

## 乳酸钙对鲜切生菜生理特性及抗氧化品质的影响

陈恬<sup>1</sup>, 侯亚茹<sup>1</sup>, 李弘文<sup>2</sup>, 任乾乾<sup>1</sup>, 李存曦<sup>1</sup>, 孙风合<sup>3</sup>, 张晓宇<sup>1</sup>

(1. 山西农业大学 食品科学与工程学院, 山西 太原 030031; 2. 山东华宇工学院 能源与建筑工程学院, 山东 德州 253034; 3. 太原市鸿新农产品有限公司, 山西 太原 030031)

**摘要:** 为了延长鲜切生菜的贮藏期, 为乳酸钙在鲜切生菜加工技术上的应用提供理论依据, 以生菜为试材, 探究不同质量浓度(0(CK)、1.5、3.0、4.5 g/L)乳酸钙(CAL)处理对控制鲜切生菜褐变的生理机制。以贮藏过程中鲜切生菜的失重率、褐变指数(BI)、叶绿素含量、相对电导率、丙二醛(MDA)含量等生理特性, 以及抗坏血酸(Vc)、多酚氧化酶(PPO)、过氧化物酶(POD)、苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性和总酚含量等抗氧化物质的变化为评价指标, 分析不同质量浓度CAL对鲜切生菜贮藏品质的影响。结果表明, 在贮藏至第8天时, 经CAL处理的鲜切生菜水分含量仍较高, 而对照的鲜切生菜出现了萎蔫, 且比3.0 g/L CAL和4.5 g/L CAL处理的萎蔫时间提早了2 d。与对照相比, 不同质量浓度的CAL处理均能抑制叶绿素的降解、保持细胞膜的相对完整性、减少Vc的损失, 以及降低PPO、POD、PAL的活性, 减缓总酚含量的下降; 其中, 3.0 g/L CAL处理的效果最为显著, 在贮藏第10天时, 3.0 g/L CAL处理的PAL、PPO及POD活性相较于对照组分别降低30.1%、45.5%和24.0%, 总酚含量是对照组的1.6倍, 作为抗氧化剂有效缓解了鲜切生菜的酶促褐变。3.0 g/L CAL处理能够延缓酶促褐变的发生, 维持鲜切生菜良好的生理特性及抗氧化品质, 在10 d的贮藏期内保持了良好的商品价值, 比对照组的保鲜期延长了4 d。

**关键词:** 鲜切生菜; 乳酸钙; 抗氧化; 贮藏品质

中图分类号: S636.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-2481(2024)05-0143-09

## Effects of Calcium Lactate on Physiological Characteristics and Antioxidant Quality of Fresh-Cut Lettuce

CHEN Tian<sup>1</sup>, HOU Yaru<sup>1</sup>, LI Hongwen<sup>2</sup>, REN Qianqian<sup>1</sup>, LI Cunxi<sup>1</sup>, SUN Fenghe<sup>3</sup>, ZHANG Xiaoyu<sup>1</sup>

(1. College of Food Science and Engineering, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China;

2. School of Energy and Constructional Engineering, Shandong Huayu University of Technology,

Dezhou 253034, China; 3. Taiyuan Hongxin Agricultural Products Co., Ltd., Taiyuan 030031, China)

**Abstract:** In order to prolong the storage period of fresh-cut lettuce, provide theoretical basis for the application of calcium lactate in the processing technology of fresh-cut lettuce, in this study, lettuce was used as the test material to investigate the physiological mechanism of different concentrations(0(CK), 1.5, 3.0, 4.5 g/L) of calcium lactate(CAL) treatments in controlling the browning of fresh-cut lettuce. The evaluation indexes included the physiological characteristics such as weight loss rate, browning index(BI), chlorophyll content, relative conductivity, malondialdehyde(MDA) content, and vitamin C(Vc) content, polyphenol oxidase(PPO) activity, peroxidase(POD) activity, phenylalanine ammonia lyase(PAL) activity, and the changes in antioxidant substances such as the activities of ascorbic acid(Vc), polyphenol oxidase(PPO), peroxidase(POD), and phenylalanine ammonia lyase(PAL) and the total phenolic content of fresh-cut lettuce during storage. The effect of different concentrations of CAL on the storage quality of fresh-cut lettuce was analyzed. The results showed that the moisture content of fresh-cut lettuce treated with CAL was higher until the eighth day of storage; however, the fresh-cut lettuce treated with the control(CK) appeared wilting and it was two days earlier than the lettuce treated with 3.0 g/L and 4.5 g/L of CAL. Compared to the control, different concentrations of CAL could delay the decomposition of chlorophyll, maintain the relative integrity of the cell membrane, reduce the loss of Vc, suppress the activities of PPO, POD, and PAL, and slow down the decrease in total phenolic content. The effect of 3.0 g/L of CAL treatment was the most significant, the activities of PAL, PPO, and POD in the 3.0 g/L CAL treatment were 30.1%, 45.5%, and 24% lower, respectively, than those in the control group on the tenth day of storage. Additionally, the total phenol content was 1.6 times that of the control, acting as an antioxidant to alleviate enzymatic browning of fresh-cut lettuce. The 3.0 g/L CAL treatment was more beneficial in delaying enzymatic browning, maintaining good physiological characteristics and antioxidant quality of fresh-cut lettuce, preserving its commercial value during the ten-day

收稿日期: 2023-12-12

基金项目: 山西省现代农业产业技术体系建设专项(2023CYJSTX08-09)

作者简介: 陈恬(1998-), 女, 山西运城人, 在读硕士, 研究方向: 农产品贮藏保鲜。

通信作者: 张晓宇(1979-), 女, 山西忻州人, 研究员, 博士, 硕士生导师, 主要从事农产品贮藏保鲜研究工作。

storage period, the shelf life of the treatment was four days longer than that of the control.

**Key words:** fresh-cut lettuce; calcium lactate(CAL); antioxidant; storage quality

生菜(*Lactuca sativa* L.)又名叶用莴苣,属于菊科莴苣属,含有丰富的纤维素、维生素和矿物质等生物活性物质<sup>[1]</sup>,在人们的日常饮食中占有不可或缺的地位。鲜切生菜以其营养卫生、快捷方便的特点,深受消费者喜爱<sup>[2]</sup>,并被广泛应用于中央厨房、餐饮门店和快餐店等。然而,作为叶菜,生菜易发生失水萎蔫、酶促褐变、营养汁液外流、膜脂过氧化、抗氧化酶活性下降<sup>[3]</sup>以及硝酸盐积累<sup>[4]</sup>等现象,这些因素限制了鲜切生菜产业的发展<sup>[5-6]</sup>。2023年中央一号文件——《中共中央国务院关于做好2023年全面推进乡村振兴重点工作的意见》首次提出要“培育发展预制菜产业”,国家发改委也提出“挖掘预制菜市场潜力,加快推进预制菜基地建设”<sup>[7]</sup>。如果没有与预制菜相适应的贮藏保鲜技术,食源性病原体的污染可能会对公共健康构成威胁<sup>[8]</sup>。鲜切生菜作为预制菜中的一种即配食品,市场潜力巨大<sup>[9]</sup>。因此,本研究通过探索鲜切生菜的贮藏方法,旨在确保安全和美味的基础上,更好地保存其营养特性和抗氧化酶活力,以延长鲜切生菜的货架期。

国内外对鲜切生菜的保鲜技术主要包括物理保鲜、化学保鲜和生物保鲜。目前,国内关于鲜切生菜保鲜剂的研究大多还停留在理论阶段<sup>[10]</sup>,因此,有必要深入探讨保鲜剂处理后鲜切生菜生理品质的变化。作为一种叶类蔬菜,生菜的失水萎蔫问题严重限制了其货架期。钙元素不仅可以维持植物细胞壁的稳定,还能作为营养元素被人体吸收。乳酸钙(Calcium lactate, CAL)已被列入GB 2760—2014食品添加剂使用标准<sup>[11]</sup>,是一种绿色安全的食品添加剂<sup>[12]</sup>,能够增强果蔬对病菌的抗性,并具有良好的护色效果。目前,乳酸钙已在一些水果上得到应用,并取得了良好效果。例如,宋永令等<sup>[13]</sup>通过使用0~2.5% CAL溶液浸渍鲜切猕猴桃5 min,成功减缓了营养物质的降解并延长了保质期;高姗等<sup>[14]</sup>研究发现,0.6%和1.4% CAL处理的鲜切花椰菜中,1.4%乳酸钙处理更有利于保持其硬度。表明CAL能够保护细胞壁的稳定。然而,关于CAL控制鲜切生菜褐变的生理机制,目前还缺乏深入研究。生菜的失水萎蔫、切口发黄发黑等问题仍然较为严重。

本研究将CAL应用于鲜切生菜,分析在10 d的贮藏期内不同浓度的CAL对鲜切生菜的失重率、褐变指数(Browning index, BI)、叶绿素等外观

特性,以及抗坏血酸(Vitamin C, Vc)、多酚氧化酶(Polyphenol oxidase, PPO)、过氧化物酶(Peroxidase, POD)、苯丙氨酸解氨酶(Phenylalanine ammonia lyase, PAL)和总酚等抗氧化相关物质的影响,旨在为鲜切生菜的贮藏保鲜提供理论依据,进而促进预制菜产业的发展。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

新鲜皱叶生菜于2022年11月购于山西省太原市小店区东蒲村金科绿蔬菜种植专业合作社。采购标准为颜色翠绿、叶片完整、大小一致、无机械损伤,采购后立即运回山西农业大学4℃冷库中预冷待用。

### 1.2 试验试剂与仪器设备

乳酸钙(食品级,天津市大茂化学试剂厂);邻苯二酚(>99%,上海麦克林生化科技有限公司);L-苯丙氨酸(>99%,上海麦克林生化科技有限公司);愈创木酚(分析纯,天津市光复精细化工研究所);硫代巴比妥酸(98.0%,天津市光复精细化工研究所);曲拉通X-100(98%,北京索莱宝科技有限公司);氯化铁(97%,天津市北辰方正试剂厂);Vc(>99%,天津市凯通化学试剂有限公司);红菲咯啉(>99%,上海源叶生物科技有限公司);硼砂、硼酸及甲醇(分析纯,天津市风船化学试剂科技有限公司);无水乙醇(分析纯,天津市汇杭化工科技有限公司)。

电子天平(CP224S型,德国赛多利斯有限公司);色差仪(CR-400型,日本Minolta公司);紫外分光光度计(Ultrospec2000型,英国Pharmacia Biotech公司);低温离心机(Allegra X-30R型,美国贝克曼库尔特有限公司);电导率仪(DDS-307A,上海仪电科学仪器股份有限公司)。

### 1.3 试验方法

挑选大小均一、无变质、无外观创伤的生菜,用灭过菌的刀将生菜切成2 cm的段,经蒸馏水清洗3次后,将鲜切生菜分为4组,分别用CAL溶液(1.5、3.0、4.5 g/L)和蒸馏水(对照组CK)浸泡5 min,沥干后分装于食品级PE保鲜袋中并封口,每袋300 g,置于4℃贮藏10 d,每2 d取样测定鲜切生菜的生理指标一次。试验重复3次。

### 1.4 测定指标及方法

1.4.1 失重率 采用称重法测定失重率。

$$M = \frac{m_0 - m_n}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中, $M$ 表示鲜切生菜失重率; $m_0$ 表示鲜切生菜的初始质量(g); $m_n$ 表示鲜切生菜第 $n$ 天的鲜质量(g)。

1.4.2 褐变指数(BI) 使用色差仪测定样品的 $L^*$ (亮度值)、 $a^*$ (红绿值)、 $b^*$ (黄蓝值),每样品测定3次,随机测定3个样品,以初次测定的叶片部位为固定观察点。

$$BI = \frac{100 \times (X - 0.31)}{0.172} \quad (2)$$

$$X = \frac{a^* + 1.75L^*}{5.645L^* + a^* - 3.012b^*} \quad (3)$$

1.4.3 抗坏血酸含量 根据《果蔬采后生理生化实验指导》<sup>[15]</sup>作Vc的标准曲线。测定样品时,称取0.5 g样品加入5 mL 50 g/L的三氯乙酸溶液,在4 °C、12 000 r/min条件下离心15 min,收集上清液备用。取1 mL上清液,按制作标准曲线的方法加入其他试剂得到混合液,测定混合液在波长534 nm处的吸光度值,从标准曲线中查出混合液的Vc质量,计算鲜切生菜中Vc含量(mg/100 g)。

1.4.4 叶绿素含量 参考罗学平等<sup>[16]</sup>的方法测定。取2 g样品,加入10 mL无水乙醇充分振荡,避光静置24 h,在波长663、645 nm处测定吸光度值,计算结果为叶绿素总含量。

1.4.5 相对电导率 参考伍新龄等<sup>[17]</sup>的方法测定。将鲜切生菜剪成1 cm<sup>2</sup>的小块,取1.5 g放入30 mL蒸馏水中,采用电导率仪测定记为 $L_0$ ;浸泡30 min后测定记为 $L_1$ ;煮沸15 min,冷却后测定记为 $L_2$ 。计算相对电导率。

$$\text{相对电导率} = \frac{L_2 - L_0}{L_1 - L_0} \times 100\% \quad (4)$$

1.4.6 MDA含量 参考《果蔬采后生理生化实验指导》<sup>[15]</sup>测定。称取1 g样品加5 mL 100 g/L TCA混匀,在4 °C、10 000 r/min条件下离心20 min,得到上清液。将2 mL上清液与2 mL 0.67%的硫代巴比妥酸混合后沸水浴20 min,完全冷却后离心,测定其在450、532、600 nm波长处的吸光度值,计算MDA含量(mmol/g)<sup>[18]</sup>。

1.4.7 PPO活性 参照《果蔬采后生理生化实验指导》<sup>[15]</sup>采用邻苯二酚比色法测定。称取0.5 g样品,加入1 mL提取缓冲液,在4 °C、12 000 r/min条件下离心30 min,收集上清液即为酶提取液,低温保存备用。取2 mL 50 mmol/L(pH值5.5)的乙酸-乙酸钠缓冲液、0.5 mL 50 mmol/L邻苯二

酚、50 μL酶提取液混匀,于波长420 nm处测定吸光度值,每分钟记录一次,共记录5次吸光度值,以每克样品每分钟在波长420 nm处的吸光度值变化增加1为1个活性单位( $\Delta OD_{420}/(\text{min} \cdot \text{g})$ )。

1.4.8 POD活性 参考愈创木酚比色法<sup>[19]</sup>测定。称取0.5 g样品,加入1 mL提取缓冲液,在4 °C、12 000 r/min条件下离心30 min,上清液即为酶提取液,低温保存备用。取3 mL 25 mmol/L愈创木酚、0.5 mL酶提取液、200 μL过氧化氢混匀,于波长470 nm处测定吸光度值,每分钟记录一次,共记录5次吸光度值,以每克样品每分钟在波长470 nm处的吸光度值变化增加1为1个活性单位( $\Delta OD_{470}/(\text{min} \cdot \text{g})$ )。

1.4.9 PAL活性 参考韩梦凡等<sup>[20]</sup>的方法测定。称取0.5 g样品,加入5 mL提取缓冲液,在4 °C、10 000 r/min条件下离心20 min,上清液即为酶提取液。将6 mL 50 mmol/L(pH值8.8)硼酸缓冲液和1 mL L-苯丙氨酸混合,于37 °C保温10 min,加1 mL酶提取液混匀,于290 nm处测定吸光度,37 °C保温60 min,测定PAL活性。以每克样品每小时在290 nm处吸光度变化值增加0.01为一个活性单位(U/g)。

1.4.10 总酚含量 参考《果蔬采后生理生化实验指导》<sup>[15]</sup>测定。称取0.5 g样品加入5 mL预冷的盐酸甲醇溶液,在4 °C避光20 min,期间多次摇荡浸提酚类物质。在4 °C、10 000 r/min条件下离心15 min,收集上清液,测定其在280 nm处的吸光度值表示总酚含量( $OD_{280}/\text{g}$ )。

## 1.5 数据分析

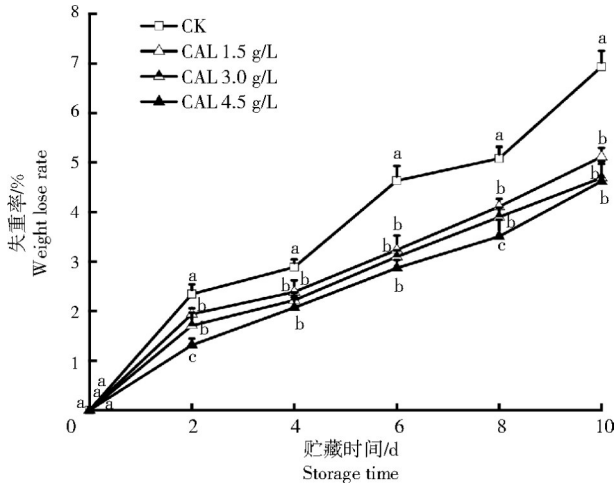
数据结果以平均值±标准偏差表示。采用SPSS 20.0进行统计分析( $P < 0.05$ ),采用Origin 2022软件制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 CAL质量浓度对鲜切生菜失重率的影响

蒸腾作用和呼吸代谢是导致果蔬表面失水的重要原因,当水分流失超过果蔬质量的5%时,果蔬就会出现萎蔫现象<sup>[21]</sup>。由图1可知,在10 d的贮藏期内,随贮藏时间增加鲜切生菜的失重率逐渐增加,与CAL质量浓度成反比关系。这可能是因为CAL能增强细胞壁和细胞膜的强度,减少水分蒸发。在贮藏的第8天,CK以及1.5、3.0、4.5 g/L CAL处理的鲜切生菜失重率分别为5.1%、4.1%、3.8%和3.5%。表明CK处理的鲜切生菜出现了萎

蔫,失去了商品价值,而CAL处理的鲜切生菜的失重率显著低于CK( $P < 0.05$ )。在贮藏的第10天,1.5、3.0、4.5 g/L CAL处理的失重率分别为5.1%、4.6%和4.7%。表明1.5 g/L CAL处理的鲜切生菜出现了萎蔫,而3.0 g/L CAL和4.5 g/L CAL处理的鲜切生菜有效保持了水分含量,二者之间的差异不显著,其中4.5 g/L CAL的效果更好。



不同小写字母表示同一贮藏时间不同处理组间在0.05水平差异显著。下图同

Different lowercase letters indicated significant differences at the 0.05 level among different treatments for the same storage time. The same as below.

图1 CAL质量浓度对鲜切生菜失重率的影响  
Fig.1 Effect of CAL mass concentration on weight loss rate of fresh-cut lettuce

## 2.2 CAL质量浓度对鲜切生菜褐变指数的影响

CAL质量浓度对鲜切生菜褐变指数的影响结果如图2所示。

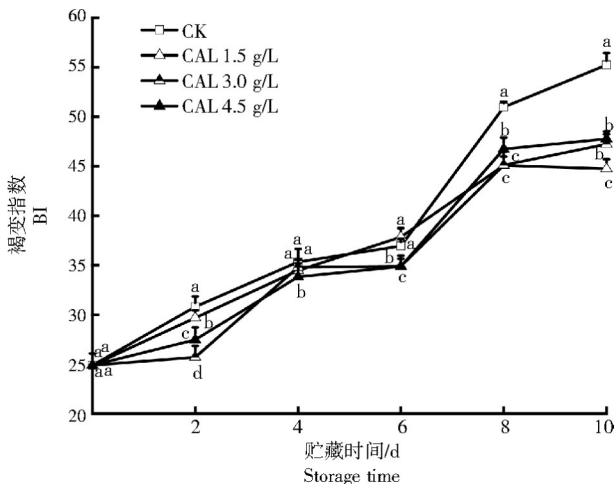


图2 CAL质量浓度对鲜切生菜褐变指数的影响  
Fig.2 Effect of CAL mass concentration on BI value of fresh-cut lettuce

鲜切生菜的色泽对其商品价值有重要影响<sup>[22]</sup>,

颜色特征决定了绿叶菜在销售时的可接受性<sup>[23-24]</sup>。从图2可以看出,在10 d的贮藏期内,鲜切生菜的褐变指数(BI)逐渐上升。在贮藏的第4天,各处理组的BI值相近;到贮藏的第8天,1.5 g/L CAL和3.0 g/L CAL处理的鲜切生菜BI值差异不显著;在贮藏的第10天,1.5、3.0、4.5 g/L CAL处理的鲜切生菜BI值分别为CK的83.0%、86.0%、86.5%。表明CAL对鲜切生菜的褐变有一定的抑制效果,其中1.5 g/L CAL处理的鲜切生菜BI值最低,与其他处理组均有显著差异( $P < 0.05$ ),其有效维持了鲜切生菜的色泽。

## 2.3 CAL质量浓度对鲜切生菜Vc含量的影响

在非酶抗氧化系统中,Vc在解毒和减少自由基方面发挥着关键作用,是果蔬中重要的营养成分和抗氧化物质,也是判断果蔬品质的重要参数。由图3可知,在贮藏期间,各处理组的Vc含量逐渐下降,但CAL处理的鲜切生菜Vc含量始终显著高于CK( $P < 0.05$ )。在贮藏的第10天,CK及1.5、3.0、4.5 g/L CAL处理的Vc含量分别为2.0、2.4、2.7、2.4 mg/100 g。Vc含量下降趋势由慢到快的顺序是3.0 g/L CAL组、4.5 g/L CAL组、1.5 g/L CAL组、CK。表明CAL处理可以延缓Vc的损耗,其中3.0 g/L CAL处理的鲜切生菜Vc含量最高,与其他处理组均有显著差异( $P < 0.05$ ),有效保留了鲜切生菜的营养成分。

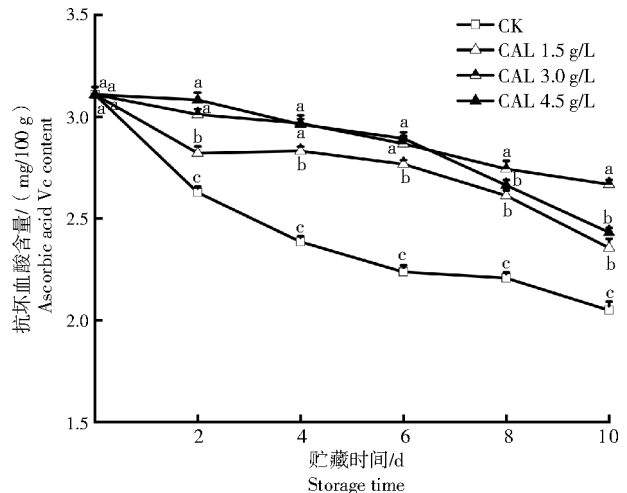


图3 CAL质量浓度对鲜切生菜Vc含量的影响  
Fig.3 Effect of CAL mass concentration on Vc content of fresh-cut lettuce

## 2.4 CAL质量浓度对鲜切生菜叶绿素含量的影响

叶绿素是鲜切生菜中的主要色素,它极不稳定且容易转化为脱镁叶绿素,是判断鲜切生菜质量的关键商业指标<sup>[25]</sup>。由图4可知,在贮藏期间,随贮藏

时间延长各处理组鲜切生菜的叶绿素含量逐渐降低。在贮藏的第10天,CK及1.5、3.0、4.5 g/L CAL处理的鲜切生菜叶绿素含量分别为初始值的42.0%、61.0%、58.0%、51.0%。叶绿素含量下降趋势由慢到快依次为1.5 g/L CAL组、3.0 g/L CAL组、4.5 g/L CAL组、CK。表明CAL处理延缓了叶绿素的分解,可能是因为CAL涂层阻碍了氧化褐变反应,并控制了水分损失,有助于最大限度地减少颜色变化。1.5 g/L CAL和3.0 g/L CAL处理的鲜切生菜叶绿素含量相近,二者之间没有显著差异,但与CK间存在显著差异( $P < 0.05$ )。

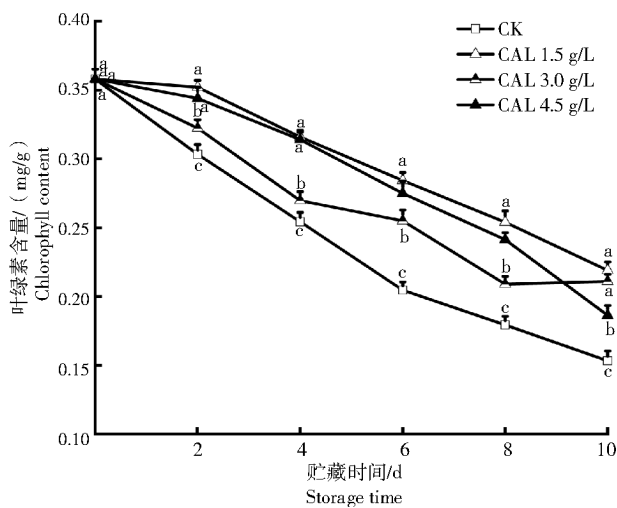


图4 CAL质量浓度对鲜切生菜叶绿素含量的影响  
Fig.4 Effect of CAL mass concentration on chlorophyll content of fresh-cut lettuce

## 2.5 CAL质量浓度对鲜切生菜相对电导率的影响

CAL质量浓度对鲜切生菜相对电导率的影响结果如图5所示。

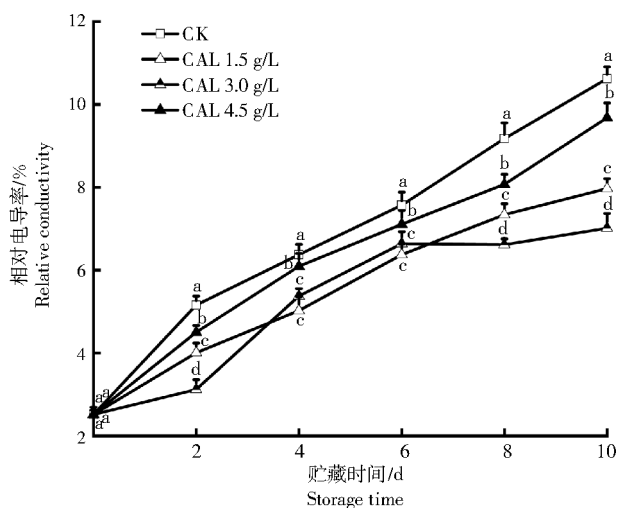


图5 CAL质量浓度对鲜切生菜相对电导率的影响  
Fig.5 Effect of CAL mass concentration on relative conductivity of fresh-cut lettuce

相对电导率是反映植物膜系统状况的重要指标<sup>[26]</sup>。当植物遭受逆境或损伤时,细胞膜容易破裂,导致膜蛋白渗出和相对电导率增大。由图5可知,在10 d的贮藏期内,随贮藏时间延长各处理组的相对电导率呈上升趋势。在贮藏的第10天,CK及1.5、3.0、4.5 g/L CAL处理的鲜切生菜相对电导率分别为10.6%、7.0%、7.0%、9.6%。相对电导率由低到高的顺序依次为1.5 g/L CAL组、3.0 g/L CAL组、4.5 g/L CAL组、CK。CAL处理与CK间存在显著差异( $P < 0.05$ ),表明CAL处理延缓了鲜切生菜相对电导率的升高。可能是因为钙离子能够促进细胞间隙离子环境的改变,增加钙离子浓度,有助于提高细胞活力<sup>[27]</sup>。3.0 g/L CAL处理的相对电导率最低,有效保护了鲜切生菜的细胞完整性。

## 2.6 CAL质量浓度对鲜切生菜MDA含量的影响

MDA是脂质过氧化的主要产物之一,能够反映果蔬组织被破坏的程度<sup>[28]</sup>。由图6可知,在贮藏期间,随贮藏时间延长各处理的鲜切生菜MDA含量逐渐增加。在贮藏前4 d内,CAL处理的鲜切生菜MDA含量高于CK;之后随着贮藏期的延长,CK处理的鲜切生菜MDA含量快速上升。在贮藏第10天,CK及1.5、3.0、4.5 g/L CAL处理的鲜切生菜MDA含量分别为1.5、0.8、1.0、1.3 mmol/g,CAL处理的鲜切生菜MDA含量显著低于CK( $P < 0.05$ )。其中,1.5 g/L CAL处理的鲜切生菜MDA含量最低,说明细胞膜脂过氧化程度较低。

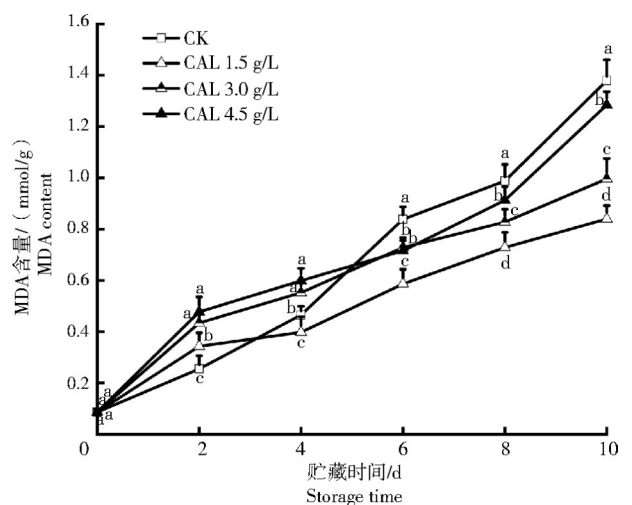


图6 CAL质量浓度对鲜切生菜MDA含量的影响  
Fig.6 Effect of CAL mass concentration on MDA content of fresh-cut lettuce

## 2.7 CAL质量浓度对鲜切生菜PPO活性的影响

PPO是判断鲜切果蔬抗氧化程度的重要指

标<sup>[29]</sup>。由图 7 可知,在贮藏期间,随贮藏时间延长 PPO 活性先升后降。这是因为机械伤害或结合态酶释放<sup>[30]</sup>导致贮藏前期 PPO 活性升高。在贮藏第 4 天,各处理的 PPO 活性达到峰值,随着营养成分的减少,PPO 活性逐渐降低;在贮藏第 8 天,CK 及 1.5、3.0、4.5 g/L CAL 处理的鲜切生菜 PPO 活性分别为 2.2、1.5、1.2、1.3  $\Delta OD_{420}/(\text{min}\cdot\text{g})$ ;在贮藏第 10 天,各处理的 PPO 活性差异不大,说明 CAL 在贮藏前期能明显抑制 PPO 活性。PPO 活性由低到高依次为 3.0 g/L CAL 组、4.5 g/L CAL 组、1.5 g/L CAL 组、CK。表明 CAL 处理抑制了 PPO 活性的升高,可能是由于 CAL 涂层的阻隔性能改变了内部气体成分,抑制了抗氧化化合物的氧化。3.0 g/L CAL 处理的鲜切生菜 PPO 活性显著低于其他处理 ( $P<0.05$ ),有效抑制了酶促褐变。

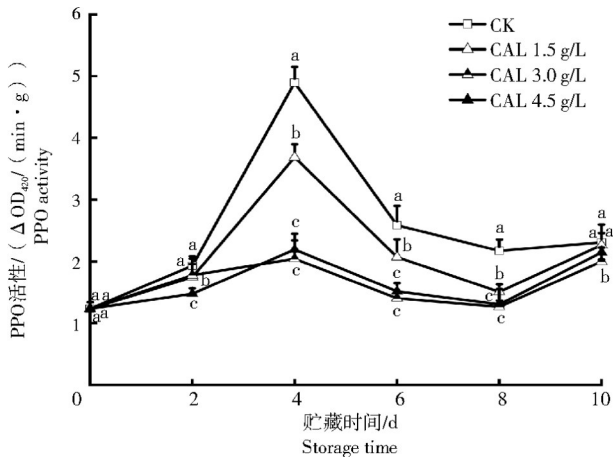


图 7 CAL 质量浓度对鲜切生菜 PPO 活性的影响  
Fig.7 Effect of CAL mass concentration on PPO activity of fresh-cut lettuce

## 2.8 CAL 质量浓度对鲜切生菜 POD 活性的影响

POD 是逆境胁迫下酶促防御系统的关键酶<sup>[31]</sup>。从图 8 可以看出,在贮藏 10 d 内,随贮藏时间延长 POD 活性先升后降再升。在贮藏前期,由于细胞溢出过氧化氢或 PPO 与酚酶结合生成的过氧化氢与 POD 反应,导致 POD 活性升高,在贮藏第 4 天,POD 活性达到峰值。随着贮藏时间的延长,鲜切生菜营养成分降低或 PPO 与酚酶反应减缓,导致 POD 活性下降。在贮藏第 8 天,CK 及 1.5、3.0、4.5 g/L CAL 处理的鲜切生菜 POD 活性分别为 1.6、1.2、1.3、1.3  $\Delta OD_{470}/(\text{min}\cdot\text{g})$ 。CAL 处理的 POD 活性显著低于 CK ( $P<0.05$ )。之后随着贮藏期的延长,POD 活性再次上升。POD 活性由低到高依次为 3.0 g/L CAL 组、4.5 g/L CAL 组、1.5 g/L CAL 组、CK。表明 3.0 g/L CAL 处理的鲜切生菜 POD 活性较低,

在一定程度上清除了植物体内的自由基,有效抑制了鲜切生菜的褐变。

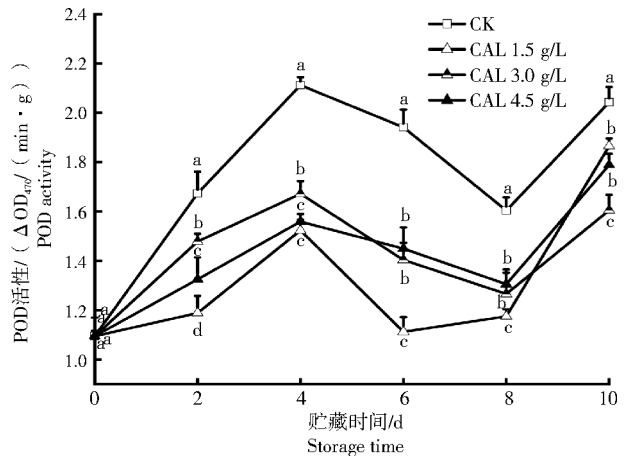


图 8 CAL 质量浓度对鲜切生菜 POD 活性的影响  
Fig.8 Effect of CAL mass concentration on POD activity of fresh-cut lettuce

## 2.9 CAL 质量浓度对鲜切生菜 PAL 活性的影响

CAL 浓度对鲜切生菜 PAL 活性的影响结果如图 9 所示。

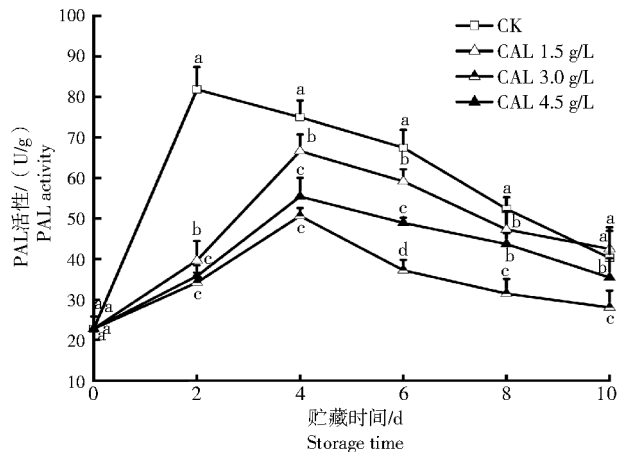


图 9 CAL 质量浓度对鲜切生菜 PAL 活性的影响  
Fig.9 Effect of CAL mass concentration on PAL activity of fresh-cut lettuce

PAL 是苯丙烷类代谢途径的关键酶和限速酶<sup>[32]</sup>,能够合成酚类物质。由图 9 可知,在贮藏 10 d 内,随贮藏时间延长各处理的 PAL 活性先升后降。果蔬受到机械损伤后,苯丙烷类代谢被激活,PAL 活性迅速上升。CK 处理的鲜切生菜 PAL 活性在贮藏第 2 天达到峰值,而 CAL 处理的鲜切生菜 PAL 活性在贮藏第 4 天达到峰值。在贮藏第 10 天,CK 及 1.5、3.0、4.5 g/L CAL 处理的鲜切生菜 PAL 活性分别为 40.2、42.5、28.1、35.4 U/g。表明 CAL 处理延缓了 PAL 活性峰值的出现,抑制了酶促褐变的发生。PAL 活性由低到高依次为 3.0 g/L CAL

组、4.5 g/L CAL组、CK、1.5 g/L CAL组。3.0 g/L CAL处理的鲜切生菜PAL活性较低,与CK存在显著差异( $P < 0.05$ ),能够减缓酚类物质的生成,从而避免引起褐变。

## 2.10 CAL质量浓度对鲜切生菜总酚含量的影响

总酚是使化合物变为棕色并引起褐变的主要底物,也是重要的抗氧化物质<sup>[32]</sup>。由图10可知,在贮藏期间,随贮藏时间延长总酚含量先升后降。在贮藏前期,苯丙烷类代谢被激活,诱导酚类物质生成。贮藏至第6天,酚类物质合成能力减弱;在贮藏第10天,CK及1.5、3.0、4.5 g/L CAL处理的总酚含量分别为2.1、2.6、3.4、3.2 OD<sub>280</sub>/g。表明CAL处理的总酚含量显著高于CK( $P < 0.05$ )。3.0 g/L CAL处理的总酚含量最高,抑制了鲜切生菜发生酶促褐变的速度。

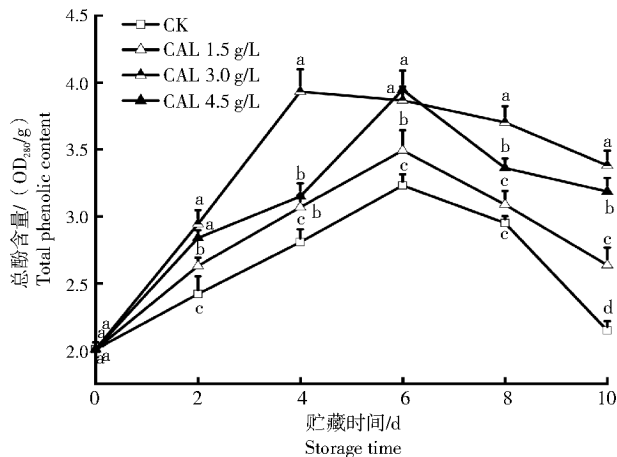


图10 CAL质量浓度对鲜切生菜总酚含量的影响  
Fig.10 Effect of CAL mass concentration on total phenolic content of fresh-cut lettuce

## 3 结论与讨论

本研究表明,CAL处理能够维持鲜切生菜的良好外观品质。在贮藏期内,鲜切生菜的失重率与CAL质量浓度成反比,CAL处理显著降低了鲜切生菜的失重率。这一结论与鞠国泉等<sup>[33]</sup>在草莓上的研究结论一致,即钙离子能在果蔬表面形成一层保护膜,同时维护细胞壁的坚固性,从而延缓水分的蒸发。然而,王馨悦等<sup>[34]</sup>在研究CAL处理对蓝莓采后品质的影响时发现,失重率与CAL浓度之间并无相关规律,因此,本研究CAL与失重率之间的关系可能与样品种类有关。CAL处理的鲜切生菜叶绿素含量较高,表明其能抑制叶绿素的分解速率,并延缓L\*值、b\*值的下降及a\*值的上升,这与BI值的变化相符。ALMELA等<sup>[35]</sup>研究发现,CAL可保

持柿子切片的色泽。HU等<sup>[36]</sup>研究发现,CAL处理能延缓猕猴桃叶绿素含量的下降,这与本研究结论相似,可能与CAL处理的低失水率有关。鲜切生菜在受到生物或非生物胁迫后,会发生膜蛋白渗出,导致相对电导率和MDA含量增大。本研究中,在贮藏前期,1.5 g/L CAL处理的鲜切生菜细胞相对更为完整;至贮藏第8天,3.0 g/L CAL处理的鲜切生菜相对电导率较低,可能是因为钙离子能促进细胞间隙离子环境的改变,增加钙离子浓度,有助于提高细胞活力<sup>[27]</sup>。NASER等<sup>[37]</sup>在处理柿子时发现,将CAL加入热水中,钙通过附着在生物膜上来稳定生物膜,防止自由基附着在膜上,减少膜脂过氧化和自由基的产生,也有利于保护细胞膜的完整性。张雨等<sup>[38]</sup>研究表明,15.0 g/L CAL结合纳米包装处理金针菇有利于保持鲜切果蔬细胞壁及细胞膜结构和功能的完整,抑制病原菌的繁殖<sup>[39]</sup>。

CAL能提高鲜切生菜内部抗氧化物质的含量和抗氧化酶的活力,延缓生物活性化合物的损失<sup>[40]</sup>。Vc不仅是营养成分,也是重要的抗氧化物质。在本研究中,3.0 g/L CAL处理的鲜切生菜Vc含量和总酚含量均显著高于CK。可能是因为Vc作为抗氧化物质,能增强清除活性氧的能力,对鲜切生菜的酚类物质和酶类起到一定的保护作用,进而抑制酶促褐变的速率。这一结论与张晓敏等<sup>[41]</sup>在鲜切皇冠梨上的研究结论一致。CAL通过激活PAL活性使总酚含量升高,而总酚作为次生代谢产物之一,能缓解样品的氧化速度,有利于提高总体抗氧化能力。在贮藏第10天,3.0 g/L CAL处理的鲜切生菜总酚含量显著高于其他处理组,PAL活性、PPO活性和POD活性较低,表明CAL能钝化与褐变相关的酶活性,延缓鲜切生菜酶促褐变的发生。可能是由于CAL涂层的阻隔性能改变了内部气体成分,抑制了抗氧化化合物的氧化,也可能是由于CAL通过螯合金属和清除自由基延缓了酚类化合物的氧化<sup>[42]</sup>。

综上所述,CAL有利于维持鲜切生菜的外观特性及抗氧化品质。在10 d的贮藏期内,综合各项指标,3.0 g/L CAL处理的鲜切生菜表现出最佳的贮藏品质。在此质量浓度下,鲜切生菜保持了一定的水分含量和叶绿素含量,提高了消费者的购买欲望;并且Vc含量和总酚含量较高,通过钝化PAL、PPO和POD活性来延缓酶促褐变<sup>[43]</sup>,提高了鲜切生菜的贮藏品质。探究CAL对鲜切生菜的抗氧化机制,为提高鲜切生菜的品质提供了理论依据<sup>[44]</sup>,进

而促进预制菜产业的发展,对经济效益和社会效益具有深远的影响。在后续的研究中,将进一步分析不同浓度 CAL 处理对鲜切生菜微生物菌群的影响。

#### 参考文献:

- [1] 申悦,田密霞. 1-MCP 处理对鲜切生菜在贮藏期间理化性质的影响[J]. 现代园艺, 2019(5):3-6.  
SHEN Y, TIAN M X. Effect of 1-MCP treatment on physico-chemical properties of fresh-cut lettuce during storage[J]. Contemporary Horticulture, 2019(5):3-6.
- [2] TANG T, ZHANG M, LIM LAW C, et al. Novel strategies for controlling nitrite content in prepared dishes: current status, potential benefits, limitations and future challenges[J]. Food Research International, 2023, 170:112-984.
- [3] KHAN M R, DI GIUSEPPE F A, TORRIERI E, et al. Recent advances in biopolymeric antioxidant films and coatings for preservation of nutritional quality of minimally processed fruits and vegetables[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2021, 30:100752.
- [4] MARTÍNEZ-ISPIZUA E, CALATAYUD Á, MARSAL J I, et al. The nutritional quality potential of microgreens, baby leaves, and adult lettuce: an underexploited nutraceutical source [J]. Foods, 2022, 11(3):423.
- [5] KATOR L, IHEANACHO A, ALOHO K. Isolation, identification and pathogenicity of fungal organisms causing postharvest spoilage of tomato fruits during storage[J]. Annual Research & Review in Biology, 2018, 26(6):1-7.
- [6] PERUMAL A B, HUANG L X, NAMBIAR R B, et al. Application of essential oils in packaging films for the preservation of fruits and vegetables: a review[J]. Food Chemistry, 2022, 375:131-810.
- [7] 中共中央, 国务院. 中共中央国务院关于做好 2023 年全面推进乡村振兴重点工作的意见[J]. 科学中国人, 2023(4):68-73.  
The CPC Central Committee and the State Council. Opinions of the central committee of the communist party of China and the state council on completing the key work of comprehensively promoting rural revitalization in 2023[J]. Scientific Chinese, 2023(4):68-73.
- [8] WONG J X, RAMLI S, DESA S, et al. Use of *Centella asiatica* extract in reducing microbial contamination and browning effect in fresh cut fruits and vegetables during storage: a potential alternative of synthetic preservatives[J]. LWT, 2021, 151:112-229.
- [9] HUANG M S, ZHANG M, BHANDARI B. Recent development in the application of alternative sterilization technologies to prepared dishes: a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(7):1188-1196.
- [10] 柳青, 陈晓琪, 黄广学, 等. 鲜切果蔬品质控制技术研究进展 [J]. 食品研究与开发, 2022, 43(6):217-224.  
LIU Q, CHEN X Q, HUANG G X, et al. Progress on research into quality control technology for fresh-cut fruit and vegetables [J]. Food Research and Development, 2022, 43(6):217-224.
- [11] 聂珂楠, 李婷, 王玉丽, 等. GB 2760—2014《食品添加剂使用标准》存在若干问题与探讨[J]. 食品工业, 2022, 43(8):264-268.  
NIE K N, LI T, WANG Y L, et al. Some existing problems and discussion on the GB 2760-2014 use standard of food additives[J]. The Food Industry, 2022, 43(8):264-268.
- [12] 胡晓敏. 乳酸钙浸渍和短波紫外光照射对鲜切猕猴桃品质及抗氧化活性的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2022.  
HU X M. Impact of calcium lactate dips combined with UV-C irradiation on the quality attributes and antioxidant capacities of fresh-cut kiwi fruit slices[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2022.
- [13] 宋永令, 王若兰, 王翠翠. 乳酸钙处理对猕猴桃鲜果切片品质和生理效应的影响[J]. 食品科技, 2014, 39(2):51-54.  
SONG Y L, WANG R L, WANG C C. Effect of calcium lactate treatment on physiology and quality of fresh-cut kiwi fruit slices[J]. Food Science and Technology, 2014, 39(2):51-54.
- [14] 高姗, 赵晶晶, 俞子莹, 等. 乳酸钙处理对鲜切花椰菜生理生化及保鲜效果影响的研究[J]. 保鲜与加工, 2011, 11(3):16-20.  
GAO S, ZHAO J J, YU Z X, et al. Effects of calcium lactate treatments on physiological and biochemical changes of fresh-cut cauliflower[J]. Storage and Process, 2011, 11(3):16-20.
- [15] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007.  
CAO J K, JIANG W B, ZHAO Y M. Guidance on postharvest physiological and biochemical experiments of fruits and vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007.
- [16] 罗学平, 李腊, 张丽, 等. 乙醇浸泡法测定绿茶叶绿素含量的试验研究[J]. 现代食品, 2023, 29(1):148-154.  
LUO X P, LI L, ZHANG L, et al. Experimental study on determination of chlorophyll content in green tea by ethanol soaking[J]. Modern Food, 2023, 29(1):148-154.
- [17] 伍新龄, 荆红彭, 张旭, 等. 不同自发气调包装膜对鲜食大豆保鲜效果的比较[J]. 食品科学, 2015, 36(14):265-270.  
WU X L, JING H P, ZHANG X, et al. Comparison of different packaging materials used for modified atmosphere packaging of green soybean during storage[J]. Food Science, 2015, 36(14):265-270.
- [18] 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 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, 47(20):194-203.
- [19] YU R Y, SONG H B, CHEN Y N, et al. Incorporation of ascorbic acid and L-cysteine in sodium carboxymethyl cellulose coating delays color deterioration and extends the shelf-life of fresh-cut asparagus lettuce (*Lactuca sativa* var. *angustata*) [J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, 204:112-419.
- [20] 韩梦凡, 蒋思睿, 钟舒睿, 等. 臭氧联合植酸处理对鲜切水果甘蓝品质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(3):266-272.  
HAN M F, JIANG S R, ZHONG S R, et al. Effect of combined ozone and phytic acid treatment on storage quality of fresh-cut fruit cabbage[J]. Food Science, 2019, 40(3):266-272.
- [21] 柳青, 田文静, 李淑荣, 等. 1-MCP 处理对 3 种鲜切生菜贮藏期品质的影响[J]. 农产品加工, 2023(6):58-62.  
LIU Q, TIAN W J, LI S R, et al. Effect of 1-MCP treatment on the quality of three fresh-cut lettuce[J]. Farm Products Processing, 2023(6):58-62.
- [22] 王春芳, 刘晨霞, 王晓, 等. 不同厚度 LDPE 薄膜袋对鲜切生菜贮藏品质的影响[J]. 上海农业学报, 2023, 39(1):113-118.  
WANG C F, LIU C X, WANG X, et al. Effects of LDPE film bags with different thickness on storage quality of fresh-cut lettuce[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2023, 39(1):113-118.
- [23] 邓吉斯, 王百鸿, 石慧. 不同浓度桑叶多酚对鲜切生菜褐变和假

- 单胞菌的抑制作用[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(10):206-211.  
DENG J S, WANG B H, SHI H. Effect of different concentrations of mulberry leaf polyphenols on the browning of fresh-cut lettuce and inhibition of *Pseudomonas* spp. [J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(10):206-211.
- [24] 王晓, 王春芳, 柳洪入, 等. 臭氧处理对生菜保鲜效果的影响[J]. 上海农业学报, 2022, 38(5):94-98.  
WANG X, WANG C F, LIU H R, et al. Effects of ozone treatment on the preservation of lettuce[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2022, 38(5):94-98.
- [25] 邓雯瑾, 蒋汶龙, 陈安均, 等. 百里香精油抗菌涂层包装对鲜切生菜货架期内理化品质及微生物的影响[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(7):247-253.  
DENG W J, JIANG W L, CHEN A J, et al. Effect of thyme essential oil antibacterial coating films on physicochemical quality and microorganisms of fresh-cut lettuce during its shelf life [J]. Food and Fermentation Industries, 2016, 42(7):247-253.
- [26] 张鹏, 颜碧, 贾晓昱, 等. 精准温度处理对鲜切莲藕褐变、生理和品质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(16):347-354.  
ZHANG P, YAN B, JIA X Y, et al. Effects of precise temperature treatment on the browning, physiological and quality of fresh cut *Lotus* root[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(16):347-354.
- [27] 张留圈, 李艺, 梁颖, 等. 抗坏血酸钙对鲜切生菜品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(2):454-459.  
ZHANG L Q, LI Y, LIANG Y, et al. Effects of calcium ascorbate on quality of fresh-cut iceberg lettuce[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2016, 32(2):454-459.
- [28] 王琳焱, 徐彬, 王丁, 等. 金银花提取物对肉鸡生产性能、屠宰性能、肉品质和抗氧化性能的影响[J]. 河南农业科学, 2022, 51(10):134-141.  
WANG L Y, XU B, WANG D, et al. Effects of extract from *Lonicera japonica* Thunb. on the production performance, slaughter characters, meat quality and antioxidant capacity of broilers[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2022, 51(10):134-141.
- [29] 闫媛媛, 胡文忠, 姜爱丽, 等. 茉莉酸甲酯和乙烯利处理对鲜切富士苹果抗氧化酶活力和苯丙烷代谢的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(16):324-327.  
YAN Y Y, HU W Z, JIANG A L, et al. Effect of antioxidant enzyme activity and phenylpropanoid metabolism to jasmonic acid methyl ester(MeJA) of and ethephon treatments for fresh-cut apple[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(16):324-327.
- [30] 陈晨, 胡文忠, 姜爱丽, 等. 半胱氨酸控制鲜切苹果褐变的生理机制[J]. 食品科学, 2018, 39(3):282-288.  
CHEN C, HU W Z, JIANG A L, et al. Physiological mechanism for browning inhibition in fresh-cut apple by cysteine[J]. Food Science, 2018, 39(3):282-288.
- [31] 冯岩岩, 梁晓颖, 公立群, 等. 硫代乙酸糠酯对鲜切茄子褐变的抑制作用[J]. 食品工业科技, 2023, 44(6):361-365.  
FENG Y Y, LIANG X Y, GONG L Q, et al. Inhibitory effect of furfuryl thioacetate on browning in fresh-cut eggplant[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(6):361-365.
- [32] 代红飞, 李具鹏, 周新建, 等. 外源乙烯和1-MCP预处理对鲜切马铃薯褐变的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(14):329-333.  
DAI H F, LI J P, ZHOU X J, et al. Effects of exogenous ethylene and 1-MCP pre-treatment on enzymatic browning of fresh-cut potato tubers[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(14):329-333.
- [33] 鞠国泉, 鞠临子, 赵士豪, 等. 乳酸钙处理对速冻草莓品质的影响研究[J]. 农产品加工, 2015(7):5-7.  
JU G Q, JU L Z, ZHAO S H, et al. Effects of calcium lactate on the quality of quick-frozen strawberry[J]. Farm Products Processing, 2015(7):5-7.
- [34] 王馨悦, 姜爱丽, 胡文忠, 等. 乳酸钙处理对采后蓝莓品质的影响[J]. 现代食品科技, 2019, 35(7):47-54.  
WANG X Y, JIANG A L, HU W Z, et al. Effect of calcium lactate treatment on the postharvest quality of blueberries. [J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(7):47-54.
- [35] ALMELA C, CASTELLÓ M L, TARRAZÓ J, et al. Influence of calcium lactate and modified atmosphere on respiration rate, optical and mechanical properties of sliced persimmon[J]. Food Science and Technology International, 2015, 21(1):55-63.
- [36] HU X M, CHEN Y, WU X Y, et al. Combination of calcium lactate impregnation with UV-C irradiation maintains quality and improves antioxidant capacity of fresh-cut kiwifruit slices [J]. Food Chemistry: X, 2022, 14:100-329.
- [37] NASER F, RABIEI V, RAZAVI F, et al. Effect of calcium lactate in combination with hot water treatment on the nutritional quality of persimmon fruit during cold storage[J]. Scientia Horticulturae, 2018, 233:114-123.
- [38] 张雨, 俞建民, 毕阳, 等. 乳酸钙处理结合纳米包装提升金针菇贮藏品质[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(9):201-208.  
ZHANG Y, YUN J M, BI Y, et al. Effects of calcium lactate treatment combined with nano-packaging on storage quality of *Flammulina velutipes*[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(9):201-208.
- [39] 王佳宇, 胡文忠, 管玉格, 等. 鲜切花椰菜保鲜技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(21):327-332.  
WANG J Y, HU W Z, GUAN Y G, et al. Research progress on preservation technology of fresh-cut cauliflower[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(21):327-332.
- [40] JAVED M S, RANDHAWA M A, BUTT M S, et al. Effect of calcium lactate and modified atmosphere storage on biochemical characteristics of guava fruit[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2016, 40(4):657-666.
- [41] 张晓敏, 张馨月, 王娅, 等. 浸渍冷却对鲜切皇冠梨品质特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(18):202-207.  
ZHANG X M, ZHANG X Y, WANG Y, et al. Effects of immersion cooling on quality characteristics of fresh-cut Huangguan pear[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(18):202-207.
- [42] GULL A, BHAT N, WANI S M, et al. Shelf life extension of apricot fruit by application of nanochitosan emulsion coatings containing pomegranate peel extract[J]. Food Chemistry, 2021, 349:129-149.
- [43] 缪文玉, 李冠文, 殷孝莹, 等. 新鲜枸杞叶中黄酮提取工艺的优化及抗氧化性分析[J]. 山西农业科学, 2022, 50(5):762-770.  
MIAO W Y, LI G W, YIN X Y, et al. Optimization of extraction technology and analysis of antioxidant activity of flavonoids from fresh *Lycium barbarum* leaves[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2022, 50(5):762-770.
- [44] JIANG Q, ZHANG M, XU B G. Application of ultrasonic technology in postharvested fruits and vegetables storage: a review[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 69:105-261.