张舒菲, 熊敏, 潘中田, 等. 肉桂酸对鲜切莴苣红变及活性氧代谢的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(11): 387−397. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040385

ZHANG Shufei, XIONG Min, PAN Zhongtian, et al. Effect of Cinnamic Acid on Reddening and Active Oxygen Metabolism of Fresh-cut Lettuce[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(11): 387−397. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040385

· 贮运保鲜 ·

肉桂酸对鲜切莴苣红变及活性氧代谢的影响

张舒菲[1,2], 熊　敏[3], 潘中田[2], 何妹英[2], 刘云芬[2], 殷菲胧[2,*], 帅　良[2,3,*]

（1.大连工业大学食品学院, 辽宁 大连 116034;
2.贺州学院食品与生物工程学院, 广西康养食品科学与技术重点实验室, 广西 贺州 542899;
3.南昌师范学院化学与食品科学学院, 江西 南昌 330032）

摘　要: 本研究旨在探讨外源肉桂酸（cinnamic acid，CA）对鲜切莴苣红变及活性氧代谢的调控作用。以鲜切莴苣为试材，采用 0.5 g/L CA 溶液浸泡处理组，以清水浸泡为对照组（CK），两组样品于 4±0.5 ℃ 下贮藏，并每隔 2 d 取样一次，持续 8 d。结果表明，与 CK 组相比，CA 处理抑制了鲜切莴苣红变度及 a^*值的升高，减缓了 L^*值的下降，有效保持了鲜切莴笋的外观色泽。同时，CA 处理显著降低了多酚氧化酶（polyphenol oxidase，PPO）、过氧化物酶（peroxidase，POD）及苯丙氨酸解氨酶（phenylalanine ammonia-lyase，PAL）的酶活性及其相关基因的表达水平，从而延缓了总酚、类黄酮和东莨菪内酯的合成及其氧化过程。此外，CA 处理有助于维持较高水平的超氧化物歧化酶（superoxide dismutase，SOD）、过氧化氢酶（catalase，CAT）、谷胱甘肽还原酶（glutathione reductase，GR）及抗坏血酸过氧化物酶（ascorbate peroxidase，APX）活性和表达水平，有效抑制丙二醛（malondialdehyde，MDA）、过氧化氢（hydrogen peroxide，H_2O_2）含量及超氧阴离子（superoxide anion，$O_2^{-\cdot}$）产生速率的上升，从而减缓活性氧引发的氧化损伤，维持细胞膜结构的完整性。综上所述，CA 处理可有效延缓鲜切莴苣的色泽与品质劣变，为其在鲜切果蔬保鲜中的应用提供理论依据。

关键词: 鲜切莴苣, 红变, 肉桂酸, 活性氧代谢, 抗氧化酶

中图分类号: TS255.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)11−0387−11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040385

本文网刊:

Effect of Cinnamic Acid on Reddening and Active Oxygen Metabolism of Fresh-cut Lettuce

ZHANG Shufei[1,2], XIONG Min[3], PAN Zhongtian[2], HE Meiying[2], LIU Yunfen[2], YIN Feilong[2,*], SHUAI Liang[2,3,*]

（1.College of Food Science, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China;
2.College of Food and Biological Engineering, Guangxi Key Laboratory of Health Care Food Science and Technology, Hezhou University, Hezhou 542899, China;
3.College of Chemistry and Food Science, Nanchang Normal University, Nanchang 330032, China）

Abstract: This study investigated the effects of exogenous cinnamic acid (CA) on reddening and reactive oxygen species (ROS) metabolism in fresh-cut lettuce. Fresh-cut lettuce samples were treated with 0.5 g/L CA solution for 10 minutes (CA group), while distilled water was used as a control (CK group). Both groups were stored at 4±0.5 ℃, and samples were collected every two days over a period of 8 days. The results showed that CA treatment significantly suppressed the increase in reddening index and a^* value, and mitigated the decline in L^* value, thereby maintaining the visual quality of the lettuce during storage. Furthermore, CA treatment markedly inhibited the activities and gene expression levels of polyphenol oxidase (PPO), peroxidase (POD), and phenylalanine ammonia-lyase (PAL), delaying the biosynthesis and oxidation of total phe-

收稿日期: 2025−05−06

基金项目: 广西自然科学基金项目（2023GXNSFBA026112, 2025GXNSFBA069373）。

作者简介: 张舒菲（1999−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬采后保鲜与加工, E-mail: 18776780611@163.com。

*** 通信作者:** 殷菲胧（1994−）, 男, 硕士, 讲师, 研究方向: 果蔬采后保鲜与加工, E-mail: feilongyin219@hzxy.edu.cn。

帅良（1986−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 采后保鲜与加工, E-mail: shuailiang1212@163.com。

nols, flavonoids and scopoletin. In addition, CA treatment maintained higher activities and expression levels of antioxidant enzymes, including superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), glutathione reductase (GR), and ascorbate peroxidase (APX). It also reduced the accumulation of malondialdehyde (MDA) and hydrogen peroxide (H_2O_2), as well as the generation rate of superoxide anion ($O_2^{-}\cdot$), thereby alleviating oxidative damage and preserving cell membrane integrity. Overall, CA treatment can effectively delay the color and quality deterioration of fresh-cut lettuce, providing a theoretical support for the application of CA in the preservation of fresh-cut fruits and vegetables.

Key words: fresh-cut lettuce; reddening; cinnamic acid; reactive oxygen species metabolism; antioxidant enzymes

莴苣(*Lactuca sativa* L.)广泛种植于各大洲,特别是温带和亚热带地区。近年来,随着设施农业的发展,莴苣在中国蔬菜产业中的栽培地位显著提升,已成为主栽蔬菜类型[1]。鲜切加工作为提升蔬菜附加值的重要手段[2],能够有效减少整株莴苣因贮藏不当而导致的局部腐败和食物浪费,延长产品的供应链周期,同时便于餐饮业的标准化配菜处理,节省操作时间,提升经济效益[3]。然而,鲜切处理过程中不可避免的机械损伤会破坏植物细胞的完整性,促进内源性酚类物质与多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)、过氧化物酶(peroxidase, POD)发生反应[4],不仅导致产品色泽劣变、感官品质下降,还会加速营养物质的氧化损失[5]。因此,开发有效保鲜剂保持鲜切莴苣色泽与品质已成为延长货架期、减少食物浪费的重要研究方向。

目前认为莴苣发生色泽劣变主要涉及两方面:一方面,酚类代谢紊乱是关键诱因,损伤胁迫导致酚类物质在切口处积累并被 PPO 催化氧化[6],生成醌类物质并进一步聚合形成红棕色色素[7];另一方面,东莨菪内酯的积累及其氧化过程被证实是导致莴苣组织呈现特征性红色的因素之一[8]:东莨菪内酯作为苯丙烷代谢的重要分支产物,其合成始于苯丙氨酸,经肉桂酸、对香豆酸等中间体[9]。在鲜切莴苣中,机械损伤激活苯丙烷代谢途径,促使东莨菪内酯大量积累[10]。因此,控制东莨菪内酯的合成,对于有效抑制鲜切莴苣红变至关重要。

目前,对于延长鲜切莴苣贮藏期的方式主要有可食用涂膜[11−12]、化学保鲜[13] 等。其中,化学保鲜法因其操作简便、效果显著而被广泛应用于鲜切莴苣的保鲜处理中。例如,有研究表明,褪黑素处理可增强鲜切莴苣的抗氧化能力,减少活性氧(reactive oxygen species, ROS)对细胞的损伤,从而有效维持其贮藏期间的品质稳定性[14];采用不同浓度的抗坏血酸溶液浸泡处理,也可在常温贮藏 6 d 内有效缓解鲜切莴苣品质劣变,显著延缓多酚含量上升,降低 PPO 和 POD 活性,同时维持维生素 C 含量较高水平[15];此外,纳他霉素的应用亦被证实对鲜切莴苣的腐烂和衰老具有良好的抑制作用,其中喷雾处理显示出较优的保鲜效果[16]。综上所述,化学保鲜剂可通过调控抗氧化系统、延缓微生物腐败等多种机制有效维持鲜切莴苣的感官品质和营养价值,因此,化学保鲜剂可作为调控鲜切莴苣采后品质的关键处理手段。

肉桂酸(cinnamic acid, CA)是一种广泛存在于植物中的天然酚酸,近年来因其优异的抗菌、抗氧化及抑制酶活性等多重生物功能而受到广泛关注[17]。已有研究表明,CA 可通过抑制 PPO 活性和清除自由基,有效延缓鲜切芋头[18]、苹果[19] 及桃子[20] 等果蔬的褐变。有研究进一步探讨了不同 pH 条件下 CA 及其衍生物对 PPO 的抑制效果,结果发现 CA 在酸性条件下对 PPO 活性的抑制作用更为显著[21];在对芋头的处理研究中,不同浓度的 CA 均能有效抑制相关酶活性并提高抗氧化能力,减轻其表面褐变[14]。尽管 CA 在果类产品中的保鲜效果已被证实,但其在鲜切蔬菜,尤其是叶菜类蔬菜褐变调控中的作用机制仍不清晰。此外,CA 在调节 ROS 代谢网络中的潜在功能尚缺乏系统性研究,仍有待深入探讨。

因此,本研究以鲜切莴苣为对象,通过研究 0.5 g/L CA 处理对鲜切莴苣红变度、色度、总酚含量、类黄酮含量、过氧化氢(hydrogen peroxide, H_2O_2)含量及超氧阴离子(superoxide anion, $O_2^{-}\cdot$)产生速率、丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量、抗氧化酶活性及基因表达的影响,探究 CA 处理抑制鲜切莴苣红变可能的调控机制,以期为 CA 在鲜切果蔬中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

莴苣　购于广西贺州市泰兴超市,选取新鲜、大小均一、无病虫害、无病斑、无机械损伤的莴苣;Quick RNA IsolationKit 植物 RNA 提取试剂盒、Super Script cDNA Synthesis Kit 反转录试剂盒　华越洋生物科技有限公司;所有引物设计与合成均由上海生工生物工程股份有限公司完成;三氯乙酸(TCA)　分析纯,天津市大茂化学试剂厂;无水乙醇　分析纯,上海国药集团化学试剂有限公司;肉桂酸(CA)、抗硝基蓝四唑(BNT)、氧化谷胱甘肽(GSSG)、2,2-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸(ABTS)、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)　分析纯,上海源叶生物科技有限公司;丙酮、浓氨水　分析纯,西陇科学股份有限公司;其余供试试剂均为分析纯　上海源叶生物科技有限公司。

LH-B55 手持折光仪　上海勃基仪器仪表有限公司;NH310 果蔬色差仪　深圳市三恩施科技有限公司;702-Rell 超低温冰箱　美国赛默飞公司;A11 Basic 分析研磨机　德国 IKA 公司;TG18-WS 高速

冷冻离心机　长沙湘锐有限公司；UV-1780 紫外可见分光光度计　岛津仪器苏州有限公司；CFX Connect 荧光定量 PCR 仪　美国 Bio-Red 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　样品处理　选取新鲜、大小均一、无病虫害、无病斑、无机械损伤的莴苣，使用不锈钢切片机将莴苣切成厚度约 5 mm 的圆片，分别用浓度为 0（CK 组）和 0.5 g/L CA 浸泡 10 min（浓度选择基于前期预实验：由 0.1、0.5 和 1.0 g/L 三个不同浓度下 0.5 g/L 的 CA 效果最佳确定），然后捞出于室温晾干。两组莴苣均用 PP 材质的托盘（大小为 15 cm×11.5 cm×2 cm）进行装盘并用厚度为 0.02 mm 的 PE 保鲜膜进行封装。随后于 4±0.5 ℃ 进行贮藏，每 2 d 取样一次，取样当天进行色度测定，将其余样品经研磨机在液氮保护下研磨成粉后保存于−80 ℃ 超低温冰箱备用，待后续分析测定。

1.2.2　色度和红变度的测定　参照林德胜等[22] 的方法，采用色差仪对鲜切莴苣样品的表面颜色进行测定。每组随机选取 15 片鲜切莴苣叶片，分别取正反两面进行测定，并记录其 L^*值（亮度）和 a^*值（红绿度）。红变度测定参照帅良等[23] 的方法进行。取 1 g 鲜切莴苣样品粉末，加入 10 mL 预冷的缓冲液（含 10%TCA），35 ℃ 避光反应 2 h。反应结束后，于 4 ℃ 下以 1500 r/min 离心 10 min，取上清液。在波长 420 nm 处测定上清液的吸光度，以 $OD_{420\ nm}$ 表示红变度。

1.2.3　总酚、类黄酮、醌类和东莨菪内酯含量的测定

总酚含量的测定参照宋茜等[24] 的方法进行。称取 1.0 g 鲜切莴苣样品粉末，加入适量 80% 乙醇提取液充分混匀后，于 4 ℃、12000 r/min 条件下离心 20 min，取上清液 0.2 mL，用蒸馏水稀释至 1.0 mL。随后依次加入 1.0 mL 福林酚试剂，静置 6 min 后加入 1.0 mL 7%Na_2CO_3 溶液及 1.0 mL 蒸馏水，在室温下避光反应 1.5 h，最后在 756 nm 波长处测定吸光度。以没食子酸为标准品，根据标准曲线 y=6.4317x−0.0023（R^2=0.9996；其中，x 均为浓度，y 均为吸光度值）计算总酚含量，结果以 mg/kg 表示。

类黄酮提取液的制备方法与总酚含量测定相同，含量的测定参照宋慕波等[25] 的方法进行。取 0.5 mL 提取液，加入 0.2 mL 5%$NaNO_2$ 溶液，于室温下静置 6 min；随后加入 0.3 mL 10%$Al(NO_3)_3$ 溶液，继续反应 6 min；再依次加入 2.0 mL 1.0 mol/L NaOH 溶液和 1.0 mL 80% 乙醇溶液，充分混匀。在波长 510 nm 处测定吸光度。以芦丁为标准品，根据标准曲线 y=14.205x−0.1239（R^2=0.992；其中，x 均为浓度，y 均为吸光度值）计算样品中类黄酮含量，结果以 mg/kg 表示。

醌类物质含量参考 Ali 等[26] 所用方法测定。取 1 g 莴苣粉末，加入 8 mL 80% 乙醇，避光振荡提取 30 min，于 4 ℃、8000 r/min 离心 20 min，取上清液 3.0 mL 在 437 nm 处测定吸光度，以 $OD_{437\ nm}$ 表示醌类物质含量。

东莨菪内酯测定参照徐小昆等[27] 的方法，并作适当修改。将 1 g 莴苣粉末与 8 mL 80% 甲醇充分混匀，在 50 ℃ 下超声 30 min，于 12000 r/min 离心 15 min，收集上清液，用 0.22 μm 尼龙过滤器进行过滤，并采用 Shim-pack ™ GIST C_{18} 色谱柱进行高效液相色谱分析。以乙腈-0.1% 磷酸溶液（3∶7）作为流动相进行等度淋洗，流速为 0.8 mL·min^{-1}，在波长 348 nm、柱温 25 ℃ 条件下，对东莨菪内酯含量进行检测。东莨菪内酯含量以μg/g 表示。

1.2.4　H_2O_2 含量、$O_2^{-}\cdot$产生速率和 MDA 含量的测定　过氧化氢（H_2O_2）含量参考宋茜等[24] 的方法测定：取 1.0 g 莴苣粉末，加入 8 mL 预冷丙酮，冰浴静提 10 min 后于 4 ℃、12000 r/min 离心 20 min。取 1.0 mL 上清液，加入 100 μL 10% 硫酸钛和 200 μL 浓氨水，静置反应 5 min 后于 10000 r/min 离心 10 min，弃上清，用预冷的丙酮洗涤沉淀数次，直至沉淀无杂质，将装有沉淀的试管置于通风橱中待管中丙酮挥发完后，加入 3 mL 2 mol/L 浓硫酸，使其充分溶解，4 ℃、12000 r/min 离心 20 min 后取上清于 410 nm 处测定吸光值，结果以μmol/g 表示。

超氧阴离子（$O_2^{-}\cdot$）产生速率测定参照杨源[28] 的方法，称取 1 g 莴苣粉末，加入 8 mL 0.05 mol/L、pH7.8 的磷酸钠缓冲溶液混匀，冰浴静提 10 min，于 4 ℃、10000 r/min 离心 20 min，取 1 mL 上清液加入 1 mL 磷酸缓冲溶液（0.05 mol/L、pH7.8）、1 mL 1 mmol/L 盐酸羟胺溶液，混匀后于 25 ℃ 孵育 1 h，再加入 1 mL 17 mmol/L 对氨基苯磺酸溶液和 1 mL 7 mmol/L α-萘胺溶液，混匀后于 25 ℃ 再孵育 20 min。于 530 nm 处测定其吸光度，结果以 μmol·g^{-1}·min^{-1} 表示。

MDA 含量的测定参考唐基涛等[29] 的方法。称取 1.0 g 样品，加入 5.0 mL 100 g/L TCA 溶液，研磨匀浆后于 12000 r/min、4 ℃ 离心 20 min，收集上清液。反应体系：2.0 mL 上清液、2.0 mL 0.67% 硫代巴比妥酸溶液，混合后在沸水浴中煮沸 20 min，取出冷却后再离心一次，分别测定上清液在 450、532、600 nm 波长处的吸光度值，MDA 含量计算公式如下：

$$\text{MDA含量}(\mu\text{mol/g}) = \frac{V\times[6.45\times(OD_{532\ nm}-OD_{600\ nm})-0.56\times OD_{450\ nm}]}{Vs\times m\times 1000}$$

式中：V 为提取液总体积，mL；Vs 为测定时所取样品提取液体积，mL；m 为样品质量，g。

1.2.5　PPO、POD 和 PAL 活性的测定　PPO 和 POD 酶活性参照林德胜等[22] 方法测定，略有修改。称取 1.0 g 莴苣粉末，加入 8 mL 乙酸-乙酸钠缓冲液（0.1 mol/L、pH5.5），冰浴静提 10 min 后离心（4 ℃、10000 r/min、20 min），PPO 反应体系：0.1 mL 提取液加入 2.9 mL 50 mmol/L 邻苯二酚溶液，迅速混合启动反应，于 420 nm 处测定吸光度。POD 反应体系：

0.2 mL 提取液加入 2.8 mL 25 mmol/L 愈创木酚溶液再加入 0.5 mol/L H_2O_2 溶液，迅速混合启动反应，于 470 nm 处测定吸光度的变化。酶活以每分钟吸光度变化 0.01 为一个 PPO、POD 活性单位(U)，单位为 $U·g^{-1}$。PAL 活性参照刘云芬等[30]方法测定。提取液的制备同 PPO，反应体系：0.5 mL 粗酶提取液加入 0.02 mol/L L-苯丙氨酸 2.5 mL 后在 37 ℃ 水浴保温 1 h，加入 0.1 mL 6 mol/L HCl 溶液终止反应，于 290 nm 处测定吸光度的变化。以 $OD_{290\ nm}$ 变化 0.01 为 1 个酶活单位(U)，用 $U·g^{-1}$ 表示。

1.2.6 超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)和过氧化氢酶(catalase, CAT)的测定 取 1.0 g 莴苣粉末，加入 5 mL 磷酸缓冲液(含 5 mmol/L DTT、5%PVP、1 mmol/L EDTA)，振荡 30 s 使其充分混匀，于 4 ℃、12000 r/min 离心 30 min，上清液为粗酶液，用于后续测定。SOD 活性测定参照 Zhang 等[31]的方法，反应体系包括：0.2 mL 粗酶提取液、2.0 mL 50 mmol/L 磷酸钠缓冲液、0.2 mL 蛋氨酸溶液、0.2 mL 750 μmol/L 氯化硝基四氮唑蓝溶液、0.2 mL 100 μmol/L EDTA-2Na，避光 30 min 后加入 0.2 mL 20 μmol/L 核黄素，充分混合均匀后置于日光灯下反应 15 min，立即取出置于暗处，于 560 nm 处测定吸光度的变化；CAT 活性测定参照盛金凤等[32]方法，反应体系包括：0.2 mL 粗酶提取液、2.8 mL 20 mmol/L H_2O_2 溶液，混合均匀后于 240 nm 处测定吸光度的变化。均以每分钟吸光度变化 0.01 定义为一个活性单位，单位以 $U·g^{-1}$ 表示。

1.2.7 谷胱甘肽还原酶(glutathione reductase, GR)和抗坏血酸过氧化物酶(ascorbate peroxidase, APX)的测定 GR 和 APX 活性测定参照林毅雄等[33]的方法，GR 和 APX 提取液的制备同 1.2.6，仅提取缓冲液改为 50 mmol/L、pH7.0 磷酸盐缓冲液。GR 活性测定反应体系：依次加入 2.7 mL 0.1 mol/L pH7.5 的磷酸缓冲液、0.1 mL 5 mmol/L 氧化性谷胱甘肽溶液、0.2 mL 粗酶提取液，于 340 nm 处测定其吸光度的变化；APX 活性测定反应体系：0.2 mL 粗酶提取液、2.6 mL 反应缓冲液(含 0.1 mmol/L EDTA、0.5 mmol/L 抗坏血酸)、0.2 mL 2 mmol/L H_2O_2 溶液，于 290 nm 处测定吸光度的变化。均以每分钟吸光度变化 0.01 为一个活性单位，以 $U·g^{-1}$ 表示。

1.2.8 基因表达分析 使用 RNA 提取试剂盒从莴苣组织中分离出总 RNA，具体操作参照试剂盒说明书进行。随后根据反转录试剂盒说明书合成 cDNA。表 1 为所用荧光定量引物详细信息，以 *Actin* 基因作为内参基因。利用 $2^{-\Delta\Delta Ct}$ 方法计算 *LsPPO*、*LsPOD*、*LsPAL*、*LsSOD*、*LsCAT*、*LsAPX*、*LsGR* 表达量。

1.3 数据处理

每组实验进行三次重复，结果以均值±标准差表示，使用 Excel 2019、SPSS 26.0 进行数据处理和分析，采用单因素方差分析和 Duncan 法对结果进行差异显著性分析(P<0.05)，使用 Origin 和 GraphPad Prism 软件完成图表绘制。机理图由 Figdraw 绘制。

表 1 表达分析所用引物及序列

Table 1 Primers and sequences used for expression analysis

引物名称	引物序列(5'-3')
*Actin*正向引物	GCCAAGGGCAGTGTTTCCTA
*Actin*反向引物	AAAGCACAGCCTGGATAGCA
*LsPPO*正向引物	AACAAGAAGAACAAGCAGGAAGCG
*LsPPO*反向引物	GGTAGTCTCACATCCATCGTCAAC
*LsPOD*正向引物	AGGTGCTCACTCAGTAGGTAGGG
*LsPOD*反向引物	GCGGGTTTGGGTCAGGATGG
*LsPAL*正向引物	GGACTACGGGTTCAAAGGTGGAG
*LsPAL*反向引物	GGTGACTGGATTTGCGAGAAACTG
*LsCAT*正向引物	ACAACTTCAAGCAGCCAGGAGAG
*LsCAT*反向引物	GGTCAGACAGAGCACCAACAATTC
*LsSOD*正向引物	CACACACTCTTACAGACGCTTTG
*LsSOD*反向引物	GCCACTAACACCCTCACTGCTG
*LsAPX*正向引物	ACCTGTCGTTCCGGCATCTATG
*LsAPX*反向引物	GGCGGTCGAAGGAGCTGATG
*LsGR*正向引物	AACAGGAGCAGTGAAGGTGGATG
*LsGR*反向引物	GGCAACAGGAGTGAGATTCATTCG

2 结果与分析

2.1 肉桂酸对鲜切莴苣色泽的影响

红变度是衡量鲜切果蔬表面红变程度的重要指标。随着贮藏时间的延长，CK 组鲜切莴苣红变程度持续加深，而 CA 处理组在整个贮藏期内的红变程度始终低于 CK 组，表明 CA 处理在抑制红变方面具有良好效果(图 1A)。具体来看，CK 组的红变度由贮藏初期(0 d)的 0.17±0.002 上升至第 8 d 的 0.39±0.029，且在第 4 d 后呈现快速上升趋势；相比之下，0.5 g/L CA 处理组红变度仅上升至 0.26±0.003，极显著低于 CK 组(P<0.01)(图 1B)。在 L^*值方面，CA 处理显著减缓了其下降趋势(P<0.05)，表现出较高的色泽稳定性。a^*值方面，CK 组随贮藏时间推移逐渐升高，表明红变现象加剧；而 CA 处理有效抑制了 a^*值的上升，显著减缓了色变过程(图 1D)。综合以上结果，CA 处理显著抑制了 L^*值下降与 a^*值上升的趋势，能有效保持鲜切莴苣的绿色外观和较高的商品价值。

2.2 肉桂酸对鲜切莴苣总酚、类黄酮、醌类物质、东莨菪内酯含量的影响

总酚、类黄酮、醌类物质和东莨菪内酯含量是评估鲜切莴苣红变过程中的关键代谢指标。如图 2A 所示，贮藏期间鲜切莴苣总酚含量整体呈上升趋势，而 CA 处理极显著抑制了该指标的升高(P<0.01)。其中，CA 组总酚含量由 0 d 的 1.91±0.009 mg/kg 上升至 8 d 的 2.02±0.006 mg/kg，较 CK 组同期的 2.57±0.006 mg/kg 降低了 21.40%，说明 CA 处理在缓解氧

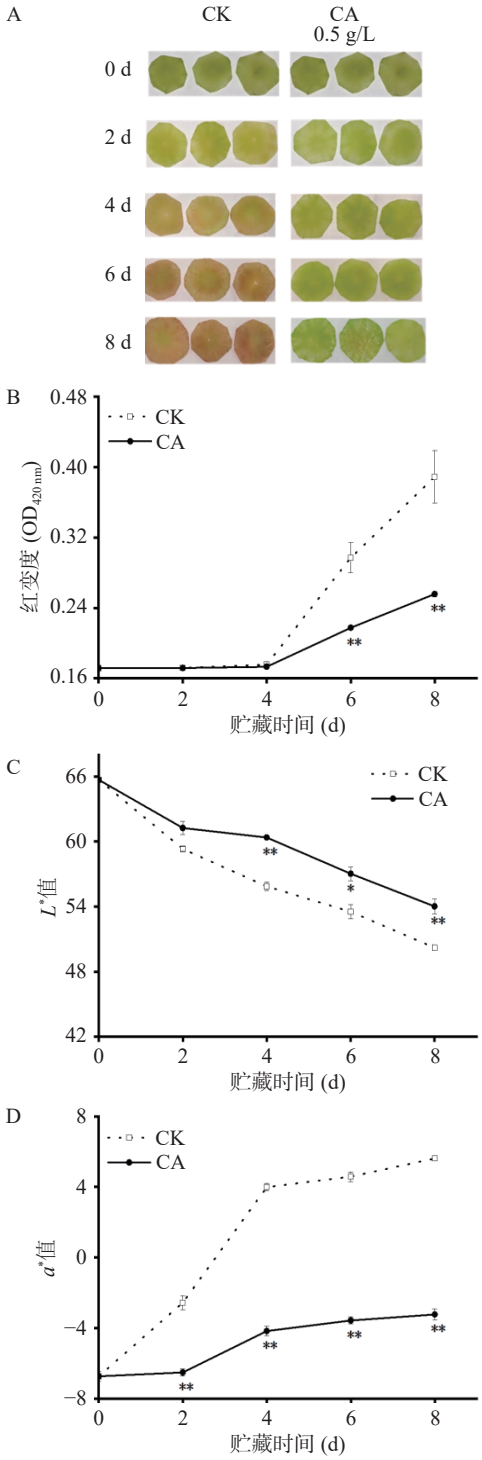


图 1　CA 处理对鲜切莴苣贮藏期间外观(A)、红变度(B)、L^*值(C)和 a^*值(D)的影响

Fig.1　Effect of CA treatment on appearance (A), reddening index (B), L^* value (C) and a^* value (D) of fresh-cut lettuce

注：*表示 CA 处理组相比于 CK 组差异显著(P<0.05)，**表示 CA 处理组相比于 CK 组差异极显著(P<0.01)；图 2~图 6 同。

化胁迫方面具有一定效果。类黄酮和醌类物质的积累也在 CA 处理下得到显著抑制(图 2B、图 2C，P<0.05)。在贮藏第 8 d，CA 组类黄酮与醌类物质分别较 CK 组减少了 17.32% 和 15.20%。其中，醌类物质在 CA 处理下从 0 d 的 0.13±0.002 仅上升至 8 d 的 0.18±0.001，升幅明显低于对照组(图 2C)。图 2D

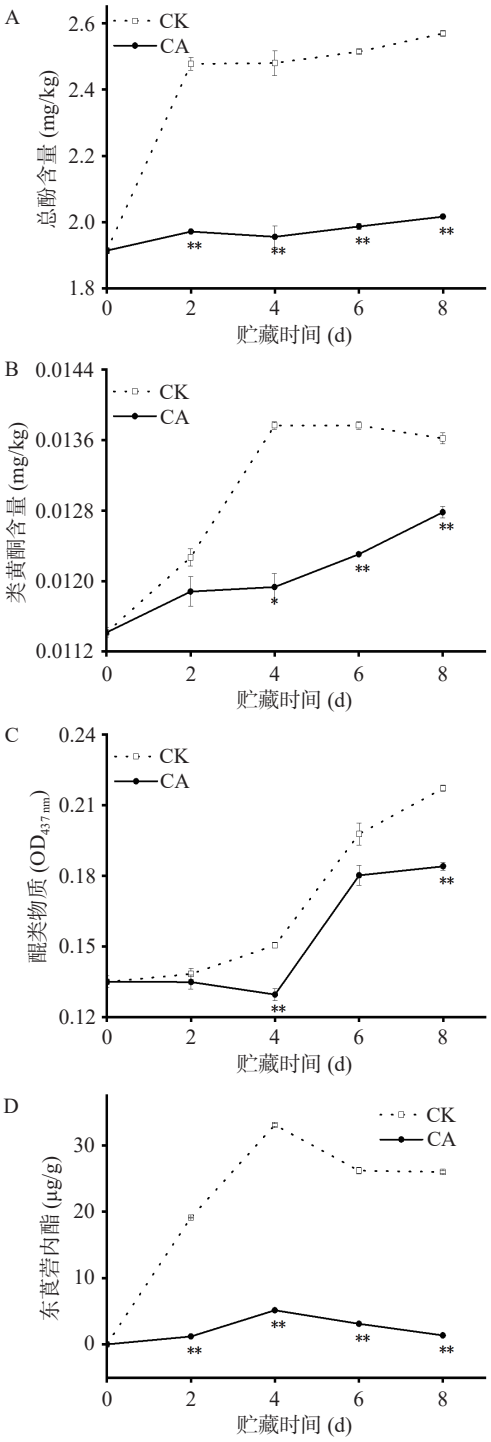


图 2　CA 处理对鲜切莴苣贮藏期间总酚(A)、类黄酮(B)、醌类物质(C)和东莨菪内酯(D)含量的影响

Fig.2　Effect of CA treatment on total phenol (A), flavonoid content (B), quinone (C) and scopoletin (D) of fresh-cut lettuce

显示，东莨菪内酯含量在 CK 组中呈先升后降趋势，并在第 4 d 达到峰值(33.09±0.210 μg/g)；而 CA 处理组的含量始终极显著低于 CK 组(P<0.01)，表明该处理可有效抑制其积累。

综上所述，CA 处理在贮藏期间显著抑制了促红变相关物质(如总酚、类黄酮、醌类和东莨菪内酯)的生成，减缓了氧化代谢过程，有助于维持鲜切莴苣的感官品质和商品价值，这与刘云芬等[30]研究的效应方向一致。

2.3 肉桂酸对鲜切莴苣 H_2O_2 含量、$O_2^{-}\cdot$产生速率和 MDA 含量的影响

H_2O_2 是活性氧(ROS)中重要的组分之一,由 $O_2^{-}\cdot$经过歧化作用产生,既可作为氧化损伤因子,也参与细胞信号转导。其含量变化可反映持续氧化胁迫状态,并与红变进程密切相关。如图 3A 所示,鲜切莴苣中 H_2O_2 含量随贮藏时间延长而持续上升。贮藏第 2~6 d 期间,CK 组和 CA 组 H_2O_2 积累速率均较缓慢,但 CA 组的上升幅度显著低于 CK 组(P<0.05)。至第 8 d,CK 组 H_2O_2 含量达 24.20±0.90 μmol/g,而 CA 组为 21.91±1.410 μmol/g,较 CK 组显著降低了 9.47%(P<0.05)。这一趋势与唐基涛等[29]对相关指标的研究相符。图 3B 显示,$O_2^{-}\cdot$产生速率在贮藏过程中持续上升,但 CA 处理有效抑制了其生成,且抑制效果随时间延长而增强。贮藏第 2 d,CA 组 $O_2^{-}\cdot$产生速率较 CK 组下降了 30.93%;至第 8 d,抑制幅度达到最大值,表明 CA 处理可在一定程度上减缓超氧阴离子自由基的积累。

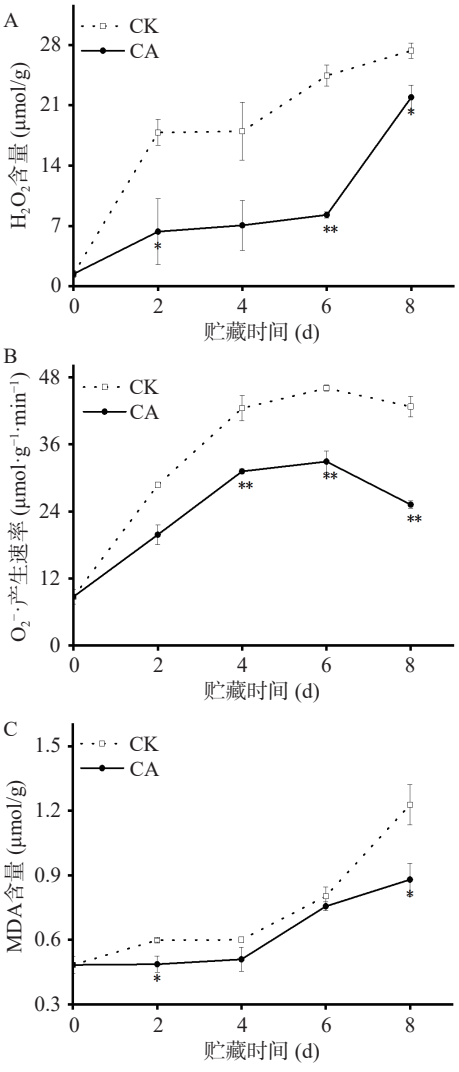


图 3 CA 处理对鲜切莴苣贮藏期间 H_2O_2 含量(A)、$O_2^{-}\cdot$产生速率(B)和 MDA 含量(C)的影响

Fig.3 Effect of CA treatment on H_2O_2 content (A), $O_2^{-}\cdot$ generation rate (B) and MDA content (C) of fresh-cut lettuce

MDA 是衡量膜脂过氧化水平的重要指标,其含量变化可直观反映细胞氧化损伤程度。如图 3C 所示,MDA 含量随贮藏时间延长整体呈上升趋势。虽然 CK 组在第 4~6 d 期间含量上升幅度较小,但至第 8 d 时,CK 组 MDA 含量仍显著高于 CA 组 28.3%(P<0.05),表明其在贮藏后期受到更严重的氧化胁迫,导致膜系统损伤加剧。综合来看,CA 处理通过有效调控 ROS 代谢过程,降低了 H_2O_2 与 $O_2^{-}\cdot$的积累速率,并显著减缓了膜脂过氧化,有助于维持细胞结构稳定,为延缓鲜切莴苣品质劣变和红变的发生提供了重要的生理基础。

2.4 肉桂酸处理对鲜切莴苣 PPO、POD、PAL 活性及其基因表达量的影响

如图 4A 所示,鲜切莴苣的 PPO 活性在贮藏过程中呈现明显的组间差异。CK 组 PPO 活性从 0 d 的 268.33±11.667 U·g^{-1} 持续上升,在第 6 d 达到 563.33±21.867 U·g^{-1},并于第 8 d 升高至 1336.67±35.282 U·g^{-1}。而 CA 处理组在贮藏初期 PPO 活性呈下降趋势,至第 6 d 降至最低值 173.33±11.676 U·g^{-1},随后略有回升,在第 8 d 达到 573.33±3.333 U·g^{-1},较 CK 组降低了 57.11%,差异极显著(P<0.01)。图 4B 显示,POD 活性随贮藏时间推移逐渐上升。CK 组在第 8 d 达到 93.78±1.355 U·g^{-1},约初始值的 1.95 倍;而 CA 组同期仅为 72.68±2.376 U·g^{-1},较 CK 组降低 22.5%,差异极显著(P<0.01)。PAL 活性变化如图 4C 所示,贮藏早期(0~4 d),PAL 活性迅速升高,CK 组在第 4 d 达到峰值 22.00±0.886 U·g^{-1},显著高于 CA 组的 17.57±1.154 U·g^{-1}(P<0.05)。此后两组活性逐渐下降,但 CK 组始终保持较高水平,至第 8 d 时仍是 CA 组的 1.74 倍,提示 CA 处理可在一定程度上抑制酚类合成通路的激活,从源头减少红变相关物质的积累。这一变化规律与林德胜等[22]的研究一致。

图 4D~图 4F 进一步揭示了 CA 处理对相关代谢基因表达的调控作用。*LsPPO*、*LsPOD* 与 *LsPAL* 的相对表达量在 CK 组中虽在不同时间点略有波动,但贮藏后整体呈下降趋势;而 CA 处理则在转录水平显著下调了这三种关键酶的基因表达(P<0.05),且在贮藏前期抑制效果更为明显。综合来看,CA 处理不仅在酶活性层面有效抑制了 PPO、POD 与 PAL 的活化,还在基因表达水平实现对其转录的双重调控,从而阻断了红变相关的代谢通路,为延缓褐变、维持品质稳定性提供了重要的生理基础。

2.5 肉桂酸处理对鲜切莴苣 CAT、SOD 活性及其基因表达量的影响

如图 5A 所示,各处理组的 CAT 活性在贮藏前期(0~4 d)整体保持稳定。从第 4 d 开始,CAT 活性开始上升,且 CA 处理组上升幅度极显著高于 CK 组(P<0.01)。第 6 d 时,CA 组 CAT 活性为 CK 组的

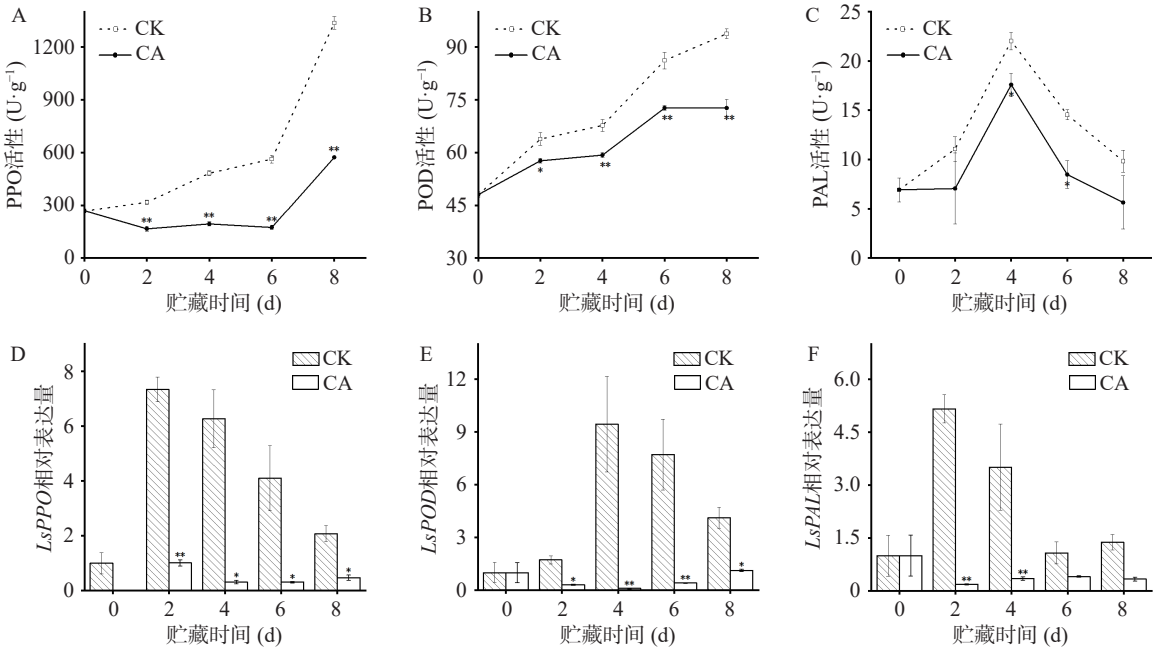


图 4　CA 处理对鲜切莴苣贮藏期间 PPO(A)、POD(B)、PAL(C)活性及 *LsPPO*(D)、*LsPOD*(E)、*LsPAL*(F)相对表达量的影响

Fig.4　Effect of CA treatment on PPO (A), POD (B) and PAL (C) activity and relative expression of *LsPPO* (D), *LsPOD* (E), *LsPAL* (F) of fresh-cut lettuce

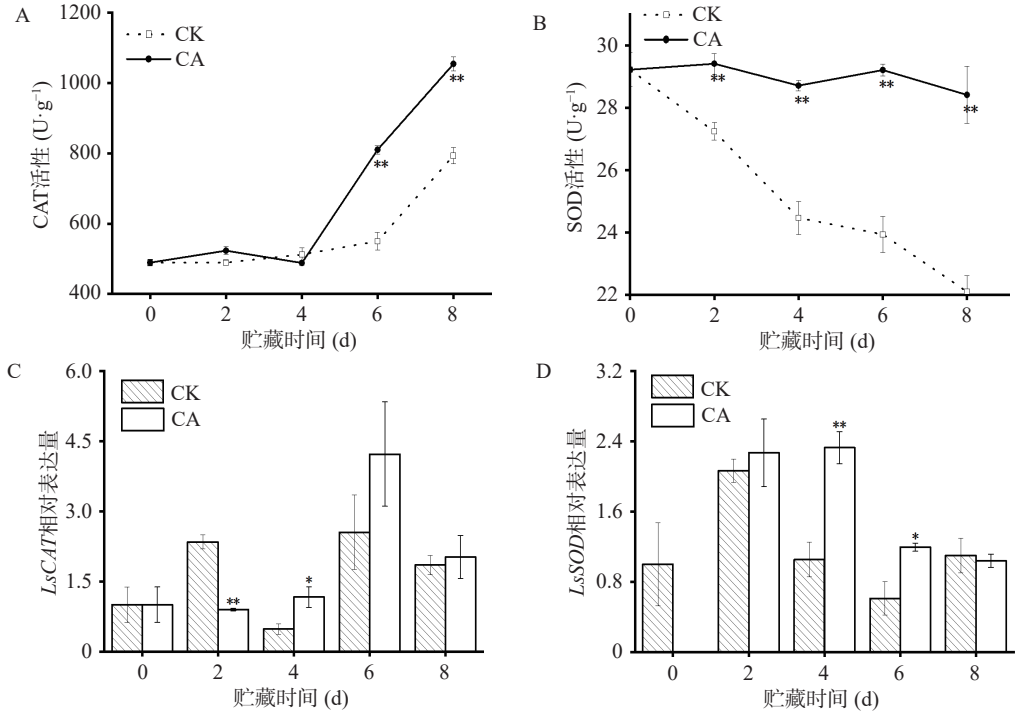


图 5　CA 处理对鲜切莴苣贮藏期间 CAT(A)、SOD(B)活性及 *LsCAT*(C)、*LsSOD*(D)相对表达量的影响

Fig.5　Effect of CA treatment on CAT (A), SOD (B) activity and relative expression of *LsCAT* (C), *LsSOD* (D) of fresh-cut lettuce

1.47 倍；第 8 d 时仍保持 1.32 倍的优势，说明 CA 处理在中后期显著增强了 CAT 活性。SOD 活性变化如图 5B 所示。CK 组 SOD 活性自 0 d 的 29.23 U·g^{-1} 持续下降至 8 d 的 22.11 U·g^{-1}，降幅达 24.4%；而 CA 处理组的 SOD 活性则整体较为稳定，仅下降了 2.8%。至贮藏末期，CA 组 SOD 活性极显著高于 CK 组 28.5%（P<0.01），表明 CA 处理有助于维持 SOD 活性的稳定性，从而在一定程度上减缓其因氧化胁迫所引起的活性衰退。在基因表达水平上（图 5C、图 5D），CA 处理明显上调了抗氧化相关基因 *LsCAT* 和 *LsSOD* 的相对表达量。贮藏中后期，CA 组 *LsCAT* 相对表达量分别为 CK 组的 1.66 倍（第 6 d）和 1.09 倍（第 8 d）；同时，*LsSOD* 的表达在第 4~6 d 期间也显著高于 CK 组（P<0.05）。尽管至贮藏末期两组之间的差异有所减弱，但在抗氧化调控的关键阶段，CA 处理显现出积极的基因调控效应。综合上述结果，CA 处理不仅通过增强 CAT 与 SOD 酶活性有效提高了鲜切莴苣的抗氧化能力，还通过上

调其关键基因表达，实现酶活性与转录水平的协同调控。该处理有助于高效清除细胞内 ROS，维持其动态平衡，减缓膜脂过氧化，进而延缓品质劣变过程。这一机制与已有相关研究结论一致[34−36]。

2.6 肉桂酸处理对鲜切莴苣 GR、APX 活性及基因表达量的影响

如图 6A 所示，GR 活性在 CK 组中呈持续下降趋势，从 0 d 的 15.13±1.122 U·g^{-1} 下降至 8 d 的 7.47±0.751 U·g^{-1}；而 CA 处理组则呈先升后降的动态变化，第 4 d 达到峰值(17.94±0.98 U·g^{-1})，显著高于同期 CK 组(为其 1.37 倍，P<0.05)，随后逐步下降，至第 8 d 两组间差异不显著。APX 活性变化如图 6B 所示，随贮藏时间延长整体呈下降趋势。第 8 d 时，CK 组 APX 活性降至 16.67±1.17 U·g^{-1}，而 CA 处理组仍维持在较高水平(20.83±2.60 U·g^{-1})。结果表明，CA 处理有效延缓了 APX 活性的衰退，从而有助于在贮藏后期维持较强的 H_2O_2 清除能力，增强细胞的氧化还原稳态调节功能。

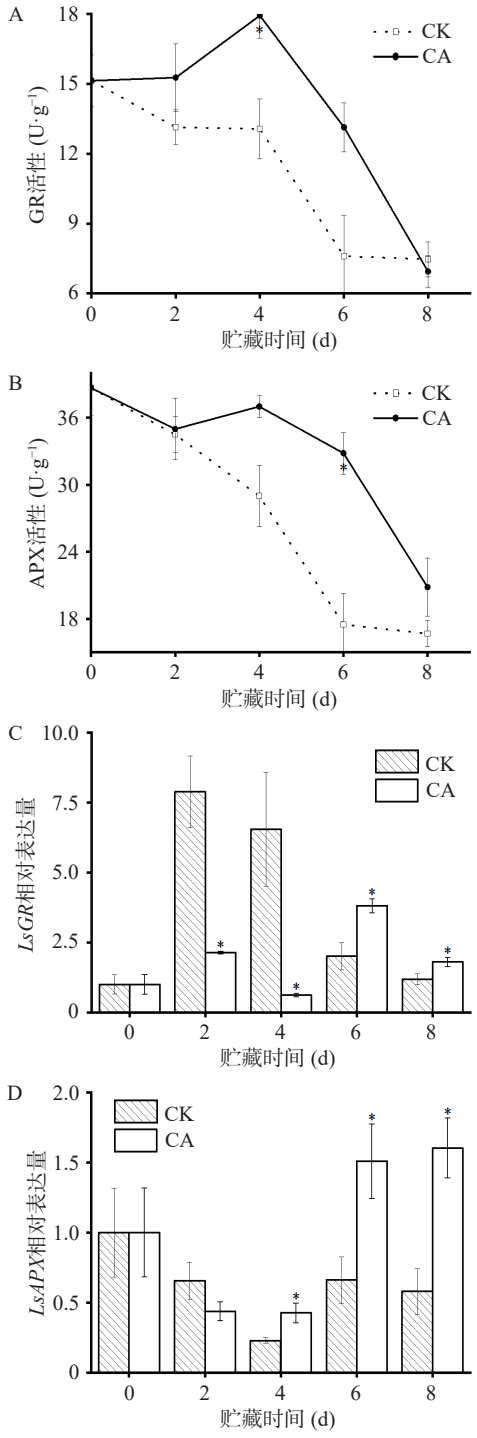


图 6 CA 处理对鲜切莴苣贮藏期间 GR(A)、APX(B)活性及 *LsGR*(C)、*LsAPX*(D)相对表达量的影响

Fig.6 Effect of CA treatment on GR (A), APX (B) activity and relative expression of *LsGR* (C), *LsAPX* (D) of fresh-cut lettuce

基因表达结果进一步支持了上述酶活性变化(图 6C、图 6D)。在 CK 组中，*LsGR* 基因相对表达量自第 2 d 起逐渐下降，从 7.882±1.284 降至 8 d 的 1.187±0.193；相比之下，CA 组在贮藏期内保持相对稳定，先上升至 2 d 的 2.14±0.045，再下降至 8 d 的 1.80±0.161，最终在第 8 d 时显著高于 CK 组 51.6%(P<0.05)。*LsAPX* 基因表达在 CK 组呈先降后升的波动趋势，而 CA 处理组在贮藏第 8 d 的表达水平显著高于 CK 组(P<0.05)，约为其 2.67 倍，说明 CA 处理对该基因的表达具有积极调控作用。综合来看，CA 处理通过增强 GR 与 APX 的酶活性并上调其基因表达，提升了 AsA-GSH 循环系统的稳定性和抗氧化能力，显著改善了鲜切莴苣在贮藏过程中的 ROS 清除效率，从而延缓氧化胁迫导致的品质劣变。该结果与已有关于 CA 处理调控抗氧化酶体系的研究结论一致[33,36]，进一步支持了通过激活抗氧化系统增强果蔬贮藏品质的可能机制。

2.7 相关性分析

为进一步探讨 CA 处理与鲜切莴苣红变之间的潜在关联，对 CK 组和处理组的主要生理生化指标进行了相关性分析。如图 7 所示，PPO 和 POD 活性与红变度呈极显著正相关(P<0.01；相关系数分别为 0.88、0.9)，说明酶促红变是导致组织变色的主导机制。与此同时，这两种酶的基因表达水平与其活性变化趋势高度一致，表明其表达调控在红变过程中具有关键作用。此外，总酚、类黄酮和东莨菪内酯等物质的含量也与 PPO 活性呈正相关关系(相关系数分别为 0.72、0.73、0.65)，提示酚类底物的积累可能为红变反应提供了重要基础，从而加速了红变进程。在抗氧化方面，ROS(H_2O_2 和 $O_2^{-}\cdot$)的积累与抗氧化酶系统(如 SOD、APX)呈显著负相关关系(P<0.05)，说明这些酶通过清除 ROS，有效减缓了氧化胁迫所引发的组织损伤与红变加剧。抗氧化酶的基因表达与其酶活性并非完全同步，暗示在转录层面之外，可能还存在翻译后调控或酶活性的环境调节机制。

综上所述，鲜切莴苣的红变发生主要受 PPO 和 POD 的驱动，其表达调控机制可为延缓红变提供潜在的分子靶点；同时，抗氧化系统的协同作用可通过降低 ROS 水平间接抑制红变进程；而酚类代谢与氧化应激之间的相互作用，可能构成红变调控的关键交叉点。

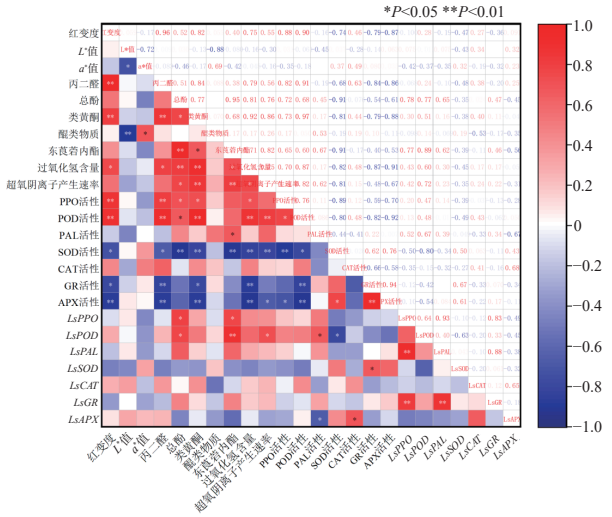


图 7　CA 处理鲜切莴苣红变相关指标的相关性分析

Fig.7　Correlation analysis of browning indexes of CA treatment of fresh-cut lettuce

3　讨论

本研究结果表明，CA 处理能显著降低鲜切莴苣的红变程度，有效延缓其色泽劣变进程。贮藏期间，CK 组与 CA 处理组的红变程度呈现不同变化趋势：在 0~4 d 时，两组间无显著差异（P>0.05）；而 4~8 d 时，CK 组红变程度急剧上升，CA 处理组则显著抑制了这一趋势。这一结果与杨菊等[37] 关于抗坏血酸处理香蕉研究中的变化趋势一致。

鲜切莴苣在加工贮藏中极易发生红变。这种现象的诱因在于细胞内 ROS 代谢稳态的失衡[38−39]。机械损伤导致细胞区室化破坏，使 PPO 与液泡酚类底物接触[30]，催化生成醌类聚合物；而东莨菪内酯作为苯丙烷代谢通路的关键产物，其合成与积累受 PAL 等酶活调控影响，CA 抑制 PAL 过度激活，使东莨菪内酯含量维持在合理水平[8]，避免红变加剧，同时，ROS 代谢失衡将直接引发膜系统损伤及营养流失，而切割胁迫引发 ROS 爆发，攻击膜系统，造成膜脂过氧化[40]：MDA 与膜蛋白交联加剧区室化崩溃，促进 PPO 与酚类接触；H_2O_2 作为 PPO 的激活因子进一步加速醌类生成[31]，导致色泽衰败及质地软化，最终导致商品价值丧失。本研究中，0.5 g/L 的 CA 处理可以显著抑制 PPO、POD、PAL 的酶活和基因表达水平，延缓总酚、类黄酮的合成和氧化，同时 CA 处理也可以显著维持较高的超氧化物歧化酶 SOD、CAT、GR、APX 活性和表达水平，延缓 MDA、H_2O_2 含量和 O_2^-·产生速率的上升，保持较好的细胞膜结构，进而延缓红变的发生。

相关性分析结果表明，抗氧化酶基因表达水平与其活性呈现正相关关系，但两者并非完全同步，这一现象提示除转录水平调控外，酶活性可能还受到翻译后修饰或环境因子的调控。东莨菪内酯含量与 ROS 含量（包括 H_2O_2 和 O_2^-·）均呈显著正相关（P<0.05），这种正相关关系的形成机制主要是通过 PAL 活性来介导的。进一步分析发现，酚类代谢产物的积累与抗氧化酶活性之间存在显著负相关（P<0.05），表明酚类物质代谢与氧化应激反应之间存在复杂的动态平衡关系，这可能是调控鲜切莴苣红变进程的关键节点。综合研究结果可知，CA 处理通过多途径、多层次的协同作用调控鲜切莴苣的红变过程：a.显著抑制 PAL 等关键酶的活性进而有效降低东莨菪内酯等次生代谢产物的积累；b.激活 GR、APX 等抗氧化酶系统，维持细胞内氧化还原稳态。

图 8 为 CA 调控 ROS 代谢、延缓鲜切莴苣色泽劣变的机理预测。首先，该酶催化一元酚类物质通过羟基化作用转化为二元酚类衍生物，此过程呈现动力学限制性特征，反应速率较缓且生成无色中间产物。随后，二元酚类化合物经历快速氧化反应，最终形成醌类物质，同时伴随特征性显色现象[41]。机械损伤会引发细胞内 ROS 水平的急剧升高，这种氧化应激状态可触发膜脂过氧化链式反应[35,42−43]。因此，通过外源干预调控 ROS 代谢，可能成为抑制鲜切蔬菜色泽劣变的有效策略。

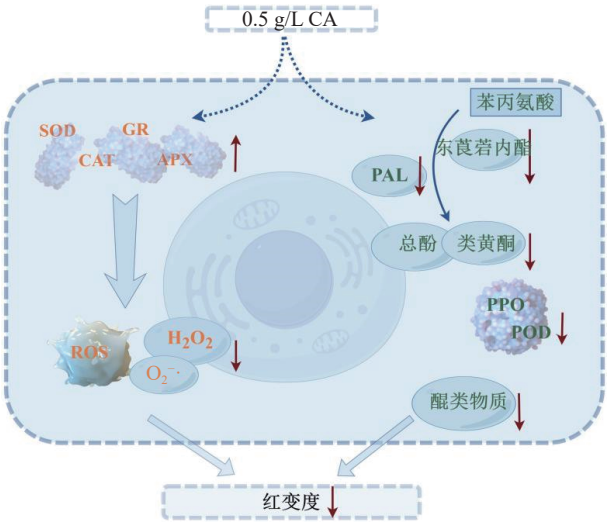


图 8　CA 处理通过调控 ROS 代谢延缓鲜切莴苣红变的机理预测

Fig.8　Predicted mechanism of CA treatment delaying browning in fresh-cut lettuce by regulating ROS metabolism

4　结论

本研究表明，0.5 g/L 的 CA 处理显著抑制了鲜切莴苣的红变，主要通过以下机制实现：CA 通过降低 PPO 和 POD 的酶活性及其基因表达，减少了酚类物质的氧化反应，减缓了鲜切莴苣色泽劣变，同时 CA 处理显著增强了 SOD、CAT、GR 和 APX 等抗氧化酶的活性和相关基因表达，促进 ROS 的清除，缓解氧化应激，保护细胞膜的完整性。综上，CA 通过协同调控抗氧化防御体系，有效延长了鲜切莴苣的贮藏寿命。

© The Author(s) 2026. 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] 杨开, 李精精, 董旭军, 等. 莴苣功能成分及生理活性研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(8): 329−335. [YANG Kai, LI Jingjing, DONG Xujun, et al. Recent advances on functional components and physiological activities of *Lactuca sativa*[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(8): 329−335.]

[2] SINGLA G, CHATURVEDI K, SANDHU P P. Status and recent trends in fresh-cut fruits and vegetables[M]. Fresh-Cut Fruits and Vegetables, 2020: 17−49.

[3] SINGH S, ALAM M S. Preservation of fresh-cut fruits and vegetables: Current status and emerging technologies[J]. Stewart Postharvest Rev, 2012, 8: 1−10.

[4] SINGH B, SURI K, SHEVKANI K, et al. Enzymatic browning of fruit and vegetables: A review[M]. Enzymes in Food Technology: Improvements and Innovations, 2018: 63−78.

[5] MOON K M, KWON E B, LEE B, et al. Recent trends in controlling the enzymatic browning of fruit and vegetable products[J]. Molecules, 2020, 25(12): 2754.

[6] TOMÁS-BARBERÁN F A, GIL M I, CASTAÑER M, et al. Effect of selected browning inhibitors on phenolic metabolism in stem tissue of harvested lettuce[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1997, 45(3): 583−589.

[7] ADAMS J B, BROWN H M. Discoloration in raw and processed fruits and vegetables[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2007, 47(3): 319−333.

[8] LIU Yunfen, LIAO Lingyan, YIN Feilong, et al. Integration of metabolome and transcriptome profiling reveals the effect of 6-benzylaminopurine on the browning of fresh-cut lettuce during storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 192: 112015.

[9] SIWINSKA J, KADZINSKI L, BANASIUK R, et al. Identification of QTLs affecting scopolin and scopoletin biosynthesis in *Arabidopsis thaliana*[J]. BMC Plant Biology, 2014, 14: 280.

[10] SHARAN M, TAGUCHI G, GONDA K, et al. Effects of methyl jasmonate and elicitor on the activation of phenylalanine ammonia-lyase and the accumulation of scopoletin and scopolin in tobacco cell cultures[J]. Plant Science, 1998, 132(1): 13−19.

[11] LI Li, YI Ping, LI Changbao, et al. Influence of polysaccharide-based edible coatings on enzymatic browning and oxidative senescence of fresh-cut lettuce[J]. Food Science & Nutrition, 2021, 9(2): 888−899.

[12] 田旭静. 壳聚糖涂膜处理对鲜切莴笋贮藏品质的影响[J]. 广东蚕业, 2022, 56(8): 54−56. [TIAN Xujing. Effect of chitosan coating treatment on the storage quality of fresh cut lettuce[J]. Guangdong Sericulture, 2022, 56(8): 54−56.]

[13] XYLIA P, CHRYSARGYRIS A, TZORTZAKIS N. The combined and single effect of marjoram essential oil, ascorbic acid, and chitosan on fresh-cut lettuce preservation[J]. Foods, 2021, 10(3): 575.

[14] 师聪, 刘大豪, 沈苏婉, 等. 外源褪黑素处理对鲜切莴苣品质与活性氧代谢的影响[J]. 北方园艺, 2023(19): 84−91. [SHI Cong, LIU Dahao, SHEN Suwan, et al. Effects of exogenous melatonin treatment on quality and reactive oxygen species metabolism in fresh-cut lettuce[J]. Northern Horticulture, 2023(19): 84−91.]

[15] 敖敏, 王艳颖, 郎萍, 等. 抗坏血酸处理对鲜切莴苣生理生化的影响[J]. 现代园艺, 2020, 43(19): 45−47. [AO Min, WANG Yanying, LANG Ping, et al. Effects of ascorbic acid treatment on physiology and biochemistry of fresh-cut lettuce[J]. Xiandai Horticulture, 2020, 43(19): 45−47.]

[16] 宋晓雪, 胡文忠, 毕阳, 等. 纳他霉素对鲜切莴苣表面微生物增殖与生理生化变化的影响[J]. 食品工业科技, 2014, 35(8): 336−339,348. [SONG Xiaoxue, HU Wenzhong, BI Yang, et al. Effect of natamycin on surface microorganism's growth and physiological properties of fresh-cut lettuces[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(8): 336−339,348.]

[17] SOVA M. Antioxidant and antimicrobial activities of cinnamic acid derivatives[J]. Mini Reviews in Medicinal Chemistry, 2012, 12(8): 749−767.

[18] XIAO Yanhui, ZHANG Jieli, JIANG Yuanyuan, et al. Cinnamic acid treatment reduces the surface browning of fresh-cut taro[J]. Scientia Horticulturae, 2022, 291: 110613.

[19] GACCHE R N, WARANGKAR S C, GHOLE V S. Glutathione and cinnamic acid: Natural dietary components used in preventing the process of browning by inhibition of polyphenol oxidase in apple juice[J]. Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry, 2004, 19(2): 175−179.

[20] JIA Shuang, JIANG Shu, CHEN Yi, et al. Comparison of inhibitory effects of cinnamic acid, *β*-cyclodextrin, L-cysteine, and ascorbic acid on soluble and membrane-bound polyphenol oxidase in peach fruit[J]. Foods, 2023, 12(1): 167.

[21] 江宏伟. 不同 pH 下肉桂酸及其衍生物对多酚氧化酶的抑制作用[D]. 南昌: 南昌大学, 2024. [JIANG Hongwei. Inhibitory effect of cinnamic acid and its derivatives on polyphenol oxidase at different pH[D]. Nanchang: Nanchang University, 2024.]

[22] 林德胜, 帅良, 刘云芬, 等. 超高压处理对鲜切莴苣酶促褐变及相关基因表达的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(17): 23−30. [LIN Desheng, SHUAI Liang, LIU Yunfen, et al. Effects of high pressure process treatment on enzymatic browning and related gene expression of fresh-cut lettuce[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(17): 23−30.]

[23] 帅良, 廖玲燕, 朱东建, 等. 不同贮藏温度对鲜切马蹄生理生化的影响[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(22): 178−182. [SHUAI Liang, LIAO Lingyan, ZHU Dongjian, et al. Physio-biochemical effects of fresh-cut Chinese water chestnut at different storage temperature[J]. Food Research and Development, 2016, 37(22): 178−182.]

[24] 宋茜, 帅良, 沙金兰, 等. 辣椒炭疽菌侵染对采后辣椒活性氧代谢的影响[J]. 中国食品学报, 2025, 25(1): 281−292. [SONG Qian, SHUAI Liang, SHA Jinlan, et al. Effect of *Colletotrichum capsici* infection on active oxygen metabolism of postharvest pepper[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25(1): 281−292.]

[25] 宋慕波, 孙翊然, 刘英健, 等. 米糠提取物处理对鲜切荸荠黄化的影响[J]. 广东农业科学, 2024, 51(1): 1−9. [SONG Mubo, SUN Yiran, LIU Yingjian, et al. Effect of rice bran extracts on yellowing of fresh-cut Chinese water chestnut[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2024, 51(1): 1−9.]

[26] ALI S, SATTAR K A, ULLAH M A, et al. Combined application of ascorbic and oxalic acids delays postharvest browning of *Litchi* fruits under controlled atmosphere conditions[J]. Food Chemistry, 2021, 350: 129277.

[27] 徐小昆, 陈志永, 廖立平, 等. 丁公藤属植物中东莨菪苷、绿原酸、东莨菪素、异绿原酸 A、异绿原酸 B 和异绿原酸 C 的含量测定[J]. 中国中药杂志, 2015, 40(6): 1119−1122. [XU Xiaokun, CHEN Zhiyong, LIAO Liping, et al. Determination of scopolin, chlorogenic acid, scopoletin, isochlorogenic acid A, isochlorogenic acid B and isochlorogenic acid C in plants of *Erycibe*[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2015, 40(6): 1119−1122.]

［28］杨源. 1-MCP 对采后西葫芦贮藏品质及活性氧代谢的影响［D］. 南京：南京农业大学, 2022. ［YANG Yuan. Effect of 1-MCP on the changes of fruit quality and reactive oxygen species metabolism of zucchini［D］. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2022. ］
［29］唐基涛, 帅良, 廖玲燕, 等. α-熊果苷处理对采后龙眼果皮褐变及活性氧代谢的影响［J］. 核农学报, 2025, 39(4): 784−792. ［TANG Jitao, SHUAI Liang, LIAO Lingyan, et al. Effects of α-arbutin on pericarp browning and reactive oxygen metabolism of postharvest Longan fruit［J］. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2025, 39(4): 784−792. ］
［30］刘云芬, 田天容, 殷菲胧, 等. 赤霉素对鲜切莴苣酶促褐变及活性氧代谢的影响［J］. 食品与发酵工业, 2021, 47(19): 215−220. ［LIU Yunfen, TIAN Tianrong, YIN Feilong, et al. Effects of gibberellin on enzymatic browning and reactive oxygen metabolism of fresh-cut lettuce［J］. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(19): 215−220. ］
［31］ZHANG Y Y, HUBER D J, HU M J, et al. Delay of postharvest browning in *Litchi* fruit by melatonin via the enhancing of antioxidative processes and oxidation repair［J］. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(28): 7475−7484.
［32］盛金凤, 王雪峰, 雷雅雯, 等. 不同采后处理对恭城月柿褐变、活性氧代谢及糖类的影响［J］. 食品工业科技, 2024, 45(11): 260−269. ［SHENG Jinfeng, WANG Xuefeng, LEI Yawen, et al. Effects of different postharvest treatments on browning, active oxygen metabolism and saccharides of Gongcheng persimmon［J］. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(11): 260−269. ］
［33］林毅雄, 林河通, 陈艺晖, 等. 采前喷施胺鲜酯对采后龙眼果实贮藏期间果皮膜脂代谢的影响［J］. 食品科学, 2019, 40(21): 203−210. ［LIN Yixiong, LIN Hetong, CHEN Yihui, et al. Effect of pre-harvest spraying of diethyl aminoethyl hexanoate on membrane lipid metabolism in pericarp of Longan fruits during postharvest storage［J］. Food Science, 2019, 40(21): 203−210. ］
［34］陈道业, 王玲, 陈于陇, 等. 不同切割方式对鲜切芋头品质的影响［J］. 食品工业科技, 2025, 46(19): 347−356. ［CHEN Daoye, WANG Ling, CHEN Yulong, et al. Effects of different cutting methods on quality of fresh cut taro［J］. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(19): 347−356. ］
［35］徐雨晗, 包垠秋, 易阳, 等. 乙醇熏蒸处理对鲜切莲藕片褐变和活性氧代谢的影响［J］. 中国食品学报, 2023, 23(1): 259−266. ［XU Yuhan, BAO Yinqiu, YI Yang, et al. Effects of ethanol vapor treatment on browning and reactive oxygen species metabolism of fresh-cut *Lotus* root slices［J］. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(1): 259−266. ］
［36］周倩怡, 薄丽萍, 张国莉, 等. 低温胁迫对大蒜生长、活性氧代谢及相关基因表达的影响［J］. 分子植物育种, 2023, 21(18): 6116−6125. ［ZHOU Qianyi, BO Liping, ZHANG Guoli, et al. Effects of low temperature stress on growth, active oxygen metabolism and related gene expression in garlic［J］. Molecular Plant Breeding, 2023, 21(18): 6116−6125. ］
［37］杨菊, 程谦伟, 孟陆丽, 等. 外源抗坏血酸对香蕉保鲜和抗氧化代谢的影响［J］. 食品研究与开发, 2022, 43(15): 146−151. ［YANG Ju, CHENG Qianwei, MENG Luli, et al. Effects of exogenous ascorbic acid on the storage quality and antioxidant metabolism of bananas［J］. Food Research and Development, 2022, 43(15): 146−151. ］
［38］张琼琼, 魏佳, 李杰, 等. 葡萄采后果梗抗氧化系统与褐变的关系［J］. 现代食品科技, 2021, 37(9): 128−137,206. ［ZHANG Qiongqiong, WEI Jia, LI Jie, et al. Relationship between antioxidant system and browning of postharvest grape *Rachis*［J］. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(9): 128−137,206. ］
［39］FAN Mingcong, LI Wenxiang, HU Xinlei, et al. Effect of micro-vacuum storage on active oxygen metabolism, internal browning and related enzyme activities in Laiyang pear (*Pyrus bretschneideri* Reld)［J］. LWT-Food Science and Technology, 2016, 72: 467−474.
［40］LUO Zisheng, WU Xiang, XIE Yan, et al. Alleviation of chilling injury and browning of postharvest bamboo shoot by salicylic acid treatment［J］. Food Chemistry, 2012, 131(2): 456−461.
［41］PANG X Y, WANG S Y, JURCZAK M J, et al. Retinol saturase modulates lipid metabolism and the production of reactive oxygen species［J］. Archives of Biochemistry and Biophysics, 2017, 633: 93−102.
［42］刘倩婷, 郭晓宏, 杜佳铭, 等. 3 种石榴果皮褐变与活性氧及膜脂代谢关系分析［J］. 中国食品学报, 2024, 24(5): 333−345. ［LIU Qianting, GUO Xiaohong, DU Jiaming, et al. Analysis of browning and reactive oxygen species and membrane lipid metabolism in husk of three pomegranate cultivars［J］. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(5): 333−345. ］
［43］潘家丽, 覃子倚, 李静, 等. 外源过氧化氢处理对采后荔枝褐变及活性氧代谢的影响［J］. 南方农业学报, 2022, 53(5): 1227−1234. ［PAN Jiali, QIN Ziyi, LI Jing, et al. Effects of exogenous hydrogen peroxide treatment on browning and reactive oxygen metabolism of postharvest *Litchi*［J］. Journal of Southern Agriculture, 2022, 53(5): 1227−1234. ］