DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250728002
引用格式: 陈洛丞, 乔明武, 黄凯, 等. 纳米钼酸铜和纳米钼酸锂对鲜切苹果褐变及其生理指标变化的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(1): 233–238.
CHEN LC, QIAO MW, HUANG K, *et al*. Effects of nano-copper molybdate and nano-lithium molybdate on browning and physiological index changes in fresh-cut *Malus* [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(1): 233–238. (in Chinese with English abstract).

纳米钼酸铜和纳米钼酸锂对鲜切苹果褐变及其生理指标变化的影响

陈洛丞[1,2], 乔明武[1], 黄 凯[1], 赵 煦[3], 陈 云[1*], 杜兵耀[1*]

(1. 河南农业大学食品科学技术学院, 郑州 450002; 2. 湖北中澳纳米材料技术有限公司, 随州 432700; 3. 武汉轻工大学电气与电子工程学院, 武汉 430070)

摘 要: 目的 研究纳米钼酸铜和纳米钼酸锂对鲜切苹果褐变的影响。**方法** 将 3 组鲜切苹果分别浸泡于去离子水、纳米钼酸铜和纳米钼酸锂溶液中 30 min 后, 静置于空气中 0、1.5、3.0 和 6.0 h 后取样, 测定其果肉褐变和相关生理指标(总酚含量、丙二醛含量、类黄酮含量、苯丙氨酸解氨酶和多酚氧化酶活性)的变化。**结果** 纳米钼酸铜和纳米钼酸锂处理后(0~6.0 h 时间内), 鲜切苹果果肉颜色变化不明显, 而对照组苹果果肉在 1.5 h 时即呈现明显的褐化现象。与对照相比, 处理组苹果果肉的褐变程度、丙二醛含量、类黄酮含量、苯丙氨酸解氨酶和多酚氧化酶活性均明显降低。**结论** 纳米钼酸铜和纳米钼酸锂显著延缓苹果的褐化速率。该研究为纳米钼酸铜和纳米钼酸锂在鲜切水果保鲜中的应用提供理论依据。

关键词: 鲜切苹果; 纳米材料; 褐变; 酶活性; 褐变抑制

Effects of nano-copper molybdate and nano-lithium molybdate on browning and physiological index changes in fresh-cut *Malus*

CHEN Luo-Cheng[1,2], QIAO Ming-Wu[1], HUANG Kai[1], ZHAO Xu[3], CHEN Yun[1*], DU Bing-Yao[1*]

(1. *College of Food Science and Technology*, *Henan Agricultural University*, *Zhengzhou* 450002, *China*; 2. *Hubei Zhong'ao Nanomaterial Technology Company Limited*, *Suizhou* 432700, *China*; 3. *School of Electrical and Electronic Engineering*, *Wuhan Polytechnic University*, *Wuhan* 430070, *China*)

ABSTRACT: Objective To study the effects of nano-copper molybdate and nano-lithium molybdate on the browning of fresh-cut *Malus*. **Methods** The 3 groups of fresh-cut apples were immersed in deionized water, nano-copper molybdate and nano-lithium molybdate solutions for 30 minutes, respectively, and then left in the air. Samples were taken at 0, 1.5, 3.0 and 6.0 h to measure flesh browning and related physiological indicators (total

收稿日期: 2025-07-28
基金项目: 高层次人才专项支持基金项目(30501775); 河南省科技攻关项目(252102110136)
第一作者: 陈洛丞(1997—), 男, 主要研究方向为纳米材料调控食品品质。E-mail: 450668673@qq.com
***通信作者:** 陈云(1989—), 女, 博士, 实验员, 主要研究方向为食品安全与品质控制方面的研究。E-mail: sweetc0509@163.com
杜兵耀(1990—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为食品微生物安全与品质控制方面的研究。E-mail: bingyao@henau.edu.cn

phenol content, malondialdehyde content, flavonoid content, phenylalanine ammonia-lyase activity, and polyphenol oxidase activity). **Results** After treatment with nano-copper molybdate and nano-lithium molybdate (within 0 to 6.0 hours), the flesh color of fresh-cut *Malus* did not change significantly compared to that at 0 hours, while the flesh of the control group *Malus* showed obvious browning at 1.5 hours. Compared with the control group, the degree of browning, malondialdehyde content, flavonoid content, phenylalanine ammonia-lyase and polyphenol oxidase activity of the treated group *Malus* were all significantly reduced. **Conclusion** Nano-copper molybdate and nano-lithium molybdate significantly delayed the browning rate of the *Malus*. This study provides a theoretical basis for the application of nano-copper molybdate and nano-lithium molybdate in the preservation of fresh-cut fruits.

KEY WORDS: fresh-cut *Malus*; nanomaterials; browning; enzyme activity; anti-browning

0 引 言

苹果(*Malus* spp.)属于蔷薇科(Rosaceae)苹果属植物[1], 栽培历史悠久且地理分布广泛, 生态适应性显著。苹果营养价值高, 富含维生素、矿物质及生物活性成分[2], 且具有抗癌、抗衰老、抗氧化、健胃消食、养心益气等多种保健功效[3], 在鲜切加工领域应用广泛。然而, 鲜切后果肉褐变严重制约产业发展, 其核心机制在于多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)与酚类底物接触后催化氧化反应, 生成醌类聚合物并形成褐色色素[4]。研究表明, 褐变强度与 PPO 活性、总酚及类黄酮含量呈显著正相关, 且不同品种抗褐变能力差异显著(如‘岳帅’PPO 活性低, 褐变轻; ‘秋富红’PPO 活性高, 褐变严重)[4]。此外, 苯丙氨酸解氨酶(phenylalnine ammonialyase, PAL)的活性上升也共同加剧品质劣变[4–6]。

传统抑制褐变的技术包括物理方法、化学方法、协同技术等存在明显局限, 例如, 75 ℃热处理虽可抑制苹果切片 PPO, 但会破坏苹果中热敏营养素(如维生素 C)并改变其风味; 短波紫外线(ultraviolet-C, UV-C)处理虽能通过增强抗氧化系统延缓褐变, 却无法直接抑制 PPO 活性[7–8]。射频处理对冻藏桃果 PPO 活性和总酚有一定的抑制作用, 但较高温度的射频处理对丙二醛(malondialdehyde, MDA)的影响无显著差异[9]; 抗坏血酸(1%)结合柠檬酸可抑制 90%以上 PPO 活性[10], 但化学添加剂存在安全风险且适用浓度范围受限。1-甲基环丙烯(1-methylcyclopropene1-MCP)+ 紫外线 B 辐射虽能降低 PPO/POD 活性, 但设备成本高且产业化难度大[11]。鉴于消费者对健康食品需求日益增长, 未来研究应聚焦于开发绿色、天然、低成本且可持续的果实褐变抑制方法。

随着纳米技术的发展, 纳米材料在食品加工领域有着巨大的应用潜力, 已应用至加工工艺优化、包装技术创新等多个关键环节[12]。纳米材料因其独特的表面效应和量子尺寸效应, 不仅可通过吸附、结合及结构强化作用改善食品质地, 更作为功能性添加剂显著影响着产品的感官品质(口感、风味、色泽)与营养特性。在食品保鲜领域, 纳米技术已衍生出 4 大创新方向: 具备智能响应特性的抗菌包装材料、检查食品质量的生物纳米传感器、追踪健康危害的纳米传感器、食品成分或添加剂的封装或涂层[13–15]。具有抑菌效果的纳米颗粒相比较于传统抑菌剂可以更有效地抑制微生物滋生, 优化食品贮藏环境并且延长食品保质期[16]。

钼酸盐类纳米材料具有独特的优势: (1)合成方法多样且可控, 能够实现对纳米材料的精确控制, 包括水热法、微乳液法、化学沉淀法、溶胶-凝胶法等[17]。(2)具有优异的物理化学性能。包括具有高比表面积、多活性位点和高选择性, 广泛应用于催化、光电子、生物荧光标记等领域[18]。其高比表面积特性与表面活性能显著提升抑菌效能与营养物质的包封效率[15]。(3)具有低毒、缓蚀和防护性能, 钼酸盐形成的复合膜层能够有效抑制金属腐蚀[19]。有研究发现, 在智能包装领域, 纳米传感器能够实时监测食品品质变化, 而功能性纳米复合膜则能主动调节贮藏微环境[15]。

前人研究多关注纳米材料在杀菌领域的应用, 而其在延缓果实褐化方面的研究则相对较少。本研究以褐变敏感型富士苹果为研究对象, 对纳米钼酸铜和钼酸锂对鲜切苹果的褐变防护效果进行对比, 通过比较处理组和对照组果肉在处理时间内的 PPO 活性、总酚含量及类黄酮积累等与果实褐变相关的关键指标, 揭示纳米钼酸盐抑制果实褐变的生理机制, 以期为开发天然源纳米保鲜剂提供理论支撑, 有望推动鲜切果蔬采后保鲜技术向绿色、高效、可持续方向转型升级。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与仪器

红富士苹果(*Malus domestica* Borkh. *cv.* Fuji): 水果店购买的烟台红富士苹果果实, 选取大小一致、无机械损伤、成熟度基本一致的苹果果实, 清洗、晾干后备用。

纳米钼酸铜、纳米钼酸锂(杭州中钼新材料科技有限公司); 多酚氧化酶试剂盒(比色法)、PAL 测定试剂盒(分光光度法)(南京建成生物工程研究所); 植物总酚检测试剂盒(比色法)(上海源叶生物科技有限公司); 植物类黄酮含量

检测试剂盒(可见分光光度法)(北京索莱宝科技有限公司); 三氯乙酸(分析纯, 上海宏瑞化工有限公司); 硫代巴比妥酸(分析纯, 上海吉至生化科技有限公司); 无水乙醇(分析纯, 上海尚宝生物科技有限公司)。

FA2004A 电子分析天平(200 g/0.1 mg, 上海精天电子仪器厂); NR0QC 色差仪(广东三恩时科技有限公司); SYNERGYHI 酶标仪(北京质研科技有限公司); DU-730 紫外-可见分光光度计、HWS-26 电热恒温水浴锅(上海-恒科学仪器有限公司); H1650R 高速离心机(长沙湘仪离心机仪器有限公司); SHA-B 恒温震荡器(常州智博瑞仪器制造有限公司); SCIENTZ 微波光波超声波萃取仪(宁波新芝生物科技股份有限公司)。

1.2　实验材料处理方法

将去皮去果核的果肉(赤道区)切成约 1 cm×1 cm×1 cm 的正方体果丁。将切好的苹果块随机等份分成 3 组, 对照组: 去离子水浸泡; 处理组 1: 1.5%浓度的纳米钼酸铜悬浮液浸泡; 处理组 2: 1.5%浓度的纳米钼酸锂悬浮液浸泡, 每组 90 块苹果丁。浸泡 30 min 后取出, 用滤纸吸干表面残留液体后静置于空气中 0、1.5、3.0 和 6.0 h 后取样, 经液氮速冻后转移至–80 ℃冰箱保存, 用于后续测定苹果果实褐变的相关生理指标, 每个处理 3 次重复。

1.3　褐变度测量

使用高精度分光测色仪测定各处理组苹果的 L^*、a^*、b^*。鲜切苹果表面褐变度用 ΔE 表示[20]: 褐变度 $\Delta E=\sqrt{(L_t-L_0)^2+\left(a_t^*-a_0^*\right)^2+\left(b_t^*-b_0^*\right)^2}$ (t 为处理组, 0 为对照组)。

1.4　褐变相关生理指标测量

PPO 活力测定采用邻苯二酚比色法[21]; PAL 活性测量参考田兰兰[22]和杨敏等[23]方法测定; 总酚和 MDA 含量测量分别采用 Folin-酚反应法[24]和硫代巴比妥酸法测定[25]; 类黄酮含量测量采用超声波萃取法测定[26]。

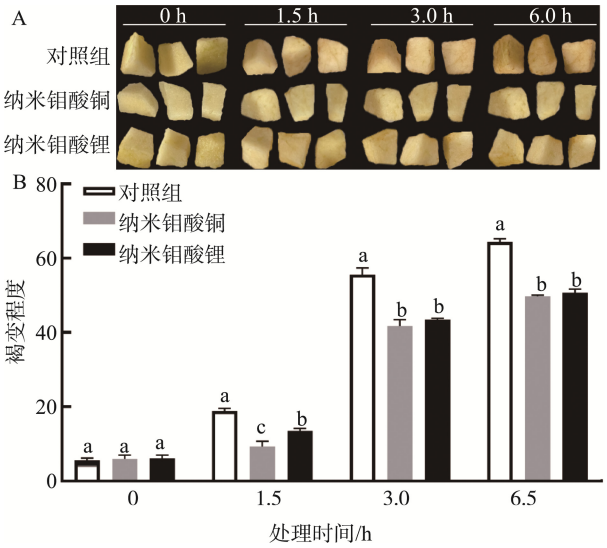
1.5　数据处理

运用科学绘图数据分析软件 GraphPad Prism 8.3 进行绘图与分析, SPSS 2016 软件对实验数据进行分析, 处理的数据均采用平均值±标准偏差表示。

2　结果与分析

2.1　不同纳米材料处理对苹果果实褐变程度的影响

图 1A 为对照组和两个处理组放置空气中不同时间后的颜色变化。由图 1A 可知, 对照组苹果切块在 1.5 h 时即呈现明显的褐化现象, 纳米钼酸铜和纳米钼酸锂处理组苹果切块在整个处理时间内褐化现象不明显。进一步对苹果切块的褐变度进行了测定, 由图 1B 可知, 对照组苹果切块的褐变度变化最为显著, 纳米钼酸铜和纳米钼酸锂处理组的褐变度变化较为缓慢, 纳米钼酸锂处理 1.5 h 时褐变度高于纳米钼酸铜处理组, 但仍明显低于对照组。这表明纳米钼酸铜和纳米钼酸锂均可以明显减缓苹果果实的褐化速度。



注: 不同小写字母表示同一处理时间下不同组之间差异显著(P<0.05), 下同。

图 1　不同处理组苹果果实褐变程度的变化

Fig.1　Comparison of browning degree of *Malus* fruits among different treatment

2.2　不同纳米材料处理对苹果果实总酚含量的影响

苹果果实中存在大量酚类等次生代谢物质, 其与果实的品质、组织褐变等密切相关[27–28]。由图 2 可知, 处理组果实中总酚含量在 0~6.0 h 时间内整体变化不大, 在 3.0~6.0 h 时间内, 对照组总酚含量呈现下降趋势, 在 6.0 h 时达到最低。以上结果表明, 纳米钼酸铜和纳米钼酸锂可能抑制了苹果果实总酚的氧化反应, 从而减缓果实的褐变速度。

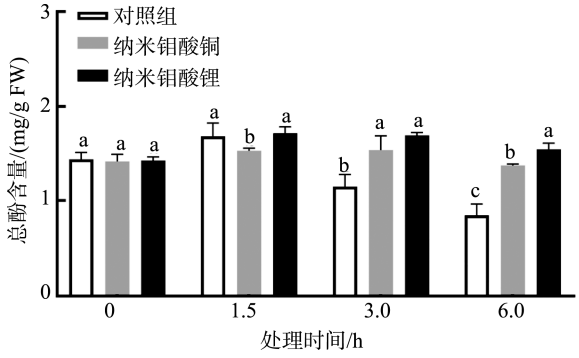


图 2　不同处理组苹果果实总酚含量的比较

Fig.2　Comparison of total polyphenols content of *Malus* fruits among different treatment

2.3 不同纳米材料处理对苹果果实 MDA 含量的影响

MDA 含量直接反映细胞膜损伤程度，与果实褐变和膜透性的改变关系密切[29]。图 3 显示，随放置时间的延长，对照组、纳米钼酸铜、纳米钼酸锂处理组苹果切块中的 MDA 含量均呈总体上升趋势，0 h 时各处理组 MDA 含量最低，分别为 1.46、1.54 和 1.59 nmol/g FW，6.0 h 时含量最高，分别为 6.56、3.42 和 3.81 nmol/g FW，且处理时间内对照组 MDA 含量均明显高于处理组。由此可见，纳米钼酸铜和纳米钼酸锂抑制了苹果果实 MDA 含量的增加，从而减缓果实的褐变速度。

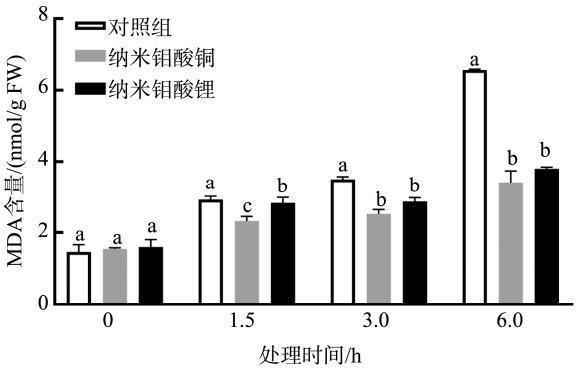


图 3 不同处理组苹果果实 MDA 含量的比较
Fig.3 Comparison of MDA content of *Malus* fruits among different treatment

2.4 不同纳米材料处理对苹果果实类黄酮含量的影响

类黄酮是一类广泛存在于果实中的酚类化合物，其含量变化与褐变进程直接相关。结果显示，类黄酮含量随着放置时间的延长，整体呈现上升趋势(图 4)。在放置前期(1.5 h)，纳米钼酸铜和纳米钼酸锂处理组类黄酮含量变化不明显，但对照组含量上升明显(图 4)。在放置 6.0 h 时，各处理组类黄酮含量最高，且对照组含量明显高于纳米钼酸铜和纳米钼酸锂处理组，分别为 1.64、0.78、1.01 mg/g FW(图 4)。由此可见，纳米钼酸铜和纳米钼酸锂减缓了苹果果实类黄酮含量的增加。

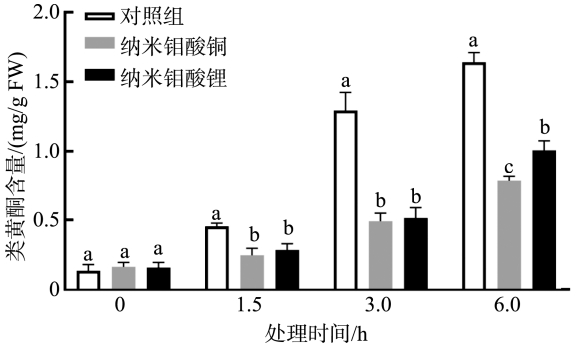


图 4 不同处理组苹果果实类黄酮含量的比较
Fig.4 Comparison of flavonoid content of *Malus* fruits among different treatment

2.5 不同纳米材料处理对苹果果实 PAL 活性的影响

PAL 是植物苯丙烷代谢途径的关键限速酶，也是酚类物质生物合成的关键酶，其活性与果肉褐变密切相关[30]。由图 5 可知，在放置时间内(0~6.0 h)，PAL 活性整体呈先上升后下降的趋势。随时间延长，0~3.0 h 时间内对照组和纳米钼酸锂 PAL 活性均上升，其中 3.0 h 时 PAL 活性最高，分别为 18.10 和 13.37 U/g FW；在放置 6 h 时，各处理组 PAL 活性较 3.0 h 时都明显降低。由此可见，纳米钼酸铜和纳米钼酸锂抑制了苹果果实 PLA 含量的增加，从而减缓果实的褐变速度。

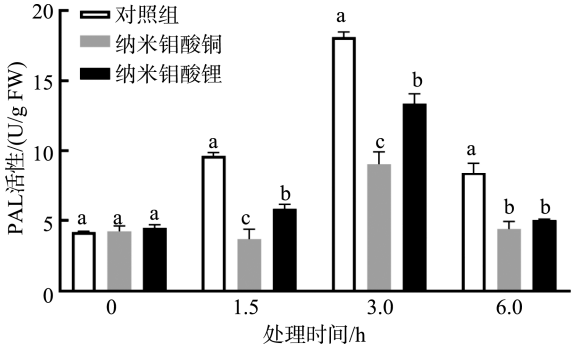


图 5 不同处理组苹果果实 PAL 活性的比较
Fig.5 Comparison of PAL activities of *Malus* fruits among different treatment

2.6 不同纳米材料处理对苹果果实 PPO 活性的影响

PPO 是果实酶促褐变过程中的关键酶之一，促进酚类物质氧化成醌类物质，从而引起果实褐变[31–32]，即 PPO 活力越高，褐变程度越严重。图 6 显示，对照组和各处理组的苹果果实 PPO 活性随放置时间的延长总体均呈上升趋势，但纳米钼酸铜和纳米钼酸锂处理组的 PPO 活性在放置时间内均低于对照组，6.0 h 时各处理的 PPO 活力分别为 4.55、1.54、2.21 U/g FW。其中对照组的 PPO 活性上升趋势最为明显，纳米钼酸铜和纳米钼酸锂处理组的 PPO 活性上升缓慢。由此可见，纳米钼酸铜可以有效降低苹果果实 PPO 的活性。

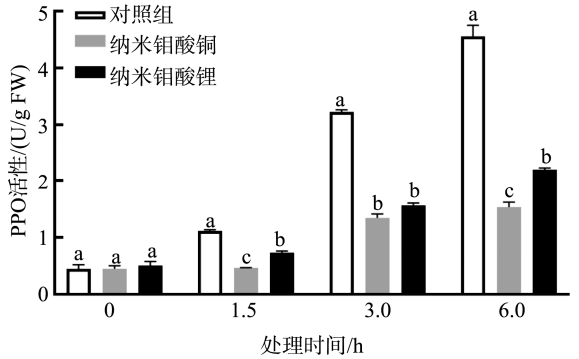


图 6 不同处理组苹果果实 PPO 活性的比较
Fig.6 Comparison of PPO activities of *Malus* fruits among different treatment

3　讨论与结论

纳米材料的独特性质使其在食品领域的应用日益广泛。部分纳米材料(如纳米纤维素等)可作为食品添加剂, 用于提升食品品质与改善加工工艺[33]; 另一些则应用于食品包装(如细菌纳米纤维素薄膜), 以缩短杀菌时间并维持食品的感官与营养特性[16]。本研究采用纳米钼酸铜和纳米钼酸锂处理鲜切苹果果肉, 探究了纳米材料对鲜切苹果褐变的抑制效果, 同时分析了其对总酚含量、PPO 活性等生理指标的影响机制。结果表明, 纳米钼酸铜和纳米钼酸锂能显著延缓鲜切苹果果实的褐变进程, 为后续研发应用于食品包装的新型纳米材料提供了理论基础。

果实褐变的核心机制在于其组织内的酚类物质在相关酶(主要是 PPO)催化下氧化为醌类物质, 进而聚合成褐色产物。国内外研究普遍认为, 果实褐变主要与酶促反应、膜脂过氧化及品种特性等因素相关[34]。刘忆东[35]研究发现, PPO 活性、总酚含量和细胞膜透性是导致果实褐变的直接因素, 并证实气调贮藏可通过有效抑制 PPO 活性来延缓褐变。CHEN 等[36]的研究也指出, 总酚含量和 PPO 活性与果实褐变度呈正相关, 均随果实褐变度的增加而增加。LINIĆ 等[27]对苹果果肉褐变的研究同样强调了总酚含量和 PPO 活性的主导作用。本研究对鲜切苹果的褐变度和各生理指标的研究发现, 对照组中类黄酮含量、MDA 含量以及 PPO 活性均随果实褐变度的增加而增加, 而经纳米钼酸铜和纳米钼酸锂处理的鲜切苹果, 其褐变程度、PAL 活性、PPO 活性、MDA 含量以及类黄酮含量在整个处理期间均维持在较低水平, 显著低于对照组, 说明纳米钼酸铜和纳米钼酸锂能够有效抑制苹果果实褐变。目前并未有研究显示纳米钼酸铜和纳米钼酸锂抑制果实褐变的机制, 但根据以往研究, 本研究推测, 钼酸盐纳米材料可能通过其高比表面积、多孔结构或特定功能基团(如金属离子)发挥抑制微生物或氧化反应的作用。主要是可能通过竞争性抑制或螯合作用(如与金属离子结合)抑制 PPO 活性[37], 还可能通过清除自由基或抑制氧化反应链式反应, 减少醌类化合物的生成[38]。此外, 钼酸盐纳米材料可能通过形成膜层或改变细胞膜稳定性, 减少酚类物质的释放或氧化[39]。最后, 尽管钼酸盐纳米材料具有一定的安全性, 但纳米材料在环境和健康方面仍存在潜在风险。例如, 纳米材料的毒性、细胞定位和细胞毒性等问题需要进一步研究。

综上所述, 纳米钼酸铜和纳米钼酸锂能够显著延缓鲜切苹果果肉褐变, 通过抑制 MDA 含量、类黄酮含量、PPO 活性以及 PAL 活性来延缓苹果果肉褐变, 为鲜切水果的保鲜提供了新思路和理论依据。后续还可以考虑将纳米材料加入保鲜膜或者包装材料中使用, 降低其残留, 拓宽其使用范围。

参考文献

[1] 袁云香. 苹果的贮藏与保鲜技术研究进展[J]. 北方园艺, 2015(4): 189–191.
YUAN YX. Research progress on storage and preservation technology of apple [J]. Northern Horticulture, 2015, (4): 189–191.

[2] 李启彭, 张福胜. 苹果营养成分及应用价值研究进展[J]. 浙江农业科学, 2017, 58(1): 132–134.
LI QM, ZHANG FS. Research progress on the nutritional components and application value of apple [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2017, 58(1): 132–134.

[3] 黄小鸿. 苹果中有效成分及其保健功效[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(8): 179–180, 187.
HUANG XH. Active components of apple and their health effects [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2019, 37(8): 179–180, 187.

[4] 郭丹, 韩英群, 魏鑫, 等. 鲜切苹果冷藏期间品质与褐变生理变化关系[J]. 河南农业科学, 2020, 49(8): 173–180.
GUO D, HAN YQ, WEI X, *et al*. Relationship between quality and browning physiological changes of fresh-cutting apples during cold storage period [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2020, 49(8): 173–180.

[5] 张海新, 宁久丽, 及华. 果实褐变研究现状及发展方向[J]. 保鲜与加工, 2010, 10(1): 7–10.
ZHANG HX, NING JL, JI H. Research status and development direction on fruit browning [J]. Storage and Process, 2010, 10(1): 7–10.

[6] 李丽梅, 关军锋, 冯云霄, 等. 采收期对‘大久保’桃贮藏期间果肉褐变的影响[J]. 食品科学, 2010, 31(8): 260–263.
LI LM, GUAN JF, FENG YX, *et al*. Effect of harvesting time on browning of ‘*Okubo*’ peach pulp during storage [J]. Food Science, 2010, 31(8): 260–263.

[7] VALDERRAMA P, MARANGONI F, CLEMENTE E. Effect of heat treatment on the activity of peroxidase (POD) and polyphenol oxidase (PPO) in apple (*Mallus comunis*) [J]. Ciência E Tecnologia De Alimentos, 2001, 21(3): 321–325.

[8] 周琪, 陈晨, 周福慧, 等. 短波紫外线控制鲜切苹果褐变与其活性氧代谢的相关性[J]. 食品科学, 2019, 40(5): 102–109.
ZHOU Q, CHEN C, ZHOU FH, *et al*. Correlation between enzymatic browning inhibition by UV-C treatment and reactive oxygen species metabolism of fresh-cut apples [J]. Food Science, 2019, 40(5): 102–109.

[9] 宣晓婷, 钟雪珍, 尚海涛, 等. 射频和热激处理对水蜜桃冻藏褐变及品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(1): 234–242.
XUAN XT, ZHONG XZ, SHANG HT, *et al*. Effects of radio frequency and heat shock treatment on the browning and quality of honey peaches during frozen storage [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(1): 234–242.

[10] 潘炘, 茅林春, 阙斐, 等. 鲜切果品保鲜技术及其生物学原理研究进展[J]. 农业工程学报, 2005, 21(6): 172–175.
PAN X, MAO LC, QUE P, *et al*. Research advance in preservation technologies and biological principles for fresh cut fruits [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(6): 172–175.

[11] LI YL, LIU S, CHEN SQ, *et al*. Physicochemical changes in fresh-cut peaches with the combined treatment of UV-B irradiation and 1-MCP [J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 184: 111755.

[12] SINGH DP, PACKIRISAMY G. Applications of nanotechnology to combat the problems associated with modern food [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(2): 479–487.

[13] PRIYANKA P, KUMAR D, YADAV A, *et al*. Nanobiotechnology and its application in agriculture and food production [M]. Nanotechnology in the Life Sciences. Cham: Springer International Publishing, 2020.

[14] COX S, SANDALL A, SMITH L, *et al*. Food additive emulsifiers: A review of their role in foods, legislation and classifications, presence in food supply, dietary exposure and safety assessment [J]. Nutrition Reviews, 2021, 79(6): 726–741.

[15] 林罕彦. 纳米包装技术在食品工业中的可持续发展研究[J]. 材料科学, 2024, 14(3): 260–268.
LIN HY. Research on sustainable development of nano-packaging technology in the food industry [J]. Material Sciences, 2024, 14(3): 260–268.

[16] 陶琦, 钟飞, 王志文, 等. 纳米材料在食品生产和保鲜中的应用[J]. 包装学报, 2024, 16(4): 89–100.
TAO Q, ZHONG F, WANG ZW, *et al*. Nanomaterials in food production and preservation applications [J]. Packaging Journal, 2024, 16(4): 89–100.

[17] LINY P, JAGADISH H, PATIL A. comprehensive review of molybdenum nanomaterials [J]. World Journal of Advanced Research and Reviews, 2024, 23(2): 1624–1632.

[18] SHIMODAIRA Y, KATO H, KOBAYASHI H, *et al*. Photophysical properties and photocatalytic activities of bismuth molybdates under visible light irradiation [J]. Journal of Physical Chemistry B, 2006, 110(36): 17790–17797.

[19] BHANVASE BA, PATEL MA, SONAWANE SH. Kinetic properties of layer-by-layer assembled cerium zinc molybdate nanocontainers during corrosion inhibition [J]. Corrosion Science, 2014, 88: 170–177.

[20] 乜兰春, 孙建设, 辛蓓, 等. 苹果果实酶促褐变底物及多酚氧化酶活性的研究[J]. 园艺学报, 2004(4): 502–504.
NIE LC, SUN JS, XIN B, *et al*. Study on the substrates of enzymatic browning and polyphenol oxidase activity in apple fruits [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2004(4): 502–504.

[21] COSETENG MY, LEE CY. Changes in apple polyphenoloxidase and polyphenol concentrations in relation to degree of browning [J]. Journal of Food Science, 1987, 52(4): 985–989.

[22] 田兰兰, 郭玉蓉, 牛鹏飞, 等. 富士苹果中多酚氧化酶特性的研究[J]. 农产品加工(学刊), 2011(3): 20–23, 39.
TIAN LL, GUO YR, NIU PF, *et al*. Characters of polyphenol oxidase in fuji apple [J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2011(3): 20–23, 39.

[23] 杨敏, 于立梅, 刘朝霞, 等. 贮藏温度对山竹果皮木质化相关酶活性和果肉腐烂的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(18): 307–311.
YANG M, YU LM, LIU ZX, *et al*. Effect of storage temperature on enzyme activities associated with peel lignification and pulp decay of mangosteen [J]. Food Science, 2013, 34(18): 307–311.

[24] 李静, 聂继云, 李海飞, 等. Folin-酚法测定水果及其制品中总多酚含量的条件[J]. 果树学报, 2008, 25(1): 126–131.
LI J, NIE JY, LI HF, *et al*. On determination conditions for total polyphenols in fruits and its derived products by Folin-phenol methods [J]. Journal of Fruit Science, 2008, 25(1): 126–131.

[25] 李明. 白花蛇舌草多糖的抗疲劳抗氧化作用研究[J]. 食品科技, 2014, 39(7): 190–193.
LI M. Anti-fatigue and antioxidation effects of *Hedyotis diffusa* polysaccharides [J]. Food Science and Technology, 2014, 39(7): 190–193.

[26] 马菁, 幸让新, 王华强, 等. 超声波萃取法提取恰玛古中类黄酮的工艺研究[J]. 保鲜与加工, 2010, 10(1): 40–44.
MA J, XING RX, WANG HQ, *et al*. Study on flavonoid extraction with ultrasonic radiation from Qiamagu [J]. Storage and Process, 2010, 10(1): 40–44.

[27] LINIĆ I, MLINARIĆ S, BRKLJAČIĆ L, *et al*. Ferulic acid and salicylic acid foliar treatments reduce short-term salt stress in Chinese cabbage by increasing phenolic compounds accumulation and photosynthetic performance [J]. Plants, 2021, 10(11): 2346.

[28] 王超. 低 O_2、高 CO_2 处理对寒富和金冠苹果采后贮藏褐变的影响[D]. 锦州: 渤海大学, 2021.
WANG C. Effects of low O_2 and high CO_2 treatment on postharvest browning of Hanfu and Golden delicious apples [D]. Jinzhou: Bohai University, 2021.

[29] 张佳俊, 曹洪波, 贾浩, 等. 桃新品系‘保佳俊’果肉抗褐化生理机制研究[J]. 食品科学, 2015, 36(18): 247–251.
ZHANG JJ, CAO HB, JIA H, *et al*. Physiological mechanism of reduced browning susceptibility in the new peach cultivar ‘Baojiajun’ [J]. Food Science, 2015, 36(18): 247–251.

[30] 陆振中, 徐莉, 王庆国. 热空气处理对中华寿桃贮藏品质的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 375–379.
LU ZZ, XU L, WANG QG. Effect of hot air treatment on postharvest quality of Zhonghuashou peach [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 375–379.

[31] 王玉萍, 饶景萍, 杨青珍, 等. 猕猴桃 3 个品种果实耐冷性差异研究[J]. 园艺学报, 2013, 40(2): 341–349.
WANG YP, RAO JP, YANG QZ, *et al*. Chilling tolerance difference among three Kiwifruit cultivars [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2013, 40(2): 341–349.

[32] ALI S, KHAN AS, MALIK AU, *et al*. Postharvest application of antibrowning chemicals modulates oxidative stress and delays pericarp browning of controlled atmosphere stored litchi fruit [J]. Journal of Food Biochemistry, 2018: e12746. DOI: 10.1111/jfbc.12746.

[33] 关桦楠, 迟振东, 孙艺铭. 纳米材料在食品添加剂和食品配料生产中的应用进展[J]. 中国食品卫生杂志, 2024, 36(5): 627–634.
GUAN HN, CHI ZD, SUN YM. Research progress on the application of nanomaterials in the production of food additives and food ingredients [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2024, 36(5): 627–634.

[34] 宋晓雪, 胡文忠, 毕阳, 等. 鲜切果蔬酶促褐变关键酶的研究进展[J]. 食品工业科技, 2013, 34(15): 390–392.
SONG XX, HU WZ, BI Y, *et al*. Research progress in key enzymes for enzymatic browning of fresh-cut fruits and vegetables [J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(15): 390–392.

[35] 刘忆东. 不同贮藏条件对中华寿桃的采后生理及贮藏效果的影响研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2006.
LIU YD. Studies on postharvest physiology and storage technology of Zhonghuashoutao peach at different storage conditions [D]. Shihezi: Shihezi University, 2006.

[36] CHEN C, JIANG A, LIU C, *et al*. Hydrogen sulfide inhibits the browning of fresh-cut apple by regulating the antioxidant, energy and lipid metabolism [J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 175: 111487.

[37] NISA A, KHAN F, SAEED A, *et al*. Controlling enzymatic browning in apples: Inhibiting polyphenol oxidases activity [J]. Advances in Food Technology Nutritional Sciences, 2023, 9(1): 25–30.

[38] 包子娴, 范晓阳, 王星华, 等. 壳寡糖防止苹果果汁褐变的机理 [J]. 食品科学, 2012, 33(19): 102–106.
BAO ZX, FAN XY, WANG XH, *et al*. Analysis of the mechanism by which oligochitosans prevent apple juice browning [J]. Food Science, 2012, 33(19): 102–106.

[39] 王济瀚, 李富军, 张新华, 等. 苹果冷藏期间果肉褐变机制及控制研究进展[J]. 果树学报, 2023, 40(3): 566–576.
WANG JH, LI FJ, ZHANG XH, *et al*. Research progress in the mechanisms of flesh browning and its prevention of apple fruit during cold storage [J]. Journal of Fruit Science, 2023, 40(3): 566–576.

(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)