

## 臭氧处理对采后杏果实活性氧代谢的影响

芦玉佳, 李玲, 张亚琳, 张文娜, 马海娟, 朱璇\*  
(新疆农业大学食品科学与药学院 乌鲁木齐 830052)

**摘要** 为研究贮藏期间臭氧对杏果实活性氧代谢(ROS)和抗病性的影响,以“赛买提”杏为试材,采用 200 mg/m<sup>3</sup> 臭氧熏蒸处理杏果实,处理后的果实贮藏在(1.0±0.5)℃冷库中。每 7 d 测定杏果实自然发病率、丙二醛(MDA)、细胞膜渗透率、超氧阴离子自由基(O<sub>2</sub><sup>-</sup>)产生速率、过氧化氢含量(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)和活性氧代谢相关酶活性。结果表明:200 mg/m<sup>3</sup> 臭氧处理能显著降低杏果实自然发病率,在 49 d 时,臭氧处理组杏果实的自然发病率为 17.0%,比对照组降低 61.94%(*P*<0.05),臭氧诱导可增强过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)等酶的活性,有效减轻 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量和 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 产生速率的升高,使杏果实抗氧化系统平衡,延缓 MDA 和细胞膜透性的增加,减缓膜脂过氧化程度。贮藏结束时,臭氧处理组 CAT、SOD、POD、APX 分别为 47.5、4.14、1.98、12.0 U,是对照组的 1.48、1.14、1.15、1.58 倍,H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量和 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 产生速率分别为 22.04 μmol/g 和 264.44 nmol/min·g,比对照组低 20.61%和 37.04%(*P*<0.05),说明 200 mg/m<sup>3</sup> 臭氧可以调控活性氧代谢相关酶活性,增强采后杏果实的抗病性,研究结果为臭氧广泛应用于果蔬贮藏保鲜提供理论参考。

**关键词** 杏; 臭氧; 采后; 活性氧代谢

**文章编号** 1009-7848(2023)07-0345-08 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2023.07.035

杏 (*Prunus armeniaca* L.) 属蔷薇科李属植物<sup>[1]</sup>,普遍种植于温带地区,具有很高的营养价值。新疆是杏的重要栽培中心,其特殊的自然环境使杏果实具有品质优良,含糖量高,果肉多汁等特点<sup>[2]</sup>。杏是呼吸跃变型果实,采后生理代谢旺盛,后熟快。在贮运时,杏果实易受到病原微生物的侵染,从而发生腐烂,造成大量损失<sup>[3]</sup>。寻找安全、有效的采后果蔬贮藏保鲜方法,已成为亟待解决的重要问题。

臭氧是一种活性高,渗透性强,无残留的强氧化剂,具有延缓果蔬后熟,抑制品质下降等特点<sup>[4]</sup>。在采后果蔬的研究中发现,臭氧处理可以保持草莓<sup>[5]</sup>、桑葚<sup>[6]</sup>等果蔬的品质,延长贮藏时间。臭氧处理是目前果蔬贮藏最为有效的物理保鲜技术之一,其对真菌、细菌等有强烈的直接杀灭作用<sup>[7]</sup>。Luo 等<sup>[8]</sup>在对猕猴桃的研究中证实臭氧能抑制灰霉孢子的萌发及菌丝发育,显著降低发病率。冷藏期间将柑橘暴露在富含臭氧的环境中,可显著抑制

意大利青霉(*Penicillium italicum*)的正常生长<sup>[9]</sup>。

臭氧除了直接的杀菌作用,还能通过诱导果实防御反应来抵抗外界病原菌的侵染,臭氧处理能有效激活抗氧化防御系统,提高树莓的抗氧化能力,从而提高果实的抗病性<sup>[10]</sup>。Ioannis 等<sup>[11]</sup>研究表明臭氧可增加猕猴桃总酚类黄酮的含量,显著提高抗氧化活性,从而减少冷藏过程中猕猴桃的发病率。在对番茄<sup>[12]</sup>的研究中也发现,臭氧通过诱导植物分泌植保素如白藜芦醇等,降低果实的腐烂率。

目前臭氧处理主要集中在通过直接杀菌作用延缓果实腐烂及保持其品质等方面的研究,然而通过调控活性氧代谢与增强果蔬抗病性关系的研究鲜见报道。本试验采用臭氧处理杏果实,研究臭氧处理对杏果实自然发病率及活性氧相关酶活性的影响,探究臭氧处理诱导杏果实抗病性的作用机理,为臭氧广泛应用于果蔬的贮藏提供技术参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

“赛买提”杏,采自新疆库车县乌恰镇,选取可溶性固形物为 12.0%~13.0%,硬度为 (18.0±0.5) N,无机械伤、无腐烂、个体均一的果实作为试验用

收稿日期: 2022-07-21

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目(2022D01A196); 国家自然科学基金地区科学基金项目(31860462)

第一作者: 芦玉佳,女,硕士生

通信作者: 朱璇 E-mail: 13999877961@126.com

果,当天运回实验室,于5℃预冷24h。

## 1.2 试剂与仪器

聚乙烯吡咯烷酮、 $\alpha$ -萘胺、冰醋酸、浓氨水、硫

酸、盐酸、丙酮、氮蓝四唑、三氯乙酸、无水醋酸钠、愈创木酚均为国产分析纯级。

试验主要仪器如表1所示。

表1 试验主要仪器

Table 1 Test main instrument

仪器名称	仪器型号	生产厂家
气体检测报警仪	SKY2000	深圳元特科技有限公司
臭氧发生器	HY-004S-4A	广州佳环电器科技有限公司
电子分析天平	H0503	河北慧采科技有限公司
智能高速冷冻离心机	3H16RI	湖南赫西仪器有限公司
紫外分光光度计	UV-1700	上海美析仪器有限公司
电导率仪	DDS-307	上海仪电科学仪器有限公司
恒温水浴锅	HH-2S	常州中纤检测仪器设备有限公司
pH计	PHS-3E	济南欧莱博技术有限公司

## 1.3 试验预处理

预试验结果表明预处理杏果实的臭氧最佳浓度为200 mg/m<sup>3</sup>,处理方法参照李玲等<sup>[13]</sup>的方法,将臭氧气体通入密封箱(70.0 L)中,箱内臭氧气体浓度达到200 mg/m<sup>3</sup>时,密闭处理30 min,对照组为密封箱不通入臭氧气体的杏果实。每隔7 d处理一次,每组处理用果3.0 kg,试验重复3次,熏蒸后置于冷库【温度(1.0±0.5)℃,RH 90%~95%】中低温贮藏49 d,每7 d测定各项指标。

## 1.4 指标测定

1.4.1 自然发病率 定期统计贮藏期杏果实的自然发病情况,单个杏果实病斑直径达4.0 mm以上计为发病果,统计结果用百分数表示<sup>[14]</sup>。

$$\text{自然发病率}(\%) = \frac{\text{发病果实个数}}{\text{总果实个数}} \times 100 \quad (1)$$

1.4.2 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量的测定 参照曹建康等<sup>[15]</sup>的方法,结果以 $\mu\text{mol/g}$ 表示。

1.4.3 超氧阴离子(O<sub>2</sub><sup>-·</sup>)产生速率的测定 参照Li等<sup>[16]</sup>的方法,单位为nmol/min·g。

1.4.4 ROS清除酶活性测定 过氧化氢酶(CAT)活性测定参照吴媛媛等<sup>[17]</sup>的方法,抗坏血酸过氧化物酶(APX)测定参照曹建康等<sup>[15]</sup>的方法,超氧化物歧化酶(SOD)测定参照黄余年等<sup>[18]</sup>的方法,过氧化氢酶(POD)活性测定参照王星星等<sup>[19]</sup>的方法。

1.4.5 丙二醛含量的测定 参照Shan等<sup>[20]</sup>的方法,单位为 $\mu\text{mol/g}$ 。

1.4.6 细胞膜渗透率的测定 参照曹建康等<sup>[15]</sup>的方法,采用电导率法,结果用百分数表示。

## 1.5 数据分析

采用SPSS 26.0软件,利用*t*检验进行差异显著性分析,*P*<0.05表示差异显著,采用Origin 2020软件作图。

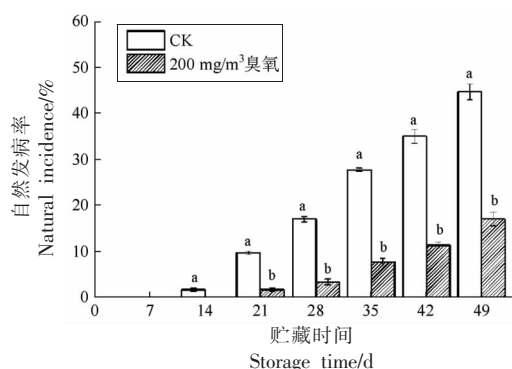
## 2 结果与分析

### 2.1 臭氧处理对杏果实自然发病率的影响

由图1可知,杏果实的自然发病率在贮藏期间呈上升趋势,且200 mg/m<sup>3</sup>臭氧处理组杏果实自然发病率显著低于对照组(*P*<0.05)。在第14天时,对照组杏果实已发病,而臭氧处理组的杏果实在21 d才开始发病,到35 d时,200 mg/m<sup>3</sup>臭氧处理组杏果实的自然发病率为7.67%,比对照组低72.28%(*P*<0.05)。在贮藏结束时,臭氧组自然发病率比对照组低61.94%(*P*<0.05)。结果表明,200 mg/m<sup>3</sup>臭氧处理能显著降低杏果实的自然发病率并有效推迟发病时间。

### 2.2 臭氧处理对杏果实H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量的影响

活性氧产生的H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>可以直接攻击病原菌,抑制病原微生物发育,另一方面,H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>还能调控植物防御系统<sup>[21]</sup>。如图2所示,贮藏前期(0~21 d),臭氧处理组H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>迅速积累,14 d时达到峰值。贮藏后期,臭氧诱导CAT酶活性升高,H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量逐渐下降,到28 d时,对照组杏果实H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量比200



注: 相同贮藏时间组间小写字母不同表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同。

图 1 臭氧处理对杏果实自然发病率的影响

Fig.1 Effects of ozone on disease incidence of apricot fruit

mg/m<sup>3</sup> 臭氧处理组高 14.54% ( $P < 0.05$ )。第 42 天时, 臭氧处理组杏果实 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量仅为 26.59 μmol/g, 比对照组低 21.20% ( $P < 0.05$ ), 贮藏结束时, 对照组 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量是臭氧处理组的 1.26 倍 ( $P < 0.05$ )。

### 2.3 臭氧处理对杏果实 CAT 活性的影响

从图 3 可以看出, 随贮藏期间的延长, 臭氧处理组杏果实的 CAT 活性先略下降后升高, 在第 35 天上升至峰值。对照组杏果实的 CAT 活性在 7 d 达到峰值, 是处理组的 2.43 倍 ( $P < 0.05$ ), 贮藏后期 (21~49 d), 对照组杏果实的 CAT 活性开始逐渐下降。200 mg/m<sup>3</sup> 臭氧处理组的 CAT 活性在第 35 天达到最大值 (113 U), 是对照组的 2.0 倍 ( $P < 0.05$ ), 贮藏第 49 天时, 臭氧组杏果实的 CAT 活性比对照组高 48.43% ( $P < 0.05$ )。结果表明, 200

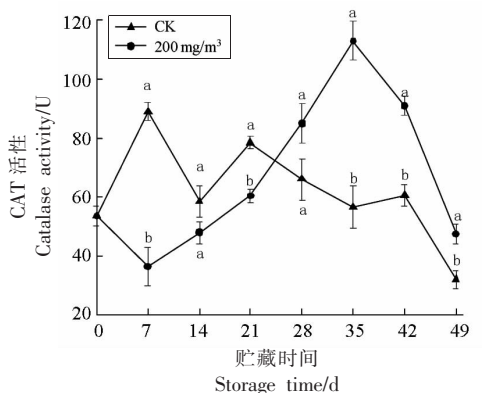


图 3 臭氧处理对杏果实 CAT 活性的影响

Fig.3 Effects of ozone treatment on CAT activity of apricot fruit

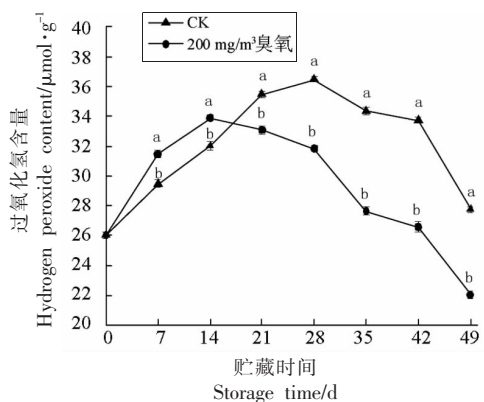


图 2 臭氧处理对杏果实过氧化氢含量的影响

Fig.2 Effects of ozone treatment on H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> content of apricot fruit

mg/m<sup>3</sup> 臭氧处理的杏果实能保持较高的 CAT 活性。

### 2.4 臭氧处理对杏果实超氧阴离子产生速率的影响

如图 4 所示, 杏果实的 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 在贮藏前期 (0~28 d) 急速增加。与对照组相比, 臭氧处理组显著抑制了贮藏期间果实中 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 的上升 ( $P < 0.05$ )。第 14 天时, 对照组的 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 产生速率是臭氧处理组的 1.41 倍 ( $P < 0.05$ ), 到 28 d 时, 两组杏果实的 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 产生速率均达到峰值, 200 mg/m<sup>3</sup> 臭氧处理组的 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 产生速率为 1 220 nmol/min·g, 比对照组低 17.3% ( $P < 0.05$ )。随着贮藏时间的延长, O<sub>2</sub><sup>-</sup> 产生速率逐渐下降, 而 200 mg/m<sup>3</sup> 臭氧处理组 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 产生速率始终低于对照组, 贮藏结束时, 对照组 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 产生速率是臭氧处理组的 1.58 倍 ( $P < 0.05$ ), 说明臭氧处理能够显著延缓杏果实 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 的产生速率。

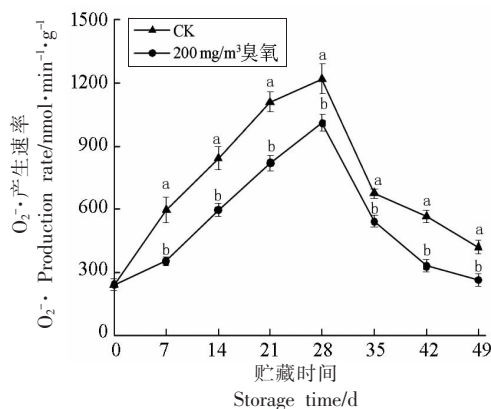


图 4 臭氧处理对杏果实 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 产生速率的影响

Fig.4 Effect of ozone treatment on O<sub>2</sub><sup>-</sup> production rate of apricot fruit

## 2.5 臭氧处理对杏果实 SOD 活性的影响

由图 5 可知,200 mg/m<sup>3</sup> 臭氧处理组 SOD 活性在杏果实贮藏期间均高于对照组。贮藏前期(0~28 d),两组 SOD 活性呈上升趋势。到 7 d 时,臭氧处理组杏果实 SOD 活性比对照组高 20.09% ( $P < 0.05$ ),在第 28 天时,臭氧处理组杏果实 SOD 活性达到 5.40 U,比对照组高 22.81% ( $P < 0.05$ )。随着贮藏时间的延长,杏果实 SOD 活性逐渐下降。在贮藏第 49 天时,臭氧处理组 SOD 活性为 4.14 U,是对照组的 1.14 倍 ( $P < 0.05$ ),上述结果表明臭氧处理能够有效提高杏果实的 SOD 活性。

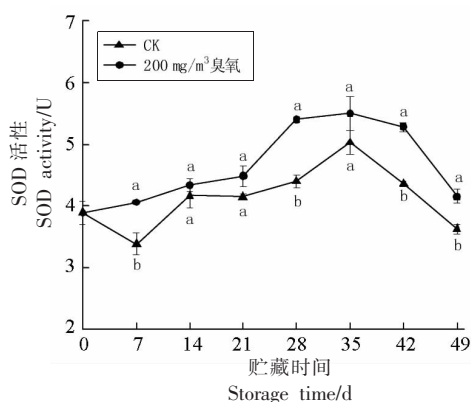


图 5 臭氧处理对杏果实 SOD 活性的影响

Fig.5 Effect of ozone treatment on SOD activity of apricot fruit

## 2.7 臭氧处理对杏果实 POD 活性的影响

由图 7 可知,在杏果实贮藏期间,200 mg/m<sup>3</sup> 臭氧处理组 POD 活性均高于对照组。从开始贮藏至贮藏 21 d,臭氧处理组杏果实 POD 活性上升迅速,到 14 d 时,臭氧处理组杏果实的 POD 活性比对照组高 11.24% ( $P < 0.05$ )。贮藏 28 d 时,臭氧处理组 POD 活性是对照组的 1.06 倍,差异显著 ( $P < 0.05$ ),贮藏结束时,臭氧处理组的 POD 活性为 1.98 U,比对照组高 14.98% ( $P < 0.05$ )。由此说明臭氧处理提高了贮藏过程中杏果实的 POD 活性。

## 2.8 臭氧处理对杏果实 MDA 含量的影响

MDA 是膜脂过氧化的产物,其含量表明果蔬细胞受胁迫的程度<sup>[22]</sup>。由图 8 可知,在杏果实贮藏过程中,杏果实的 MDA 含量不断增加,200 mg/m<sup>3</sup> 臭氧处理组的 MDA 含量显著低于对照组 ( $P < 0.05$ )。贮藏前期(0~14 d),对照组杏果实的 MDA

## 2.6 臭氧处理对杏果实 APX 活性的影响

由图 6 可知,贮藏期间,与对照组相比,200 mg/m<sup>3</sup> 臭氧处理能显著提高 APX 活性 ( $P < 0.05$ )。贮藏 21 d 时,臭氧处理组的 APX 活性为 13.52 U,是对照组的 1.37 倍 ( $P < 0.05$ ),在贮藏第 35 天时,200 mg/m<sup>3</sup> 臭氧处理杏果实的 APX 活性达到峰值,此时臭氧处理组杏果实 APX 活性是对照组的 1.91 倍 ( $P < 0.05$ )。贮藏后期(35~49 d),APX 活性逐渐降低,贮藏至 49 d 时,臭氧处理组杏果实的 APX 活性比对照组高 57.49% ( $P < 0.05$ )。由此表明,臭氧处理能够有效提高贮藏期间杏果实的 APX 活性。

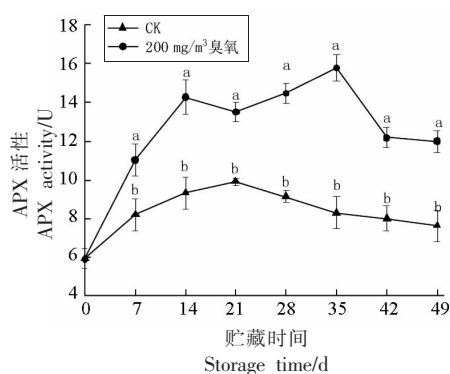


图 6 臭氧处理对杏果实 APX 活性的影响

Fig.6 Effects of ozone treatment on APX activity of apricot fruit

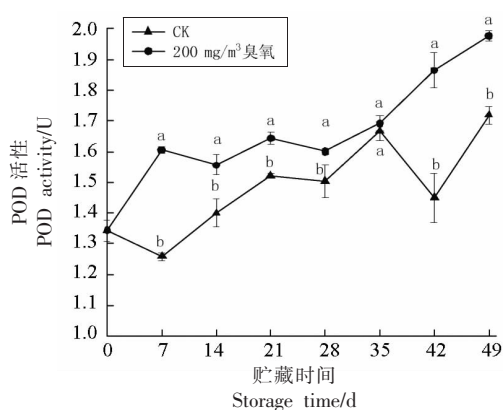


图 7 臭氧处理对杏果实 POD 活性的影响

Fig.7 Effects of ozone treatment on POD activity of apricot fruit

含量变化较大,上升迅速,在贮藏 14 d 时,对照组的 MDA 含量是处理组的 1.40 倍 ( $P < 0.05$ )。到 21 d 时,对照组 MDA 含量为 3.15  $\mu\text{mol/g}$ ,是处理组

的 1.36 倍 ( $P<0.05$ ), 贮藏后期, MDA 含量上升缓慢, 在第 49 天时, 臭氧处理组 MDA 含量比对照组低 20.78% ( $P<0.05$ )。结果表明臭氧处理可抑制杏果实贮藏期 MDA 含量的上升。

### 2.9 臭氧处理对杏果实细胞膜渗透率的影响

由图 9 可知, 杏果实的细胞膜渗透率在贮藏期间逐渐上升, 贮藏前期 (0~21 d), 两组杏果实细胞膜渗透率无显著差异。第 7 天时, 200 mg/m<sup>3</sup> 臭氧处理组的细胞膜渗透率为 24.53%, 比对照组低

8.16%, 在贮藏 28~49 d 时, 臭氧处理抑制了细胞膜渗透率的升高, 200 mg/m<sup>3</sup> 臭氧处理组杏果实细胞膜渗透率显著低于对照组 ( $P<0.05$ )。在贮藏结束时, 200 mg/m<sup>3</sup> 臭氧处理杏果实的细胞膜渗透率为 61.32%, 对照组杏果实的细胞膜渗透率是臭氧组的 1.37 倍 ( $P<0.05$ )。由此说明臭氧可有效抑制杏果实细胞膜渗透率的升高, 保持细胞膜的完整性。

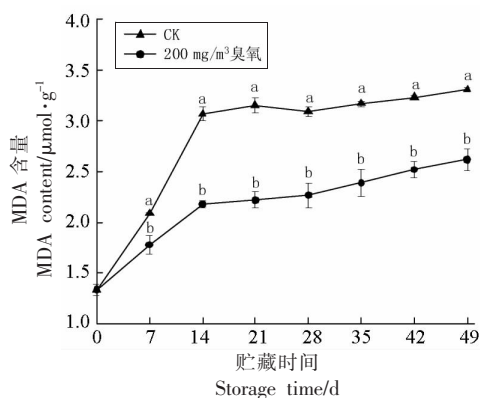


图 8 臭氧处理对杏果实 MDA 含量的影响

Fig.8 Effects of ozone treatment on MDA content of apricot fruit

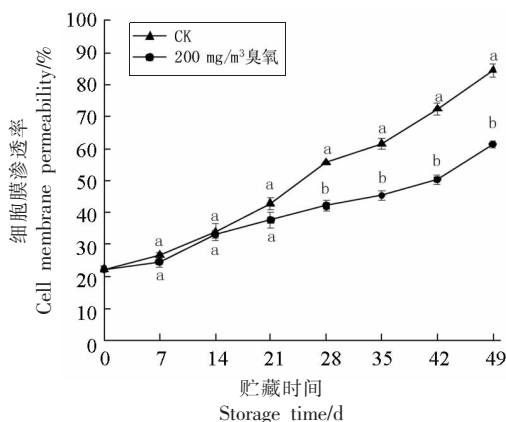


图 9 臭氧处理对杏果实细胞膜渗透率的影响

Fig.9 Effect of ozone treatment on cell membrane permeability of apricot fruit

## 3 讨论

臭氧是大气中的一种天然物质, 具有很强的氧化能力和高效的杀菌作用, 在空气中会逐渐分解成氧气, 无残留<sup>[23]</sup>。臭氧处理具有直接杀菌作用, 不仅可以抑制真菌孢子萌发与生长, 降低果蔬自然发病率, 还能清除农药残留<sup>[24]</sup>。Gabler 等<sup>[25]</sup>研究发现高浓度臭氧处理显著降低了葡萄果实灰霉菌的发病率, 并减少 4 种常用杀菌剂的残留量。袁乙平等<sup>[26]</sup>在对青梅的研究中发现, 臭氧处理能显著抑制皮落青霉、米曲霉和日本曲霉的孢子萌发率, 抑制产孢能力、菌丝生长量及菌落扩展。臭氧处理能导致互隔交链孢菌丝萎缩和孢子褶皱, 抑制其生长, 还能降解 3 种交链孢毒素<sup>[27]</sup>。

活性氧是一类具有化学活性、氧化能力强的氧分子, 主要包括 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub><sup>[28]</sup>。本试验结果表明, 臭氧处理组早期 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量显著高于对照组, 较高的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量具有直接杀菌的作用并能作为

信号分子刺激杏果实启动寄主的防御反应, 对病原菌侵染做出抗病反应<sup>[29]</sup>。然而, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 一直保持在较高水平会引起膜脂过氧化, 造成细胞膜结构的破坏和功能丧失<sup>[30-31]</sup>。SOD、POD、CAT、APX 是植物酶促防御系统的重要组成部分, 他们协同作用以清除活性氧, 避免过多活性氧累积对植物组织造成氧化胁迫<sup>[32-33]</sup>。从本试验结果可知, 臭氧处理组的 CAT、SOD、POD、APX 等抗氧化酶活性显著高于对照组, 臭氧诱导杏果实体内活性氧清除系统中相关酶活性的增强, 有效降低了杏果实体内积累的 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 的含量, 使杏果实抗氧化系统平衡, 降低细胞膜渗透率和 MDA 含量, 减缓膜脂过氧化程度。血橙<sup>[34]</sup>、树莓<sup>[35]</sup>、葡萄<sup>[36]</sup>的研究中也表明果蔬抗病性的增强与活性氧代谢和保持抗氧化系统的平衡有密切关系。

以上结果表明, 臭氧不仅具有直接杀菌作用, 而且通过调控活性氧代谢增强杏果实的抗病性,

有效降低杏果实的发病率,延长贮藏期。

#### 4 结论

综上所述,200 mg/m<sup>3</sup> 臭氧处理能显著降低杏果实的自然发病率,提高 APX、SOD、POD 和 CAT 酶的活性,减缓 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量及 O<sub>2</sub><sup>-</sup>· 的产生速率,抑制 MDA 含量及细胞膜渗透率的上升,由此表明,臭氧可以通过调控活性氧代谢增强杏果实的抗病性。

#### 参 考 文 献

- [1] 李亚玲, 崔宽波, 石玲, 等. 近冰温贮藏对杏果实冷害及活性氧代谢的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(7): 177-183.  
LI Y L, CUI K B, SHI L, et al. Effects of near-freezing temperature storage on cold injury and active oxygen metabolism of apricot fruit[J]. Food Science, 2020, 41(7): 177-183.
- [2] SU C Y, ZHENG X C, ZHANG D D, et al. Investigation of sugars, organic acids, phenolic compounds, antioxidant activity and the aroma fingerprint of small white apricots grown in Xinjiang[J]. Journal of Food Science, 2020, 85(12): 1-12.
- [3] 石玲, 李丽花, 张瑞杰, 等. 24-表油菜素内酯调控活性氧代谢增强杏果实采后抗病性[J]. 食品科学, 2020, 41(9): 126-132.  
SHI L, LI L H, ZHANG R J, et al. 24-Epibrassinolide regulates reactive oxygen metabolism and enhances postharvest disease resistance of apricot fruits [J]. Food Science, 2020, 41(9): 126-132.
- [4] 龙娅, 胡文忠, 萨仁高娃, 等. 鲜切果蔬精准保鲜包装技术的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(12): 249-256.  
LONG Y, HU W Z, SA R G W, et al. Research progress of precise packaging technology for fresh-cut fruits and vegetables[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(12): 249-256.
- [5] ANDREAS A P, KONSTANTOULA A D, PANAGIOTIS D, 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): 1-14.
- [6] NADIDE T, HAKAN K. Effects of ozone-enriched storage atmosphere on postharvest quality of black mulberry fruits (*Morus nigra* L.) [J]. LWT, 2018, 92: 276-281.
- [7] KHADRE M A, YOUSEF A E, KIM J G. Microbiological aspects of ozone applications in food: A review[J]. Journal of Food Science, 2001, 66(9): 1242-1252.
- [8] LUO A B, JUNQ L R, FANG Y M, et al. Effects of ozone treatment on the quality of kiwifruit during postharvest storage affected by *Botrytis cinerea* and *Penicillium expansum* [J]. Journal of Phytopathology, 2019, 167: 470-478.
- [9] JUAN F G, MANUEL O, JOSE M G. Effect of ozone treatment on postharvest disease and quality of different citrus varieties at laboratory and at industrial facility [J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 137(15): 77-85.
- [10] TOMASZ P, PIOTR A, PATRYK K, et al. Impact of ozonation process on the microbiological and antioxidant status of raspberry (*Rubus idaeus* L.) fruit during storage at room temperature [J]. Agricultural and Food Science, 2019, 28(1): 35-44.
- [11] IOANNIS S, MINAS G S, KARAOGLANIDIS G A, et al. Effect of ozone application during cold storage of kiwifruit on the development of stem-end rot caused by *Botrytis cinerea* [J]. Postharvest Biology and Technology, 2010, 58(3): 203-210.
- [12] TZORTZAKIS N, TAYBI T, ROBERTS R, SINGLETON I, et al. Low-level atmospheric ozone exposure induces protection against *Botrytis cinerea* with down-regulation of ethylene-, jasmonate- and pathogenesis-related genes in tomato fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2011, 61(3): 152-159.
- [13] 李玲, 李智, 石玲, 等. 臭氧对杏果实黑斑病的抑制及贮藏保鲜作用[J]. 食品科学, 2021, 42(5): 215-220.  
LI L, LI Z, SIN L, et al. Effects of ozone on inhibition and storage of apricot fruit black spot [J]. Food Science, 2021, 42(5): 215-220.
- [14] 马玄, 常雪花, 郭科燕, 等. 水杨酸处理对杏果实采后抗病性及活性氧代谢的影响[J]. 食品科技, 2015, 40(4): 57-61.  
MA X, CHANG X H, GUO K Y, et al. Effects of salicylic acid treatment on postharvest disease resistance and active oxygen metabolism of apricot fruit

- [J]. Food Science and Technology, 2015, 40(4): 57-61.
- [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: 176.  
CAO J K, JIANG W B, ZHAO Y M. Experimental instruction of postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007: 176.
- [16] LI Y C, MA Y Y, ZHANG T T, et al. Exogenous polyamines enhance resistance to *Alternaria alternata* by modulating redox homeostasis in apricot fruit[J]. Food Chemistry, 2019, 301: 125303.
- [17] 吴媛媛, 刘瑞玲, 郜海燕, 等. 灰霉菌侵染对蓝莓采后品质变化及抗氧化性的影响[J]. 中国食品学报, 2019, 19(1): 148-155.  
WU Y Y, LIU R L, GAO H Y, et al. Effects of *Botrytis cinerea* infection on postharvest quality and antioxidant activity of blueberries[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(1): 148-155.
- [18] 黄余年, 张维, 张群, 等. 采前套袋与未套袋处理对黄桃采后贮藏品质的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(6): 231-242.  
HUANG Y N, ZHANG W, ZHANG Q, et al. Effects of pre-harvest bagging and non-bagging treatments on postharvest storage quality of yellow peach [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(6): 231-242.
- [19] 王星星, 李永华, 韦莹莹, 等. 茶树精油对灰葡萄孢霉活性氧代谢的影响[J]. 中国食品学报, 2018, 18(12): 180-187.  
WANG X X, LI Y H, WEI Y Y, et al. Effects of tea tree essential oil on active oxygen metabolism of *Botrytis cinerea*[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(12): 180-187.
- [20] SHAN T, JIN P, ZHANG Y, et al. Exogenous glycine betaine treatment enhances chilling tolerance of peach fruit during cold storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 114(5): 104-110.
- [21] 黄晓杰, 李婧, 柴媛, 等. MeJA 处理对蓝莓果实采后灰霉病的影响及机理[J]. 食品科学, 2016, 37(22): 307-312.  
HUANG X J, LI J, CHAI Y, et al. Effects of MeJA treatment on postharvest gray mold of blueberry fruits and its mechanism[J]. Food Science, 2016, 37(22): 307-312.
- [22] 姜雪, 张敏, 赵昱瑄, 等. 不同初始机体温度对热水处理西葫芦果实低温贮藏品质和活性氧代谢的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(5): 231-239.  
JIANG X, ZHANG M, ZHAO Y X, et al. Effects of different initial body temperature on storage quality and active oxygen metabolism of zucchini fruits treated with hot water[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(5): 231-239.
- [23] HORVITZ S, CANTALEJO M J. Application of ozone for the postharvest treatment of fruits and vegetables[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2014, 54(3): 312-339.
- [24] IKEHATA K, EL-DIN M G. Aqueous pesticide degradation by ozonation and ozone-based advanced oxidation processes: A review[J]. Ozone: Science and Engineering, 2005, 27(2): 83-114.
- [25] GABLER F M, SMILANICK J L, MANSOUR M F, et al. Influence of fumigation with high concentrations of ozone gas on postharvest gray mold and fungicide residues on table grapes[J]. Postharvest Biology and Technology, 2010, 55(2): 85-90.
- [26] 袁乙平. 青梅致腐霉菌的分离纯化及臭氧抑菌机理研究[D]. 成都: 西华大学, 2020.  
YUAN Y P. Isolation and purification of saprophytic fungi from plum and its mechanism of ozone inhibition[D]. Chengdu: Xihua University, 2020.
- [27] 姜楠, 王刘庆, 李祖梁, 等. 臭氧处理对交链孢菌生长及其毒素积累的抑制作用[J]. 食品科学, 2019, 40(21): 51-57.  
JIANG N, WANG L Q, LI Z L, et al. The ozone treatment of the growth of the spores of the link and the accumulation of its toxins[J]. Food Science, 2019, 40(21): 51-57.
- [28] MITTLERR. ROS are good[J]. Trends in Plant Science, 2017, 22(1): 11-19.
- [29] ZENG K F, DENG Y Y, MING J, et al. Induction of disease resistance and ROS metabolism in navel oranges by chitosan[J]. Scientia Horticulturae, 2010, 126(2): 223-228.
- [30] 任艳芳, 薛宇豪, 田丹, 等. 水杨酸和硝普钠协同处理对芒果贮藏品质及抗氧化活性的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(9): 151-159.  
REN Y F, XUE Y H, TIAN D, et al. Effects of salicylic acid and sodium nitroprusside on storage quality and antioxidant activity of mango[J]. Food

- Science, 2021, 42(9): 151–159.
- [31] 何欢, 刘昭雪, 张亚琳, 等. 外源褪黑素通过调控活性氧代谢减轻采后杏果实冷害[J]. 食品科学, 2022, 43(5): 168–174.
- HE H, LIU Z X, ZHANG Y L, et al. Effects of exogenous melatonin on reactive oxygen species metabolism and chilling injury of postharvest apricot fruit[J]. Food Science, 2022, 43(5): 168–174.
- [32] VALVERDE J, GIMENEZ M J, GUILLEN F, et al. Methyl salicylate treatments of sweet cherry trees increase antioxidant systems in fruit at harvest and during storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2015, 109(6): 106–113.
- [33] 黄耀豪, 钟荣彬, 杜冬冬, 等. 3种果蜡对红肉火龙果活性氧代谢的影响[J]. 热带生物学报, 2017, 8(2): 159–164.
- HUANG Y H, ZHONG R B, DU D D, et al. Effects of three fruit waxes on active oxygen metabolism of red meat pitdragon fruit[J]. Chinese Journal of Tropical Biology, 2017, 8(2): 159–164.
- [34] 折弯弯, 程玉娇, 唐彬, 等. 臭氧结合间歇热处理对“塔罗科”血橙变温物流保鲜品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(4): 272–279.
- SHE W W, CHENG Y J, TANG B, et al. Effect of ozone combined with intermittent heat treatment on fresh-keeping quality of blood orange ‘Taroko’ [J]. Food and Fermentation Industries, 2017, 43(4): 272–279.
- [35] PIECHOWIAK T, ANTOS P, KOSOWSKI P, et al. Impact of ozonation process on the microbiological and antioxidant status of raspberries (*Rubus idaeus* L.) during storage at room temperature[J]. Agricultural and Food Science, 2019, 28(1): 35–44.
- [36] 郭宇欢, 何玲, 齐馨, 等. 臭氧对葡萄灰霉病的抑制效果[J]. 食品科学, 2017, 38(17): 273–278.
- GUO Y H, HE L, QI X, et al. Effects of ozone on the inhibition of grapevine gray mold[J]. Food Science, 2017, 38(17): 273–278.

### Effects of Ozone Treatment on Active Oxygen Metabolism of Postharvest Apricot Fruits

Lu Yujia, Li Ling, Zhang Yalin, Zhang Wenna, Ma Haijuan, Zhu Xuan\*

(College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052)

**Abstract** The present research was undertaken in order to study the effects of ozone on ROS and disease resistance of apricot fruits. Apricot fruits of "Saimaiti" was fumigated with ozone at 200 mg/m<sup>3</sup> and stored in cold storage at (1.0±0.5) °C. Natural incidence, MDA, cell membrane permeability, O<sub>2</sub><sup>-·</sup> production rate, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, CAT, SOD, POD, APX of apricot fruit were determined every seven days during storage. The results show that 200 mg/m<sup>3</sup> ozone treatment could significantly reduce the natural morbidity of apricot fruit. On day 49 of storage, compared with the control group, the natural incidence in ozone-treated apricot fruits were 17.0%, which were reduced by 61.94% (*P*<0.05). Ozone increased the activities of CAT, SOD, POD and APX, effectively reduced H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> content and O<sub>2</sub><sup>-·</sup> production rate, balance the antioxidant system of apricot fruit, delay the increase of MDA and cell membrane permeability, and slow down the degree of membrane lipid peroxidation. At the end of storage, the activities of CAT, SOD, POD, APX of the ozone-treated group were 47.5, 4.14, 1.98 U and 12.0 U, respectively, which were 1.48, 1.14, 1.15 and 1.58 times as high as those in the control group. Compared with the control group, the H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and O<sub>2</sub><sup>-·</sup> production rate in ozone-treated apricot fruits were 22.04 μmol/g, and 264.44 nmol/min·g, which were reduced by 20.61% and 37.04% (*P*<0.05). It shows that 200 mg/m<sup>3</sup> ozone could regulate the activity of enzymes related to active oxygen metabolism and enhance the disease resistance of postharvest apricot fruits. It is expected to provide theoretical reference for ozone's widely used storage and preservation of fruits and vegetables.

**Keywords** apricot; ozone; postharvest; reactive oxygen metabolism