

不同 CO₂ 比例的鲜切马铃薯气调保鲜效果

韦雪^{1,2}, 赵晓燕¹, 王丹¹, 王宇滨¹, 赵文婷¹, 张辉², 郑鄢燕^{1*}

(1. 北京市农林科学院农产品加工与食品营养研究所, 北京市蔬菜农产品保鲜与加工重点实验室, 北京 100097)

(2. 新疆农业大学食品科学与药学院, 新疆乌鲁木齐 830000)

摘要: 为探究 CO₂ 气调包装对鲜切马铃薯褐变的抑制及贮藏品质的影响, 以“荷兰 15 号”马铃薯为试材, 采用体积分数 10%、20% 和 30% 的 CO₂ 气调包装, 4 °C 贮藏, 测定相关理化指标。结果表明: CO₂ 气调包装有效抑制鲜切马铃薯褐变和品质劣变, 其中 30% CO₂ 效果最佳。CO₂ 气调包装抑制了多酚氧化酶 (Polyphenol Oxidase, PPO)、过氧化物酶 (Peroxidase, POD) 和苯丙氨酸解氨酶 (Phenylalanine ammonia lyase, PAL) 活性的上升和总酚含量的增加, 保持了鲜切马铃薯的硬度、脆性、可溶性固形物 (Total Soluble Solids Content, TSS)、抗坏血酸和挥发性风味物质和滋味。贮藏第 8 天时, PPO、POD 和 PAL 活性比对照分别降低 53.02%、39.60%、28.21% 和 73.97%, 硬度、脆性、TSS 含量和抗坏血酸含量为初始值的 97.49%、95.00%、73.10% 和 88.73%, 8 d 电子鼻测定的挥发性风味物质和电子舌测定的滋味接近于 0 d 初始值。因此, CO₂ 气调包装有效抑制鲜切马铃薯褐变, 保持其贮藏品质。

关键词: 鲜切马铃薯; CO₂ 气调包装; 褐变; 品质

文章编号: 1673-9078(2023)05-148-156

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.5.0534

Effects of Different CO₂ Concentrations in Modified Atmosphere Packaging on Fresh-cut Potatoes

WEI Xue^{1,2}, ZHAO Xiaoyan¹, WANG Dan¹, WANG Yubin¹, ZHAO Wenting¹, ZHANG Hui², ZHENG Yanyan^{1*}

(1. Institute of Agri-food Processing and Nutrition (IAPN), Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing Key Laboratory of Agricultural Products of Fruits and Vegetables Preservation and Processing, Beijing 100097, China)

(2. College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830000, China)

Abstract: To explore the effects of CO₂ in modified atmosphere packaging on the browning and storage quality of fresh-cut potatoes, ‘Holland No. 15’ potatoes were used as the test material stored with 10%, 20%, and 30% CO₂ in modified atmosphere packaging at 4 °C and their physical and chemical attributes were determined. CO₂ in modified atmosphere packaging could effectively inhibit the browning and quality deterioration of fresh-cut potatoes, with 30% CO₂ producing the best effect. In particular, CO₂ in modified atmosphere packaging inhibited the augmentation of polyphenol oxidase (PPO), peroxidase (POD), and phenylalanine ammonia lyase (PAL) activity and elevation of total phenolic content. The firmness, brittleness, total soluble solid (TSS) content, ascorbic acid content, and volatile flavor substances, and taste of fresh-cut potatoes were maintained. On day 8 of storage, PPO, POD, and PAL activity was decreased by respectively 53.02%, 39.60%, and 28.21% and total phenolic content was decreased by 73.97% of the control values. Meanwhile, the firmness, brittleness, TSS content, and ascorbic acid content were 97.49%, 95.00%, 73.10%, and 88.73% of the initial values. Volatile flavor compounds measured using an electronic nose and taste measured using an electronic tongue on day 8 of storage were close to the initial values (day 0). Therefore, CO₂ in modified atmosphere packaging can effectively inhibit the browning of fresh-cut potatoes and maintain their storage quality.

Key words: fresh-cut potatoes; CO₂ in modified atmosphere packaging; browning; quality

引文格式:

韦雪, 赵晓燕, 王丹, 等. 不同 CO₂ 比例的鲜切马铃薯气调保鲜效果[J]. 现代食品科技, 2023, 39(5): 148-156.

WEI Xue, ZHAO Xiaoyan, WANG Dan, et al. Effects of different CO₂ concentrations in modified atmosphere packaging on fresh-cut potatoes [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(5): 148-156.

收稿日期: 2022-04-28

基金项目: 北京市农林科学院协同创新中心 (KJCX201915); 北京市重点实验室资助项目 (Z141105004414037); 北京市农林科学院青年基金 (QNJJ202122)

作者简介: 韦雪 (1995-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品贮藏与加工, E-mail: 1044700783@qq.com

通讯作者: 郑鄢燕 (1987-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向: 农产品采后生理及贮运保鲜, E-mail: zhengyanyan@iapn.org.cn

马铃薯 (*Solanum tuberosum* L) 属茄科植物, 既是蔬菜作物, 又是仅次于玉米、水稻和小麦的第四大粮食作物。鲜切马铃薯是马铃薯加工的重要产品之一, 其新鲜、方便、卫生, 满足消费者快节奏生活需求^[1]。然而, 马铃薯鲜切后在贮藏过程中易发生褐变, 这是由于切割导致马铃薯组织结构受到机械损伤, 汁液外溢, 使得酶和底物暴露于空气之中, 诱发马铃薯组织表面发生酶促褐变, 褐变会降低食用价值和消费者接受度, 甚至破坏营养成分, 导致产品安全性和质量出现问题^[2]。因此, 开发一种安全、健康、环保的技术来控制鲜切马铃薯的褐变已迫在眉睫^[3-6]。

目前, 抑制鲜切马铃薯褐变的方法包括使用化学抗褐变抑制剂、超声波、真空处理等^[7-11]。然而, 这些方法处理通常受限于其高成本、低效率或可能导致质量下降和一些严重的健康安全问题。其中, 气调包装操作简单、效果好和无残留等特点而被广泛应用。气调包装 (Modified Atmosphere Packaging, MAP) 是通过调节空气中或包装环境内的气体成分比例, 抑制呼吸作用, 延缓果蔬产品营养物质损失, 从而延长产品保鲜期的保鲜技术^[12]。梁惜雯等^[13]在鲜切苹果中研究发现, CO₂ 气调包装显著抑制了鲜切苹果中一些致腐菌的生长, 减缓了鲜切苹果的腐败变质。Sun 等^[14]在鲜切黄瓜中研究发现, 气调包装可减少鲜切黄瓜中微生物侵染, 提升保鲜品质。Shen 等^[15]在鲜切马铃薯中研究发现, 将其用氩气、氮气或其混合物 (浓度比为 1:1) 在 4 MPa 下加压 60 min, 然后将处理过的马铃薯密封在装有 4% O₂、2% CO₂、94% N₂ 的袋子中, 并在 4℃ 下贮藏, 可有效减少鲜切马铃薯中微生物数量, 并且有利于维持鲜切马铃薯的新鲜度。赵欣等^[16]在鲜切马铃薯中研究发现, 在 4℃ 条件下, 采用 40% CO₂+50% O₂+10% N₂ 的混合气对鲜切马铃薯片气调包装, 可以显著地抑制鲜切马铃薯片中多酚氧化酶 (Polyphenol Oxidase, PPO) 和过氧化物酶 (Peroxidase, POD) 活性, 维持较好的品质。

但关于不同 CO₂ 气调处理针对鲜切马铃薯褐变及其贮藏品质的影响鲜有报道, 鉴于此, 本试验以“荷兰 15 号”品种马铃薯为试材, 采用 10% CO₂、20% CO₂、30% CO₂ 的气调包装鲜切马铃薯, 于 4℃ 下贮藏, 旨在探讨不同 CO₂ 气调包装对鲜切产品褐变及贮藏品质的影响, 为生产加工中确定适宜的气调包装鲜切马铃薯产品提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 原料

“荷兰 15 号”马铃薯采购于山东滕州农场, 挑选大小一致、无机械损伤的马铃薯于 4℃ 预冷 48 h。

包装材料: PE/PA 共挤膜: (长×宽×厚: 21 cm×15 cm×160 μm), O₂ 透过率为 194.820±0.01 cm³/(m² d 0.1 MPa), CO₂ 透过率为 262.000±51.68 cm³/(m² d 0.1 MPa), 水蒸气透过率为 (1.619±0.00) g/(m² d), 河北省雄县旭日纸塑包装有限公司; PET 气调包装盒: (长×宽×高: 40 mm×140 mm×50 mm), 上海集信包装机械有限公司。

甲醇、三氯乙酸、硫代巴比妥酸、红菲罗啉等, 上述试剂均为分析纯; 多酚氧化酶、过氧化物酶和苯丙氨酸解氨酶活性检测试剂盒购于北京索莱宝生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

DZM450 型气调保鲜包装机, 上海集信包装机械有限公司; A11 型号 IKA 研磨仪, 德国 IKA 公司; Spectra Max i3 酶标仪, 美谷分子仪器 (上海) 有限公司; TD65 型数显糖度计, 日本 ATAGO 有限公司; CM700D 型手持色差仪, 青岛科睿德仪器有限公司; TA-XT plus 型质构仪, 天津创兴电子设备制造股份有限公司; EOS450D 型数码相机, 日本佳能有限公司; EL303 型分析天平, 梅特勒-托利多仪器有限公司; PEN3 型电子鼻, 德国 AIRSENSE 公司; SA402B 型电子舌, 日本 INSENT 公司。

1.3 处理方法

将马铃薯清洗、去皮、切片 (厚度约为 5 mm) 后, 清洗 3 次, 以去除表面淀粉。采用离心脱水机去除鲜切马铃薯片表面水分, 称重待用。将鲜切马铃薯片进行以下 4 种处理: ①CK 组: 对照组, 无充气处理, 直接封口包装; ②10% CO₂ 处理组: 包装内充入 10% CO₂+90% N₂ 气体; ③20% CO₂ 处理组: 包装内充入 20% CO₂+80% N₂ 气体; ④30% CO₂ 处理组: 包装内充入 30% CO₂+70% N₂ 气体。每个处理组重复 3 盒, 每盒约 250 g。包装好的鲜切马铃薯于 4℃ 贮藏 8 d。每隔 2 d 定时取样, 测定鲜样的理化指标。剩余样品迅速用液氮冷冻并于 -80℃ 保存。

1.4 指标测定

1.4.1 包装内气体组分 (O₂ 和 CO₂ 含量) 的测定

随机每组取 3 盒气调包装的马铃薯样品, 采用顶空气体分析仪测定包装盒内 O₂ 和 CO₂ 的体积分数, 每盒取 4 个点测定, 每 2 d 测一次, 读取并记录数据。

1.4.2 色泽的测定

色差采用便携式手持色差仪测量, 测定距鲜切马

铃薯中心 1 cm 处的色泽。为了评估样品的颜色变化，通过与原始样品的值进行比较来评估 ΔE 作为总颜色变化的指数。通过下列公式 (1) 计算总色差 ΔE ：

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (1)$$

式中：

L_0^* 值、 a_0^* 值、 b_0^* 值——0 d CK 组鲜切马铃薯的测定值；

L^* 值、 a^* 值、 b^* 值——放置 2、4、6 和 8 d 鲜切马铃薯的测定值。

1.4.3 褐变相关酶的测定

参照徐冬颖等^[17]的方法，使用 PPO、POD 和 PAL 活性检测试剂盒测定，单位为：U/g。

1.4.4 总酚的测定

参照徐冬颖等^[17]的方法，单位为：mg/g。

1.4.5 硬度、脆性的测定

参照 Xu 等^[6]方法，用质构仪测定，单位为：N。

1.4.6 抗坏血酸的测定

参照徐冬颖等^[17]的方法，单位为：mg/100 g。

1.4.7 可溶性固形物含量 (TSS) 的测定

取 10 g 鲜切马铃薯样品，打浆机打浆后，过滤，取上滤液，滴入手持式糖度计上面，读数记录。

1.4.8 电子鼻风味物质的测定

使用电子鼻测定鲜切马铃薯的挥发性风味物质，把鲜切马铃薯切成小块装入 30 mL 的富集瓶中，拧紧密封。顶空提取时，电子鼻的进样速度为 400 mL/min，

测样时间为 180 s。每次顶空提取前，用过滤空气净化传感器，使每个传感器的响应值恢复到初始位置 ($G/G_0=1$)，选择了检测过程中最后 5 s 稳定的传感器响应值。电子鼻传感器相关描述见表 1。

表 1 PEN3 型电子鼻传感器性能描述

Table 1 Performance descriptions of PEN3 electronic nose sensors

sensors		
序号	传感器名称	性能描述
1	W1C	对芳香性化合物灵敏
2	W5S	对氮氧化物较为灵敏
3	W3C	主要对氨水灵敏
4	W6S	对氢气的选择性
5	W5C	检测烷烃、芳香型化合物
6	W1S	对甲烷灵敏
7	W1W	对硫化物、萜烯类化合物灵敏
8	W2S	对乙醇和部分芳香型化合物灵敏
9	W2W	对芳香成分灵敏
10	W3S	检测烷烃型化合物

1.4.9 电子舌滋味的测定

使用前先把电子舌的传感器活化，然后称取鲜切马铃薯 100 g，打浆、离心、过滤，取 30 mL 滤液检测，把室内温度控制在 25 °C 左右。每个样品测量 120 s，每次测量前用蒸馏水清洗传感器，以确保获得稳定的电位后进行测定。电子舌传感器的相关介绍见表 2 所示。

表 2 电子舌传感器性能描述

Table 2 Performance description of electronic tongue sensor

传感器名称	可以评价的味道	
	基本味 (相对值)	回味 (CPA 值)
(AAE) 鲜味传感器	鲜味 (氨基酸、核酸引起的鲜味)	鲜味丰富度
(CTO) 咸味传感器	咸味 (食盐等无机盐引起的咸味)	无
(CAO) 酸味传感器	酸味 (醋酸、柠檬酸、酒石酸等引起的酸味)	无
(COO) 苦味传感器	苦味 (苦味物质引起的味道)	苦味回味
(AEI) 涩味传感器	涩味 (涩味物质引起的味道)	涩味回味
(GLI) 甜味传感器	甜味 (糖或糖醇引起的甜味)	无

1.5 数据分析

数据采用 Microsoft Excel 2019 进行处理，Origin 2021 作图，SMICA 14.1 进行主成分分析图形绘制，SPSS 21 软件进行邓肯极差法 (Duncan's) 和单因素方差分析 (ANOVA) 数据， $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 鲜切马铃薯包装盒内 CO₂ 和 O₂ 气体体积

分数变化

由图 1 可知，CK 组包装内 CO₂ 体积分数由初始的 0.03% (充入空气中所含) 逐渐升高，贮藏 2 d 时，CO₂ 含量上升至 11.32%。所有处理组 CO₂ 体积分数较初始值有所下降，可能是由于鲜切马铃薯的呼吸作用和包装材料的透气性有关^[18,19]。CK 组 O₂ 含量由初始空气中的 21% 逐渐下降，贮藏 2 d 时，O₂ 含量下降至 0.73%，鲜切马铃薯呼吸消耗了包装袋的 O₂。马铃薯的呼吸作用消耗 O₂ 的同时产生 CO₂，利用气调包装的

方式,适当提高保藏环境中的 CO₂ 浓度并降低 O₂ 浓度可以有效抑制果蔬的呼吸作用^[20]和微生物增长,延长马铃薯的休眠期,有利于贮藏^[21]。

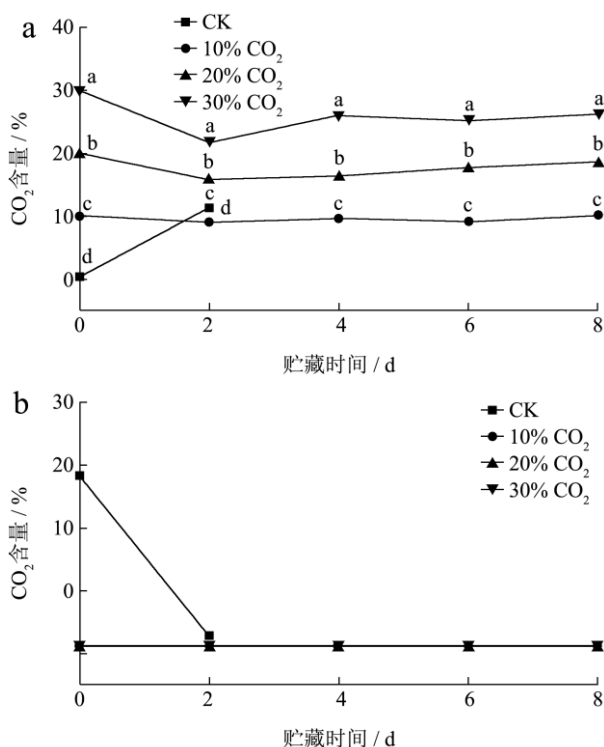


图1 鲜切马铃薯包装盒内 CO₂ (a) 和 O₂ (b) 气体体积分数变化

Fig.1 Changes in CO₂ (a) and O₂ (b) gas volume fractions in fresh-cut potato packaging

注:同一时间点不同处理间显著性差异,相同字母表示无显著性差异,不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$);下同。

2.2 不同浓度 CO₂ 气调对鲜切马铃薯色泽的影响

鲜切马铃薯的颜色是评价鲜切果蔬新鲜度的指标。如图2所示,贮藏8 d内,所有 CO₂ 气调处理组鲜切马铃薯未褐变,而 CK 组在贮藏第2 d时严重褐变,失去了商品价值和食用价值。

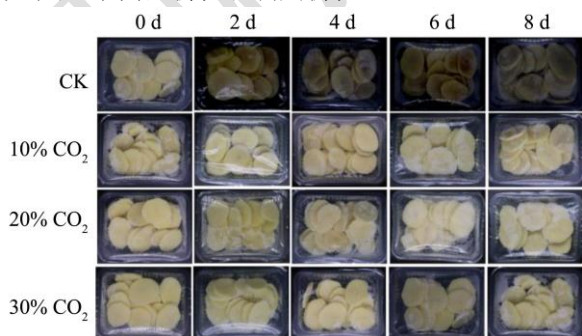


图2 不同浓度 CO₂ 气调对鲜切马铃薯色泽的影响

Fig.2 Effects of different concentrations of CO₂ on the color of fresh-cut potatoes

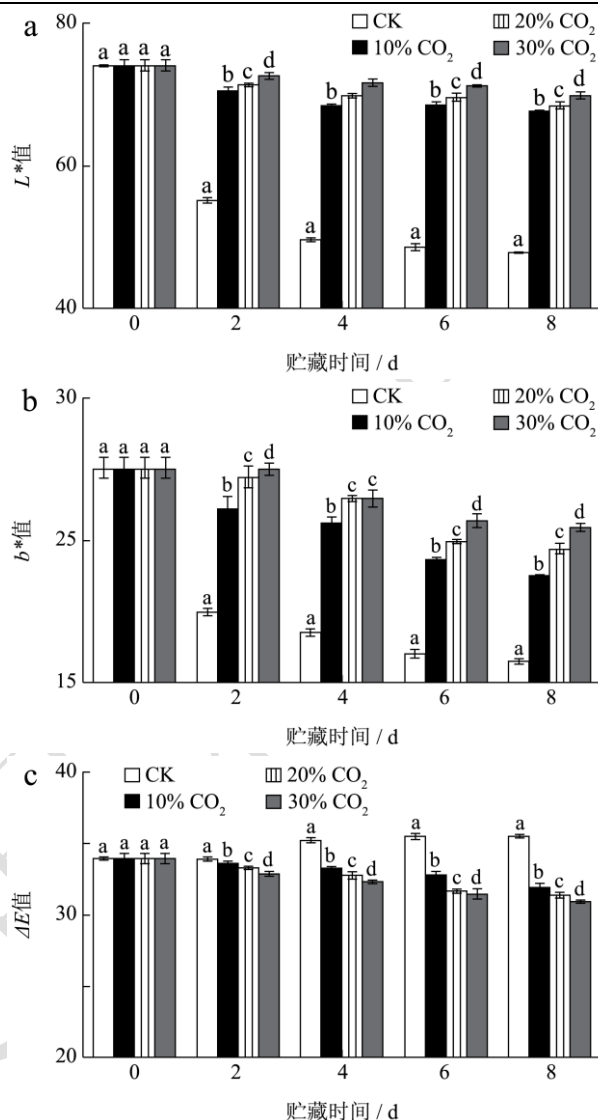


图3 不同浓度 CO₂ 气调对鲜切马铃薯 L* (a)、b* (b) 和 ΔE (c) 的影响

Fig.3 Effects of different concentrations of CO₂ on L* (a), b* (b) and ΔE (c) values of fresh-cut potatoes

如图3a所示,在整个贮藏期间, L*值呈现下降趋势,这表明鲜切马铃薯的表面亮度变暗,感官质量下降,与 CK 组相比,其它处理组的 L*值下降速率缓慢 ($P<0.05$)。贮藏2 d时, CK 组鲜切马铃薯的 L*值急剧下降,这与表观观察结果鲜切马铃薯已经发生褐变一致(图2)。贮藏8 d时,气调包装处理组均仍保持较高的 L*值水平,与0 d CK 组相比,对照组和处理组的 L*值分别下降了 35.34%、8.67%、7.49%和 5.67%,因此,30% CO₂ 处理组 L*值下降最为缓慢,结果表明,CO₂ 气调包装有效抑制鲜切马铃薯褐变,30% CO₂ 处理组维持鲜切马铃薯亮度效果最佳。如图3b所示,鲜切马铃薯贮藏8 d时, b*值分别比初始值下降了 38.21%、21.30%、15.88%和 11.53%,30% CO₂ 处理组中 b*值变化较缓慢,保持了鲜切马铃薯的色泽。如

图 3c 所示, 随着鲜切马铃薯贮藏时间延长, ΔE 值逐渐增加, 与初始相比, 贮藏 2 d 时, CK 组发生严重褐变, 而处理组仍然保持较好的色泽。贮藏 8 d 时, 与 10% CO₂ 和 20% CO₂ 处理组相比, 30% CO₂ 处理组的鲜切马铃薯色泽保持良好, 这一结果与前人报道相一致^[22-24]。

2.3 不同浓度 CO₂ 气调对鲜切马铃薯 PPO、POD、PAL 活性和总酚含量的影响

如图 4a 所示, 在贮藏期内, CO₂ 气调处理组 PPO 的活性均呈现出逐渐升高的趋势, 贮藏 8 d 时, 对照组与处理组的酶活分别为 16.97、14.41、13.61 和 11.09 U/g, 即处理组的 PPO 活性显著低于 CK 组 ($P < 0.05$), 且处理组比对照组的 PPO 活性显著降低 15.09%、19.79% 和 34.62%。结果表明, 30% CO₂ 处理组的 PPO 活性显著低于其它两个 CO₂ 气调处理组, 30% CO₂ 处理组显著抑制 PPO 活性效果最佳。

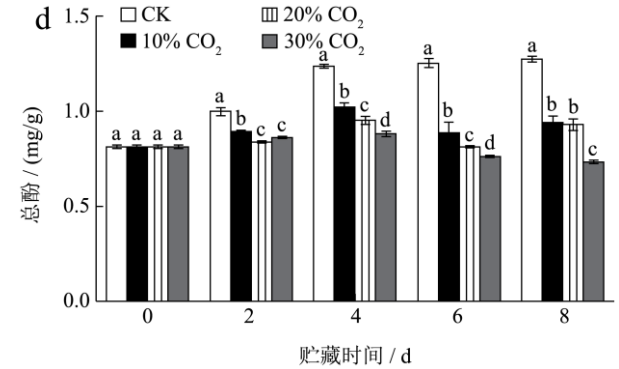
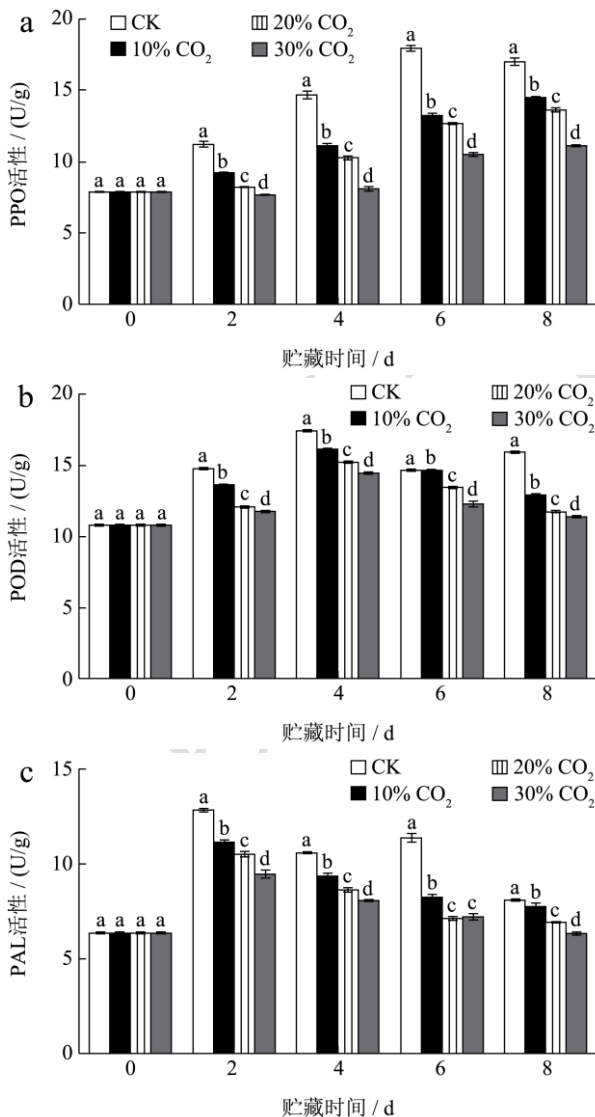


图 4 不同浓度 CO₂ 气调对鲜切马铃薯 PPO、POD、PAL 活性和总酚含量的影响

Fig.4 Effects of different concentrations of CO₂ on the activities of PPO, POD, PAL and total phenolic content in fresh-cut potatoes

如图 4b 所示, 贮藏 2 d 时, 与 CK 组相比, 10% CO₂ 处理组、20% CO₂ 处理组和 30% CO₂ 处理组的 POD 活性分别下降了 8.53%、22.24% 和 25.41%; 贮藏 8 d 时, 处理组的 POD 活性分别为 12.90、11.77 和 11.39 U/g, 其中 30% CO₂ 处理组中鲜切马铃薯的 POD 活性显著低于其它两个处理组 ($P < 0.05$)。这表明 CO₂ 气调包装通过有抑制缓鲜切马铃薯中 POD 活性的增加, 抑制鲜切马铃薯褐变, 其中 30% CO₂ 处理组效果最好。

由图 4c 可知, 在贮藏的第 2 天时, CK 组鲜切马铃薯 PAL 的活性上升达到峰值, 但处理组显著要低于 CK 组 ($P < 0.05$)。其中 10% CO₂ 处理组、20% CO₂ 处理组和 30% CO₂ 处理组的 PAL 活性较 CK 组分别降低了 14.87%、22.24% 和 35.42%。贮藏 8 d 时, 与其它处理组相比, 30% CO₂ 处理组抑制 PAL 活性的效果最佳, 有效抑制 POD 活性, 从而抑制鲜切马铃薯褐变。

如图 4d 所示, 在贮藏过程中, 鲜切马铃薯总酚的含量呈不断上升趋势, 但是处理组总酚的含量都显著低于 CK 组 ($P < 0.5$)。贮藏 8 d 时, 对照组和处理组总酚含量分别为 1.27、0.94、0.93 和 0.73 mg/g, 即处理组的总酚含量分别低于对照组 26.29%、26.97% 和 42.34%, 结果表明, CO₂ 气调处理可以有效抑制鲜切马铃薯中总酚含量的积累, 其中 30% CO₂ 处理组效果最好。

PPO 通过催化鲜切马铃薯中酚类物质氧化形成褐变^[25]。POD 也可以通过将酚类和类黄酮类物质氧化参与酶促褐变^[26]。苯丙烷类物质代谢中与酚类物质生物合成直接相关的酶是 PAL^[27], 它在酶促褐变中起着重要的作用。酚类化合物是酶促褐变的关键底物, 也是鲜切马铃薯中重要的抗氧化物质之一^[28]。结果表明, CO₂ 气调包装后的鲜切马铃薯可以显著降低了 PPO、

POD 和 PAL 活性, 其中 30% CO₂ 处理组效果最佳, 这与前人^[29-32]研究结果一致。此外, CO₂ 气调处理显著抑制鲜切马铃薯总酚物质积累, 保持较高的抗氧化能力, 从而达到抑制褐变的目的^[33,34]。

2.4 不同浓度 CO₂ 气调对鲜切马铃薯硬度、脆性、TSS 含量和抗坏血酸含量的影响

硬度是衡量鲜切马铃薯品质的重要指标。如图 5a 所示, 贮藏 8 d 时, 10% CO₂ 处理组、20% CO₂ 处理组和 30% CO₂ 处理组较初始值分别下降了 9.26%、8.01% 和 2.51%。其中 30% CO₂ 处理组硬度下降最为缓慢, 结果表明, CO₂ 气调包装能有效维持鲜切马铃薯的硬度, 且 30% CO₂ 处理组维持其硬度效果最佳。

如图 5b 所示, CK 组鲜切马铃薯的脆性在贮藏贮藏 4 d 时达到最高值。贮藏 8 d 时, CK 组和 CO₂ 处理组鲜切马铃薯的脆度约下降 2.58%~10.21%, 其中, 30% CO₂ 处理组脆度下降最少, 结果表明, CO₂ 气调处理有效维持鲜切马铃薯脆度, 其中 30% CO₂ 处理组维持脆性效果最好。CO₂ 气调能较好的维持鲜切马铃薯的硬度, 保持其在贮藏期间的营养品质, 这与前人^[35]研究发现高浓度 CO₂ 气调包装处理能够有效维持采后果实硬度, 例如, 高浓度 CO₂ 气调能够提高贮藏期间草莓、果实硬度^[36]的结论一致。这可能是由于高浓度 CO₂ 抑制果胶裂解酶等活性来延缓果胶降解^[37], 或者是高浓度 CO₂ 通过降低质外体 pH 值, 使得可溶性果胶沉淀, 来增强细胞与细胞间的结合强度^[38]。

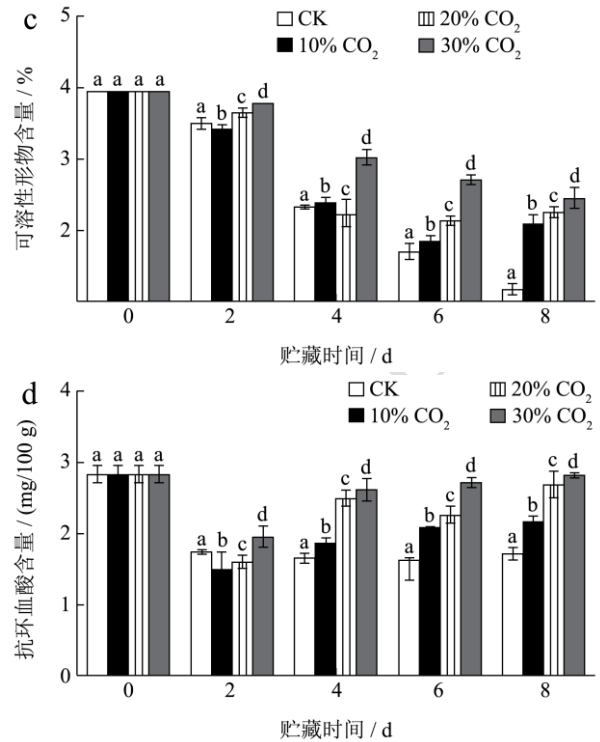
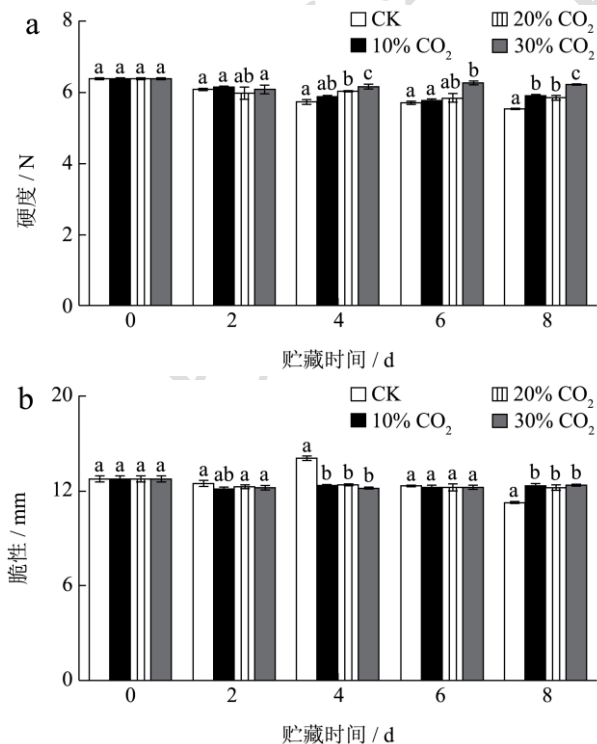


图 5 不同浓度 CO₂ 气调对鲜切马铃薯硬度、脆性、TSS 含量和抗坏血酸含量的影响

Fig.5 Effects of different concentrations of CO₂ on the hardness, brittleness, TSS content and ascorbic acid content of fresh-cut potatoes

如图 5c 所示, 鲜切马铃薯在贮藏期间, TSS 含量在不断下降。而 CO₂ 气调包装有效抑制鲜切马铃薯的生命代谢活动, 延缓 TSS 含量的减少。贮藏 2 d 时, CK 组和 CO₂ 气调处理组的 TSS 含量较初始值分别下降了 8.77%、6.03%、3.36% 和 3.28%。结果表明, CO₂ 气调处理能够有效维持鲜切马铃薯中 TSS 的含量, 其中 30% CO₂ 处理组维持鲜切马铃薯中 TSS 含量效果最好。这与李丽等^[39]在鲜切胡萝卜研究中发现, 低温结合 5% O₂+10% CO₂+85% N₂ 气调包装有效延缓可溶性固形物的下降的结论一致。可能是由于 CO₂ 气调包装有助于促进鲜切果蔬中前期单糖的积累, 从而更好的保持鲜切果蔬的营养品质。

抗坏血酸是果蔬体内重要的非酶抗氧化物质, 其含量可作为其营养品质与贮藏效果的评价指标之一。抗坏血酸是马铃薯中天然存在的抗氧化成分, 可以将褐变中间产物醌类物质还原成酚类化合物, 从而抑制褐变^[40]。抗坏血酸是果蔬中的重要营养成分, 随贮藏时间的延长果蔬中的抗坏血酸会被分解, 合适的保鲜方式能够抑制抗坏血酸的分解维持果蔬的营养成分含量。由图 5d 可知, CO₂ 气调包装的鲜切马铃薯抗坏血酸含量在贮藏期间均始终高于 CK 组。贮藏 2 d 时, CK 组抗坏血酸含量较初始值下降了 49.65%, 而 10%

CO₂处理组、20% CO₂处理组和30% CO₂处理组较初始值分别下降了8.10%、3.52%和0.35%。贮藏8 d时,10% CO₂、20% CO₂和30% CO₂处理组抗坏血酸保留率分别为41.20%、59.86%和88.73%。结果表明,CO₂气调包装处理可有效降低鲜切马铃薯代谢活动,抑制马铃薯切片贮藏期间抗坏血酸降解消耗,保持较高的抗氧化能力。其中30% CO₂处理组抗坏血酸含量保留率最高。

2.5 不同浓度 CO₂ 气调对鲜切马铃薯挥发性风味物质的影响

如图6所示,不同浓度CO₂气调包装的鲜切马铃薯电子鼻数据主成分分析,主成分1的贡献率:79.7%,主成分2的贡献率:17.7%,累计贡献率:97.4%。0 d CK与2 d CK之间的间距比较大,说明0 d CK与2 d CK之间差异较大。同时,2 d CK和所有CO₂气调处理组距离也相对较大,说明3个CO₂气调处理组鲜切马铃薯与2 d CK组的鲜切马铃薯的挥发性风味差异较大。而所有30% CO₂处理组的挥发性风味物质与0 d CK接近,结果表明,CO₂气调包装有利于维持鲜切马铃薯的风味,其中30% CO₂处理组风味保持最好。

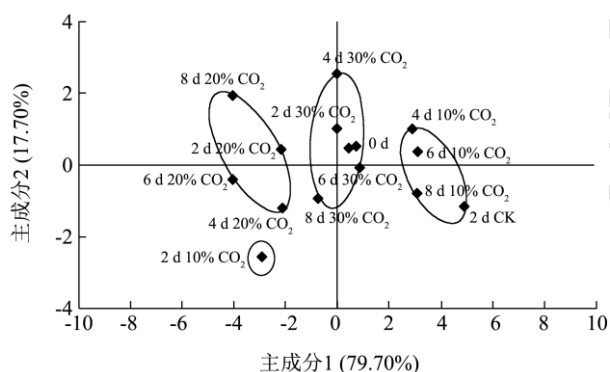


图6 不同浓度CO₂气调对鲜切马铃薯电子鼻主成分的影响
Fig.6 Effects of different concentrations of CO₂ on the main components of the electronic nose of fresh-cut potatoes

2.6 不同浓度 CO₂ 气调对鲜切马铃薯滋味的影响

从图7可知,鲜切马铃薯的主成分1的贡献率:50.6%,主成分2的贡献率:22.6%,累积贡献率:73.2%。

2 d CK和CO₂气调处理组鲜切马铃薯的距离较远,说明2 d CK与处理组鲜切马铃薯的主成分差异性相对较大,然而,30% CO₂处理组所有样品分布在以0 d样品为中心的周围。30% CO₂处理组所有样品和0 d

样品之间差异性较小,即30% CO₂处理组鲜切马铃薯主成分接近于0 d CK。结果表明,CO₂气调包装有助于维持鲜切马铃薯的主成分,其中30% CO₂处理组效果最佳。

风味作为果蔬的重要品质之一,鲜切损伤会导致风味物质的散失,贮藏期微生物的生长会导致风味的改变,因此探讨风味变化对鲜切马铃薯品质评价至关重要。李文欣等^[41]和Zhu等^[42]用电子舌和电子鼻测定的食品风味和滋味利用主成分分析发现,样品数据点的集中性与样品的重复性、稳定性成正相关。本试验结果表明,CO₂气调包装有助于维持鲜切马铃薯的主成分,无论是电子鼻测定鲜切马铃薯风味还是电子舌测定其滋味,都发现所有30% CO₂处理组的样品集中聚集在一起,且距离0 d CK较近,即30% CO₂处理组鲜切马铃薯风味、滋味都和0 d样品初始风味、滋味相近。同时,说明30% CO₂处理组鲜切马铃薯的稳定性好,能够较好的保持马铃薯原有的风味和滋味。

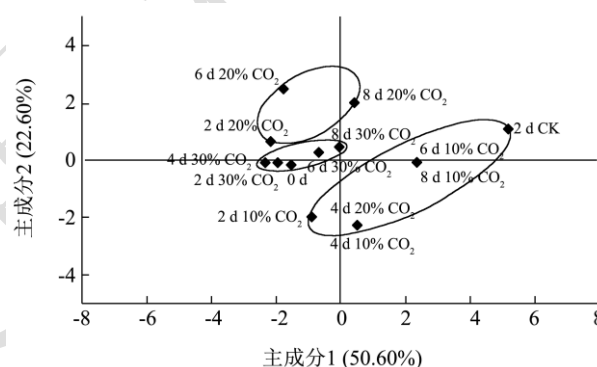


图7 不同浓度CO₂气调对鲜切马铃薯电子舌主成分的影响
Fig.7 Effects of different concentrations of CO₂ on the main components of the electronic tongue of fresh-cut potatoes

3 结论

CO₂气调包装的鲜切马铃薯在4℃下贮藏8 d,CO₂气调包装显著抑制了鲜切马铃薯L*、b*值和ΔE值、PPO、POD、PAL活性和总酚含量增加,有效抑制褐变,同时,保持了鲜切马铃薯硬度、脆性、TSS含量和抗坏血酸含量、风味和滋味,其中30% CO₂处理组效果最佳,为抑制鲜切马铃薯褐变技术和保持贮藏品质提供理论参考。

参考文献

- [1] Yu J, Zhang F. Effects of curcumin-mediated photodynamic technology on bactericidal efficacy of fresh-cut potatoes [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(4): 259-263.
- [2] Ru X, Tao N, Feng Y, et al. A novel anti-browning agent

- 3-mercapto-2-butanol for inhibition of fresh-cut potato browning [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 170: 110-324.
- [3] Shen X, Zhang M, Fan K, et al. Effects of E-polylysine/chitosan composite coating and pressurized argon in combination with map on quality and microorganisms of fresh-cut potatoes [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2019, 13(1): 145-158.
- [4] Rizzo V, Amoroso L, Licciardello F, et al. The effect of sous vide packaging with rosemary essential oil on storage quality of fresh-cut potato [J]. *Lwt - Food Science and Technology*, 2018, 94: 111-118.
- [5] Thivya P, Bhosale Y K, Anandakumar S, et al. Development of active packaging film from sodium alginate/carboxymethyl cellulose containing shallot waste extracts for anti-browning of fresh-cut produce [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 188: 790-799.
- [6] Xu Y, Wang D, Zhao W, et al. Low frequency ultrasound treatment enhances antibrowning effect of ascorbic acid in fresh-cut potato slices [J]. *Food Chemistry*, 2022, 380: 132-190.
- [7] Zhao W, Wang Y, Ma Y, et al. Effect of vacuum impregnation on enzymatic browning of fresh-cut potatoes during refrigerated storage [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2021, 57(2): 983-994.
- [8] Dong T, Cao Y, Jiang C Z, et al. Cysteine protease inhibitors reduce enzymatic browning of potato by lowering the accumulation of free amino acids [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(8): 2467-2476.
- [9] Xie Y, Lin Q, Guan W, et al. Comparison of sodium acid sulfate and UV-C treatment on browning and storage quality of fresh-cut potatoes [J]. *Journal of Food Quality*, 2017, 5: 980-964.
- [10] Liu X, Lu Y, Yang Q, et al. Cod peptides inhibit browning in fresh-cut potato slices: a potential anti-browning agent of random peptides for regulating food properties [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2018, 146: 36-42.
- [11] Moscetti R, Raponi F, Monarca D, et al. Effects of hot-water and steam blanching of sliced potato on polyphenol oxidase activity [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2019, 54(2): 403-411.
- [12] 濮艳清,卢立新,潘嘹,等.预处理结合气调包装对混合鲜切果蔬品质的影响[J].*食品与发酵工业*,2020,46(6):114-120.
- [13] 梁惜雯,顾思彤,姜爱丽,等.自发气调在鲜切果蔬包装中的应用研究进展[J].*包装工程*,2020,41(15):8-13.
- [14] Sun Y, Zhao X, Ma Y, et al. Inhibitory effect of modified atmosphere packaging on *Escherichia coli* O157:H7 in fresh-cut cucumbers (*Cucumis Sativus* L) and effectively maintain quality during storage [J]. *Food Chemistry*, 2022, 369: 130-969.
- [15] Shen X, Zhang M, Devahastin S, et al. Effects of pressurized argon and nitrogen treatments in combination with modified atmosphere on quality characteristics of fresh-cut potatoes [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 149: 159-165.
- [16] 赵欣,周婧,陈湘宁,等.OPP/ CPP 膜中不同气体比例对鲜切马铃薯片保鲜的影响[J].*食品工业科技*,2017,38(17):207-211.
- [17] 徐冬颖,周福慧,蒋海峰,等.真空包装结合避光处理对鲜切马铃薯的品质影响[J].*食品科学*,2020,41(13):184-192.
- [18] 王梅,刘永翔,吕都,等.不同材料包装袋对泡椒鲜切马铃薯片储藏品质的影响[J].*保鲜与加工*,2021,21(11):8.
- [19] 颜敏华,李梅,冯毓琴.马铃薯贮藏保鲜原理与技术[J].*农产品加工*,2007,8:47-50.
- [20] 王佳莉,唐建新,英丽美,等.二氧化碳短期厌氧处理对双孢蘑菇采后生理及品质的影响[J].*食品科学*,2022,43(17):255-262.
- [21] 高红豆,胡文忠,管玉格,等.采后果蔬呼吸代谢途径及其调控研究进展[J].*包装工程*,2021,42(15):30-38.
- [22] 徐燕新,陈湘宁,许丽.鲜切生菜气调包装保鲜条件优化[J].*中国农学通报*,2016,32(7):185-190.
- [23] 王维海,李源钊,吴先辉,等.气调包装微环境对樱桃品质的影响[J].*热带生物学报*,2018,9(1):8.
- [24] Frans M, Aerts R, Ceusters N, et al. Possibilities of modified atmosphere packaging to prevent the occurrence of internal fruit rot in bell pepper fruit (*Capsicum annuum*) caused by *Fusarium* spp [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 178: 111545.
- [25] Yu J, Zhang F, Zhang J, et al. Effect of photodynamic treatments on quality and antioxidant properties of fresh-cut potatoes [J]. *Food Chemistry*, 2021, 362: 130-224.
- [26] 张敏欢,王莉梅,王治洲,等.静电场结合自发气调包装对马铃薯贮藏期间的保鲜效果[J].*食品科学*,2019,40(9):269-275.
- [27] 陈嘉琪.谷氨酸溶液处理抑制鲜切马铃薯褐变的研究[D].泰安:山东农业大学,2021.
- [28] Ma Y, Wang H, Yan H, et al. Pre-cut nacl solution treatment effectively inhibited the browning of fresh-cut potato by influencing polyphenol oxidase activity and several free amino acids contents [J]. *Postharvest Biology and*

- Technology, 2021, 178(1).
- [29] 谢君,代钰,王宏勋,等.高浓度二氧化碳气调包装通过调节酚代谢抑制鲜切莲藕的酶促褐变[J].现代食品科技,2018,34(7):168-174.
- [30] 孔梦洁,张娇,李家兴,等.高压二氧化碳处理对鲜切荸荠褐变的影响[J].食品工业科技,2021,42(15):283-288.
- [31] 王云香,李文生,常虹,等.高浓度 CO₂ 处理对樱桃果实贮藏品质的影响[J].北方园艺,2021,12:101-110.
- [32] 李云云,赵春霞,程曦,等.高氧气调包装对双孢蘑菇微生物及其品质的影响[J].食品科学,2016,37(2):261-265.
- [33] Qiao L, Han X, Wang H, et al. Novel alternative for controlling enzymatic browning: catalase and its application in fresh-cut potatoes [J]. *Journal of Food Science*, 2021, 86: 3529-3539.
- [34] Meng Z, Wang T, Malik A U, et al. Exogenous isoleucine can confer browning resistance on fresh-cut potato by suppressing polyphenol oxidase activity and improving the antioxidant capacity [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2022, 184: 111772.
- [35] 刘慧,张静林,刘杰超,等.抗坏血酸结合自发气调包装对灵武长枣贮藏品质和抗氧化性的影响[J].食品科学,2021,42(1):257-263.
- [36] Matar C, Salou T, Hédias A, et al. Benefit of modified atmosphere packaging on the overall environmental impact of packed strawberries [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 177: 111521.
- [37] 黄欢,王绍帆,韩育梅.超高压处理对鲜切马铃薯质地及细胞壁多糖含量的影响[J].食品工业科技,2020,41(2):258-266.
- [38] Ling Lia H K, Rongfei Zhang, Xiangyou Wang, et al. New insights into the chilling injury of postharvest white mushroom [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 152: 45-53.
- [39] 李丽,易萍,孙健,等.低温结合气调包装处理对鲜切胡萝卜品质的影响[J].食品与发酵工业,2021,47(4):159-165.
- [40] Ali H M, El-Gizawy A M, El-Bassiouny R E, et al. Browning inhibition mechanisms by cysteine, ascorbic acid and citric acid, and identifying PPO-catechol-cysteine reaction products [J]. *Journal Food Science Technology*, 2015, 52(6): 3651-3659.
- [41] 李文欣,赵文婷,王宇滨,等.基于电子舌评价不同品种番茄制备番茄酱的滋味品质[J].食品工业科技,2019,40(19):209-215.
- [42] Zhu Y, Zhou X, Chen Y P, et al. Exploring the relationships between perceived umami intensity, umami components and electronic tongue responses in food matrices [J]. *Food Chemistry*, 2021, 368: 130-849.