

壳聚糖抗菌包装纸箱结合1-MCP缓释处理下番茄贮藏品质的变化

李保祥¹, 刘志军², 孙卓成¹, 孙艳洳², 田梓煜¹, 刘影¹, 吴曼琴¹, 赵亚婷^{1*}

(1. 新疆农业大学食品科学与药学院, 新疆乌鲁木齐 830052)

(2. 新疆东鲁水控农业发展有限公司, 新疆喀什 844200)

摘要: 为探究一种适于番茄保鲜的处理方法, 该研究采用壳聚糖 (Chitosan, CS) 抗菌包装纸箱及 1-甲基环丙烯 (1-methylcyclopropene, 1-MCP) 缓释的方式贮藏番茄, 测定了果实的感官、品质、细胞膜代谢及抗氧化相关指标的变化。结果表明, CS+1-MCP 组较两者单独处理, 在 0~18 d 能够更好的抑制番茄的失重与腐烂, 其在第 18 天的失重率与腐烂率较 CS 组分别低 0.97%、23.3%, 而较 CK+1-MCP 组分别高 0.58%、低 6.67%。1-MCP 缓释处理也有助于保持生理与抗氧化品质, 特别是 CS+1-MCP 处理, 在第 18 天的呼吸强度较 CK+1-MCP 与 CS 组分别高 3.37、11.4 mg/(kg·h), 硬度较该两组分别高 1.93、0.64 kgf/cm², 该组也保持了较高的外观色泽及可滴定酸、可溶性固形物、抗坏血酸与总酚含量。此外, CS+1-MCP 处理更有效的减缓了丙二醛及细胞膜渗透率的增加, 推迟了过氧化物酶 (Peroxidase, POD) 与过氧化氢酶 (Catalase, CAT) 活性峰值的到来, 并抑制了后期活性的下降。综上, CS+1-MCP 相比于两者单独处理, 有效提高了对番茄贮藏相关品质的保持效果。因此, CS 纸箱结合 1-MCP 缓释处理可作为一种良好的方法应用于番茄采后贮藏保鲜中。

关键词: 壳聚糖; 抗菌包装; 1-MCP; 缓释处理; 保鲜效果

文章编号: 1673-9078(2025)07-189-198

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.7.0664

Changes in the Storage Quality of Tomatoes in Antimicrobial Chitosan Packaging Cartons under 1-MCP Sustained Release Treatment

LI Baoxiang¹, LIU Zhijun², SUN Zhuocheng¹, SUN Yanru², TIAN Ziyu¹, LIU Ying¹, WU Manqin¹, ZHAO Yating^{1*}

(1. College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

(2. Xinjiang Donglu Water Control Agricultural Development, Kashi 844200, China)

Abstract: To determine a suitable treatment method for tomato preservation, antibacterial chitosan (CS) packaging cartons and 1-methylcyclopropene (1-MCP) sustained-release treatment were used for tomato storage. Changes in the sensory, quality, cell membrane metabolism, and antioxidant indexes of tomatoes were measured during storage. The results indicate that CS+1-MCP treatment can better reduce the weight loss and decay of tomatoes than pure CS or 1-MCP

引文格式:

李保祥, 刘志军, 孙卓成, 等. 壳聚糖抗菌包装纸箱结合 1-MCP 缓释处理下番茄贮藏品质的变化[J]. 现代食品科技, 2025, 41(7): 189-198.

LI Baoxiang, LIU Zhijun, SUN Zhuocheng, et al. Changes in the storage quality of tomatoes in antimicrobial chitosan packaging cartons under 1-MCP sustained release treatment [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(7): 189-198.

收稿日期: 2024-05-14

基金项目: 新疆维吾尔自治区“三农”骨干人才培养项目 (2022SNGGCY037)

作者简介: 李保祥 (1990-), 男, 硕士, 讲师, 研究方向: 果蔬贮藏保鲜, E-mail: libx1011@xjau.edu.cn

通讯作者: 赵亚婷 (1989-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 果蔬贮藏技术, E-mail: zhaoyt@xjau.edu.cn

treatments alone during the 0~18 d storage period. In particular, on the 18th day, the weight loss and decay rate of the CS+1-MCP group are 0.97% and 23.3% lower than those of the CS group, respectively, and are 0.58% higher and 6.67% lower than those of the CK+1-MCP group, respectively. 1-MCP sustained release treatments also help to maintain the physiological and antioxidant properties of tomatoes. More specifically, on the 18th day, the respiratory intensity of the CS+1-MCP group is 3.37 and 11.4 mg/(kg·h) higher than that of the CK+1-MCP and CS groups, respectively, and the hardness of the CS+1-MCP group is 1.93 and 0.64 kgf/cm² higher than that of the latter two groups, respectively. At the same time, the CS+1-MCP group also maintains a better appearance and color and higher contents of titratable acid, soluble solids, ascorbic acid, and total phenols. In addition, CS+1-MCP treatment effectively slows the increase of malondialdehyde and cell membrane permeability, delays the peak activities of peroxidase and catalase, and inhibits the their activity reduction in the later stage. In conclusion, CS+1-MCP effectively improves the preservation of storage quality of tomatoes compared with pure CS or 1-MCP treatments alone. Therefore, CS cartons combined with 1-MCP sustained-release treatment can be successfully applied to the postharvest storage and preservation of tomatoes.

Key words: chitosan; antimicrobial packaging; 1-MCP; sustained release treatment; preservation effects

番茄 (*Solanum lycopersicum*) 果实营养丰富, 富含类胡萝卜素、抗坏血酸和糖, 是日常饮食中最重要的一类蔬菜^[1,2]。但是, 新鲜番茄因果皮薄、多汁、易损伤^[3], 加之其属于典型的呼吸跃变型果实, 采后呼吸代谢旺盛, 贮藏过程中, 易受成熟衰老的影响, 而出现软化、腐烂及品质劣变等现象, 由此所造成的采后损失约占总产量的 24.5%^[4]。近年来, 番茄常用的保鲜处理技术主要包括物理方法中的低温预冷^[5]、热处理^[6]及自发气调包装^[7]等, 生物方法主要有涂膜^[8]及植物精油处理^[9]等。番茄采后进行及时有效的商品化处理, 对降低其采后损耗、保持营养成分及延长货架期具有重要的意义。

壳聚糖 (Chitosan, CS), 来自天然产物—甲壳素, 是目前自然界发现唯一的碱性多糖, 因其安全无毒、价格低廉, 且具有良好的抑菌性^[10]、成膜性及抗氧化特性, 成为目前应用最为广泛的涂膜材料^[11,12]。Zhao 等^[13]采用壳聚糖制备薄膜, 并应用于蓝莓果实保鲜中, 结果表明, 壳聚糖膜处理的菌落总数与腐烂率较对照组分别降低了 13.5%、41.1%; 李保祥等^[14]采用壳聚糖对砂糖橘进行涂膜, 发现纯 CS 涂膜相比于未涂膜处理组, 腐烂率降低了 50%。综上所述, 壳聚糖能通过有效抑制病原微生物的生长, 从而减少果蔬贮藏过程中的腐烂。番茄贮藏过程中, 软化是其面临的主要问题, 但是目前尚未有充足的证据表明壳聚糖具有直接抑制果实软化的作用。

1-MCP 作为一种应用广泛的乙烯作用抑制剂, 不仅可在一定程度上调控果实软化相关产物的积累及相关酶活性, 更重要的方面是, 可通过抑制乙烯及呼吸代谢对果蔬成熟衰老的影响^[15,16], 从而保持

果实风味、延长货架期。Rabia 等^[17]研究发现, 1-MCP 处理能有效抑制秋葵在贮藏期间的软化、失重及乙烯释放量, 同时保持了较高的抗坏血酸含量与总抗氧化能力。张强等^[18]采用 1-MCP 对采后伽师瓜进行处理, 分析了软化相关酶活性及对应的基因表达量, 结果表明, 1-MCP 处理通过抑制 *CmPME*、*CmPG* 等基因的表达量, 降低了软化相关酶活性。因此, 1-MCP 作为一种良好的生物保鲜剂用于延缓果蔬采后软化与品质劣变, 具有广阔的应用前景。

新鲜番茄皮薄汁多、表面光滑, 且食用方式多为不去皮鲜食或烹饪的方式, 故不适宜直接在表面进行涂膜处理。而采用抗菌纸箱的方式, 更适合于番茄, 且易推广于实践。因此, 本研究拟在壳聚糖抗菌纸箱的基础上, 结合 1-MCP 缓释的方式处理番茄, 以期番茄绿色保鲜技术的开发提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

材料: 新鲜番茄, 2023 年 9 月 15 日采摘自乌鲁木齐齐新市区蔬菜种植基地, 挑选大小均匀、成熟度一致、无机械损伤及虫害的果实, 于当天立即运回实验室进行处理; 壳聚糖 (脱乙酰度为 90%, 分子质量为 180 kDa), 购自山东禾口王生物科技有限公司; 1-MCP (微囊粒剂, 透气性纸包装, 有效成分含量 3.3%), 购自河南卓纽生物科技有限公司。

试剂: 氢氧化钠、冰乙酸、三氯乙酸, 天津鑫铂特化工有限公司; 结晶乙酸钠、愈创木酚、聚乙烯吡咯烷酮 (Polyvinylpyrrolidone, PVP)、曲拉通 X-100, 天津光复精细化工研究所; 聚乙二醇 6000

(Macrogol 6000, PEG-6000), 上海山浦化工有限公司; 硫代巴比妥酸 (Thiobarbituric Acid, TBA)、考马斯亮蓝 G-250、牛血清白蛋白 (Bovine Serum Albumin, BSA), 北京索莱宝科技有限公司; 过氧化氢, 成都科隆化学品有限公司; 2,6-二氯酚靛酚钠盐, 江苏普乐生物科技有限公司; 福林酚, 上海生物工程股份有限公司; 所有试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

HCB 1002 电子天平, 埃德姆衡器 (武汉) 有限公司; 85-2 数显恒温磁力搅拌器, 常州荣华仪器制造有限公司; Dansensor CheckMate 3 台式顶空气体分析仪, 美国 MOCON 公司; LB32T 手持式糖度计, 广州市铭睿电子科技有限公司; NR200 便携式色差仪, 广东三恩时智能科技有限公司; L720R-3 台式冷冻离心机, 湘仪离心机仪器有限公司; DDS-307 电导率仪, 上海雷磁仪器有限公司; SHB-III 循环水式多用真空泵, 郑州长城科工贸有限公司; T6 新世纪紫外分光光度计, 北京普析通用仪器有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 抗菌纸箱制备

称取 15.0 g CS 粉末, 溶于 1 L 体积分数为 1% 的冰醋酸水溶液中, 置于磁力搅拌器上, 设置转速 800 r/min, 搅拌 24 h, 直至溶液透明均匀, 即制得质量分数为 1.5% 的 CS 膜液。将 1.5% CS 膜液均匀刷涂于瓦楞纸箱 (厚度为 4 mm, 体积约为 0.015 m³) 内部, 待自然晾干后, 即为所制备的抗菌包装纸箱。

1.3.2 番茄处理

将新鲜番茄随机分为 4 组, 每组 90 个番茄, 其中 40 个用于计数腐烂, 50 个用于其他指标测定。第一组为对照组, 将番茄装入未经任何处理的空白纸箱, 记为 CK; 第二组番茄装入制备的壳聚糖抗菌纸箱中, 记为 CS; 第三组为空白纸箱装入番茄, 在内部放置 1 小包 (50 mg) 1-MCP 做缓释处理, 记为 CK+1-MCP; 第四组为壳聚糖抗菌纸箱装入番茄后, 在内部放置同样规格的 1-MCP 做缓释处理, 记为 CS+1-MCP。上述四组番茄置于室温下贮藏, 每隔 3 天取样, 进行相关指标的测定。

1.3.3 番茄贮藏期间相关指标的测定

1.3.3.1 腐烂率

每组选择 40 个番茄计数累计腐烂。记录贮藏

第 3 天……第 i 天番茄的腐烂个数, 按照公式 (1) 计算腐烂率。

$$X = \frac{N_i}{N_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

X ——腐烂率, %;

N_i ——贮藏至第 i 天果实的腐烂总数;

N_0 ——总果实数 40。

1.3.3.2 失重率

每组选择 6 个番茄, 采用电子天平称重的方式, 记录番茄贮藏第 0 天, 第 3 天……第 i 天质量, 按照公式 (2) 计算失重率。

$$W = \frac{m_0 - m_i}{m_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

W ——失重率, %;

m_0 ——贮藏第 0 天果实的质量;

m_i ——贮藏第 i 天果实的质量。

1.3.3.3 呼吸强度

参照余易琳^[19]的方法。每组选择 4 个番茄果实, 采用台式顶空气体分析仪分别测定未放置番茄及放置番茄密闭 3 h 后, 干燥器中 CO₂ 的体积分数差, 计算番茄的呼吸强度。

1.3.3.4 颜色变化

采用便携式色差仪 (NR200) 对番茄贮藏期间的颜色变化进行测定。每组随机选择 3 个番茄, 测定赤道部位 3 个点的 L^* 值、 a^* 值和 b^* 值。

1.3.3.5 硬度

使用 GY-3 型果实硬度计测定。

1.3.3.6 可溶性固形物

参照曹建康等^[20]的方法测定。

1.3.3.7 可滴定酸

参照 Zhou 等^[21]的方法测定, 并根据预实验做了适当修改。10 g 番茄果汁, 用蒸馏水定容至 100 mL, 用 0.05 mol/L 的氢氧化钠溶液滴定 20 mL 滤液, 以酚酞作指示剂, 至滤液初显粉色, 且 30 s 内不褪色为终点, 记录所消耗的氢氧化钠体积, 重复测定 3 次。

1.3.3.8 抗坏血酸

参考 Xu 等^[12]的方法, 采用 2,6-二氯酚靛酚滴定法测定。

1.3.3.9 可溶性蛋白含量

参考曹建康等^[20]的方法, 采用考马斯亮蓝法测定。

1.3.3.10 总酚含量

参照 Haroon 等^[22]的方法,并进行了适当的修改。以没食子酸做标准曲线,按照公式(3)计算总酚含量,以每克番茄果汁中所含有相当于没食子酸毫克数表示(mg/g)。

$$C = \frac{\mu \times V}{m} \quad (3)$$

式中:

C ——总酚含量,mg/g;

μ ——在标准曲线查出的混合液中没食子酸的质量浓度,mg/mL;

V ——测定时所用的样品液体积,mL;

m ——称取汁液的质量,g。

1.3.3.11 丙二醛

参照 Hu 等^[23]的方法,并进行了适当的修改。称取 1.0 g 番茄果汁,加入 5.0 mL 100 g/L 的三氯乙酸溶液(TCA)匀浆,离心后取 2 mL 上清液,加入 2 mL 0.67 wt.% 的 TBA 溶液,混合煮沸,冷却后测定反应液在 450、532 和 600 nm 处的吸光度值。

1.3.3.12 细胞膜渗透率

参照 Zhao 等^[24]的方法,并进行了适当的修改。用打孔器取番茄外皮圆片,每组样品 10 片,浸泡在 20 mL 蒸馏水中孵育 1 h,测定溶液初始电导率 E_0 ;沸水浴 15 min,待冷却至室温后测定电导率 E_1 。按照公式(4)计算细胞膜渗透率。

$$P = \frac{E_0}{E_1} \times 100\% \quad (4)$$

式中:

P ——细胞膜渗透率,100%;

E_0 ——活组织提取液的电导率, $\mu\text{S}/\text{cm}$;

E_1 ——加热杀死组织提取液的电导率, $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

1.3.3.13 POD活性

(1)粗酶液制备:根据预实验,取 1.0 g 番茄样品,加入 5 mL 提取缓冲液,研磨匀浆,4℃、12 000 r/min 条件下离心 20 min 后,收集上清液,即为粗酶提取液。

(2)活性测定:采用愈创木酚法测定^[20]。

1.3.3.14 CAT活性

(1)粗酶液制备:称取 2.0 g 番茄样品,酶提取液制备方法同 1.3.3.13。

(2)活性测定:参考曹建康等^[20]的方法。

1.4 数据统计与分析

采用 Excel 2016 软件进行数据处理,SPSS 24.0

软件进行单因素方差分析(ANOVA),以 Duncan's 多重比较法进行显著性分析($P < 0.05$ 表示组间差异显著),采用 Origin 2017 软件绘图。

2 结果与讨论

2.1 不同处理对番茄贮藏期间失重率与腐烂率的影响

番茄果实皮薄汁多,采后呼吸作用及蒸腾生理旺盛,由水分散失所导致的果皮皱缩及风味变差将导致其商品价值降低。由图 1a 可知,各组处理番茄的失重率在 0~18 d 贮藏期内均逐渐增加,相比于 CK 组,CS 处理虽然贮藏 6 d 后在一定程度上抑制了番茄失重率的升高,但两者之间几乎未见显著性差异。增加 1-MCP 缓释处理,对果实失重的抑制效果有所提升,但 CK+1-MCP 组并不明显,而 CS+1-MCP 组在整个贮藏期间的失重率均低于另外三组,且具有显著性差异($P < 0.05$)。贮藏第 15 天,CS+1-MCP 组的失重率为 11.38%,较 CK、CS、CK+1-MCP 分别低 0.83%、0.63%、0.39%。

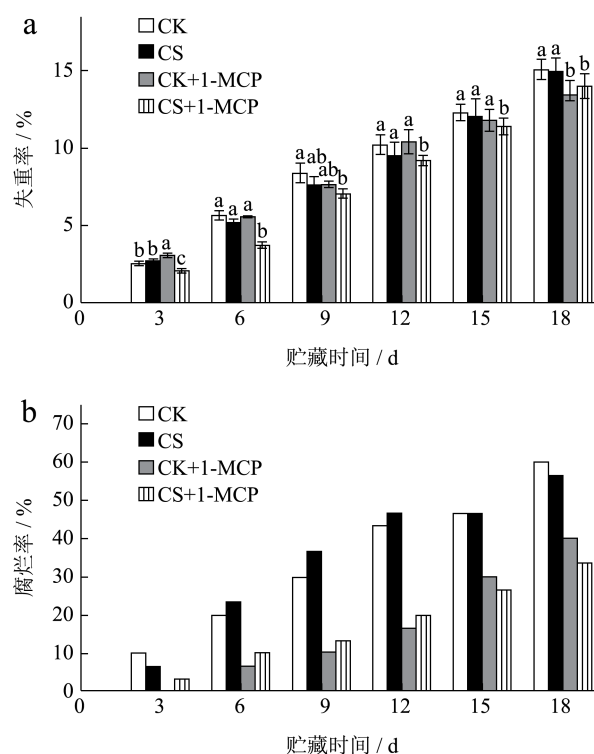


图 1 番茄贮藏期间失重率与腐烂率的变化

Fig.1 Changes in weight loss and decay of tomato during storage

注:图中不同字母表示数据具有显著性差异($P < 0.05$),下同。

新鲜番茄因果皮较薄, 贮运过程中因微生物侵染及软化所导致的腐烂, 是造成其损失的主要原因之一^[25]。如图 1b 所示, 贮藏 6 d 后各组番茄均出现腐烂, 且在后续贮藏过程中逐渐增加。贮藏 6~15 d, CS 处理并未提高对番茄腐烂的抑制效果, 甚至高于 CK 组, 但在整个贮藏期内, 包装纸箱结合 1-MCP 缓释处理组均表现出较低的腐烂率, 且 CS+1-MCP 在贮藏末期效果最佳。贮藏第 18 天, CS+1-MCP 组腐烂率最低, 为 33.3%, 其次为 CK+1-MCP 组的 40%, 较 CK 组分别低 26.7%、20.0%, 但 CS 组仅略低于 CK 组。说明 CS 抗菌纸箱仅能在贮藏前期 (0~3 d) 抑制番茄的腐烂, 而在结合 1-MCP 缓释处理后, 可有效抑制整个贮藏期间腐烂率的增加, 这可能是因为 1-MCP 缓释处理能在一定程度上抑制番茄贮藏期间的软化, 从而减缓了腐烂。

2.2 不同处理对番茄贮藏期间呼吸强度的影响

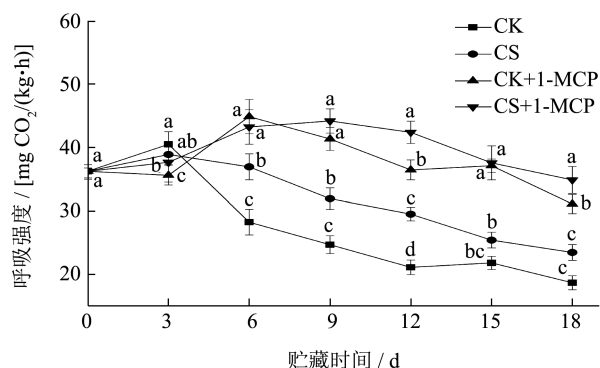


图 2 番茄贮藏期间呼吸强度的变化
Fig.2 Changes in respiration intensity of tomato during storage

新鲜果蔬采后所进行的呼吸作用是最主要的生理代谢, 可用呼吸强度衡量其值的大小, 呼吸强度的大小与变化不仅与果蔬中糖和酸为底物的氧化反应有关, 也影响着水分散失速率, 还与果实贮藏寿命有着重要的关系^[26]。由图 2 可知, 各组果实呼吸强度总体变化范围为 18~44 mg/(kg·h) 之间, 在贮藏前期呈现缓慢增加的趋势, CK 与 CS 组在贮藏第 3 天达到呼吸峰值, 且 CS 组略低于 CK 组, 而 CK+1-MCP 与 CS+1-MCP 组分别在贮藏第 6 天与第 9 天达到呼吸峰值, 这可能是因为番茄采后存在成熟作用, 而增加 1-MCP 缓释处理可在一定程度上抑制番茄的后熟作用。Dong 等^[27]研究也发现 1-MCP 处理可抑制宝石梨在贮藏前期的呼吸强度。贮藏 9 d 后, 各组番茄的呼吸强度呈现下降的趋势, 增加 1-MCP 缓释处理, 特别是 CS 抗菌纸箱结合 1-MCP

缓释组能保持贮藏后期较高的呼吸强度, 且与其他几组具有显著性差异 ($P < 0.05$)。贮藏第 18 天, CS+1-MCP 组呼吸强度为 34.92 mg/(kg·h), 较 CS 组与 CK 组分别高 32.6%、46.3%, 但该两组并无显著性差异 ($P > 0.05$)。由此说明, CS 抗菌纸箱处理可在贮藏前期保持番茄较高的呼吸活动, 增加 1-MCP 缓释处理后, 不仅可推迟呼吸高峰期的到来, 还减弱了贮藏后期的衰老。

2.3 不同处理对番茄贮藏期间颜色变化的影响

番茄属于跃变型水果, 而外观颜色的变化与番茄的成熟衰老及消费者接受程度有着重要的关系^[28,29]。由图 3a 可知, 各组处理番茄的 L^* 值, 在贮藏前期 (0~6 d) 略有增加, 这可能是番茄采后初期存在后熟的原因。CK 组在第 6 天达到最大值后逐渐下降, CS+1-MCP 组 L^* 值在第 9 天达到最大值, 贮藏第 9 天后, 各组 L^* 值均呈现整体下降的趋势, 较 CK 组相比, CS 组虽能够在一定程度上抑制贮藏后期 L^* 值的下降, 但几乎无显著性差异, 而增加 1-MCP 处理的两组番茄表现出较高的亮度值。贮藏第 18 天, CS+1-MCP 组番茄的 L^* 值为 40.08, 较 CS、CK 组分别高 14.5%、19.6%, 且与两者具有显著性差异 ($P < 0.05$), 但较 CK+1-MCP 组差异性不显著 ($P > 0.05$)。

a^* 值表示红绿值, 其中正值代表红色, 其值越大说明果实红色保持越好。由图 3b 可以看出, 各组 a^* 值在贮藏前期略有增加, 而在贮藏后期整体逐渐下降。贮藏 0~6 d, 相比于 CK 组, 三个处理组均能抑制 a^* 的上升, 但仅 CS+1-MCP 处理在两个时间点与 CK 组均有显著性差异 ($P < 0.05$)。贮藏第 6 天后, CK 组 a^* 值开始下降, 而三个处理组均能在一定程度上抑制 a^* 值的下降, 除第 9 天外, 三者较 CK 组均差异显著。贮藏第 18 天, CS+1-MCP 组番茄的 a^* 值最高, 为 26.91, 分别是 CK、CS、CK+1-MCP 组的 1.61、1.34、1.25 倍。说明, CS 纸箱处理及 1-MCP 缓释处理均能保持番茄在贮藏后期较好的红色, 且两者联合处理, 增强了保持效果。由图 3c 可看出, 贮藏期间, 各组的 b^* 值均逐渐增加, 但处理组可在一定程度上抑制 b^* 值的增加, 且与 CK 组具有显著性差异 ($P < 0.05$), CS+1-MCP 组在贮藏第 15 天与第 18 天, 表现出最低值。综上所述, CS 纸箱与 1-MCP 单独处理均能通过抑制贮藏前期 L^* 值与 a^* 值的增加而延缓了番茄的转红, 这与弓德强等^[30]研究发现 1-MCP 可通过抑制番茄红素的

积累而延缓番茄转红的结果类似。但是贮藏后期, CS 纸箱处理对番茄颜色的保持基本无效, 而 1-MCP 此阶段发挥主要作用, 特别是 CS+1-MCP 缓释处理保持了番茄较好的颜色。

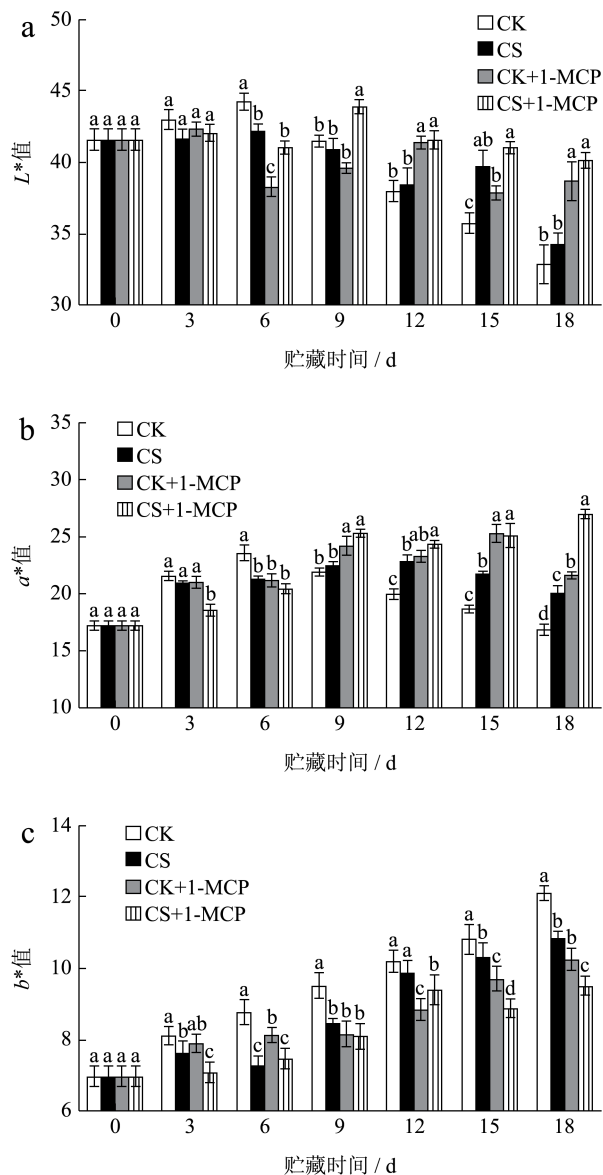


图 3 番茄贮藏期间颜色相关值的变化

Fig.3 Changes in color correlation value of tomato during storage

2.4 不同处理对番茄贮藏期间品质相关指标的影响

番茄是典型的易软化果蔬, 采后软化不仅降低了其抵御病原微生物的能力, 更直接决定其货架期。如图 4a 所示, 各组番茄的硬度在贮藏 0~18 d 内均呈现逐渐下降的趋势, 各处理组均能在一定程度上抑制硬度的下降, 但 CS 处理仅在贮藏前期 (0~6 d) 有效, 增加 1-MCP 缓释处理后, 在贮藏第 6 天后

依然能表现出较好的抑制效果, 且 CS+1-MCP 组硬度值显著高于其他几组 ($P<0.05$)。张明昊等^[31]研究发现, 1-MCP 处理抑制了早生新水梨果实带皮硬度、脆性和果肉紧实度的下降速率, 从而抑制了软化。贮藏第 18 天, CS+1-MCP 处理的番茄硬度为 0.72, 较 CS 组的 0.41, 高 43.1%, 但仅略高于 CK+1-MCP 组。说明, CS 纸箱处理相比于 CK 并不能有效抑制番茄贮藏后期的软化, 而 1-MCP 缓释处理对抑制软化起到了关键作用。

番茄果实中含有较为丰富的糖、有机酸和多种挥发性芳香物质^[32], 它们的含量高低对于果实风味具有决定性作用。由于糖类是番茄果实中含量最多的物质, 而其也是可溶性固形物最主要的成分之一, 因此可溶性固形物含量可大致衡量番茄在贮藏期间的含糖量。由图 4b 可以看出, 贮藏前 9 d, 各组番茄的可溶性固形物含量均逐渐增加, 这可能是采后成熟所致, 但是各处理组均能在一定程度上抑制可溶性固形物含量的增加。CS+1-MCP 组在贮藏第 9 天达到最大值, 较其他三组第 6 天达到最大值推迟了 3 d。贮藏 9 d 之后, 各组可溶性固形物含量表现出逐渐下降的趋势, 这可能是由于呼吸消耗所致, CK 组下降趋势最快。贮藏第 18 天时, CS+1-MCP 组可溶性固形物含量最高, 为 4.93%, 较 CK+1-MCP 组高 0.45%, 与另外两组存在显著性差异 ($P<0.05$)。

如图 4c 所示, 可滴定酸含量的变化趋势与可溶性固形物类似, 各处理均能在一定程度上抑制贮藏后期可滴定酸含量的下降, 但贮藏 12~18 d, 仅 CS+1-MCP 与 CK 组存在显著差异。

抗坏血酸又名维生素 C, 不仅是果蔬中重要的营养物质, 还与果实采后的氧化及衰老有着重要的关系^[33]。由图 4d 可知, 贮藏 0~3 d 各组番茄抗坏血酸含量略有下降, 而在 3 d 后, CK 与 CS 组抗坏血酸含量整体呈现降低的趋势, 增加 1-MCP 缓释处理的两组在贮藏前期能够保持较高的抗坏血酸含量, 且 CS+1-MCP 组在贮藏末期 (12~18 d) 的抗坏血酸含量均显著高于其他几组 ($P<0.05$)。贮藏第 18 天, CK 组抗坏血酸含量为 5.74 mg/100 g, 较 CS、CK+1-MCP、CS+1-MCP 分别低 20.9%、28.2%、57.5%, 且表现出差异显著 ($P<0.05$)。综上所述, CS 纸箱处理可在一定程度保持番茄品质相关指标的含, 但其影响小于增加 1-MCP 缓释处理, CS 纸箱结合 1-MCP 缓释处理可提高对相关指标含量的保持效果。

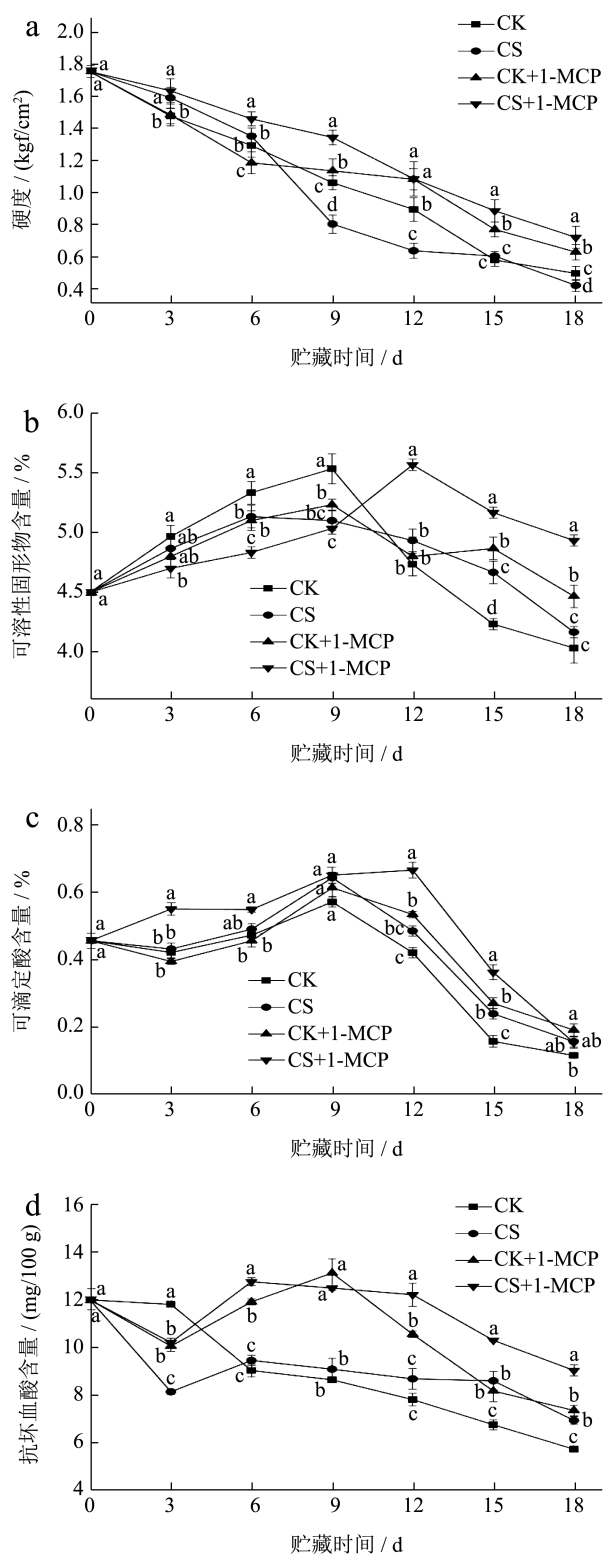


图4 番茄贮藏期间品质相关指标的变化

Fig.4 Changes in quality-related indicators of tomato during storage

2.5 不同处理对番茄贮藏期间氧化品质的影响

果蔬中存在的酚类物质与其抗氧化能力存在一定的关系。由图 5a 可见, 除 CS 组外, 其余三组的

总酚含量在贮藏前期总体呈现下降的趋势。贮藏第 9 天后, CK 与 CS 组总酚含量逐渐下降, 且 CS 处理的总酚含量在 15~18 d 低于 CK 组; 而增加 1-MCP 缓释处理的两组能够保持较高的总酚含量, 均显著高于 CK 与 CS 组 ($P < 0.05$), 且以 CS+1-MCP 处理效果最好。贮藏第 12 天, CK 组与 CS 组的总酚含量分别为 0.88、0.94 mg/g, 两者差异性不明显 ($P > 0.05$), 但较 CS+1-MCP 组的含量分别低 37.6%、21.7%。

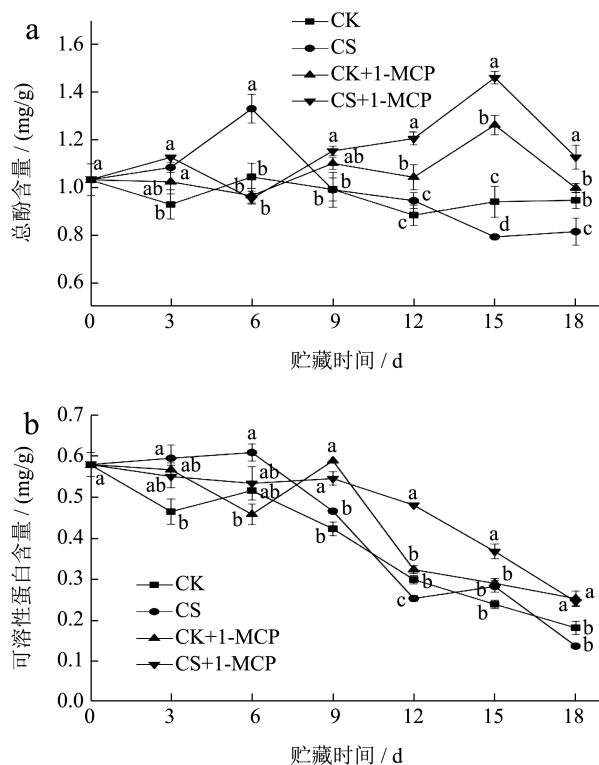


图5 番茄贮藏期间总酚与可溶性蛋白含量的变化

Fig.5 Changes in total phenolic and soluble protein content of tomato during storage

可溶性蛋白作为果蔬采后抗氧化相关酶合成的重要前体物质, 也与果蔬的抗氧化特性相关^[34]。由图 5b 可以看出, 在 0~6 d, CS 组可溶性蛋白含量略有增加, 而其余三组整体呈现波动下降趋势, 说明 CS 纸箱单独处理可在贮藏期间保持番茄中的可溶性蛋白含量。贮藏第 6 天后, 各组可溶性蛋白含量整体逐渐下降, CS 组下降速度最快, CK 组次之, 而结合 1-MCP 缓释处理的两组可在一定程度上抑制可溶性蛋白含量的下降, 但仅 CS+1-MCP 处理在 9~18 d 与上述两组存在显著性差异 ($P < 0.05$), 贮藏第 12 天, CS+1-MCP 组可溶性蛋白含量为 0.48 mg/g, 较 CK+1-MCP、CK、CS 组分别高 33.3%、39.6%、47.9%。综上, 采用 CS 纸箱处理可在贮藏前期保持

番茄较好的抗氧化特性,但随着进入到贮藏后期,该效果将被 1-MCP 的作用所取代,特别是 CS 纸箱结合 1-MCP 缓释处理,在贮藏后期表现出最好的效果。

2.6 不同处理对番茄贮藏期间丙二醛含量与细胞膜渗透率的影响

作为膜脂过氧化产物之一,丙二醛可间接反映果蔬细胞膜系统的氧化和损伤程度^[35]。由图 6a 可以看出,贮藏 0~12 d 各组番茄中的丙二醛含量均增加较为缓慢,说明该时期内所遭受的氧化损伤较小,但在贮藏第 12 天后,CK 组丙二醛含量迅速增加,而其余三组均在第 15 天后,增加速率达到最快。贮藏第 18 天,CK 组丙二醛含量为 2.26 $\mu\text{mol/kg}$,与 CS 组相比差异性不明显;而 CK+1-MCP 与 CS+1-MCP 组的丙二醛含量较 CK 组分别低 15.9%、29.2%,且两者差异显著 ($P<0.05$)。由此说明,相较于对照组,CS 纸箱不能显著抑制贮藏后期丙二醛含量的增加,但结合 1-MCP 缓释处理后,能够增强抑制作用。

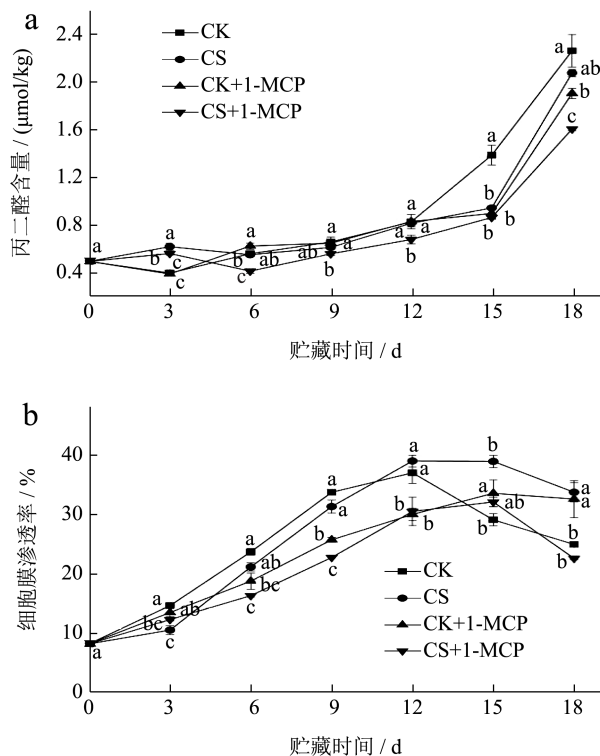


图 6 番茄贮藏期间丙二醛含量与细胞膜渗透率的变化

Fig.6 Changes in malondialdehyde content and cell membrane permeability of tomato during storage

果实采后贮藏过程中,由于不利的贮藏环境及成熟衰老,而引起细胞膜内电解质的大量渗漏,将导致细胞膜的完整性与功能丧失^[36]。如图 6b,各组细胞膜渗透率在贮藏前 12 d 均逐渐增加,其中 CK

与 CS 组在第 12 天达到峰值,而结合 1-MCP 缓释处理的两组,不仅抑制了细胞膜渗透率的增加,还将峰值出现时间推迟了 3 d,在第 15 天达到最大值。随着细胞膜内电解质的渗漏,各组番茄的细胞膜渗透率均呈现逐渐下降的趋势。贮藏第 12 天,CK 与 CS 组细胞膜渗透率分别为 37.04%、39.02%,但两者差异不显著 ($P>0.05$),而 CK+1-MCP 与 CS+1-MCP 组的细胞膜渗透率较 CS 组分别低 8.98%、8.35%,但两者并未表现出差异性。总体而言,相比于对照组,CS 纸箱仅在贮藏前期对抑制细胞膜氧化及衰老表现出一定的作用,结合 1-MCP 缓释处理后,该抑制效果在贮藏后期也能够显现。

2.7 不同处理对番茄贮藏期间抗氧化酶活性的影响

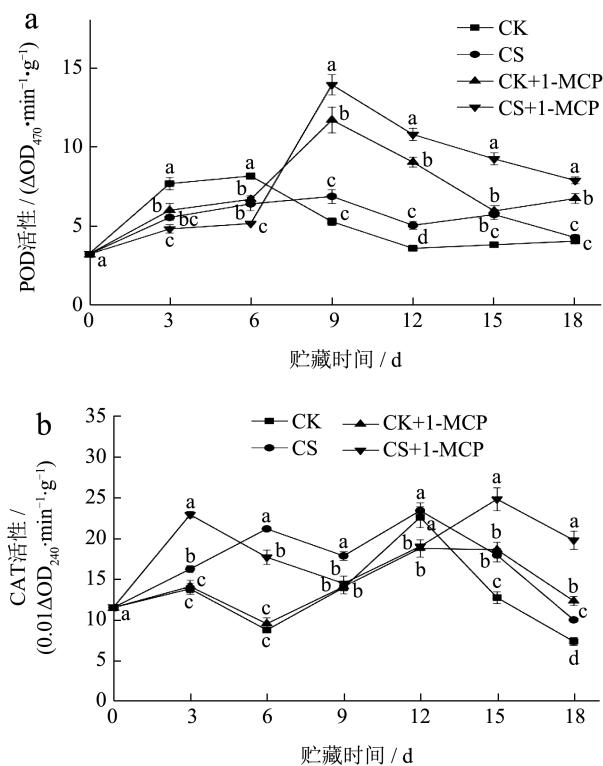


图 7 番茄贮藏期间 POD 与 CAT 活性的变化

Fig.7 Changes in POD and CAT activities of tomato during storage

果蔬体内存在 POD 与 CAT,是两种重要的抗氧化相关酶,可将膜质过氧化产生的 H_2O_2 分解,以减少对果蔬细胞的氧化损伤。由图 7a 可知,贮藏 0~6 d 各组的 POD 活性逐渐升高,CK 组在第 6 天达到活性峰值后逐渐下降,而结合 1-MCP 处理的两组均在第 9 天达到活性峰值,且显著高于 CK 与 CS 组。贮藏 6 d 后,各处理组番茄的 POD 活性均高于

CK 组, 但 CS 组与 CK 组未见明显差异, 而 CS+1-MCP 组的 POD 活性始终高于 CK+1-MCP 组, 且差异显著 ($P < 0.05$)。贮藏第 18 天, CS+1-MCP 处理的 POD 活性最高, 为 7.91 U/(min/g), 较 CK+1-MCP 组的 6.77 U/(min/g) 高 14.3%。张悦等^[37]的研究也发现, 1-MCP 结合植酸处理可以保持菠菜在贮藏后期较高的 POD 活力。

如图 7b 所示, 贮藏前 12 d, 各组番茄的 CAT 活性的呈现波动上升的趋势, 除 CS+1-MCP 组外, 其余三组均在贮藏第 12 天后活性逐渐下降, 而 CS+1-MCP 在第 15 天后呈现降低趋势, 但活性高于其余三组, 且具有显著性差异 ($P < 0.05$)。贮藏第 18 天, CS+1-MCP 处理的 CAT 活性为 19.79 U/(min/g), 分别是 CK+1-MCP、CS、CK 组的 1.61、1.97、2.69 倍。综上, CS+1-MCP 处理可通过维持抗氧化相关酶活性, 从而减缓了番茄在贮藏过程中氧化所导致的品质劣变。

3 结论

该研究结果表明, CS 抗菌纸箱可在一定程度上保持番茄贮藏期间的品质, 但其作用时效性有限, 而结合 1-MCP 缓释处理, 可有效抑制番茄贮藏期间的重量损失、腐烂及硬度下降, 同时, 保持了番茄贮藏后期呼吸强度、可滴定酸、可溶性固形物及抗坏血酸的含量。CS+1-MCP 处理相比于两者单独处理, 能够保持番茄贮藏后期较高的总酚、POD 及 CAT 活性, 并有效抑制了丙二醛含量与细胞膜渗透率的升高, 从而减缓了番茄贮藏中因氧化而导致的衰老。因此, CS 抗菌纸箱结合 1-MCP 缓释处理的方式可有效提升对番茄保鲜的效果。

参考文献

- [1] 杨钧翔, 张鹏, 曹森, 等. 不同生物保鲜剂处理对番茄采后贮藏品质及生理变化的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(23): 284-292.
- [2] LIU H R, LI Y Y, SHAO Z Y, et al. 24-Epibrassinolide regulates volatile metabolic pathways to improve tomato flavor quality during postharvest storage [J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, 205: 112516.
- [3] MARÍA L F L, JORGE M V, CRISTINA M R, et al. Postharvest quality improvement of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit using a nanomultilayer coating containing Aloe vera [J]. Foods, 2024, 13: 83.
- [4] ZHANG H L, HUANG X Y, WANG H Y, et al. Effects of harvest ripeness on storage quality of tomato fruits [J]. Emirates Journal of Food and Agriculture, 2023, 35(11): 978-987.
- [5] 韦强, 史思雨, 满杰, 等. 不同预冷温度对番茄贮藏品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2023, 23(11): 7-13.
- [6] 郝浩永, 陈莉, 张伟峰. 采后热处理对番茄保鲜效果的影响[J]. 农业与技术, 2009, 29(1): 27-30.
- [7] KIM D, THANAKKASARANEE S, LEE K, et al. Smart packaging with temperature-dependent gas permeability maintains the quality of cherry tomatoes [J]. Food Bioscience, 2021, 41: 100997.
- [8] ROSHANDEL H N, MOKABER E M, TALEGHANI A, et al. Investigation of physicochemical properties, antimicrobial and antioxidant activity of edible films based on chitosan/casein containing *Origanum vulgare* L. essential oil and its effect on quality maintenance of cherry tomato [J]. Food Chemistry, 2022, 396: 133650.
- [9] JIANG L L, WANG J B, WANG, W H, et al. Effects of three Essential oil fumigation treatments on the postharvest control of botrytis cinerea and their efficacy as preservatives of cherry tomatoes [J]. Plant Disease, 2023, 107 (6): 1874-1882.
- [10] 倪荣, 郭雪松, 韩艳霞, 等. 壳聚糖复合保鲜剂对荧光假单胞菌的抑菌活性[J]. 现代食品科技, 2023, 39(12): 178-183.
- [11] YANG L, REN L X, ZHAO Y Z, et al. Preparation and characterization of PVA/arginine chitosan/ZnO NPs composite films [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 226: 184-193.
- [12] XU D, QIN H, REN D. Prolonged preservation of tangerine fruits using chitosan/montmorillonite composite coating [J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 143: 50-57.
- [13] ZHAO J, WANG Y, LI J B, et al. Preparation of chitosan/Enoki mushroom foot polysaccharide composite cling film and its application in blueberry preservation [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 246: 125567.
- [14] 李保祥, 余易琳, 何悦, 等. 壳聚糖-纳米纤维素复合涂膜对砂糖橘贮藏保鲜效果的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(13): 185-192.
- [15] LV J Y, ZHANG J H, HAN X Z, et al. Genome wide identification of superoxide dismutase (SOD) genes and their expression profiles under 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatment during ripening of apple fruit [J]. Scientia Horticulturae, 2020, 271(1): 1-8.
- [16] HU H L, ZHAO H H, ZHANG L G, et al. The application of 1-methylcyclopropene preserves the postharvest quality of cabbage by inhibiting ethylene production, delaying chlorophyll breakdown and increasing antioxidant capacity [J]. Scientia Horticulturae, 2021, 281: 109986.
- [17] RABIA K, HADEED A, MUHAMMAD S, et al. Effect of

- 1-methylcyclopropane and modified atmosphere packaging on the storage of okra (*Abelmoschus esculentus* L.): theory and experiments [J]. Sustainability, 2020, 12(18): 7547.
- [18] 张强,代文婷,金新文.氯化钙与1-甲基环丙烯对伽师瓜果实软化与果胶酶活性及其基因表达影响[J].食品与发酵工业,2019,45(2):45-52.
- [19] 余易琳.纳米纤维素/壳聚糖复合涂膜对柑橘的保鲜效果及涂膜制备与表征[D].重庆:西南大学,2020.
- [20] 曹建康,姜微波,赵玉梅.果蔬采后生理生化实验指导[M].北京:中国轻工业出版社,2007.
- [21] ZHOU Y, HU L, CHEN Y T, et al. The combined effect of ascorbic acid and chitosan coating on postharvest quality and cell wall metabolism of papaya fruits [J]. LWT, 2022, 171: 114134.
- [22] HAROON E T, ZOU X B, LI Z H, et al. Comprehensive evaluation of antioxidant properties and volatile compounds of sudanese honeys[J]. Journal of Food Biochemistry, 2015, 39(4): 349-359.
- [23] HU H, LI P X, WANG Y N, et al. Hydrogen-rich water delays postharvest ripening and senescence of kiwifruit [J]. Food Chemistry, 2014, 156: 100-109.
- [24] ZHAO Y T, ZHU X, HOU Y Y, et al. Postharvest nitric oxide treatment delays the senescence of winter jujube (*Zizyphus jujuba* Mill. cv. Dongzao) fruit during cold storage by regulating reactive oxygen species metabolism [J]. Scientia Horticulturae, 2020, 261(C): 109009.
- [25] 杨智超,曹阳,沈超怡,等.基于高压静电场处理的樱桃番茄果实贮藏期生理品质及其代谢[J].食品科学,2021, 42(21):168-176.
- [26] ZHANG L M, LIU Z L, SUN Y, et al. Combined antioxidant and sensory effects of active chitosan/zein film containing α -tocopherol on *agaricus bisporus* [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2020, 24: 1-9.
- [27] DONG Y, WANG Y, EINHORN C T. Postharvest physiology, storage quality and physiological disorders of 'Gem' pear (*Pyrus communis* L.) treated with 1-methylcyclopropene [J]. Scientia Horticulturae, 2018, 240: 631-637.
- [28] KARTHIKEYAN V, SOMWANG L, PARAMEE N, et al. Extension of quality and shelf life of tomatoes using chitosan coating incorporated with Cinnamon oil [J]. Foods, 2024, 13(7): 1000.
- [29] LIU Y L, LIU Q Y, LI X Y, et al. Effects of postharvest chitosan and potassium sorbate coating on the storage quality and fungal community of fresh jujube [J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, 205: 112503.
- [30] 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.
- [31] 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后生理及品质的影响[J].食品与机械,2022, 38(10):127-133,209.
- [32] 郭精桐,赵圆,孙玉敬.番茄果实风味及其影响因素的研究进展[J].食品科学,2023,44(17):169-177.
- [33] ZHANG Y, WANG K, XIAO X, et al. Effect of 1-MCP on the regulation processes involved in ascorbate metabolism in kiwifruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 179: 111563.
- [34] KATARÍNA K, MÁRIA H, EUDMILA S, et al. Effects of plasma activated water on wheat: germination, growth parameters, photosynthetic pigments, soluble protein content, and antioxidant enzymes activity [J]. Plasma Processes and Polymers, 2019, 16(3): 1-14.
- [35] XIE Y T, ZHANG F, GUO F Z, et al. Postharvest application of 1-methylcyclopropene delays chloroplast degradation in *Gynura bicolor* DC under sugar scarcity conditions [J]. Scientia Horticulturae, 2022, 305: 11342.
- [36] TAO N G, FAN F, JIA L, et al. Octanal incorporated in postharvest wax of Satsuma mandarin fruit as a botanical fungicide against *Penicillium digitatum* [J]. Food Control, 2014, 45: 56-61.
- [37] 张悦,李安,潘立刚,等.1-甲基环丙烯结合植酸处理对菠菜保鲜效果的影响[J].食品科学,2023,44(1):231-238.