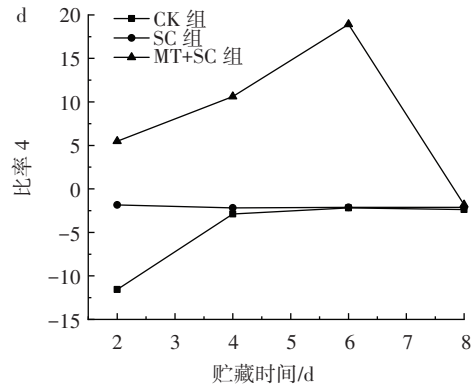
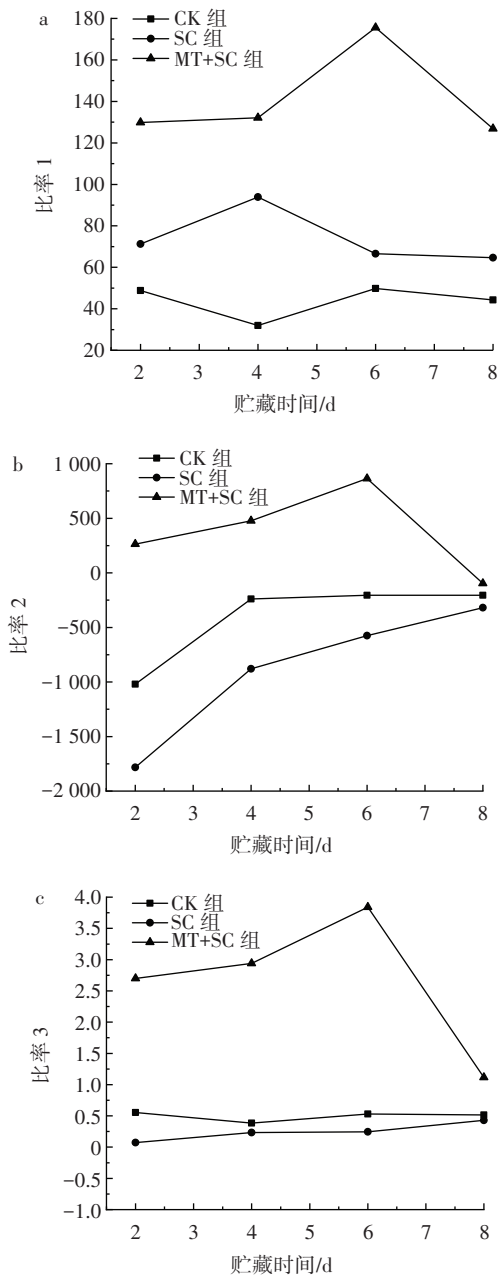
减少了细胞内活性氧和自由基的积累,从而维持了较好的细胞膜完整性。由图4b可知,CK组、MT+SC组和SC组CAT活性均呈下降趋势,而MT+SC组在第2~8天CAT活性无显著性变化,其活性分别为35.6、34.3、35.75、35.7 U/g,且在贮藏的第4~8天中显著高于另外两组($P<0.05$)。这可能是由于MT通过增强CAT活力进而有效消除了 H_2O_2 ,减少了鲜切马铃薯的氧化损伤。

植物的抗氧化能力可以用DPPH自由基清除能力

进行评估。由图 4c 可知,SC 组的鲜切马铃薯的抗氧化能力显著高于 CK 组($P<0.05$)。研究表明,褪黑素可以对鲜切梨和草莓产生非生物胁迫,从而达到更高水平的抗氧化能力^[26]。本研究发现 MT+SC 处理提高了马铃薯鲜切片的抗氧化能力,并且在整个贮藏期间表现出的抗氧化能力下降幅度最少,表现出了最佳的 DPPH 自由基清除能力。因此,MT+SC 处理提高了鲜切马铃薯的抗氧化能力,减少了活性氧引起的组织损伤。

2.6 酶活性比

酶活性比可用来评价处理方法对鲜切果蔬褐变方面的有效性^[19]。酶活比是指单位时间内攻击酶和防御酶增量的比值,可以表示样品在贮藏期间的生命活性强度。MT+SC 处理对防御酶和攻击酶活性比的影响见图 5。



a. 比率 1; b. 比率 2; c. 比率 3; d. 比率 4。

图 5 防御酶与攻击酶活性比

Fig.5 Activity ratio of defense enzymes to attack enzymes

由图 5a 和图 5b 可知,MT+SC 组的酶活性比率高于 SC 组和 CK 组。其中,第 6 天 MT+SC 组比率 1 值达到最大,分别比 SC 组和 CK 组高 2.64 倍和 3.53 倍。这表明 MT+SC 组可以有效抑制鲜切马铃薯的褐变效果。由图 5c 和图 5d 可知,MT+SC 组的酶活性比率均高于 SC 组和 CK 组。其中,第 6 天 MT+SC 组比率 3、比率 4 值达到最大。这表明 MT 处理可使马铃薯块茎具有更强的抗氧化能力,以抵抗切割和 SC 贮藏对鲜切马铃薯造成的伤害。

3 结论

为延长鲜切马铃薯货架期,探究 MT+SC 处理对鲜切马铃薯品质的影响。研究结果表明,MT+SC 处理对抑制鲜切马铃薯果实褐变和增加抗寒性具有较好效果。MT+SC 处理显著抑制了 PPO 活性和总酚含量升高,同时维持了较低的 PAL 活性,并且显著减少了因低温造成的 MDA 积累,不仅降低了膜脂质过氧化程度,而且保持了细胞膜的完整性。MT+SC 处理还提高了鲜切马铃薯的抗氧化能力,从而减少了自由基积累对细胞膜的损伤。综上所述,MT+SC 处理可以有效延长鲜切马铃薯的货架期,对于开发具有农业应用潜力的新型保鲜技术具有重要意义。

参考文献:

- [1] ALI S, NAWAZ A, NAZ S, et al. Hydrogen sulfide mitigates chilling injury of postharvest banana fruits by regulating γ -aminobutyric acid shunt pathway and ascorbate-glutathione cycle[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 941246.
- [2] AHMED S, RU W D, CHENG L R, et al. Genetic diversity and stability in starch physicochemical property traits of potato breeding lines[J]. *Food Chemistry*, 2019, 290: 201-207.
- [3] WU D, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Combined effects of microporous packaging and nano-chitosan coating on quality and shelf-life of fresh-cut eggplant[J]. *Food Bioscience*, 2021, 43: 101302.
- [4] FENG B S, KANG D C, SUN J, et al. Research on melatonin in fruits and vegetables and the mechanism of exogenous melatonin

- on postharvest preservation[J]. *Food Bioscience*, 2022, 50: 102196.
- [5] TIWARI R K, LAL M K, NAGA K C, et al. Emerging roles of melatonin in mitigating abiotic and biotic stresses of horticultural crops[J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 272: 109592.
- [6] DEBNATH B, LI M, LIU S, et al. Melatonin-mediate acid rain stress tolerance mechanism through alteration of transcriptional factors and secondary metabolites gene expression in tomato[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 200: 110720.
- [7] SARAFI E, TSOUVALTZIS P, CHATZISSAVVIDIS C, et al. Melatonin and resveratrol reverse the toxic effect of high boron (B) and modulate biochemical parameters in pepper plants (*Capsicum annuum* L.)[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2017, 112: 173-182.
- [8] LIU S M, HUANG H, HUBER D J, et al. Delay of ripening and softening in 'Guifei' mango fruit by postharvest application of melatonin[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 163: 111136.
- [9] AGATHOKLEOUS E, ZHOU B Y, XU J N, et al. Exogenous application of melatonin to plants, algae, and harvested products to sustain agricultural productivity and enhance nutritional and nutraceutical value: A meta-analysis[J]. *Environmental Research*, 2021, 200: 111746.
- [10] OSUGA R, KOIDE S, SAKURAI M, et al. Quality and microbial evaluation of fresh-cut apples during 10 days of supercooled storage[J]. *Food Control*, 2021, 126: 108014.
- [11] KOIDE S, KUMADA R, HAYAKAWA K, et al. Survival of cut cabbage subjected to subzero temperatures[J]. *Acta Horticulturae*, 2019 (1256): 329-334.
- [12] JAMES C, SEIGNEMARTIN V, JAMES S J. The freezing and supercooling of garlic (*Allium sativum* L.)[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2009, 32(2): 253-260.
- [13] STONEHOUSE G G, EVANS J A. The use of supercooling for fresh foods: A review[J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 148: 74-79.
- [14] CHEN J, LI Y X, LI F F, et al. Effects of procyanidin treatment on the ripening and softening of banana fruit during storage[J]. *Scientia Horticulturae*, 2022, 292: 110644.
- [15] GAO H, ZHANG Z K, CHAI H K, et al. Melatonin treatment delays postharvest senescence and regulates reactive oxygen species metabolism in peach fruit[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 118: 103-110.
- [16] SHAIK R, RAMAKRISHNA W. Machine learning approaches distinguish multiple stress conditions using stress-responsive genes and identify candidate genes for broad resistance in rice[J]. *Plant Physiology*, 2014, 164(1): 481-495.
- [17] WANG M, ZHENG Q S, SHEN Q R, et al. The critical role of potassium in plant stress response[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2013, 14(4): 7370-7390.
- [18] KOIDE S, OHSUGA R, ORIKASA T, et al. Evaluation of electrical and physiological properties of supercooled fresh cut spinach[J]. *Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi*, 2019, 66(9): 335-340.
- [19] LI X J, LIU Z Y, RAN Y L, et al. Short-term high oxygen pre-stimulation inhibits browning of fresh-cut watercored Fuji apples[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2022, 191: 111959.
- [20] TANG Y, LI X H, ZHANG B, et al. Characterisation of phenolics, betanins and antioxidant activities in seeds of three *Chenopodium quinoa* Willd. genotypes[J]. *Food Chemistry*, 2015, 166: 380-388.
- [21] COMANDINI P, BLANDA G, SOTO-CABALLERO M C, et al. Effects of power ultrasound on immersion freezing parameters of potatoes[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2013, 18: 120-125.
- [22] LI Y X, ZHANG L, ZHANG L, et al. Exogenous melatonin alleviates browning of fresh-cut sweetpotato by enhancing anti-oxidative process[J]. *Scientia Horticulturae*, 2022, 297: 110937.
- [23] LIU Q T, XIN D D, XI L J, et al. Novel applications of exogenous melatonin on cold stress mitigation in postharvest cucumbers[J]. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2022, 10: 100459.
- [24] ZHENG H H, LIU W, LIU S, et al. Effects of melatonin treatment on the enzymatic browning and nutritional quality of fresh-cut pear fruit[J]. *Food Chemistry*, 2019, 299: 125116.
- [25] ALTAF M A, SHARMA N, SINGH J, et al. Mechanistic insights on melatonin-mediated plant growth regulation and hormonal cross-talk process in solanaceous vegetables[J]. *Scientia Horticulturae*, 2023, 308: 111570.
- [26] MADEBO M P, HU S Q, ZHENG Y H, et al. Mechanisms of chilling tolerance in melatonin treated postharvest fruits and vegetables: A review[J]. *Journal of Future Foods*, 2021, 1(2): 156-167.