

# 1-MCP 处理维持软枣猕猴桃活性氧的代谢平衡

陈曦冉<sup>1</sup>, 张鹏<sup>2\*</sup>, 贾晓昱<sup>2</sup>, 李江阔<sup>2\*</sup>

(1. 沈阳农业大学食品学院, 辽宁沈阳 110866)

(2. 天津市农业科学院农产品保鲜与加工技术研究所, 国家农产品保鲜工程技术研究中心(天津), 农业农村部农产品贮藏保鲜重点实验室, 天津市农产品采后生理与贮藏保鲜重点实验室, 天津 300384)

**摘要:** 为了明确 1-MCP 处理对软枣猕猴桃冰温 (-0.5±0.3 °C) 贮藏 0~60 d 期间活性氧 (ROS) 代谢的影响, 以“龙成二号”为研究试材, 采用 1.0 μL/L 1-甲基环丙烯 (1-MCP) 进行熏蒸处理, 探究其对果实生理、活性氧代谢、抗坏血酸-谷胱甘肽循环的影响。结果表明: 在贮藏 60 d 时 1-MCP 处理组果实呼吸强度为 44.11 mg/(kg·h), 乙烯生成速率为 2.35 μL/(kg·h), 分别比 CK 降低 17.20% 和 23.70%, 同时抑制超氧阴离子 (O<sub>2</sub><sup>-</sup>·)、过氧化氢 (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)、丙二醛 (MDA) 含量和相对电导率的升高, 维持超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (CAT)、过氧化物酶 (POD)、抗坏血酸过氧化物酶 (APX)、谷胱甘肽还原酶 (GR) 活性, 保持较高的还原型抗坏血酸 (AsA)、氧化型谷胱甘肽 (GSSG) 和还原型谷胱甘肽 (GSH) 含量。1-MCP 处理可以降低软枣猕猴桃的呼吸及乙烯生成速率, 减少自由基生成, 提高贮藏期的抗氧化能力, 延缓果实衰老进程, 保持良好的商品性, 因此, 该研究可以为软枣猕猴桃采后贮藏保鲜技术的完善提供理论基础和技术依据。

**关键词:** 软枣猕猴桃; 1-甲基环丙烯; 活性氧代谢; 谷胱甘肽

文章编号: 1673-9078(2022)04-83-91

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.4.0811

## Reactive Oxygen Metabolism Balance in *Actinidia arguta* by 1-MCP

### Treatments

CHEN Xiran<sup>1</sup>, ZHANG Peng<sup>2\*</sup>, JIA Xiaoyu<sup>2</sup>, LI Jiangkuo<sup>2\*</sup>

(1. Food Science College, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

(2. Institute of Agricultural Products Preservation and Processing Technology, Tianjin Academy of Agricultural Sciences, Tianjin Key Laboratory of Postharvest Physiology and Storage of Agricultural Products, Key Laboratory of Storage of Agricultural Products, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Engineering and Technology Research Center for Preservation of Agricultural Products (Tianjin), Tianjin 300384, China)

**Abstract:** To analyze the effects of 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatments on the reactive oxygen species (ROS) metabolism in *Actinidia arguta* stored at -0.5±0.3 °C for 0~60 d, the changes in the fruit physiology, ROS metabolism, and ascorbate-glutathione cycle of *Actinidia arguta* “Longcheng NO.2” treated with 1-MCP at 1.0 μL/L were examined. The results suggest that, at 60 d, the respiration intensity and ethylene production rate of the 1-MCP-treated fruits are 44.11 mg/(kg·h) and 2.35 μL/(kg·h), respectively. These values are 17.20% and 23.70% lower than those of the control group (CK), correspondingly. In addition, owing to the 1-MCP treatment, the increases in the levels of superoxide anion, hydrogen peroxide, and malondialdehyde and the relative conductivity were alleviated, whereas the activities of superoxide dismutase, catalase, peroxidase, ascorbate peroxidase, and glutathione reductase were well maintained. Simultaneously, the reduced ascorbic

引文格式:

陈曦冉, 张鹏, 贾晓昱, 等. 1-MCP 处理维持软枣猕猴桃活性氧的代谢平衡[J]. 现代食品科技, 2022, 38(4): 83-91

CHEN Xiran, ZHANG Peng, JIA Xiaoyu, et al. Reactive oxygen metabolism balance in *actinidia arguta* by 1-MCP treatments [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(4): 83-91

收稿日期: 2021-07-29

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFD0401303)

作者简介: 陈曦冉 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬贮藏保鲜, E-mail: 2025900665@qq.com

通讯作者: 张鹏 (1981-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 果蔬贮藏保鲜, E-mail: zhangpeng811202@163.com; 共同通讯作者: 李江阔 (1974-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品安全与果蔬贮藏保鲜新技术与推广, E-mail: lijkuo@sina.com

acid, oxidized glutathione, and reduced glutathione levels were maintained at relatively high levels. In summary, 1-MCP treatments can effectively reduce the respiration intensity and ethylene production rate of *Actinidia arguta* as well as the production of free radicals. In this manner, the antioxidant capacity during storage is enhanced and the aging of the fruits is slowed down, maintaining the commercial value of the fruits. Hence, the findings of this study can help theoretically and technically to improve the postharvest storage and preservation technology of *Actinidia arguta*.

**Key words:** *Actinidia arguta*; 1-methylcyclopropene; reactive oxygen metabolism; glutathione

软枣猕猴桃 (*Actinidia arguta*) 为猕猴桃科猕猴桃属的浆果类水果, 果皮光滑细腻, 果肉味美多汁, 同时富含多种营养物质, 其中维生素 C 含量远高于其他类型水果<sup>[1,2]</sup>。软枣猕猴桃若在贮藏期间活性氧代谢受到破坏, 果实内自由基大量累积, 引起细胞膜脂过氧化, 加速植物细胞衰老, 引起品质下降<sup>[3-5]</sup>。因此, 维持活性氧代谢平衡是保持软枣猕猴桃品质的重要因素。此前, 研究者们主要采用气调贮藏、低温贮藏、UV-C 辐照、水杨酸、1-MCP 熏蒸等<sup>[6-10]</sup>物理或化学方法, 来延缓软枣猕猴桃品质下降。

1-MCP 作为一种无毒高效的乙烯受体抑制剂<sup>[11]</sup>, 优先与乙烯受体发生不可逆的结合, 抑制内源乙烯的正常作用, 进而达到延缓果实衰老的目的<sup>[12,13]</sup>。Li 等<sup>[14]</sup>发现, 用 1-MCP 浸泡芒果可以推迟乙烯和呼吸速率高峰的出现, 诱导 POD、CAT 和 SOD 的活性。另外, 1-MCP 处理可以提高黑莓的抗氧化酶活性<sup>[15]</sup>。Xu 等<sup>[16]</sup>研究表明, 1-MCP 可以减少猕猴桃贮藏期间的腐烂率, 保持果实硬度的同时不同程度的提高 APX、SOD 和 CAT 活性。安容慧等<sup>[17]</sup>采用 1-MCP 对娃娃菜进行熏蒸处理, 发现可以抑制 MDA、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub><sup>-</sup>的增加, 提高 POD、CAT、SOD 和 GR 的活性。软枣猕猴桃属于呼吸跃变型果实, 乙烯对贮藏期间品质的影响较大<sup>[18,19]</sup>, 而 1-MCP 在抑制乙烯生成的同时延缓果实软化进程<sup>[20]</sup>, 可以减少果实组织中自由基的积累, 延缓果实的成熟与衰老, 维持果实较好的品质。

目前, 1-MCP 处理采后猕猴桃的研究多集中在维持鲜果品质方面, 但针对其在软枣猕猴桃活性氧代谢相关变化的研究较少。因此, 本文研究了 1-MCP 处理对软枣猕猴桃冰温贮藏期间抗氧化及活性氧代谢的影响, 为软枣猕猴桃的贮藏保鲜提供理论和技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

软枣猕猴桃于 2020 年 9 月 22 日采摘自辽宁省丹东市, 品种为“龙成二号”, 挑选个体均一、无伤病、成熟度(可溶性固形物含量 6.5%~7.0%)一致的果实进行处理。小篮(长×宽×高=17.5 cm×10 cm×11 cm),

宁波国嘉农产品保鲜包装技术有限公司产品; PE 袋(长×宽=35 cm×45 cm, 厚度 34 μm)、1-MCP 便携包, 国家农产品保鲜工程技术研究中心(天津)提供。

氢氧化钠、草酸、EDTA、偏磷酸醋酸、硫酸、钼酸铵、三氯乙酸, 天津市江天化工有限公司; 二硫苏糖醇、TritonX-100、硫代巴比妥酸, 上海麦克林生化科技有限公司; 磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、聚乙二醇 6000、聚乙烯吡咯烷酮、磷酸氢二钾、磷酸二氢钾、愈创木酚、30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 天津市大茂化学试剂厂; 以上试剂均为国产分析纯; 生理盐水, 石家庄四药有限公司; O<sub>2</sub><sup>-</sup>试剂盒、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 试剂盒、SOD 试剂盒、GR 试剂盒、GSSG 试剂盒、GSH 试剂盒, 南京建成生物科技有限公司。

### 1.2 仪器与设备

Sigma3-30K 型高速离心机, 德国 SIGMA 离心机有限公司; Check Piont II 便携式测氧仪, 丹麦 Dansensor 公司; F-900 便携式乙烯分析仪, 美国 FELIX 仪器公司; DDS-307A 型电导率仪, 上海仪电科学仪器仪表有限公司; SynergyH1 多功能微孔板检测仪酶标仪, 美国伯腾仪器有限公司; TU-1810ASPC 紫外可见分光光度计, 北京普析通用仪器有限责任公司; HH-1 恒温水浴锅, 金坛市金南仪器制造有限公司。

### 1.3 试验方法

果实园内采摘后进行筛选, 在基地冷库内预冷并处理, 本实验设置两个处理, CK 组不进行处理, 将分装成篮的果实直接装入 PE 袋中, 封口将其扎紧; 1-MCP 组将分装成篮的果实装入 PE 袋内, 采用 1.0 μL/L 浓度的 1-MCP 便携包密封处理 12 h。随后采用冷链物流车(0~4 °C) 12 h 内运回天津实验室, 在冰温库内(-0.5±0.3 °C) 开袋预冷 12 h 后封口进行贮藏。每组处理软枣猕猴桃各 15 篮, 每篮约 2.2 kg, 测定周期为 60 d, 每 15 d 各拿出三篮果实测定相关指标。

### 1.4 指标测定

#### 1.4.1 呼吸强度、乙烯生成速率

呼吸强度采用静置法<sup>[21]</sup>测定。

乙烯生成速率参照张鹏等<sup>[22]</sup>方法。

#### 1.4.2 $O_2^-$ 活性、 $H_2O_2$ 和MDA含量、相对电导率的测定

$O_2^-$ 活性采用试剂盒(比色法)测定,结果以U/g prot表示。

$H_2O_2$ 含量采用试剂盒(比色法)测定,结果以mmol/g prot表示。

MDA含量采用硫代巴比妥酸(TBA)法<sup>[23]</sup>测定。

相对电导率使用电导率仪测定,称取果皮0.5g加入50mL去离子水,震荡立即测定 $P_0$ ;静置30min后测定 $P_1$ ;沸水浴15min冷却至室温测定 $P_2$ 。

相对电导率(%) =  $(P_1 - P_0) / (P_2 - P_0) \times 100\%$

#### 1.4.3 SOD、CAT、POD、APX活性测定

SOD活性采用试剂盒(羟胺法)测定,结果以U/mg prot表示。

CAT活性参照王艳颖等<sup>[24]</sup>方法稍作改动。

POD和APX活性参照曹建康等<sup>[25]</sup>方法。

#### 1.4.4 GR活性及AsA、GSSG、GSH含量测定

GR活性采用试剂盒(紫外比色法)测定,结果以U/g prot表示。

AsA含量采用钼蓝比色法<sup>[26]</sup>测定。

GSSG含量采用试剂盒(微量酶标法)测定,结果以 $\mu\text{mol/L}$ 表示。

GSH含量采用试剂盒(分光光度法)测定,结果以mg/g prot表示。

#### 1.4.5 数据分析

采用Excel 2010进行数据汇总处理与分析,SPSS 19.0进行Duncan's多重差异显著性分析, $p < 0.05$ 表示差异显著,SMICA 14.1进行正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA),检验其相关性。

## 2 结果与分析

### 2.1 1-MCP处理对软枣猕猴桃呼吸强度、乙烯生成速率的影响

呼吸是果实采后的基本代谢活动。由图1a可知,软枣猕猴桃呼吸强度呈先上升后下降的趋势,处理组一直处于较低水平,0~15d上升速度较快,15d出现呼吸高峰,对照组为92.09 mg/(kg·h),处理组为78.29 mg/(kg·h)。1-MCP处理保持较低的果实呼吸强度,减少贮藏期间果实营养物质的损失,维持贮藏期品质,姜毅等<sup>[27]</sup>的研究发现1.5  $\mu\text{L/L}$  1-MCP可以有效抑制两种无花果的呼吸强度并且推迟呼吸高峰的出现,这

与本试验结果相似。

乙烯是可以促进果实衰老的内源激素。如图1b所示,在贮藏期间,猕猴桃乙烯呈现先上升后下降的趋势,0~30d时乙烯生成速率增加缓慢,45d时各处理达到最大值,随后又快速下降,在贮藏60d时,对照组乙烯生成速率为3.08  $\mu\text{L}/(\text{kg}\cdot\text{h})$ ,是处理组的1.3倍。1-MCP能够显著( $p < 0.05$ )抑制乙烯生成速率,可能是因为1-MCP率先与乙烯受体结合,从而减少果实乙烯的生成。

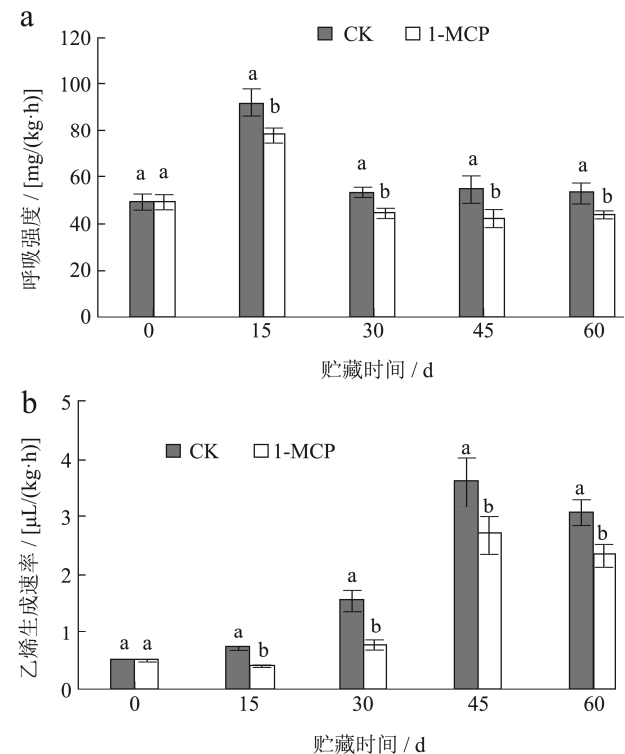


图1 1-MCP处理对软枣猕猴桃呼吸强度、乙烯生成速率的影响  
Fig.1 Effects of 1-MCP treatments on respiratory intensity and ethylene production rate of *Actinidia arguta*

### 2.2 1-MCP处理对软枣猕猴桃 $O_2^-$ 活性、 $H_2O_2$ 、MDA含量及相对电导率的影响

$O_2^-$ 过度积累会对植物造成严重的损害。由图2a可知,在整个贮藏期间果实 $O_2^-$ 活性逐渐升高,0d时 $O_2^-$ 活性为350.47 U/g prot,60d时对照组 $O_2^-$ 活性上升到863.81 U/g prot,上升幅度为146.47%,处理组 $O_2^-$ 活性为699.62 U/g prot,涨幅为99.62%。贮藏期间处理组 $O_2^-$ 活性显著( $p < 0.05$ )低于对照组,说明1.0  $\mu\text{L/L}$  1-MCP处理抑制 $O_2^-$ 效果好,降低对果实的伤害。林静颖等<sup>[28]</sup>研究也表明,1-MCP处理可以抑制“油棕”果实 $O_2^-$ 生成速率,提高其贮藏品质。

过多的 $H_2O_2$ 影响正常的细胞代谢。由图2b可知,果实 $H_2O_2$ 含量在0~45d上升缓慢,60d大幅度升高,

此时对照组含量为 230.17 mmol/g prot, 为处理组的 1.47 倍。统计分析表明, 处理组果实组织中的  $H_2O_2$  含量显著 ( $p<0.05$ ) 低于对照组, 说明 1.0  $\mu\text{L/L}$  1-MCP 处理有效降低  $H_2O_2$  的生成。

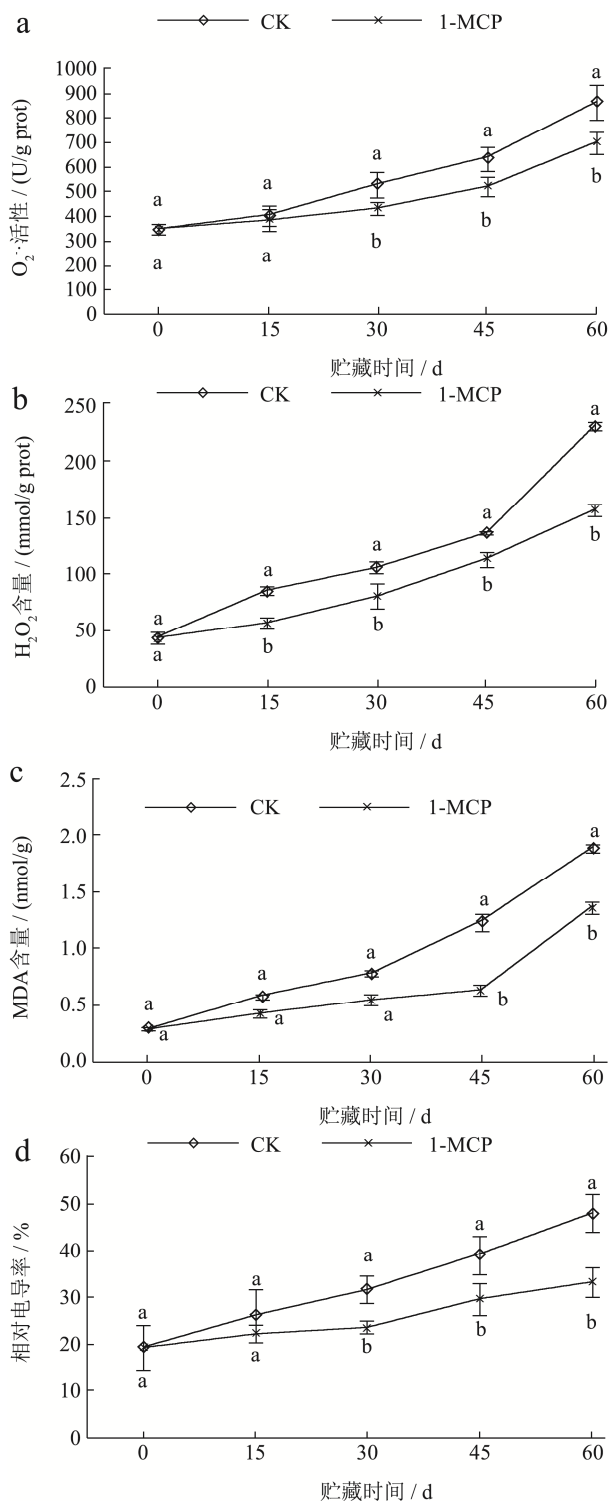


图 2 1-MCP 处理对软枣猕猴桃  $O_2\cdot^-$  活性、 $H_2O_2$ 、MDA 含量及相对电导率的影响

Fig.2 Effects of 1-MCP treatments on  $O_2\cdot^-$  activity,  $H_2O_2$ , MDA content and relative electrical conductivity of *Actinidia arguta*  
MDA 含量可以反应细胞膜脂过氧化程度。由图

2c 可知, 在果实贮藏的 60 d 内, MDA 含量呈直线上升, 0~30 d 各组处理间的差异不明显, 45 d 两组处理 MDA 含量大幅度升高, 但处理组上升幅度较小。60 d 两组处理同样继续升高, 并且达到最大值, 此时对照组含量为 1.89 nmol/g 为处理组的 1.39 倍, 差异显著 ( $p<0.05$ )。这表明, 1-MCP 处理可以抑制软枣猕猴桃果实组织内 MDA 增加, 减缓贮藏期果实细胞膜的破坏程度。

相对电导率的大小可以描述果蔬组织衰老伴随着细胞膜通透性增加的程度。如图 2d 所示, 贮藏期间相对电导率不断上升, 0~15 d 各组处理差异较小, 30 d 后处理效果显著 ( $p<0.05$ ), 60 d 时对照组为 48.00%, 处理组为 33.36%。处理组的相对电导率上升较慢, 说明 1-MCP 对贮藏期间果实膜衰老有抑制作用, 维持细胞微环境和正常的生理代谢, 这与徐冬颖等<sup>[29]</sup>对软枣猕猴桃的研究结果一致, 1-MCP 可以有效抑制果实膜脂损伤, 降低贮藏期 MDA 含量及相对电导率的生长。

### 2.3 1-MCP 处理对软枣猕猴桃 SOD、CAT、POD、APX 活性的影响

SOD 分布于高等植物叶绿体、线粒体中, 可以清除并催化组织中的  $O_2\cdot^-$  转变为  $H_2O_2$ 。由图 3a 可知, 在贮藏 0~15 d 时 SOD 含量呈现下降的趋势, 随后开始小幅度升高再继续下降, 60 d 时对照组和处理组 SOD 含量分别为 280.18 U/mg prot 和 323.87 U/mg prot, 且整个贮藏期处理组的 SOD 含量均显著 ( $p<0.05$ ) 高于对照组, 这与曹森等<sup>[30]</sup>对“东红”猕猴桃的研究结果一致。

CAT 可以将  $H_2O_2$  催化分解为对果实无害的  $H_2O$  和  $O_2$ 。CAT 活性先升高再减少, 0~15 d 两组差异不明显, 30 d 活性达到峰值, 此时对照组为 40.56 U/g, 处理组为 55.19 U/g, 随后开始下降, 贮藏末期处理组 CAT 活性较对照组高 12.22 U/g。说明 1-MCP 处理可以维持软枣猕猴桃较高的 CAT 活性, 延缓其活性的下降, 差异显著 ( $p<0.05$ )。杜林笑等<sup>[31]</sup>的研究发现在贮藏末期 1-MCP 处理的库尔勒香梨 CAT 活性显著高于对照组, 这与本研究结果相似。

贮藏期间 POD 活性与 CAT 活性相同呈先上升后下降的趋势 (图 3c), 1-MCP 可以促进其活性的升高并且延缓下降, 15 d 时对照组与处理组 POD 活性分别为 0.61、0.70 U/g, 随后果实 POD 活性开始逐渐下降。0~60 d 处理组 POD 活性显著 ( $p<0.05$ ) 高于对照组, 说明 1-MCP 对于维持 POD 活性有较好的作用。

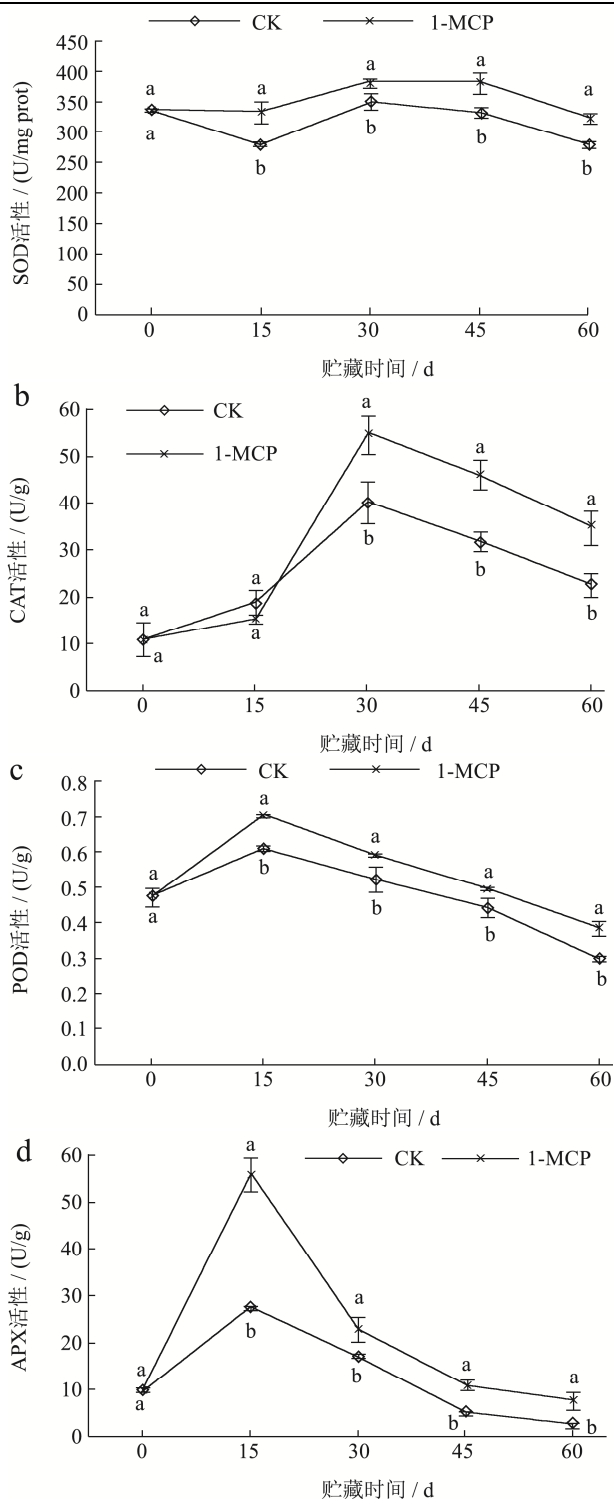


图3 1-MCP 处理对软枣猕猴桃 SOD、CAT、POD、APX 活性的影响

Fig.3 Effects of 1-MCP treatments on activities of SOD, CAT, POD and APX of *Actinidia arguta*

由图3d可知, APX活性与POD、CAT活性变化相同, 呈现升高再降低的趋势。在贮藏15d时处理组APX活性达到高峰, 随后开始下降, 60d时处理组APX活性下降为3.78 U/g, 比对照组高2.67 U/g。可见1-MCP处理可以保持软枣猕猴桃较高的APX活性, 提高APX抗氧化酶的活性。这与Xu等<sup>[32]</sup>采用1-MCP

处理对猕猴桃的研究结果一致。

## 2.4 1-MCP 处理对软枣猕猴桃 GR 活性、AsA、GSSG、GSH 含量的影响

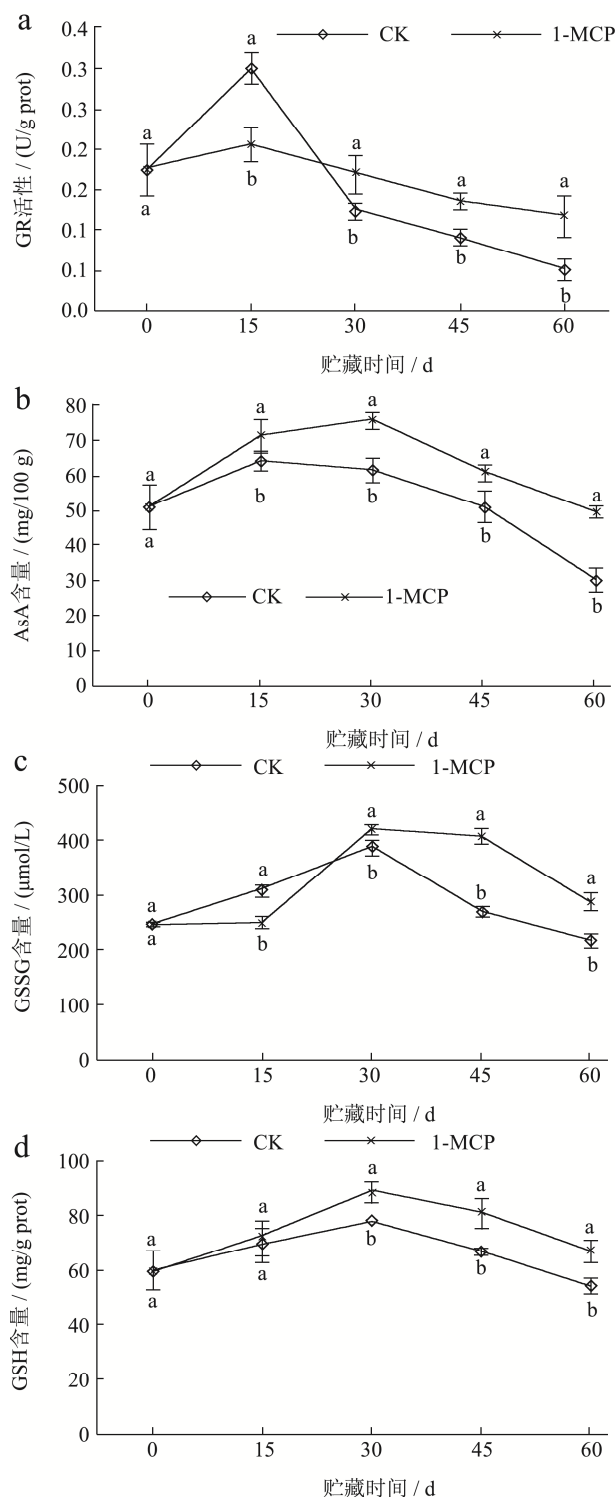


图4 1-MCP 处理对软枣猕猴桃 GR 活性、AsA、GSSG、GSH 含量的影响

Fig.4 Effects of 1-MCP treatments on GR activity, AsA, GSSG and GSH contents of *Actinidia arguta*



GR 可以维持组织中充足的 GSH 水平。GR 活性呈现先上升后下降的趋势，贮藏 15 d 时对照组活性较高，30 d 两组处理 GR 活性开始降低，但处理组下降速度较慢，贮藏中后期处理组 GR 活性显著 ( $p < 0.05$ ) 高于对照组，60 d 时为 0.12 U/g prot，是对照组的 2.40 倍。结果表明 1-MCP 可有效维持软枣猕猴桃较高的 GR 活性，杨乾等<sup>[33]</sup>的研究也证实了水杨酸处理可以维持甜瓜较高的 GR 活性。

AsA 是重要的抗氧化剂可以直接清除  $H_2O_2$ 。如图 4b 所示，在整个贮藏期间 AsA 含量先上升后下降，0~15 d 各组 AsA 含量相差较小，处理组在 30 d 出现最大值，较对照组晚 15 d，此时 AsA 含量为 75.88 mg/100 g，30 d 后 AsA 含量开始大幅度下降，但处理组含量始终显著 ( $p < 0.05$ ) 高于对照组。由此可见，1-MCP 可以减少贮藏期间果实 AsA 含量的消耗，侯佳迪等<sup>[34]</sup>研究表明，1-MCP 处理可以有效延缓桃果实 AsA 含量的下降，与本研究结果相似。

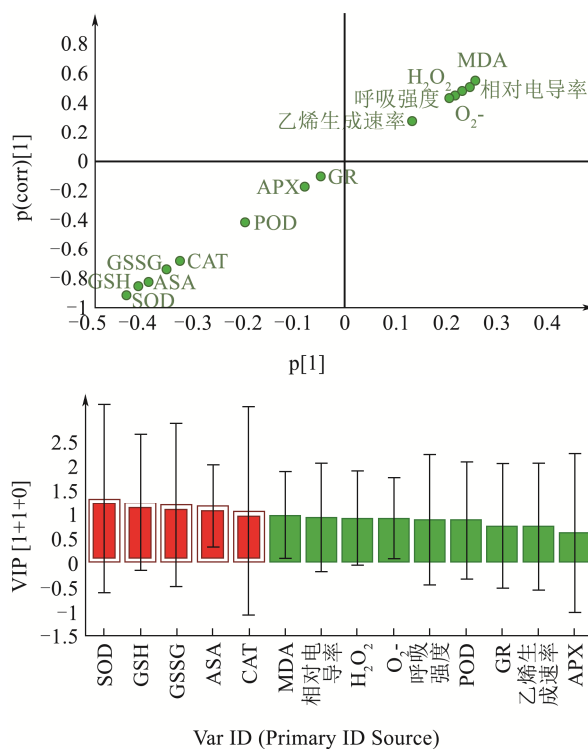
在 GR 的催化下 GSSG 可以转化成 GSH，而 GSH 又可以将脱氢抗坏血酸 (DHA) 还原成 AsA，这对维持果实组织  $H_2O_2$  平衡起到了重要的作用。GSSG 含量先上升后下降，15 d 时对照组 GSSG 含量高于处理组，相较于 0 d 涨幅分别为 24.81% 和 1.80%。贮藏 30 d 达到峰值，且处理组含量显著 ( $p < 0.05$ ) 高于对照组，45 d 时，对照组与处理组 GSSG 含量分别为 271.67  $\mu\text{mol/L}$ 、409.57  $\mu\text{mol/L}$ ，60 d 时为 218.61  $\mu\text{mol/L}$ 、289.24  $\mu\text{mol/L}$ 。30~60 d，处理组 GSSG 含量高于对照组，说明 1-MCP 处理可以缓解软枣猕猴桃贮藏中后期 GSSG 含量的下降。

如图 4d 所示，1-MCP 处理在贮藏期间 GSH 含量呈现先上升后下降的趋势，贮藏前期各组处理差异不大，30 d 两组处理分别达到最大值，处理组的 GSH 含量显著 ( $p < 0.05$ ) 高于对照组，此时对照组为 78.76 mg/g prot，处理组为 89.67 mg/g prot，60 d 时分别降低到 54.70 mg/g prot、67.55 mg/g prot。由此可知，1-MCP 处理可以维持果实较高的 GSH 含量，有利于保护果实在贮藏期间膜的完整性，与张飞等<sup>[35]</sup>对紫背天葵的研究相似，1-MCP 处理可以提高 GSH 含量，维持较高的抗氧化能力。

### 2.5 基于 OPLS-DA 法研究 1-MCP 处理对软枣猕猴桃活性氧代谢的影响

两组处理进行 OPLS-DA 分析，根据 VIP 值大于 1，可将果实差异指标确定为 SOD、GSH、GSSG、AsA 和 CAT。SOD 和 CAT 为特征成分的主要原因可

能是，1-MCP 提高了组织中抗氧化酶的活性，本研究中 SOD 和 CAT 作用较为明显，进而增强清除自由基的能力，降低对细胞膜的伤害。GSSG、GSH、AsA 成为特征成分的主要原因可能是，1-MCP 激活了果实的抗坏血酸-谷胱甘肽循环，与对照相比 GSSG、GSH 含量可以维持在较高的水平，同时减少 AsA 作为营养物质在贮藏期间的消耗，作为抗氧化物参与到清除活性氧中，进而延缓果实衰老期的到来。



Var ID (Primary ID Source)

图 5 SUS-plot 图和 VIP 图

Fig.5 Su-plot and VIP graph

### 3 讨论

呼吸作用是果实采后的一个重要生理活动，乙烯作为植物的衰老激素，可以促进果实的后熟进程。本研究软枣猕猴桃的呼吸高峰出现在贮藏的 15 d，45 d 时乙烯生成速率最大，1-MCP 处理较 CK 处理可以有效抑制呼吸和乙烯的生成，减缓贮藏期间营养物质的消耗，维持果品质，延缓衰老速度，与洪伟荣等<sup>[36]</sup>利用 1-MCP 预处理对机械损伤的猕猴桃的研究结果相同。

ROS 有几种常见形式，为  $O_2^{\cdot-}$ 、 $H_2O_2$  和羟基自由基 ( $\cdot OH$ ) 等，当 ROS 含量过高时会加剧果实组织的衰老进程<sup>[37]</sup>。本研究结果显示，CK 处理组在贮藏过程中  $O_2^{\cdot-}$  活性和  $H_2O_2$  含量逐渐升高，说明果实组织受到氧化胁迫，而 1-MCP 处理组可以有效抑制 ROS 的积累，延缓膜脂氧化进程，从而降低 MDA 含量以及相对电导率的升高。

果蔬中降解 ROS 的途径分为酶促和非酶促两种<sup>[38]</sup>。SOD、POD、APX、CAT 为酶促系统的主要抗氧化酶<sup>[39]</sup>。非酶促包括 AsA、GSH、总酚等,可直接降低 ROS。SOD 将  $O_2\cdot$  歧化为  $H_2O_2$  再通过 POD、APX、CAT 去除,本研究发现,SOD 活性在贮藏中期出现峰值,表明抗氧化系统开始作用,1-MCP 处理可以持续提高 SOD 活性,保持 POD、APX、CAT 清除  $H_2O_2$  能力,说明 1-MCP 在提高软枣猕猴桃抗氧化酶活性的同时,增强自由基清除能力,这与尹健等<sup>[40]</sup>对“金红宝”甜瓜的研究结果一致。OPLS-DA 法分析将 SOD 和 CAT 确定为差异性指标,表明这两种酶对清除自由基具有重要作用。抗坏血酸-谷胱甘肽循环为植物体内的一个重要抗氧化系统,对维持果实正常生理代谢、贮藏期品质有着重要的意义<sup>[41-43]</sup>。本研究结果表明,CK 处理组 GR 活性一直处于较低水平,1-MCP 处理下的差异指标 AsA、GSSG 及 GSH 含量下降速度较慢,表明处理可以提高该系统的抗氧化能力,提高软枣猕猴桃的贮藏品质,与霍俊伟等<sup>[44]</sup>对蓝靛果的研究结果相似。

#### 4 结论

综上所述,1.0  $\mu\text{L/L}$  1-MCP 处理降低软枣猕猴桃呼吸强度和乙烯生成速率,抑制  $O_2\cdot$ 、 $H_2O_2$ 、MDA 和相对电导率的增加,维持较高 SOD、CAT、POD、APX、GR 活性,减缓 AsA、GSSG、GSH 含量的下降。1.0  $\mu\text{L/L}$  1-MCP 可以有效降低贮藏期间软枣猕猴桃的生理活性,缓解膜脂过氧化,维持果实活性氧代谢平衡,保持较高的果实品质。1-MCP 保鲜技术具有易操作、成本低、效果好等优点,本实验对果实抗氧化及活性氧代谢进行较为系统的研究,为软枣猕猴桃采后保鲜技术提供理论依据。

#### 参考文献

- [1] 辛广,张博,冯帆,等.软枣猕猴桃果实香气成分分析[J].食品科学,2009,30(4):230-232  
XIN Guang, ZHANG Bo, FENG Fan, et al. Analysis of aroma components in kiwifruit [J]. Food Science, 2009, 30(4): 230-232
- [2] Li Y K, Cui W, Wang R, et al. MicroRNA858-mediated regulation of anthocyanin biosynthesis in kiwifruit (*Actinidia arguta*) based on small RNA sequencing [J]. Public Library of Science One, 2019, 14(5): e0217480
- [3] 孙兴盛,银徐蓉,周福慧,等.气调包装对软枣猕猴桃品质的影响[J].包装工程,2019,40(19):73-79  
SUN Xingsheng, YIN Xurong, ZHOU Fuhui, et al. Effect of modified atmosphere packaging on quality of *Actinidia*

- arguta* [J]. Packaging Engineering, 2019, 40(19): 73-79
- [4] Chen H H, Zhang J, Jia Y, et al. Effect of 1-methylcyclopropene treatment on quality, volatile production and ethanol metabolism in kiwifruit during storage at room temperature [J]. Scientia Horticulturae, 2020, 265: 109266
- [5] 黄鸿晖,顾里娟,李美琳,等.褪黑素处理对草莓品质与活性氧代谢的影响[J].食品科学,2021,42(15):187-193  
HUANG Honghui, GU Lijuan, LI Meilin, et al. Effect of melatonin treatment on quality and reactive oxygen species metabolism in strawberry [J]. Food Science, 2021, 42(15): 187-193
- [6] 冉昇,高萌,屈魏,等.限气包装对‘绿迷一号’软枣猕猴桃采后贮藏特性的影响[J].西北农业学报,2020,29(12):1848-1858  
RAN Bian, GAO Meng, QU Wei, et al. Effects of limited gas packaging on postharvest storage characteristics of 'Lü mi NO.1' kiwifruit [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2020, 29(12): 1848-1858
- [7] 顾思彤,姜爱丽,李宪民,等.不同贮藏温度对软枣猕猴桃采后生理品质及抗氧化性的影响[J].食品与发酵工业,2019, 45(13):178-184  
GU Sitong, JIANG Aili, LI Xianmin, et al. Effects of different storage temperatures on physiological quality and antioxidant activity of kiwifruit [J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(13): 178-184
- [8] 焦中高,胡丽娜,张春岭,等.采后 UV-C 处理对软枣猕猴桃果实酚类物质及抗氧化活性的影响[J].现代食品科技,2016, 32(11):177-183  
JIAO Zhonggao, HU Lina, ZHANG Chunling, et al. Effect of ultraviolet-C irradiation on phenolic compounds and antioxidant activity of postharvest *Actinidia arguta* fruit [J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(11): 177-183
- [9] 蔡慧,王铭,李亚东,等.水杨酸处理对贮藏软枣猕猴桃果实品质性状影响的研究[J].食品工业科技,2012,33(2):376-379  
CAI Hui, WANG Ming, LI Yadong, et al. Study on the effect of salicylic acid on physiological indicators of *Actinidia arguta* planch [J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(2): 376-379
- [10] 颜廷才,刘振通,李江阔,等.箱式气调结合 1-MCP 对软枣猕猴桃冷藏期品质及风味物质的影响[J].食品科学,2016,37 (20):253-260  
YAN Tingcai, LIU Zhentong, LI Jiangkuo, et al. Effect of box-type modified atmosphere packaging combined with 1-MCP on quality and flavor compounds of *Actinidia arguta*

- during cold storage [J]. Food Science, 2016, 37(20): 253-260
- [11] Chai J X, Wang Y T, Liu Y F, et al. 1-MCP extends the shelf life of ready-to-eat 'Hayward' and 'Qihong' kiwifruit stored at room temperature [J]. Scientia Horticulturae, 2021, 289(5): 110437
- [12] Tao S C, Chu H L, Chen X M, et al. Study of the effects of 1-MCP to blueberry under cold storage [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, 61: 012041
- [13] Zhang J, Ma Y C, Dong C, et al. Meta-analysis of the effects of 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatment on climacteric fruit ripening [J]. Horticulture Research, 2020, 7: 208
- [14] Li L, Li C B, Sun J, et al. The effects of 1-methylcyclopropene in the regulation of antioxidative system and softening of mango fruit during storage [J]. Journal of Food Quality, 2020, 2: 1-11
- [15] Li J, Ma G W, Ma L, et al. Multivariate analysis of fruit antioxidant activities of blackberry treated with 1-methylcyclopropene or vacuum precooling [J]. International Journal of Analytical Chemistry, 2018, 2018: 2416461
- [16] Xu F X, Liu S Y, Liu Y F, et al. Effectiveness of lysozyme coatings and 1-MCP treatments on storage and preservation of kiwifruit [J]. Food Chemistry, 2019, 288(AUG.1): 201-207
- [17] 安容慧,陈皖豫,胡花丽,等.1-甲基环丙烯对娃娃菜贮藏品质及抗氧化活性的影响[J].食品与发酵工业,2021,47(20): 194-203  
AN Ronghui, CHEN Wanyu, HU Huali, et al. Effects of 1-methylcyclopropene on the storage quality and antioxidant properties of baby cabbage [J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(20): 194-203
- [18] 千春录,殷建东,王利斌,等.1-甲基环丙烯和自发气调对猕猴桃品质及活性氧代谢的影响[J].食品科学,2018,39(11): 233-240  
QIAN Chunlu, YIN Jiandong, WANG Libin, et al. Effects of 1-methylcyclopropene treatment and self-developed modified atmosphere on quality and reactive Oxygen species metabolism of kiwifruits during storage [J]. Food Science, 2018, 39(11): 233-240
- [19] Zhao H D, Fu M R, Du Y M, et al. Improvement of fruit quality and pedicel color of cold stored sweet cherry in response to pre-storage 1-methylcyclopropene and chlorine dioxide treatments: combination treatment of 1-MCP plus ClO<sub>2</sub> improves post-harvest quality of sweet cherry fruit [J]. Scientia Horticulturae, 2021, 277: 109806
- [20] Zhu X Y, Song Z Y, Li Q M, et al. Physiological and transcriptomic analysis reveals the roles of 1-MCP in the ripening and fruit aroma quality of banana fruit (Fenjiao) [J]. Food Research International, 2019, 130(1): 108968
- [21] 朱志强,张平,任朝晖,等.不同包装箱对绿芦笋贮藏效果的影响[J].食品科技,2009,34(9):48-52  
ZHU Zhiqiang, ZHANG Ping, REN Zhaohui, et al. Effects of different packing modes on the storage quality of green asparagus [J]. Food Science and Technology, 2009, 34(9): 48-52
- [22] 张鹏,袁兴铃,王利强,等.1-MCP 处理对“阳光玫瑰”葡萄货架品质的影响[J].包装工程,2021,42(7):19-27  
ZHANG Peng, YUAN Xingling, WANG Liqiang, et al. Effect of 1-MCP treatment on shelf quality of "Sunshine Muscat" grapes [J]. Packaging Engineering, 2021, 42(7): 19-27
- [23] 郝再彬,苍晶,徐仲.植物生理实验[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2004  
HAO Zaibin, CANG Jing, XU Zhong. Plant Physiology Experiment [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2004
- [24] 王艳颖,胡文忠,庞坤,等.机械损伤对富士苹果酶促褐变的影响[J].食品科学,2008,4:430-434  
WANG Yanying, HU Wenzhong, PANG Kun, et al. Effects of mechanical damage on enzymatic browning in Fuji apples [J]. Food Science, 2008, 4: 430-434
- [25] 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  
CAO Jiankang, JIANG Weibo, ZHAO Yumei. Experimental Study on Physiological and Biochemical Characteristics of Fruit and Vegetable [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007
- [26] 李军.钼蓝比色法测定还原型维生素 C[J].食品科学,2000, 21(8):42-45  
LI Jun. Determination of reduced vitamin C by molybdenum blue colorimetry [J]. Food Science, 2000, 21(8): 42-45
- [27] 姜毅,饶泽洲,刘佳,等.1-MCP 对无花果采后贮藏品质的影响[J].食品工业科技,2021,42(15):276-282  
JIANG Yi, RAO Zezhou, LIU Jia, et al. Effect of 1-MCP treatment on postharvest storage quality of fig fruit [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(15): 276-282
- [28] 林静颖,李辉,袁芳,等.1-甲基环丙烯处理对采后‘油棕’果实呼吸速率和活性氧代谢的影响[J].食品科学,2020,41(23): 205-211  
LIN Jingying, LI Hui, YUAN Fang, et al. Effect of



- 1-methylcyclopropene treatment on respiration rate and reactive oxygen species metabolism during postharvest storage of 'Younai' plum fruit [J]. Food Science, 2020, 41(23): 205-211
- [29] 徐冬颖,张静,姜爱丽,等.1-MCP 熏蒸处理对软枣猕猴桃的保鲜效果[J].包装工程,2019,40(11):26-32  
XU Dongying, ZHANG Jing, JIANG Aili, et al. Effects of 1-methylcyclopropene fumigation on preservation of *Actinidia arguta* [J]. Packaging Engineering, 2019, 40(11): 26-32
- [30] 曹森,江彤,马超,等.1-MCP 处理对“东红”猕猴桃货架期品质的影响[J].北方园艺,2021,4:101-106  
CAO Sen, JIANG Tong, MA Chao, et al. Effects of 1-MCP treatment on shelf life quality of "Donghong" kiwifruit [J]. Northern Horticulture, 2021, 4: 101-106
- [31] 杜林笑,赵晓敏,谢季云,等.1-MCP 处理对库尔勒香梨低温贮藏期间活性氧代谢及品质的影响[J].保鲜与加工,2020, 20(2):28-34  
DU Linxiao, ZHAO Xiaomin, XIE Jiyu, et al. Effects of 1-MCP treatment on active oxygen metabolism and quality of Korla fragrant pear during cold storage [J]. Storage and Process, 2020, 20(2): 28-34
- [32] Xu F X, Zhang K X, Liu S Y. Evaluation of 1-methylcyclopropene (1-MCP) and low temperature conditioning (LTC) to control brown of Huangguan pears [J]. Scientia Horticulturae, 2020, 259: 108738
- [33] 杨乾,范存斐,王毅,等.水杨酸处理诱导采后甜瓜抗坏血酸-还原型谷胱甘肽循环代谢清除过氧化氢的作用及机制[J].食品科学,2021,42(1):243-249  
YANG Qian, FAN Cunfei, WANG Yi, et al. Role and underlying mechanism of the ascorbic acid-reduced glutathione cycle in scavenging hydrogen peroxide in postharvest melons induced by salicylic acid [J]. Food Science, 201, 42(1): 243-249
- [34] 侯佳迪,朱丽娟,王军萍,等.1-MCP 处理期不同成熟度‘霞晖8号’桃果实贮藏中品质和生理生化特性的影响[J].食品工业科技,2021,42(17):326-334  
HOU Jiadi, ZHU Lijuan, WANG Junping, et al. Effect of 1-MCP on peach fruit quality and physio-biochemical characteristics of 'Xiahui 8' with different maturity during storage [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(17): 326-334
- [35] 张飞,石洁,谢意通,等.1-甲基环丙烯对采后紫背天葵抗氧化系统的影响[J].食品科学:1-11[2021-08-02]  
ZHANG Fei, SHI Jie, XIE Yitong, et al. Effects of 1-methylcyclopropene on the antioxidant system of *Gynura bicolor* DC [J]. Food Science: 1-11[2021-08-02]
- [36] 洪伟荣,王璇,刘馨岚,等.1-MCP 预处理对采后猕猴桃机械损伤导致品质变化的影响[J].保鲜与加工,2021,21(2):7-12  
HONG Weirong, WANG Xuan, LIU Xinlan, et al. Effect of 1-MCP pretreatment on kiwifruit quality changes caused by mechanical damage after harvest [J]. Storage and Process, 2021, 21(2): 7-12
- [37] Mittler Ron. ROS are good [J]. Trends in Plant Science, 2017, 22(1): 11-19
- [38] Waszczak C, Carmody M, Kangasjärvi J. Reactive oxygen species in plant signaling [J]. Annual Review of Plant Biology, 2018, 69: 209-236
- [39] Ji Y R, Hu W Z, Liao J, et al. Effect of atmospheric cold plasma treatment on antioxidant activities and reactive oxygen species production in postharvest blueberries during storage [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(15): 5586-5595
- [40] 尹健,颖敏华,陈柏,等.1-MCP 复合杀菌剂处理对“金红宝”甜瓜常温贮藏品质的影响[J].保鲜与加工,2021,21(1):40-45, 53  
YIN Jian, JIE Minhua, CHEN Bai, et al. Effects of 1-MCP compound fungicide treatment on the storage quality of 'Jinhongbao' melon at room temperature [J]. Storage and Process, 2021, 21(1): 40-45, 53
- [41] Cao M M, Wang X L, Su J L, et al. Delayed senescence of kiwifruit by p-coumaric acid pretreatment during storage at 20 °C: toward regulating the ascorbate-glutathione cycle and phenolic anabolism [J]. Scientia Horticulturae, 2021, 280(2): 109913
- [42] Paciolla C, Fortunato S, Dipierro N, et al. Vitamin C in plants: from functions to biofortification [J]. Antioxidants, 2019, 8(11): 519
- [43] 李秋雨,曾凯芳,姚世响.活性氧在果实成熟和衰老中的作用及调控机制[J].食品与发酵工业,2020,46(17): 271-276  
LI Qiuyu, ZENG Kaifang, YAO Shixiang. Effect of reactive oxygen species on fruit ripening and senescence and the relevant mechanism [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(17): 271-276
- [44] 霍俊伟,高静,张鹏,等.1-甲基环丙烯对蓝靛果贮藏品质的影响[J].食品工业科技,2021,42(19):321-328  
HUO Junwei, GAO Jing, ZHANG Peng, et al. Effect of 1-methylcyclopropene on the storage quality of *Lonicera caerulea* L. [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(19): 321-328