

负离子处理时间对鲜切苹果贮藏品质的影响

陈煜¹ 郭赐欣¹ 高敬涛¹ 苏鹏宇¹ 唐书文¹ 谢晶^{1,2} 陈晨伟^{1,2*}

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学食品科学与工程国家级实验教学示范中心, 上海 201306)

摘要:【目的】研究负离子处理时间对鲜切苹果贮藏品质的影响。【方法】将鲜切苹果分别进行 0、40、80 min 的负离子处理, 测定其在 4 °C 贮藏条件下的呼吸速率、褐变指数、可溶性固形物和可滴定酸质量分数、相关酶活力、丙二醛(MDA)质量摩尔浓度、总酚质量分数、抗氧化能力及微生物生长情况, 评价负离子处理对鲜切苹果贮藏品质的影响。【结果】负离子处理可抑制鲜切苹果在 4 °C 贮藏条件下的微生物生长和呼吸速率, 减少营养物质损耗, 降低多酚氧化酶(PPO)与过氧化物酶(POD)活力, 提高 MDA 质量摩尔浓度、总酚质量分数和抗氧化能力, 延缓果实表面褐变, 从而改善鲜切苹果的贮藏品质。其中, 经负离子处理 80 min 的鲜切苹果贮藏品质最佳。【结论】负离子处理能够改善鲜切苹果的贮藏品质, 具有良好的应用前景。

关键词: 负离子处理; 鲜切苹果; 贮藏品质; 褐变

Effects of Negative Ion Treatment on the Preservation Quality of Fresh-cut Apples

CHEN Yu¹ GUO Cixin¹ GAO Jingtao¹ SU Pengyu¹ TANG Shuwen¹

XIE Jing^{1,2} CHEN Chenwei^{1,2*}

(1. College of Food Sciences and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. National Demonstration Center for Experimental Food Science and Technology Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the effects of negative ion treatment time on the preservation quality of fresh-cut apples. [Method] Fresh-cut apples were treated with negative ion for 0, 40, and 80 min. Under 4 °C preservation conditions, the respiration rate, browning index, mass fractions of soluble solids and titratable acids, activities of related enzymes, molality of malondialdehyde (MDA), mass fraction of total phenols, antioxidant capacity, and microbial growth of fresh-cut apples were measured. The effects of negative ion treatment on the preservation quality of fresh-cut apples were evaluated. [Result] Negative ion treatment effectively inhibited the microbial growth and respiration rate, reduced the nutrient loss and activities of polyphenol oxidase (PPO) and peroxidase (POD) activities, increased the molality of MDA, mass fraction of total phenols, and antioxidant capacity, and delayed surface browning, thereby improving the overall preservation quality of fresh-cut apples under 4 °C preservation conditions. Notably, the fresh-cut apples treated with negative ions for 80 min exhibited the best preservation quality. [Conclusion] Negative ion treatment improves the preservation quality of fresh-cut apples, demonstrating a promising application prospect.

Keywords: negative ion treatment; fresh-cut apple; preservation quality; browning

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划项目(2018YFD0400701); 上海市大学生创新创业训练计划项目(S202410264066)。

通信作者: 陈晨伟(1983—), 男, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事食品包装与保鲜研究。E-mail: cwchen@shou.edu.cn

收稿日期: 2025-04-30 修回日期: 2025-06-15

随着人们生活水平的提升与健康意识的增强,便捷性、新鲜度和营养价值已成为驱动食品消费的关键因素,推动鲜切果蔬产品逐渐走进大众生活。苹果在我国种植范围广泛、品种多样、产量高,且富含多种酚类化合物及其他营养成分^[1]。然而,去皮、切割等加工过程会造成苹果果肉细胞损伤,引发酶促褐变、组织软化、营养物质减少等问题,为腐败微生物和食源性病原体的生长创造了有利环境,进而加速了鲜切苹果的腐烂变质^[2]。为了提高其贮藏品质,需采用合适的保鲜技术。目前,已有多种保鲜技术应用于鲜切苹果的保鲜,主要包括化学方法(如抗氧化剂)^[3]、生物方法(如动植物提取物、微生物及其衍生物)^[4]、物理方法(如热处理)^[5]。化学保鲜作为传统保鲜技术,具有成本低、效果好等优势,但近年来由其引发的食品安全问题日益增多,引起了消费者的顾虑与担忧;生物保鲜成分天然、来源广泛,相较于化学保鲜技术更加安全可靠,但存在成本较高、规模化生产技术不够成熟等问题,有待进一步研究与完善;物理保鲜则具有绿色环保、安全可靠且成本相对较低的特点,有利于规模化推广。

负离子(negative ions, NI)是空气中携带负电荷的化学组分,其分子构型主要包括氧基($\text{O}^-/\text{O}^{2-}/\text{O}^{3-}$)、碳酸盐基($\text{CO}^{3-}/\text{CO}^{4-}$)、硝酸盐基($\text{NO}^{3-}/\text{NO}^{2-}$)及羟基($\text{OH}^-/\text{HCO}^{3-}$)等带电微粒。这类带电粒子可使悬浮物中带正电的污染物凝聚并沉淀,从而达到空气净化的效果。目前,关于负离子的研究主要集中在杀菌、抑菌领域,而在果蔬保鲜中的应用研究相对较少^[6]。负离子具有较强的抑菌活性,其主要抑菌机制是通过产生臭氧及活性物质影响细胞生长代谢,进而抑制细菌活性^[7]。有研究表明,负离子对荧光假单胞菌和大肠杆菌具有抑制作用,与柠檬草油联合使用时,可使大肠杆菌在8 h内死亡^[8-10]。Tuffi等^[11]研究发现,负离子处理草莓和番茄能减少果实表面灰霉菌和青霉菌的污染。郑瑜等^[12]研究表明,负离子处理可延缓菠菜黄化、氧化衰老及营养物质分解,抑制细菌的生长繁殖,从而维持菠菜较好的贮藏品质。尽管如此,负离子处理在其他鲜切果蔬保鲜领域的应用研究仍较为匮乏。

本研究以鲜切苹果为研究对象,在前期试验的基础上,探究不同负离子处理时间(0、40、80 min)对鲜切苹果呼吸速率、褐变指数、可溶性固形物和可滴定酸质量分数、相关酶活力、MDA质量摩尔浓度、总酚质量分数、抗氧化能力及微生物生长情况的影响,为负离子在鲜切苹果保鲜中的应用提供理论参考和实践依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

陕西‘红富士’苹果(*Malus pumila* Mill.):淘宝平台农户,当天采摘;2,2-二苯基-1-苦基肼(DPPH)、氢氧化钠、氯化钡、氯化钠:上海麦克林生化科技股份有限公司;草酸:上海源叶生物科技有限公司;酚酞:天津市北辰方正试剂厂;孟加拉红琼脂、平板计数琼脂:海博生物技术有限公司;PPO活性检测试剂盒、植物总酚含量检测试剂盒、MDA检测试剂盒:北京索莱宝科技有限公司;POD活性检测试剂盒、抗坏血酸检测试剂盒:南京建成生物工程研究所有限公司。

1.2 仪器与设备

负离子保鲜箱:课题组自制;电子天平:HC-C型,慈溪市华徐衡器实业有限公司;台式分光测色仪:YS6002型,深圳市三恩时科技有限公司;手持式数字折光仪:HT113ATC型,禹城市田园信科光学仪器有限公司;紫外-可见分光光度计:SP-756P型,上海光谱仪器有限公司;灭菌锅:LX-B50L型,合肥华泰医疗设备有限公司;恒温培养箱:DHP-9052N型,上海慧泰仪器制造有限公司。

1.3 方法

1.3.1 样品处理

挑选大小均匀、品相完好、色泽接近的新鲜苹果,单个质量约220 g。将苹果清洗干净后,用消毒后的削皮刀去皮、去核,并切成8等份块状,随后放入负离子保鲜箱(60 cm×40 cm×40 cm)中分别处理0、40、80 min(对应组别分别标记为NI-0、NI-40和NI-80),处理环境温度5℃、相对湿度50%。负离子处理时间是在前期试验的基础上确定的,前期试验发现,处理时间超过80 min的苹果会产生褐变现象。处理完成后,分别采用聚乙烯塑料袋(20 cm×28 cm)密封包装各组样品,置于

(4 ± 1) °C 冰箱冷藏。参考鲜切苹果相关研究^[5,13], 整个贮藏周期为 12 d, 每 3 d 取出一次样品, 测定各项指标。

1.3.2 微生物的测定

菌落总数参照 GB 4789.2—2022 进行测定, 霉菌总数参照 GB 4789.15—2016 进行测定。

1.3.3 呼吸速率的测定

呼吸速率参照郑瑜等^[12]的方法进行测定。

1.3.4 可溶性固形物和可滴定酸的测定

可溶性固形物质量分数采用手持式数字折光仪进行测定。可滴定酸质量分数参照马璐璐等^[14]的方法进行测定。

1.3.5 PPO 和 POD 活力的测定

PPO、POD 活力均采用相应试剂盒进行测定。

1.3.6 MDA 质量摩尔浓度的测定

MDA 质量摩尔浓度采用 MDA 检测试剂盒进行测定。

1.3.7 抗坏血酸质量分数的测定

抗坏血酸质量分数采用试剂盒进行测定。

1.3.8 总酚质量分数和抗氧化能力的测定

总酚质量分数采用试剂盒进行测定。参照宁豫昌等^[15]的方法测定 DPPH 自由基清除能力。

1.3.9 褐变指数的测定

褐变指数参照宾宇淇等^[5]的方法进行测定。

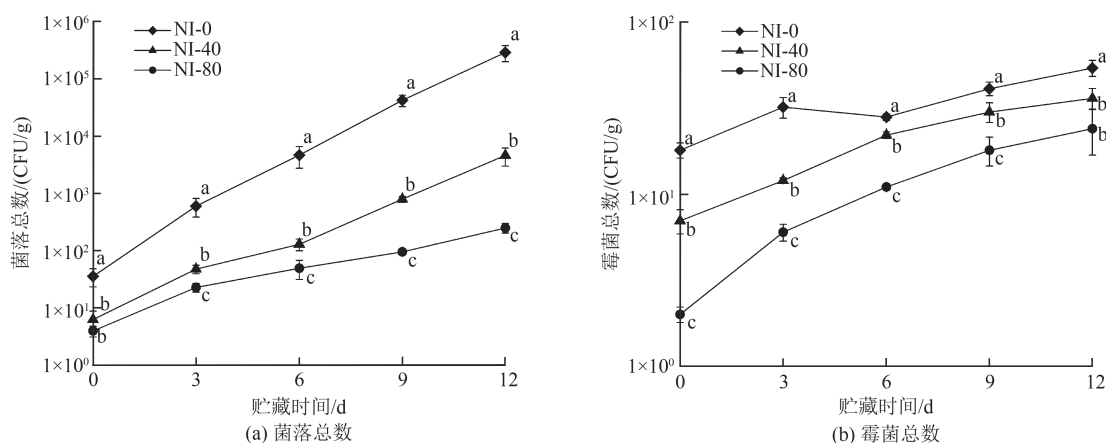
1.4 数据处理与分析

使用 SPSS 27.0 统计软件进行数据处理, Duncan 检验用于分析显著性差异, $P<0.05$ 表示差异显著。采用 Pearson 系数进行相关性分析, 并使用 Origin 2024 软件作图。

2 结果与讨论

2.1 负离子处理时间对鲜切苹果微生物的影响

微生物是反映食品品质的重要指标。鲜切加工过程会造成苹果果肉细胞损伤, 为腐败微生物和食源性病原体的生长创造有利环境。不同负离子处理时间对鲜切苹果菌落总数和霉菌总数的影响见图 1。负离子处理组样品的初始菌落总数和霉菌总数显著低于 NI-0 ($P<0.05$), 且 NI-80 样品的初始菌落总数和霉菌总数低于 NI-40 样品, 这表明负离子具有杀菌效果, 可显著降低鲜切苹果表面的细菌和霉菌数量。其原因主要是负离子产生的静电场环境能够使鲜切苹果表面的微生物因电穿孔而死亡^[8]; 同时, 负离子产生的臭氧及活性物质可影响微生物细胞代谢, 从而更好地抑制其生长繁殖^[7]。贮藏期间, 所有组别样品的菌落总数和霉菌总数均随贮藏时间的延长而增加, 但负离子处理组样品的菌落总数和霉菌总数均显著低于同一贮藏时间的 NI-0 样品, 且 NI-80 样品始终最低。这主要与样品经负离子处理后初始微生物数量相对较低有关。当贮藏至 12 d 时, NI-0 样品的菌落总数和霉菌总数分别为 2.9×10^5 、 5.4×10^1 CFU/g, 而 NI-80 样品的菌落总数和霉菌总数分别为 2.5×10^2 、 2.4×10^1 CFU/g。新鲜果蔬制品本身含有一定数量的菌群, 目前我国未制定统一的菌落数量检测标准, 仅对果蔬制品的致病菌限量作出规定。参考相关鲜切果蔬研究^[16], 菌落总数推荐限量为 1×10^5 CFU/g。本研究的 NI-0 样品中菌落总数超



相同贮藏时间不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

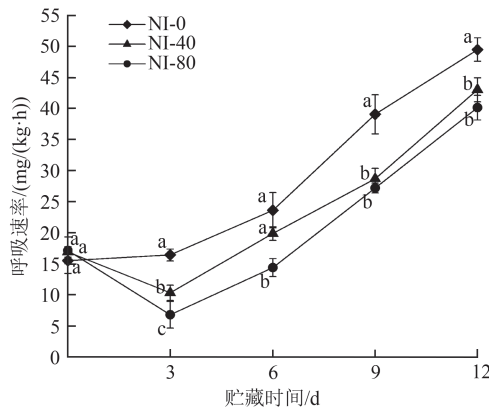
图 1 不同处理组鲜切苹果菌落总数和霉菌总数变化

Fig. 1 Changes in bacterial count and mold count of fresh-cut apples in different treatment groups

过 1×10^5 CFU/g, 而负离子处理组均未超过该限值, 表明负离子处理后的鲜切苹果可安全食用。

2.2 负离子处理时间对鲜切苹果呼吸速率的影响

负离子处理时间对鲜切苹果组织细胞呼吸速率的影响见图2。贮藏前3 d, NI-0样品的呼吸速率略有上升, 而负离子处理组的呼吸速率有所下降, 这可能是由于密封环境中 CO_2 浓度升高、 O_2 浓度降低, 从而抑制了苹果的呼吸作用^[17]。贮藏3 d后, 所有组别样品的呼吸速率均呈上升趋势, 主要是由于当苹果受到切割等非生物胁迫时, 会诱导果肉组织产生相关应激反应, 进而加剧呼吸作用^[2]。在整个贮藏期间, 同一贮藏时间下负离子处理组样品的呼吸速率均低于对照组样品, 且呼吸速率随负离子处理时间的延长而降低。贮藏至12 d时, 与NI-0样品相比, NI-80样品的呼吸速率降低了18.9%。这主要是因为负离子的杀菌作用降低了果肉表面的初始微生物数量; 同时, 负离子可能通过钝化相关呼吸酶的活性, 抑制鲜切苹果的呼吸强度^[18]。



相同贮藏时间不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图2 不同处理组鲜切苹果呼吸速率变化

Fig. 2 Changes in respiration rate of fresh-cut apples in different treatment groups

2.3 负离子处理时间对鲜切苹果可溶性固形物和可滴定酸质量分数的影响

果蔬中的糖类、有机酸等可溶性固形物是衡量果蔬营养物质含量、成熟度和口感等的重要指标^[19]。如图3(a)所示, 随着贮藏时间的延长, 所有组别样品的可溶性固形物质量分数总体均呈下降趋势, 这是因为鲜切苹果的呼吸作用持续消耗营养物质, 进而导致可溶性固形物质量分数降低。贮藏至12 d时, 负离子处理组样品的可溶性固形

物质量分数显著高于NI-0样品; NI-80样品的可溶性固形物质量分数高于NI-40样品, 这主要是由于负离子处理可抑制细胞代谢活性和呼吸强度, 从而延缓了营养物质的消耗。

不同负离子处理时间对鲜切苹果可滴定酸质量分数的影响见图3(b)。在整个贮藏期内, 鲜切苹果的可滴定酸质量分数总体呈小幅下降趋势。苹果的可滴定酸质量分数与有机酸质量分数直接相关, 而有机酸通常在果实发育阶段积累, 在三羧酸循环中作为呼吸底物被消耗, 在果实成熟过程中又作为糖异生底物被利用, 因此其质量分数在贮藏过程中缓慢降低^[20]。贮藏前6 d, 负离子处理组样品的可滴定酸质量分数总体高于NI-0样品; 贮藏至12 d时, 所有组别样品的可滴定酸质量分数无显著差异。这可能是因为在贮藏初期, 负离子处理抑制了鲜切苹果的代谢活性和呼吸速率, 使负离子处理组样品的可滴定酸质量分数下降缓慢; 而贮藏后期, 苹果自身苹果酸的合成导致各组可滴定酸质量分数趋于相近水平^[20]。

2.4 负离子处理时间对鲜切苹果PPO、POD活力的影响

PPO和POD是介导酶促褐变的2种主要的酚代谢酶, 均能利用 O_2 氧化酚类物质^[21]。负离子处理时间对鲜切苹果PPO活力的影响见图4(a)。在整个贮藏期内, 所有组别样品的PPO活力均呈先上升后下降的趋势, 并于第6天达到峰值。在组织细胞中, PPO主要以游离态存在于细胞质或相关细胞器中, 鲜切加工过程会使PPO活力逐渐升高, 从而保护细胞组织^[22]; 随后, PPO在与酚类底物的反应中不断被消耗, 其活力缓慢下降。经负离子处理后, 处理组样品的PPO活力显著低于NI-0样品, 其中NI-80样品在贮藏第6天时PPO活力较NI-0样品下降了24.4%, 表明负离子处理可有效抑制鲜切苹果的PPO活力, 且抑制程度随处理时间的延长而显著增强。这主要是由于鲜切苹果切面暴露于负离子环境中, 促使苹果切面的酶蛋白发生变性, 导致更多PPO降解, 进而降低了负离子处理后鲜切苹果的PPO活力^[13]。

POD可清除植物体内过量的自由基, 维持膜系统及果肉组织正常代谢^[23]。负离子处理时间对鲜切苹果POD活力的影响见图4(b)。在整个贮

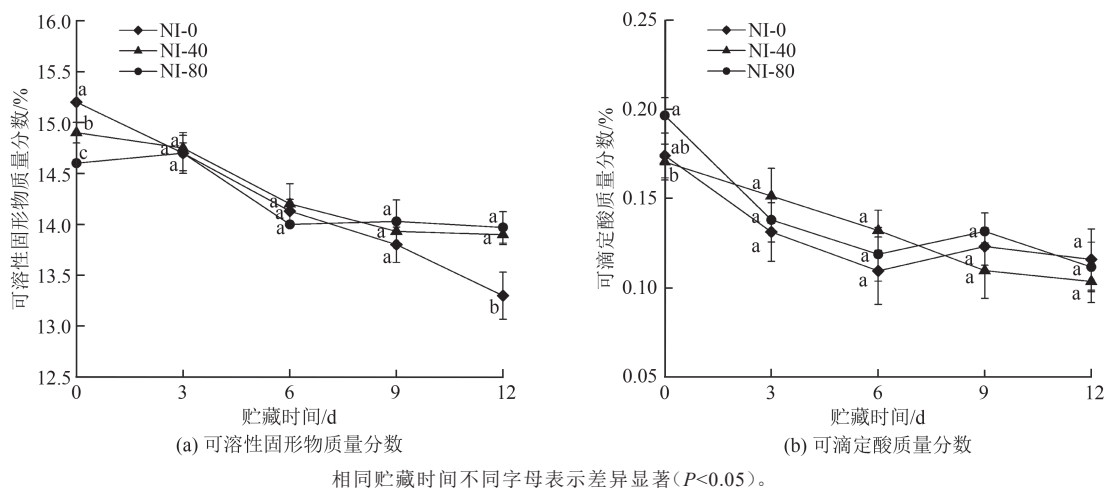


图 3 不同处理组鲜切苹果可溶性固形物和可滴定酸质量分数变化

Fig. 3 Changes in mass fractions of total soluble solids and titratable acids of fresh-cut apples in different treatment groups

藏期内,所有组别样品的 POD 活力总体均呈上升趋势,这主要归因于果肉细胞中缓解活性氧(ROS)膜脂过氧化的调节机制^[24]。与 PPO 活力变化一致,负离子处理组样品的 POD 活力显著低于 NI-0 样品,且 NI-80 样品对 POD 活力的抑制效果

优于 NI-40 样品。POD 可利用 H_2O_2 释放出的 O_2 氧化酚类物质,进而促进氧化褐变,而负离子处理能抑制 POD 活力的上升,延缓酚类物质的氧化进程。目前,负离子处理对相关酶的具体影响机制尚不明确,有待进一步研究。

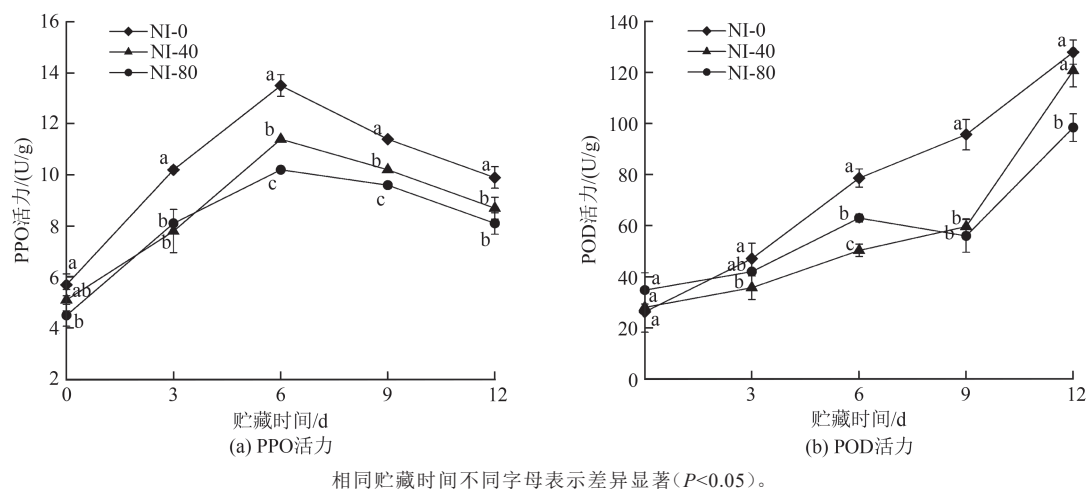


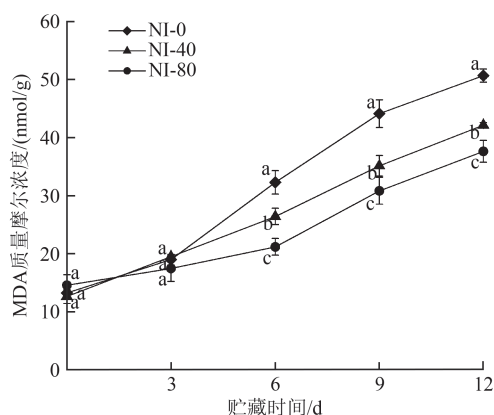
图 4 不同处理组鲜切苹果 PPO、POD 活力变化

Fig. 4 Changes in PPO and POD activities of fresh-cut apples in different treatment groups

2.5 负离子处理时间对鲜切苹果 MDA 质量摩尔浓度的影响

MDA 作为细胞膜脂过氧化产物,可用于表征细胞膜损伤程度及果蔬衰老进程。鲜切加工造成的组织损伤会诱导 ROS 大量积累,加速膜脂氧化,进而引发果肉细胞氧化损伤^[23]。由图 5 可知,贮藏期内所有组别的 MDA 质量摩尔浓度均呈上升趋势。这是由于鲜切处理加快了果肉组织的呼吸

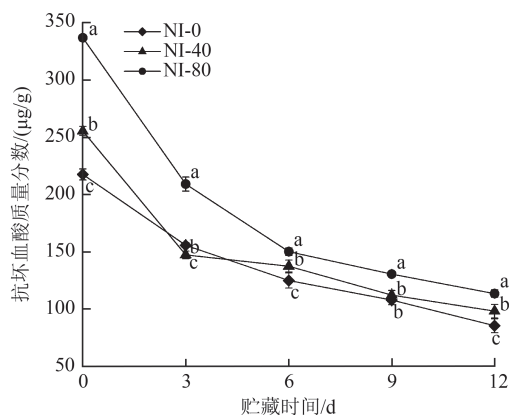
速率和营养物质的消耗速率,从而产生大量 ROS,过量 ROS 会进一步加剧膜脂过氧化反应,最终造成细胞膜氧化损伤^[25]。随着贮藏时间的延长,负离子处理组样品的 MDA 质量摩尔浓度上升速率明显减慢,且负离子处理时间越长,MDA 质量摩尔浓度越低。结果表明,负离子处理可有效缓解鲜切苹果的膜脂过氧化损伤,延缓其衰老进程。这可能是由于负离子抑制了鲜切苹果的呼吸作



相同贮藏时间不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图5 不同处理组鲜切苹果MDA质量摩尔浓度变化

Fig. 5 Changes in molality of MDA of fresh-cut apples in different treatment groups



相同贮藏时间不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图6 不同处理组鲜切苹果抗坏血酸质量分数变化

Fig. 6 Changes in mass fraction of ascorbic acid of fresh-cut apples in different treatment groups

用,同时负离子自身具有抗氧化作用,可清除体内过量自由基,并维持细胞膜结构与功能完整性^[26]。

2.6 负离子处理时间对鲜切苹果抗坏血酸质量分数的影响

抗坏血酸是果蔬中重要的抗氧化物质,能够增强苹果的抗逆能力^[27]。负离子处理时间对鲜切苹果抗坏血酸质量分数的影响见图6。在整个贮藏期内,各组样品的抗坏血酸质量分数均呈下降趋势。这主要是由于鲜切苹果暴露于空气中,抗坏血酸发生氧化分解,进而造成其质量分数下降。随着贮藏时间的延长,与NI-0相比,负离子处理组样品的抗坏血酸质量分数显著降低。这可能是由于负离子处理能够抑制鲜切苹果的呼吸速率,减少水分散失,从而减缓抗坏血酸的氧化分解,维持鲜切苹果的品质。

2.7 负离子处理时间对鲜切苹果总酚质量分数和抗氧化能力的影响

苹果中的多酚类物质是重要的抗氧化成分,可通过清除植物体内的自由基延缓其衰老。苹果在鲜切加工过程中受到的机械损伤会诱导其在切面快速合成酚类物质,从而维持鲜切苹果自身的抗氧化能力^[28]。负离子处理时间对鲜切苹果总酚质量分数的影响见图7(a)。各组样品总酚质量分数在贮藏前3 d均快速下降,贮藏6 d后下降速率减缓,整体呈波动变化趋势。这可能是由于在贮藏初期,果肉切面与空气接触,大量多

酚类物质被氧化,导致苹果抗氧化能力减弱;随着贮藏时间的延长,组织内ROS不断积累,可诱导果肉合成多酚类物质以清除过量ROS^[29]。贮藏第3天时,NI-0样品的总酚质量分数为2.81 mg/g,而NI-40和NI-80样品相较于NI-0样品分别提升了4.98%和14.23%。结果表明,负离子处理可有效抑制鲜切苹果中酚类物质的氧化分解。这可能是由于负离子自身具备抗氧化能力,能够清除自由基,从而缓解细胞氧化损伤^[26]。

负离子处理时间对鲜切苹果DPPH自由基清除率的影响见图7(b)。在贮藏期内,各组样品的DPPH自由基清除率均呈下降趋势。鲜切处理后苹果切面直接暴露于空气中,发生氧化反应,致使抗氧化能力降低。负离子处理组样品的DPPH自由基清除能力显著高于NI-0样品,且处理时间越长,DPPH自由基清除率下降趋势越平缓。综上,负离子处理能够延缓鲜切苹果DPPH自由基清除能力的降低。一方面,负离子可直接发挥抗氧化作用,清除自由基、抑制ROS积累,从而增强果实抗氧化能力,延缓细胞损伤与衰老进程;另一方面,负离子可减缓总酚质量分数的下降,进而维持果实的抗氧化能力。

2.8 负离子处理时间对鲜切苹果褐变指数的影响

负离子处理时间对鲜切苹果褐变指数的影响见图8。在贮藏期间,各组样品的苹果褐变指数均呈逐渐上升趋势。鲜切处理破坏了果肉组织结构,空气中的氧气快速进入受损的果肉细胞

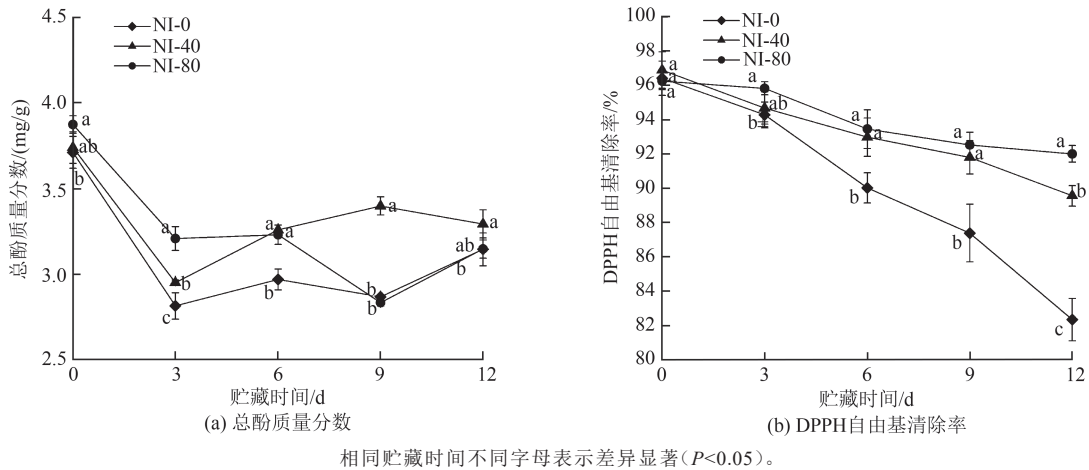
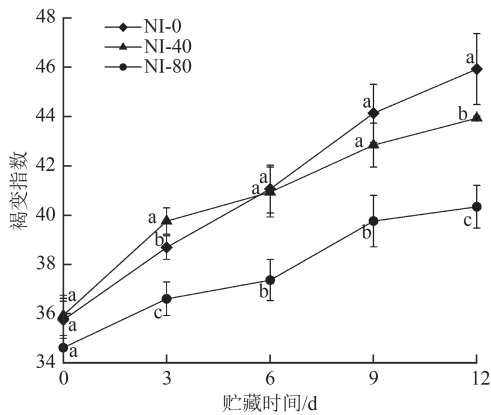


图 7 不同处理组鲜切苹果总酚质量分数和 DPPH 自由基清除率变化

Fig. 7 Changes in mass fraction of total phenols and DPPH free radical scavenging rate of fresh-cut apples in different treatment groups



相同贮藏时间不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 8 不同处理组鲜切苹果褐变指数变化

Fig. 8 Changes in browning index of fresh-cut apples in different treatment groups

中,破坏酚酶区域化分布,促使醌类物质大量生成并进一步氧化聚合为黑色素,引发酶促褐变^[30]。贮藏第 12 天时,NI-0、NI-40、NI-80 样品的褐变指数分别为 45.93、43.93、40.34,表明负离子处理抑制了鲜切苹果贮藏期间的褐变,且处理时间越长,抑制褐变的效果越显著。已有研究表明,PPO、POD 等介导的酶促反应是引发鲜切苹果褐变的主要原因^[2]。2 种负离子处理均可在贮藏期间抑制 PPO、POD 活力,进而减缓鲜切苹果的褐变进程。

负离子处理时间对贮藏过程中鲜切苹果的外观影响见图 9。鲜切苹果的色泽变化与褐变指数变化规律一致。鲜切苹果在第 0 天时呈淡黄色,贮

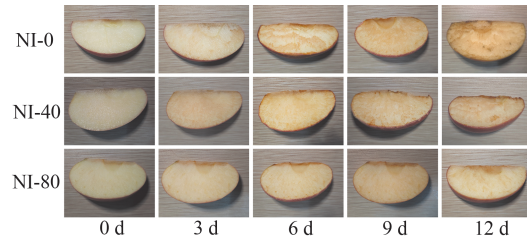


图 9 不同处理组鲜切苹果外观变化

Fig. 9 Changes in appearance of fresh-cut apples in different treatment groups

藏 12 d 后各组均发生了不同程度的褐变;相较于 NI-0 样品,负离子处理组的褐变程度明显减轻。从外观图片可直观看出,贮藏第 12 天时 NI-80 样品的褐变程度最轻。

2.9 相关性分析

鲜切苹果各指标间的相关性分析结果见表 1。鲜切苹果的 DPPH 自由基清除率与抗坏血酸质量分数呈极显著正相关 ($P < 0.01$),与 MDA 质量摩尔浓度呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。表明鲜切苹果的非酶抗氧化能力与抗坏血酸质量分数及细胞膜损伤程度密切相关。此外,鲜切苹果在贮藏期间的褐变指数与 DPPH 自由基清除率呈极显著负相关 ($P < 0.01$),与 MDA 质量摩尔浓度、PPO 活力、POD 活力呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。

2.10 负离子处理改善鲜切苹果贮藏品质的作用机制

负离子处理改善鲜切苹果贮藏品质的作用机制见图 10。综合上述研究结果,负离子处理改善

表1 鲜切苹果各指标间的相关性分析

Table 1 Correlation analysis of indexes of fresh-cut apples

	褐变指数	DPPH 自由基清除率	PPO 活力	POD 活力	MDA 质量摩尔浓度	抗坏血酸质量分数	总酚质量分数
褐变指数	1.000	-0.909**	0.648**	0.837**	0.942**	-0.868**	-0.526*
DPPH 自由基清除率		1.000	-0.589*	-0.900**	-0.939**	0.738**	0.450
PPO 活力			1.000	0.469	0.567*	-0.765**	-0.743**
POD 活力				1.000	0.935**	-0.721**	-0.376
MDA 质量摩尔浓度					1.000	-0.802**	-0.455
抗坏血酸质量分数						1.000	0.725**
总酚质量分数							1.000

注：“*”表示显著相关($P<0.05$)；“**”表示极显著相关($P<0.01$)。

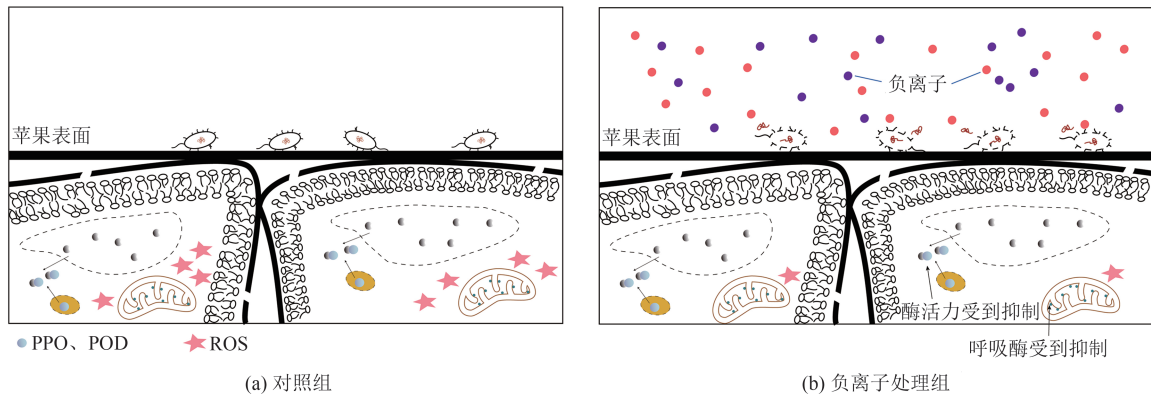


图10 负离子处理改善鲜切苹果贮藏品质的作用机制

Fig. 10 Improving mechanism of negative ion treatment for the preservation quality of fresh-cut apples

鲜切苹果贮藏品质的作用机制可归纳为4个方面。

1) 杀菌作用：负离子可形成静电场环境，引发微生物细胞膜发生电穿孔，且负离子产生的臭氧可以氧化微生物细胞膜(壁)结构中的大分子聚合物(脂质、蛋白质和多糖)及细胞内的DNA、RNA和关键酶，造成细胞内容物外泄，破坏微生物增殖体系，进而实现杀菌作用^[31]。经负离子处理的鲜切苹果初始菌落总数和霉菌总数均显著低于对照组。2) 调控呼吸代谢：负离子通过抑制或钝化呼吸相关酶活性，减弱鲜切苹果呼吸强度。3) 调控关键酶：负离子通过降低鲜切苹果PPO、POD活力，减少酚类物质氧化为醌类物质，进而有效抑制酶促褐变。目前关于负离子处理对相关酶的影响机制仍不清楚，有待后续进一步研究。4) 清除自由基：负离子通过清除自由基，减少ROS累积，从而延缓苹果抗氧化能力的降低。

3 结论

不同负离子处理时间均可有效抑制鲜切苹果

在贮藏过程中的呼吸强度、表面褐变、营养物质损耗及微生物生长繁殖，减轻丙二醛对细胞膜的损伤，增强果实抗氧化能力，进而改善其贮藏品质，且贮藏品质随负离子处理时间的延长而提升。其中，经负离子处理80 min的鲜切苹果贮藏品质最佳。综上，负离子处理可显著提高鲜切苹果的贮藏品质，作为一种简单、保鲜效果优良的技术手段，具有广阔的应用前景，可进一步拓展其在其他果蔬保鲜中的应用研究；同时，也需加强负离子对果蔬保鲜作用的分子机制研究，以期为其规模化应用提供理论支撑。

参考文献

- [1] FANG T, CHEN J, LIN Q, et al. Phenolic profiling reveals the metabolite basis of flesh colour and fresh-cut browning in apple fruit[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(4): 2257-2266.
 - [2] 王斌, 林薇, 袁晓. 鲜切果蔬褐变机理及防控技术研究进展[J]. 食品科学, 2025, 46(7): 367-384.
- WANG B, LIN W, YUAN X. Research progress in

- mechanism and preventive technologies for the browning of fresh-cut fruits and vegetables[J]. Food Science, 2025, 46(7):367-384. (in Chinese)
- [3] FANG T, YAO J, DUAN Y Q, et al. Phytic acid treatment inhibits browning and lignification to promote the quality of fresh-cut apples during storage[J]. Foods, 2022, 11(10):1470.
- [4] BIN Y Q, TIAN M X, XIE J N, et al. Bamboo leaf extract treatment alleviates the surface browning of fresh-cut apple by regulating membrane lipid metabolism and antioxidant properties [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2024, 104(5):2888-2896.
- [5] 宾宇洪, 石立佳, 谢佳妮, 等. 鲜切前后热空气处理对‘红富士’苹果的保鲜效果[J]. 食品科学, 2023, 44(17): 118-126.
- BIN Y Q, SHI L J, XIE J N, et al. Effect of hot air treatment before or after minimal processing on the preservation of fresh-cut ‘red fuji’ apples [J]. Food Science, 2023, 44(17):118-126. (in Chinese)
- [6] ZHANG S L, FANG X J, WU W J, et al. Effects of negative air ions treatment on the quality of fresh shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) during storage [J]. Food Chemistry, 2022, 371:131200.
- [7] TYAGI A K, MALIK A, GOTTARDI D, et al. Essential oil vapour and negative air ions: a novel tool for food preservation[J]. Trends in Food Science & Technology, 2012, 26(2):99-113.
- [8] TYAGI A K, NIRALA B K, MALIK A, et al. The effect of negative air ion exposure on *Escherichia coli* and *Pseudomonas fluorescens* [J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 2008, 43(7):694-699.
- [9] TYAGI A K, MALIK A. Bactericidal action of lemon grass oil vapors and negative air ions[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2012, 13:169-177.
- [10] TYAGI A K, MALIK A. Antimicrobial action of essential oil vapours and negative air ions against *Pseudomonas fluorescens* [J]. International Journal of Food Microbiology, 2010, 143(3):205-210.
- [11] TUFFI R, LOVINO R, CANESE S, et al. Effects of exposure to gaseous ozone and negative air ions on control of epiphytic flora and the development of *Botrytis cinerea* and *Penicillium expansum* during cold storage of strawberries and tomatoes [J]. Italian Journal of Food Science, 2012, 24(2):102-114.
- [12] 郑瑜, 陈煜, 郭赐欣, 等. 负离子处理对菠菜贮藏品质的影响研究[J]. 包装工程, 2024, 45(11):96-104.
- ZHENG Y, CHEN Y, GUO C X, et al. Effect of negative ion treatment on storage quality of *Spinacia oleracea* L. [J]. Packaging Engineering, 2024, 45(11):96-104. (in Chinese)
- [13] PERINBAN S, ORSAT V, RAGHAVAN V. Influence of plasma activated water treatment on enzyme activity and quality of fresh-cut apples [J]. Food Chemistry, 2022, 393:133421.
- [14] 马璐璐, 杨成, 张建, 等. 番茄不同成熟时期品质变化及可利用性研究[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(2): 58-66.
- MA L L, YANG C, ZHANG J, et al. Study on quality characteristics and processing availability of immature tomatoes in different ripening stages [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(2):58-66. (in Chinese)
- [15] 宁豫昌, 高俊杰, 袁艺萌. 复合酶处理对刺梨、苹果混合发酵果汁的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(8):87-94.
- NING Y C, GAO J J, YUAN Y M. Effect of compound enzyme treatment on mixed fermented juice of *Rosa roxburghii* Tratt. and *Malus pumila* Mill. [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(8):87-94. (in Chinese)
- [16] 李玉梅, 程建新, 葛霞, 等. 弱酸性电解水用于提升鲜切马铃薯安全品质的研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(1):197-205.
- LI Y M, CHENG J X, GE X, et al. Study on improving the safety quality of fresh-cut potatoes with weak acid electrolytic water [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(1):197-205. (in Chinese)
- [17] ZHANG Y T, ZHANG J H, ZHANG Y Y, et al. Effects of in-package atmospheric cold plasma treatment on the qualitative, metabolic and microbial stability of fresh-cut pears [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101(11):4473-4480.
- [18] 王亚东. 果蔬产品采后呼吸作用与贮运保鲜研究[J]. 园艺与种苗, 2022, 42(2):58-59.
- WANG Y D. Postharvest respiration and storage of fruit and vegetable products [J]. Horticulture & Seed, 2022, 42(2):58-59. (in Chinese)
- [19] KUMAR P, SETHI S, VARGHESE E. Hurdle approach for enhancing storage life of minimally processed apple slices using active modified atmosphere packaging [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2023, 46(1):8.
- [20] LIU R L, WANG Y Y, QIN G Z, et al. Molecular basis of

- 1-methylcyclopropene regulating organic acid metabolism in apple fruit during storage[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 117: 57-63.
- [21] 黄欣莹, 姚卫蓉. 蜂蜜对苹果酶促褐变的抑制及有效成分分析[J]. *食品与生物技术学报*, 2024, 43(2): 55-62.
- HUANG X Y, YAO W R. Inhibition on apple enzymatic browning by honey and analysis of its effective components [J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2024, 43(2): 55-62. (in Chinese)
- [22] 于淑坤, 王金晶, 罗进, 等. 普鲁兰多糖涂膜对鲜切苹果品质的影响[J]. *安徽农业科学*, 2023, 51(17): 150-153, 157.
- YU S K, WANG J J, LUO J, et al. Effect of pullulan coating on the quality of fresh-cut apple[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2023, 51(17): 150-153, 157. (in Chinese)
- [23] LI Y, HAN L X, WANG B B, et al. Dynamic degradation of penconazole and its effect on antioxidant enzyme activity and malondialdehyde content in apple fruit[J]. *Scientia Horticulturae*, 2022, 300: 111053.
- [24] 吕静祎, 丁思杨, 张俊虎, 等. ‘金冠’和‘富士’苹果采后活性氧相关代谢差异比较[J]. *食品科学*, 2021, 42(15): 194-199.
- LYU J Y, DING S Y, ZHANG J H, et al. Comparison of reactive oxygen species (ROS) metabolism between ‘Golden Delicious’ and ‘Fuji’ apple fruit after harvest [J]. *Food Science*, 2021, 42(15): 194-199. (in Chinese)
- [25] TANG S W, XU Z Y, CHEN C W, et al. Effect of different postharvest pre-cooling treatments on quality of water bamboo shoots (*Zizania latifolia*) during refrigerated storage[J]. *Plants*, 2024, 13(20): 2856.
- [26] 胡晓敏. 乳酸钙浸渍和短波紫外光照射对鲜切猕猴桃品质及抗氧化活性的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2022.
- [27] ZHU J J, ZHU D Q, WANG L, et al. Effects of compression damage on mechanical behavior and quality attributes of apple fruit [J]. *Food Science and Technology Research*, 2022, 28(1): 53-65.
- [28] FENG S H, YI J Y, LI X, et al. Systematic review of phenolic compounds in apple fruits: compositions, distribution, absorption, metabolism, and processing stability[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69(1): 7-27.
- [29] 刘琪, 赵雨晴, 陈丽萍, 等. 低温等离子体技术在食品安全及营养领域的应用[J]. *食品与生物技术学报*, 2025, 44(3): 1-10.
- LIU Q, ZHAO Y Q, CHEN L P, et al. Application of cold plasma technology in the filed of food safety and nutrition [J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2025, 44(3): 1-10. (in Chinese)
- [30] ARNOLD M, GRAMZA-MICHAŁOWSKA A. Enzymatic browning in apple products and its inhibition treatments: a comprehensive review[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2022, 21(6): 5038-5076.
- [31] LIN X X, ZHANG W X, XIONG J, et al. Polarized electric field induced by piezoelectric effect of ozone micro-nano bubbles/spontaneously polarized ceramic to boost ozonolysis for efficient fruit sterilization[J]. *Food Chemistry*, 2025, 466: 142191.