

臭氧结合1-MCP处理对油桃贮藏色泽和品质的影响

刘 晨, 张轶斌, 贾晓昱, 赵志永

Effect of Ozone Combined with 1-MCP on the Color and Quality of Nectarines during Postharvest Storage

LIU Chen, ZHANG Yibin, JIA Xiaoyu, and ZHAO Zhiyong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024030115>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

1-MCP结合臭氧处理对蓝莓低温保鲜效果的影响

Effect of 1-MCP Coupling with Ozone Treatment on Storage of Blueberry at Low Temperature

食品工业科技. 2019, 40(11): 302-307 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.11.050>

1-甲基环丙烯和不同贮藏温度对油桃果实硬度与细胞壁果胶的影响

Effects of 1-Methylcyclopropene and Different Ambient Temperature on Firmness and Cell Wall Pectin in Postharvest Nectarine

食品工业科技. 2021, 42(7): 317-323 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020050347>

1-MCP对无花果采后贮藏品质的影响

Effect of 1-MCP Treatment on Postharvest Storage Quality of Fig Fruit

食品工业科技. 2021, 42(15): 276-282 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020090284>

1-MCP可控缓释包装纸对杏果实贮藏品质的影响

Effect of 1-MCP Controlled Release Packaging Paper on Storage Quality of Apricot Fruit

食品工业科技. 2022, 43(2): 248-254 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021050127>

1-MCP处理对低温贮藏鲜姜品质和活性成分的影响

Effect of 1-MCP Treatment on the Quality and Active Ingredient of Ginger During Low Temperature Storage

食品工业科技. 2020, 41(12): 281-285 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.12.046>

1-MCP处理对花红采后常温贮藏品质的影响

Effect of 1-MCP Treatment on Postharvest Quality of *Malus asiatica* Stored at Room Temperature

食品工业科技. 2020, 41(21): 286-292 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019120340>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘晨, 张轶斌, 贾晓昱, 等. 臭氧结合 1-MCP 处理对油桃贮藏色泽和品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(4): 342–349. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024030115

LIU Chen, ZHANG Yibin, JIA Xiaoyu, et al. Effect of Ozone Combined with 1-MCP on the Color and Quality of Nectarines during Postharvest Storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(4): 342–349. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024030115

· 贮运保鲜 ·

臭氧结合 1-MCP 处理对油桃贮藏色泽和品质的影响

刘 晨¹, 张轶斌¹, 贾晓昱^{2,3,4,*}, 赵志永⁴

(1.天津现代职业技术学院生物工程学院, 天津 300451;

2.天津市农业科学院农产品保鲜与加工技术研究所, 天津 300384;

3.陕西果业冷链新材料有限公司, 陕西铜川 727199;

4.新疆远翔农业科技有限公司, 新疆和田 848000)

摘 要:为探究臭氧调控方式对经 1-甲基环丙烯 (1-MCP) 处理后的油桃在冷藏过程中的色泽和品质变化的影响, 以油桃为试材, 采后用 1 μ L/L 1-MCP 熏蒸 24 h 以及 1-MCP 熏蒸分别结合臭氧水雾化和臭氧气体熏蒸 30 min 后包装, 然后于 0 $\pm$ 0.5 $^{\circ}$ C 条件下贮藏, 定期测定相关理化指标。结果表明, 1-MCP 联合臭氧处理能有效抑制呼吸速率和乙烯产量。单独 1-MCP 处理抑制果肉中花青素的积累, 阻碍了果肉的红色着色, 而 1-MCP 联合臭氧处理在贮藏后期促进了果肉的红色着色。与单独 1-MCP 组相比, 1-MCP 联合臭氧处理组在贮藏后期花青素含量、矢车菊素-3-O-葡萄糖苷、矢车菊素-3-O-芸香糖苷含量和花青素代谢相关酶活性较高, 同时, 臭氧气体熏蒸的方式更有利于贮藏后期花青素的积累, 果肉红色度更高。该研究为改善果实采后色泽调控以及优化 1-MCP 在采后保鲜中的应用提供了新的思路。

关键词:油桃, 1-MCP, 臭氧, 花青素代谢, 色泽调控

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)04-0342-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024030115



本文网刊:

Effect of Ozone Combined with 1-MCP on the Color and Quality of Nectarines during Postharvest Storage

LIU Chen¹, ZHANG Yibin¹, JIA Xiaoyu^{2,3,4,*}, ZHAO Zhiyong⁴

(1.School of Biological Engineering, Tianjin Modern Vocational Technology College, Tianjin 300451, China;

2.Institute of Agricultural Products Preservation and Processing Technology, Tianjin Academy of Agricultural Sciences, Tianjin 300384, China;

3.Shaanxi Fruit Industry Cold Chain New Materials Co., Ltd., Tongchuan 727199, China;

4.Xinjiang Yuanxiang Agricultural Technology Co., Ltd., Hetian 848000, China)

Abstract: In order to investigate the effect of ozone regulation on the color and quality changes of nectarine treated with 1-methylcyclopropylene (1-MCP) during cold storage, nectarine test materials were fumigated with 1 μ L/L 1-MCP for 24 h after postharvest, combined with ozone water atomization and ozone gas fumigation for 30 min, then packaged and stored at 0 $\pm$ 0.5 $^{\circ}$ C. The relevant physicochemical indexes were determined regularly. Results showed that 1-MCP combined with ozone treatment could effectively inhibit respiration rate and ethylene release, 1-MCP alone inhibited anthocyanin

收稿日期: 2024-03-08

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2024JC-YBQN-0200); 农业农村部农产品贮藏保鲜重点实验室开放基金项目 (kf2022001); 新疆自治区天池英才计划; 新疆维吾尔自治区乡村振兴产业发展科技行动项目 (2022NC119)。

作者简介: 刘晨 (1988-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向: 食品加工与贮藏, E-mail: 278492469@qq.com。

* **通信作者:** 贾晓昱 (1988-), 男, 硕士, 正高级工程师, 研究方向: 农产品冷链保鲜, E-mail: jiaxiaoyu331@163.com。

accumulation in pulp, hindering its red coloring, and 1-MCP combined with ozone treatment promoted red coloring in pulp at the later stage of storage. Compared with 1-MCP group alone, 1-MCP group combined with ozone treatment had higher anthocyanin content, centaurin-3-O-glucoside content, centaurin-3-O-rutin content and enzyme activity related to anthocyanin metabolism at the later stage of storage. Meanwhile, ozone gas fumigation was more conducive to anthocyanin accumulation at the later stage of storage, and the flesh red degree was higher. This study provides a new idea for improving the control of postharvest color and optimizing the application of 1-MCP in postharvest preservation.

Key words: nectarine; 1-MCP; ozone; anthocyanin metabolism; color control

油桃 (*Prunus persica* L. Batsch, var. *nectarine*)

富含纤维、多酚、维生素 C、氨基酸和胡萝卜素, 果面鲜红, 肉质鲜美, 深受市场欢迎, 我国油桃年产量约 1500 万吨^[1-2]。果肉和果皮的颜色是影响消费者接受度的关键因素, 而果实的变色与色素的积累密切相关^[3]。花青素是植物重要的次生代谢物, 其通过羟基与不同的糖结合, 以糖苷的形式存在并赋予水果蓝色、橙色、紫色和红色^[4-5]。桃中的花青素主要包括矢车菊素-3-O-葡萄糖苷和矢车菊素-3-O-芸香糖苷, 二者使果肉具有良好的红色。此外, 花青素在结构上包含多个酚羟基, 具有抗氧化和保护作用, 可增强对非生物和生物胁迫的耐受性^[6]。花青素的生物合成和稳定性受温度、光照、乙烯等多种环境因子的调控, 其中乙烯是一个重要的调节因子^[7]。果实在成熟后期会发生各种不可逆的变化, 乙烯会加速水果的呼吸速率, 导致过熟和品质劣变, 同时乙烯会导致果实的颜色变化, 诱导花青素积累, 增加果实的红色^[8]。因此, 乙烯清除剂/抑制剂在成熟过程中的应用对保持采后果实品质起着重要作用。

1-MCP 是一种内源性乙烯抑制剂, 它通过阻断乙烯受体结合位点发挥作用^[9], 被广泛用于水果、蔬菜、花卉等园艺产品的延缓成熟和品质维持^[10]。然而, 相关研究表明, 1-MCP 处理会减少果实花青素的生物合成, 延缓了果肉在贮藏过程中的变红, 导致油桃和李子的外观和营养特性变差^[10-11]。也有研究指出 1-MCP 处理会加剧桃子、梨和杏的病害和生理失调^[12-14]。因此, 有必要采用 1-MCP 协同处理方式, 在不抑制花青素合成的情况下调节乙烯水平, 确保果实具有较高的品质和商品性。

臭氧(O₃)是另一种乙烯清除剂, 其具有较强的氧化能力、乙烯氧化能力和广谱杀菌性, 在果蔬采后商品化处理过程中应用广泛^[15]。臭氧处理通过抑制 *AdACO1* 和 *AdACSI* 表达以及降低 ACC 氧化酶 (ACO) 和 ACC 合成酶 (ACS) 酶活性来抑制呼吸跃变型猕猴桃呼吸过程中乙烯产生^[16]。O₃ 处理通过上调苹果 *McF3H*、*McANR*、*McCHI* 和 *McANS* 基因的表达来促进花青素的积累, 从而提高其对非生物胁迫的抗性^[8]。截止目前, 对 1-MCP 处理对油桃采后贮藏花青素生物合成和调控机制鲜有报道, 本研究旨在探讨应用 O₃ 对 1-MCP 处理后油桃果肉变色和花青素积累的影响, 为弥补 1-MCP 对油桃果实色泽的不良影响, 提高果实商品性提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

油桃 产自中国河北省秦皇岛市的果园, 选取无病征、无机械损伤、形状、大小、颜色均匀的果实进行试验; 1-MCP 有效成分含量 3.3%, 咸阳西秦生物科技有限公司; 酚酞、乙醇、氢氧化钠、氯化钡、草酸、邻苯二甲酸氢钾、福林酚、硫代巴比妥酸、考马斯亮蓝、无水乙醇、二甲苯、环保型脱蜡透明液、番红固绿(植物)染液 分析纯, 北京索莱宝科技有限公司; 矢车菊素-3-O-葡萄糖苷、矢车菊素-3-O-芸香糖苷标准品 北京索莱宝科技有限公司。

FL-803A 便携式臭氧发生器 深圳市飞立电器科技有限公司; XY-SJ-5 臭氧水雾化机 广州心宇机电设备有限公司; GT-903-O₃ 泵吸式臭氧检测仪、ST-GX10 果蔬呼吸速率测试仪 山东三体仪器有限公司; GC-2014 气相色谱仪 日本岛津公司; GY-4 果实硬度计 山东莱恩德智能科技有限公司; PAL-3 折光仪 日本爱拓公司; FD-1-A-50 冷冻干燥机 上海达洛科学仪器有限公司; UV759 紫外可见分光光度计 广州沪瑞明仪器有限公司; CR-400 色差计 杭州柯盛仪器有限公司; HT-TE023 冷冻离心机 上海徽涛自动化设备有限公司; ML1203 电子天平 厦门莱斯特科学仪器有限公司; ECLIPSE E100 正置光学显微镜、DS-U3 成像系统 日本尼康公司; JB-P5 包埋机 武汉俊杰电子有限公司; RM2016 病理切片机 上海徕卡仪器有限公司; 1260 Infinity II 高效液相色谱仪 美国安捷伦公司。

1.2 实验方法

1.2.1 1-MCP 结合臭氧处理 油桃样品采收后立即运输到实验室, 果实采用塑料框装并被随机分成三组, 每组处理 30 kg, 分别为设置为处理 1: 对照组(1-MCP), 处理 2: 1-MCP 联合臭氧水雾化组(1-MCP+AtO₃), 处理 3: 1-MCP 联合臭氧气体熏蒸组(1-MCP+FuO₃)。三个处理分别设计 3 个处理大帐(体积约 1.5 m³), 大帐内含有微型循环风扇(风速的循环风速为 0.6±0.1 m/s)的大帐内进行 1-MCP 熏蒸处理。处理 1 只进行 1 μL/L 1-MCP 室温(18±1 ℃)熏蒸处理 24 h; 处理 2 大帐外接雾化管道, 在进行 1 μL/L 1-MCP 熏蒸处理 24 h 的过程中, 进行臭氧水雾化处理(浓度 20 μL/L, 雾化时间 30 min); 处理 3 在进行 1 μL/L 1-MCP 熏蒸处理 24 h 的过程中, 进行臭氧气体熏蒸处理(浓度 20 μL/L, 熏蒸时间

30 min)。处理 24 h 后,各个处理组的果实采用 0.03 mm 厚的聚乙烯袋包装,然后置于冷库(温度 0 ± 0.5 °C、湿度 90%~95% RH)下贮藏,在第 0、6、12、18、24 和 30 d 取样测定相关理化指标,每个处理重复 3 次。

1.2.2 测定指标和方法

1.2.2.1 呼吸速率 采用果蔬呼吸速率测试仪测定,参考 Du 等^[12]的方法测定。

$$X = \frac{(W_2 - W_1) \times V \times M \times 1000}{V_0 \times m \times t}$$

式中, X 表示呼吸速率($\text{mg CO}_2/(\text{kg} \cdot \text{h})$); M 表示 CO_2 的摩尔质量(g/mol); V 为呼吸室总容积(L); W_1 、 W_2 分别为空白呼吸室总 CO_2 (%) 和测量后呼吸室总 CO_2 (%); t 表示测量时间(h), m 表示新鲜油桃重量(kg); V_0 为一定温度下 CO_2 摩尔体积(L/mol)。

1.2.2.2 乙烯产量 采用气相色谱仪测定,参照 Jia 等^[17]的方法测定。

1.2.2.3 失重率 参考 Jia 等^[17]的方法测定,分 3 个重复进行失重率测定,每个重复 800 g/袋。

$$\text{失重率}(\%) = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100$$

式中, W_f 为油桃贮藏期的重量(g), W_i 为贮藏 0 d 时油桃初始重量(g)。

1.2.2.4 可溶性固形物(SSC) SSC 采用 PAL-3 手持折光仪进行测定,方法参考 Jia 等^[17]的方法测定。

1.2.2.5 可滴定酸(TA) 采用碱滴定法测定,参考 Jia 等^[17]的方法测定,单位以 % 计。

1.2.2.6 硬度 采用 GY-4 果实硬度计测定,参考 Jia 等^[17]的方法测定,结果以 N 表示。

1.2.2.7 色差 由精密色差仪(CR-400)测定,沿果皮赤道面上相对两个部位测定果实色差值,以 L^* 、 a^* 、 b^* 表示。

1.2.2.8 细胞形态观察 参照 Ban 等^[18]的方法,采用正置光学显微镜(Eclipse E100)对油桃组织的细胞形态进行观察。将果肉组织标本切成 2×2 mm,固定在福尔马林-乙酸-乙醇溶液(FAA)中,然后采用石蜡切片番红固绿经过固定、脱水、透明、浸蜡、染色、封片等系列过程制作切片并观察。

1.2.2.9 总花青素含量 参照 Zhou 等^[7]的方法,通过比对矢车菊素-3-O-葡萄糖苷氯化物进行定量,结果以每 kg 果肉含矢车菊素-3-O-葡萄糖苷氯化物当量的重量表示。

1.2.2.10 矢车菊素-3-O-葡萄糖苷和矢车菊素-3-O-芸香糖苷含量的测定 根据 Zhou 等^[7]的方法,采用高效液相色谱仪测定,用 10 mL 萃取液(甲酸:甲醇=1.6:98.4, V/V)在 4 °C、黑暗条件下提取 2 g 油桃果肉 7 h。取上清液, $8000 \times g$ 离心 25 min,用高效液相色谱系统分析,液相色谱仪采用 520 nm 的二极

管阵列检测器(DAD)测定, C_{18} 色谱柱(Zorbax SB, $5 \mu\text{m}$, $4.6 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$)梯度洗脱法进行分离。自动进样器进样量为 20 μL ,柱箱温度为 35 °C。色谱柱流速 0.6 mL/min。以矢车菊素-3-O-葡萄糖苷和矢车菊素-3-O-芸香糖苷作为主要花青素的定量分析,花青素含量以 mg/kg 鲜重表示。

1.2.2.11 花青素生物合成相关酶活性 参照 Zhang 等^[11]的方法采用试剂盒进行测定,包括苯丙氨酸解氨酶(PAL)、4-香豆酸辅酶 A 连接酶(4CL)、肉桂酸-4-羟基化酶(C4H)和二氢黄酮醇 4-还原酶(DFR)的活性,结果均以 U/mg 蛋白表示。

1.3 数据处理

所有数据均以平均数 $\pm$ 标准差表示。采用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析,进行统计学显著性检验。数据采用邓肯多重比较分析, $P < 0.05$ 表示差异显著。每个处理设 3 个平行重复。

2 结果与分析

2.1 臭氧调控方式对 1-MCP 处理后油桃贮藏呼吸强度和乙烯产量的影响

各个处理组油桃的呼吸速率和乙烯生成速率呈先增加后降低的趋势,且在第 18 d 呼吸达到峰值,如图 1。与单独 1-MCP 处理相比,1-MCP+ AtO_3 和 1-MCP+ FuO_3 处理的油桃在贮藏 18 d 时呼吸高峰分别降低了 4.57% 和 10.57%,在贮藏 30 d 时分别降

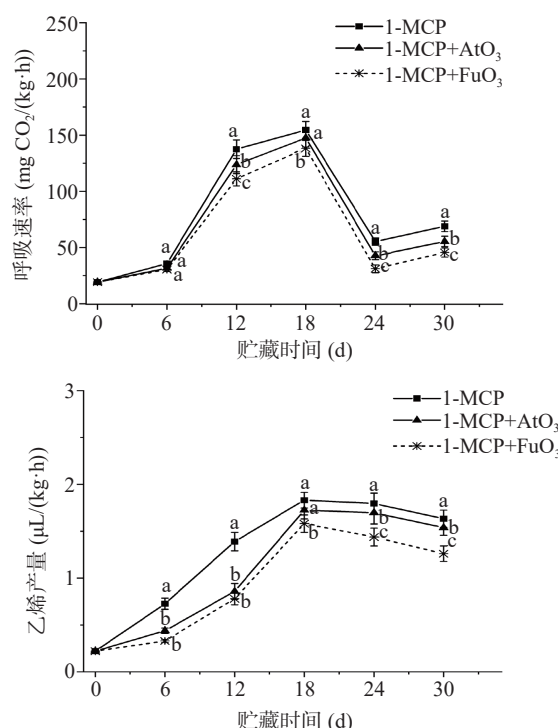


图1 臭氧调控方式对 1-MCP 处理后油桃贮藏期呼吸速率和乙烯产量的影响

Fig.1 Effects of ozone regulation on respiration rate and ethylene production of nectarine after 1-MCP treatment during storage

注:不同小写字母表示同一贮藏时间不同处理组存在显著性差异($P < 0.05$),图 2、图 4、图 5 同。

低了 19.60% 和 33.83%。同时, 1-MCP+AtO₃ 和 1-MCP+FuO₃ 处理均能显著抑制乙烯产生 ($P<0.05$), 贮藏第 12 d 时的乙烯产量分别降低了 38.32% 和 43.83%, 贮藏 24 d 的乙烯产量分别降低了 5.50% 和 22.79%。在贮藏 6~30 d 期间, 本研究发现 1-MCP 联合臭氧水雾化和臭氧气体熏蒸比单独使用 1-MCP 更能减缓呼吸和乙烯的产生, 并且 1-MCP 联合 O₃ 气体熏蒸的方式能更有效的抑制呼吸速率和乙烯生成。相关研究表明, O₃ 及其阴离子处理对内源性乙烯有降解作用^[19]。O₃ 可以有效抑制圣女果贮藏过程中呼吸强度^[20]。

2.2 臭氧调控方式对 1-MCP 处理后油桃硬度、失重率、SSC 和 TA 含量的影响

随着贮藏期的延长, 所有处理的油桃硬度都有所下降(图 2)。与单独 1-MCP 组油桃相比, 无论何种臭氧处理方式与 1-MCP 联用都能显著抑制油桃在冷藏期间硬度的下降。贮藏 30 d 后, 1-MCP+AtO₃ 和 1-MCP+FuO₃ 处理后的果实硬度分别比单独 1-MCP 处理提高 7.6% 和 21.22% ($P<0.05$)。贮藏 6~30 d 的贮藏期内, 1-MCP+FuO₃ 处理组的油桃果实硬度最大。结果表明, 施用臭氧水雾化和臭氧气体熏蒸与 1-MCP 处理之间的互作效应显著延缓了果实的软化 ($P<0.05$)。1-MCP+AtO₃ 和 1-MCP+FuO₃ 均能降低油桃的失重。0 °C 处理 30 d 后, 单独 1-MCP 处理组油桃果实失重率最高, 为 2.82%, 而 1-MCP+AtO₃ 和 1-MCP+FuO₃ 处理果实失重率分别为 2.01% 和 1.48%。1-MCP+AtO₃ 和 1-MCP+FuO₃ 处理油桃 TA 含量较高, 且在贮藏期内显著高于 1-MCP 处理组 ($P<0.05$)。贮藏 24 d 时, 可溶性固形物含量在 18 d 前呈现增加趋势, 之后呈下降趋势。与单独 1-MCP 相比, 1-MCP+AtO₃ 和 1-MCP+FuO₃ 提高了贮藏 18 d 后的 SSC 水平。

失重率是影响果实品质并且反映贮藏特性的重要指标之一。与其他两个处理组相比, 1-MCP+FuO₃ 处理的油桃果实在贮藏 30 d 内失重率较低, 这可能是因为蒸腾和呼吸生理活动导致的水分消耗^[15]。1-MCP 结合 O₃ 联合处理失重率较低, 主要是因为其对呼吸速率和乙烯产生速率抑制作用。此外, TA、SSC 和硬度被认为是油桃重要的理化品质指标, 决定了油桃的保质期和商业价值^[21]。1-MCP+AtO₃ 和 1-MCP+FuO₃ 维持了果实在贮藏过程中的 TA 和 SSC 值, 延缓了果实的软化, 先前有报道表明, 臭氧可以通过抑制果胶代谢物的降解和下调乙烯产生的相关基因来延缓哈密瓜采后贮藏过程中的软化^[11]。

2.3 臭氧调控方式对 1-MCP 处理后油桃微观结构的影响

油桃果肉的细胞平面超微结构如图 3 所示, 油桃果肉结构为薄壁细胞, 在采收当天细胞壁呈规则、棱角分明、完整, 果实中细胞平面形态呈现小而致

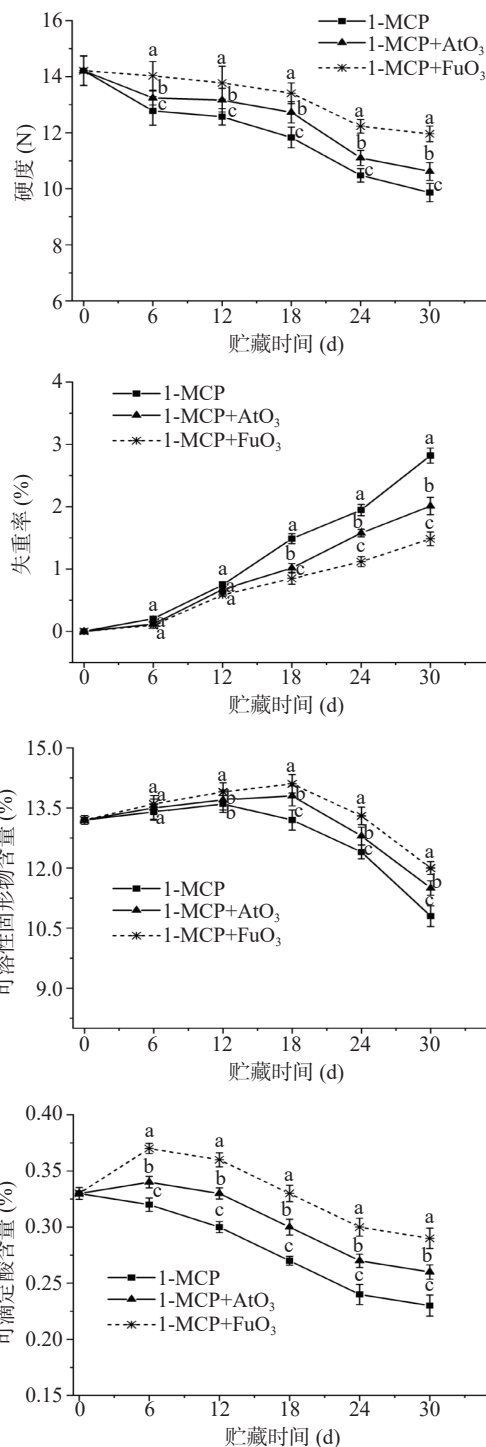


图 2 臭氧调控方式对 1-MCP 处理后油桃贮藏期硬度、失重率、可溶性固形物和可滴定酸含量的影响

Fig.2 Effects of ozone regulation on hardness, weight loss, SSC and TA content of nectarine after 1-MCP treatment during storage

密、结构均匀。随着贮藏时间的延长, 果实组织逐渐出现形状不规则, 细胞间收缩, 细胞间隙增大的现象, 在贮藏第 30 d 时, 单独 1-MCP 处理组的样品部分出现边缘溶解、肿胀和松动现象, 1-MCP+AtO₃ 和 1-MCP+FuO₃ 两个处理组较单独 1-MCP 处理组的果肉结构保持的较好, 细胞结构致密、完整, 细胞结构的石蜡切片结果表明, 1-MCP 联合臭氧雾化和气

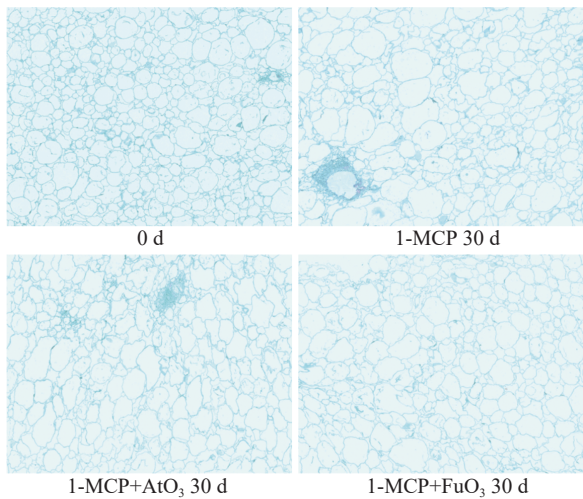


图3 臭氧调控方式对1-MCP处理后油桃贮藏期微观结构的影响

Fig.3 Effects of ozone regulation on microtubule structure of nectarine after 1-MCP treatment during storage

体熏蒸均可以有效延缓油桃果实细胞组织结构的降解,保持果肉组织结构的完整性,且1-MCP联合O₃气体熏蒸方式对果实细胞结构的保持要优于1-MCP联合臭氧水雾化。Du等^[12]也证明了1-MCP+O₃可以延缓桃子果实软化,保持组织结构的完整性,且与臭氧延缓成熟以及防止侵染有关。

2.4 臭氧调控方式对1-MCP处理后油桃色泽的影响

不同处理后油桃果肉色泽的变化如表1,与单独1-MCP相比,1-MCP+AtO₃和1-MCP+FuO₃促进

了油桃果实的亮度(L*值)和红度(a*值)的发育,在贮藏期的6~30 d内,L*值和a*值均高于单独1-MCP处理组,b*值低于1-MCP处理组。贮藏30 d时,1-MCP+AtO₃和1-MCP+FuO₃两个处理组的a*值分别比单独1-MCP处理组高47.98%和146.44%。刚采后的“中油13号”油桃果肉呈白色,随着存放时间的延长,由于花青素在成熟后期积累会使果肉呈红色^[11]。1-MCP对贮藏期花青素积累有抑制作用,其a*值增加较慢,而1-MCP联合O₃处理组果实a*值在贮藏18 d后增加幅度较大,且显著高于单独1-MCP处理组,这可能与臭氧能够促进花青素的积累有关。

2.5 臭氧调控方式对1-MCP处理后油桃花青素含量的影响

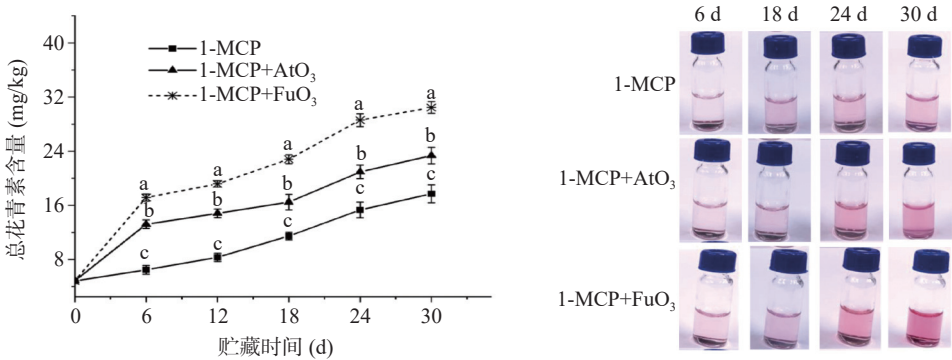
从图4可以看出,贮藏期6~30 d内,油桃果实中的总花青素含量、矢车菊素-3-O-葡萄糖苷和矢车菊素-3-O-芸香糖苷含量均呈增加趋势,1-MCP+AtO₃和1-MCP+FuO₃两个处理组的矢车菊素-3-O-葡萄糖苷和矢车菊素-3-O-芸香糖苷含量在18 d后增长速度显著大于1-MCP处理组,且1-MCP处理组的上述三种物质含量均显著低于1-MCP+AtO₃和1-MCP+FuO₃两个处理组(P<0.05)。贮藏第30 d时,1-MCP+FuO₃处理组花青素含量、矢车菊素-3-O-葡萄糖苷和矢车菊素-3-O-芸香糖苷含量最高,分别为30.46、18.14和12.46 mg/kg。提取液的颜色与花青素含量表现出相同的趋势。在果实变红的成熟

表1 臭氧调控方式对1-MCP处理后油桃贮藏期色泽的影响

Table 1 Effects of ozone regulation on color of nectarine after 1-MCP treatment during storage

指标	处理	贮藏时间(d)					
		0	6	12	18	24	30
L*	1-MCP	70.85±2.65 ^a	65.14±1.52 ^b	62.81±0.97 ^b	60.61±1.18 ^b	59.21±1.92 ^b	54.43±2.55 ^b
	1-MCP+AtO ₃	70.23±1.34 ^a	69.81±0.62 ^a	67.68±3.54 ^a	66.95±2.59 ^a	65.41±2.68 ^a	61.52±1.84 ^a
	1-MCP+FuO ₃	70.56±0.95 ^a	70.52±2.73 ^a	69.91±2.88 ^a	68.08±1.74 ^a	64.75±2.33 ^a	63.66±3.26 ^a
a*	1-MCP	-2.45±0.14 ^a	0.60±0.03 ^a	0.84±0.06 ^b	0.93±0.05 ^b	2.45±0.14 ^c	3.23±0.17 ^c
	1-MCP+AtO ₃	-2.38±0.08 ^a	0.63±0.09 ^a	0.90±0.01 ^b	0.96±0.03 ^b	3.44±0.09 ^b	4.78±0.07 ^b
	1-MCP+FuO ₃	-2.27±0.07 ^a	0.68±0.04 ^a	1.12±0.00 ^a	2.56±0.06 ^a	6.46±0.02 ^a	7.96±0.25 ^a
b*	1-MCP	5.03±0.32 ^a	7.32±0.45 ^a	8.66±0.67 ^a	8.91±0.58 ^a	10.39±0.61 ^a	12.36±0.72 ^a
	1-MCP+AtO ₃	5.17±0.28 ^a	5.33±0.38 ^b	8.31±0.21 ^a	8.67±0.44 ^a	9.36±0.72 ^a	11.78±0.56 ^a
	1-MCP+FuO ₃	5.06±0.19 ^a	7.57±0.54 ^a	9.28±0.77 ^a	9.94±0.63 ^a	10.41±0.35 ^a	10.63±0.82 ^b

注:不同小写字母表示同一贮藏时间不同处理组存在显著性差异(P<0.05)。



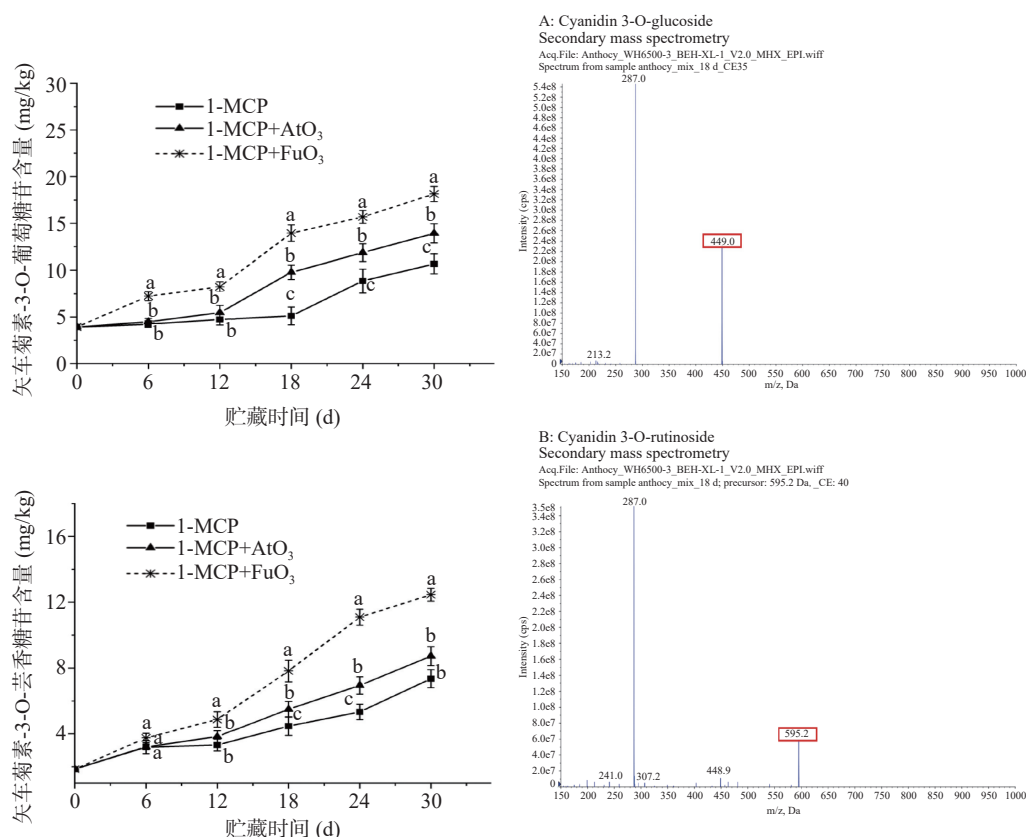


图 4 臭氧调控方式对 1-MCP 处理后油桃贮藏期总花青素、矢车菊素-3-O-葡萄糖苷和矢车菊素-3-O-芸香糖苷含量的影响
Fig.4 Effects of ozone regulation on the contents of total xanthocyanin, cyanidin 3-O-glucoside chloride and cyanidin 3-O-rutinoside in nectarine after 1-MCP treatment during storage

过程中会产生乙烯,从而诱导花青素积累^[22]。相关的研究指出 1-MCP 可以抑制油桃^[11]和李子^[10]果肉发红和花青素的积累,本研究发现单独 1-MCP 处理组的花青素含量增加速度较慢,果肉红色程度低,可能是由于 1-MCP 处理降低了果实的乙烯产量。而 1-MCP 联合臭氧雾化和熏蒸处理在贮藏 18 d 后能够显著加速花青素的积累,促进果肉红色程度加重,促进了油桃的着色。已有研究表明,一定剂量的臭氧处理可以增强植物的抗性,导致树莓在贮藏期间花青素含量增加^[23]。本研究结果表明 O₃ 能够抵消 1-MCP 在贮藏后期对花青素积累的抑制作用,且使用臭氧气体熏蒸的方式效果更佳。

2.6 外源乙烯调控方式对 1-MCP 处理后油桃花青素代谢酶活性的影响

从图 5 可以看出,三个处理组的油桃的 PAL 活性在第 0~18 d 呈现先升高后降低的趋势,但是 1-MCP+FuO₃ 处理组的 PAL 酶活性显著低于单独 1-MCP 处理组 ($P<0.05$)。在贮藏初期,经 1-MCP 处理后的油桃 C4H 酶活性被显著提升。1-MCP 结合臭氧处理的 C4H 酶活性在贮藏 24~30 d 要显著高于单独 1-MCP 处理组 ($P<0.05$)。在 24~30 d 范围内 1-MCP+AtO₃ 和 1-MCP+FuO₃ 处理组的果实的 PAL 酶活性显著提高 ($P<0.05$)。除了第 12 d 和第 18 d 分别出现下降外,所有处理的 4CL 酶活性都随着贮藏时间的延长而增加。与单独 1-MCP 处理组相比,

1-MCP 结合不同形式的臭氧处理在 24~30 d 内 4CL 酶活性显著提高 ($P<0.05$)。各处理油桃 C4H 酶活性均在贮藏第 18 d 达到峰值,之后呈下降趋势。各处理组的油桃的 DFR 活性在贮藏期 24 d 内呈现增加趋势,24 d 后显著下降,在贮藏第 30 d 时,1-MCP+FuO₃ 处理组的果实的 DFR 活性显著高于其他两个处理组 ($P<0.05$)。

花青素的合成代谢与苯丙烷代谢途径密切相关^[11]。由莽草酸途径产生的苯丙氨酸在细胞质中被苯丙氨酸解氨酶(PAL)脱氨,转化为反式肉桂酸,然后通过肉桂酸 4-羟化酶(C4H)产生对香豆酸,对香豆酸通过 4-香豆酸-辅酶 a 连接酶(4CL)转化为对香豆酰辅酶 a^[24]。1-MCP、1-MCP+AtO₃ 和 1-MCP+FuO₃ 对早期贮藏中 PAL、4CL、C4H 和 DFR 活性均有抑制作用,说明 1-MCP 与 O₃ 联合处理对酶活性的抑制作用与 1-MCP 单独处理相似。但在贮藏 24~30 d 期间,1-MCP 联合臭氧处理显著提高了 PAL、C4H 和 4CL 的活性,表明臭氧参与了苯丙素途径的调控,相关的研究表明臭氧处理水果中 PAL 活性的增加可能与酚类化合物和花青素水平的含量以及高活性氧清除能力有关^[25]。DFR 是与花青素合成相关的关键酶,主要负责黄烷酮柚皮素转化为花青素 3-O-糖苷,被认为是稳定的水溶性色素^[24],三个处理组均抑制油桃贮藏早期 DFR 活性,与油桃花青素含量、矢车菊素-3-O-葡萄糖苷和矢车菊素-3-O-芸香糖苷含量降

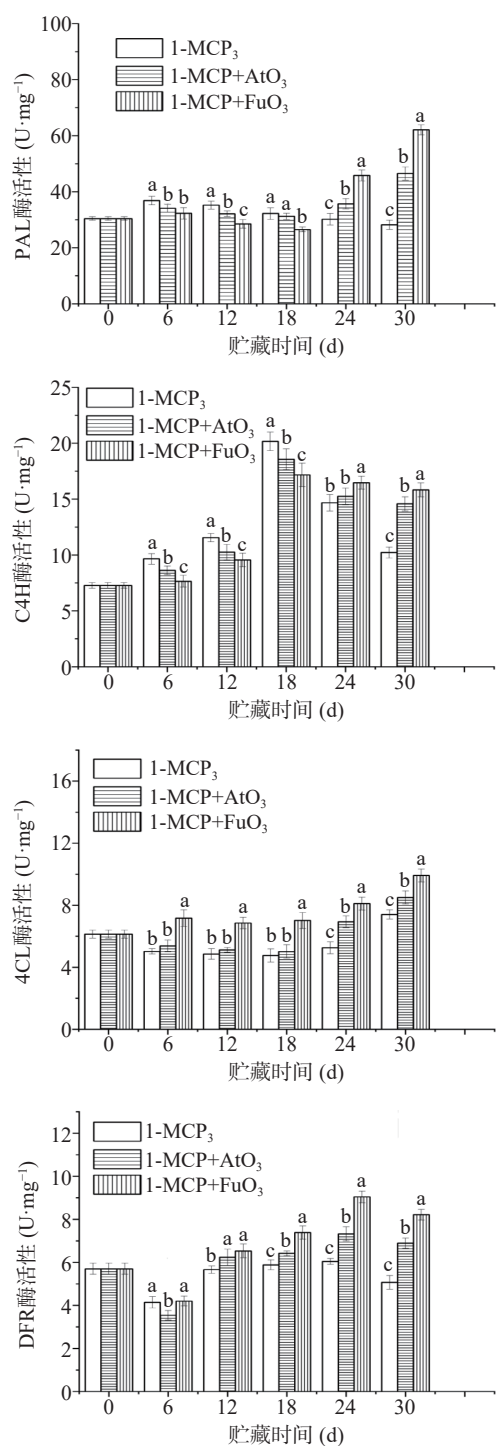


图5 臭氧调控方式对1-MCP处理后油桃贮藏期PAL、C4H、4CL和DFR酶活性的影响

Fig.5 Effects of ozone regulation on PAL, C4H, 4CL and DFR enzyme activities of 1-MCP treated nectarine during storage

低相对应,说明在贮藏前期(0~18 d)三个处理阻断油桃早期花青素的生物合成。而在贮藏后期(24~30 d), 1-MCP+AtO₃和1-MCP+FuO₃处理组显著诱导DFR活性,提高贮藏后期花青素含量,且采用气体熏蒸形式的1-MCP+FuO₃处理组DFR活性最高。因此,1-MCP联合臭氧处理通过增加苯丙烷代谢途径中关键酶的活性,诱导了贮藏后期果实中花青素的生物合成。

3 结论

油桃的红色是影响其商品性的重要因素,研究表明,油桃1-MCP结合臭氧水雾化和臭氧熏蒸均能有效降低油桃贮藏过程中呼吸速率、乙烯产量和果实失重,维持TA和SSC,延缓果实软化,保持较好的细胞形态。而1-MCP联合臭氧处理在贮藏后期通过增加苯丙烷代谢途径中关键酶的活性,诱导了贮藏后期果实中花青素的生物合成,提高了花青素、矢车菊素-3-O-葡萄糖苷和矢车菊素-3-O-芸香糖苷含量,提高了果实红色着色程度,同时,臭氧气体熏蒸的方式,处理效果由于臭氧水雾化。本研究为改善油桃果实贮藏中的色泽保持和发育提供了一种可行的方法。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 熊子璇,吴志蒙,黄华,等.不同保鲜袋包装对采后油桃果实贮藏品质的影响[J].包装工程,2022,43(3):78-86. [XIONG Zixuan, WU Zhimeng, HUANG Hua, et al. Effects of different storage bags on storage quality of postharvest nectarine fruit[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(3): 78-86.]
- [2] CONESA M R, CONEJERO W, VERA J, et al. Irrigation management practices in nectarine fruit quality at harvest and after cold storage[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 243: 106519.
- [3] 刘昌来,熊星,李天帅,等.基于转录组分析色膜覆盖下月月竹竹青变色机制[J/OL].植物生理学报:1-16[2024-12-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.2055.Q.20231222.1158.003.html>.
- [4] LIU Changlai, XIONG Xing, LI Tianshuai, et al. Transcriptome-based analysis of the discoloration mechanism of *Phyllodendron chinensis* under color film coverage[J/OL]. *Chinese Journal of Plant Physiology*: 1-16[2024-12-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.2055.Q.20231222.1158.003.html>.
- [5] JAAKOLA L. New insights into the regulation of anthocyanin biosynthesis in fruits[J]. *Trends in Plant Science*, 2013, 18: 477-483.
- [6] ZHANG J K, WANG Y C, MAO Z L, et al. Transcription factor McWRKY71 induced by ozone stress regulates anthocyanin and proanthocyanidin biosynthesis in *Malus crabapple*[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 232: 113274.
- [7] ZHOU D D, LIU Q, PENG J, et al. Metabolic analysis of phenolic profiles reveals the enhancements of anthocyanins and procyanidins in postharvest peach as affected by hot air and ultraviolet C[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 167: 111227.
- [8] ZHOU D D, LI R, ZHANG H, et al. Hot air and UV-C treatments promote anthocyanin accumulation in peach fruit through their regulations of sugars and organic acids[J]. *Food Chemistry*, 2020, 309: 125726.
- [9] 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.
- [10] TOKALA V Y, SINGH Z, et al. 1H-cyclopropabenzene and 1H-cyclopropa naphthalene fumigation downregulates ethylene production and maintains fruit quality of controlled atmosphere stored

- ‘Granny Smith’ apple[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 176: 111499.
- [10] XU Y, LI S E, HUAN C, et al. Effects of 1-methylcyclopropene treatment on quality and anthocyanin biosynthesis in plum (*Prunus salicina* cv. Taoxingli) fruit during storage at a non-chilling temperature[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 169: 111291.
- [11] ZHANG W L, JIANG H T, ZHANG Y Q, et al. Synergistic effects of 1-MCP and hot air treatments on delaying softening and promoting anthocyanin biosynthesis in nectarines[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 180: 111598.
- [12] DU M, JIA X, 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.
- [13] LATT T T, LWIN H P, SEO H J, et al. 1-Methylcyclopropene delays degradation of peel greenness but induces internal physiological disorders in cold-stored fruit of interspecific pears[J]. *Scientia Horticulturae*, 2023, 312: 111852.
- [14] LIANG C C, CUI X Z, SUN C C, et al. Synergistic and antagonistic effects of preharvest salicylic acid and postharvest 1-methylcyclopropene treatments on the storage quality of apricot[J]. *Food Chemistry*, 2023, 405: 134764.
- [15] TOKALA V Y, SINGH Z, KYAW P N. Postharvest fruit quality of apple influenced by ethylene antagonist fumigation and ozonized cold storage[J]. *Food Chemistry*, 2021, 341: 128293.
- [16] MINAS I S, VICENTE A R, DHANAPAL A P, et al. Ozone-induced kiwifruit ripening delay is mediated by ethylene biosynthesis inhibition and cell wall dismantling regulation[J]. *Plant Science*, 2014, 229: 76–85.
- [17] JIA X Y, LI J K, DU M J, et al. Combination of low fluctuation of temperature with TiO_2 photocatalytic/ozone for the quality maintenance of postharvest peach[J]. *Foods*, 2020, 9: 234.
- [18] BAN Q Y, HAN Y, HE Y H, et al. Functional characterization of persimmon β -galactosidase gene DkGAL1 in tomato reveals cell wall modification related to fruit ripening and radicle elongation[J]. *Plant Science*, 2018, 274: 109–120.
- [19] HAWKINS M, KOHLMILLER C K, ANDREWS L. Matrix infrared spectra and photolysis and pyrolysis of isotopic secondary ozonides of ethylene[J]. *Journal of Physical Chemistry*, 2021, 86: 3154–3166.
- [20] 李昌宝, 辛明, 孙宇, 等. 组合保鲜技术对圣女果保鲜效果的影响[J]. *食品研究与开发*, 2019, 41(3): 123–129. [LI Changbao, XIN Ming, SUN Yu, et al. Effect of combination preservation technology on preservation effect of Cherry Tomatoes[J]. *Food Research and Development*, 2019, 41(3): 123–129.]
- [21] 安娜, 赵志永, 贾晓昱, 等. 1-甲基环丙烯结合茉莉酸甲酯雾化熏蒸对石榴采后品质的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 14(15): 287–296. [AN Na, ZHAO Zhiyong, JIA Xiaoyu, et al. Effects of atomized fumigation with 1-methylcyclopropylene combined with methyl jasmonate on postharvest quality of pomegranate[J]. *Journal of Food Safety and Quality Inspection*, 2019, 14(15): 287–296.]
- [22] CHENG Y D, LIU L Q, YUAN C, et al. Molecular characterization of ethylene-regulated anthocyanin biosynthesis in plums during fruit ripening[J]. *Plant Molecular Biology Reporter*, 2016, 34: 777–785.
- [23] PIECHOWIAK T, GRZELAK-BŁASZCZYK K, SÓJKA M, et al. Changes in phenolic compounds profile and glutathione status in raspberry fruit during storage in ozone-enriched atmosphere[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 168: 111277.
- [24] CHAVES-SILVA S, SANTOS A L D, CHALFUN-JÚNIOR A, et al. Understanding the genetic regulation of anthocyanin biosynthesis in plants—Tools for breeding purple varieties of fruits and vegetables[J]. *Phytochemistry*, 2018, 153: 11–27.
- [25] PIECHOWIAK T, BALAJEJDER M. Impact of ozonation process on the level of selected oxidative stress markers in raspberries stored at room temperature[J]. *Food Chemistry*, 2019, 298: 125093.