

DOI: 10.12161/j.issn.1005-6521.2025.05.001

1-MCP 结合 ClO_2 处理对水蜜桃保鲜效果的影响

郝浩然^{1,2,3}, 刘思含^{1,2,3}, 周宏胜^{1,2,3}, 凌军^{1,2,3}, 李鹏霞^{1,2,3,4}, 郭正兵⁵, 程顺昌^{1*}, 张映瞳^{1,2,3*}

(1. 沈阳农业大学 食品学院, 辽宁 沈阳 110866; 2. 江苏省农业科学院农业设施与装备研究所, 江苏 南京 210014; 3. 江苏省农业科学院农业农村部农产品冷链物流技术重点实验室, 江苏 南京 210014; 4. 江苏省高效园艺作物遗传改良重点实验室, 江苏 南京 210014; 5. 江苏农林职业技术学院, 江苏 句容 212400)

摘要: 为探究室温条件下 1-甲基环丙烯(1-methylcyclopropene, 1-MCP)结合二氧化氯(chlorine dioxide, ClO_2)对水蜜桃的保鲜效果,以‘中桃九号’水蜜桃为试验材料,分别进行 ClO_2 、1-MCP、1-MCP+ ClO_2 处理,以蒸馏水处理的水蜜桃为对照,观察其在贮藏期间的品质和生理指标的变化情况。结果表明,1-MCP 或 ClO_2 单独处理以及两者结合处理都能有效减少微生物的滋生,降低果实的腐烂率。同时,各处理能够明显降低果实的呼吸强度,抑制乙烯的生成和丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量的上升,延缓可溶性固形物和可滴定酸含量的下降,但结合处理效果更佳。在维持果实硬度方面, ClO_2 处理的效果弱于 1-MCP 处理。此外,1-MCP 和 ClO_2 处理均能保持较高的抗氧化物质含量和抗氧化酶活性,增强对 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基和羟基自由基的清除能力,两者结合后效果进一步提升。综上,1-MCP 结合 ClO_2 处理不仅可针对性解决桃采收后贮藏中突出的呼吸旺盛和易腐烂问题,还能明显提升水蜜桃的贮藏保鲜品质。

关键词: 1-甲基环丙烯; 二氧化氯; 水蜜桃; 品质; 保鲜

Effects of Combined Treatment of 1-Methylcyclopropene and Chlorine Dioxide on Preservation Effects of Peach

HAO Haoran^{1,2,3}, LIU Sihan^{1,2,3}, ZHOU Hongsheng^{1,2,3}, LING Jun^{1,2,3}, LI Pengxia^{1,2,3,4},
GUO Zhengbing⁵, CHENG Shunchang^{1*}, ZHANG Yingtong^{1,2,3*}

(1. Food Science College, Shenyang Agriculture University, Shenyang 110886, Liaoning, China; 2. Institute of Agricultural Facilities and Equipment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, Jiangsu, China; 3. Key Laboratory of Cold Chain Logistics Technology for Agro-product, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, Jiangsu, China; 4. Jiangsu Key Laboratory for Horticultural Crop Genetic Improvement, Nanjing 210014, Jiangsu, China; 5. Jiangsu Vocational College of Agriculture and Forestry, Jurong 212400, Jiangsu, China)

Abstract: To investigate the preservation effect of 1-methylcyclopropene (1-MCP) combined with chlorine dioxide (ClO_2) on peaches at room temperature, peaches 'Zhongtao No.9' were treated with ClO_2 , 1-MCP, and 1-MCP + ClO_2 , respectively. Peaches treated with distilled water served as the control to monitor quality and physiological changes during storage. The results indicated that both independent 1-MCP and ClO_2 treatments, as well as the combined treatment of 1-MCP and ClO_2 effectively reduced fruit decay rates and inhibited microbial proliferation. At the same time, each treatment could significantly reduce the respiration intensity of fruit, inhibit the production of ethylene and the increase in malondialdehyde (MDA) content, and delay the decrease in soluble solid and titratable acid content, but the combined treatment was better. ClO_2 treatment performed poorly than 1-MCP treatment in maintaining fruit firmness. In addition, both 1-MCP and ClO_2 treatments maintained high antioxidant content and activity of antioxidant enzymes and enhanced the scavenging

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2100601); 国家自然科学基金项目(32302176); 江苏省自然科学基金项目(BK20221434); 江苏省青蓝工程优秀教学团队

作者简介: 郝浩然(2000—), 女(汉), 硕士研究生, 研究方向: 果蔬保鲜。

*通信作者: 程顺昌(1978—), 男(汉), 副教授, 博士, 研究方向: 果蔬贮藏保鲜与采后生物学; 张映瞳(1988—), 女(汉), 助理研究员, 博士, 研究方向: 果蔬贮藏保鲜。

rates of 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) and hydroxyl radicals. The effect was further improved by combined treatment of 1-MCP and ClO_2 . In summary, combined treatment of 1-MCP and ClO_2 could solve the outstanding problems of vigorous respiration and perishability in postharvest storage of peaches and significantly improve the storage and preservation quality of peaches.

Key words: 1-methylcyclopropene; chlorine dioxide; peach; quality; preservation

引文格式:

郝浩然,刘思含,周宏胜,等. 1-MCP 结合 ClO_2 处理对水蜜桃保鲜效果的影响[J]. 食品研究与开发,2025,46(5):1-9.

HAO Haoran, LIU Sihan, ZHOU Hongsheng, et al. Effects of Combined Treatment of 1-Methylcyclopropene and Chlorine Dioxide on Preservation Effects of Peach[J]. Food Research and Development, 2025, 46(5): 1-9.

水蜜桃属蔷薇科桃属植物,浆汁丰富,果肉柔软,富含葡萄糖、果糖、维生素 C 等营养成分,广受消费者喜爱。然而,桃作为呼吸跃变型果实,后熟期很短,且对乙烯敏感,内源乙烯的生成加快了桃的成熟,果肉很快变软^[1],易受机械损伤。而且桃主要在高温夏季成熟,损伤处易受微生物侵染发生腐烂变质,很大程度上限制了桃的保鲜期。因此,寻找合理的保鲜技术延长桃果实的贮藏期迫在眉睫。目前,水蜜桃采后保鲜技术主要包括低温贮藏保鲜^[2]、涂膜保鲜^[3]和气调保鲜^[4]等,但存在保鲜技术成本高、易发生冷害、存在安全性和抑菌效果不明显等缺点。

1-甲基环丙烯(1-methylcyclopropene, 1-MCP)是一种乙烯竞争性抑制剂,与乙烯受体不可逆的结合,进而减少乙烯的生成,达到延缓果蔬成熟衰老的目的^[5]。1-MCP 处理在蓝莓^[6]、娃娃菜^[7]和冬枣^[8]等多种果蔬中具有良好的保鲜效果。二氧化氯(chlorine dioxide, ClO_2)是世界卫生组织确定的安全高效且强力无毒的杀菌剂,能够杀灭大多数的微生物,并且不产生有害代谢物,被广泛用作消毒剂和防腐剂,在新鲜肉类、鱼类等产品的包装消毒中大量应用^[9]。近些年逐渐作为保鲜剂和杀菌剂应用在水果和蔬菜中。例如,在木奶果^[10]和圣女果^[11]中,二氧化氯处理能够提高其果实的贮藏品质。Chen 等^[12]研究发现,二氧化氯处理葡萄可明显抑制微生物生长,保持葡萄的品质。相关研究表明,1-MCP 和 ClO_2 处理对果蔬有提高贮藏保鲜效果的作用,但目前有关 1-MCP 结合 ClO_2 对水蜜桃的保鲜及采后贮藏品质的影响研究鲜见。

本研究以水蜜桃为试验材料,采用 1-MCP 和 ClO_2 结合处理的技术,探索在室温下不同处理对水蜜桃贮藏品质、生理指标及抑菌防腐效果的影响,以期水蜜桃的贮藏保鲜提供理论和技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

水蜜桃品种为‘中桃九号’,采摘时七成熟,采后当

天运至江苏省农业科学院农业设施与装备研究所,挑选外观、大小一致且无机械损伤、无病虫害的桃果实作为试验材料。

二氧化氯泡腾片:山东华实药业有限公司;1-MCP:山东奥维特生物科技有限公司;酚酞、2,6-二氯靛酚、抗坏血酸、福林酚、乙醇、水杨酸:上海麦克林生化科技有限公司;三氯乙酸、硫代巴比妥酸、愈创木酚、硫酸亚铁:天津市科密欧化学试剂有限公司;磷酸二氢钾:四川西陇科学股份有限公司;1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH):上海源叶生物科技有限公司;过氧化氢:天津市大茂化学试剂有限公司。以上化学试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

PHSJ-3F pH 计:上海仪电科学仪器股份有限公司;PL202-L 电子天平:梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;UV-1102 紫外可见分光光度计:上海天美科学仪器有限公司;Centrifuge 5804R 离心机:德国艾本德公司;IKA A11 Basic 液氮研磨器:艾卡(广州)仪器设备有限公司;7820A 气相色谱仪:美国 Agilent 公司;PAL-1 糖度计:北京欧信胜科技有限公司;FT-011 硬度计:广州沪瑞明仪器有限公司;DW-HL530 超低温冰箱:苏州阿尔法生物实验器材有限公司。

1.3 试验方法

试验共设置 4 个处理组,1)对照(CK)组:空气熏蒸 12 h 后去离子水浸泡处理 5 min;2) ClO_2 处理组:空气熏蒸 12 h 后 0.5 mg/L ClO_2 溶液浸泡处理 5 min;3) 1-MCP 处理组:1-MCP 熏蒸 12 h 后去离子水浸泡处理 5 min;4) ClO_2 结合 1-MCP(结合)处理组:1-MCP 熏蒸 12 h 后 0.5 mg/L ClO_2 溶液浸泡处理 5 min。所有处理晾干结束后装袋,随后放到室内常温[(22±2) °C]条件下贮藏 8 d,每组设置 3 个生物学重复。在贮藏期间,每隔 2 d 取样,每组随机取 30 个桃子用于指标测定。用不锈钢刀片取出果肉,将组织样本置于液氮中速冻并存放在-80 °C超低温冰箱中,用于测定相关指标。

1.4 指标测定方法

1.4.1 硬度和可溶性固形物含量的测定

硬度用硬度计测定,单位为 kg/cm²。可溶性固形物含量用糖度计测定,单位为%。

1.4.2 呼吸强度和乙烯释放量的测定

参照 Zhang 等^[13]的方法测定,采用气相色谱仪测定呼吸强度和乙烯释放量,呼吸强度单位为 CO₂ mg/(kg·h),乙烯释放量单位为 μL/(kg·h)。

1.4.3 可滴定酸(titratable acid, TA)含量和维生素 C 含量的测定

可滴定酸含量和维生素 C 含量的测定参照孔方南等^[10]的方法测定。

1.4.4 丙二醛含量的测定

丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量的测定参照 Du 等^[14]的方法。

1.4.5 抗氧化物质含量及抗氧化能力的测定

总酚、类黄酮含量、DPPH 自由基和羟基自由基(hydroxyl radical, ·OH)的清除率参照安容慧等^[7]的方法测定。

1.4.6 抗氧化酶活性的测定

粗酶液的制备:称取 1 g 样品,加入 2 mL 0.1 mol/L 磷酸盐缓冲溶液(pH7.2),混匀后浸提 10 min,在 4 °C 下以 10 000 r/min 离心 15 min,收集上清液用于酶活性的测定。过氧化物酶(peroxidase, POD)活性的测定采用愈创木酚法^[15]。超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性的测定参照曹建康等^[15]的方法。

1.4.7 菌落总数的测定

参照 GB 4789.2—2022《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》^[16]中的方法测定菌落总数。

1.4.8 腐烂率的测定

记录水蜜桃腐烂果实的个数(A),水蜜桃总个数记为 B,用下列公式计算腐烂率(W,%).

$$W = \frac{A}{B} \times 100$$

1.5 数据处理

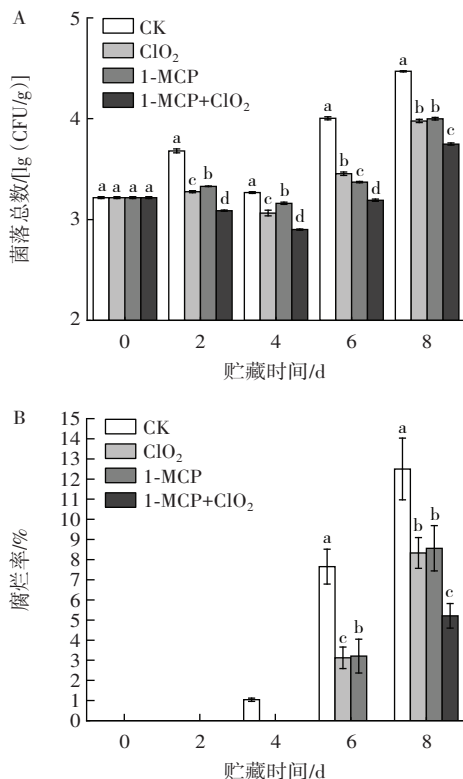
所有数据均平行测定 3 次,数据采用平均值±标准差,使用 SPSS 24.0 软件进行 Duncan 多重比较($p < 0.05$ 为差异显著),并用 Origin 2018 作图。

2 结果与分析

2.1 不同处理对水蜜桃菌落总数和腐烂率的影响

采后水蜜桃容易软化造成微生物侵染,引起腐烂变质。1-MCP 结合 ClO₂ 处理对水蜜桃菌落总数和腐烂率的影响见图 1。

如图 1A 所示,菌落总数在整个贮藏期除在第 4 天有所下降外整体呈上升趋势,其中 CK 组的菌落总数始终高于各处理组($p < 0.05$)。在两个单独处理组中,ClO₂ 处理组菌落数在贮藏前中期(0~4 d)显著低于



A. 菌落总数; B. 腐烂率。不同小写字母表示组间差异显著($p < 0.05$)。

图 1 1-MCP 结合 ClO₂ 处理对水蜜桃菌落总数和腐烂率的影响
Fig.1 Effect of combined treatment of 1-MCP and ClO₂ on aerobic plate count and rot rate of peach

1-MCP 处理组,结合处理组的抑菌效果在整个贮藏期内均显著优于单独处理组($p < 0.05$)。到贮藏结束时,结合处理组的菌落总数为 3.75 lg(CFU/g),分别比 CK 组、ClO₂ 处理组、1-MCP 处理组低 16.15%、5.76% 和 6.29%。腐败率的测定结果与菌落计数结果相符。由图 1B 可知,CK 组从第 4 天开始出现腐烂,单独处理组第 6 天出现腐烂,且 ClO₂ 处理组腐烂率显著低于 1-MCP 处理组,而结合处理组到贮藏结束才出现腐烂,腐烂率显著低于单独处理组($p < 0.05$)。

ClO₂ 由于强氧化作用可有效破坏微生物胞内含巯基相关酶,抑制蛋白质合成途径进而导致微生物死亡^[9],因此可有效减少桃表面致病菌,显著降低腐烂率。但在本试验中,1-MCP 处理后桃表面菌落总数也显著降低,在第 6 天其抑菌效果甚至优于 ClO₂,腐败率也相应降低。这可能是因为 1-MCP 可抑制乙烯释放,延缓了果实的软化和损伤,阻碍了微生物的侵染和繁殖。同时 1-MCP 可诱导桃果实苯并烷类代谢途径抗病相关物质的积累,从而提高其抗病能力^[17]。因此,1-MCP 结合 ClO₂ 可分别从提高果实抗病性和抑制微生物蛋白质合成两方面抑制微生物对桃果实的侵染、降低腐败率,效果显著优于单独处理。在唐欣影^[18]的研究中,ClO₂ 单独处理西蓝花腐败率为 8.91%,ClO₂ 结

合 1-MCP 处理则使腐烂率降低至 0%，进一步证实了两者的协同效果。

2.2 不同处理对水蜜桃果实呼吸强度、乙烯释放量和 MDA 含量的影响

1-MCP 结合 ClO_2 处理对水蜜桃呼吸强度、乙烯释放量和 MDA 含量的影响见图 2。

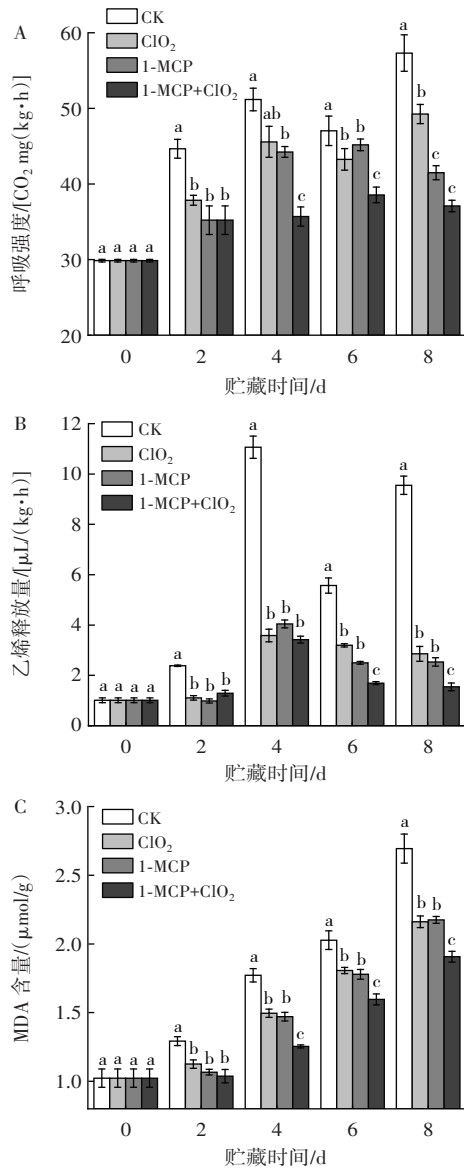


图 2 1-MCP 结合 ClO_2 处理对水蜜桃呼吸强度、乙烯释放量和 MDA 含量的影响。不同小写字母表示组间差异显著 ($p < 0.05$)。

图 2 1-MCP 结合 ClO_2 处理对水蜜桃呼吸强度、乙烯释放量和 MDA 含量的影响

Fig.2 Effect of combined treatment of 1-MCP and ClO_2 on respiratory intensity, ethylene production, and MDA content of peach

呼吸作用是采后重要的生理代谢,会使果实品质下降,加快衰老。由图 2A 可知,在贮藏第 2 天,各处理组的呼吸强度显著低于 CK 组 ($p < 0.05$),此时各处理组间无显著差异。贮藏第 4 天和第 6 天,结合处理组

显著低于两个单独处理组 ($p < 0.05$),CK 组呼吸强度最高。贮藏结束时,结合处理组的呼吸强度最低,为 $37.09 \text{ CO}_2 \text{ mg}/(\text{kg}\cdot\text{h})$, ClO_2 和 1-MCP 单独处理组显著低于 CK 组 ($p < 0.05$),分别为 CK 组的 85.92% 和 72.39%。

乙烯可以加快果实的成熟衰老,增强呼吸作用,直接影响果实的贮藏品质。如图 2B 所示,乙烯释放量除 CK 组在贮藏结束时有所上升外在整个贮藏期整体呈先上升后下降的趋势。整个贮藏期,CK 组的乙烯释放量始终显著高于各处理组 ($p < 0.05$)。在贮藏第 2 天和第 4 天,各处理组间差异不显著。第 4 天时,CK 组的乙烯释放量达到最大值,为 $11.06 \mu\text{L}/(\text{kg}\cdot\text{h})$,各处理组与 CK 组相比分别降低了 67.59%、63.44% 和 69.07%。贮藏后期 (6~8 d), ClO_2 处理组和 1-MCP 处理组的乙烯释放量开始显著高于结合处理组 ($p < 0.05$),但两组之间差异不显著。

1-MCP 可通过与乙烯受体结合阻断乙烯及其受体的正常结合,有效阻止乙烯的生成^[9],进而抑制果实后熟相关的生理代谢,降低果实的呼吸强度。 ClO_2 则能阻止蛋氨酸降解生成乙烯,并且破坏已生成的乙烯,有效降低果实的乙烯释放量。在本试验中,1-MCP 和 ClO_2 均明显抑制了桃果实的乙烯释放、降低了呼吸强度。但在贮藏前期,将两者结合后其处理效果与单独处理没有显著差异,直到中后期时结合处理组对呼吸强度和乙烯释放的抑制作用才强于单独处理组。这可能是由于贮藏前期果实的 CO_2 和乙烯释放量相对较低,1-MCP 和 ClO_2 单独处理即可有效抑制其释放;而中后期由于果实衰老软化进程加快,呼吸和乙烯释放速率加快,结合处理从两个不同方面同时作用于乙烯,因而效果更明显。在张冬梅^[9]的研究中也有类似结论:无花果果实贮藏到第 5 天对照组的呼吸速率为 $169 \text{ CO}_2 \text{ mg}/(\text{kg}\cdot\text{h})$, ClO_2 处理组比对照组降低了 10.65%,1-MCP 和 ClO_2 结合处理组比对照组降低了 14.79%,推迟了呼吸高峰的出现。

MDA 是膜脂过氧化作用的主要产物之一,MDA 积累越多,膜脂过氧化程度越高,越容易衰老。如图 2C 所示,随贮藏时间的延长,水蜜桃果实的 MDA 含量呈上升趋势。在整个贮藏期,CK 组 MDA 含量始终显著高于各处理组 ($p < 0.05$), ClO_2 、1-MCP 和结合处理均能不同程度地抑制 MDA 含量的升高。但在贮藏前期 (0~2 d),各处理组之间没有显著差异。从第 4 天开始,结合处理组的 MDA 含量显著低于单独处理组 ($p < 0.05$),但两个单独处理组之间差异不显著。贮藏结束时,CK 组的 MDA 含量达 $2.69 \mu\text{mol}/\text{g}$,分别是 ClO_2 、1-MCP 和结合处理组的 1.25、1.24 倍和 1.41 倍。这表明 1-MCP 和 ClO_2 单独处理均能抑制 MDA 含量的上升,结合处理抑制效果更明显。

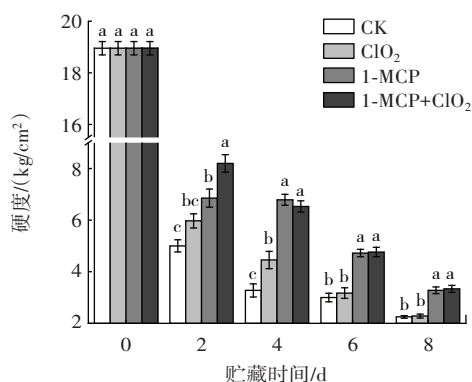
采后果蔬衰老或受环境胁迫时,活性氧会大量积累,破坏细胞膜结构,增加 MDA 的含量,加快膜脂过

氧化,进而加快果实衰老^[20]。在本试验中,1-MCP处理显著抑制了MDA含量的上升,这可能与1-MCP可以保持较低的磷脂D酶、脂酶和脂氧合酶等膜脂降解酶的活性,维持细胞膜的完整性相关^[21]。ClO₂对MDA的抑制作用则可能是因为ClO₂处理可以保持较低的细胞膜透性,维持较完整的膜结构^[20]。两者结合对MDA含量的抑制作用得到了显著提升,尽管在贮藏前期因为活性氧含量较低,结合处理与单独处理组没有显著差异。冯叙桥等^[22]在玫瑰香葡萄中的研究结果也表明,1-MCP和ClO₂单独处理明显抑制MDA含量的升高,结合处理后可进一步降低MDA含量(5.86 μmol/g),证实了1-MCP和ClO₂结合处理的协同效果。

2.3 不同处理对水蜜桃品质的影响

2.3.1 不同处理对水蜜桃硬度的影响

1-MCP结合ClO₂处理对水蜜桃硬度的影响见图3。



不同小写字母表示组间差异显著($p < 0.05$)。

图3 1-MCP结合ClO₂处理对水蜜桃硬度的影响

Fig.3 Effect of combined treatment of 1-MCP and ClO₂ on firmness of peach

硬度是反映果实保鲜效果的重要指标。水蜜桃在采后贮藏过程中,细胞壁结构发生改变,果实开始逐渐软化,硬度下降。从图3中可以看出,所有处理组硬度随贮藏时间的延长而下降,其中,CK组的硬度下降速率最快。在贮藏第2天,结合处理组的硬度显著高于其他处理组($p < 0.05$),ClO₂处理组与CK组无显著差异。到贮藏第4天,1-MCP处理组以及结合处理组硬度较高(两组间无显著差异),ClO₂处理组次之,CK组最低。贮藏后期(6~8 d),ClO₂处理组硬度与CK组水平相当,但显著低于1-MCP处理组和结合处理组(且两组之间无显著差异)。

水蜜桃在采后贮藏过程中,果实逐渐变软硬度下降,造成果实软化的原因主要有内源乙烯含量的增加以及细胞壁果胶物质发生水解^[23]。而且病原微生物可以通过释放果胶裂解酶降解细胞壁入侵机体,大量释放果胶裂解酶会加速果实的软化^[24]。有研究表明,1-MCP处理可以通过抑制多聚半乳糖醛酸酶(polygalacturonase, PG)的活性减少果胶降解,进而保持桃果

实硬度^[23],本试验结果也显示1-MCP处理能显著抑制硬度下降。第4天时,ClO₂处理组硬度显著高于CK组,一方面可能是因为ClO₂处理能够抑制细胞壁水解酶PG和纤维素酶(cellulase, Cx)的活性,进而延缓果实软化的速度^[25];另一方面可能是ClO₂处理后可以抑制微生物的滋生,减少果胶裂解酶的释放。但与1-MCP结合后的处理效果与单独1-MCP处理相比没有显著差异,说明ClO₂处理在维持果实硬度上与1-MCP相比作用微弱。

2.3.2 不同处理对水蜜桃果实可溶性固形物和可滴定酸含量的影响

1-MCP结合ClO₂处理对水蜜桃可溶性固形物和可滴定酸含量影响见图4。

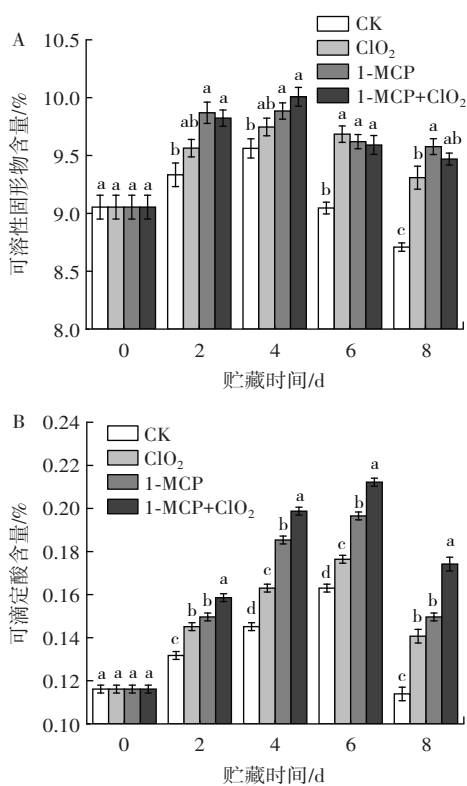


图4 A. 可溶性固形物含量; B. 可滴定酸含量。不同小写字母表示组间差异显著($p < 0.05$)。

图4 1-MCP结合ClO₂处理对水蜜桃可溶性固形物和可滴定酸含量的影响

Fig.4 Effect of combined treatment of 1-MCP and ClO₂ on total soluble solid and titratable acid contents of peach

可溶性固形物主要包括糖和酸等可溶性物质,直接影响果实的口感,是判断果实贮藏品质的重要指标。由图4A可知,所有处理组的可溶性固形物含量呈先上升后下降的趋势,在第4天达到最高值。在贮藏第2、4天,结合处理组的可溶性固形物含量与单独处理组无显著差异,但显著高于CK组($p < 0.05$);ClO₂处理组的可溶性固形物含量与CK组无显著差异。在贮藏第6天,各处理组间无明显差异,但均显著高于CK组

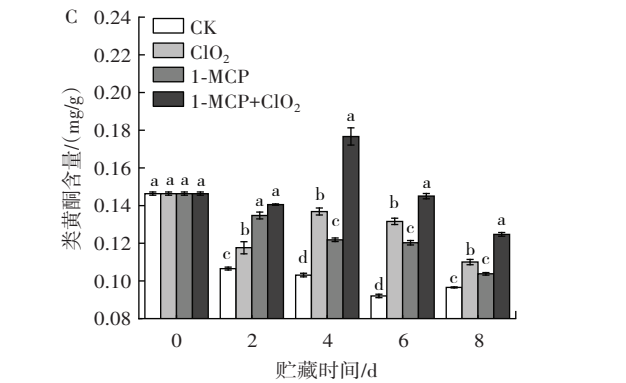
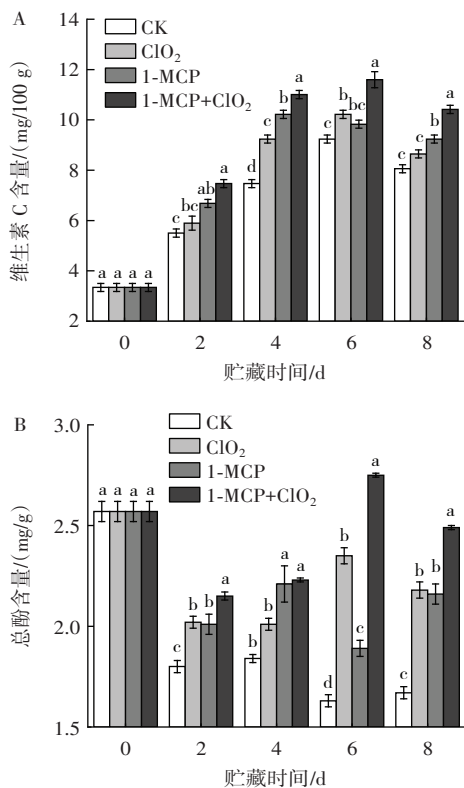
($p < 0.05$)。贮藏结束(8 d)时,各处理组的可溶性固形物含量均显著高于 CK 组,1-MCP 处理组显著高于 ClO_2 处理组($p < 0.05$),但与结合处理组无显著差异。

由图 4B 可知,与可溶性固形物含量变化趋势类似,在贮藏过程中各组水蜜桃果实的可滴定酸含量先上升后下降,CK 组在整个贮藏期可滴定酸含量均显著低于各处理组($p < 0.05$)。除第 4、6 天 1-MCP 与 ClO_2 处理组有差异显著外,在其他时间点无显著差异。结合处理组可滴定酸含量在整个贮藏期均显著高于其他处理组($p < 0.05$)。至贮藏结束时,其数值为 17.42%,是对照组的 1.53 倍。

可溶性固形物和可滴定酸含量在贮藏前期呈上升趋势,可能是因为果实的后熟作用;后期由于呼吸作用和生理代谢,营养物质消耗加快,导致含量降低^[26]。在本试验中, ClO_2 处理能延缓营养物质含量的下降,主要是因为 ClO_2 能够降低果实的呼吸强度,进而减少营养物质的消耗。1-MCP 处理也是通过抑制果实的呼吸强度来降低营养物质下降的速率。结合处理的效果与预期一致,显著优于单独处理。在吴凡等^[27]的研究中,贮藏结束时,1-MCP 处理后樱桃的可滴定酸含量下降 19.26%,结合处理组仅下降 14.08%,表明复合处理的效果更显著^[26],结果与本试验的效果类似。

2.3.3 不同处理对水蜜桃果实维生素 C、总酚和类黄酮含量的影响

1-MCP 结合 ClO_2 处理对水蜜桃维生素 C、总酚和类黄酮含量的影响见图 5。



A. 维生素 C 含量;B. 总酚含量;C. 类黄酮含量。不同小写字母表示组间差异显著($p < 0.05$)。

图 5 1-MCP 结合 ClO_2 处理对水蜜桃维生素 C、总酚和类黄酮含量的影响

Fig.5 Effect of combined treatment of 1-MCP and ClO_2 on vitamin C, total phenols, and flavonoid contents of peach

维生素 C 是桃果实中重要的营养物质。由图 5A 可知,在贮藏期间,水蜜桃果实维生素 C 含量整体呈先上升后下降的趋势,除 1-MCP 处理组在第 4 天达到最高值外,其他处理组均都在第 6 天达到最高值随后下降。在贮藏第 2 天,结合处理组的维生素 C 含量显著高于 ClO_2 处理组和 CK 组($p < 0.05$),但与 1-MCP 处理组差异不显著。到第 4 天后,结合处理组的维生素 C 含量始终显著高于其他处理组。在第 6 天, ClO_2 处理组的维生素 C 含量显著高于 CK 组($p < 0.05$),与 1-MCP 处理组差异不显著。贮藏结束时,1-MCP 处理组维生素 C 含量显著高于 ClO_2 处理组和 CK 组($p < 0.05$)。

酚类化合物是重要的次生代谢产物,反映抗氧化能力的强弱^[7]。由图 5B 可知,贮藏初期,总酚含量随贮藏时间延长降低,但在贮藏后期,总酚含量有所上升。贮藏第 4 天时,CK 组的总酚含量与 ClO_2 处理组无显著差异,结合处理组与 1-MCP 处理组也无显著差异,但在其他时间点 CK 组和结合处理组始终保持最低和最高值。在第 4 天时,1-MCP 处理组相对 ClO_2 处理组总酚含量较高,第 6 天反之,但在贮藏的第 2、8 天两组之间差异不显著。

如图 5C 所示,各处理组的类黄酮含量呈不同的变化趋势。在贮藏第 2 天,结合处理组的类黄酮含量显著高于 ClO_2 处理组($p < 0.05$),但与 1-MCP 处理组差异不显著。第 4 天以后,结合处理组的类黄酮含量显著高于单独处理组;在两单独处理组中, ClO_2 处理组的类黄酮含量显著高于 1-MCP 处理组($p < 0.05$)。除第 8 天 CK 组类黄酮含量与 1-MCP 处理组组差异不显著外,其他贮藏点均显著低于各处理组($p < 0.05$)。

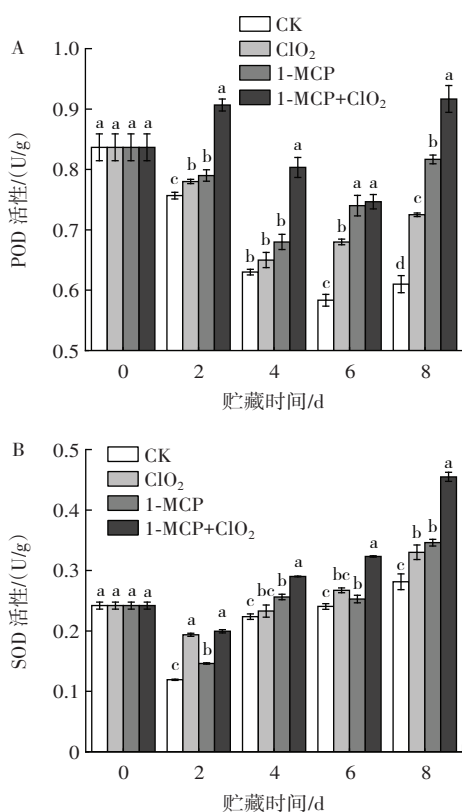
抗坏血酸、总酚和黄酮是重要的活性成分,可以清除活性氧的伤害,提高果实的抗氧化能力。试验结果表明,1-MCP 和 ClO_2 处理均可以保持抗氧化物质的含

量,可能是因为 1-MCP 和 ClO_2 都可以降低果实的呼吸强度和乙烯生成,延缓果实的成熟衰老,从而减少抗氧化成分的氧化分解和消除活性氧的消耗。而相比于单独处理,结合处理能更有效地延缓果实成熟,保持更高的抗氧化物质含量。在金童^[26]的研究中,也有类似的结果:在整个贮藏期,结合处理组冬枣的维生素 C 含量始终处于最高水平,贮藏结束时含量达 206 mg/100 g,高于 ClO_2 处理组 28.75%。另外,在个别处理组中总酚和类黄酮含量在贮藏后期有所上升,可能与贮藏后期果实衰老诱发次生代谢产物合成抵御胁迫有关^[28]。

2.4 不同处理对水蜜桃果实抗氧化能力的影响

2.4.1 不同处理对水蜜桃果实抗氧化酶活性的影响

1-MCP 结合 ClO_2 处理对水蜜桃 POD 和 SOD 活性的影响见图 6。



A. POD 活性; B. SOD 活性。不同小写字母表示组间差异显著 ($p < 0.05$)。

图 6 1-MCP 结合 ClO_2 处理对水蜜桃 POD 和 SOD 活性的影响
Fig.6 Effect of combined treatment of 1-MCP and ClO_2 on POD and SOD activities of peach

POD 可以将 H_2O_2 分解成 H_2O 和 O_2 ,使机体免受 H_2O_2 的伤害。由图 6A 可知,在整个贮藏期,单独处理组和 CK 组 POD 活性呈先下降后上升的趋势,结合处理组在第 2 天先上升随后再下降。在整个贮藏期,除第 6 天外,结合处理组的 POD 活性均显著高于单独处理组 ($p < 0.05$)。在贮藏第 2~4 天,单独处理组的 POD 活性无显著差异,到贮藏后期(6~8 d),1-MCP 处理组

显著高于 ClO_2 处理组 ($p < 0.05$)。CK 组的 POD 活性除在第 4 天与单独处理组无差异外,其他时间均显著低于处理组 ($p < 0.05$)。

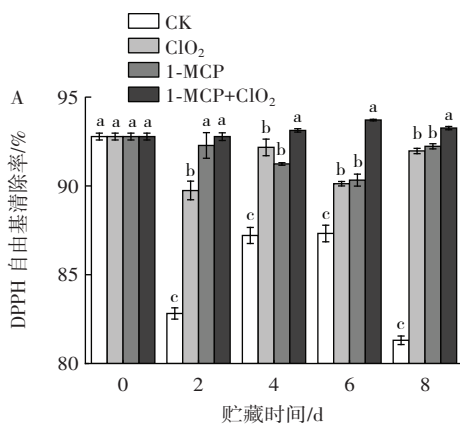
SOD 是一种含金属辅基的酶,具体作用是将 O_2 分解成 H_2O_2 和 O_2 ,进而清除超氧阴离子对果实的伤害。从图 6B 中可以看出,SOD 活性在第 2 天有所下降随后不断增强。在贮藏第 2 天,结合处理组的 SOD 活性显著高于 1-MCP 处理组 ($p < 0.05$),但与 ClO_2 处理组无显著差异。在贮藏 4~6 d,结合处理组的 SOD 活性显著高于单独处理组 ($p < 0.05$), ClO_2 处理组的 POD 活性与 CK 组差异不显著。在贮藏第 8 天,CK 组的 SOD 活性显著低于各处理组,单独 ClO_2 或 1-MCP 处理组 SOD 活性显著低于结合处理组 ($p < 0.05$),但两者之间差异不显著。此时结合处理组的 SOD 活性达到最高值 0.45 U/g,分别是 CK 组、 ClO_2 处理组和 1-MCP 处理组的 1.17、1.23、1.61 倍。上述结果表明, ClO_2 和 1-MCP 处理均能提高抗氧化酶活性,而结合处理的效果更明显。

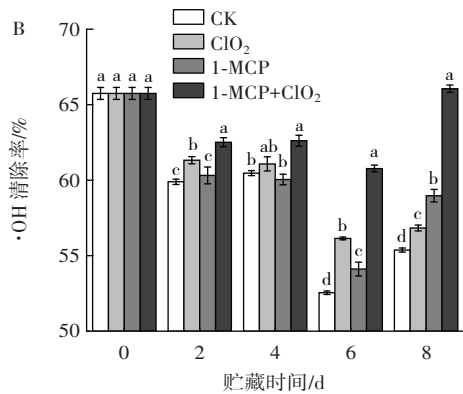
活性氧的清除通过植物的酶促和非酶促系统完成,酶促系统主要包括 POD 和 SOD 等抗氧化酶。在本试验中,1-MCP 及 ClO_2 处理均提高了果实的 POD 和 SOD 活性,但结合处理较两者单独处理能更好地维持酶活性,因此推测可能是处理后降低了细胞膜脂的过氧化程度,减少了对细胞的伤害,进而提高抗氧化酶的活性。在贮藏第 2 天, ClO_2 处理组和结合处理组的 SOD 活性无显著性差异,可能是在前期活性氧含量低,单独处理即可清除活性氧,避免氧化损伤,随着贮藏时间的延长,活性氧含量不断增加,此时 1-MCP 和 ClO_2 处理同时发挥作用,明显提高了抗氧化酶的活性,进而延缓果实衰老。

2.4.2 不同处理对水蜜桃果实自由基清除率的影响

1-MCP 结合 ClO_2 处理对水蜜桃 DPPH 自由基和羟基自由基清除率的影响见图 7。

DPPH 自由基和羟基自由基清除率是衡量果蔬抗氧化能力的重要指标。由图 7A 可知,在整个贮藏期,CK 组的 DPPH 自由基清除率均显著低于各处理





A. DPPH 自由基清除率; B. 羟基自由基清除率。不同小写字母表示组间差异显著 ($p < 0.05$)。

图7 1-MCP 结合 ClO₂ 处理对水蜜桃 DPPH 自由基清除率和羟基自由基清除率的影响

Fig.7 Effect of combined treatment of 1-MCP and ClO₂ on DPPH and OH free radical scavenging rates of peach

组 ($p < 0.05$)。在贮藏第 2 天, ClO₂ 处理组的 DPPH 自由基清除率显著低于结合处理组 ($p < 0.05$), 但结合处理组与 1-MCP 处理组差异不显著。第 4 天后, 结合处理组的 DPPH 自由基清除率显著高于单独处理组 ($p < 0.05$), 两单独处理组间差异不显著。在贮藏第 8 天, 结合处理组 DPPH 清除率为 93.3%, 与 CK 组相比, 提高了 14.7%。

从图 7B 中可以看出, 随着贮藏时间的延长, 羟基自由基清除率整体呈先下降后上升的趋势。在贮藏前中期 (2~4 d), CK 组和 1-MCP 处理组无明显差异。到贮藏后期 (6~8 d), CK 组的羟基自由基清除率显著低于各处理组 ($p < 0.05$)。在整个贮藏期, 除第 4 天, 结合处理组的羟基自由基清除率均显著高于其他处理组 ($p < 0.05$)。在贮藏第 2、6 天, ClO₂ 处理组的羟基自由基清除率显著高于 1-MCP 处理组 ($p < 0.05$), 第 4 天与 1-MCP 处理组差异不显著。在贮藏结束时, 1-MCP 处理组的羟基自由基清除率显著高于 ClO₂ 处理组 ($p < 0.05$)。

果蔬成熟衰老过程中伴随着活性氧的大量积累, 活性氧的积累会对果实造成伤害。本试验结果表明, 1-MCP 和 ClO₂ 处理均能提高桃果实的自由基清除能力, 可能是因为 1-MCP 和 ClO₂ 处理既能够保持较高的抗坏血酸和总酚等非酶抗氧化剂含量又能够使 SOD 和 POD 等抗氧化酶活性处于较高水平, 进而增强对自由基的清除能力。在李奕星等^[29]的研究中也得到了相似的结论: 结合处理可以通过提高荔枝果皮的多酚含量, 进而提高 DPPH 自由基清除能力, 贮藏结束时, 结合处理组的 DPPH 自由基清除率为 88%, 与贮藏开始时的清除率相当。

2.5 不同处理水蜜桃品质变化的主成分分析

1-MCP 结合 ClO₂ 处理对水蜜桃品质变化的主成

分分析见图 8。

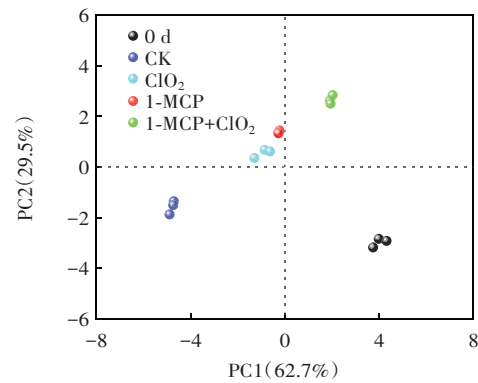


图8 1-MCP 结合 ClO₂ 处理水蜜桃品质变化的主成分分析

Fig.8 Principal component analysis of quality change of peach treated with both 1-MCP and ClO₂

通过对贮藏结束时的 15 项指标进行主成分分析, 将所有指标转化成 2 个主成分。如图 8 所示, 两个主成分的累积贡献率为 92.2%, 其中主成分因子 1 (principal component 1, PC1) 和主成分因子 2 (principal component 2, PC2) 分别贡献了总方差的 62.7% 和 29.5%。各组的样点逐渐从 PC1 组分向左移动, 远离 0 d 的新鲜样品, 表明水蜜桃随贮藏时间的延长品质不断下降。结合处理组的样点离 0 d 最近, 单独处理介于结合处理组和 CK 组之间, CK 组的样点离 0 d 最远。PCA 结果直观表明, 1-MCP 或 ClO₂ 单独处理均能保持果实的品质, 1-MCP 结合 ClO₂ 处理进一步提高保鲜效果。

3 结论

1-MCP 和 ClO₂ 处理的水蜜桃贮藏品质与 CK 组相比有了明显提高, ClO₂ 和 1-MCP 都能够有效抑制微生物的滋生, 降低果实的腐烂率。1-MCP 处理能够有效延缓果实的软化, ClO₂ 处理对延缓果实的软化效果弱于 1-MCP 处理。1-MCP 和 ClO₂ 处理均能不同程度降低果实的呼吸强度, 抑制乙烯的生成和 MDA 含量的上升, 对可溶性固形物和可滴定酸含量的维持起到积极作用。1-MCP 结合 ClO₂ 处理同时具有两者的优点, 更进一步地保持果实的品质。此外, 1-MCP 和 ClO₂ 处理均能维持较高的抗氧化物质含量和抗氧化酶活, 有效地清除自由基, 结合处理后效果进一步提升。综上, 1-MCP 和 ClO₂ 结合处理可针对桃采后贮藏中突出的呼吸旺盛和易腐烂问题, 明显提升水蜜桃的贮藏保鲜品质。

参考文献:

- [1] ZHANG W S, JING L Y, CHEN H Y, et al. NC-1 coating combined with 1-MCP treatment maintains better fruit qualities in honey peach during low-temperature storage[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(1): 516-524.
- [2] LIU H, JIANG W B, CAO J K, et al. Effect of chilling temperatures on physiological properties, phenolic metabolism and antioxidant level accompanying pulp browning of peach during cold storage[J].

- Scientia Horticulturae, 2019, 255: 175-182.
- [3] 陈奕兆, 王亦佳, 刚成诚, 等. 壳寡糖/PVP处理对冷藏水蜜桃的保鲜效果比较[J]. 食品科学, 2013, 34(18): 332-336.
CHEN Yizhao, WANG Yijia, GANG Chengcheng, et al. Comparison of effectiveness between chitosan oligosaccharide and PVP in preserving juicy peaches during refrigerated storage[J]. Food Science, 2013, 34(18): 332-336.
- [4] VALLEJO F, BEAUDRY R M. Comparing the function of perforated and non-perforated film in modified-atmosphere packaging: Impact on the quality of broccoli[J]. Acta Horticulturae, 2010(857): 503-512.
- [5] LIN W Y, LIU Y P, DI J B, et al. Effects of 1-MCP treatment on physiology and storage quality of root mustard at ambient temperature[J]. Foods, 2022, 11(19): 2978.
- [6] CHIABRANDO V, GIACALONE G. Shelf-life extension of high-bush blueberry using 1-methylcyclopropene stored under air and controlled atmosphere[J]. Food Chemistry, 2011, 126(4): 1812-1816.
- [7] 安容慧, 陈皖豫, 胡花丽, 等. 1-甲基环丙烯对娃娃菜贮藏品质及抗氧化活性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(20): 194-203.
AN Ronghui, CHEN Wanyu, HU Huali, et al. Effects of 1-methylcyclopropene on the storage quality and antioxidant properties of baby cabbage[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(20): 194-203.
- [8] ZHANG W D, KANG J W, YANG W T, et al. Incorporation of 1-methylcyclopropene and salicylic acid improves quality and shelf life of winter jujube (*Zizyphus jujuba* Mill. cv. Dongzao) through regulating reactive oxygen species metabolism[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 940494.
- [9] SINGH S, MAJI P K, LEE Y S, et al. Applications of gaseous chlorine dioxide for antimicrobial food packaging: A review[J]. Environmental Chemistry Letters, 2021, 19(1): 253-270.
- [10] 孔方南, 李文砚, 罗培四, 等. 二氧化氯对木奶果保鲜效果的影响[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(2): 20-27.
KONG Fangnan, LI Wenyuan, LUO Peisi, et al. Effects of chlorine dioxide treatments on fresh-keeping results of *Baccaurea ramiflora* Lour.fruits[J]. Storage and Process, 2021, 21(2): 20-27.
- [11] CHAI J X, WANG Y T, LIU Y F, et al. 1-MCP extends the shelf life of ready-to-eat 'Hayward' and 'Qihong' kiwifruit stored at room temperature[J]. Scientia Horticulturae, 2021, 289: 110437.
- [12] CHEN S J, WANG H O, WANG R R, et al. Effect of gaseous chlorine dioxide (ClO₂) with different concentrations and numbers of treatments on controlling berry decay and rachis browning of table grape[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, 42(7): e13662.
- [13] ZHANG Y T, LING J, ZHOU H S, et al. 1-Methylcyclopropene counteracts ethylene inhibition of anthocyanin accumulation in peach skin after harvest[J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 183: 111737.
- [14] DU M J, JIA X Y, LI J K, et al. Regulation effects of 1-MCP combined with flow microcirculation of sterilizing medium on peach shelf quality[J]. Scientia Horticulturae, 2020, 260: 108867.
- [15] 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.
CAO Jiankang, JIANG Weibo, ZHAO Yumei. Guidance on postharvest physiological and biochemical experiments of fruits and vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007.
- [16] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定: GB 4789.2—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, National Medical Products Administration. National standard for food safety Food microbiological analysis Determination of aerobic plate count: GB 4789.2—2022[S]. Beijing: Standard Press of China, 2022.
- [17] LIU H X, JIANG W B, ZHOU L G, et al. The effects of 1-methylcyclopropene on peach fruit (*Prunus persica* L. cv. Jiubao) ripening and disease resistance[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2005, 40(1): 1-7.
- [18] 唐欣影. ClO₂缓释剂结合 1-MCP 处理对西兰花常温货架期保鲜作用的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
TANG Xinying. Study on the fresh-keeping effect of ClO₂ sustained-release agent combined with 1-MCP treatment on broccoli during shelf life at room temperature[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017.
- [19] 张冬梅. 1-MCP 和 ClO₂ 复合处理对无花果流通过程中贮藏品质的影响[J]. 食品科技, 2021, 46(5): 53-57.
ZHANG Dongmei. Effects of combined treatment of 1-methylcyclopropene(1-MCP)and chlorine dioxide(ClO₂)on storage quality of *Ficus carica* linn in the circulation[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(5): 53-57.
- [20] 戴斯琴. ClO₂ 及其与 1-MCP 结合处理对油桃保鲜效果和其生理变化的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
DAI Siqin. Effect of combined treatment of ClO₂ and 1-MCP on physiological and biochemical changes of nectarine during storage[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2008.
- [21] 郑江枫. 1-MCP 处理对采后“朝霞”水蜜桃果实能量代谢、膜脂代谢和抗病物质代谢的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2016.
ZHENG Jiangfeng. Effect on energy membrane lipid metabolism and disease-resistant material metabolism in harvested 'Zhaoxia' peach fruit by 1-MCP treatment[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2016.
- [22] 冯叙桥, 关筱歆, 张鹏, 等. 1-MCP 结合 ClO₂ 处理对冰温贮藏玫瑰香葡萄生理和品质的影响[J]. 食品工业科技, 2012, 33(17): 333-338.
FENG Xuqiao, GUAN Xiaoxin, ZHANG Peng, et al. Effect of 1-MCP and ClO₂ treatments on postharvest quality and physiology of Muscat hamburg grape under controlled freezing point storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(17): 333-338.
- [23] 金昌海, 阚娟, 王红梅, 等. 1-甲基环丙烯对桃果实成熟软化调控的影响[J]. 食品研究与开发, 2006, 27(11): 153-156.
JIN Changhai, KAN Juan, WANG Hongmei, et al. Effect of 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatment on softening of peach fruit[J]. Food Research and Development, 2006, 27(11): 153-156.
- [24] 郝慧慧. 贮藏温度对灵武长枣细胞壁代谢及软化特性的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2022.
HAO Huihui. Effect of storage temperature on cell wall metabolism and softening characteristics of Lingwu jujube[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022.
- [25] 戴斯琴, 饶景萍, 周洁, 等. ClO₂ 处理对油桃采后生理及相关酶活性的影响[J]. 西北植物学报, 2007, 27(12): 2466-2470.
DAI Siqin, RAO Jingping, ZHOU Jie, et al. Effect of ClO₂ treatment on postharvest physiology and enzymatic activity of nectarines[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2007, 27(12): 2466-2470.
- [26] 金童. 1-甲基环丙烯(1-MCP)和二氧化氯联合使用对果蔬采后品质的影响[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2019.
JIN Tong. Effects of 1-methylcyclopropene (1-MCP) and chlorine dioxide on postharvest quality of fruits and vegetables[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2019.
- [27] 吴凡, 隋继学. 1-甲基环丙烯结合二氧化氯处理红灯大樱桃冷藏保鲜的试验研究[J]. 冷藏技术, 2017, 40(4): 27-31, 26.
WU Fan, SUI Jixue. Effect of-methylcyclopropene and chlorine dioxide treatments on the preservation of large cherry Hongdeng[J]. Journal of Refrigeration Technology, 2017, 40(4): 27-31, 26.
- [28] 管玉格. 鲜切西兰花酚类物质生物合成机制及其抗氧化活性的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
GUAN Yuge. Study on biosynthesis mechanism and antioxidant activity of phenolic compounds in fresh-cut broccoli[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [29] 李奕星, 陈娇, 李芬芳, 等. ClO₂ 结合 1-MCP 对无核荔枝的常温保鲜效果研究[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(3): 29-34.
LI Yixing, CHEN Jiao, LI Fenfang, et al. Study on preservation effects of ClO₂ combining 1-MCP treatments on seedless litchis at room temperature[J]. Storage and Process, 2021, 21(3): 29-34.