

唐继兴, 徐斌, 赵焱焱, 等. 二氧化氯对仔姜保鲜效果的影响 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(5): 316–321. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022030233

TANG Jixing, XU Bin, ZHAO Yaoyao, et al. Effect of Chlorine Dioxide (ClO_2) Treatment on the Preservation Effect of Tender Ginger[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(5): 316–321. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022030233

· 贮藏保鲜 ·

二氧化氯对仔姜保鲜效果的影响

唐继兴¹, 徐斌², 赵焱焱^{1,*}, 林琼¹, 戴琪^{1,3}, 齐淑宁¹, 林星宇⁴, 段玉权^{1,*}

(1. 中国农业科学院农产品加工研究所, 北京 100193;

2. 新疆农业科学院农产品贮藏加工研究所, 新疆乌鲁木齐 830091;

3. 沈阳农业大学食品学院, 辽宁沈阳 110866;

4. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 浙江杭州 310058)

摘要: 为明确二氧化氯对仔姜保鲜效果的影响, 以新鲜仔姜为试材, 在室温条件下, 用 80 mg/L 二氧化氯处理, 以去离子水作为对照, 分别浸泡 10 min, 自然风干后在 4 ℃ 条件下贮藏 28 d。结果表明, 二氧化氯处理显著降低了仔姜在整个贮藏期内的呼吸速率和腐烂率, 延缓了可溶性固形物 (TSS) 的下降, 明显降低了过氧化氢 (H_2O_2) 和丙二醛 (MDA) 的含量。同对照组相比, 二氧化氯处理明显增强了超氧化物歧化酶 (SOD) 和过氧化物酶 (POD) 的活性。以上结果说明, 二氧化氯通过增强抗氧化能力保持仔姜贮藏期间品质。

关键词: 仔姜, 二氧化氯, 采后, 贮藏品质

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)05-0316-06

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022030233

本文网刊:



Effect of Chlorine Dioxide (ClO_2) Treatment on the Preservation Effect of Tender Ginger

TANG Jixing¹, XU Bin², ZHAO Yaoyao^{1,*}, LIN Qiong¹, DAI Qi^{1,3},
QI Shuning¹, LIN Xingyu⁴, DUAN Yuquan^{1,*}

(1. Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences,
Beijing 100193, China;

2. Research Institute of Agricultural Products Storage and Processing, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences,
Urumqi 830091, China;

3. School of Food Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China;

4. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The study explored the effect of exogenous chlorine dioxide (ClO_2) treatment on retaining freshness of post-harvest fresh ginger. The fresh tender ginger were treated with 80 mg/L ClO_2 at room temperature for 10 min, and the rest were soaked in distilled water for 10 min as control, then stored at 4 ℃ for up to 28 days. The results showed that ClO_2 treatment suppressed the respiration rate, reduced decay rate, delayed the decrease of soluble solids (TSS) and decreased the content of hydrogen peroxide (H_2O_2) and malondialdehyde (MDA) during the entire storage time. Compared with the control, ClO_2 treatment significantly enhanced the enzymes activities of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD). The research indicated that ClO_2 maintained the storage quality of fresh tender ginger by promoting the antioxidant capacity.

Key words: tender ginger; chlorine dioxide; post-harvest; storage quality

收稿日期: 2022-03-21

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (2019YFC1604504-3); 中国农业科学院农业科技创新工程项目 (CAAS-ASTIP-2022-IFST)。

作者简介: 唐继兴 (1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬贮藏保鲜, E-mail: YNTjixing@163.com。

* 通信作者: 赵焱焱 (1992-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 农产品保鲜与加工, E-mail: sdzyaoyao@126.com。

段玉权 (1972-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 果蔬采后生物学与保鲜加工, E-mail: duanyuquan@caas.cn。

仔姜(*Zingiber officinale* Rose)在生活中常用作调味品和香辛料^[1-2]。然而仔姜外皮幼嫩、纤维素含量低、水分含量高,在不利的贮藏条件下易腐烂,导致商品品质降低,造成极大的经济损失^[3-4]。目前仔姜采后贮藏主要有物理、化学、生物保鲜技术^[5]。物理保鲜技术包括低温、沙藏、气调、高压脉冲等,化学保鲜技术包括钙处理、施加杀菌剂等,生物保鲜技术通过添加一些天然、环保的化学物质如壳聚糖、植物精油、茉莉酸、水杨酸等,生物保鲜技术可有效缓解环境污染、药物残留等问题,因其环保、高效、无毒的特点而受到广泛的关注。目前广泛采用的是低温贮藏,但仔姜对低温敏感,长期暴露在低温环境中容易发生冷害,主要表现为出现水浸渍斑,颜色褐变等^[6]。因此研究如何缓解低温贮藏下仔姜的冷害对延长其贮藏期具有重要的意义。

二氧化氯(ClO_2)是一种水溶性的强氧化剂,具有广谱、高效、安全,不产生有害代谢物等优良特性,常被用做保鲜剂和杀菌剂,广泛应用于果蔬保鲜领域^[7]。二氧化氯处理可提高核桃^[8]、李子^[9]、龙眼^[10]等的贮藏品质,延长贮藏期。余璐璐等^[11]研究发现用适宜浓度的二氧化氯处理草莓可以减少草莓的腐烂率,保持草莓的硬度和含糖量,延长草莓贮藏期。张方艳等^[12]研究发现用适宜浓度二氧化氯处理猕猴桃可以抑制猕猴桃的呼吸强度,减少腐烂率,维持猕猴桃较好的硬度和色泽。孔方南等^[13]研究表明二氧化氯处理可保持木瓜硬度,防止褐变,提高木瓜抗氧化酶的活性,减轻细胞膜脂过氧化作用,维持木瓜较好的商品品质。这充分说明二氧化氯在提高果蔬贮藏品质,延长果蔬贮藏期方面有十分重要的作用,且有着广泛的应用基础。本试验以仔姜为材料,用二氧化氯处理仔姜,测定其贮藏期间的品质变化,包括腐烂率、呼吸速率、可溶性固形物含量等,为 ClO_2 在仔姜保鲜中的应用提供一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

仔姜 采自四川省乐山市仔姜种植基地,采收后运至中国农业科学院农产品加工研究所实验室,将发霉和有机械损伤及病虫害的仔姜块挑出,选大小均一的仔姜,洗净泥土后用于试验;食品级二氧化氯片剂(有效成分含量 10%) 泰安嘉纳利环保科技有限公司;MDA 含量检测试剂盒(BC0025)、 H_2O_2 含量检测试剂盒(BC3595)、SOD 酶活检测试剂盒(BC1075)、POD 酶活检测试剂盒(BC0095)、CAT 酶活检测试剂盒(BC0205)、APX 酶活检测试剂盒(BC0225) 索莱宝有限公司。

试验冷库 天津捷胜东辉保鲜科技有限公司;GY-B 硬度计 浙江托普仪器有限公司;F-950 型便携式乙烯/ O_2 / CO_2 分析仪 美国 Felix 公司;H1650R 高速冷冻离心机 湖南长沙湘仪离心机仪器有限公司;BIORAD680 型全自动酶标仪 美国 Biorad 公司;QM100(s)型高通量研磨仪 五洲鼎创(北京)科

技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 二氧化氯处理仔姜 将新鲜仔姜用流动清水清洗,除去仔姜上附着的泥土,晾干后于 14 ℃ 气调库内预冷 6 h,除去呼吸热。用 80 mg/L ClO_2 处理,以去离子水作为对照,分别浸泡 10 min,自然风干后放入 4 ℃ 恒温气调库中。每个处理选用 70 块生姜,每 4 d 取一次样,测定不同处理组仔姜的生理指标。取样后用液氮迅速冷冻,然后在 -80 ℃ 下保存,将冷冻的姜肉样品用研磨仪研磨成粉状进行后续理化指标的测定。

1.2.2 测定指标与方法

1.2.2.1 呼吸速率 呼吸速率按以下方法稍作修改进行测定^[14],每个处理取 6 块仔姜,每 2 个一组放入 1.5 L 的保鲜盒中,密封 2 h,用 F-950 型便携式乙烯/ O_2 / CO_2 分析仪检测 CO_2 的浓度。呼吸速率用 $\mu\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\text{CO}_2$ 表示。

1.2.2.2 腐烂率 挑选出已经腐烂的仔姜,仔姜的腐烂率按照下式计算^[15]:

$$\text{腐烂率}(\%) = \text{仔姜腐烂块数} / \text{仔姜总数} \times 100$$

1.2.2.3 可溶性固形物 可溶性固形物按以下方法稍作修改进行测定^[16],将仔姜块茎相对称的两侧各切去一块厚约 1 cm 的姜肉,用糖度计进行可溶性固形物含量的测定。每个处理测定 9 块仔姜,单位以百分比(%)表示。

1.2.2.4 丙二醛(MDA)含量 MDA 含量采用 MDA 含量检测试剂盒测定,取 0.1 g 研磨成粉的姜肉样品,加入提取液然后匀浆,8000×g,4 ℃ 离心 10 min,然后按照说明书进行操作。

1.2.2.5 过氧化氢(H_2O_2)含量 H_2O_2 含量测定使用 H_2O_2 含量检测试剂盒,取 0.1 g 研磨成粉的姜肉样品,加入提取液后匀浆,8000×g,4 ℃ 离心 10 min,按照说明书进行操作。

1.2.2.6 抗氧化酶活性测定 SOD、POD、CAT 和 APX 酶活测定分别采用 SOD 酶活检测试剂盒,POD 酶活检测试剂盒,CAT 酶活检测试剂盒,APX 酶活检测试剂盒,取 0.1 g 研磨成粉的姜肉样品,加入提取液后匀浆,8000×g,4 ℃ 离心 10 min,按照说明书进行操作。

1.3 数据处理

每次试验重复三次,将三次的试验结果取平均值。利用 SPSS18.0 软件(SPSS Inc., Chicago, IL, USA)进行显著性分析, $P < 0.05$ 为差异显著,采用 Origin8.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 二氧化氯处理对仔姜呼吸速率的影响

仔姜采后呼吸作用仍在继续, ClO_2 可以抑制仔姜呼吸作用,减少有机物的消耗,维持其较好的商品价值。如图 1 所示,对照组仔姜和二氧化氯处理的

仔姜的呼吸速率在贮藏期的前 16 d 缓慢增加,从贮藏 16~20 d 急剧上升,在随后的贮藏中迅速下降。在第 20 d 对照组呼吸速率达到 $4.70 \mu\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1} \text{CO}_2$,而二氧化氯处理组仅为 $3.77 \mu\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1} \text{CO}_2$,与对照相比,在贮藏第 20 d 和 24 d 时,二氧化氯处理组仔姜的呼吸速率显著降低($P<0.05$)。

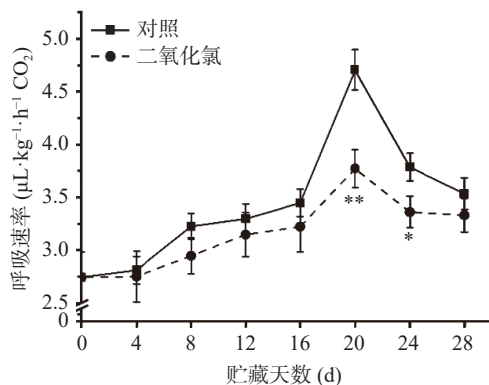


图1 二氧化氯处理对仔姜呼吸速率的影响

Fig.1 Effects of ClO_2 treatment on the respiration rate of tender ginger

注: *表示组内差异显著($P<0.05$), **表示组内差异极显著($P<0.01$); 图2~图6同。

2.2 二氧化氯处理对仔姜腐烂率的影响

仔姜在低于 10°C 贮藏容易发生冷害,温度过高则容易造成大量腐烂^[17]。在贮藏期间,仔姜腐烂率均随着贮藏期延长而增加(图2)。具体而言,对照组仔姜在贮藏第 12 d 已经发生腐烂,且对照组仔姜从贮藏 20 d 起腐烂继续增加,而二氧化氯处理的仔姜直到 24 d 才出现腐烂迹象,腐烂率为 2.98%,远低于对照组的 10.06%。说明 ClO_2 可以有效减缓仔姜冷藏过程中的腐烂变质。

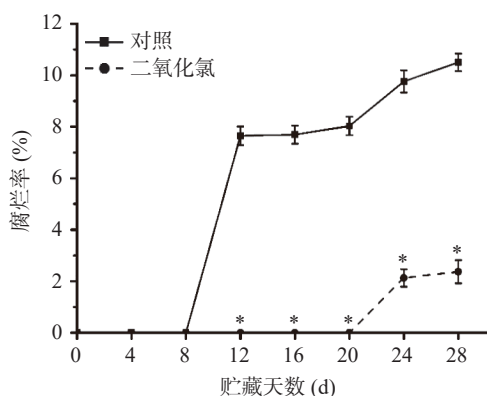


图2 二氧化氯处理对仔姜腐烂率的影响

Fig.2 Effect of ClO_2 treatment on the decay rate of tender ginger

2.3 二氧化氯处理对仔姜可溶性固形物的影响

可溶性固形物主要由一些可溶性物质和可溶性糖组成,是组成果实口感和风味的重要物质基础,其含量变化往往反映了果实的成熟度及品质变化^[18]。由图3可知,在贮藏前期处理组仔姜的可溶性固形物含量缓慢下降,从第 8 d 至第 16 d 又急剧升高,并

在 16 d 达到峰值,随后急剧下降直到贮藏结束,处理组仔姜的可溶性固形物含量由一开始的 0.0046% 下降到贮藏结束时的 0.0033%;对照组的仔姜也有类似的趋势,但不同的是,对照组的仔姜可溶性固形物在第 12 d 才开始升高,直至 16 d 达到峰值,在贮藏结束后可溶性固形物含量仅为 0.0026%。在整个贮藏期间,二氧化氯处理显著延缓了可溶性固形物含量的下降($P<0.05$)。

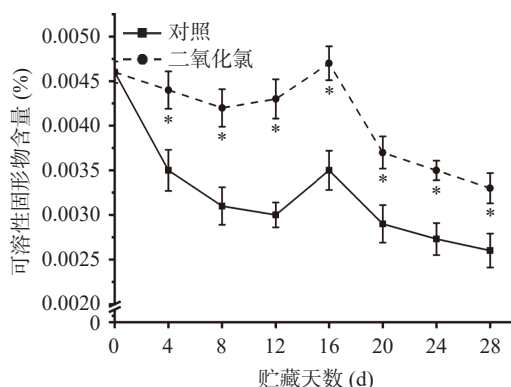


图3 二氧化氯处理对仔姜可溶性固形物含量的影响

Fig.3 Effects of ClO_2 treatment on the total soluble solids content of tender ginger

2.4 二氧化氯处理对仔姜 MDA 含量的影响

丙二醛(Malondialdehyde, MDA)是衡量氧化程度的重要标志物,反映了植物膜脂过氧化的程度^[19]。如图4所示,在整个贮藏期间,MDA 含量不断上升。与对照相比,二氧化氯处理的仔姜在整个贮藏期内 MDA 的含量显著低于对照组($P<0.05$)。具体而言,在整个贮藏期间,对照仔姜中 MDA 含量从 $1.16 \text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}$ 显著增加到 $1.37 \text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}$ ($P<0.05$);而二氧化氯处理过的仔姜中 MDA 含量缓慢增加,在贮藏期结束时仅达到 $1.29 \text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}$ 。在整个贮藏期间,与对照组仔姜相比, ClO_2 的应用明显抑制了仔姜 MDA 含量的升高。

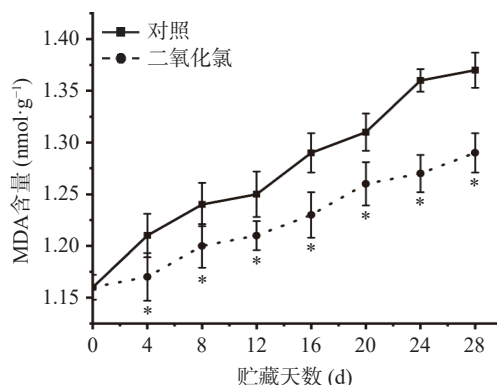


图4 二氧化氯处理对仔姜 MDA 含量的影响

Fig.4 Effect of ClO_2 treatment on MDA content of tender ginger

2.5 二氧化氯处理对仔姜 H_2O_2 含量的影响

植物组织在衰老或者遭受逆境胁迫时,体内活性代谢会加快,往往会产生大量过氧化物,如 H_2O_2

(Hydrogen peroxide), H_2O_2 如果积累过多, 植物细胞膜会受到损害, 这会加速植物衰老, 解体^[20]。对照组过氧化氢含量在贮藏第 16 d 达到峰值, 为 $15.3 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 二氧化氯处理组为 $13.54 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 在随后的贮藏过程中迅速下降(图 5)。在贮藏第 28 d, 对照组 H_2O_2 含量为处理组的 1.129 倍。同对照组相比, 从贮藏第 8 d 开始到贮藏结束 ClO_2 处理显著降低了 H_2O_2 的含量($P<0.05$)。

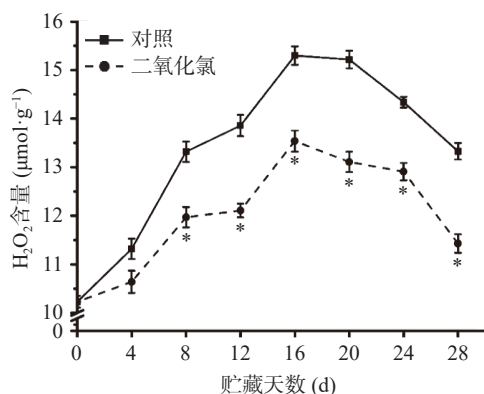


图 5 二氧化氯处理对仔姜 H_2O_2 含量的影响

Fig.5 Effect of ClO_2 treatment on H_2O_2 content of tender ginger

2.6 二氧化氯处理对仔姜抗氧化酶活性的影响

SOD、POD、CAT 和 APX 是植物酶促抗氧化防御系统的一部分, 它们可以清除活性氧积累^[21]。 ClO_2 对低温贮藏仔姜中抗氧化酶活性的影响见图 6。处理和未处理的仔姜的 SOD 活性在贮藏的前 4 d 迅速上升。此后, 对照组仔姜的 SOD 活性逐渐增加, 在贮藏第 20 d 达到峰值, 在随后贮藏期间迅速下降(图 6(a)); 二氧化氯处理的仔姜也表现出类似的趋势, 二氧化氯处理后 SOD 活性保持在一个较高水平, 并且从第 8 d 开始一直到贮藏结束显著高于对照组($P<0.05$)。贮藏期间处理和未处理的仔姜 POD 活性均呈现先升高后下降的趋势, 并在 16 d 时达到峰值, 此时处理组 POD 活性为 $1311.3 \text{ U}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而对照组 POD 活性为 $1074.5 \text{ U}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在随后的贮藏中急速下降(图 6(b)), 同对照相比, 二氧化氯处理显著提高了仔姜在贮藏第 16~24 d 时的 POD 活性($P<0.05$)。如图 6(c)所示, 在整个贮藏期间, 对照组仔姜 CAT 活性在前 8 d 略微上升, 随后持续下降直到贮藏结束, 二氧化氯处理的仔姜同样表现出类似的趋势。如图 6(d)所示, 对照组仔姜样品的 APX 活性在贮藏期前 20 d 内稳定增加, 并在 20 d 达到峰值, 处理组 APX 活性在 20 d 时达到 $4.52 \text{ U}\cdot\text{kg}^{-1}$, 之后下降直到贮藏结束。对于 CAT 和 APX 而言, 处理组与对照组之间在整个贮藏期间并无显著差异。这些结果表明, ClO_2 处理诱导的 APX、CAT、SOD 和 POD 活性与仔姜的耐寒性有关。

3 讨论

随着贮藏时间的延长, 仔姜会逐渐腐烂霉变, 降低商品价值。研究结果表明, 采后二氧化氯处理减少

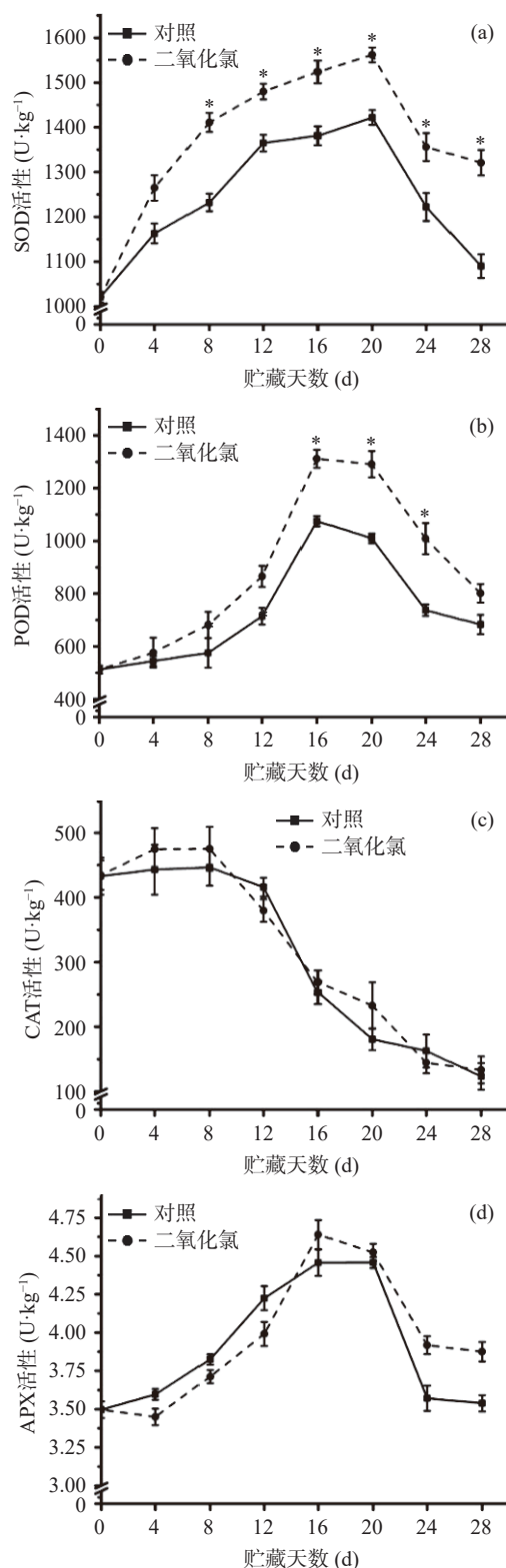


图 6 二氧化氯处理对仔姜抗氧化酶活性的影响

Fig.6 Effect of ClO_2 treatment on antioxidant enzyme activity of tender ginger

了仔姜腐烂率, 延缓了品质恶化并延长了仔姜的贮藏时间, 推测这可能是由于 ClO_2 抑制了病原菌的繁殖, 从而延缓了仔姜的腐烂。这些结果与之前使用二氧化氯处理抑制腐烂和软化的发生, 保持贡柑^[22]、荔枝^[23]和猕猴桃^[24]的采后品质的研究一致。

可溶性固形物含量是评估仔姜风味和营养品质

的主要化学物质,在果蔬成熟衰老的过程中逐渐降低^[25]。本研究中,仔姜在采后贮藏过程中 TSS 含量呈现出先下降,然后略有增加后再下降的趋势,外源二氧化氯处理明显延缓了可溶性固形物含量的下降。这与甄凤元等^[26]研究发现用 $0.57 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 二氧化氯处理杭白菜延缓了可溶性固形物含量的下降的结果一致。

仔姜在贮藏期间呼吸作用仍在继续,消耗有机酸和碳水化合物,贮藏期间和呼吸作用有关的氧化还原反应通过影响仔姜的能量代谢及氧化还原状态直接影响仔姜的成熟衰老^[27-28]。在本文的研究中,仔姜呼吸速率在整个贮藏期内先上升后下降,这一结果和赵治兵等^[29]的结论一致。与对照组相比,二氧化氯处理降低了仔姜的呼吸速率,这可能是由于二氧化氯诱导参与呼吸作用相关的酶,降低了果实呼吸强度,延缓了仔姜的成熟衰老。上述研究结果共同表明,二氧化氯可以抑制仔姜在贮藏期间的呼吸作用,进而延缓其在冷藏过程中理化品质劣化的发展和衰老速度。

研究表明,许多植物在衰老过程中会产生活性氧(ROS)及其他有害产物,活性氧积累会毒害植物细胞,此外活性氧失衡导致植物发生代谢紊乱,影响植物许多生理活动^[30]。脂质过氧化会导致细胞膜完整性和功能的丧失,被认为是导致果实采后衰老的主要因素,它可以促进果实腐烂并加重其代谢紊乱^[31]。MDA 是脂质过氧化的产物,是评估低温冷害膜损伤程度的一个重要指标。实验结果表明,随着贮藏时间的延长,细胞膜通透性增强,MDA 含量也随之升高, H_2O_2 含量先升高后下降。之前的研究也表明,二氧化氯处理可以通过抑制 ROS 的产生,从而保护细胞膜。在整个贮藏期间,二氧化氯处理显著降低了仔姜 MDA 和 H_2O_2 含量,有效减少了仔姜的氧化损伤。

植物体内抗氧化系统包括酶促和非酶的抗氧化系统,它们负责清除植物组织因生物和非生物胁迫产生的活性氧(ROS),维持植物体内活性氧代谢平衡。SOD、POD、CAT 和 APX 是植物中清除 ROS 主要的酶^[32-33]。SOD 能催化超氧阴离子生成氧,POD 以 H_2O_2 为底物,催化过氧化反应。本研究中, ClO_2 处理维持着较高水平的 SOD 活性,在整个贮藏期间,处理组的 SOD 活性除了第 4 d 外显著高于对照组。POD 活性在贮藏第 16 d 时达到峰值,在贮藏后期 ClO_2 明显提高了仔姜 POD 的活性,有效减少 H_2O_2 的积累。 ClO_2 处理组仔姜中 CAT 和 APX 的活性和对照组相比无显著差异,推测 ClO_2 可能并不通过提高 CAT 和 APX 的活性来减少 H_2O_2 的积累。Wu 等^[34]研究发现 NO 处理可以提高抗氧化酶活性,诱导抗氧化相关基因的表达从而增强香蕉果实的耐寒性,这说明抗氧化酶在活性氧代谢中发挥着十分重要的作用。综上所述,二氧化氯可以提高仔姜冷藏过程中抗氧化酶的活性,从而提高仔姜清除 ROS 的能力,延缓仔姜成熟衰老的过程。

4 结论

仔姜在采后贮藏过程中会逐渐失水,并且腐烂率升高,硬度降低,二氧化氯处理仔姜可以显著抑制仔姜腐烂率和呼吸速率,延缓仔姜可溶性固形物下降。另外二氧化氯还可以通过提高 SOD 和 POD 的活性,减少活性氧的积累,以及减轻膜脂过氧化程度,这说明二氧化氯可能是通过维持仔姜活性氧代谢平衡进而维持仔姜的贮藏品质。本研究为仔姜的贮藏保鲜提供了一定的理论依据。

参考文献

- [1] LÜ J Y, BAI L, HAN X Z, et al. Effects of 1-MCP treatment on sprouting and preservation of ginger rhizomes during storage at room temperature[J]. *Food Chemistry*, 2021, 349: 129004.
- [2] 刘继. 仔姜采后保鲜技术及病害防治措施研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2014: 1-9. [LIU J. Study on preservation technologies and control of pathogens during baby ginger storage period[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2014: 1-9.]
- [3] 游玉明, 汤洁, 张美霞, 等. 外源 24-表油菜素内酯调控仔姜活性氧及酚类代谢减轻冷害[J]. *食品科学*, 2021, 42(3): 273-280. [YOU Y M, TANG J, ZHANG M X, et al. 24-Epibrassinolide alleviates chilling injury in baby ginger rhizome by regulating active oxygen and phenolic metabolism[J]. *Food Science*, 2021, 42(3): 273-280.]
- [4] 付云云, 蒋成, 闫小倩, 等. 水杨酸处理对仔姜保鲜效果的影响[J]. *食品与机械*, 2019, 35(4): 157-162. [FU Y Y, JIANG C, YAN X Q, et al. Effect of salicylic acid treatment on fresh-keeping of baby gingers[J]. *Food & Machinery*, 2019, 35(4): 157-162.]
- [5] 颜强, 侯颖辉, 陈静忠, 等. 仔姜贮藏与泡制技术研究进展[J]. *保鲜与加工*, 2021, 21(6): 127-131. [YAN Q, HOU Y H, CHEN J Z, et al. Research progress on storage and processing technology of young ginger (*Zingiber officinale*)[J]. *Storage and Process*, 2021, 21(6): 127-131.]
- [6] 张曼, 李喜宏, 李伟丽, 等. 1-MCP 对低温胁迫下鲜姜的生理调控效果[J]. *食品科学*, 2012, 33(18): 303-306. [ZHANG M, LI X H, LI W L, et al. Effect of 1-methylcyclopropene on physiological regulation of fresh ginger under cold stress[J]. *Food Science*, 2012, 33(18): 303-306.]
- [7] MU Y W, FENG Y Q, WEI L J, et al. Combined effects of ultrasound and aqueous chlorine dioxide treatments on nitrate content during storage and postharvest storage quality of spinach (*Spinacia oleracea* L.)[J]. *Food Chemistry*, 2020, 333: 127500.
- [8] MA Y P, LI P, WATKINS C B, et al. Chlorine dioxide and sodium diacetate treatments in controlled atmospheres retard mold incidence and maintain quality of fresh walnuts during cold storage[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 161: 111063.
- [9] CHEN Z, ZHU C H. Combined effects of aqueous chlorine dioxide and ultrasonic treatments on postharvest storage quality of plum fruit (*Prunus salicina* L.)[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2011, 61: 117-123.
- [10] CHUMYAM A, SHANK L, FAIYUE B, et al. Effects of chlorine dioxide fumigation on redox balancing potential of antioxidative ascorbate-glutathione cycle in 'Daw' longan fruit during storage[J]. *Scientia Horticulturae*, 2017, 222: 76-83.
- [11] 余璐璐, 曹中权, 朱秋杰, 等. 二氧化氯在草莓采后保鲜中的

- 作用[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(4): 343–346. [YU L L, CAO Z Q, ZHU Q J, et al. Role of chlorine dioxide in post-harvest preservation of strawberries[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016, 44(4): 343–346.]
- [12] 张方艳, 朱桂兰, 郭娜, 等. 二氧化氯和羧甲基纤维素联合处理对中华猕猴桃保鲜效果的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(15): 196–201. [ZHANG F Y, ZHU G L, GUO N, et al. Effects of chlorine dioxide and carboxymethyl cellulose on preserving *Actinidia chinensis* [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(15): 196–201.]
- [13] 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 F N, LI W Y, LUO P S, 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.]
- [14] 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: 109009.
- [15] 杜美军, 张鲜桃, 刘震远, 等. 1-MCP 与脉冲重硫联合调控四川仔姜保鲜效果研究[J]. *中国调味品*, 2021, 46(3): 7–10. [DU M J, ZHANG X T, LIU Z Y, et al. Research on the effect of 1-MCP and pulse sulfur fumigation on the preservation of Sichuan tender ginger[J]. *China Condiment*, 2021, 46(3): 7–10.]
- [16] CHEN Y R, GE Y H, ZHAO J R, et al. Postharvest sodium nitroprusside treatment maintains storage quality of apple fruit by regulating sucrose metabolism[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 154: 115–120.
- [17] 张静, 王淑贞, 杨娟侠. 鲜姜贮藏保鲜技术[J]. *保鲜与加工*, 2002(6): 34. [ZHANG J, WANG S Z, YANG J X. Fresh ginger storage and preservation technology[J]. *Storage and Process*, 2002(6): 34.]
- [18] CHEN L L, SHAN W, CAI D L, et al. Postharvest application of glycine betaine ameliorates chilling injury in cold-stored banana fruit by enhancing antioxidant system[J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 287: 110264.
- [19] DU H Y, LIU G T, HUA C M, et al. Exogenous melatonin alleviated chilling injury in harvested plum fruit via affecting the levels of polyamines conjugated to plasma membrane[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 179: 111585.
- [20] YAO M M, GE W Y, ZHOU Q, et al. Exogenous glutathione alleviates chilling injury in postharvest bell pepper by modulating the ascorbate-glutathione (AsA-GSH) cycle[J]. *Food Chemistry*, 2021, 352: 129458.
- [21] MITTLER R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance[J]. *Trends in Plant Science*, 2002, 7(9): 405–410.
- [22] 徐呈祥, 郑福庆, 马艳萍, 等. 二氧化氯处理对贡柑采后贮藏品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(3): 201–206. [XU C X, ZHENG F Q, MA Y P, et al. Effect of chlorine dioxide on the quality of Gonggan mandarin fruits during postharvest storage[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(3): 201–206.]
- [23] 郭芹, 张玉丽, 王吉德, 等. 二氧化氯处理对荔枝采后贮藏品质的影响[J]. *食品科技*, 2013, 38(6): 46–50–53. [GUO Q, ZANG Y L, WANG J D, et al. Effect of chlorine dioxide treatment on postharvest quality of litchi fruit[J]. *Food Science and Technology*, 2013, 38(6): 46–50–53.]
- [24] 王亚萍, 郭叶, 费学谦. 二氧化氯处理对“徐香”猕猴桃贮藏品质的影响[J]. *西北林学院学报*, 2014, 29(3): 151–154. [WANG Y P, GUO Y, FEI X Q, et al. Impact of chlorine dioxide treatment on preservation quality of kiwifruit[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2014, 29(3): 151–154.]
- [25] 申小静. 气体二氧化氯对鲜枣的杀菌保鲜研究[D]. 太原: 中北大学, 2010. [SHEN X J. The preservation and sterilization for china jujube by chlorine dioxide gas[D]. Taiyuan: Zhongbei University, 2010.]
- [26] 甄凤元, 乔勇进, 高春霞, 等. 二氧化氯气体处理对抗白菜贮藏品质的影响[J]. *核农学报*, 2017, 31(7): 1323–1329. [ZHEN F Y, QIAO Y J, GAO C X, et al. Effect of chlorine dioxide gas on preservation of Hangzhou cabbage[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(7): 1323–1329.]
- [27] ZHANG W L, ZHAO H D, JIANG H T, et al. Multiple 1-MCP treatment more effectively alleviated postharvest nectarine chilling injury than conventional one-time 1-MCP treatment by regulating ROS and energy metabolism[J]. *Food Chemistry*, 2020, 330: 127256.
- [28] HUANG H, GUO L F, WANG L, et al. 1-Methylcyclopropene (1-MCP) slows ripening of kiwifruit and affects energy status, membrane fatty acid contents and cell membrane integrity[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 156: 110941.
- [29] 赵治兵, 刘永玲, 李莹, 等. 二氧化氯浓度对翠红李贮藏品质的影响[J]. *食品与机械*, 2021, 37(8): 153–157. [ZHAO Z B, LIU Y L, LI Y, et al. Effect of chlorine dioxide concentration on storage quality of Cuihong pium[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(8): 153–157.]
- [30] ZHANG Z, XU J, CHEN Y, et al. Nitric oxide treatment maintains postharvest quality of table grapes by mitigation of oxidative damage[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 152: 9–18.
- [31] GAO H, LU Z M, YANG Y, et al. Melatonin treatment reduces chilling injury in peach fruit through its regulation of membrane fatty acid contents and phenolic metabolism[J]. *Food Chemistry*, 2018, 245: 659–666.
- [32] RABIEI V, KAKAVAND F, ZAARE-NAHANDI F, et al. Nitric oxide and γ -aminobutyric acid treatments delay senescence of cornelian cherry fruits during postharvest cold storage by enhancing antioxidant system activity[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 243: 268–273.
- [33] HUAN C, AN X J, YU M L, et al. Effect of combined heat and 1-MCP treatment on the quality and antioxidant level of peach fruit during storage[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2018, 145: 193–202.
- [34] WU B, GUO Q, LI Q P, et al. Impact of postharvest nitric oxide treatment on antioxidant enzymes and related genes in banana fruit in response to chilling tolerance[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2014, 92: 157–163.