

曾媛, 韩欣如, 薛思玥, 等. 采后熏蒸 1-甲基环丙烯对西兰花保鲜效果的影响及主成分分析 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(4): 332-340. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021060111

ZENG Yuan, HAN Xinru, XUE Siyue, et al. Effect of 1-Methylcyclopropene Fumigation on Preservation of Broccoli and Principal Component Analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(4): 332-340. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021060111

· 贮运保鲜 ·

采后熏蒸 1-甲基环丙烯对西兰花保鲜效果的影响及主成分分析

曾媛, 韩欣如, 薛思玥, 白奕昌, 姜丽*
(南京农业大学食品科技学院, 江苏南京 210095)

摘要:为解决采后西兰花不能及时预冷的问题, 本文拟采用 1 $\mu\text{L/L}$ 1-甲基环丙烯 (1-Methylcyclopropene, 1-MCP) 于 20 \pm 2 $^{\circ}\text{C}$ 处理西兰花 6 h, 通过测定采后西兰花的基础生理生化指标及相关抗氧化酶活性, 探讨采后立即 1-MCP 处理对西兰花的保鲜效果。结果表明: 1-MCP 处理能够显著提高西兰花贮藏 1 d 内的感官品质, 抑制了呼吸强度, 保持了较高的总硫代葡萄糖苷含量, 提高了 POD、APX、SOD 活性; 1-MCP 处理和预冷+冷藏处理都刺激了 H_2O_2 产生, 抑制了 CAT 活性。主成分分析结果表明: 色差 a^* 、呼吸强度、过氧化氢含量、硫代葡萄糖苷含量、CAT 活性是西兰花保鲜中的关键性指标。本研究表明西兰花采后立即用 1-MCP 处理能够取得良好的保鲜效果, 可以在无法及时预冷的情况下起到代替作用, 为西兰花的冷链运输和产业化提供理论依据。

关键词: 西兰花, 采后, 1-甲基环丙烯, 预冷, 保鲜效果

中图分类号: TS255.36

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)04-0332-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021060111



本文网刊:

Effect of 1-Methylcyclopropene Fumigation on Preservation of Broccoli and Principal Component Analysis

ZENG Yuan, HAN Xinru, XUE Siyue, BAI Yanchang, JIANG Li*

(College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: In order to solve the problem that broccoli could not be pre-cooled in time, 1 $\mu\text{L/L}$ 1-methylcyclopropene (1-MCP) was used to treat broccoli at 20 \pm 2 $^{\circ}\text{C}$ for 6 h. The effects of 1-MCP on the preservation of broccoli were studied by measuring the basic physiological and biochemical indexes and related antioxidant enzyme activities. The results showed that 1-MCP treatment could significantly improve the sensory quality of broccoli during one day storage, inhibit the respiratory intensity, maintain a higher total glucosinolates content, and improve the activities of POD, APX and SOD. 1-MCP treatment and pre-cooling and cold storage treatment stimulated H_2O_2 production and inhibited CAT activity. The results of principal component analysis showed that color difference a^* , respiratory intensity, hydrogen peroxide content, glucosinolates content and CAT activity were the key indexes in broccoli preservation. This study showed that 1-MCP treatment could achieve good preservation effect immediately after the broccoli was harvested, which could play a substitute role when it could not be pre-cooled in time. It would provide a theoretical basis for the cold chain transportation and industrialization of broccoli.

Key words: broccoli; postharvest; 1-methylcyclopropene; pre-cooling; preservation effect

西兰花 (*Brassica oleracea L. var. italica* Planch.) 别称花椰菜, 属十字花科芸薹属甘蓝的变种之一, 其

食用部分为绿色花球及肥嫩花茎。西兰花有“蔬菜皇冠”的美誉, 其富含多种营养素及生物活性成分, 如

收稿日期: 2021-06-15

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD)。

作者简介: 曾媛 (2000-), 女, 本科, 研究方向: 农产品贮藏与加工, E-mail: zengyuanyan@163.com。

* 通信作者: 姜丽 (1982-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 采后生物学, E-mail: jiangli@njau.edu.cn。

多酚类、硫代葡萄糖苷、类黄酮等^[1],可以减少许多慢性心血管疾病、肿瘤的发生^[2]。西兰花采后呼吸、代谢旺盛,水分易散失,运输过程中易出现机械损伤,常温下 24 h 花球就会发生黄化,失去商品价值^[3]。我国是西兰花生产大国,但是采后及时预冷的条件依旧不足,给菜农造成的经济损失较大。

目前,1-甲基环丙烯(1-Methylcyclopropene, 1-MCP)已广泛运用于果蔬的采后贮藏保鲜中。吕真真等^[4]在采后用 1 μL/L 1-MCP 密闭熏蒸桃果实 24 h,发现在贮藏前期可以显著性延缓桃果实硬度下降。Gamrasni D 等^[5]用 1-MCP 处理番茄,基于分子生物学水平的研究发现,1-MCP 处理影响了蛋氨酸生物合成相关代谢物的水平,从而影响乙烯的生成与作用。唐欣影^[6]研究发现,常温下 1-MCP 处理能有效延缓西兰花衰老,保持了叶绿素含量,降低了呼吸强度,延缓花球黄化,提高了西兰花的感官品质。许凤^[7]研究发现,1-MCP 处理通过调控糖代谢并维持较高水平可溶性糖来延缓西兰花的衰老,在分子生物学水平上调控一些基因的表达,从而抑制叶绿素的降解,延缓西兰花的黄化。

研究表明,1-MCP 熏蒸处理在常温条件下效果最好^[8],而常温 1-MCP 处理与及时预冷不可兼得,因而研究是否可以通过采后立即 1-MCP 处理提高西兰花保鲜品质,以期弥补西兰花采后无法及时冷链的问题,具有实际价值。本论文拟通过研究采后 1-MCP 处理的生理生化变化,数据分析比较,探讨 1-MCP 处理对采后 3 d 内西兰花的保鲜效果,以期为西兰花的冷链运输和产业化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

西兰花 采摘于江苏盐城响水县,要求材料大小均一,成熟度一致,无机械损伤;1-MCP 果蔬保鲜剂 有效浓度 3.3%,购于咸阳西秦生物科技有限公司。

Dansensor CheckMate3 顶空分析仪 丹麦 PBI Dansensor 公司;CR-400 型色差仪 日本柯尼卡美能达公司;Alpha-1860A 紫外-可见分光光度计 上海谱元有限公司;HH-6 数显恒温水浴锅 常州国华电器有限公司;TGL 16M 台式高速冷冻离心机 长沙维尔康湘鹰离心机有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 材料处理 将实验西兰花随机分为三组,每

组 30 颗,第一组为 1-MCP 处理组,采用 1 μL/L^[9]的 1-MCP 在 20±2 °C 条件下^[8]密闭熏蒸 6 h,熏蒸完毕后置于泡沫保温箱于 20±2 °C 放置;第二组为预冷+冷藏处理组,采后立即 0±1 °C 预冷 18 h 后置于 4±1 °C 冰箱保存;3 第三组为对照(CK)组,置于泡沫保温箱于 20±2 °C 放置。分别于 0、1、2、3 d 取样并测定相关指标,取样部位为西兰花花球,用液氮速冻置于-20±2 °C 冰箱保存。

1.2.2 感官评定方法 采用张娜等^[10]方法,对不同处理及不同贮藏天数的西兰花,从色泽、气味、组织状态、腐败情况、花蕾开放程度五个方面进行评定。单项评分为 9 分,精确到 0.1,总分取五项均值,5 分及以下判定为西兰花基本失去商品价值。具体评定标准见表 1,评定结果由 10 名经过培训的评定员给出。

1.2.3 呼吸强度测定 取质量相同的西兰花样品置于密封罐中,室温放置 1 h 后,用顶空分析仪测定。

1.2.4 色差测定 使用彩色色差仪测定,每个样品取中间和四周共 5 个点,测定取平均值。

1.2.5 叶绿素含量测定 参照张宪政等^[11]方法,稍加改进,以 95% 乙醇代替丙酮-乙醇混合液提取。称取磨碎样品 2 g,加 3~5 mL 95% 乙醇,混匀,于 4 °C、12000 ×g 离心后取上清液,用 95% 乙醇定容到 10 mL,以乙醇为空白,用分光光度计在波长 665、649 nm 处测定吸光度。叶绿素含量的计算公式为 $C=C_a+C_b$, $C_a=13.95A_{665\text{ nm}}-6.88A_{649\text{ nm}}$, $C_b=24.96A_{649\text{ nm}}-7.32A_{665\text{ nm}}$ (C_a 为叶绿素 a 含量, C_b 为叶绿素 b 含量)结果以 mg/g 表示。

1.2.6 过氧化氢含量测定 参照张帆等^[12]方法,称取磨碎样品 0.5 g,用 5 mL 丙酮溶解,于 4 °C、10000 ×g 离心 15 min。吸取 1 mL 上清液,加入 0.1 mL 20% 硫酸钛和 0.2 mL 浓氨水,于 25 °C 反应 10 min 后离心去上清液,沉淀中加 2 mL 丙酮,混匀离心,取沉淀加入 3 mL 2 mol/L 的硫酸,等沉淀完全溶解后定容至 10 mL,取上清液测定 415 nm 下吸光值,按同样的方法制作 H₂O₂ 标准曲线,最终的 H₂O₂ 含量表示为 $C(\mu\text{mol/g}\cdot F_w)=(n\times V)/(m\times V_s)$, $n(\mu\text{mol})$ 为标曲中查得的 H₂O₂ 浓度, $V(\text{mL})$ 为样品提取液总体积, $V_s(\text{mL})$ 为测定时所用提取液体积, $m(\text{g})$ 为样品质量。

1.2.7 总硫代葡萄糖苷测定 参照许凤^[7]方法略加

表 1 西兰花感官评定标准

Table 1 Sensory evaluation standard of broccoli

评分	色泽	气味	组织状态	腐败情况	花蕾开放程度
9	花球整体鲜绿	特有清香味	花球组织紧密	无腐烂	花蕾无开放
7	不超过10%花蕾变黄	轻度清香味	花球组织致密,硬挺	不超过5%花蕾出现斑点	不超过10%花蕾开放
5	10%~30%花蕾变黄	无清香味	花球外延稍软中心组织疏松	5%~10%花蕾出现斑点	10%~30%花蕾开放
3	30%~50%花蕾变黄	轻度异味	花球萎蔫超过50%	10%~20%花蕾出现斑点	30%~50%花蕾开放
1	超过50%花蕾变黄	明显腐臭味	花球全部萎蔫	超过20%花蕾出现斑点	超过50%花蕾开放

改动,用蒽酮比色法测定。称取两份 0.5 g 磨碎样品,测定管加 2 mL 蒸馏水,对照管加 2 mL 40% 酸化甲醇,静置 20 min 后,测定管和对照管同时加 40% 酸化甲醇至 10 mL。充分混匀后,10000 ×g 离心 15 min,取上清液至 50 mL 容量瓶中,加 5 mL 蒸馏水混匀,加入 5 mL 21.9% 乙酸锌溶液和 5 mL 10.6% 亚铁氰化钾溶液,定容至刻度,混匀后静置 30 min,用滤纸过滤,所得样品滤液备用。准确吸取测定管和对照管液体各 1 mL 加入冰浴的试管中,加入 4 mL 蒽酮-硫酸溶液混匀,沸水浴 10 min,冷却 10 min 后,测定 620 nm 下吸光值。按相同方法制作葡萄糖标准曲线,根据标曲读取对应吸光度的总硫苷含量(mg),再根据样品质量获得每克样品总硫苷含量(mg/g)。

1.2.8 过氧化物酶活性测定 采用愈创木酚法^[13],测定 470 nm 处吸光值。称取磨碎样品 0.5 g,加入 5 mL 磷酸钠缓冲液,混匀,于 4 °C、10000 ×g 离心 15 min。取上清液 0.05 mL,加入 3 mL POD 反应液(100 mmol/L pH6.0 磷酸缓冲液+0.56 mL 愈创木酚+0.38 mL 30% 过氧化氢),每隔 1 min 记录 570 nm 下吸光值,连续记录 3~5 min。以每分钟吸光值变化 0.01 为一个酶活力单位,结果表示为 $U \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{Fw}$ 。

1.2.9 过氧化氢酶活性测定 参照许宙等^[14]方法,测定 240 nm 处吸光值。称取磨碎样品 0.5 g,加入 6 mL 磷酸缓冲液,混匀,于 4 °C、10000 ×g 离心 15 min。取上清液 0.05 mL,加入 1.7 mL 蒸馏水、1 mL Tris-HCL,25 °C 水浴 3 min,再加入 0.2 mL 200 mmol/L 过氧化氢,测定时加入 0.05 mL 上清液,测定 240 nm 下吸光值变化,每隔 30 s 测定一次,连续反应 3 min。以每分钟吸光值变化 0.01 为一个酶活力单位,结果表示为 $U \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{Fw}$ 。

1.2.10 抗坏血酸过氧化物酶活性测定 参照 Nakano 等^[15]方法,测定 290 nm 处吸光值。称取磨碎样品 0.5 g,加入 6 mL 50mmol/L pH7.0 PBS 缓冲液,混匀,于 4 °C、4000 r/min 离心 10 min,取上清液 0.1 mL,加入 1.4 mL APX 反应液(150 mmol/L PBS 缓冲液+0.3 mmol/L 抗坏血酸+0.06 mmol/L 过氧化氢),室温下连续反应 3 min,每 30 s 记录一次 290 nm 处吸光值。以每分钟吸光值变化 0.01 为一个酶活力单位,结果表示为 $U \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{Fw}$ 。

1.2.11 超氧化物歧化酶活性测定 采用氮蓝四唑法^[16],以抑制 NBT 光化还原的 50% 为一个酶活力单位^[17]。称取磨碎样品 0.5 g,加入 5 mL PBS 缓冲液,于 4 °C、12000 ×g 离心 30 min,取上清液备用。测定管和对照管分别加入 1.7 ml 50 mmol/L 磷酸缓冲液,0.3 mL 130 mmol/L MET 溶液,0.3 mL 750 μmol/L NBT 溶液,0.3 mL 100 μmol/L EDTA-Na₂ 溶液,0.3 ml 20 μmol/L 核黄素溶液,测定管加 0.1 ml 酶液,对照管以缓冲液代替。混匀后将 1 支对照管置于暗处,其他各管置于 4000 lx 日光灯反应 15 min 后,立即

取出,置于暗处终止反应,于 560 nm 处测定吸光值。

1.3 数据处理

各组实验数据重复三次,基础数据采用 Excel 2013 进行统计分析,采用 Origin Pro2018 软件作图,采用 SPSS23 软件进行主成分分析($P < 0.05$ 代表显著性差异, $P < 0.01$ 代表极显著差异)。

2 结果与分析

2.1 不同处理方式对西兰花贮藏期感官品质的影响

感官评价可以直观地看出两种处理对于西兰花品质的影响。如图 1 所示,预冷+冷藏处理以及 1-MCP 熏蒸处理在采后 1 d 内均显著延缓了西兰花感官品质的下降($P < 0.05$)。与 CK 组比较,1-MCP 处理在采后 1 d 内效果显著,保留了较好的感官品质。以感官评定得分低于 5 分来判定西兰花基本失去商品价值,1-MCP 处理组在采后 1 d 内依旧具有良好的商品价值。

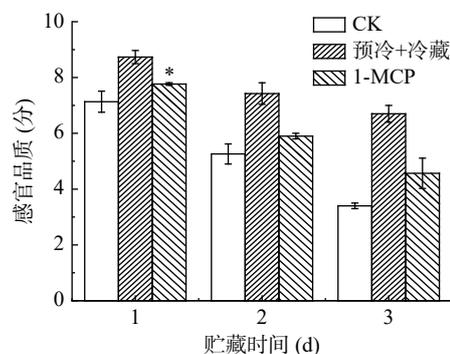


图 1 不同处理对西兰花感官品质的影响

Fig.1 Different treatments on sensory quality of broccoli
注: *表示 1-MCP 处理组与 CK 组具有显著性差异 ($P < 0.05$)。

2.2 不同处理方式对西兰花呼吸强度的影响

西兰花在采后呼吸作用旺盛,因而呼吸强度是衡量其代谢的重要指标。如图 2 所示,贮藏 1 d 时,预冷+冷藏处理及 1-MCP 处理均显著降低了西兰花的呼吸强度($P < 0.05$)。但 2 d 以后 1-MCP 处理与 CK 组无显著性差异。与 CK 组比较,1-MCP 处理延缓了西兰花呼吸高峰的出现,在 1 d 以内能够有效提高西兰花短期贮藏的品质。

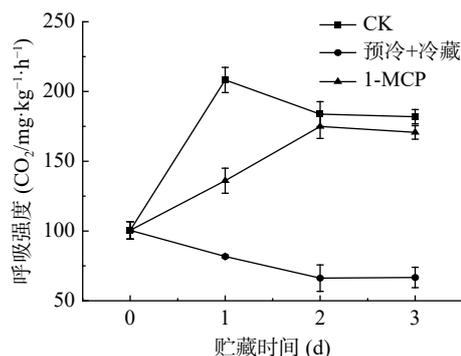


图 2 不同处理对西兰花呼吸强度的影响

Fig.2 Different treatments on respiratory intensity of broccoli

2.3 不同处理方式对西兰花色差 a^* 、 b^* 的影响

a^* 越小表明被测物越偏绿色, b^* 值越大表明被测物越偏黄色^[18]。由图 3 可知, CK 组与两个处理组的 a^* 值都在上升, 在第 1 d, 出现显著性差异 ($P < 0.05$)。CK 组与 1-MCP 组的 b^* 值变化规律一致, 都是先上升再下降最后又上升, 在贮藏第 1 d 出现显著性差异 ($P < 0.05$), 此变化过程与叶绿素酶和脱镁叶绿素酶的活性有关, 这两种酶在代谢过程中能产生合成叶绿素 b 的中间产物^[19]。采后 1 d 内 1-MCP 处理对抑制 a^* 值增大有效, 可以显著地保持西兰花的绿色。

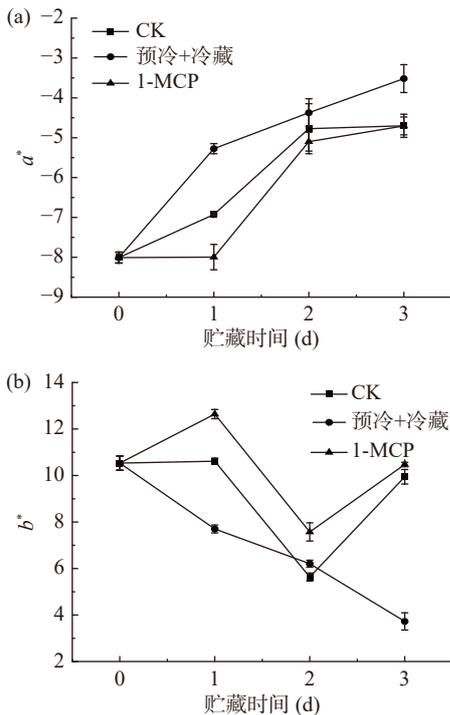


图 3 不同处理对西兰花色差 (a^* 、 b^*) 的影响
Fig.3 Different treatments on color difference (a^* 、 b^*) of broccoli

2.4 不同处理方式对西兰花叶绿素含量的影响

新鲜西兰花的花球呈鲜绿色, 叶绿素是形成这种绿色的重要成分, 故西兰花的叶绿素含量可以直观反映其新鲜程度。由图 4 可知, 贮藏期间, 西兰花叶绿素含量整体呈下降趋势。但是, 在采前 1 d 内 1-MCP

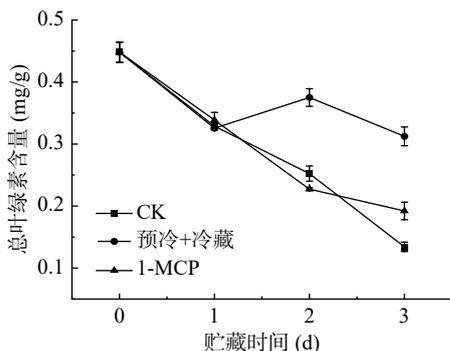


图 4 不同处理对西兰花叶绿素含量的影响
Fig.4 Different treatments on chlorophyll content of broccoli

处理及预冷+冷藏处理对叶绿素的影响都不显著, 第 2 d 出现显著性差异 ($P < 0.05$)。

2.5 不同处理方式对西兰花过氧化氢含量的影响

H_2O_2 是植物体内正常代谢或者受到胁迫刺激而产生的一种活性氧, 微量 H_2O_2 可以调控植物的生理生化反应, 大量 H_2O_2 则会对植物体产生伤害。由图 5 可知, 采后 3 d H_2O_2 含量呈上升趋势, 1-MCP 处理和预冷+冷藏处理促进了 H_2O_2 的上升, 在采后第 1 d 出现显著性差异 ($P < 0.05$), 可能与 1-MCP 和预冷+冷藏处理加重了西兰花对逆境胁迫的反应有关^[20]。

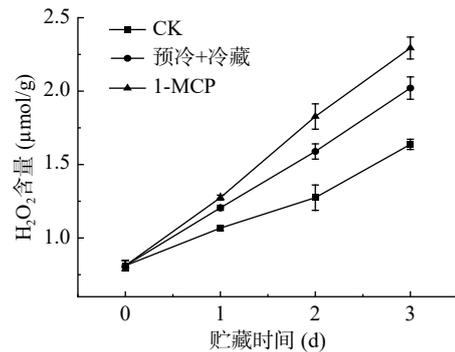


图 5 不同处理对西兰花过氧化氢含量的影响
Fig.5 Different treatments on hydrogen peroxide content in broccoli

2.6 不同处理方式对西兰花总硫代葡萄糖苷含量的影响

硫代葡萄糖苷是西兰花富含的一种生物活性物质, 其含量是衡量西兰花营养价值的重要指标^[21]。由图 6 可见, 1-MCP 处理组和 CK 组硫苷含量的变化趋势一致, 在贮藏第 1 d 上升后又趋于下降。在采后 1 d 内, 1-MCP 处理和预冷+冷藏处理均抑制了硫代葡萄糖苷的合成, 且二者之间差异不显著, 但与 CK 组差异显著 ($P < 0.05$)。采后第 2、3 d 1-MCP 处理与预冷+冷藏处理组出现显著性差异 ($P < 0.05$), 可见仅在采后 1 d 内 1-MCP 代替预冷具有良好的效果。

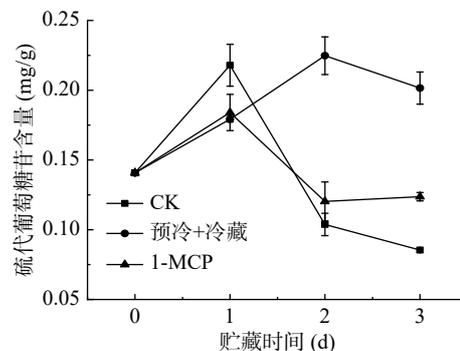


图 6 不同处理对西兰花硫代葡萄糖苷含量的影响
Fig.6 Different treatments on glucosinolates content in broccoli

2.7 不同处理方式对西兰花 POD 活性的影响

过氧化物酶是一与类血红素相关的酶, 一方面

可以催化 H_2O_2 反应^[22],一方面与果蔬贮藏期间发生的褐变密切相关^[23]。如图 7 所示,贮藏 1 d 内 POD 活性上升,出现显著性差异 ($P<0.05$)。贮藏 1 d 内,1-MCP 处理及预冷+冷藏处理都促进了 POD 活性的提高。POD 酶活性的提高会刺激果实产生 H_2O_2 ,与上文采后 H_2O_2 含量的测定结果具有一致性。

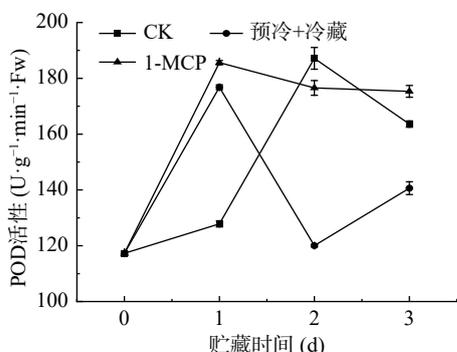


图 7 不同处理对西兰花 POD 活性的影响

Fig.7 Different treatments on peroxidase activity of broccoli

2.8 不同处理方式对西兰花 CAT 活性的影响

由图 8 可知,采后短期贮藏中,CAT 活性呈上升趋势,1-MCP 处理和预冷+冷藏处理抑制了 CAT 酶活性的上升,在贮藏第 2 d 才出现显著性差异 ($P<0.05$),采后 1 d 内几乎没有差异。结果表明,采后 1 d 内 1-MCP 处理及预冷+冷藏处理对 CAT 活性的抑制效果差不多。

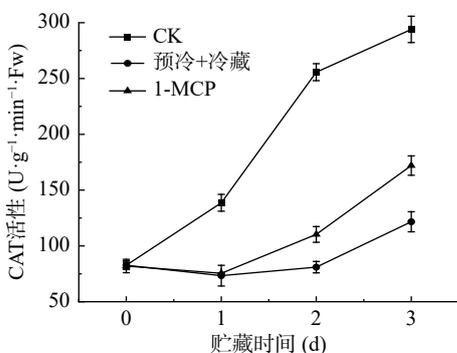


图 8 不同处理对西兰花 CAT 活性的影响

Fig.8 Different treatments on catalase activity of broccoli

2.9 不同处理方式对西兰花 APX 活性的影响

抗坏血酸过氧化物酶是植物活性代谢的重要抗氧化酶之一,其活性提高,可以降低超氧阴离子的产生速率,从而减少对细胞的损失^[24]。由图 9 可知,采后 1-MCP 处理及预冷+冷藏处理促进了 APX 活性的增强,在贮藏第 1 d 出现显著性差异 ($P<0.05$),有利于减少植物体内活性氧的积累,从而延缓植物衰老。虽然 1-MCP 处理对 APX 活性的促进效果要低于预冷+冷藏处理,但与 CK 组相比,在采后预冷条件不足时仍能取到很好的效果。

2.10 不同处理方式对西兰花 SOD 活性的影响

超氧化物歧化酶是植物代谢过程中重要的自由基清除剂之一,与植物的衰老密切相关^[20]。由图 10

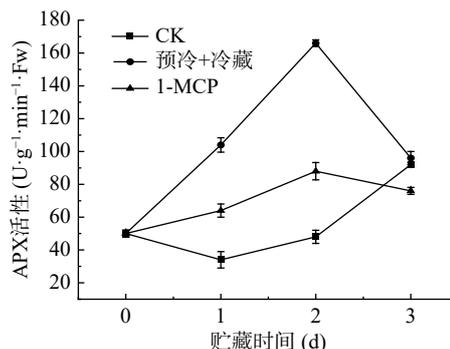


图 9 不同处理对西兰花 APX 活性的影响

Fig.9 Different treatments on ascorbate peroxidase activity of broccoli

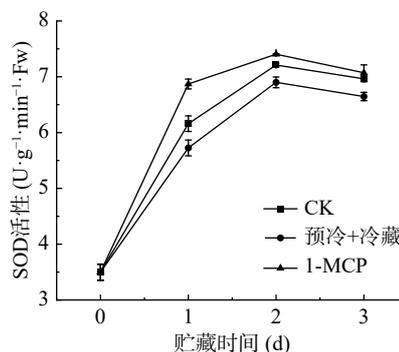


图 10 不同处理对西兰花 SOD 活性的影响

Fig.10 Different treatments on superoxide dismutase activity of broccoli

可知,采后西兰花的 SOD 活性呈先上升后下降趋势,1-MCP 处理促进了 SOD 活性的提高,在贮藏第 1 d 出现显著性差异 ($P<0.05$)。因此,在通过 SOD 作用清除自由基的这条代谢途径中,1-MCP 处理的效果要优于预冷+冷藏处理。

2.11 Pearson 相关性分析及主成分分析

对西兰花 10 种理化指标: a^* (X_1)、 b^* (X_2)、呼吸强度 (X_3)、叶绿素 (X_4)、 H_2O_2 (X_5)、硫代葡萄糖苷 (X_6)、CAT (X_7)、POD (X_8)、APX (X_9)、SOD (X_{10}) 进行 Pearson 相关性分析及主成分分析,结果见表 2、表 3、图 11。

2.11.1 Pearson 相关性分析

由表 2,对不同处理组的西兰花 10 项理化指标进行 Pearson 相关性分析,结果如下: a^* 值与 b^* 值呈显著负相关 ($P<0.05$),表明当 a^* 值呈负值且越小, b^* 值越小时,西兰花的色泽越绿。呼吸强度与 APX 活性呈显著负相关 ($P<0.05$),表明 APX 活性升高可能加快了活性氧的清除,减少植物体的氧化应激,在某种程度上减缓了呼吸作用,延缓西兰花的衰老^[24]。叶绿素含量与硫代葡萄糖苷含量呈极显著正相关 ($P<0.01$),表明通过西兰花的黄化程度可以判断它的部分营养成分的流失情况。叶绿素含量与 CAT 活性呈显著负相关 ($P<0.05$),CAT 活性增加,可以加快活性氧的清除,减缓对细胞的损害^[17],可能在一定程度上增加了叶绿素酶等相关酶的活性,加快了叶绿素的降解。硫代葡萄糖苷含量与

表 2 10 种测定指标的 Pearson 相关性分析

Table 2 Pearson correlation analysis of 10 measurement indexes

指标	a^*	b^*	呼吸强度	叶绿素	H ₂ O ₂	硫苷	CAT活性	POD活性	APX活性	SOD活性
a^*	1.000									
b^*	-0.796*	1.000								
呼吸强度	-0.375	0.521	1.000							
叶绿素	-0.293	-0.181	-0.589	1.000						
H ₂ O ₂	0.605	-0.177	-0.126	-0.459	1.000					
硫苷	-0.225	-0.102	-0.567	0.914**	-0.286	1.000				
CAT活性	0.287	0.001	0.595	-0.784*	0.090	-0.763*	1.000			
POD活性	-0.213	0.265	0.306	-0.444	-0.009	-0.689*	0.220	1.000		
APX活性	0.515	-0.406	-0.756*	0.242	0.360	0.275	-0.346	-0.400	1.000	
SOD活性	0.215	-0.059	0.328	-0.487	0.535	-0.566	0.385	0.275	0.016	1.000

注: *表示具有显著相关性($P<0.05$); **表示具有极显著相关性($P<0.01$)。

表 3 成分矩阵

Table 3 Component matrix

	成分		
	1	2	3
X ₁	0.007	0.947	-0.275
X ₂	0.312	-0.714	0.435
X ₃	0.790	0.433	-0.148
X ₄	-0.903	-0.279	0.014
X ₅	0.233	0.736	0.458
X ₆	-0.932	-0.221	-0.003
X ₇	0.795	0.186	-0.482
X ₈	0.618	-0.187	0.314
X ₉	-0.526	0.653	0.263
X ₁₀	0.583	0.410	0.366

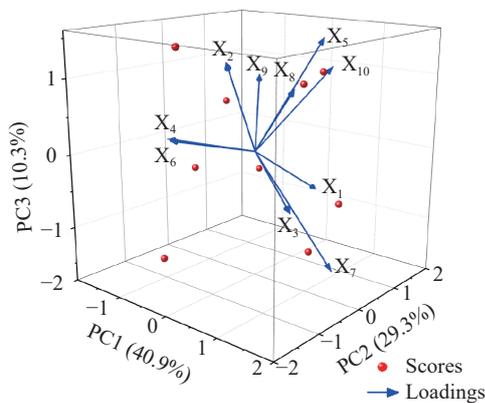


图 11 西兰花理化指标 PCA 图

Fig.11 PCA chart of broccoli physical and chemical indexes

CAT 活性及 POD 活性均呈显著负相关($P<0.05$), 因为西兰花在贮藏期间, 硫苷作为营养物质不断流失, 相关抗氧化酶活性提高。

2.11.2 主成分分析 对 10 种西兰花理化指标: $a^*(X_1)$ 、 $b^*(X_2)$ 、呼吸强度(X_3)、叶绿素(X_4)、H₂O₂(X_5)、硫代葡萄糖苷(X_6)、CAT(X_7)、POD(X_8)、APX(X_9)、SOD(X_{10})进行主成分分析, 主成分见图 11, 特征矩阵见表 3。以特征值大于 1, 提取出 3 个主成分, 累积贡献率为 80.5%, 可以代表原始数据的绝大部分

信息。

由图 11、表 3 可知, 第一主成分贡献率为 40.9%, 呼吸强度(X_3)载荷 0.790、叶绿素(X_4)载荷-0.903、硫代葡萄糖苷(X_6)载荷-0.932、CAT(X_7)载荷 0.795 占比最高; 结合表 2, 由于叶绿素和硫代葡萄糖苷呈极显著正相关($P<0.01$), 且二者与 CAT 活性呈显著负相关($P<0.05$), 所以只提取硫代葡萄糖苷和呼吸强度作为代表性指标, 分别为营养指标和代谢指标。由图 11, 第二主成分贡献率为 29.3%; 由表 3, $a^*(X_1)$ 载荷 0.947、H₂O₂(X_5)载荷 0.736、 $b^*(X_2)$ 载荷-0.714 占比最高; 结合表 2, 由于 a^* 值与 b^* 值呈显著负相关($P<0.05$), 所以提取 a^* 、H₂O₂ 为代表性指标, 分别为品质指标和抗氧化指标。第三主成分贡献率为 10.3%; 由表 3, CAT(X_7)载荷-0.482 占比最高, 提取为代表性抗氧化指标。综上, 本试验提取 $a^*(X_1)$ 、呼吸强度(X_3)、H₂O₂(X_5)、硫代葡萄糖苷(X_6)、CAT(X_7)作为评定西兰花感官品质的核心指标。

2.11.3 综合评价 以 3 个主成分作为自变量, 感官品质得分作为因变量, 进行多元线性回归分析, 得到感官品质与各理化指标的线性回归模型($R^2=0.802$, $P<0.05$)如下:

$$Y=6.321-0.254X_1+0.186X_2-0.403X_3+0.359X_4+0.035X_5+0.354X_6-0.527X_7-0.047X_8-0.023X_9-0.088X_{10}$$

此模型消除了回归分析中相关性带来的误差, 有助于根据各因子的占比, 更好地观测影响西兰花感官品质的理化指标。

3 讨论与结论

西兰花采后生理代谢旺盛, 衰老迅速, 主要体现在呼吸作用旺盛, 营养物质降解, 花球黄化、开花等方面^[25]。本实验表明, 采后一天内, 1-MCP 处理显著抑制了色差 a^* 值的增加, 在贮藏前期显著延缓了叶绿素的降解, 与陈锦等^[26]采用低温贮藏研究龙眼果实的耐贮性研究结果一致。叶绿素含量影响西兰花花球的黄化和营养状况^[27], 其降解与有关叶绿素酶活性密切相关。谢晓宇等^[28]研究发现, 预冷结合低温

贮藏可以显著抑制叶绿素酶活性,从而减少西兰花贮藏期间叶绿素的降解。1-MCP处理具有和预冷结合冷藏处理相同的作用。

呼吸强度是体现果蔬生理代谢活性的重要指标。果蔬采后由于逆境胁迫^[29],呼吸强度会增强。西兰花属于呼吸跃变型果实,采后会出现呼吸高峰,呼吸强度呈先上升后下降趋势^[30]。本实验研究表明,1-MCP处理显著降低了西兰花贮藏期间的呼吸强度,延缓了呼吸高峰的出现。用1-MCP处理桃^[31]、番石榴^[32]、番茄^[33]和娃娃菜^[34]等都显著降低了果蔬的呼吸强度,与本实验研究结果一致。

硫代葡萄糖苷主要存在于十字花科植物中,是一种富含氮、硫的植物刺激代谢产物,可以赋予植物特殊的风味^[35],并且具有一定的生物活性,可以起到抗肿瘤的作用^[36]。本实验的1-MCP处理显著延缓了西兰花硫代葡萄糖苷含量的下降,保持了西兰花贮藏期间的营养品质。

一般情况下,植物体内的活性氧(ROS)代谢处于动态平衡状态,逆境胁迫会使植物体内的ROS代谢失衡,导致其在植物体内蓄积,造成氧化伤害^[37-38]。本实验1-MCP处理调节了西兰花的抗氧化系统,提高了相关抗氧化酶的活性,加快了植物体对活性氧自由基的清除能力,有效延缓了西兰花的衰老。千春录等^[39]用1-MCP处理猕猴桃发现显著提高了SOD、APX活性。王玉玲等^[40]研究发现1-MCP处理蓝莓显著抑制了果实总抗氧化能力的下降。本实验发现,在采后1d内1-MCP处理促进了西兰花POD活性的上升。同时本实验1-MCP处理及预冷+冷藏处理均未能降低H₂O₂的含量,可能是处理加剧了西兰花贮藏前期的氧化应激^[20]。Mittler^[41]研究发现H₂O₂可以诱导POD的合成,从而增加POD活性,与本实验结果一致。

本研究表明,采后用1 μL/L 1-MCP熏蒸6h并于20℃放置,在采后1d内,有效抑制了西兰花呼吸强度,抑制了a*值的增加,维持了西兰花的感官品质;对叶绿素和硫代葡萄糖苷的含量的影响与预冷+冷藏处理的效果相同,无显著性差异;对于H₂O₂和CAT的作用与预冷+冷藏组趋势一致,都可能引起了西兰花的氧化应激;同时,1-MCP处理显著提高了POD、APX、SOD活性,提高了西兰花的抗氧化能力,在一定程度上延缓了西兰花的衰老,显著延长了西兰花的货架期。主成分分析表明,色差a*、呼吸强度、H₂O₂、硫代葡萄糖苷和CAT活性是影响西兰花保鲜效果的关键性指标。综上,西兰花采后用1-MCP处理效果比较理想,可以在预冷条件不足的情况下起到替代作用,本实验为后续的西兰花的冷链运输和工业化提供了理论依据。

参考文献

[1] NAGRAJ G S, CHOUKSEY A, JAISWAL S, et al. Broccoli [M]. Nutritional Composition and Antioxidant Properties of Fruits

and Vegetables, 2020: 5-17.

[2] LINK L B, POTTER J D. Raw versus cooked vegetables and cancer risk[J]. Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention: A Publication of the American Association for Cancer Research, Co-sponsored by the American Society of Preventive Oncology, 2004, 13(9): 1422-1435.

[3] 洪宗. 西兰花的采收和贮藏[J]. 农村新技术, 2019(11): 58-59. [HONG Z. Harvesting and storage of broccoli[J]. New Technology in Rural Areas, 2019(11): 58-59.]

[4] 吕真真, 刘慧, 张春岭, 等. 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[J]. 食品工业科技, 2021, 42(7): 317-323. [LV Z Z, LIU H, ZHANG C L, et al. Effects of 1-methylcyclopropene and different ambient temperature on firmness and cell wall pectin in postharvest nectarine[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(7): 317-323.]

[5] GAMRASNI D, FELDMESSER E, BEN-ARIE R, et al. Gene expression in 1-methylcyclopropene(1-MCP) treated tomatoes during pre-climacteric ripening suggests shared regulation of methionine biosynthesis, ethylene production and respiration[J]. Agronomy, 2020, 11(10): 1669.

[6] 唐欣影. ClO₂缓释剂结合1-MCP处理对西兰花常温货架期保鲜作用的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017. [TANG X Y. Study on the effects of susrained-release ClO₂ and 1-MCP treatments on the quality of broccoli during shelf life at room temperature[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017.]

[7] 许凤. 采后处理对延缓青花菜衰老的作用及其机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012. [XU F. Study on effect and mechanism of postharvest treatments on delaying senescence of broccoli florets[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.]

[8] 陈金印, 刘康. 1-甲基环丙烯(1-MCP)在果蔬贮藏保鲜上的应用研究进展[J]. 江西农业大学学报, 2008(2): 215-219. [CHEN J Y, LIU K. Research advances in research on application of 1-MCP in storage and fresh-keeping of fruit and vegetable[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2008(2): 215-219.]

[9] 国崇文. 1-MCP、生物保鲜剂结合PE包装对西兰花贮藏品质的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018. [GUO C W. Effects of 1-MCP, biological preservative and PE packaging on storage quality of broccoli[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2018.]

[10] 张娜, 阎瑞香, 关文强, 等. LED单色红光对西兰花采后黄化抑制效果的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(4): 955-959. [ZHANG N, YAN R X, GUAN W Q, et al. Effect of LED monochromatic red light on inhibition of postharvest etiolation of broccoli[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(4): 955-959.]

[11] 张宪政. 植物叶绿素含量测定: 丙酮乙醇混合液法[J]. 辽宁农业科学, 1986(3): 26-28. [ZHANG X Z. Determination of chlorophyll content in plants: Acetone and ethanol mixture method[J]. Liaoning Agricultural Science, 1986(3): 26-28.]

[12] 张帆, 王友升, 刘晓艳, 等. 采前水杨酸处理对树莓果实贮藏效果及抗氧化能力的影响[J]. 食品科学, 2010, 31(10): 308-312. [ZHANG F, WANG Y S, LIU X Y, et al. Effect of pre-harvest salicylic acid spray treatment on fruit quality and antioxidant

- ant capacity of raspberry during post-harvest storage[J]. *Food Science*, 2010, 31(10): 308–312.]
- [13] 郑永华, 寇莉萍. 食品贮运学实验[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013: 62–64. [ZHENG Y H, KOU L P. Experiment of Food Storage and Transportation[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2013: 62–64.]
- [14] 许宙, 周文化, 周其中. 鲜切新高梨褐变相关酶活性研究[J]. *湖南林业科技*, 2008(2): 17–20. [XU Z, ZHOU W H, ZHOU W H. Study on the enzyme activity correlated to browning in the fresh-cut nittaka pear[J]. *Hunan Forestry Science and Technology*, 2008(2): 17–20.]
- [15] NAKANO Y, ASADA K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts[J]. *Plant Cell Physiology*, 1981, 22(5): 867–880.
- [16] HUANG X S, LIU J H, CHEN X J. Overexpression of PtrABF gene, abZIP transcription factor isolated from poncirustrifoliolate, enhances dehydration and drought tolerance in tobacco via scavenging ROS and modulating expression of stress-responsive genes[J]. *BMC Plant Biology*, 2010, 10(1): 230.
- [17] 谢忠斌, 叶春海, 等. 1-MCP 和乙烯利处理对采后菠萝蜜果实活性氧代谢的影响[J]. *热带作物学报*, 2018, 39(1): 77–83. [XIE Z B, YE C H, et al. Effects of 1-MCP and ethephon treatment on reactive oxygen metabolism of postharvest jackfruit[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2018, 39(1): 77–83.]
- [18] 谢晓宇, 韩欣如, 曾媛, 等. 采前 CaCl_2 处理对采后西兰花品质的影响[J]. *保鲜与加工*, 2021, 21(3): 40–47. [XIE X Y, HAN X R, ZENG Y, et al. Effects of pre-harvest CaCl_2 treatments on post-harvest quality of broccoli[J]. *Storage and Process*, 2021, 21(3): 40–47.]
- [19] 宋小青, 任亚梅, 张艳宜. 采后猕猴桃叶绿素降解机制及 1-MCP 处理对其代谢的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(17): 260–265. [SONG X Q, REN Y M, ZHANG Y Y. Mechanism of chlorophyll degradation and effect of 1-MCP treatment on chlorophyll metabolism in postharvest kiwifruit[J]. *Food Science*, 2017, 38(17): 260–265.]
- [20] 张飞, 石杰, 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*, 2021. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20201219-222. [ZHANG F, SHI J, XIE Y T, et al. Effects of 1-methylcyclopropene on the antioxidant system of gymura bicolor DC[J]. *Food Science*, 2021. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20201219-222.]
- [21] BONES A M, ROSSITER J T. The enzymic and chemically induced decomposition of glucosinolates[J]. *Phytochemistry*, 2006, 67(11): 1053–1067.
- [22] 姚春娜, 裴新梧, 孔英珍, 等. 盐胁迫下小麦新品系 89122 的抗氧化酶活性和内源 ABA 含量变化的研究[J]. *兰州大学学报*, 2001, 37(4): 78. [YAO C N, PEI X W, KONG Y Z, et al. Activities of antioxidant enzyme and contents of ABA in new wheat line 89122 under salt stress[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2001, 37(4): 78.]
- [23] RICHARD-FORGET F C, GAUILLARD F A. Oxidation of chlorogenic acid, catechins, and 4-methylcatechol in model solutions by combinations of pear (*Pyrus communis* cv Williams) polyphenol oxidase and peroxidase: A possible involvement of peroxidase in enzymatic browning[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1997, 45(7): 2472–2476.
- [24] 侯晓婉, 鹿志伟, 张鲁斌, 等. 外源抗坏血酸对采后菠萝黑心病发生及抗氧化性能的影响[J]. *果蔬学报*, 2018, 35(9): 1105–1116. [HOU X W, LU Z W, ZHANG L B, et al. Effect of exogenous ascorbic acid on blackheart occurrence and anti-oxidation activity in postharvest pineapple[J]. *Journal of Fruit Science*, 2018, 35(9): 1105–1116.]
- [25] MA G, WANG R, WANG C R, et al. Effect of 1-methylcyclopropene on expression of genes for ethylene biosynthesis enzymes and ethylene receptors in post-harvest broccoli[J]. *Plant Growth Regulation*, 2009, 57(3): 223–232.
- [26] 陈锦, 林毅雄, 林育钊, 等. 低温贮藏对‘松风本’龙眼果实品质和耐贮性的影响[J]. *热带作物学报*, 2020, 41(11): 2314–2321. [CHEN J, LIN Y X, LIN Y Z, et al. Effects of low temperature storage on quality and storability of ‘Songfengben’ longan fruit[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2020, 41(11): 2314–2321.]
- [27] 罗政, 许超群, 陈飞平, 等. LED 光照对气调保鲜菜心的叶绿素合成代谢的影响[J]. *保鲜与加工*, 2021. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1330.S.20210309.1325.009.html>. [LUO Z, XU C Q, CHEN F P, et al. Effects of LED light on chlorophyll synthesis and metabolism of modified atmosphere cabbage[J]. *Storage and Process*, 2021. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1330.S.20210309.1325.009.html>]
- [28] 谢晓宇, 张飞, 石洁, 等. 预冷处理结合低温贮藏对西兰花贮藏品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(7): 302–310. [XIE X Y, ZHANG F, SHI J, et al. Effect of pre-cooling treatment and low temperature storage on storage quality of broccoli[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(7): 302–310.]
- [29] 范海廷, 崔娜, 邵美娜, 等. 植物应答逆境胁迫的蛋白质组学研究进展[J]. *生物技术通报*, 2009(10): 15–19, 25. [FAN H Y, CUI N, SHAO M N, et al. Advances on proteomics of plants under stresses[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2009(10): 15–19, 25.]
- [30] 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 W R, WANG X, LIU X L, 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.]
- [31] 曹森, 何贵红, 王瑞, 等. 臭氧结合 1-MCP 对桃子货架期品质的影响[J]. *食品工业*, 2021, 42(2): 6–10. [CAO S, HE G H, WANG R, et al. Effect of combined treatment of O_3 and 1-MCP on the quality of peach fruits during shelf life[J]. *Food Industry*, 2021, 42(2): 6–10.]
- [32] 陈洪彬, 杨菁美, 吴锦雯, 等. 1-MCP 处理提高采后“红心”番石榴果实品质和耐贮性[J]. *食品与发酵科技*, 2021, 57(2): 49–55. [CHEN H B, YANG J M, WU J W, et al. 1-MCP treatment improves quality and storability of postharvest “Hongxin” guava fruit[J]. *Food and Fermentation Sciences & Technology*, 2021, 57(2): 49–55.]
- [33] 林旭东, 康孟利, 朱麟, 等. 气调和 1-MCP 对番茄常温配送品质的影响[J]. *农产品加工*, 2021(8): 5–7. [LIN X D, KANG M L, ZHU L, et al. Effects of modified atmosphere and 1-MCP on the

quality of tomato at room temperature[J]. *Farm Products and Processing*, 2021(8): 5-7.]

[34] 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. DOI: 13995/j.cnki.11-1802/ts.026847. [AN R H, CHEN W Y, HU H L, et al. Effects of 1-methylcyclopropene on the storage quality and antioxidant properties of baby cabbage[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.026847]

[35] BONES A M, ROSSITER J T. The enzymic and chemically induced decomposition of glucosinolates[J]. *Phytochemistry*, 2002, 67(11): 1053-1067.

[36] FAHEY J W, STEPHENSON K K, TALALAY P. Glucosinolates, myrosinase, and Isothiocyanates: three reasons for eating *Brassica* vegetables[J]. *ACS Symposium Series*, 1998, 701: 16-22.

[37] HUANG J, KLIONSKY D J. Autophagy and human disease[J]. *Cell Cycle*, 2007, 6(15): 1837-1849.

[38] NOCTOR G, MHAMDI A, FOYER C H. The roles of reactive oxygen metabolism in drought: Not so cut and dried[J]. *Plant Physiology*, 2014, 164(4): 1636-1648.

[39] 千春录, 殷间东, 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*, 2021, 39(11): 233-240. [QIAN C L, YIN J D, WANG L B, et al. Effects of 1-methylcyclopropene treatment and self-developed modified atmosphere on quality and reactive oxygen species metabolism of kiwi-fruits during storage[J]. *Food Science*, 2021, 39(11): 233-240.]

[40] 王玉玲, 高继鑫, 张新富, 等. 1-MCP 处理对蓝莓冷藏保鲜效果的影响[J]. *食品研究与开发*, 2015, 36(10): 132-136. [WANG Y L, GAO J X, ZHANG X F, et al. Effects of 1-methylcyclopropene treatment on the blueberry fruit quality during cold storage [J]. *Food Research and Development*, 2015, 36(10): 132-136.]

[41] MITTLER R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance[J]. *Trends in Plant Science*, 2002, 7: 405-410.