

不同浓度 1-MCP 对番茄采后生理及 活性氧代谢的影响

易明玥¹, 戚晨晨^{1,2}, 陈国辉², 刘晶玉¹, 翟亚巍¹, 王志鹏¹, 王伟¹, 李学文^{1*}

(1. 新疆农业大学 食品科学与药学学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆新康农业发展公司, 新疆 乌鲁木齐 830023)

摘要: 为探讨不同浓度 1-甲基环丙烯(1-methylcyclopropene, 1-MCP)在低温贮藏条件下对绿熟期番茄果实采后贮藏品质及活性氧代谢的影响, 该研究以“天赐 575”番茄为试材, 采用浓度为 0.5、1.0、1.5 $\mu\text{L/L}$ 的 1-MCP 熏蒸 24 h 后放置在 $(12\pm 1)^\circ\text{C}$ 条件下, 定期测定番茄果实贮藏期间品质及活性氧代谢相关指标。结果表明, 1-MCP 处理显著减少番茄果实的失重率、硬度、抗坏血酸含量的下降 ($P<0.05$), 抑制叶绿素的降解, 有效延缓采后绿熟期番茄成熟衰老的进程; 同时 1-MCP 处理组可以有效提高超氧化物歧化酶的活性, 显著减缓超氧阴离子的产生速率, 抑制过氧化氢的生成、丙二醛含量的积累和细胞膜透性的上升。以上结果表明, 在低温贮藏条件下, 1-MCP 处理可以有效调控番茄果实活性氧代谢, 保持番茄采后贮藏品质。

关键词: 番茄; 1-甲基环丙烯; 低温; 采后品质; 活性氧代谢

Effects of Different Concentrations of 1-MCP on Postharvest Physiology and Reactive Oxygen Species Metabolism of Tomatoes

YI Mingyue¹, QI Chenchen^{1,2}, CHEN Guohui², LIU Jingyu¹, ZHAI Yawei¹, WANG Zhipeng¹, WANG Wei¹,
LI Xuewen^{1*}

(1. College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China;
2. Xinjiang Xinkang Agricultural Development Co., Ltd., Urumqi 830023, Xinjiang, China)

Abstract: The effects of different concentrations of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on the postharvest quality and reactive oxygen species metabolism of tomatoes harvested at the green mature stage and stored at low temperatures were studied. The fruits of the tomato variety 'Tianci 575' were fumigated with 0.5, 1.0, 1.5 $\mu\text{L/L}$ 1-MCP for 24 h and then placed at $(12\pm 1)^\circ\text{C}$. The quality and reactive oxygen metabolism indexes of tomatoes during storage were measured regularly. The results showed that 1-MCP significantly reduced the weight loss rate, attenuated the decreases in hardness and vitamin C content ($P<0.05$), inhibited the degradation of chlorophyll, and delayed the ripening and senescence of tomatoes harvested at the green mature stage. At the same time, 1-MCP increased the activity of superoxide dismutase, slowed down the production of superoxide anion, and inhibited the formation of hydrogen peroxide, the accumulation of malondialdehyde, and the increase of cell membrane permeability. The above results showed that 1-MCP regulated the metabolism of reactive oxygen species and maintained the postharvest quality of tomatoes stored at low temperatures.

Key words: tomato; 1-methylcyclopropylene; low temperature; post-harvest quality; reactive oxygen species metabolism

引文格式:

易明玥, 戚晨晨, 陈国辉, 等. 不同浓度 1-MCP 对番茄采后生理及活性氧代谢的影响[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(4): 46-54.

YI Mingyue, QI Chenchen, CHEN Guohui, et al. Effects of Different Concentrations of 1-MCP on Postharvest Physiology and Reactive Oxygen Species Metabolism of Tomatoes[J]. Food Research and Development, 2025, 46(4): 46-54.

基金项目: 自治区重点研发计划项目(2022B02004-2)

作者简介: 易明玥(1998—), 女(汉), 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工与贮藏。

*通信作者: 李学文(1964—), 教授, 研究方向: 果蔬采后生理及贮藏。

番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill)又称西红柿、洋柿子,是茄科茄属一年生或多年生草本植物,因含有大量 V_C 和番茄红素而深受大众喜爱。新疆是我国番茄生产基地,2021年新疆番茄种植面积达57.35万 hm^2 ,总产量达586.99万t,是新疆地区典型的特色农作物。但番茄属于呼吸跃变型果实,具有采后生理代谢旺盛、成熟软化快、贮藏期短、极易失去商品价值的特性。据统计,番茄每年在贮藏加工过程中的腐烂率高达15%~20%,严重影响番茄的食用价值和商业价值^[1]。因此,开展番茄采后保鲜技术的研究,对提高经济效益,增加农民收入具有重要意义。

番茄的采后保鲜技术主要包括冷藏保鲜^[2]、气调保鲜^[3]、物理保鲜^[4]、化学剂保鲜^[5]、超声波保鲜^[6]和涂抹保鲜^[7]等。气调保鲜和变压保鲜由于对设备要求高、操作复杂、运行成本高而较少使用,化学保鲜存在辐射及化学残留污染等问题。所以低温贮藏是保持果蔬采后品质和延长果蔬采后货架期的有效途径,对人体健康和环境的负面影响最小^[2]。低温贮藏可通过降低果蔬的呼吸强度来延缓衰老,并保持果蔬的营养品质^[8]。研究表明番茄在低温条件下贮藏,果实的风味品质和果皮结构完整性保持较好^[9]。1-甲基环丙烯(1-methylcyclopropene, 1-MCP)作为一种新型有效的乙烯受体抑制剂,能作用于乙烯受体,从而阻断其与乙烯的正常结合,具有不可逆性,因具有无毒无味、稳定性好和使用剂量低等优点而被广泛应用^[10]。近年来,1-MCP已在梨^[11]、蟠桃^[12]、苹果^[13]、葡萄^[14]等果蔬中广泛应用。研究表明,1-MCP能抑制果实腐烂率、失重率、呼吸强度和丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量的上升,延缓可滴定酸含量、可溶性固形物含量和硬度的下降,从而延缓果实的衰老进程^[10,15]。

国内外已有关于1-MCP应用于番茄采后保鲜中的研究,并取得了较好的效果。刘忠德等^[6]研究发现1-MCP处理可明显减缓番茄果实的硬度、糖度的降低,保持可溶性固形物含量以及减缓番茄颜色指数的升高,维持良好的商品品质;程宏雪等^[17]研究发现1-MCP二次处理能有效保持番茄果实的硬度并延缓番茄红素和 V_C 含量的降低、抑制果实呼吸强度和丙二醛的积累以及细胞膜透性的增加、降低果实中过氧化物酶活性并推迟其活性高峰的出现;Bahar等^[18]研究发现1-MCP处理延长了番茄果实的贮藏期,保持了番茄果实的品质。此外,已有研究表明果实的衰老过程即活性氧代谢失调与积累的过程,1-MCP处理可以有效提高果实抗氧化酶活性,增强自由基清除能力,减少果实受到活性氧(reactive oxygen species, ROS)的伤害,对维持果实活性氧代谢的平衡有显著效果。林静颖等^[19]研究表明,1-MCP处理能有效降低‘油棕’超氧阴离子产生速率和膜脂过氧化产物丙二醛含量,保持‘油棕’果实较

高的超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化物酶等活性氧清除酶活性,同时提高采后‘油棕’果实的活性氧清除能力、降低活性氧积累及抑制膜脂过氧化作用,从而提高采后‘油棕’果实耐贮性、延长其果实保鲜期。然而目前关于1-MCP处理在低温贮藏条件下对番茄果实保持品质及增强其抗氧化能力鲜有研究。因此本研究以品种“天赐575”番茄为试验材料,用3种不同浓度1-MCP熏蒸处理后放入 $(12\pm 1)^\circ C$ 条件下贮藏,通过测定番茄采后品质、活性氧及相关酶活性的影响,探讨1-MCP处理对番茄果实低温贮藏品质和保鲜效果的影响,以期为1-MCP在番茄贮藏保鲜上的应用提供一定的理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

“天赐575”绿熟期番茄:2023年7月19日采摘于新疆乌鲁木齐市三坪农场管理良好的果园。选择大小均匀、单果质量100g左右、外观典型、无病虫害、无机械损伤的果实立即运往新疆农业大学果蔬采后生理及贮藏实验室进行清洗和杀菌,室温晾干后运至 $(12\pm 1)^\circ C$ 冷库中备用。

石英砂、三氯乙酸、硫酸、愈创木酚、碳酸钙粉、碳酸氢钠、氢氧化钠、邻苯二甲酸氢钾、草酸、甲醇、甲苯、无水乙醇、酚酞、丙酮(均为分析纯):天津市致远化学试剂有限公司;抗坏血酸(分析纯):天津市北联精细化学品开发有限公司;2,6-二氯酚靛酚盐(分析纯):上海源叶生物科技有限公司;1-甲基环丙烯(分析纯):美国罗门哈斯(中国)公司;番茄红素标准品(苏丹I色素):北京索莱宝科技有限公司;过氧化氢试剂盒:苏州梦犀生物医药科技有限公司。

1.2 仪器与设备

GY-4数显果实硬度计:艾普计量仪器有限公司;JSB30-1电子计重秤:上海浦春计量仪器有限公司;PAL-1手持折光仪:日本ATAGO株式会社;NH310高品质色差仪:深圳市三恩驰科技有限公司;F145-11电子天平:赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;DZKW-S-6恒温水浴锅:北京市永光明医疗仪器有限公司;FSH-2A可调高速分散器(匀浆机):常州润华电器有限公司;DL-I-15台式封闭电炉:天津市泰斯特仪器有限公司;UV-1780紫外可见分光光度计:日本岛津公司;3H16RI高速冷冻离心机:湖南赫西仪器装备有限公司;RC-4温度记录仪:江苏精创电气股份有限公司;低温库:烟台科达气调设备有限公司。

1.3 试验设计

对照组(CK):将外观典型、大小均匀、色泽一致、无机械损伤的果实放入 $(12\pm 1)^\circ C$ 低温库中,以不加1-MCP熏蒸为对照。处理组1:将果实放置在由聚乙

烯膜制成的密封帐中用 0.5 $\mu\text{L/L}$ 1-MCP 熏蒸处理 24 h 后放入低温库中。处理组 2: 将果实放置在由聚乙烯膜制成的密封帐中用 1.0 $\mu\text{L/L}$ 1-MCP 熏蒸处理 24 h 后放入低温库中。处理组 3: 将果实放置在由聚乙烯膜制成的密封帐中用 1.5 $\mu\text{L/L}$ 1-MCP 熏蒸处理 24 h 后放入低温库中。处理后每隔 5 d 测定相关指标, 试验均重复测定 3 次。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 冷害指数的测定

贮藏结束后将果实从冷库中取出, 冷却至室温 (25 $^{\circ}\text{C}$), 记录果实冷害情况。根据番茄果实表面冷害程度, 将冷害分为 5 级: 1 级为果实表面无冷害状完好; 2 级为果实表面冷害面积占果实 0%~10%; 3 级为果实表面冷害面积占果实 11%~25%; 4 级为果实表面冷害面积占果实 26%~40%; 5 级为果实表面冷害面积超过 40% 以上。分别记录各组的冷害级数, 冷害指数计算公式如下。

$$X = \frac{\sum (Y \times Z)}{M \times N}$$

式中: X 为冷害指数; Y 为冷害级别; Z 为同级别果实数; M 为调查总果数; N 为最高级别冷害。

1.4.2 失重率的测定

采用称重法测定失重率, 每个处理做 3 次重复。

1.4.3 硬度和细胞膜透性的测定

使用硬度计测定番茄果实硬度; 参考张少颖^[20]的方法测定细胞膜透性。

1.4.4 可溶性固形物含量 (soluble solids content, SSC)、抗坏血酸 (ascorbic acid, AsA)、可滴定酸 (titratable acid, TA) 含量的测定

番茄果实 SSC 采用手持折光仪进行测定; AsA 和 TA 含量的测定参考曹建康等^[21]的方法。

1.4.5 果实表面色度的测定

采用色差仪沿番茄赤道对果实表面颜色 (L^* 、 a^* 、 b^*) 进行测定, 每隔 120 $^{\circ}$ 测量 1 次, 所有测定重复 3 次。

1.4.6 果实色素含量的测定

参考 Roohanitaziani 等^[22]的方法和 GB/T 14215—2021《番茄酱罐头质量通则》测定果实叶绿素和番茄红素含量。

1.4.7 MDA 含量和过氧化氢酶 (catalase, CAT)、超氧化物歧化酶活性的测定

参考曹建康等^[21]的方法进行测定。

1.4.8 O_2 -产生速率和 H_2O_2 含量的测定

参考曹建康等^[21]的方法测定 O_2 -产生速率; 采用试剂盒的说明方法测定 H_2O_2 含量。

1.5 数据处理与统计分析

采用 Excel 和 SPSS 26.0 软件进行数据处理和统计分析, 采用 Origin2021 软件进行统计分析和作图, 利

用 ANOVA 分析数据间显著性, 并通过 t 检验检查数据组间及组内差异, $P < 0.05$ 为差异显著。

2 结果与分析

2.1 不同浓度 1-MCP 处理对番茄果实冷害指数和失重率的影响

不同浓度 1-MCP 对番茄果实冷害指数和失重率的影响见图 1。

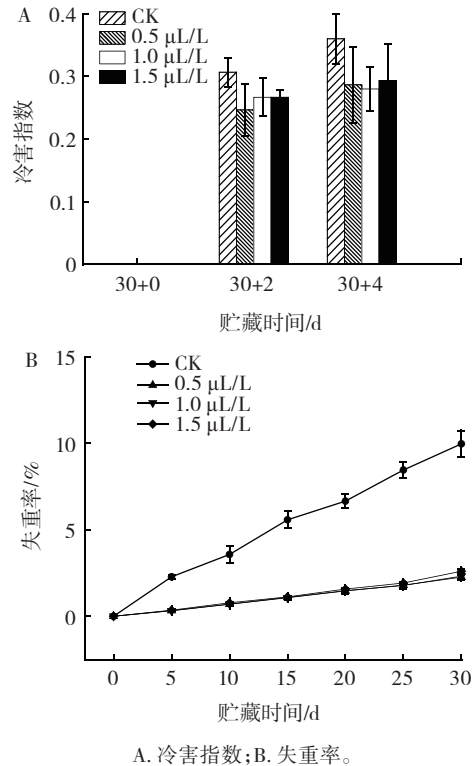


图 1 不同浓度 1-MCP 对番茄果实冷害指数和失重率的影响
Fig.1 Effects of different concentrations of 1-MCP on chilling injury index and weight loss rate of tomatoes

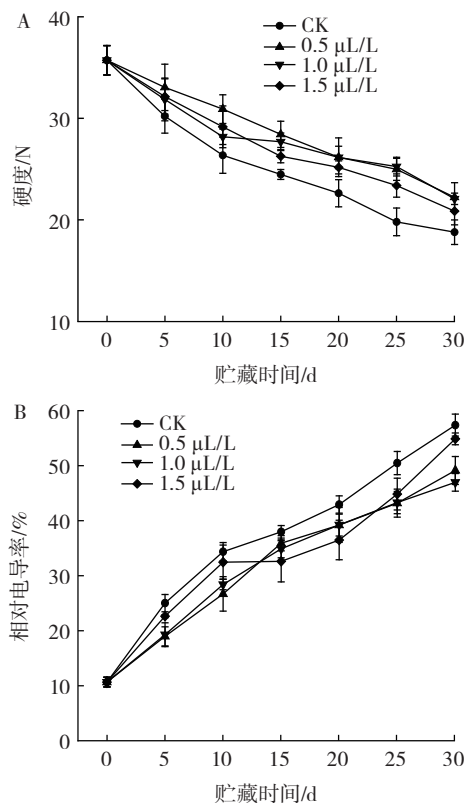
冷害指数是评价番茄外观最直接和最易观察的指标之一, 番茄果实的冷害现象表现为果实表面发生凹陷的斑点和斑块, 局部组织坏死、变色且为水浸状, 果实不能正常后熟软化等。由图 1A 可知, 在冷藏期间, 番茄果实表现出的冷害症状不明显, 但转置货架期 2 d 后, 不同处理组的果实均出现了冷害症状。不同浓度的 1-MCP 处理均可以有效减缓番茄果实冷害症状的发生, 但是与对照组相比差异不明显。

果蔬失重率是评价果蔬品质的重要指标之一, 失重率的产生主要是因为果蔬采收后呼吸作用失去水分, 营养物质消耗等因素造成。由图 1B 可知, 在贮藏期间番茄的失重率随着贮藏时间的延长呈上升趋势, 且对照组失重率始终高于处理组。在贮藏第 30 天时, 各处理组的失重率分别是 2.2%、2.3%、2.6%, 对照组失重率分别高出处理组 7.8%、7.7%、7.4%, 1-MCP 处理组间的失重率无明显差异, 结果表明 1-MCP 处理可以有效

减少番茄果实的质量损失。

2.2 不同浓度 1-MCP 处理对番茄果实硬度和细胞膜透性的影响

不同浓度 1-MCP 处理番茄硬度和细胞膜透性的影响见图 2。



A. 硬度; B. 细胞膜透性。

图 2 不同浓度 1-MCP 处理番茄硬度和细胞膜透性的影响

Fig.2 Effects of different concentrations of 1-MCP on tomato hardness and cell membrane permeability

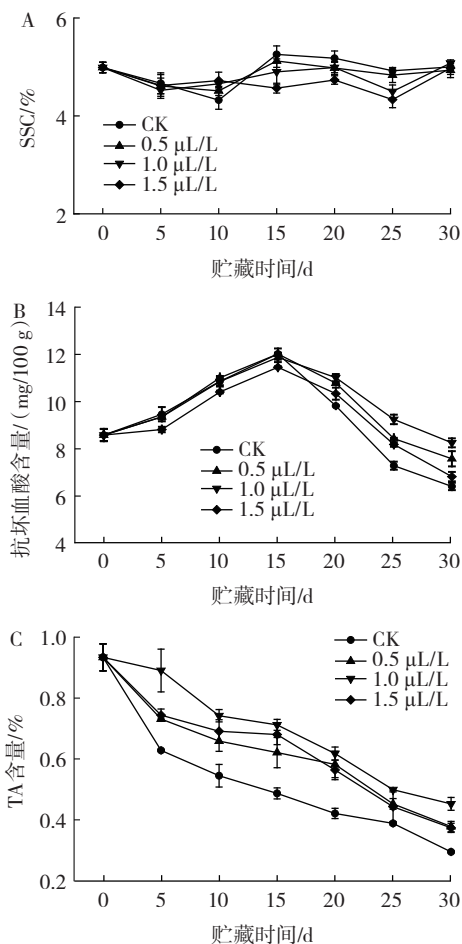
硬度是衡量果实品质的一个重要指标,如图 2A 所示,在整个贮藏期间果实的硬度持续下降,贮藏 15~30 d, 1-MCP 处理组的番茄果实均明显高于对照组。贮藏第 30 天时, 0.5、1.0、1.5 μL/L 处理组的果实硬度分别是 (22.22±1.43)、(22.07±0.56)、(20.86±1.35) N, 相较于第 0 天分别降低了 13.50、13.65、14.86 N, 而 CK 组降低了 16.94 N, 1-MCP 组的硬度明显高于对照组。结果表明, 1-MCP 可显著延缓番茄果实硬度的下降。

细胞膜透性可用相对电导率表示,可以反映出果实细胞膜受到的伤害程度和果蔬成熟软化程度^[23]。由图 2B 可知,在贮藏期间所有处理组的番茄相对电导率随着贮藏时间的延长呈现持续升高的趋势。在贮藏第 30 天时, 0.5、1.0、1.5 μL/L 处理组的相对电导率分别是 49.13%、46.97% 和 54.87%, 而 CK 组在第 30 天的相对电导率为 57.37%, 比 0.5 μL/L 和 1.0 μL/L 处理组高 8.24% 和 10.24%, 表明浓度为 0.5 μL/L 和

1.0 μL/L 的 1-MCP 处理在冷藏条件下可明显抑制番茄果实相对电导率的升高,说明 0.5 μL/L 和 1.0 μL/L 的处理浓度对延缓番茄果实细胞膜透性的增加,保持细胞膜透性的完整有较好的效果。而浓度为 1.5 μL/L 与 CK 组差异不明显。

2.3 不同浓度 1-MCP 处理对番茄果实 SSC、AsA 含量和 TA 含量的影响

不同浓度 1-MCP 处理对番茄 SSC、AsA 含量和 TA 含量的影响见图 3。



A. SSC; B. AsA 含量; C. TA 含量。

图 3 不同浓度 1-MCP 处理对番茄 SSC、AsA 含量和 TA 含量的影响

Fig.3 Effects of different concentrations of 1-MCP on the content of SSC, AsA, and TA in tomatoes

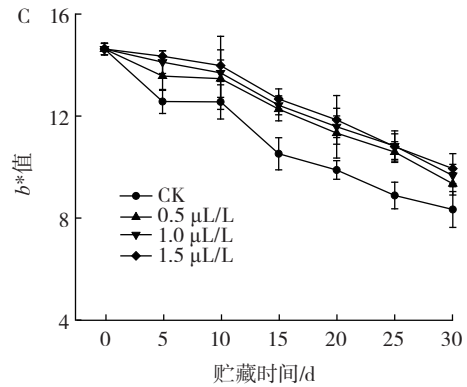
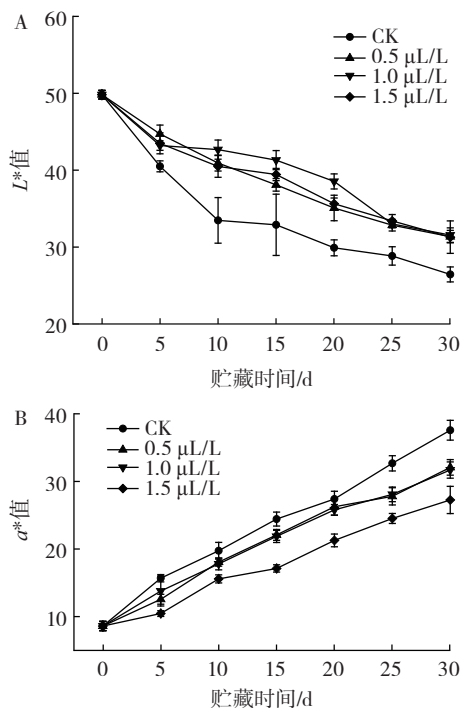
番茄中的可溶性固形物由可溶性糖、矿物质、柠檬酸和苹果酸等有机酸组成,主要为番茄汁液中溶质的百分含量,是衡量番茄品质及加工特性的重要指标^[24]。由图 3A 可知,番茄果实在贮藏过程中 SSC 整体呈现先上升后下降的趋势,表明番茄在贮藏过程中伴随着成熟衰老过程,贮藏前 10 d 的 SSC 含量变化趋势缓慢,第 15 天 SSC 达到最大值,15 d 之后的 SSC 逐渐下降。结果表明, 1-MCP 可延缓番茄果实 SSC 的增加。

抗坏血酸也称维生素C,是一种重要的抗氧化剂和生长调节剂,对植物生长发育和人类健康至关重要^[25],也是评价果蔬营养品质和贮藏效果的评价指标。由图3B可知,番茄在未成熟之前AsA含量整体呈现上升的趋势,在第15天到达最大值,推测此时番茄正处于转色期,其中熏蒸浓度为1.5 $\mu\text{L/L}$ 的1-MCP处理组明显低于其它处理组,15 d之后AsA含量迅速下降,在第30天时0.5、1.0、1.5 $\mu\text{L/L}$ 处理组的AsA含量分别为7.6、8.3、6.8 mg/100 g,比对照组分别高出1.2、1.9、0.4 mg/100 g。试验结果表明1-MCP在番茄果实转色前可抑制AsA含量的上升,转色后可抑制AsA含量的下降,其中浓度为0.5 $\mu\text{L/L}$ 和1.0 $\mu\text{L/L}$ 的1-MCP可明显抑制番茄果实AsA含量的下降。

可滴定酸含量是评价果实风味品质的重要指标之一,贮藏期间的有机酸含量变化与糖类呼吸作用和分解代谢有关^[26]。由图3C可知,随着贮藏时间的延长,不同处理组的TA含量均呈现下降趋势。对照组下降趋势明显,从0 d的0.93%下降至第30天的0.29%,下降0.64%。对照组在整个贮藏期的TA含量明显低于1-MCP处理组,其中以1.0 $\mu\text{L/L}$ 1-MCP处理对果实TA含量的下降有较好的抑制作用,在整个贮藏期TA含量变化较为缓慢,但1-MCP浓度高于或低于1.0 $\mu\text{L/L}$,抑制果实TA含量的作用逐渐减弱。试验结果表明不同浓度1-MCP处理均可不同程度抑制番茄果实TA含量的下降。

2.4 不同浓度1-MCP处理对番茄果实色差的影响

不同浓度1-MCP处理对番茄果实 L^* 、 a^* 、 b^* 值的影响见图4。



A. L^* 值; B. a^* 值; C. b^* 值。

图4 不同浓度1-MCP处理对番茄果实 L^* 、 a^* 、 b^* 值的影响
Fig.4 Effects of different concentrations of 1-MCP on the L^* , a^* , and b^* of tomatoes

番茄果实色泽是判断番茄品质的直观标准。 L^* 值代表果实亮度, L^* 值越大果实越亮,反之偏暗。由图4A可知,贮藏0 d时 L^* 值最大,随着贮藏时间的延长各处理组的 L^* 值均呈下降趋势,后10 d的 L^* 值变化相较于前20 d平缓,可能是随着成熟进程的推进,番茄果实在第20天已近成熟。除0 d外,0.5、1.0、1.5 $\mu\text{L/L}$ 处理组与对照组相比 L^* 值差异明显,贮藏第30天时,0.5、1.0、1.5 $\mu\text{L/L}$ 处理组与对照组CK相比, L^* 值分别增加了4.93、5.11、4.85,试验结果表明1-MCP处理会影响绿熟期番茄果实亮度,能较好地维持番茄果实 L^* 值。

a^* 值代表果皮的红绿程度, a^* 值越大,表明果实越红,反之偏绿色。由图4B可知,在整个贮藏过程中各处理组的 a^* 值随着贮藏时间的延长不断增大,表明绿熟期番茄在贮藏过程中逐渐由绿转红。贮藏第30天时,0.5、1.0、1.5 $\mu\text{L/L}$ 1-MCP处理组与对照组(CK)相比 a^* 值变化明显,此时对照组番茄转红率高达90%,而1-MCP处理组转红率仅为50%~60%,色泽大多为淡粉色。试验结果表明1-MCP处理可以延缓绿熟期番茄从绿转红。其中浓度为1.5 $\mu\text{L/L}$ 的1-MCP对番茄转红相较于0.5 $\mu\text{L/L}$ 和1.0 $\mu\text{L/L}$ 有更好的抑制作用。

b^* 值表示果皮蓝黄色度, b^* 值越大,表明果皮偏黄色, b^* 值越小,表明果皮偏蓝色。由图4C可知,在贮藏过程中果实的 b^* 值呈下降趋势,这是由于随着贮藏时间的延长,果实逐渐转红,所以黄色度不断下降。除第10天外,1-MCP处理组的 b^* 值均明显高于对照组,表明1-MCP处理可以加速果实的黄色变化。

2.5 不同浓度1-MCP处理对番茄果实色素含量的影响

不同浓度1-MCP处理对番茄果实色素含量的影响见图5。

番茄中色素含量和果实成熟度有着直接关系。随着贮藏时间的延长,叶绿素不断分解,叶绿素含量不断下降,分解为其它色素,如胡萝卜素、番茄红素和花色

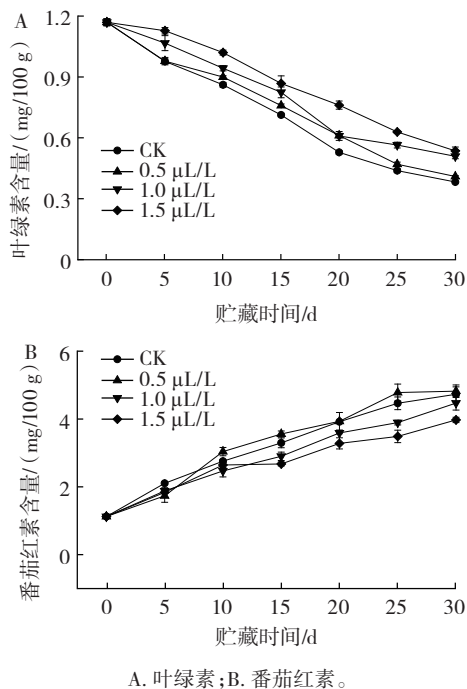


图5 不同浓度 1-MCP 处理对番茄果实色素含量的影响

Fig.5 Effects of different concentrations of 1-MCP on pigment content in tomatoes

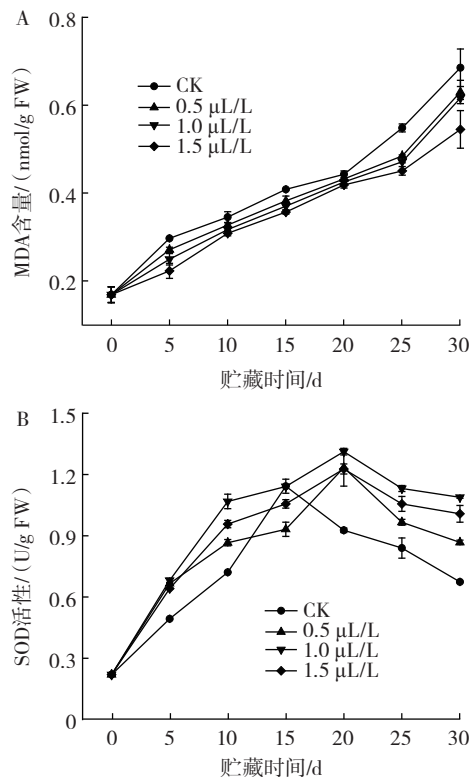
素苷等^[27]。由图 5 可知,随着贮藏时间的延长,果蔬在成熟衰老过程中叶绿素的降解伴随着番茄红素的升高,在贮藏过程中 1-MCP 处理组的叶绿素含量始终高于对照组(CK),说明 1-MCP 可抑制番茄果实叶绿素的降解,在第 30 天时,对照组、0.5、1.0、1.5 $\mu\text{L/L}$ 处理组叶绿素含量分别为 0.38、0.41、0.51、0.53 mg/100 g。

番茄红素是类胡萝卜素的一种,具有较强的氧化作用,同时也是导致番茄在贮藏过程中变红的一个主要原因。由图 5B 可知,番茄红素含量在整个贮藏期呈上升趋势,对照组果实的番茄红素含量在整个贮藏期都高于 1.0、1.5 $\mu\text{L/L}$ 1-MCP 处理组,表明 1.0、1.5 $\mu\text{L/L}$ 1-MCP 处理组可以抑制番茄红素的合成,而 0.5 $\mu\text{L/L}$ 1-MCP 处理组第 20 天后可促进番茄红素的合成。其中 1.5 $\mu\text{L/L}$ 1-MCP 在第 30 天时明显低于 0.5 $\mu\text{L/L}$ 和 1.0 $\mu\text{L/L}$ 1-MCP 处理组,试验结果表明 1-MCP 浓度对番茄红素含量的积累有抑制作用,并有量效关系。

2.6 不同浓度 1-MCP 处理对番茄果实 MDA 含量和 SOD 活性的测定

不同浓度 1-MCP 处理对番茄果实 MDA 含量和 SOD 活性的影响见图 6。

如图 6A 所示,番茄果实在贮藏过程中,MDA 含量随贮藏时间的延长不断增加。1-MCP 处理组的 MDA 含量增加趋势缓慢且始终低于对照组。30 d 时对照组 (0.68 nmol/g) 比 0.5 $\mu\text{L/L}$ 处理组 (0.63 nmol/g)、1.0 $\mu\text{L/L}$ 处理组 (0.61 nmol/g)、1.5 $\mu\text{L/L}$ 处理组 (0.54 nmol/g) 增



A. MDA 含量; B. SOD 活性。

图6 不同浓度 1-MCP 处理对番茄果实 MDA 含量和 SOD 活性的影响

Fig.6 Effects of different concentrations of 1-MCP on MDA content and SOD activity in tomatoes

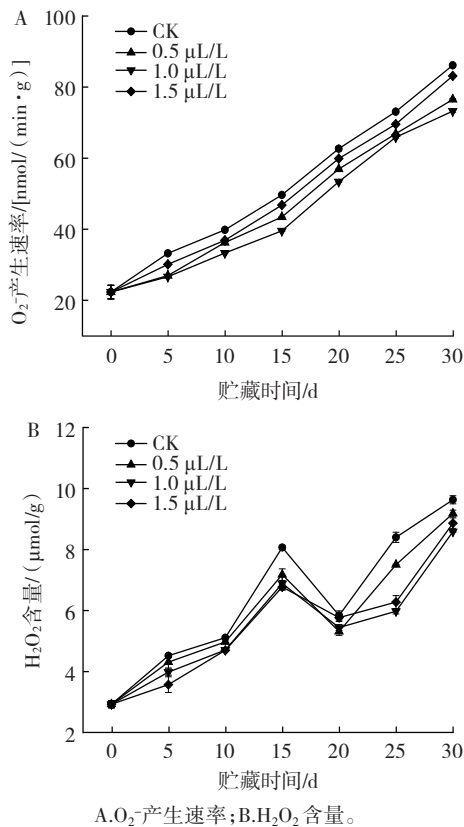
加了 7.35%、10.29% 和 20.59%。说明 1-MCP 组抑制了番茄 MDA 含量的积累,从而降低了细胞膜脂过氧化的程度,且 1-MCP 浓度越大,抑制 MDA 含量增加的效果越好。

SOD 是植物抗氧化系统的第一道防线,能催化超氧阴离子发生歧化反应生成 H_2O_2 ,在维持机体自由基的动态平衡中起重要作用。由图 6B 可知,在贮藏期间,SOD 活性呈现先上升后下降的趋势。除 15 d 外,1-MCP 处理组的 SOD 活性均高于对照组。对照组在第 15 天时达到最大值 1.14 U/g FW,而 0.5、1.0、1.5 $\mu\text{L/L}$ 处理组则在 20 d 达到最大值,分别为 1.23、1.31、1.22 U/g FW,贮藏结束时 0.5、1.0、1.5 $\mu\text{L/L}$ 处理组比对照组高 22.38%、38.14% 和 33.17%。由以上分析可知,1-MCP 处理可以保持较高的酶活性,对维持细胞膜的完整性和流动性有较好的效果。

2.7 不同浓度 1-MCP 处理对番茄果实 O_2^- 产生速率和 H_2O_2 含量的影响

不同浓度 1-MCP 处理对番茄果实 O_2^- 产生速率和 H_2O_2 含量的影响见图 7。

如图 7A 所示,超氧阴离子产生速率在贮藏过程中呈现上升的趋势,从 15 d 后 1-MCP 处理组的 O_2^- 产生速率明显低于对照组。在贮藏 30 d 时,对照组番茄

A.O₂⁻产生速率;B.H₂O₂含量。图7 不同浓度1-MCP处理对番茄果实O₂⁻产生速率和H₂O₂含量的影响Fig.7 Effects of different concentrations of 1-MCP on O₂⁻ production rate and H₂O₂ content in tomatoes

的O₂⁻产生速率为86.14 nmol/(min·g),比0.5、1.0、1.5 μL/L处理组分别高出11.16%、15.00%、3.50%。说明1-MCP对番茄果实O₂⁻产生速率具有明显的抑制作用。

H₂O₂的积累导致膜脂氧化的发生。如图7B所示,过氧化氢含量在贮藏期间有两次明显的升高,分别为处理后的第15天和第25天,这可能是因为15 d时番茄处于转色期,1-MCP处理抑制了番茄果实贮藏期间H₂O₂的产生,在贮藏30 d时对照组的H₂O₂含量明显高于1-MCP处理组,比0.5、1.0、1.5 μL/L处理组分别高出4.65%、10.85%和7.95%,说明1-MCP处理组延缓了H₂O₂对细胞的损伤,有效延缓了膜脂氧化的进程,且1.0 μL/L 1-MCP处理效果最好。

3 讨论

番茄属于典型的呼吸跃变型果蔬,采摘后的番茄仍在进行呼吸作用,番茄贮藏是一个后熟过程,采后番茄软化快是贮藏过程中的主要问题之一,贮藏过程中营养指标不断发生变化,营养指标与番茄的食用品质密切相关。1-MCP作为一种果蔬保鲜剂,通过与果实细胞膜上的乙烯受体结合,从而延长果蔬的成熟衰老,在多种果蔬上已有广泛应用。本试验研究表明,不同浓度的1-MCP处理均可较好保持番茄果实的硬度,有

效延缓果实硬度的下降,推迟果实的成熟衰老过程,这与李学文等^[28]的研究结果一致。李明璇等^[29]研究表明1-MCP处理可以延缓杏果实硬度的下降,与其在贮藏过程中使多聚半乳糖醛酸酶、果胶甲酯酶、纤维素酶和β-葡萄糖苷酶保持较低的活性有关。在保持果实内在品质方面,1-MCP处理也有较好的效果。本试验中,1-MCP处理可以延缓番茄果实SSC含量和维生素C含量的降低,这与在猕猴桃^[30]、海棠果^[31]上得出的结论基本一致。随着贮藏时间的延长,叶绿素含量降低,番茄红素含量升高,果实由绿变红是果实色泽变化的重要特征。试验结果表明,1.0 μL/L 1-MCP处理可以延缓绿熟期番茄果实叶绿素含量的降解,而在整个贮藏期间1-MCP处理组的番茄红素含量低于对照,这与已有研究结果基本一致^[17]。综上所述,1-MCP处理可以有效抑制番茄果实失重率的上升,延缓果实硬度的下降,在果实成熟后期可以显著抑制番茄果实可溶性固形物、维生素C、可滴定酸和叶绿素含量的下降,延缓番茄红素的降解。另外,1-MCP处理能减少ROS产生、积累及膜脂过氧化作用,减轻ROS对番茄果实细胞膜结果的破坏,这与在软枣猕猴桃^[32]、油柿^[33]、甜瓜^[34]上的研究一致。

4 结论

研究表明,与对照组相比,1-MCP处理可以有效维持番茄果实在贮藏过程中的SOD活性,抑制H₂O₂含量的积累、O₂⁻产生速率和细胞膜透性的上升,从而保持细胞膜的完整性并抑制MDA含量的增加,并延缓番茄果实硬度、TA含量、AsS含量、色泽和叶绿素含量的下降,抑制番茄果实失重率和冷害指数的升高,从而延缓番茄果实的成熟衰老,提高果实贮藏性,延长其保鲜期。

参考文献:

- [1] 孙慧波. 新疆兵团番茄产业链建设问题研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2014.
SUN Huibo. Study on the construction of tomato industry chain in Xinjiang Corps[D]. Shihezi: Shihezi University, 2014.
- [2] DAVID S, LEVIN E, FALLIK E, et al. Physiological genetic variation in tomato fruit chilling tolerance during postharvest storage[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 991983.
- [3] KADER A A, BEN-YEHOSHUA S. Effects of superatmospheric oxygen levels on postharvest physiology and quality of fresh fruits and vegetables[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2000, 20 (1): 1-13.
- [4] 李贞景, 刘丹, 罗茂, 等. 光量子辐照对番茄采后品质及微观结构的影响[J]. *食品科学技术学报*, 2020, 38(3): 27-34, 76.
LI Zhenjing, LIU Dan, LUO Mao, et al. Effect of photon quantum irradiation on quality and microstructure of postharvest tomato[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2020, 38(3): 27-34, 76.
- [5] 王慧俐, 郑晓冬. 印度梨形孢对樱桃番茄产量、品质及采后抗性的影响[J]. *核农学报*, 2022, 36(2): 466-472.

- WANG Huili, ZHENG Xiaodong. Effects of *Piriformis indica* on yield, quality and postharvest resistance of cherry tomato[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2022, 36(2): 466-472.
- [6] 张丽芬, 张盼盼, 潘润森, 等. 超声协同钙浸渍对樱桃番茄贮藏过程中番茄红素和品质特性的影响[J]. 食品科学技术学报, 2021, 39(1): 54-64.
- ZHANG Lifen, ZHANG Panpan, PAN Runsen, et al. Effects of ultrasound combined with calcium impregnation on lycopene and quality properties of cherry tomatoes during storage[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 39(1): 54-64.
- [7] MORE S K, RAMANA RAO T V. Synergistic effect of aloe vera gel coating and UV-C on post-harvest quality retention of stored tomatoes[J]. Indian Journal of Agricultural Biochemistry, 2022, 35(1): 87-95.
- [8] 弓德强, 李敏, 高兆银, 等. 1-甲基环丙烯处理对樱桃番茄果实低温贮藏品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(4): 116-122, 129.
- GONG Deqiang, LI Min, GAO Zhaoyin, et al. Effect of 1-methylcyclopropene treatment on quality of cherry tomatoes stored at low temperature[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(4): 116-122, 129.
- [9] 曹雪, 郝秀秀, 曹振, 等. 低温贮藏对“汉蒙7号”茄果实品质、色素含量和果皮显微结构的影响[J]. 北方园艺, 2020(1): 96-103.
- CAO Xue, HAO Xiuxiu, CAO Zhen, et al. Effects of low temperature storage on the quality, pigment content and pericarp microstructure of tomato Fruit 'Hanmeng No.7'[J]. Northern Horticulture, 2020(1): 96-103.
- [10] 陈金印, 刘康. 1-MCP 处理对秋番茄果实采收后生理及贮藏效果的影响[J]. 食品科学, 2008, 29(10): 598-603.
- CHEN Jinyin, LIU Kang. Effects of 1-MCP treatment on post-harvest physiology and storage of autumn tomato[J]. Food Science, 2008, 29(10): 598-603.
- [11] 张明昊, 叶正文, 骆军, 等. 1-MCP 处理结合低温贮藏对早生新水梨采收后生理及品质的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(10): 127-133, 209.
- ZHANG Minghao, YE Zhengwen, LUO Jun, et al. Effects of 1-MCP combined with low temperature storage on postharvest physiology and quality of Zaoshengxinshui pear[J]. Food & Machinery, 2022, 38(10): 127-133, 209.
- [12] 谢小燕, 刘德讲, 李芳杰, 等. 程序降温协同 1-甲基环丙烯、保鲜纸两种处理对新疆蟠桃贮藏品质和果皮褐变的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(19): 223-231.
- XIE Xiaoyan, LIU Dejiang, LI Fangjie, et al. Effects of programmed cooling combined with 1-methylcyclopropene and plastic wrap treatments on storage quality and peel browning of peacha in Xinjiang[J]. Food Science, 2022, 43(19): 223-231.
- [13] 贾朝爽, 王志华, 王文辉. 不同货架温度结合 1-MCP 处理对华红、华月苹果质地性状的影响[J]. 华北农学报, 2022, 37(4): 128-140.
- JIA Chaoshuang, WANG Zhihua, WANG Wenhui. Effects of different shelf temperatures combined with 1-MCP treatments on texture traits of Huahong and Huayue Apples[J]. Acta Agriculturae Borealisinica, 2022, 37(4): 128-140.
- [14] 颜廷才, 邵丹, 李江阔, 等. 1-MCP 对葡萄货架期间品质及挥发性物质的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(20): 258-263.
- YAN Tingcai, SHAO Dan, LI Jiangkuo, et al. Effects of 1-MCP on quality and volatile components of grapes during shelf life[J]. Food Science, 2015, 36(20): 258-263.
- [15] 霍俊伟, 高静, 张鹏, 等. 1-甲基环丙烯对蓝靛果贮藏品质的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(19): 321-328.
- HUO Junwei, GAO Jing, ZHANG Peng, et al. Effect of 1-methylcyclopropene on the storage quality of *Lonicera caerulea* L[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(19): 321-328.
- [16] 刘忠德, 栾姝晓. 1-MCP 对采收后番茄常温贮藏效果的影响[J]. 江苏农业科学, 2011, 39(1): 303-305.
- LIU Zhongde, LUAN Shuxiao. Effects of 1-MCP on storage of harvested tomato at ambient temperatures[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2011, 39(1): 303-305.
- [17] 程宏雪, 董萍, 王月华, 等. 1-MCP 和 1-PentCP 二次处理对樱桃番茄采收后常温贮藏生理品质影响的比较[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(4): 202-206.
- CHENG Hongxue, DONG Ping, WANG Yuehua, et al. Effect of double treatment with 1-MCP or 1-PentCP on postharvest physiology and quality of cherry tomatoes stored in ambient temperature[J]. Food and Fermentation Industries, 2015, 41(4): 202-206.
- [18] BAHAR A, CAVUSOGLU S, YILMAZ N, et al. The effect of different doses of 1-methylcyclopropene on postharvest physiology and predicting ethylene production through multivariate adaptive regression splines in cocktail tomato[J]. Horticulturae, 2022, 8(7): 567.
- [19] 林静颖, 李辉, 袁芳, 等. 1-甲基环丙烯处理对采收后‘油棕’果实呼吸速率和活性氧代谢的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(23): 205-211.
- LIN Jingying, LI Hui, YUAN Fang, et al. Effect of 1-methylcyclopropene treatment on respiration rate and reactive oxygen species metabolism during postharvest storage of 'younai' plum fruit[J]. Food Science, 2020, 41(23): 205-211.
- [20] 张少颖. NO 处理对番茄采收后活性氧代谢的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2004.
- ZHANG Shaoying. Effect of NO treatment on reactive oxygen species metabolism of postharvest tomato[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2004.
- [21] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采收后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007.
- CAO Jiankang, JIANG Weibo, ZHAO Yumei. Guidance on postharvest physiological and biochemical experiments of fruits and vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007.
- [22] ROOHANITAZIANI R, LAMMERS M, MOLTHOFF J, et al. Phenotyping of a diverse tomato collection for postharvest shelf-life[J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 188: 111908.
- [23] 周枫. 采收成熟度、1-MCP 和乙烯处理对番茄果实冷害和贮藏效果的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
- ZHOU Feng. Effects of harvest maturity, 1-MCP and ethylene treatment on chilling injury and storage effect of tomato fruit[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016.
- [24] KANAYAMA Y. Sugar metabolism and fruit development in the tomato[J]. The Horticulture Journal, 2017, 86(4): 417-425.
- [25] CHEN W F, HU T X, YE J, et al. A CCAAT-binding factor, SIN-FYA10, negatively regulates ascorbate accumulation by modulating the D-mannose/L-galactose pathway in tomato[J]. Horticulture Research, 2020, 7(1): 200.
- [26] MAHAJAN B V C, DHILLON W S, KUMAR M, et al. Effect of different packaging films on shelf life and quality of peach under super and ordinary market conditions[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(6): 3756-3762.
- [27] 齐红岩, 陈俊俏, 吕德卿, 等. SRE 处理对采收后番茄贮藏效果的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(20): 291-295.
- QI Hongyan, CHEN Junqiao, LÜ Deqing, et al. Effect of slow-release ethanol treatment on quality traits of tomatoes (*Lycopersicon esculentum* mill.) during postharvest storage[J]. Food Science,

- 2014, 35(20): 291-295.
- [28] 李学文, 韩江, 滕康宁. 1-MCP 对番茄采后生理变化的影响[J]. 新疆农业科学, 2006, 43(6): 477-479.
LI Xuewen, HAN Jiang, TENG Kangning. Effects of 1-MCP post-harvest treatment on physiological changes of tomato[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2006, 43(6): 477-479.
- [29] 李明璇, 岳明, 靳江平, 等. 1-MCP 熏蒸结合不同温度对杏果实细胞壁代谢的影响[J]. 食品科技, 2022, 47(2): 62-68.
LI Mingxuan, YUE Ming, JIN Jiangping, et al. Effect of 1-MCP fumigation combined with different temperatures on cell wall metabolism in apricot fruit[J]. Food Science and Technology, 2022, 47(2): 62-68.
- [30] 林晋雨, 肖丽, 杨春平, 等. 1-MCP 处理采后红阳猕猴桃果实生理效应的研究[J]. 四川农业大学学报, 2023, 41(2): 307-317.
LIN Jinyu, XIAO Li, YANG Chunping, et al. Study on physiological effects of 1-MCP treatment of postharvest 'Hongyang' kiwifruit [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2023, 41(2): 307-317.
- [31] 穆茜, 张丹丹, 杨祎凡, 等. 1-MCP 处理对“丽格”海棠果实采后生理及品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(1): 18-23.
MU Qian, ZHANG Dandan, YANG Yifan, et al. Effects of 1-MCP treatment on postharvest physiology and quality of rieger *Begonia* fruits[J]. Storage and Process, 2020, 20(1): 18-23.
- [32] 陈曦冉, 张鹏, 贾晓昱, 等. 1-MCP 处理维持软枣猕猴桃活性氧的代谢平衡[J]. 现代食品科技, 2022, 38(4): 83-91.
CHEN Xiran, ZHANG Peng, JIA Xiaoyu, et al. Reactive oxygen metabolism balance in *Actinidia arguta* by 1-MCP treatments[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(4): 83-91.
- [33] 王慧, 陈燕华, 林河通, 等. 纸片型 1-MCP 处理对采后安溪油柿果实活性氧代谢和细胞膜透性的影响[J]. 热带作物学报, 2018, 39(11): 2283-2289.
WANG Hui, CHEN Yanhua, LIN Hetong, et al. Effects of paper containing 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatment on reactive oxygen species (ROS) metabolism and cell membrane permeability of harvested Anxi persimmon fruit[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2018, 39(11): 2283-2289.
- [34] 张明明, 热合满·艾拉, 王玉红, 等. 乙烯与 1-MCP 处理对伯谢克辛甜瓜采后活性氧代谢的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(18): 270-273, 310.
ZHANG Mingming, Rehemana Ayla, WANG Yuhong, et al. Effects of ethylene and 1-MCP treatment on active oxygen metabolism of postharvest boxiekexin melon[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(18): 270-273, 310.

责任编辑:冯娜
收稿日期:2023-12-26