

柠檬醛对草莓贮藏期间品质和抗氧化能力的影响

唐歆玥¹, 曹叶婷¹, 邓明益¹, 李涛¹, 王贺^{1,2*}

(1. 江苏科技大学粮食学院, 镇江 212100; 2. 浙江农林大学暨阳学院, 绍兴 311800)

摘要: 目的 探讨不同植物精油对草莓贮藏期间品质和抗氧化能力的影响。**方法** 以“红颜”草莓为试材, 分别用不同质量浓度(40、80、160和320 $\mu\text{g/mL}$)的百里香精油、丁香花精油、肉桂精油、桔萜醛和柠檬醛进行处理, 测定其在20°C贮藏期间的失重率、腐烂指数、理化性质、抗氧化物质含量和抗氧化酶活性等指标。

结果 柠檬醛在40 $\mu\text{g/mL}$ 质量浓度时具有最佳保鲜效果, 能够有效地降低草莓果实的失重率和腐烂指数, 延缓可溶性固形物、可滴定酸和抗坏血酸含量的下降, 维持较高的总酚和总黄酮含量, 并提高果实对1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基和羟基自由基的清除能力。此外, 该处理还能显著提高过氧化氢酶、超氧化物歧化酶、抗坏血酸过氧化物酶等抗氧化酶的活性, 且有效抑制丙二醛含量的升高。

结论 柠檬醛在草莓贮藏中具有良好的保鲜效果, 能够保持其品质和营养价值, 这为柠檬醛在水果贮藏保鲜中的应用提供了依据。

关键词: 柠檬醛; 草莓; 植物精油; 保鲜; 品质; 抗氧化

Effects of citral on the quality and antioxidant capacity of *Fragaria ananassa* Duch. fruit during postharvest storage

TANG Xin-Yue¹, CAO Ye-Ting¹, DENG Ming-Yi¹, LI Tao¹, WANG He^{1,2*}

(1. School of Grain Science and Technology, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China;
2. Jiyang College, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Shaoxing 311800, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the effects of different plant essential oils on the quality and antioxidant capacity of *Fragaria ananassa* Duch. during storage. **Methods** Fresh 'Red face' *Fragaria ananassa* Duch. fruits were subjected to different treatments with varying mass concentrations (40, 80, 160, and 320 $\mu\text{g/mL}$) of thyme essential oil, clove essential oil, cinnamon essential oil, cuminaldehyde, and citral, respectively. The changes in weight loss rate, decay index, physicochemical parameters, antioxidant compounds, antioxidant enzymes, and lipid peroxidation of the *Fragaria ananassa* Duch. fruits were monitored during storage at 20°C. **Results** Citral at 40 $\mu\text{g/mL}$ showed the best preservation effect among all the treatments. It significantly decreased the weight loss rate and decay index, delayed the reduction of total soluble solids, titratable acidity, and ascorbic acid, maintained higher amounts of total phenolics and

基金项目: 浙江省基础公益研究计划项目(LGN19C200020)、江苏科技大学博士科研启动基金项目(1182932007)

Fund: Supported by the Zhejiang Provincial Basic Public Welfare Research Project (LGN19C200020), and the Start-up Fund of Jiangsu University of Science and Technology (1182932007)

*通信作者: 王贺, 博士, 副教授, 主要研究方向为粮油食品储藏与品质控制。E-mail: wh2989@just.edu.cn

*Corresponding author: WANG He, Ph.D, Associate Professor, Jiangsu University of Science and Technology, No.666, Changhui Road, Dantu District, Zhenjiang 212100, China. E-mail: wh2989@just.edu.cn

total flavonoids, and enhanced the fruit's ability to scavenge 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) and hydroxyl radicals. Moreover, this treatment also considerably increased the activities of catalase, superoxide dismutase and ascorbate peroxidase, and effectively suppressed the accumulation of malondialdehyde. **Conclusion** Citral has a good effect on the preservation of *Fragaria ananassa* Duch. fruit, which can maintain their quality and nutritional value. This study provides a foundation for the application of citral in fruit preservation.

KEY WORDS: citral; *Fragaria ananassa* Duch. fruit; plant essential oils; preservation; quality; antioxidant

0 引言

草莓(*Fragaria ananassa* Duch.)是一种蔷薇科草莓属的浆果类水果,原产于欧洲,后来被引入到世界各地,成为一种广受欢迎的水果。草莓不仅具有酸甜可口的风味和鲜艳的外观,还富含维生素 C、糖类、有机酸、黄酮类化合物等多种营养物质,具有抗癌、抗炎、抗衰老等多种生理功能^[1]。然而,由于草莓果实缺乏外皮保护,含水量高达 90%以上,易受微生物和机械损伤的影响,导致采后变质和损耗严重,贮藏期极短^[2]。据统计,草莓在贮运过程中的损失率高达 25%~30%。这不仅给草莓生产者和消费者带来了巨大的经济损失,也造成了资源的浪费。

为了延长草莓的贮藏期,目前常用的草莓保鲜方法主要有冷藏、气调包装、辐照、化学保鲜剂等^[3-4]。但是,这些方法都存在一定的缺陷和问题。例如,冷藏温度过低会导致草莓发生冷害,影响品质和风味^[5];气调包装可以减少水分散失和微生物污染,但高浓度 CO₂ 可能导致某些品种的草莓果实因无氧呼吸而产生乙醇,影响口感^[6];辐照可以有效杀灭微生物和延缓果实衰老,但会引起消费者的担忧和抵制^[7];化学保鲜剂虽然能够延长草莓的贮藏期,但也会带来食品安全和环境污染等问题^[7]。因此,寻找一种经济、高效、绿色、安全、可行的草莓采后保鲜方法,对减少贮藏和运输等过程中的经济损失,具有十分重要的意义。

近年来,植物精油因其具有广谱的抑菌和良好的抗氧化活性,在食品保鲜方面的研究与应用受到了广泛关注。植物精油可以有效地抑制食品中微生物的生长繁殖和延迟氧化反应,从而延缓食品的腐败和变质,延长食品的贮藏期。因此,探索植物精油在草莓保鲜中的应用,对于提高草莓的商品价值和市场竞争力具有重要意义。目前,已有一些文献报道了植物精油在草莓保鲜中的应用效果。例如,丁香精油、百里香精油、肉桂精油和柠檬醛等植物精油都能显著抑制草莓果实的腐烂和品质的下降^[8-11]。枯茗醛是孜然精油的主要活性成分,也具有较强的抑菌和抗氧化活性,近年来引起了越来越多的关注^[12]。然而,已有的研究都是将这些植物精油与其他精油或成膜剂复配使用,没有单独考察每种精油对草莓保鲜的效果和最佳浓度。此外,将柠檬醛与其他常用植物精油用于草莓保鲜效果进行

比较的研究也未见报道。

本研究以“红颜”草莓为试材,首先比较不同浓度的百里香精油、丁香花精油、肉桂精油、枯茗醛和柠檬醛对其保鲜效果的影响,并筛选出保鲜效果较好的一种植物精油。然后,分析该植物精油对草莓品质、营养成分和抗氧化系统相关酶活性等方面的影响,以期植物精油在草莓贮藏中的应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

本研究选用“红颜”草莓作为试材。这些草莓于 2023 年 4 月从镇江市三山镇采摘,选取外形整齐、大小一致、成熟度相似(8 成熟)、无机械损伤和病虫害的草莓果实作为实验样本。“红颜”草莓的采收成熟度指标是基于果实的外观、质地、香气和味道综合评定的。采收时,果实表面着色应达到 70%以上,呈深红色;果实肉质饱满;果实香气浓郁;果实味道甜酸适中。

1.2 试剂

百里香精油、丁香花精油和肉桂精油(分析纯,广州亿诚精油有限公司);枯茗醛、柠檬醛、1,10-菲罗啉、三氯化铝(分析纯,上海麦克林生化科技股份有限公司);过氧化氢酶(catalase, CAT)试剂盒、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)试剂盒、抗坏血酸过氧化物酶(ascorbate peroxidase, APX)试剂盒(南京建成生物工程研究所);其他试剂(分析纯,上海国药集团化学试剂有限公司)。

1.3 仪器与设备

LRH-250F 生化培养箱(上海一恒科学仪器有限公司);SQ10C 立式压力蒸汽灭菌器(重庆雅马拓科技有限公司);H1MF 酶标仪(美国 BioTek 仪器有限公司);D005102 手持式折光仪(上海力辰邦西仪器科技有限公司);LSC-520D 保鲜陈列柜(澳柯玛股份有限公司);18R-WS 台式高速冷冻离心机(湖南湘立科学仪器有限公司);752PC 紫外可见分光光度计(上海舜宇恒平科学仪器股份有限公司)。

1.4 实验方法

1.4.1 样品处理

采摘后的草莓经过清水冲洗干净并用纸巾吸干表面

水分, 以备后续处理。实验分为两个阶段: 设置 6 个处理组, 包括对照组(CK)和 5 种植物精油处理组(百里香精油组、丁香花精油组、肉桂精油组、桔萜醛组和柠檬醛组)。每个植物精油处理组又分为 4 个质量浓度: 40、80、160、320 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 。每个处理有 3 个重复, 每个重复使用 1 盒草莓。将不同浓度的植物精油溶于 1%吐温-80 中制成相应浓度的溶液, 然后将挑选好的草莓浸泡其中 2 min。之后取出自然晾干, 并放入扎孔的 PE 盒中, 每盒装有 15 颗草莓。对照组使用无菌水和 1%吐温-80 溶液。处理结束后, 将草莓置于 20°C、相对湿度 80%~85%的恒温恒湿箱中贮藏 6 d, 并测定好果率、失重率和腐烂指数。第二阶段: 在第一阶段获得保鲜效果最佳的植物精油处理基础上, 进一步研究其对草莓果实品质、营养成分、抗氧化能力以及抗氧化系统相关酶活性和丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量的影响。处理方式和贮藏条件同第一阶段, 不同之处在于在贮藏的 6 d 内每天都测定各项指标。

1.4.2 测定指标

(1)好果率测定

好果率是指贮藏结束后没有腐烂或病斑的果实占总果实的百分比, 它反映了草莓的保鲜效果和商品性, 参照杨涛等^[13]方法进行, 并略作修改。按公式(1)求出好果率。

$$\text{好果率}/\% = \frac{\text{好果数}}{\text{调查总果数}} \times 100\% \quad (1)$$

(2)失重率

采用称重法, 称取果实贮藏前后的重量, 用公式(2)计算。

$$\text{失重率}/\% = \frac{\text{贮藏前果实质量} - \text{贮藏结束时果实质量}}{\text{贮藏前果实质量}} \times 100\% \quad (2)$$

(3)腐烂指数

腐烂指数是指草莓在贮藏过程中发生腐烂的果实数量占总果实数量的百分比, 参照 YANG 等^[14]方法进行, 并稍作修改。然后用公式(3)计算:

$$\text{腐烂指数}/\% = \frac{\sum \text{腐烂级别} \times \text{该级别果实数}}{\text{腐烂最高级} \times \text{果实总数}} \times 100\% \quad (3)$$

按照草莓果实腐烂面积大小分为 5 个级别: 0 级: 无腐烂; 1 级: (0, 10%]; 2 级: (10%, 30%]; 3 级: (30%, 50%]; 4 级: (50%, 100%]。

(4)品质指标

品质指标包括可溶性固形物(total soluble solids, TSS)、可滴定酸(titratable acidity, TA)和抗坏血酸含量。TSS 用手持式折光仪测定, 以°Brix 表示; TA 用 0.1 mol/L 氢氧化钠滴定法测定, 以柠檬酸为标准, 以 g/100 mL 表示; 抗坏血酸含量按照 WANG 等^[15]方法进行, 以 mg/100 g 表示。

(5)总酚和总黄酮含量

总酚含量用 Folin-Ciocalteu 法测定。步骤如下: 首先,

按照 2:5 (g/mL)比例混合草莓果肉和预冷 80%丙酮提取液, 制备组织匀浆。接着, 在 4°C下以 11000 r/min 离心 20 min, 收集离心上清液。随后, 吸取 50 μL 上清液于离心管内, 加入 150 μL 蒸馏水、1 mL 福林酚试剂和 0.8 mL 7.5% Na_2CO_3 溶液, 混匀后在 30°C下进行避光反应 1 h。最后, 使用紫外分光光度计在 765 nm 处测定吸光值。总酚含量以每 100 g 新鲜果实重量的没食子酸 mg 表示。

总黄酮含量用氯化铝法^[16]测定, 结果换算为每 1 kg 鲜重果实中槲皮素的含量(mg/kg)。

(6)抗氧化能力

1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基清除率: 草莓果肉和 50%乙醇按照 2:5 (*m:V*) 比例制备组织匀浆, 在 4°C、12000 r/min 离心 20 min。分别吸取 1 mL 上清液和 0.2 mmol/L DPPH 溶液于离心管中, 混匀, 放入 30°C水浴锅中水浴避光反应 20 min, 在 517 nm 处测定吸光值。按下式(4)求出 DPPH 自由基清除率:

$$\text{DPPH 自由基清除率}/\% = \frac{A - B}{A_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中: *A*—样液与 DPPH 溶液反应后的吸光值; *B*—样液与 1 mL 50%乙醇溶液测得的吸光值; *A*₀—1 mL DPPH 溶液与 1 mL 50%乙醇溶液混合测得的吸光值。

羟自由基清除率: 样品处理同 DPPH 自由基清除率测定。取提取液、9 mmol/L 水杨酸-乙醇溶液、1.5 mmol/L 亚硫酸铁溶液和 6 mmol/L H_2O_2 溶液各 1 mL 于离心管中, 混匀, 放入 37°C水浴锅中反应 30 min, 反应结束后, 在 510 nm 下测定吸光值。按下式(5)求出羟基自由基清除率:

$$\text{羟基自由基清除率}/\% = \frac{A - B}{A_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中: *A*—样液与反应体系反应后的吸光值; *B*—1 mL 样液与 1 mL 9 mmol/L 水杨酸-乙醇溶液、1 mL 蒸馏水和 1 mL 6 mmol/L H_2O_2 溶液反应测得的吸光值; *A*₀—0.5 mL 50%乙醇与反应体系混合液测得的吸光值。

(7)抗氧化系统相关酶活性

抗氧化系统相关酶活性包括过氧化氢酶(catalase, CAT)、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)和抗坏血酸过氧化物酶(ascorbate peroxidase, APX)的活性。草莓果肉和 0.86%生理盐水按照 1:4 (g/mL)比例低温研磨匀浆, 在 4°C、4000 r/min 离心 10 min。然后采用 SOD 试剂盒、CAT 试剂盒和 APX 试剂盒测定, 结果均以 U/g FW 表示。

(8)丙二醛含量

MDA 是脂质过氧化的终产物之一, 是反映细胞膜损伤程度的重要指标。草莓样品的处理方法同步骤(7), MDA 含量采用 MDA 试剂盒测定, 以 nmol/g 表示。

1.5 数据处理

每个指标测定均重复 3 次。实验数据采用 Excel 2010

进行整理,用 SPSS 22.0 进行方差分析,各因素水平间的显著差异采用最小显著差别(least significant difference, LSD)法检验($P<0.05$),使用 Origin 2021 进行绘图。

2 结果与分析

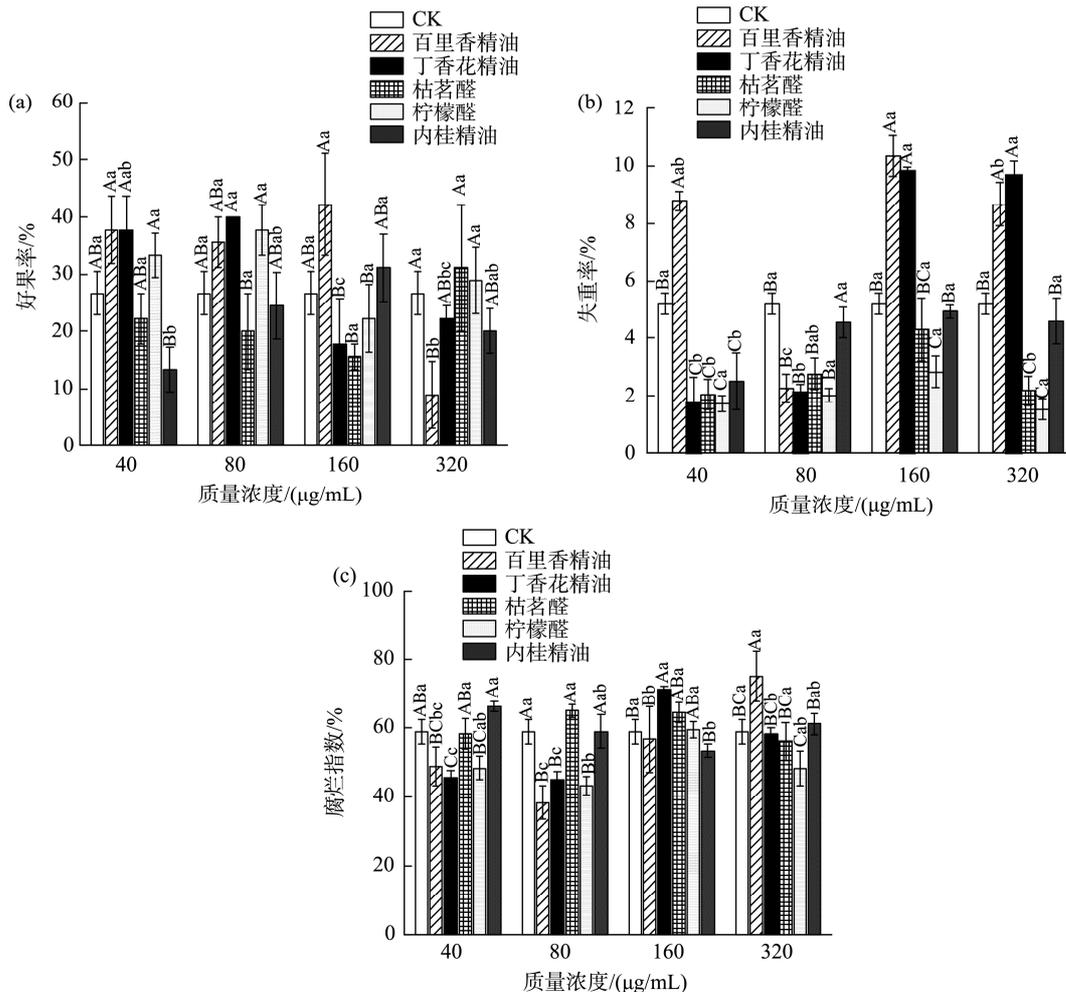
2.1 5 种植物精油对草莓果实保鲜效果的初筛

当草莓在贮藏过程中,水分散失和微生物侵入会导致果实的好果率降低、重量减少和腐烂。好果率、失重率和腐烂指数是反映草莓保鲜效果的关键指标。

在贮藏过程中,好果率是判断水果保鲜效果的重要指标之一。从图 1(a)可知,在 20°C 、 $80\%\sim 85\%$ 相对湿度的贮藏条件下,经过 6 d 贮藏的草莓果实,百里香精油质量浓度为 $160\ \mu\text{g}/\text{mL}$ 的处理效果最佳,其次是丁香花精油质量浓度为 $80\ \mu\text{g}/\text{mL}$ 和柠檬醛质量浓度为 $80\ \mu\text{g}/\text{mL}$ 的处理。相比高浓度精油处理,低浓度精油更有利于维持草莓果实的好果

率。这一现象可能与过高的精油浓度会对果实造成的伤害有关,因为高浓度的精油可能会破坏果实的细胞结构和功能,加速果实衰老^[17]。此外,本研究还发现这 3 种精油处理与 CK 组在好果率方面没有明显差异。

在采后阶段,草莓果实失重主要是由于水分流失所致。如图 1(b)所示,植物精油处理组中,过高浓度(例如 $160\ \mu\text{g}/\text{mL}$ 百里香精油和 $320\ \mu\text{g}/\text{mL}$ 丁香花精油)导致药害并显著增加了果实失重率(与 CK 组相比, $P<0.05$)。然而,未产生药害的精油处理组对草莓果实的失重均有不同程度的抑制作用。具体来看,柠檬醛处理对草莓果实保鲜效果最佳,其次是枯茗醛处理。此外,在不同浓度下使用枯茗醛和柠檬醛进行处理时,基本上显著低于 CK 组($P<0.05$)。值得注意的是,在柠檬醛质量浓度为 $320\ \mu\text{g}/\text{mL}$ 时,草莓的失重率最低,仅为 5.19%; 然而,在 4 个柠檬醛浓度之间并未观察到显著差异($P>0.05$)。



注:不同小写字母表示同一精油不同浓度处理下具有显著差异($P<0.05$),而大写字母表示同一浓度下不同精油处理下具有显著差异($P<0.05$)。

图 1 5 种植物精油对草莓好果率(a)、失重率(b)和腐烂指数(c)的影响

Fig.1 Effects of 5 kinds of essential oils on the good fruit rate (a), weight loss rate (b) and decay index (c) of *Fragaria ananassa* Duch. fruit

果实腐烂指数是反映果实保鲜效果的关键指标。由图 1(c)可知, 在 40 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 和 80 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 质量浓度下, 柠檬醛、丁香花精油和百里香精油 3 个精油处理组的腐烂指数低于 CK 组。具体而言, 40 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 质量浓度下分别为 48.33%、45.56%和 48.89%, 80 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 质量浓度下分别为 43.33%、45.00%和 38.44%。这表明几种浓度的精油处理均能有效抑制草莓果实的腐烂指数, 但各个处理之间对草莓果实腐烂指数的抑制效果基本上没有明显差异。需要指出的是, 随着精油浓度升高, 草莓果实产生的药害也变得更加严重。例如, 在 160 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 和 320 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 两个质量浓度下, 丁香花精油和百里香精油对草莓产生了最严重的药害, 表现为果实出现褐变并发生软腐现象, 失水情况加剧。

综合考虑好果率、失重率和腐烂指数 3 个指标, 选择 40 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 柠檬醛作为最佳保鲜剂进行后续研究。

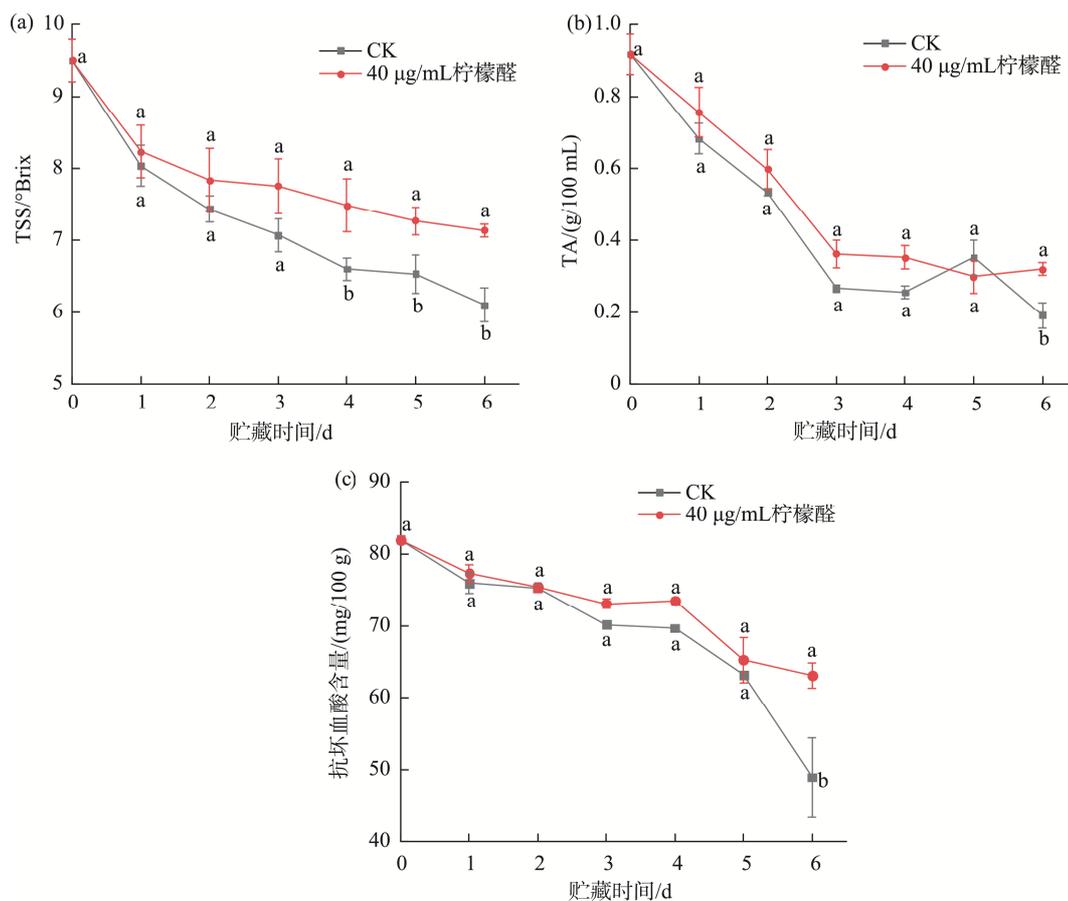
2.2 40 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 柠檬醛对草莓果贮藏实品质的影响

2.2.1 对草莓果实 TSS、TA 和抗坏血酸含量的影响

TSS 是衡量果实成熟度和风味特征的重要参数, 它主要取决于果实中的糖类、有机酸、氨基酸等可溶性成分。

从图 2(a)可以看出, 无论是处理组还是 CK 组, 草莓果实的 TSS 都随着贮藏时间的增加而逐渐下降, 但在贮藏后期 (4~6 d), 40 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 柠檬醛处理组的草莓仍然保持了较高的 TSS 含量, 显著高于 CK 组 ($P < 0.05$)。这说明 40 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 柠檬醛处理能够延缓草莓 TSS 的下降, 维持较高的果实品质。草莓在采后会发生呼吸作用和代谢反应, 消耗和分解可溶性成分, 导致 TSS 降低。柠檬醛通过抑制果实呼吸作用和代谢活性, 减少可溶性成分的损失, 从而保持较高的 TSS。这与其他研究者的发现相一致, 例如程旺开等^[18]报道了羧甲基壳聚糖-柠檬醛保鲜纸能延缓李子果实的 TSS 含量下降, MOHAMED 等^[19]也证明了明胶与薄荷精油的复合涂层能减少草莓果实的 TSS 损失。

草莓果实的 TA 含量是反映其品质的重要指标之一, 它由多种有机酸构成, 如柠檬酸、苹果酸、草酸等。这些有机酸不仅决定了草莓的风味特征, 还影响了草莓的呼吸强度和抗菌能力。如图 2(b)所示, 随着贮藏时间的延长, 草莓果实的 TA 呈现逐渐降低的趋势, 这表明草莓果实中的有机酸在贮藏过程中发生了消耗, 可能是因为有机酸作为



注: 不同小写字母表示同一贮藏时间下具有显著差异 ($P < 0.05$), CK 为对照组, 下同。

图 2 40 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 柠檬醛对草莓果实 TSS (a)、TA (b) 和抗坏血酸 (c) 含量的影响

Fig.2 Effects of 40 $\mu\text{g}/\text{mL}$ citral on the TSS (a), TA (b) and ascorbic acid (c) content of *Fragaria ananassa* Duch. fruit

呼吸代谢的底物或中间产物,参与了多种生理和生化反应。ELHAM 等^[20]发现,利用玉米醇溶蛋白和百里香精油制备的薄膜包装草莓,可以有效地抑制 TA 含量的降低,从而保持草莓的品质。本研究中,TA 在贮藏的前 3 d 下降最快,之后下降速度减缓。在整个贮藏过程中,除了第 6 d 外,40 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 柠檬醛处理组的草莓果实与 CK 组相比,TA 含量无显著差异($P>0.05$)。

抗坏血酸是草莓的重要品质指标之一,它具有多种生理功能,如维持正常的新陈代谢、延缓衰老和抗氧化。图 2(c)显示了 40 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 柠檬醛处理对草莓抗坏血酸含量的影响。从图 2(c)中可以看出,无论是 CK 组还是处理组,随着贮藏时间的延长,草莓中的抗坏血酸含量都逐渐减少。在贮藏 6 d 后,柠檬醛处理组的草莓抗坏血酸含量为 63.09 mg/100 g,显著高于 CK 组的 48.95 mg/100 g ($P<0.05$)。这说明柠檬醛处理能够有效地减缓草莓中抗坏血酸的损失,可能是由于柠檬醛能够抑制草莓细胞中氧化酶的活性,从而降低了抗坏血酸的降解速率^[21]。目前,已有研究发现,一些天然物质可以有效保持草莓中的抗坏血酸含量。例如,可可毛色二孢菌 F6 胞外多糖能够减少草莓贮藏过程中的抗坏血酸损失^[22];芦荟与精油复配后能够延缓草莓贮藏过程中的抗坏血酸降低,提高草莓品质^[23]。

2.2.2 对草莓果实总酚、总黄酮含量的影响

草莓果实中含有丰富的酚类物质,这些物质具有清除自由基、抗氧化和抗衰老等生理功能,是草莓的重要活性成分。40 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 柠檬醛处理对草莓总酚含量的影响结果见图 3(a)。由图 3(a)可知,无论是否经过柠檬醛处理,草莓果实中总酚含量都随着贮藏时间的延长而逐渐降低。其中,CK 组的总酚含量下降最快,到第 6 d 时,仅剩初始含量的 32.33%。而经过柠檬醛处理的草莓果实的总

酚含量下降相对较慢,到第 6 d 时,仍然保持在初始含量的 38.48%。从第 5 d 开始,两组之间的总酚含量存在显著差异($P<0.05$),说明柠檬醛处理能够在一定程度上减缓草莓果实中酚类化合物的损失,从而维持其营养价值和抗氧化能力。

黄酮类化合物是一类具有多种生物活性的次生代谢物,广泛分布于水果中。它们不仅影响水果的色素、品质和风味的形成,还能调节果实的成熟衰老过程。40 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 柠檬醛处理对草莓总黄酮含量的影响见图 3(b)。从图 3(b)中可以看出,在 6 d 的贮藏期内,无论是柠檬醛处理组还是 CK 组,草莓总黄酮含量都呈现下降趋势,这可能是由于黄酮类化合物在贮藏过程中发生了降解或转化,导致草莓色泽变暗。然而,相比于 CK 组,柠檬醛处理组的草莓总黄酮含量下降幅度较小,其损失率为 54.91%,而 CK 组为 64.77%。这说明柠檬醛处理能够在一定程度上减缓草莓总黄酮含量的下降,从而维持草莓的色泽和抗氧化活性。这一结果与 DU 等^[24]的研究相符,该研究发现在贮藏过程中,用 1 $\mu\text{L}/\text{L}$ 1-甲基环丙烯和柠檬醛联合处理的番茄,其总黄酮含量明显高于未处理组。

2.2.3 对草莓果实抗氧化能力的影响

DPPH 自由基清除活性是一种评价果实抗氧化能力的方法,它反映了果实清除自由基的效率,数值越高表示果实抗氧化能力越强。图 4(a)显示了 40 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 柠檬醛处理对草莓抗氧化能力的影响。从图 4(a)中可以看出,柠檬醛处理组和 CK 组的草莓果实对 DPPH 自由基的清除率都随着贮藏时间的延长而下降。然而,在贮藏期的前 4 d,柠檬醛处理组和 CK 组对 DPPH 自由基清除率无明显差异,而在贮藏期的后 2 d,柠檬醛处理组果实的 DPPH 自由基清除率显著高于 CK 组果实($P<0.05$),说明柠檬醛处理能够在一定程度上延缓草莓果实抗氧化能力的下降。

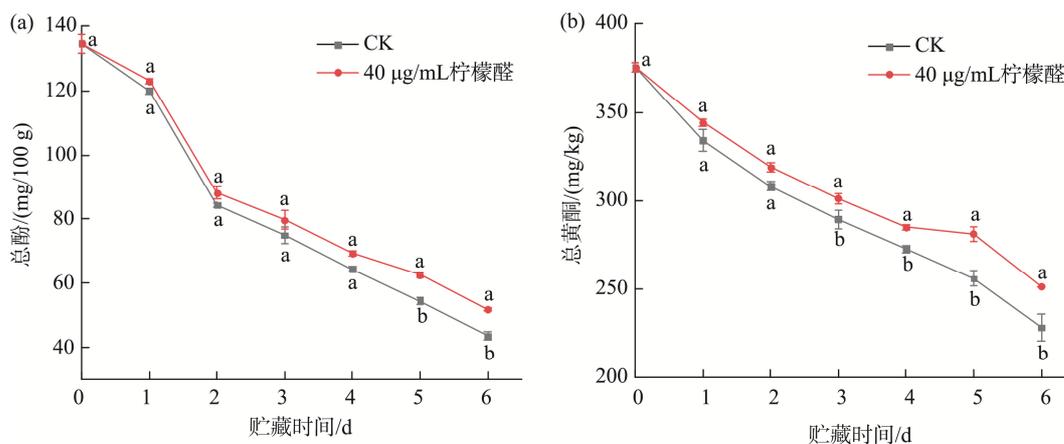


图 3 40 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 柠檬醛对草莓果实总酚(a)和总黄酮(b)含量的影响

Fig.3 Effects of 40 $\mu\text{g}/\text{mL}$ citral on the total phenolics (a) and total flavonoid (b) content of *Fragaria ananassa* Duch. fruit

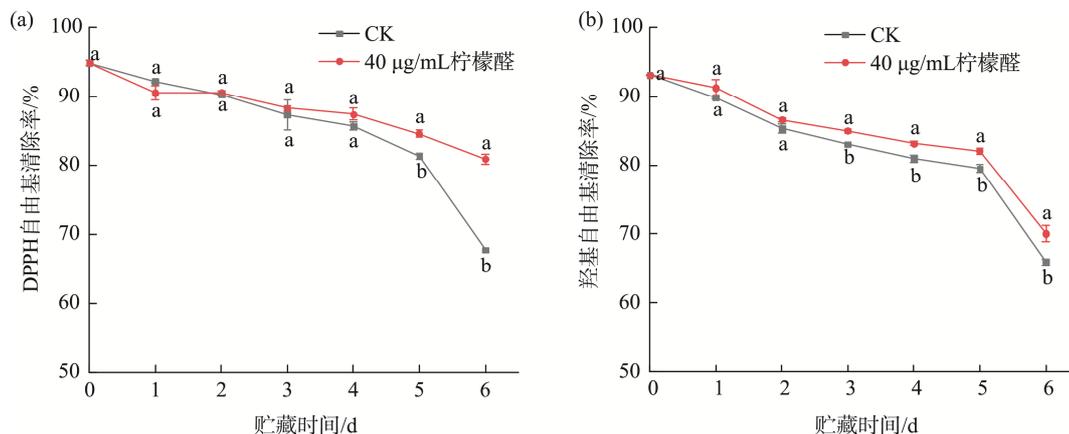


图 4 40 µg/mL 柠檬醛对草莓 DPPH 自由基清除率(a)和羟自由基清除率(b)的影响
Fig.4 Effects of 40 µg/mL citral on DPPH radical scavenging activity (a) and hydroxyl radical scavenging activity (b) of *Fragaria ananassa* Duch. fruit

除了 DPPH 自由基清除活性外, 羟自由基清除活性也是反映果实抗氧化能力的重要指标之一。由图 4(b)可知, 随着贮藏时间的延长, 柠檬醛处理组和 CK 组果实的羟自由基清除率逐渐降低, 且下降趋势及幅度与 DPPH 自由基清除率类似。贮藏至第 3 d, 柠檬醛处理组的果实具有更高的羟自由基清除率($P<0.05$), 表明 40 µg/mL 柠檬醛处理能够有效地保护果实中的抗氧化物质, 抵抗自由基对果实的氧化损伤, 延缓果实的老化过程。综上所述, 柠檬醛处理对草莓果实的抗氧化能力有一定的保护作用, 这可能与柠檬醛的抗菌、抑制酶和捕捉自由基等多重机制有关^[25]。

2.3 40 µg/mL 柠檬醛对草莓果实抗氧化系统相关酶活性和 MDA 含量的影响

2.3.1 对草莓果实 SOD、CAT 和 APX 酶活性的影响

草莓果实在采后会受到氧化应激的影响, 导致品质和营养成分的下降。为了抵抗氧化应激, 草莓果实具有一套复杂的抗氧化系统, 包括 SOD、CAT 和 APX 等酶类, 以及还原型谷胱甘肽、抗坏血酸等非酶类抗氧化物质。这些抗氧化物质可以清除活性氧自由基(reactive oxygen species, ROS), 维持细胞内的氧化还原平衡^[26]。另一方面, MDA 是多不饱和脂肪酸过氧化的终产物, 是反映细胞膜脂质过氧化程度的重要指标。因此, 测定草莓果实中抗氧化系统相关酶活性和 MDA 含量, 可以评估柠檬醛处理对草莓果实抗氧化能力的影响。

SOD 是一种重要的抗氧化酶, 能够将超氧阴离子自由基($O_2^{\cdot-}$)歧化为过氧化氢(H_2O_2), 从而减少自由基对果实的氧化损伤。图 5(a)显示了 SOD 活性在贮藏期间的变化趋势。从图 5(a)中可以看出, 柠檬醛处理组和 CK 组草莓果实的 SOD 活性均在第 3 d 达到最高值, 分别为 470.19

和 432.90 U/g FW, 之后逐渐下降。此外, 图 5(a)还显示, 在整个贮藏期间, 40 µg/mL 柠檬醛处理组的草莓果实的 SOD 活性均显著高于 CK 组($P<0.05$), 说明柠檬醛处理能够有效提高草莓果实的 SOD 活性, 增强其抗氧化能力。

CAT 是一种能够将过氧化氢(H_2O_2)分解为水(H_2O)和氧气(O_2)的酶, 其催化效率高, 能有效降低果实中 H_2O_2 的含量, 保护细胞免受氧化损伤, 维持其生理功能。从图 5(b)可以看出, 随着贮藏时间的延长, 柠檬醛处理组和 CK 组的草莓果实 CAT 活性都呈现出先升高后降低的趋势, 在第 3 d 达到最高值, 之后逐渐下降。柠檬醛处理组草莓果实的 CAT 活性在整个贮藏过程中均显著高于 CK 组($P<0.05$), 且在第 3 d 时比 CK 组提高了 35.79%。这表明柠檬醛处理能够有效地激活草莓果实中的 CAT 酶, 增强其清除 H_2O_2 的能力, 减轻氧化应激对草莓果实的影响。此外, 新近研究发现, 肉桂醛^[27]、牛至精油保鲜纸^[28]等天然物质也能有效提升草莓果实中的 SOD 和 CAT 的活性, 从而增强其除去活性氧和自由基的能力。

APX 是植物体内清除 H_2O_2 的关键酶, 其作用是催化抗坏血酸和 H_2O_2 之间的氧化还原反应, 有效降低膜脂过氧化物的含量, 从而保持细胞膜的完整性。图 5(c)显示了两个处理组的草莓果实贮藏期间的 APX 活性变化。可以看出, 两个处理组的 APX 活性均呈现出先升高后降低的趋势, 并在第 4 d 时达到峰值。在贮藏后期(4~6 d), 40 µg/mL 柠檬醛处理组的 APX 活性显著高于 CK 组($P<0.05$), 表明柠檬醛处理能够诱导草莓果实中 APX 的表达, 增强其抗氧化能力, 有利于保持草莓的品质, 延缓其衰老过程。这与魏玲^[29]的研究结果一致, 该研究发现柠檬醛处理能够提高猕猴桃中 APX 的活性, 增加其对软腐病的抗性, 延长其贮藏期。

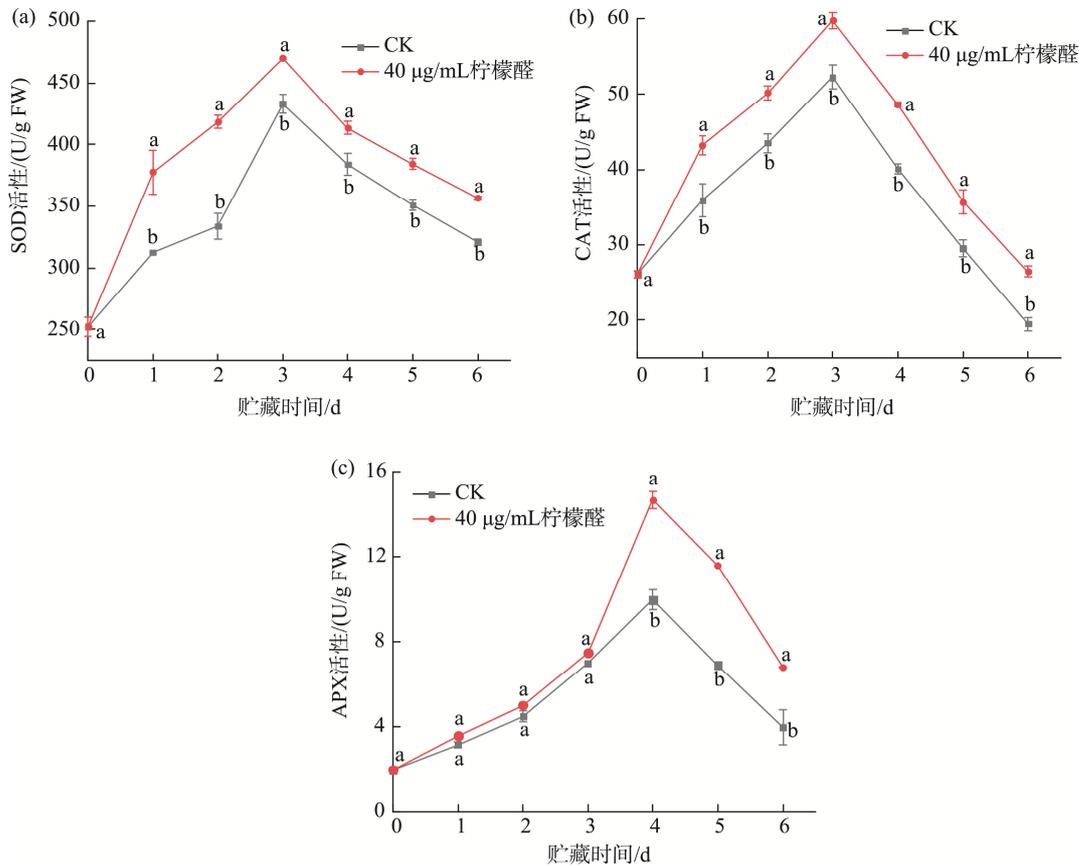


图 5 40 µg/mL 柠檬醛对草莓果实 SOD (a)、CAT (b)和 APX (c)活性的影响

Fig.5 Effects of 40 µg/mL citral on SOD (a), CAT (b) and APX (c) activities of *Fragaria ananassa* Duch. fruit

2.3.2 对草莓果实 MDA 含量的影响

从图 6 可以看出,随着贮藏时间的延长,处理组和 CK 组的草莓 MDA 含量都呈上升趋势,但从第 3 d 开始两个处理组之间存在显著差异($P < 0.05$)。CK 组的草莓 MDA 含量最高,从初始的 0.59 nmol/g 升至第 6 d 的 1.44 nmol/g;而 40 µg/mL 柠檬醛组的草莓 MDA 含量最低,从初始的 0.59 nmol/g 升至第 6 d 的 1.29 nmol/g。这表明 40 µg/mL 柠檬醛处理能够抑制草莓 MDA 含量的升高,维持较低的果实脂质过氧化水平。草莓在采后会发生氧化应激和代谢变化,导致自由基和过氧化物对细胞膜上的不饱和脂肪酸进行过氧化反应,产生 MDA 等有害物质,从而破坏细胞结构和功能。柠檬醛可以通过提高果实抗氧化能力和抑制果实代谢活性,减少自由基和过氧化物对细胞膜的伤害,从而降低 MDA 含量。KHALIFA 等^[30]也发现橄榄叶提取物与壳聚糖复合液涂层能有效抑制草莓 MDA 含量上升,维持果实品质。

综上所述,40 µg/mL 柠檬醛处理对采后草莓具有显著的保鲜和抗氧化效果。柠檬醛处理不仅能够维持草莓的品质和营养成分,还能够增强草莓的抗氧化能力,表现为提高抗氧化酶活性和降低膜脂过氧化产物 MDA 含量。柠檬

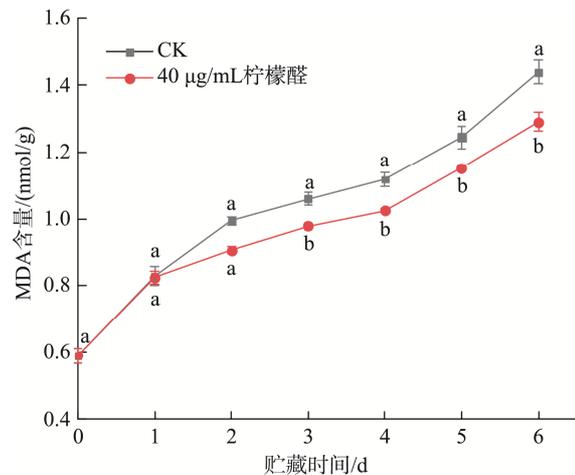


图 6 40 µg/mL 柠檬醛对草莓果实 MDA 含量的影响

Fig.6 Effect of 40 µg/mL citral on MDA content of *Fragaria ananassa* Duch. Fruit

醛是一种主要存在于柑橘类植物中的挥发性有机化合物,具有清香的柠檬味和多种生物活性,如抗菌、抗炎、抗癌等。本研究结果为柠檬醛在草莓贮藏中的应用提供了理论依据和技术支持。

3 结 论

本研究以“红颜”草莓为试材, 研究了 5 种植物精油对其保鲜效果的影响, 并筛选出柠檬醛为最佳保鲜剂。柠檬醛在 40 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 质量浓度时能够有效地降低草莓果实的失重率和腐烂指数, 延缓果实品质和营养成分的下降, 提高果实抗氧化能力和抗氧化系统相关酶活性, 抑制果实脂质过氧化水平。本研究结果表明, 柠檬醛是一种有效的草莓保鲜剂, 可以延长草莓的贮藏期, 保持草莓的新鲜度和营养价值。

参考文献

- [1] 潘少香, 刘雪梅, 郑晓冬, 等. 基于质构分析的鲜食草莓质地感官品质综合评价[J]. 食品科技, 2023, 48(8): 37–43.
PAN SX, LIU XM, ZHENG XD, *et al.* Comprehensive evaluation of texture sensory quality of fresh strawberry based on texture analysis [J]. Food Sci Technol, 2023, 48(8): 37–43.
- [2] SUN Y, HUANG Y, WANG X, *et al.* Kinetic analysis of PGA/PBAT plastic films for strawberry fruit preservation quality and enzyme activity [J]. J Food Compos Anal, 2022, 108: 104439.
- [3] BHAT R, STAMMINGER R. Preserving strawberry quality by employing novel food preservation and processing techniques-recent updates and future scope-An overview [J]. J Food Process Eng, 2015, 38(6): 536–554.
- [4] 李结瑶, 罗文翰, 翟万京, 等. 全降解 PLA/PBAT/ESO 保鲜膜在草莓保鲜中的应用研究[J]. 包装工程, 2023, 44(5): 90–97.
LI JY, LUO WH, ZHAI WJ, *et al.* Application of fully biodegradable PLA/PBAT/ESO films in strawberry preservation [J]. Packag Eng, 2023, 44(5): 90–97.
- [5] LV J, ZHENG T, SONG Z, *et al.* Strawberry proteome responses to controlled hot and cold stress partly mimic post-harvest storage temperature effects on fruit quality [J]. Front Nutr, 2022, 8: 812666.
- [6] DEEWATTHANAWONG R, NOCK JF, WATKINS CB. γ -Aminobutyric acid (GABA) accumulation in four strawberry cultivars in response to elevated CO_2 storage [J]. Postharvest Biol Technol, 2010, 57(2): 92–96.
- [7] 唐甜甜, 解新方, 任雪, 等. 草莓贮藏保鲜技术的研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(5): 332–339.
TANG TT, XIE XF, REN X, *et al.* Research progress on storage and preservation technology of strawberry [J]. Sci Technol Food Ind, 2020, 41(5): 332–339.
- [8] 赵亚珠, 郝晓秀, 孟婕, 等. 百里香精油抗菌包装纸箱对草莓保鲜效果的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(11): 258–263.
ZHAO YZ, HAO XX, MENG J, *et al.* Effect of antimicrobial packaging cartons coated with thyme essential oil on quality and shelf life of strawberries [J]. Food Ferment Ind, 2020, 46(11): 258–263.
- [9] 黎汉清, 罗文翰, 肖更生, 等. 丁香精油微胶囊的制备及其对草莓保鲜效果的研究[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(21): 191–196.
LI HQ, LUO WH, XIAO GS, *et al.* Preparation of microcapsule of clove essential oil and preservation effect on strawberry [J]. Food Ferment Ind, 2021, 47(21): 191–196.
- [10] 王建清, 付振喜, 金政伟, 等. 肉桂壳聚糖涂膜处理对草莓保鲜的研究[J]. 包装工程, 2009, 30(8): 34–37.
WANG JQ, FU ZX, JIN ZW, *et al.* Study of strawberry preservation with cinnamon oil and chitosan coating [J]. Packag Eng, 2009, 30(8): 34–37.
- [11] SHEN D, CHANG X, ZHOU L, *et al.* Ultrasonic preparation of citral/hydroxypropyl- β -cyclodextrin inclusion complex: Application as a potential antifungal preservative in strawberry storage [J]. Food Control, 2024, 155: 110046.
- [12] 刘达照. 枯茗醛抑制指状青霉的作用机制初探[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2020.
LIU DZ. Initial Study on the mechanism of cucuminaldehyde inhibiting *Penicillium digitatum* [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2020.
- [13] 杨涛, 郜海燕, 张润光, 等. 加压氮气对草莓采后生理及贮藏品质的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 282–290.
YANG T, GAO HY, ZHANG RG, *et al.* Effects of pressurized nitrogen on strawberry postharvest physiology and storage quality [J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2020, 36(15): 282–290.
- [14] YANG N, ZHANG X, LU Y, *et al.* Use of DENBA⁺ to assist refrigeration and extend the shelf-life of strawberry fruit [J]. Postharvest Biol Technol, 2023, 195: 112152.
- [15] WANG H, ZHANG Z, DONG Y, *et al.* Effect of chitosan coating incorporated with *Torreya grandis* essential oil on the quality and physiological attributes of loquat fruit [J]. J Food Meas Charact, 2022, 16(4): 2820–2830.
- [16] ZHANG Y, LI S, DENG M, *et al.* Blue light combined with salicylic acid treatment maintained the postharvest quality of strawberry fruit during refrigerated storage [J]. Food Chem X, 2022, 15: 100384.
- [17] 张金磊, 陈兴煌. 柑橘精油熏蒸对草莓贮藏品质的影响[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(2): 37–44.
ZHANG JL, CHEN XH. Effect of citrus essential oil fumigation on strawberry storage quality [J]. China Food Addit, 2022, 33(02): 37–44.
- [18] 程旺开, 周炜, 肖子龙. 羧甲基壳聚糖-柠檬醛保鲜纸对李子的抗菌保鲜效果研究[J]. 绵阳师范学院学报, 2020, 39(5): 64–67.
CHENG KW, ZHOU W, XIAO ZL. Study on antibacterial effect of carboxymethyl chitosan-citral preservation paper on plum [J]. J Mianyang Teachers' Coll, 2020, 39(5): 64–67.
- [19] MOHAMED A, SAID Z, AMIN L, *et al.* Gelatin-based edible coating combined with mentha pulegium essential oil as bioactive packaging for strawberries [J]. J Food Qual, 2018, (2018): 1–7.
- [20] ELHAM A, FARID M. Preservation of strawberry fruit quality via the use of active packaging with encapsulated thyme essential oil in zein

- nanofiber film [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2021, 56(9): 4239–4247.
- [21] AFFAN M, LESTARI RDN, MANGUNWIKARTO J. Application of chitosan edible coating on fresh strawberry fruit (*Fragaria* sp. 'Holibert') during storage in a tropical environment [J]. *Acta Hort*, 2018, (1210): 95–102.
- [22] 罗海澜, 马翠云, 罗海淑, 等. 可可毛色二孢菌 F6 胞外多糖在草莓保鲜中的应用[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(2): 91–98.
LUO HL, MA CY, LUO HS, *et al.* Application of exopolysaccharides from *Lasiodiplodia theobromae* F6 in strawberry preservation [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, 14(2): 91–98.
- [23] LEILA M, FUMINA T, FUMIHIKO T. Preservation of strawberry fruit with an Aloe vera gel and basil (*Ocimum basilicum*) essential oil coating at ambient temperature [J]. *J Food Process Pres*, 2021, 45(10): 115–120.
- [24] DU S, ZHANG J, CHEN S, *et al.* The combined effect of 1-methylcyclopropene and citral suppressed postharvest grey mould of tomato fruit by inhibiting the growth of *Botrytis cinerea* [J]. *J Phytopathol*, 2019, 167(2): 123–134.
- [25] WANG Y, SHAN T, YUAN Y, *et al.* Overall quality properties of kiwifruit treated by cinnamaldehyde and citral: microbial, antioxidant capacity during cold storage [J]. *J Food Sci*, 2016, 81(12): H3043–H3051.
- [26] PIECHOWIAK T, SKÓRA B. Edible coating enriched with cinnamon oil reduces the oxidative stress and improves the quality of strawberry fruit stored at room temperature [J]. *J Sci Food Agric*, 2023, 103(5): 2389–2400.
- [27] LI S, CHEN J, LIU Y, *et al.* Application of cinnamaldehyde solid lipid nanoparticles in strawberry preservation [J]. *Horticulturae*, 2023, 9(5): 607.
- [28] CHEN X, LI T, ZHU C, *et al.* Improving fresh strawberry shelf life and quality by using the fresh-keeping paper embedded with oregano essential oil and tea polyphenols [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2023, DOI: 10.1111/ijfs.16720
- [29] 魏玲. 柠檬醛对猕猴桃采后软腐病的防治机理及保鲜效果研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2021.
WEI L. Studies on mechanism of citral in preventing and controlling soft rot of kiwifruit and its effect on kiwifruit postharvest preservation [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2021.
- [30] KHALIFA I, BARAKAT H, EL-MANSY AH, *et al.* Enhancing the keeping quality of fresh strawberry using chitosan-incorporated olive processing wastes [J]. *Food Biosci*, 2016, 13: 69–75.

(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)

作者简介



唐歆玥, 主要研究方向为植物精油保鲜剂的开发与应用。

E-mail: 280670231@qq.com



王贺, 博士, 副教授, 主要研究方向为粮油食品储藏与品质控制。

E-mail: wh2989@just.edu.cn