



李文瀚,刘紫韡,姜瑜倩,等. 臭氧处理对红灯樱桃保鲜效果的影响[J]. 轻工学报,2025,40(1):0-0.
LI W H,LIU Z Y,JIANG Y Q,et al. Effect of ozone treatment on postharvest preservation of Hongdeng cherries [J]. Journal of Light Industry,2025,40(1):0-0 DOI:10.12187/2025.01.000

臭氧处理对红灯樱桃保鲜效果的影响

李文瀚¹,刘紫韡¹,姜瑜倩¹,李喜宏¹,班兆军²

1. 天津科技大学 食品科学与工程学院,天津 300457;
2. 浙江科技学院 生物与化学工程学院,浙江 杭州 310023

摘要: 以市售红灯樱桃(九成熟)为研究对象,经低、中、高3种质量浓度臭氧处理后,分析其低温贮藏期间各理化指标和超微结构变化情况,探究臭氧处理对红灯樱桃保鲜效果的影响。结果表明:不同质量浓度臭氧处理均能有效改善红灯樱桃的贮藏品质,延缓红灯樱桃贮藏期间腐烂率的上升,降低细胞膜脂过氧化产物丙二醛(MDA)的累积,减缓硬度下降,提高花青素含量和抗氧化酶活性。与对照组相比,贮藏末期中等质量浓度(6.39 mg/m³)臭氧处理后的腐烂率降低了76.19%,硬度提高了36.46%,色差(ΔE)和MDA含量维持在69.45和6.83 $\mu\text{mol/g}$ FW,花青素含量增加至0.581 $\Delta\text{OD/g}$,超氧化物歧化酶(SOD)活性提高至69.31 U/g;同时,可诱导红灯樱桃果皮气孔缩小,有效控制果实水分流失,并通过延缓细胞壁降解,维持细胞组织结构,最终达到提高红灯樱桃贮藏品质、延长市场供应期、提高经济效益的目的。

关键词: 红灯樱桃;臭氧处理;低温贮藏;保鲜效果

中图分类号: TS255.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-1553(2025)01-0000-00

0 引言

红灯樱桃(*Prunus pseudocerasus* Lindl.)因其果肉酸甜可口、细腻多汁,风味浓郁清香,色泽娇艳亮丽,广受消费者喜爱,常被作为高档精品水果礼盒的首选果品,且在世界贸易市场中具有非常高的商品价值^[1]。然而,红灯樱桃采摘后除自然衰老导致的品质下降之外,还因自身果皮薄嫩、果肉柔软多汁等生物特性,在贮藏、运输和销售过程中极易出现机械损伤,引发微生物侵染,进而造成腐败变质,这使得红灯樱桃的贮藏期和货架期难以满足市场

需求^[2]。因此,延长红灯樱桃保鲜期成为其产业发展的难题之一,亟需寻找具有实际应用效果的保鲜方法,以改善红灯樱桃产业现状并提高其商品价值和经济效益。

红灯樱桃的保鲜方式主要包括物理保鲜(如低温贮藏、臭氧处理等)、生物保鲜和化学保鲜。其中,低温贮藏可能导致红灯樱桃果实发生冷害,影响其贮藏品质;生物保鲜中的植物提取物常因提取质量不稳定,导致保鲜效果不理想^[3];化学保鲜方法,如二氧化硫熏蒸^[4]、水杨酸浸泡^[5]、1-甲基环丙烯(1-methylcyclopropene, 1-MCP)熏蒸^[6]、褪黑素

收稿日期:2024-02-29;修回日期:2024-08-05;出版日期:2025-02-15

基金项目:山东省重点研发计划项目(2021CXGC010809);天津科技大学优秀博士学位论文创新资助项目(YB2023008)

作者简介:李文瀚(1995—),男,天津市人,天津科技大学博士研究生,主要研究方向为农产品加工与贮藏工程。E-mail: lwhzero129@163.com

通信作者:姜瑜倩(1987—),女,天津市人,天津科技大学副教授,博士,主要研究方向为农产品加工与贮藏工程。E-mail: Jiangyuqian@tust.edu.cn



(Melatonin, MT) 浸泡^[7]等,虽然保鲜效果显著,但通常会残留较高的化学药剂,难以满足消费者绿色、无残留的饮食需求。相比之下,臭氧作为一种强氧化剂气体,早在2001年就被美国食品药品监督管理局批准为可直接接触食品的抗菌添加剂^[8],其能够在无任何残留物的情况下自动分解为氧气,无毒副作用且效果稳定,可为红灯樱桃保鲜提供一种更安全、环保和有效的选择。臭氧处理作为新兴的物理保鲜方法,通过氧原子的氧化作用来破坏微生物的膜结构,进而达到杀菌的目的^[9]。与其他保鲜方法不同,在臭氧处理过程中,臭氧对细菌的灭活反应迅速,能与细菌细胞壁的脂类双键发生反应而进入细菌内部,作用于蛋白质和脂多糖,改变细胞的通透性,最终导致细菌死亡^[10];同时,臭氧还可作用于细菌细胞内的核物质(如核酸中的嘌呤和嘧啶),破坏DNA^[11-12]。目前,臭氧处理在猕猴桃^[13]、蓝莓^[14]、草莓^[15]等的保鲜中已取得较好的应用效果。例如,V. Goffi等^[16]研究发现,臭氧处理有助于延缓猕猴桃软化和叶绿素降解,且能有效抑制微生物生长和糖含量降低,进而有效保持果实在贮藏期的整体品质。Q. Han等^[17]通过分析黑桑椹果实细胞的超微结构和细胞壁成分,发现臭氧和预冷结合处理可引起表皮气孔收缩,达到抑制细菌入侵、减少水分蒸发、延缓细胞壁分解和组织降解的目的。P. Sarig等^[18]研究发现,臭氧处理除具有杀菌作用之外,还能诱导果实抗病基因的表达。近年来,臭氧处理被广泛应用于果蔬采后防腐保鲜领域,但有关臭氧处理对红灯樱桃采后保鲜效果的影响研究仍较少。

基于此,本文拟以红灯樱桃为研究对象,系统分析其低温贮藏期间各理化指标和超微结构,研究低、中、高3种臭氧质量浓度处理下红灯樱桃的保鲜效果,以期为红灯樱桃产业寻找实用性强、效果佳的简易保鲜手段,同时为臭氧在果蔬采后保鲜中的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

红灯樱桃(九成熟),购于天津市滨海新区金元

宝农贸市场,购买当日剔除次果,挑选色泽、成熟度、硬度等相近的果实,于步入式冷库(0 ± 0.5) $^{\circ}\text{C}$)中预冷24 h后,分装,备用。甲醇、戊二醛、硝基蓝四唑(NBT)、核黄素、三氯乙酸(TCA),上海吉至生化科技有限公司;HCl、乙醇、丙酮、硫代巴比妥酸(TBA),北京索莱宝科技有限公司。以上试剂均为分析纯。

1.2 主要仪器与设备

一体式臭氧发生片(3.5 g/h),郑州益源天泽环境科技有限公司;臭氧气体含量检测管($0.3 \sim 10.0 \text{ mg/m}^3$),上海会彬仪器有限公司;HP-200型精密色差仪,上海汉普光电科技有限公司;GY-4型数显果实硬度计,乐清市精诚仪器仪表有限公司;Alpha-1506型紫外-可见分光光度计,上海普元仪器有限公司;Centrifuge5804R型冷冻离心机,德国艾本德(Eppendorf)公司;WY060 T型手持折光仪,日本(ATAGO)株式会社;C21-SN216型多功能电磁炉,美的生活电器制造有限公司;FD-1A-50型冷冻干燥机,上海比朗仪器制造有限公司;SU1510型扫描电子显微镜,日本(Hitachi)日立高科技公司;IB-5型离子溅射仪,北京天瑞仪器有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 臭氧处理 将红灯樱桃分组放入臭氧熏蒸一体箱中,通过调节一体式臭氧发生片的工作时间,实现低(4.26 mg/m^3)、中(6.39 mg/m^3)、高(8.52 mg/m^3)3种臭氧质量浓度(质量浓度梯度比为1.0:1.5:2.0)的控制,并使用臭氧气体含量检测管对臭氧质量浓度进行检测。具体步骤如下:将红灯樱桃分别置于低、中、高3种臭氧质量浓度下处理30 min,分别记为T1、T2和T3处理组,再与对照(CK)组红灯樱桃分别装至保鲜盒(185 mm \times 120 mm \times 80 mm)中^[11],随后置于温度为(0 ± 0.5) $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为80%~85%的步入式冷库中贮藏,每隔3 d取样检测1次,以评估臭氧处理对红灯樱桃保鲜效果的影响。

1.3.2 腐烂率测定 分别对每组红灯樱桃的总数和腐烂数(烂斑直径 $\geq 3 \text{ mm}$)进行计数,并按下式计算腐烂率^[19]:

$$\text{腐烂率} = \frac{\text{腐烂樱桃数}}{\text{总樱桃数}} \times 100\%$$



1.3.3 色泽测定 利用精密色差仪,测定樱桃腰间表皮光滑处的 L^* (亮度值)、 a^* (红绿值)和 b^* (黄蓝值),每个样品选3个点,结果取平均值;将所得结果与标准颜色 ($L^* = 97, a^* = -2, b^* = 0$) 进行对比,按下式计算色差 (ΔE , 表示红灯樱桃的色泽变化, ΔE 越大,色泽保持越好,反之,则越差)^[20]:

$$\Delta E = \sqrt{((L^* - 97)^2 + (a^* + 2)^2 + (b^*)^2)}$$

1.3.4 硬度测定 以数显果实硬度计3~4 s 内的平均阻力来表示红灯樱桃硬度^[21]。

1.3.5 可溶性固形物 (SSC) 含量测定 使用手持折光仪测定红灯樱桃的 SSC 含量^[22]。

1.3.6 花青素含量测定 参照曹建康等^[23]的方法,取2 g 红灯樱桃果肉,加入1 mL 1% (如无特殊说明,百分号均指体积分数)的盐酸-甲醇溶液,在冰水浴条件下研磨成匀浆后,置于20 mL 刻度试管中,再用1%盐酸-甲醇溶液定容,于4 ℃条件下避光静置20 min;取滤液,分别于波长530 nm 和600 nm 处测定吸光度,按下式计算花青素含量,单位为 $\Delta OD/g$ 。

$$\text{花青素含量} = (OD_{530} - OD_{600})$$

1.3.7 丙二醛 (MDA) 含量测定 参照林艳等^[24]的方法,稍加修改。称取1 g 红灯樱桃果肉于研钵中,加入5 mL 10%的TCA溶液和少量石英砂,研磨成匀浆后,于4 ℃、10 000 r/min 条件下离心20 min;取2 mL 上清液,加入2 mL 0.6%的TBA溶液,混匀后,在沸水浴中煮沸20 min,冷却后,于4 ℃、10 000 r/min 条件下离心20 min;取上清液,采用紫外-可见分光光度计分别测定波长450 nm、532 nm 和600 nm 处的吸光度。按下式计算MDA含量,单位为 $\mu\text{mol/g FW}$ 。

$$MDA = \frac{6.45(OD_{532} - OD_{600}) - 0.56 OD_{450} \times V_{\text{总}}}{V \times m \times 1000}$$

式中, $V_{\text{总}}$ 为样品提取液总体积/mL; V 为测定时所取样品提取液体积/mL; m 为样品鲜重/g。

1.3.8 超氧化物歧化酶 (SOD) 活性测定 参照田竹希等^[25]的方法,稍加修改。反应底物为超氧阴离子自由基 ($O_2^{\cdot -}$),向反应体系中依次加入3 mL 0.05 mol/L 的磷酸盐缓冲液 (pH 值为7.8),0.6 mL 0.13 mol/L 的甲硫氨酸溶液,0.6 mL 100 $\mu\text{mol/L}$ 的

二钠乙二胺四乙酸 (EDTA-2Na) 溶液,0.6 mL 20 $\mu\text{mol/L}$ 的核黄素溶液,0.6 mL 750 $\mu\text{mol/L}$ 的NBT溶液,0.4 mL 蒸馏水,0.2 mL 50 $\mu\text{mol/L}$ 的SOD酶液,混匀。用蒸馏水调零,测定560 nm 处的吸光度。以抑制反应50%的酶液量为1个酶活单位。

1.3.9 超微结构表征 在贮藏第18 d,分别从各组中选取3颗红灯樱桃,用刀片在果实腰间切割取长×宽×高约为3.5 mm×2.5 mm×1.0 mm 的样品,投入体积分数为3%的戊二醛溶液 (pH 值为6.8) 中,固定4 h;取出,依次经磷酸盐缓冲液漂洗和梯度乙醇脱水后,用醋酸异戊酯处理1 h,于冷冻干燥机中干燥24 h;用导电胶将冻干后的样品固定在扫描电子显微镜样品台上,并通过离子溅射仪为样品镀金属薄层,于7 kV 下观察超微结构 (放大500倍) 并捕获成像^[26]。

1.3.10 细胞壁物质含量测定 参照缪颖等^[27]的方法,稍加修改。取1 g 冻干样品研磨成粉末状,加入6 mL 冰乙醇,于冰浴中静置20 min;在4 ℃、3000 r/min 条件下离心20 min,依次用4 mL 冰丙酮、4 mL 甲醇-氯仿 ($V(\text{甲醇}):V(\text{氯仿}) = 1:1$)、4 mL 甲醇抽提沉淀物,冷冻干燥后,精确称量样品质量,计算其与初始质量的比值,即得细胞壁物质含量。

1.4 数据处理

利用SPSS 22 统计分析软件对所得数据进行处理,结果以 (平均值±标准差) 表示,通过t 检验方法进行差异显著性分析,图表中不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 时,具有显著性差异。采用Origin 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 臭氧处理对红灯樱桃理化指标的影响

2.1.1 对红灯樱桃视觉属性的影响 红灯樱桃贮藏期间的品质会逐渐下降,形貌形态也会逐渐劣化。臭氧处理对红灯樱桃视觉属性的影响如图1所示。由图1可知,当贮藏第18 d时,CK组已出现严重腐烂情况,而臭氧处理组仍能保持较好的外貌形态,无明显腐烂现象发生。当贮藏第12 d时,各臭



氧处理组均已出现肉眼可见的差异,其中,T2处理组的外貌形态维持在较好的状态。这可能是因为臭氧的氧化作用能有效抑制红灯樱桃表面微生物的生长,诱导表皮气孔缩小,减少水分蒸发和养分消耗。此外,臭氧产生的负氧离子具有较强的穿透力,可阻碍糖代谢,减缓红灯樱桃的代谢进程,进而延长其保鲜期^[28]。

2.1.2 对红灯樱桃腐烂率的影响 臭氧处理对红灯樱桃腐烂率的影响如图2所示。由图2可知,臭氧处理组的腐烂率显著低于CK组($P<0.05$),且当贮藏第3d时,各臭氧处理组的腐烂率均为0,仍未

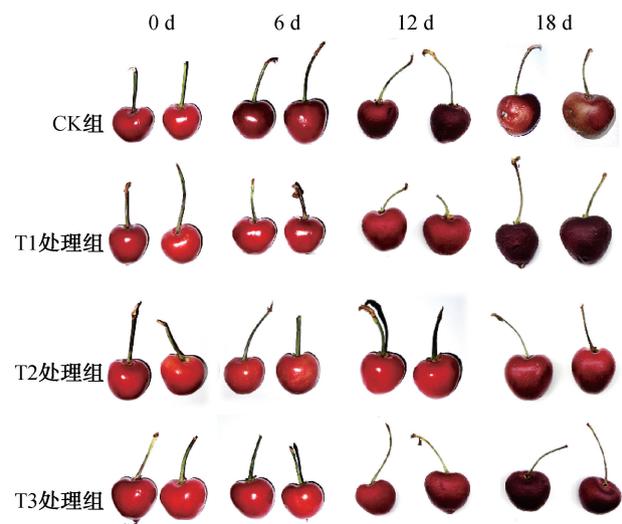


图1 臭氧处理对红灯樱桃视觉属性的影响

Fig. 1 Effect of ozone treatment on the visual properties in Hongdeng cherries

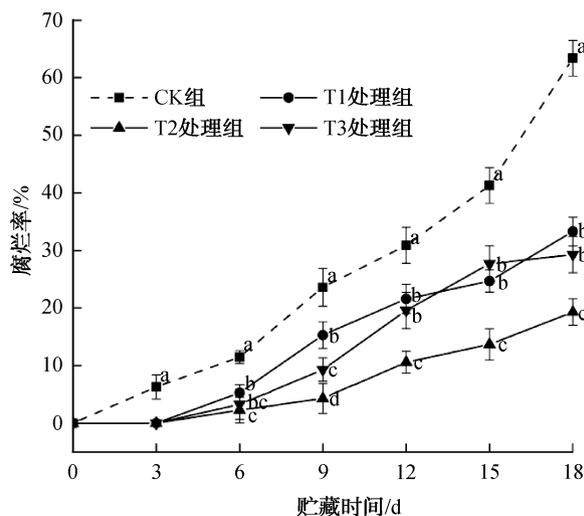


图2 臭氧处理对红灯樱桃腐烂率的影响

Fig. 2 Effect of ozone treatment on the rate of decay in Hongdeng cherries

出现腐烂现象。与之相反,CK组的腐烂率呈逐渐升高状态。此外,红灯樱桃的腐烂率与臭氧质量浓度之间没有相关性。与T1和T3处理组相比,T2处理组对红灯樱桃腐烂现象表现出更强的抑制作用。这可能是因为臭氧的强氧化性导致高质量浓度的臭氧在破坏微生物细胞的同时,也容易对果蔬表皮细胞造成一定的损伤^[28]。因此,适宜质量浓度的臭氧处理可延缓红灯樱桃腐烂现象的发生。

2.1.3 对红灯樱桃色泽、硬度和SSC含量的影响

色泽是果蔬成熟的主要外观特征,常作为消费者的购买评判标准之一^[29]。臭氧处理对红灯樱桃的色泽、硬度和SSC含量的影响见表1。由表1可知,随着贮藏时间的延长, ΔE 整体呈逐渐下降的趋势,其中,CK组的 ΔE 下降程度比臭氧处理组更为明显,而T2处理组的 ΔE 下降程度最小。因此,臭氧处理对红灯樱桃的色泽影响较小,这可能与红灯樱桃自身颜色明显及富含抗氧化活性物质有关。

硬度是描述果蔬品质的重要指标之一^[24]。由表1可知,贮藏第3d,臭氧处理组与CK组的硬度差异不明显,但贮藏18d后,臭氧处理组与CK组的

表1 臭氧处理对红灯樱桃的色泽、硬度和SSC含量的影响

Table 1 Effects of ozone treatment on color, hardness and SSC content in Hongdeng cherries

指标	贮藏时间/d	CK组	T1处理组	T2处理组	T3处理组
ΔE	0	70.15±0.12 ^a	70.15±0.12 ^a	70.15±0.12 ^a	70.15±0.12 ^a
	3	69.57±0.07 ^d	69.87±0.21 ^a	70.13±0.17 ^b	70.01±0.33 ^c
	6	69.23±0.33 ^a	69.46±0.15 ^c	70.02±0.14 ^d	69.97±0.34 ^b
	9	68.56±0.29 ^{bc}	69.01±0.27 ^a	69.87±0.13 ^b	69.59±0.17 ^d
	12	68.38±0.19 ^d	68.97±0.13 ^a	69.65±0.14 ^b	69.45±0.22 ^c
	15	68.16±0.19 ^c	68.49±0.19 ^b	69.49±0.19 ^b	69.23±0.19 ^a
18	68.06±0.03 ^a	68.35±0.04 ^b	69.45±0.03 ^d	69.01±0.05 ^c	
硬度/ N	0	11.52±0.06 ^a	11.52±0.06 ^a	11.52±0.06 ^a	11.52±0.06 ^a
	3	10.26±0.05 ^c	10.39±0.01 ^b	10.36±0.03 ^b	10.38±0.05 ^a
	6	9.13±0.03 ^a	9.12±0.04 ^b	10.19±0.03 ^d	9.87±0.05 ^c
	9	8.98±0.04 ^b	8.72±0.05 ^c	9.56±0.05 ^a	9.36±0.05 ^c
	12	6.28±0.05 ^d	7.57±0.07 ^b	8.76±0.06 ^c	8.01±0.05 ^a
	15	5.99±0.03 ^a	6.72±0.02 ^{cd}	8.32±0.02 ^d	7.39±0.01 ^d
18	5.87±0.03 ^a	6.54±0.02 ^c	8.01±0.02 ^{bc}	7.23±0.01 ^b	
SSC 含量/ %	0	13.96±0.11 ^a	13.96±0.11 ^a	13.96±0.11 ^a	13.96±0.11 ^a
	3	14.03±0.10 ^d	14.13±0.10 ^a	14.56±0.11 ^c	14.36±0.11 ^b
	6	15.98±0.10 ^a	15.87±0.08 ^b	15.92±0.09 ^d	15.96±0.10 ^c
	9	14.28±0.09 ^a	14.26±0.11 ^a	15.37±0.10 ^c	15.01±0.11 ^b
	12	13.02±0.12 ^a	13.98±0.10 ^b	14.34±0.10 ^c	14.68±0.10 ^b
	15	12.56±0.03 ^a	12.50±0.02 ^{cd}	14.09±0.02 ^d	13.60±0.01 ^d
18	10.93±0.03 ^a	12.34±0.02 ^c	13.77±0.02 ^{bc}	13.08±0.01 ^b	



硬度差异显著($P < 0.05$),且 T2 处理组保持了较高的硬度水平。整个贮藏期间,T1 处理组的硬度变化较小;在贮藏第 6 d,T1 处理组的硬度与 CK 组相近,贮藏第 9 d 甚至出现略低于 CK 组的情况。因此,臭氧处理可能对红灯樱桃具有质量浓度使用阈值,适宜质量浓度的臭氧处理有助于红灯樱桃采后硬度的保持。

SSC 也是直观反映果蔬品质状况的重要指标之一^[29]。由表 1 可知,在贮藏 18 d 内,SSC 含量呈先升高后降低的趋势,这可能是因为在贮藏过程中,属非呼吸跃变型的红灯樱桃,经呼吸作用使不溶性糖类及相关蛋白质类物质分解而溶出;当呼吸强度达到最高时,SSC 的分解与合成形成动态平衡状态,此时 SSC 含量达到最大值;随后,因红灯樱桃自身的衰老及外界致病菌的侵染,SSC 含量开始逐渐降低,这与田竹希等^[25]的研究结果较一致。在贮藏后期,因红灯樱桃中相关酶催化作用的增强及微生物的大量繁殖,糖、酸等有机物逐渐分解,SSC 含量逐渐降低,而臭氧处理可有效延缓红灯樱桃中 SSC 含量下降,进而使营养物质累积。

2.1.4 对红灯樱桃花青素含量的影响 花青素是当今人类已知较有效的抗氧化剂和自由基清除剂,其抗氧化性能比维生素 E 高 50 倍,比维生素 C 高 20 倍,且随着果蔬成熟度的日益提高,其在果蔬中的含量逐渐增加^[30]。臭氧处理对红灯樱桃花青素含量的影响如图 3 所示。由图 3 可知,花青素含量整体呈先快速上升后缓慢下降的趋势,且臭氧处理组的花青素含量显著高于 CK 组($P < 0.05$),因此,臭氧处理有助于花青素合成或减缓其降解。当贮藏第 9 d 时,花青素含量达到峰值,这表明红灯樱桃已接近完全成熟状态,为最佳食用期。该结论可为实际生产和消费者日常采买提供理论参考。当贮藏第 18 d 时,T2 处理组延缓红灯樱桃花青素降解并促进其合成的效果最佳。因此,适宜质量浓度的臭氧处理可促进花青素的累积。

2.1.5 对红灯樱桃 MDA 含量的影响 MDA 可与蛋白质、核酸反应,改变这些大分子的构型或使之发生交联反应,进而使细胞丧失生物功能^[30]。因此,MDA 的累积会对果蔬细胞质膜和细胞器造成一

定的伤害,抑制其累积是解决果蔬采后贮藏保鲜的难题之一。臭氧处理对红灯樱桃 MDA 含量的影响如图 4 所示。由图 4 可知,随着贮藏时间的延长,MDA 含量呈上升的趋势,且臭氧处理组的 MDA 含量显著低于 CK 组($P < 0.05$)。这表明臭氧处理能够有效延缓细胞膜脂的过氧化进程。值得注意的是,虽然贮藏前期脂质过氧化反应不断加剧,但贮藏 12 d 后,MDA 含量的增长速率逐渐减缓或呈下降的趋势,这可能是由组织内清除活性氧的机制被启动并对逆境产生应对措施所致。

2.1.6 对红灯樱桃 SOD 活性的影响 SOD 能够清除 $O_2^{\cdot -}$,常与过氧化物酶(POD)等物质协同作用来防御活性氧(ROS)或其他过氧化物自由基对细胞膜系统的伤害。由于 $O_2^{\cdot -}$ 非常不稳定,寿命极

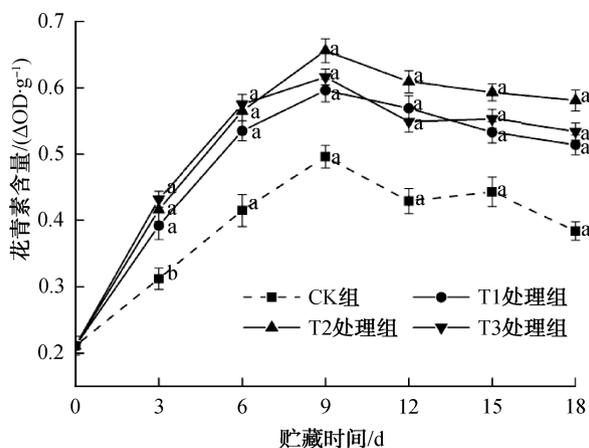


图 3 臭氧处理对红灯樱桃花青素含量的影响
Fig. 3 Effect of ozone treatment on the rate of anthocyanin content in Hongdeng cherries

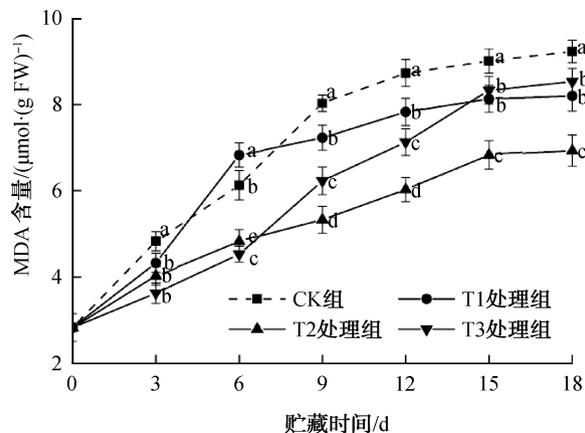


图 4 臭氧处理对红灯樱桃 MDA 含量的影响
Fig. 4 Effect of ozone treatment on the rate of MDA content in Hongdeng cherries



短,所以一般利用间接方法测定 SOD 活性^[31]。臭氧处理对红灯樱桃 SOD 含量的影响如图 5 所示。由图 5 可知,随着贮藏时间的延长,臭氧处理组的 SOD 活性较 CK 组显著提高($P<0.05$),其中,T3 处理组的 SOD 活性提高最为显著($P<0.05$)。然而,在贮藏第 18 d,T3 处理组已不能保持 SOD 的高活性,而 T1 和 T2 处理组使 SOD 活性维持在较高水平,特别是 T2 处理组的 SOD 活性显著高于 CK 组($P<0.05$)。这可能是因为臭氧处理通过氧化作用抑制了红灯樱桃表面及贮藏环境中微生物的生长,从而有效延缓了红灯樱桃生理代谢活动及后熟、老化等进程。因此,适宜质量浓度的臭氧处理对红灯樱桃的贮藏品质具有积极作用。

2.2 臭氧处理对红灯樱桃细胞结构的影响

2.2.1 对红灯樱桃表皮气孔和果肉组织超微结构的影响

CK 组和臭氧处理组表皮气孔和果肉组织的 SEM 图如图 6 所示。由图 6a)可知,CK 组表皮气孔已完全打开,开口大且深,同时果肉组织结构变形严重,存在大量塌陷现象。由图 6b)和 d)可知,臭氧处理组的气孔均表现出较为正常的功能性形态,呈椭圆形,果肉组织呈疏松空隙结构,塌陷皱缩现象不明显。其中,T2 处理组表皮气孔开口较小,这可能是因为臭氧处理对红灯樱桃表皮气孔产生了有效刺激,诱导气孔缩小。而气孔缩小有利于红灯樱桃水分的保持,且可抑制微生物对果肉的侵害,进而延缓红灯

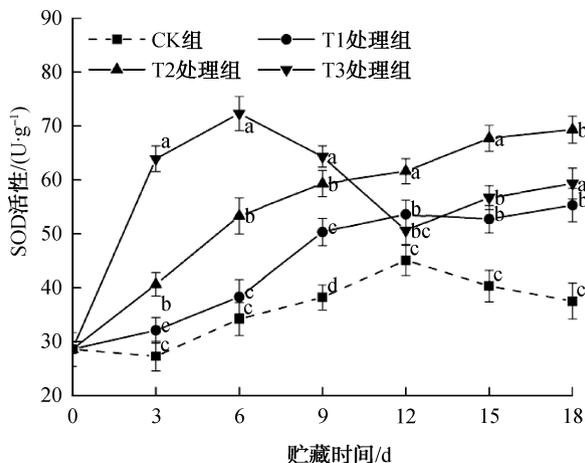


图 5 臭氧处理对红灯樱桃 SOD 含量的影响

Fig. 5 Effect of ozone treatment on the SOD content in Hongdeng cherries

樱桃腐烂。同时,臭氧处理对组织微观结构也产生了积极影响(见图 6b-2)。在贮藏第 18 d,T2 处理组果肉组织的总体排列较 CK 组更规则有序,有效维持了果肉组织原有形态。因此,适宜质量浓度的臭氧处理有利于保持果肉组织的微观结构。

2.2.2 对红灯樱桃细胞壁物质含量的影响

细胞壁为红灯樱桃生长发育过程提供了结构框架物质,该物质含量对红灯樱桃的物理特性有不同程度的影响,间接决定着红灯樱桃的贮藏品质^[31]。臭氧处理对红灯樱桃细胞壁物质含量的影响如图 7 所示。由图 7 可知,随着贮藏时间的延长,细胞壁物质含量呈逐渐下降的趋势。其中,T2 处理组的细胞壁物质含量显著高于 CK 组($P<0.05$)。这表明臭氧处理可有效抑制红灯樱桃细胞壁的分解,进而延缓其果肉软化。该结果与上文超微结构相一致。

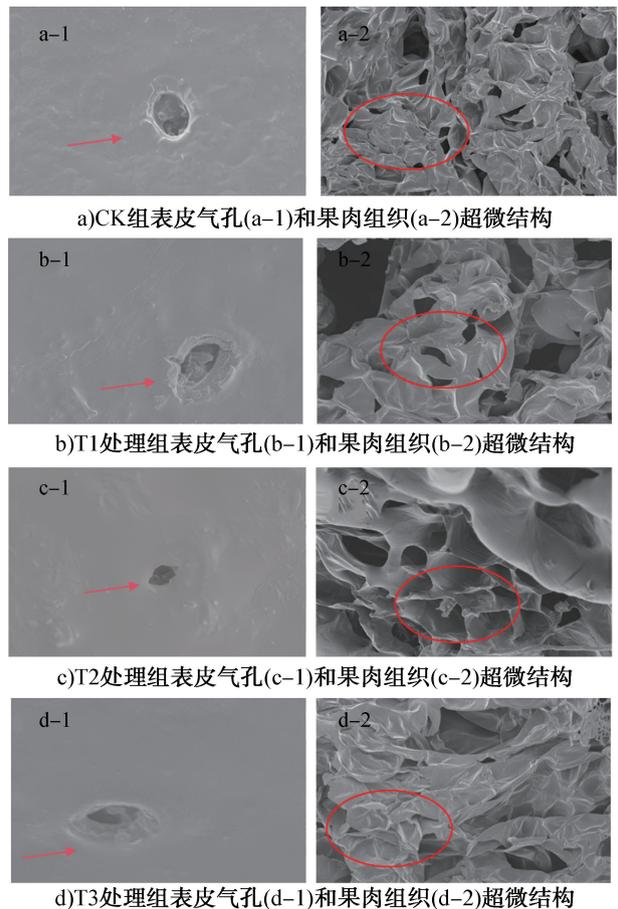


图 6 CK 组和臭氧处理组表皮气孔和果肉组织的 SEM 图

Fig. 6 Ultrastructural scanning electron microscope observation results of CK group and treatment group

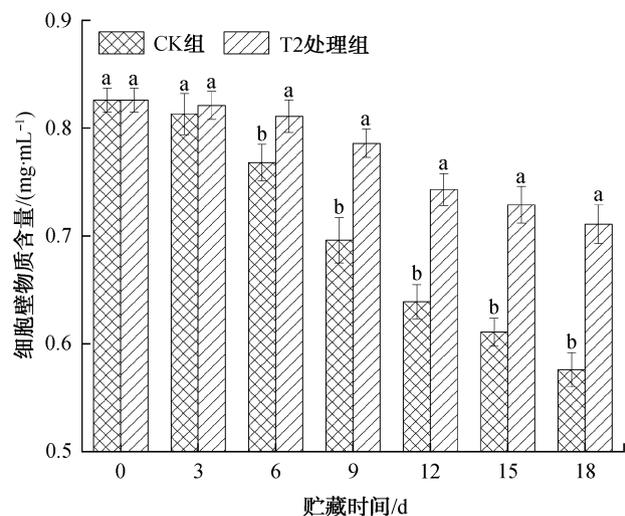


图7 臭氧处理对红灯樱桃细胞壁物质含量的影响

Fig. 7 Effect of ozone treatment on the rate of cell wall substance in Hongdeng cherries

3 结论

本研究通过检测红灯樱桃低温贮藏期间的品质状态,结合各项理化指标和果肉组织超微结构,评估了不同质量浓度臭氧处理对红灯樱桃的保鲜效果,得到如下结论:不同质量浓度臭氧处理均能显著改善红灯樱桃的贮藏品质,尤其在中等质量浓度处理下,红灯樱桃的腐烂率显著降低,花青素含量和SOD活性显著提高,MDA累积得到有效抑制;此外,中等质量浓度臭氧处理可通过诱导果皮气孔缩小、减少水分流失、减缓细胞壁降解来维持细胞结构完整性,为臭氧处理在红灯樱桃产业中的应用提供了重要参考。然而,臭氧处理可能对红灯樱桃的感官品质产生负面影响,因此,未来将就臭氧处理后如何改善红灯樱桃的感官品质进行深入研究。

参考文献:

[1] 王云香,李文生,常虹,等.高浓度CO₂处理对樱桃果实贮藏品质的影响[J].北方园艺,2021(12):101-110.

[2] 王兆丰,代华,高义霞,等.多酚处理对甜樱桃采后品质和活性氧代谢的影响[J].南方农业学报,2024,55(2):578-588.

[3] 李国琴,武晋海,朱洪梅,等.甜樱桃采后保鲜技术的研究进展[J].食品研究与开发,2021,42(20):191-197.

[4] 张敬勇,李东立,许文才,等.二氧化硫缓释杀菌袋对

樱桃保鲜性能影响的研究[J].包装工程,2013,34(15):49-52,74.

[5] 周洲.水杨酸甲酯处理甜樱桃树提高采收及贮藏期果实品质[J].中国果业信息,2016,33(1):58-59.

[6] 胡小京,张亚霞,彭强,等.1-MCP和壳聚糖对‘黑珍珠’樱桃保鲜效果分析[J].分子植物育种,2022,20(6):1937-1944.

[7] 王锋,杨青珍,赵旗峰,等.外源褪黑素对甜樱桃果实褐变和品质的影响[J].食品工业科技,2022,43(5):340-347.

[8] 黄韡,林杰.臭氧在食品添加剂生产关键控制点上的应用[J].广东化工,2009,36(7):192,203-204.

[9] 张润光.臭氧处理对草莓贮藏期果实品质的影响[J].农产品加工(学刊),2011(7):19-22.

[10] SKOG C L, CHU L J. Effect of ozone on qualities of fruits and vegetables in cold storage[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2001, 81(4): 773-778.

[11] 赵晓丹,傅达奇,李莹.臭氧结合气调冷藏对草莓保鲜品质的影响[J].食品科技,2015,40(6):24-28.

[12] 韩强,郟海燕,陈杭君,等.臭氧处理对桑葚采后生理品质的影响及机理[J].中国食品学报,2016,16(10):147-153.

[13] WANG Y J, LI Y X, YANG S H, et al. Mechanism of ozone treatment in delayed softening of fresh-cut kiwifruit during storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, 204: 112469.

[14] PIECHOWIAK T, SKÓRA B, BALAWAJDER M. Ozone treatment induces changes in antioxidative defense system in blueberry fruit during storage[J]. Food and Bioprocess Technology, 2020, 13(7): 1240-1245.

[15] PANOU A A, AKRIDA-DEMERTZI K, DEMERTZIS P, et al. Effect of gaseous ozone and heat treatment on quality and shelf life of fresh strawberries during cold storage[J]. International Journal of Fruit Science, 2021, 21(1): 218-231.

[16] GOFFI V, ZAMPELLA L, FORNITI R, et al. Effects of ozone postharvest treatment on physicochemical and qualitative traits of *Actinidia chinensis* ‘Soreli’ during cold storage[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(13): 5654-5661.

[17] HAN Q, GAO H Y, CHEN H J, et al. Precooling and ozone treatments affects postharvest quality of black mulberry (*Morus nigra*) fruits[J]. Food Chemistry, 2017, 221: 1947-1953.

[18] SARIG P, ZAHAVI T, ZUTKHI Y, et al. Ozone for control of post-harvest decay of table grapes caused by *Rhizopus stolonifer* [J]. Physiological and Molecular Plant Pathology, 1996, 48(6): 403-415.

[19] BAGNATO N, BARRETT R, SEDGLEY M, et al. The effects on the quality of Cavendish bananas, which have been treated with ethylene, of exposure to



- 1-methylcyclopropene [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2003, 38(7): 745-750.
- [20] 王自鹏,贺红宇,刘培,等. 山苍籽精油对樱桃番茄采后常温保鲜品质变化的影响[J]. *山西农业科学*, 2018, 46(1): 117-121.
- [21] 张雷刚,马艳弘,张映瞳,等. 气调保鲜对草莓贮藏期品质的影响[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2019, 39(2): 41-45.
- [22] MILLER F A, SILVA C L M, BRANDÃO T R S. A review on ozone-based treatments for fruit and vegetables preservation[J]. *Food Engineering Reviews*, 2013, 5(2): 77-106.
- [23] 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.
- [24] 林艳,郭伟珍,徐振华,等. 大叶女贞抗寒性及冬季叶片丙二醛和可溶性糖含量的变化[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(25): 68-72.
- [25] 田竹希,龙明秀,李咏富,等. 短波紫外线照射和⁶⁰Co-γ辐照处理对大樱桃贮藏品质的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(23): 269-276.
- [26] 余泽龙. 臭氧诱导的蚕豆气孔运动及其信号调控机制的研究[D]. 兰州:兰州大学,2010.
- [27] 缪颖,伍炳华,曾广文,等. 缺钙诱发大白菜干烧心与细胞壁结构组分变化的关系[J]. *植物生理学报*, 2000, 26(2): 111-116.
- [28] 宁天玉,顾淑惠,汤艺,等. 臭氧处理对鹿茸菇储藏期防腐保鲜效果的影响[J]. *常熟理工学院学报*, 2023, 37(5): 62-66.
- [29] 连欢,孙占新,杨相政. 壳聚糖抑菌复合膜对蓝莓贮藏保鲜效果的影响[J]. *中国果菜*, 2023, 43(9): 29-34.
- [30] 曾玲珍,邓礼艳,林育钊,等. 壳聚糖处理对采后脐橙活性氧代谢和细胞膜透性的影响[J]. *中国食品学报*, 2023, 23(5): 291-300.
- [31] 张希,王慧芳,左满兴,等. 不同基因型烤烟成熟期细胞壁物质及相关酶活性变化[J]. *山西农业科学*, 2023, 51(6): 639-644.

Effect of ozone treatment on preservation of Hongdeng cherries

LI Wenhan¹, LIU Ziyun¹, JIANG Yuqian¹, LI Xihong¹, BAN Zhaojun²

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

2. School of Biological and Chemical Engineering, Zhejiang University of science and Technology, Hangzhou 310023, China

Abstract: Using commercially available Hongdeng cherries (nine ripe) as the research object, after three kinds of ozone treatment with low, medium and high mass concentrations, and analysed the changes of physicochemical indexes and ultrastructures during the period of low-temperature storage, explored the effects of ozone treatment on the preservation effect of Hongdeng cherries. The results showed that different mass concentrations of ozone treatment effectively improved the storage quality of Hongdeng cherries, slowed down the increasing trend of decay rate, reduced the accumulation of malondialdehyde (MDA), the accumulation of lipid peroxidation products in cell membranes, slowed down the decline of hardness, and increased the anthocyanin content and antioxidant enzyme activities during the storage period. In particular, compared with the control group, the ozone treatment with medium mass concentration (6.39 mg/m^3) at the end of storage reduced the decay rate by 76.19%, increased the hardness by 36.46%, maintained the delta $E(\Delta E)$ and MDA contents at 69.45 and $6.83 \mu\text{mol/g FW}$, and promoted the increase of anthocyanin content to $0.581 \Delta\text{OD/g}$ and superoxide dismutase (SOD) activity to 69.31 U/g . At the same time, it induced the stomatal narrowing of the Hongdeng cherries pericarp, effectively controlled the water loss of the fruit, and maintained the cellular tissue structure by delaying the cell wall degradation, which ultimately achieved the purpose of improving the storage quality of Hongdeng cherries, prolonging the supply period of the market, and improving the economic benefits.

Key words: Hongdeng cherry; ozone treatment; low temperature storage; preservation effect

[责任编辑:杨晓娟]