



天津科技大学学报

Journal of Tianjin University of Science & Technology

ISSN 1672-6510, CN 12-1355/N

《天津科技大学学报》网络首发论文

题目: 高浓度CO₂协同 1-MCP对沙葱护绿保鲜效果的影响
作者: 范梦缘, 王世卓, 郑家轩, 寇润蕾, 孙风霞, 刘霞
DOI: 10.13364/j.issn.1672-6510.20250031
收稿日期: 2025-02-26
网络首发日期: 2026-01-29
引用格式: 范梦缘, 王世卓, 郑家轩, 寇润蕾, 孙风霞, 刘霞. 高浓度CO₂协同 1-MCP对沙葱护绿保鲜效果的影响[J/OL]. 天津科技大学学报.
<https://doi.org/10.13364/j.issn.1672-6510.20250031>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。



DOI: 10.13364/j.issn.1672-6510.20250031

高浓度 CO₂ 协同 1-MCP 对沙葱护绿保鲜效果的影响

范梦缘¹, 王世卓¹, 郑家轩¹, 寇润蕾¹, 孙风霞¹, 刘霞^{1,2}

(1. 天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300457; 2. 天津鲜食原品生物科技有限公司, 天津 300450)

摘要: 沙葱 (*Allium mongolicum*) 采后黄化、失水、腐烂等问题严重, 导致其品质劣变加速。为解决沙葱采后黄化问题, 提高其贮藏品质, 以宁夏特色沙葱为材料, 研究了高浓度 CO₂ 短激、1-甲基环丙烯(1-methylcyclopropene, 1-MCP) 单独处理以及协同处理对沙葱护绿保鲜的调控效应。结果表明: 与对照组 (CK) 相比, 高浓度 CO₂ 短激、1-MCP 以及 1-MCP+CO₂ 复合处理均可有效抑制沙葱采后色泽变化, 减缓失重率和腐烂率的上升速率, 维持较高的过氧化物酶 (POD)、超氧化物歧化酶 (SOD) 和过氧化氢酶 (CAT) 酶活水平, 降低脂氧合酶 (LOX) 酶活性和丙二醛 (MDA) 含量, 降低自由基对沙葱体内叶绿素等色素的破坏程度。其中, 1-MCP+CO₂ 复合处理效果最好, 贮藏 18 d 后, 呼吸强度比 CK 组低 171.33 mg/kg h, 可溶性固形物含量为 4.07%, 超氧阴离子 (O₂⁻) 产生速率仅为 CK 组 56%。可见, 高浓度 CO₂ 短激协同 1-MCP 可以更好地延缓沙葱失绿、失水、腐烂等现象的发生, 延长货架期, 为沙葱采后护绿保鲜技术的开发提供了理论依据。

关键词: 沙葱; 高浓度 CO₂ 短激; 1-MCP; 护绿保鲜

中图分类号: TS255.3; TS205.9

文献标志码: A

Effects of Combined Treatment of High Concentration CO₂ Short Shock and 1-MCP on Postharvest Preservation of *Allium mongolicum* Regel

FAN Mengyuan¹, WANG Shizhuo¹, ZHENG Jiaxuan¹, KOU Runlei¹, SUN Fengxia¹, LIU Xia^{1,2}

(1. College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China;

2. Tianjin Fresh Food Original Biological Technology Co., Ltd., Tianjin 300450, China)

Abstract: In order to improve the storage quality of *Allium mongolicum* Regel, we studied the regulatory effects of high-concentration CO₂ short shock and 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatment on their green preservation. The results show that, compared with the control group (CK), high-concentration CO₂ short shock, 1-MCP treatment, and the combined treatment of CO₂ and 1-MCP effectively inhibited post-harvest color change, slowed down the increase in weight loss and decay rates, and maintained higher activity levels of peroxidase (POD), superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT). Additionally, the activity of lipoxygenase (LOX) and the content of malondialdehyde (MDA) were reduced, while the degradation of chlorophyll and other pigments by free radicals was also suppressed. Among these treatments, the combined CO₂ and 1-MCP treatment showed the best effect. After 18 days of storage, the respiratory intensity of the combined treatment group was 171.33 mg/kg h lower than the CK group, the soluble solid content was 4.07%, and the super-oxide anion (O₂⁻) production rate was only 56% of the CK group. Thus, the combination of high-concentration CO₂ short shock and 1-MCP can effectively delay the occurrence of green loss, water loss, rot, and other undesirable phenomena, extend the shelf life of *Allium mongolicum* Regel, and provide a theoretical basis for developing post-harvest green preservation technology for this species.

Key words: *Allium mongolicum* Regel; high CO₂ short shock; 1-MCP; green preservation and fresh-keeping

收稿日期: 2025-02-26; 修回日期: 2025-06-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (2019ZD035)

作者简介: 范梦缘(2000—), 女, 山东菏泽人, 硕士研究生; 通信作者: 刘霞, 教授, liuxia831930@163.com

沙葱(*Allium mongolicum* Regel), 又称蒙古韭, 是一种固沙保土植物, 也是沙漠地区的一种传统野生蔬菜^[1-3]。目前广泛分布在我国西北部地区, 如新疆、宁夏等地^[4-7]。2023年阿拉善的沙葱年产量约300多万吨, 露天种植面积达1083万亩。沙葱不仅含有蛋白质等丰富的营养物质, 而且还具有多方面的药用功效, 所以被称为“菜中灵芝”^[8]。然而, 沙葱因其属于呼吸跃变型蔬菜, 含水量大, 且细胞壁较薄, 容易造成机械损伤、黄化、失水、腐烂等问题, 使产品货架期短、整体品质下降, 严重影响了我国沙葱的销售范围和产业发展^[9-11]。

1-甲基环丙烯(1-methylcyclopropene, 1-MCP)是一种植物生长调节剂, 能显著抑制果蔬的呼吸强度, 减少水分蒸发和营养物质的消耗, 从而延缓果蔬的品质下降, 延长其保鲜时间^[12-14]。Hu等^[15]研究发现, 1-MCP处理甘蓝后, 总叶绿素、叶绿素a和叶绿素b含量均显著高于对照组, 护绿效果显著。CO₂可以有效抑制果蔬呼吸强度以及酶的活性, 抑制叶绿素降解, 延缓果蔬成熟衰老的发生时间^[16-19]。同时, 研究^[20]发现, 油菜被90% CO₂短激处理后能够有效延缓其采后黄化和失水萎蔫的过程, 提高耐贮性, 抑制腐败衰老的过程。

有研究^[21]使用不同浓度1-MCP处理沙葱保持其采后品质, 但将高浓度CO₂短激与1-MCP复合处理用于沙葱的采后护绿保鲜却鲜有报道。因此, 本实验研究了高浓度CO₂短激、1-MCP处理与高浓度CO₂短激协同1-MCP复合处理对沙葱采后护绿保鲜的调控效应, 旨在为完善沙葱贮藏保鲜技术、拓宽销售半径提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

实验所用沙葱于2024年9月5日采自宁夏回族自治区, 采收成熟度一致、无病虫害和机械损伤的新鲜沙葱放置于泡沫箱中, 空运至天津科技大学。

果蔬保鲜专用PE袋(110 cm × 100 cm, 厚度0.15 mm), 市售; 1-MCP粉剂, 山东维特生物科技有限公司; 石英砂, 天津市永大化学试剂开发中心; 碳酸钙粉, 天津希恩思奥普德科剂有限公司; 丙酮, 天津渤化化学试剂有限公司; 亚油酸钠, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 曲拉通X-100、三氯乙酸, 上海麦克林生化科技有限公司; 链聚乙烯吡咯烷酮

(PVPP)、硫代巴比妥酸、乙二胺四乙酸、L-蛋氨酸、氯化硝基四氮唑蓝, 上海源叶生物科技有限公司; 盐酸羟胺, 天津绿色长源科技发展有限公司; 愈创木酚, 南京市光复化工研究所; 过氧化氢, 天津市津科精细化工研究所; 二硫苏糖醇、乙二胺四乙酸二钠, 北京索莱宝科技有限公司; 核黄素, 天津市江天化工技术股份有限公司。

PL203型精密电子天平, 瑞士梅特勒-托利多公司; TGL-16M型冷冻高速离心机, 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司; Check Point 3(O₂/CO₂)型顶空气体成分分析仪, 丹圣(上海)贸易有限公司; JFQ-3051H型果蔬呼吸测定仪, 北京均方理化科技研究所; WR-18型精密色差仪, 深圳威福光电科技有限公司; EPOCH-1908028型酶标仪, 美国伯腾仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品预处理

挑选出成熟度一致、无机械损伤的新鲜沙葱。根据前期单因素实验结果, 应用于沙葱采后保鲜及保持其营养品质的最佳高浓度CO₂浓度为80%, 最佳1-MCP处理浓度为1.0 μL/L。

将挑选出的新鲜沙葱放置在(4±1)°C的环境下预冷24 h, 将其按质量平均分为4组, 每组6 kg。对照组(CK组)不进行任何处理; 1-MCP处理组, 使用浓度为1.0 μL/L的1-MCP熏蒸24 h; 高浓度CO₂短激处理组, 使用80% CO₂处理30 min; 1-MCP+CO₂组, 先用1.0 μL/L 1-MCP熏蒸24 h后, 再用80% CO₂处理30 min。将以上4组沙葱每组平均分成3份进行平行实验, 分别装入果蔬保鲜专用袋中, 置于(4±1)°C条件下贮藏, 每隔3 d取样测定, 贮藏总时间为18 d。

1.2.2 色差和叶绿素含量的测定

使用WR-18精密色差仪测定沙葱色度值L*、a*、b*, 总色差ΔE按照式(1)计算。ΔE越大, 代表色泽差异越明显。

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (1)$$

叶绿素含量的测定参照曹建康等^[22]方法进行测定。

1.2.3 抗氧化相关酶活性的测定

超氧阴离子(O₂⁻)含量、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)的测定参考曹建康等^[22]的方法进行测定。过氧化氢酶(CAT)参考Wang等^[23]的方法进行测定。

1.2.4 脂氧合酶(LOX)和丙二醛(MDA)的测定

脂氧合酶(LOX)参考曹建康等^[22]的方法进行测定。丙二醛(MDA)含量参考王相等^[24]的方法进行测定。

1.2.5 沙葱生理品质指标的测定

使用果蔬呼吸测定仪对沙葱进行呼吸强度的测定。使用质量法测定失重率(R_m)。测定沙葱贮藏前的质量(m_0)和贮藏后的质量(m_1),按照式(2)计算失重率。

$$R_m = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (2)$$

测定沙葱总质量(m_2)和腐烂沙葱总质量(m_3),按照式(3)计算腐烂率(R)。

$$R = \frac{m_3}{m_2} \times 100\% \quad (3)$$

将沙葱切碎用纱布包裹挤压出汁液,利用便携式手持折光仪测定可溶性固形物(TSS)含量。

1.3 数据处理

所有指标均重复测定3次,实验数据的统计分析均使用软件SPSS 23进行显著性分析,借助单因素ANOVA检验比较各实验组间的差异显著性, $P < 0.05$ 为显著性差异。

2 结果与分析

2.1 高浓度CO₂短激和1-MCP处理对沙葱a*值、L*值及叶绿素含量的影响

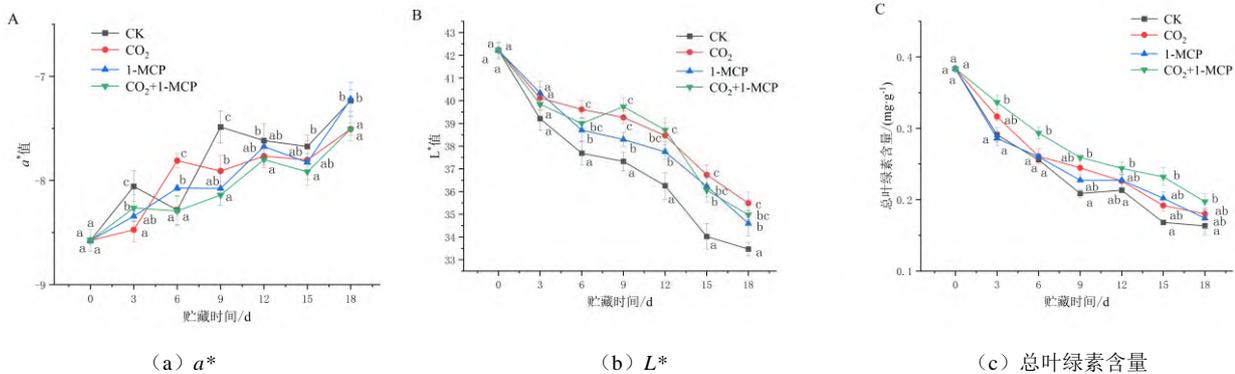
高浓度CO₂短激、1-MCP单独处理以及高浓度CO₂短激与1-MCP复合处理对沙葱a*值、L*值和叶

绿素含量的影响如图1所示。

a*值越低代表沙葱颜色越绿^[25],保鲜效果越好。由图1(a)可知,在整个贮藏期间内,a*值总体呈上升趋势。从6d开始,1-MCP+CO₂组的a*值一直处于最低水平。贮藏至18d时,1-MCP+CO₂组的a*值为-8.20,而对照组(CK)的a*值为-7.83,1-MCP+CO₂组显著低于CK组($P < 0.05$),这表明1-MCP+CO₂处理后的沙葱的外观颜色更绿。其中,值得注意的是,CK组第6天比第3天更绿,这可能是因为采后初期,沙葱因受到机械损伤或脱离土壤导致生存环境发生变化,触发乙烯爆发,加速叶绿素酶和脱镁螯合酶活性,导致叶绿素快速降解。此时a值短暂升高。随着贮藏时间延长至第6天,叶绿素消耗量到达一定量后,降解速率下降,同时呈橄榄绿色的脱镁叶绿素积累,其颜色特征使a值降低。

从图1(b)的亮度(L*)值来看,沙葱的L*值整体呈下降趋势,这表明沙葱逐渐变暗并失去光泽,其中CK组的L*值始终最低。贮藏结束时,CK组的L*值降至33.47,显著低于其他处理组($P < 0.05$)。

如图1(c),在整个贮藏期间内,沙葱的总叶绿素含量整体呈现下降趋势,且1-MCP+CO₂组的总叶绿素含量始终处于最高水平,与CK组差异显著($P < 0.05$)。CK组叶绿素含量下降速率最快,贮藏结束时,1-MCP+CO₂组的总叶绿素含量为0.1973 mg/g,较对照组(0.1634 mg/g)高17.17%。这与上述沙葱的色泽变化情况基本一致。段慧敏等^[20]的研究表明,高浓度CO₂短激处理有助于更好地保持油菜的叶绿素含量。于谦等^[26]对黄冠梨的研究发现,1.0 μL/L的1-MCP能显著抑制黄冠梨中叶绿素含量的降低。



注:不同字母表示相同贮藏时间不同处理组之间数据存在显著差异($P < 0.05$)。

图1 高浓度CO₂短激和1-MCP处理对沙葱a*值、L*值及叶绿素含量的影响

Fig. 1 Effects of short-term high-concentration CO₂ and 1-MCP treatments on a* value, L* value, and chlorophyll content in *Allium mongolicum*

综上所述，高浓度 CO₂ 短激处理、1-MCP 单独处理以及高浓度 CO₂ 短激与 1-MCP 复合处理均能有效抑制沙葱色泽变化。其中，1-MCP+CO₂ 复合处理效果最为显著，该处理能较好地保持沙葱的色泽品质，维持叶绿素含量，延缓其感官品质下降，延长贮藏期。

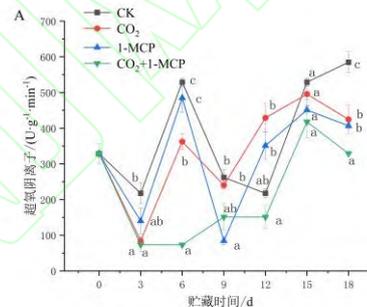
2.2 高浓度 CO₂ 短激和 1-MCP 处理对沙葱活性氧代谢的影响

2.2.1 高浓度 CO₂ 短激和 1-MCP 处理对沙葱抗氧化相关酶活性的影响

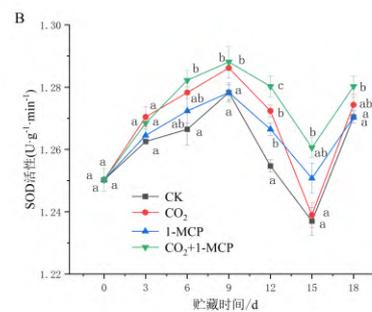
活性氧 (ROS) 是导致果蔬细胞氧化损伤的主要物质，通过直接氧化叶绿素分子、破坏光合膜系统、干扰叶绿素代谢途径等方式使叶绿素降解。生物体内的抗氧化作用是通过减少氧化应激维持 ROS 的代谢平衡^[27]，避免 ROS 积累对细胞造成氧化损伤。在正常情况下，植物体内的 ROS 代谢处于产生和清除的平衡状态^[28]。然而，这种平衡在胁迫条件下会被打破，导致体内 ROS 过量积累。抗氧化酶系统主要是通过 SOD 高效转化 ROS 中的超氧化物，将其分解为 H₂O₂ 和 H₂O，并与 POD 和 CAT 协同作用，将 H₂O₂ 进一步分解为 O₂ 和 H₂，从而降低细胞内 ROS 浓度，减少其对叶绿素等色素的破坏作用，有助于维持果蔬的绿色色泽，促进植物正常生长发育。高浓度 CO₂ 短激和 1-MCP 处理对沙葱抗氧化相关酶活性的影响如图 2 所示。

从图 2 (a) 可以看出，整个贮藏期间内，1-MCP+CO₂ 组的 O₂ 产生速率始终处于较低水平。贮藏 6 d 时，1-MCP+CO₂ 组显著抑制了超氧阴离子产生速率的增加 ($P<0.05$)。至贮藏 18 d 时，1-MCP+CO₂ 组的 O₂ 产生速率为 328.89 U/(g min)，仅为同时期 CK 组的 56%，显著低于 CK 组 ($P<0.05$)，表明 1-MCP+CO₂ 组处理有效降低沙葱体内活性氧物质含量。由图 2 (b) 可知，随着贮藏时间的延长，SOD 活性整体呈现先上升后下降再上升的趋势。3 个处理组的 SOD 活性均高于 CK 组，其中 1-MCP+CO₂ 组的 SOD 活性始终处于最高水平 (除第 3 天外)。从贮藏 6 d 开始，CK 组与 1-MCP+CO₂ 组之间出现显著性差异 ($P<0.05$)。由图 2 (c) 可知，贮藏期间内的 POD 活性呈现先上升后下降的趋势，且 1-MCP+CO₂ 组的 POD 活性始终处于较高水平。贮藏 3 d 时，CK 组的 POD 活性高于 1-MCP 处理组，这可能是因为

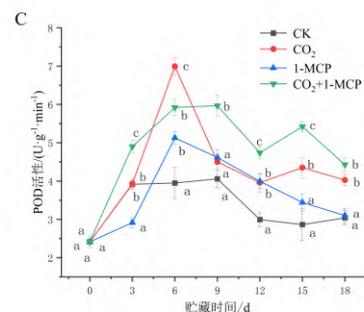
1-MCP 处理被沙葱视为一种胁迫环境，沙葱通过启动自身防御系统，迅速提高 POD 活性以增强抗逆性，从而应对 1-MCP 的胁迫。从贮藏第 3 天开始，1-MCP+CO₂ 组与 CK 组之间出现显著差异 ($P<0.05$)。如图 2 (d) 所示，从贮藏第 6 天开始，CK 组、CO₂ 组与 1-MCP 组、1-MCP+CO₂ 组之间开始出现显著差异 ($P<0.05$)。贮藏结束时，1-MCP+CO₂ 组的 CAT 活性为 71.56 U/(g min)，显著高于其他组，而 CK 组的 CAT 活性为 27.11 U/(g min)，仅为 1-MCP+CO₂ 组的 38%。本研究结果和张旭薪等^[29]的研究结果一致，其研究表明高氧短激与 1-MCP 复合处理能够激活枸杞在贮藏期间的 POD、SOD 和 CAT 活性。



(a) 超氧阴离子

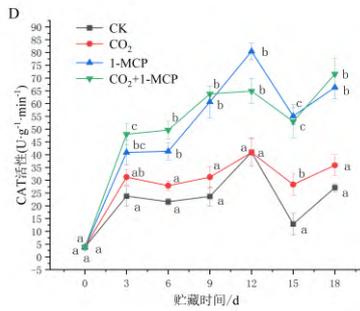


(b) SOD 活性



(c)

(c) POD 活性



(d) CAT 活性

注: 不同字母表示相同贮藏时间不同处理组之间数据存在显著差异 ($P < 0.05$)。

图 2 高浓度 CO₂ 短激和 1-MCP 处理对沙葱抗氧化相关酶活性的影响

Fig. 2 Effects of high CO₂ stress and 1-MCP treatment on antioxidant-related enzyme activities of *Allium mongolicum* leaves

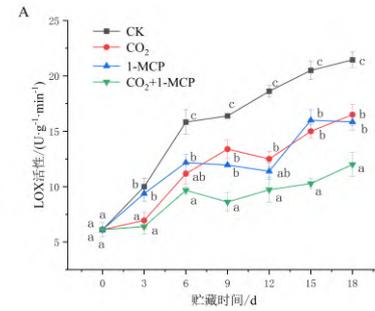
以上分析表明, CO₂ 组、1-MCP 组和 1-MCP+CO₂ 组均能有效降低 O₂⁻ 产生速率, 提高相关的抗氧化酶活性。其中, 1-MCP+CO₂ 复合处理效果最为显著, 能够清除沙葱体内更多自由基, 有效减少 ROS 积累对沙葱造成的氧化损伤, 抑制不利的氧化作用, 避免叶绿素被破坏, 维持活性氧代谢平衡, 从而有效保持沙葱原有的绿色色泽。这与上文各个处理组叶绿素含量的保持情况基本一致。

2.2.2 高浓度 CO₂ 短激和 1-MCP 处理对沙葱 LOX 酶活和 MDA 含量的影响

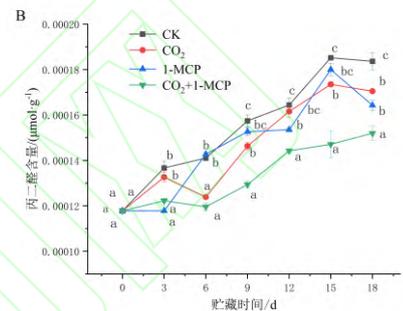
脂氧合酶 (LOX) 活性和丙二醛 (MDA) 含量是反映细胞膜脂质过氧化程度的重要指标^[30]。通常情况下, LOX 酶活性越高, 不饱和脂肪酸被氧化生成氢过氧化物的速度越快, 进而导致更多的 MDA 产生。MDA 的过度积累会引发膜结构破坏、膜脂过氧化程度加剧, 膜结构受损会导致叶绿素更容易暴露在外环境中, 进而加速叶绿素的降解。高浓度 CO₂ 短激和 1-MCP 处理对沙葱 LOX 酶活和 MDA 含量的影响如图 3 所示。

由图 3 可知, 在贮藏期间内, LOX 酶活性整体呈现上升的趋势, 这与 MDA 含量的变化趋势基本一致。CK 组的 LOX 酶活及 MDA 含量始终处于最高水平, 表明其他 3 个处理组均能在一定程度上抑制膜结构的破坏和细胞膜脂过氧化。其中, 1-MCP+CO₂ 处理组的 LOX 酶活及 MDA 含量始终处于最低水平。贮藏结束时, 1-MCP+CO₂ 处理组的 LOX 酶活及 MDA

含量仅为同时期 CK 组的 55.96%、82.73%。



(a) LOX 酶活性



(b) 丙二醛含量

注: 不同字母表示相同贮藏时间不同处理组之间数据存在显著差异 ($P < 0.05$)。

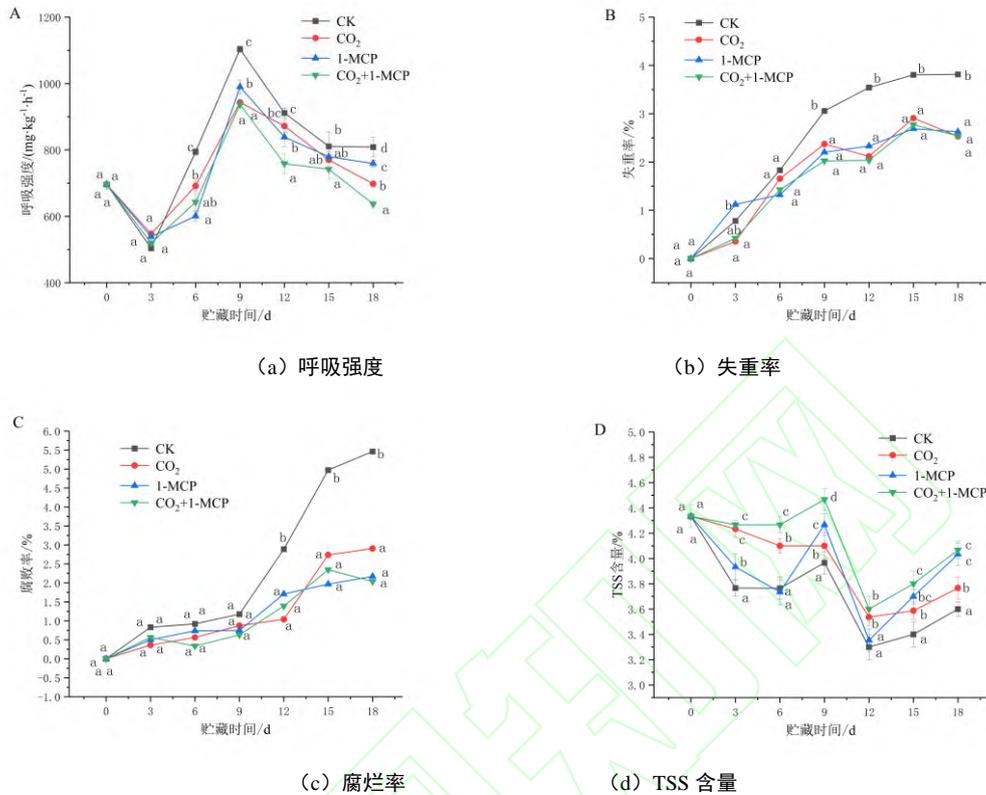
图 3 高浓度 CO₂ 短激和 1-MCP 处理对沙葱 LOX 酶活和 MDA 含量的影响

Fig. 3 Effects of high CO₂ stress and 1-MCP treatment on LOX enzyme activity and MDA content of *Allium mongolicum* leaves

综上所述, 1-MCP+CO₂ 复合处理对抑制 LOX 酶活性及 MDA 含量具有显著效果, 能够有效降低沙葱在贮藏过程中的氧化程度和色泽劣变, 更好地维持其采后品质和绿色外观。

2.3 高浓度 CO₂ 短激和 1-MCP 处理对沙葱生理品质的影响

呼吸强度是反映沙葱消耗自身营养物质速率的重要指标^[31]。沙葱作为高含水量植物, 采后通过呼吸作用和蒸腾作用导致营养物质大量流失, 进而引起品质劣变^[29]。可溶性固形物 (TSS) 是维持沙葱口感、风味和营养价值的关键指标, 同时参与细胞渗透调节, 维持细胞水分平衡, 防止沙葱因失水而萎蔫衰老^[32]。高浓度 CO₂ 短激和 1-MCP 处理对沙葱生理品质的影响如图 4 所示。



注：不同字母表示相同贮藏时间不同处理组之间数据存在显著差异 ($P < 0.05$)。

图 4 高浓度 CO₂ 短激和 1-MCP 处理对沙葱生理品质的影响

Fig. 4 Effects of high CO₂ stress and 1-MCP treatment on physiological quality of *Allium mongolicum* leaves

由图 4 (a) 可知, 贮藏期间内沙葱的呼吸强度整体呈现先下降再上升再下降的趋势。在贮藏 9 d 时, 沙葱的呼吸强度达到峰值, 其中 CK 组、CO₂ 组、1-MCP 组、1-MCP+CO₂ 组的呼吸强度分别为 1103.33、943.00、990.00、936.67 mg/(kg h)。贮藏 18 d 时, 1-MCP+CO₂ 复合处理组的呼吸强度比 CK 组低 171.33 mg/kg h。高 CO₂ 短激处理组和 1-MCP+CO₂ 组的呼吸强度显著低于 CK 组 ($P < 0.05$), 表明这两种处理方式均能有效抑制沙葱的呼吸强度, 减缓水分和营养物质的流失。

由图 4 (b) 可知, 贮藏期间沙葱的失重率呈现持续上升的趋势。从贮藏 6 d 开始, CK 组的失重率显著高于其他处理组 ($P < 0.05$), 且在贮藏 9 d 后失重率迅速增加, 与其他处理组差异显著 ($P < 0.05$), 而其他处理组之间差异不显著 ($P > 0.05$)。这表明 3 个处理组均能有效减少沙葱的水分流失。在贮藏的前 3 d, 1-MCP 组的失重率高于 CK 组, 这可能与 1-MCP 处理对沙葱造成了逆境胁迫有关, 导致贮藏初期水分流失过快。

由图 4 (c) 可知, 贮藏期间沙葱的腐烂率呈上升趋势, 且 CK 组的腐烂率始终高于其他处理组。贮藏 12 d 后, CK 组的腐烂率上升速率显著加快, 与其他处理组差异显著 ($P < 0.05$), 而其他处理组间的差异不显著 ($P > 0.05$)。

由图 4 (d) 可知, 在整个贮藏期间内, 1-MCP+CO₂ 处理组的 TSS 含量始终高于其他处理组。贮藏 3 d 后, 1-MCP+CO₂ 组与 CK 组之间存在显著差异 ($P < 0.05$), 贮藏 18 d 时, 1-MCP+CO₂ 组的 TSS 含量为 4.07%, 表明 1-MCP+CO₂ 处理能够有效维持沙葱体内 TSS 含量, 从而保护其贮藏品质。

综上所述, 1-MCP+CO₂ 复合处理能够显著降低沙葱的呼吸强度, 减缓失重率和腐烂率的上升, 有效维持 TSS 含量, 保持沙葱的营养价值, 延缓失水萎蔫, 显著提高其耐贮藏性。

3 结 论

沙葱作为宁夏地区特色农产品, 采后易出现黄

化、失水、腐烂等问题,导致其品质劣变加速,严重制约了产业发展。为延缓此类现象的发生,本研究以宁夏沙葱为实验材料,系统探究了高浓度CO₂短激处理、1-MCP处理以及二者协同复合处理对沙葱护绿保鲜的调控效应。结果表明,与对照组(CK)相比,高浓度CO₂短激处理、1-MCP处理以及二者复合处理均能显著抑制沙葱色泽变化。上述处理主要通过以下机制延缓沙葱采后绿色品质劣变:第一,提升其抗氧化能力,有效抑制ROS产生水平和叶绿素降解氧化途径的启动;第二,减轻膜系统氧化损伤,主要表现为膜完整性维持及膜脂过氧化产物生成减少,抑制叶绿素酶解级联反应;第三,有效减缓叶绿素等光合色素的降解速率,从而维持较高的绿色度指数(a*值)。其中,1-MCP+CO₂复合处理的护绿效果最为显著。

本研究从生理生化角度揭示了高浓度CO₂短激与1-MCP协同处理对沙葱采后绿色品质的调控机制,为解决其贮藏过程中易发生失绿黄化等问题提供了可靠的理论依据。研究结果不仅为沙葱采后保鲜技术的优化提供了科学支撑,也为推动宁夏地区沙葱产业及当地经济发展奠定了重要基础。未来研究可进一步探索该处理技术在其他果蔬保鲜中的应用潜力,为采后保鲜技术的创新与推广提供更广泛的参考。

参考文献:

- [1] 魏鹏超,鄂圆圆,张东,等.光照处理下不同温度对沙葱种子萌发和生理指标的影响[J].安徽农业科学,2024,52(3):31-34.
- [2] 董嘉益.饲料中添加沙葱对阿勒泰羊生长性能和经济效益的影响[J].当代畜牧,2024(9):34-36.
- [3] LI M, ZHU X, TIAN J, et al. Dietary flavonoids from *Allium mongolicum* Regel promotes growth, improves immune, antioxidant status, immune-related signaling molecules and disease resistance in juvenile northern snakehead fish (*Channa argus*) [J]. Aquaculture, 2019, 501: 473-481.
- [4] 严子柱,姚泽,姜生秀,等.不同管理措施和栽培基质对盆栽沙葱的影响[J].中国农学通报,2024,40(16):43-48.
- [5] WANG W, LI J, ZHANG H, et al. Phenolic compounds and bioactivity evaluation of aqueous and methanol extracts of *Allium mongolicum* Regel [J]. Food science & nutrition, 2019, 7(2): 779-787.
- [6] CHEN Y, DING Z, WU Y, et al. Effects of *Allium mongolicum* Regel and its flavonoids on constipation [J]. Biomolecules, 2019, 10(1): 14.
- [7] YANAN J, TING Z, BINKE L, et al. Comparative and phylogenetic analysis of the complete chloroplast genome sequences of *Allium mongolicum* [J]. Scientific reports, 2022, 12(1): 21676.
- [8] 冯述娜.沙葱及其提取物对动物生产和经济效益的影响[J].饲料研究,2022,45(7):157-160.
- [9] 严子柱,马全林,姚泽,等.特色蔬菜沙葱研究现状分析[J].甘肃林业科技,2023,48(3):52-56.
- [10] 姚兴海,雷娟.即食沙葱软罐头护色工艺研究[J].中国食品工业,2021(22):96-99.
- [11] 张占全,徐勇,陈彤,等.沙葱采后贮藏保鲜效果研究[J].食品安全质量检测学报,2018,9(18):4828-4833.
- [12] 赵丽丽,李怡晴,徐梦瑶,等.1-MCP结合主动气调保鲜对鲜切小米辣贮藏品质的影响[J/OL].食品工业科技,1-19[2025-06-04].<https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024080341>.
- [13] 张佳佳.1-MCP和高氧处理对小白杏贮藏品质及生理的影响[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2022.
- [14] JIANG Y, WANG X, LI X, et al. Combination of 1-methylcyclopropene and phytic acid inhibits surface browning and maintains texture and aroma of fresh-cut peaches [J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, 200: 112328.
- [15] HU H, ZHAO H, ZHANG L, 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.
- [16] 郭文莉.气调结合低温等离子体处理对不结球白菜保鲜效果的影响[D].南京:南京农业大学,2022.
- [17] 王晓艳,韩延超,吴伟杰,等.气调贮藏对毛豆采后叶绿素降解的影响[J].中国食品学报,2023,23(11):191-201.
- [18] HARKER F, ELGAR H, WATKINS B C, et al. Physical and mechanical changes in strawberry fruit after high carbon dioxide treatments [J]. Postharvest biology and technology, 2000, 19(2): 139-146.
- [19] 吴欣蔚.真空预冷同步结合气调技术对叶类蔬菜保鲜的研究[D].广州:华南理工大学,2017.
- [20] 段慧敏,彭梦菲,张旭薪,等.高CO₂短激处理对油菜护绿和贮藏品质的影响[J].食品工业科技,2025,46(2):308-316.

- [21] 龙金飞. 三种保鲜剂对沙葱叶片保鲜效果的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- [22] 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, 2017: 32-154.
- [23] WANG Y, ZHANG J, WANG D, et al. Effects of cellulose nanofibrils treatment on antioxidant properties and aroma of fresh-cut apples[J]. *Food chemistry*, 2023, 415: 135797.
- [24] 王相友, 闫聪聪, 刘战丽. 可食性涂膜对双孢蘑菇生理和品质的影响[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(1): 141-145.
- [25] 王雪孟, 侯双迪, 郑家轩, 等. 高浓度 CO₂ 短激与保鲜剂复合处理对大青葡萄采后褐变的影响[J]. *天津科技大学学报*, 2023, 38(1): 16-22.
- [26] 于谦, 杜艳民, 王文辉, 等. 不同浓度 1-MCP 对黄冠梨果实冷藏期和货架期品质的影响[J]. *中国果树*, 2023(11): 22-26.
- [27] 李希尤, 顾笑远, 毛江浩, 等. 体内和体外抗氧化活性检测方法[J]. *生命的化学*, 2024, 44(5): 853-862.
- [28] 任丽花, 韦航, 潘葳, 等. 冷藏对百香果采后果实品质及活性氧代谢的影响[J]. *福建农业科技*, 2024, 55(7): 26-32.
- [29] 张旭薪, 江祉昕, 王赫, 等. 高氧短激结合 1-甲基环丙烯处理对鲜食枸杞低温贮藏品质的影响[J]. *保鲜与加工*, 2024, 24(12): 1-8.
- [30] 袁富容, 杨婷, 冉雅文, 等. 基于主成分分析法评价 1-MCP 处理对‘蓝丰’蓝莓果实品质及生理的影响[J]. *保鲜与加工*, 2024, 24(9): 8-18.
- [31] 梁泽. 高浓度 CO₂ 对枸杞鲜果采后糖酸积累和酚类代谢调控作用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [32] 段冰, 杨睿, 窦媛, 等. 硫化氢在果蔬贮藏保鲜中的应用及机制研究进展[J]. *果树学报*, 2021, 38(6): 1004-1012.