

# 不同预冷方式下鲜切苹果贮藏过程中品质变化比较

东方云<sup>1</sup>, 黎锦杰<sup>1</sup>, 郭敏<sup>2</sup>, 谢思芸<sup>1</sup>, 李文静<sup>3</sup>, 温梓浩<sup>1</sup>, 韩莉冰<sup>1</sup>, 周帆<sup>1</sup>, 廖彩虎<sup>1\*</sup>

(1. 韶关学院广东省粤北食药资源利用与保护重点实验室, 食品学院, 广东韶关 512023)

(2. 韶关海关综合技术服务中心, 广东韶关 512023) (3. 广东省韶关市质量计量监督检测所, 广东韶关 512023)

**摘要:** 为了抑制鲜切苹果贮藏期褐变及微生物污染。利用风冷 (Air Blast Cooling, AB)、紫外辐照 (UV Irradiation, UV)、真空预冷 (Vacuum Cooling, VC) 及真空预冷复合紫外辐照 (Vacuum Cooling-UV irradiation, UV&VC) 技术对鲜切苹果进行处理, 并测定其贮藏过程中理化及微生物指标评价其对鲜切苹果品质的影响。结果表明: 相较于常压, 真空状态下紫外线辐照强度上升速率更快且最终辐照强度值更高 ( $1\ 277\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$ )。贮藏过程中, UV&VC 处理组下的鲜切苹果的呼吸率 ( $28.22\ \text{O}_2\ \text{mg}/\text{kg}\cdot\text{h}$ ) 和褐变程度显著低于 AB、UV 和 VC 处理组 ( $P<0.05$ )。UV&VC 组鲜切苹果的丙二醛 (Malondialdehyde, MDA) 含量, 过氧化物酶 (Peroxidase, POD)、多酚氧化酶 (Polyphenol Oxidase, PPO) 在贮藏结束时低于其他处理组, 分别为  $63.25\ \text{nmol}/\text{mg}$ ,  $25.39\ \text{U}/\text{g}$  及  $18.44\ \text{U}/\text{g}$ 。UV&VC 处理组下的鲜切苹果的维生素 C ( $0.55\ \text{mg}/\text{g}$ )、总酚含量 ( $1.20\ \text{mg}/\text{g}$ ) 也显著高于其他处理组 ( $P<0.05$ )。除此之外, UV&VC 处理组下的鲜切苹果在贮藏过程中菌落总数也明显低于其他处理组 ( $P<0.05$ ), 在第五天为  $3.33\ \text{lg CFU}/\text{g}$ 。综上所述, UV&VC 作为一种复合式的处理方式能够更有效地维持鲜切苹果的品质和延长货架期, 对于鲜切苹果贮藏有一定参考价值。

**关键词:** 苹果; 鲜切; 真空预冷; 紫外; 感官品质

文章编号: 1673-9078(2025)02-134-141

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.2.1826

## Comparison of Quality Changes in Fresh-cut Apple Slices during Storage with Different Cooling Methods

DONG Fangyun<sup>1</sup>, LI Jinjie<sup>1</sup>, GUO Min<sup>2</sup>, XIE Siyun<sup>1</sup>, LI Wenjing<sup>3</sup>, WEN Zihao<sup>1</sup>, HAN Libing<sup>1</sup>, ZHOU Fan<sup>1</sup>, LIAO Caihu<sup>1\*</sup>

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Utilization and Conservation of Food and Medicinal Resources in Northern Region & School of Food Science and Technology, Shaoguan University, Shaoguan 512023, China)

(2. Shaoguan Customs Comprehensive Technical Service Center, Shaoguan 512023, China)

(3. Guangdong Shaoguan Supervision & Inspection Institute for Quality & Metrology, Shaoguan 512023, China)

**Abstract:** To suppress browning and microbial contamination during the storage of fresh-cut apples, various treatments  
引文格式:

东方云,黎锦杰,郭敏,等.不同预冷方式下鲜切苹果贮藏过程中品质变化比较[J].现代食品科技,2025,41(2):134-141.

DONG Fangyun, LI Jinjie, GUO Min, et al. Comparison of quality changes in fresh-cut apple slice during storage with different cooling methods [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(2): 134-141.

收稿日期: 2024-03-24

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (32272425); 广东省自然科学基金项目 (2020A1515011182); 广东省普通高校重点领域专项 (2022ZDX4042); 广东省大学生创新创业训练计划 (S202310576037); 韶关市科技计划项目 (210724144530340); 韶关学院自然科学基金 (SZ2020KJ05, SY2023KJ10); 海关总署科研项目 (2024HK131)

作者简介: 东方云 (1996-), 男, 硕士, 助教, 研究方向: 农副产品深加工, E-mail: fydong@sgu.edu.cn

通讯作者: 廖彩虎 (1984-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 低温冷链设备开发及相关产品品质控制, E-mail: 154931443@qq.com

were applied to fresh-cut apple slices, including air blast cooling (AB), ultraviolet (UV) irradiation, vacuum cooling (VC), and vacuum cooling combined with UV irradiation (UV&VC). The effects of these treatments on the physicochemical and microbiological quality of the apples were assessed. The results showed that, compared to atmospheric pressure, UV irradiation intensity increased faster with a higher final value ( $1\ 277\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ) under vacuum conditions. During storage, UV&VC-treated apples exhibited significantly lower respiration rate ( $28.22\ \text{O}_2\ \text{mg}/\text{kg}\cdot\text{h}$ ) and browning compared to AB, UV, and VC treatments ( $P<0.05$ ). Malondialdehyde, peroxidase, and polyphenol oxidase levels in UV&VC-treated apples were also lower at the end of storage, measuring  $63.25\ \text{nmol}/\text{mg}$ ,  $25.39\ \text{U}/\text{g}$ , and  $18.44\ \text{U}/\text{g}$ , respectively. Additionally, vitamin C ( $0.55\ \text{mg}/\text{g}$ ) and total phenol ( $1.20\ \text{mg}/\text{g}$ ) contents of UV&VC-treated apples were significantly higher than those of the other treatments ( $P<0.05$ ). The total colony count of UV&VC-treated apples was significantly lower ( $P<0.05$ ), reaching  $3.33\ \lg\ \text{CFU}/\text{g}$  on day five. In conclusion, UV&VC, as a composite treatment, more effectively maintains the quality of fresh-cut apples and extends their shelf life, offering valuable insights for apple storage.

**Key words:** apple; fresh-cut; vacuum cooling; ultraviolet irradiation; sensory quality

鲜切苹果是指经过清洗、去皮、切割并包装的即食型苹果, 由于其保留了大部分的营养成分, 如维生素 C、膳食纤维等, 在零食和便捷食品领域有较高的需求<sup>[1]</sup>。近年来, 欧美日等国家已实现鲜切果蔬的系统化和规范化生产, 但我国目前仍属于起步阶段<sup>[2]</sup>。由于苹果具有较高活性的多酚氧化酶 (Polyphenol Oxidase, PPO) 和过氧化物酶 (Peroxidase, POD) 等, 从而导致鲜切苹果在贮藏过程中极易发生褐变<sup>[3,4]</sup>。除此之外, 鲜切果蔬也面临着较严重的微生物污染问题<sup>[5]</sup>。

真空预冷是利用相变方式来实现物料快速降温的技术, 是目前果蔬采后保鲜、品质维护以及有机物代谢减缓的重要手段<sup>[4]</sup>。值得关注的是, 真空预冷处理能够有效地抑制新鲜果蔬中 POD 和 PPO 的活性<sup>[6,7]</sup>。此外, He 等<sup>[8]</sup>研究也表明, 真空预冷还能够导致樱桃表面的大肠杆菌 (*Escherichia coli*) 细胞微观形态发生变化, 细胞膜完整性降低, 从而起到了去除 *E. coli* 的效果。但也有相关研究表明, 真空预冷过程会导致微生物渗透至蔬菜表面沟壑、气孔内部及伤口处, 增加了后续清洗的难度, 反而增加了食源性疾病爆发的风险<sup>[9,10]</sup>。上述矛盾的结果可能与微生物附着在蔬菜的位置有关, 如果附着在蔬菜表面 (如蜡质层), 那么真空环境对微生物的去除有一定的效果。但当其附着在蔬菜气孔或者内部时, 去除效果非常有限<sup>[11,12]</sup>。前期研究表明, 单独真空预冷对鲜切苹果微生物的去除效果非常有限。因此, 部分学者提出了一些创新方法来解决此类问题。例如, 在复压阶段引入臭氧、二氧化碳等气体<sup>[13,14]</sup>来杀灭样品中的微生物, 从而起到延长货架期的作用。虽然臭氧对鲜切苹果表面的微生物有灭杀作用, 但其强氧化作用反而会导致鲜切果蔬细

胞内氧化程度激增<sup>[15,16]</sup>, 从而引起严重的褐变。

近年来, 相关研究表明紫外线除了能够杀灭微生物之外, 也能够钝灭 PPO 和 POD 等褐变相关酶<sup>[17,18]</sup>, 从而有效地减少了鲜切果蔬的酶促褐变。尽管单独真空预冷或者紫外辐射对鲜切果蔬的微生物以及引起褐变的酶都有较好的抑制作用。但目前将真空预冷与紫外辐照复合来研究其对鲜切苹果品质的影响仍鲜见报告。基于此, 本文利用风冷 (Air Blast Cooling, AB)、紫外辐照 (UV Irradiation, UV)、真空预冷 (Vacuum Cooling, VC) 及真空预冷复合紫外辐照 (Vacuum cooling-UV Irradiation, UV&VC) 技术对鲜切苹果进行处理, 并通过测定其贮藏过程中理化及微生物指标来评价不同处理方式对鲜切苹果品质的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

苹果 (红富士), 购于广东省韶关市浈江区华南农产品交易中心; 维生素 C、柠檬酸、半胱氨酸均为食用级, 均购于河南万邦化工科技有限公司; 乙二胺四乙酸 (Ethylenediamine Tetraacetic Acid, EDTA)、2,6-二氯靛酚、草酸, 分析纯, 购于国药集团化学试剂有限公司; 过氧化物酶 (POD) 活性检测试剂盒、多酚氧化酶 (PPO) 活性检测试剂盒、植物总酚 (Total Phenol, TP) 含量检测试剂盒、丙二醛 (Malondialdehyde, MDA) 含量检测试剂盒, 均购于北京索莱宝科技有限公司。

### 1.2 仪器与设备

KM-50 真空预冷机 (真空箱体内部配置紫外线灯管和不锈钢架, 且上下紫外灯管与不锈钢架

的距离均为 30 cm), 东莞科美斯制冷设备有限公司; HPL-220UVC 紫外辐照计, 杭州虹谱光色科技有限公司; Testo 174H 温湿度计, 德国 Testo 公司; OXYBABY M+ O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 便携式氧气/二氧化碳分析仪, 德国 WITT 公司; SP60 色差仪, 美国爱色丽公司; FC5515R 冷冻离心机, 德国奥豪斯公司; MultiSkan SkyHigh 全波长酶标仪, Thermo 公司。

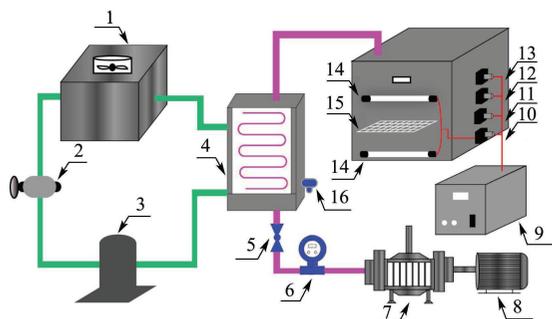


图 1 真空预冷复合紫外辐照设备组合图

Fig.1 Composition of modified vacuum pre-cooling unit integrated with ultraviolet radiation (UV&VC)

注: 1. 冷凝器; 2. 膨胀阀; 3. 压缩机; 4. 蒸发器; 5. 气动阀; 6. 电磁阀; 7. 真空泵; 8. 电动机; 9. 数据收集和处理系统; 10. 内部电源插座; 11. 放空阀; 12. 压力传感器; 13. 温度传感器; 14. 紫外灯; 15. 样品架; 16. 排水阀。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 样品处理及预冷方法

大小及质量(约 250 g)均一的苹果经过清洗、消毒后, 用锋利刀片将其切成片, 取直径约 7.5 cm, 厚度约为 0.5 cm, 质量约为 35 g 作为样品。按照如下步骤处理: 首先, 将样品浸入护色液 [0.15 wt.% 食品级维生素 C、0.25 wt.% 柠檬酸、0.85 wt.% 半胱氨酸和 0.2 wt.% EDTA, 温度为 (25±1) °C] 中 3 min; 其次, 立即按照如下所述的不同处理方式 (AB、VC、UV、UV&VC) 进行处理, 具体操作方法如下:

**AB:** 将浸泡后的鲜切苹果直接装入保鲜袋中并封口, 然后直接放入冷库中预冷;

**VC:** 将浸泡后的鲜切苹果均匀平铺在不锈钢架子上, 关闭真空腔门, 启动真空预冷机, 当真空腔体内部压力达到预设终压 1 000 Pa 时, 恒定压强并开始计时, 300 s 后停止预冷, 恢复常压后取出样品;

**UV:** 将浸泡后的鲜切苹果均匀平铺在不锈钢架子上, 关闭真空腔门, 开启紫外灯, 计时 300 s 后关闭紫外灯并取出样品;

**UV&VC:** 将浸泡后的鲜切苹果均匀平铺在架子上, 关闭真空腔门, 启动真空预冷机, 当真空腔

体压力达到预设终压 1 000 Pa 时, 恒压条件下开启紫外灯, 计时 300 s 后停止预冷并关闭紫外灯, 恢复常压后取出样品;

然后, 将上述处理后的样品分别按照每 4 片为一组装入保鲜袋 (25×40×0.1 cm) 中并封口; 最后, 在 4±1 °C 冷库中贮藏 120 h, 每隔 24 h 取出一袋样品并测定相关指标。所以, 4 种处理方式, 5 d 贮藏时间 (每日检测一次), 平行三次, 所以共需 60 袋, 一共 240 片鲜切苹果。其中, 护色液经过 0.45 μm 的滤膜过滤除菌, 接触原料的不锈钢架子、保鲜袋均经过紫外辐照 30 min 处理。

#### 1.3.2 呼吸速率测定

参考张桂<sup>[19]</sup>的方法, 利用氧气/二氧化碳分析仪测定样品袋中 O<sub>2</sub> 的含量, 将分析仪取样针刺入样品袋中开始测量, 测量时环境温度为 25 °C。相同处理组样品之间平行测定 3 次。按照如下公式计算呼吸速率:

$$R = \frac{(\varphi_2 - \varphi_1) \times V \times M \times 1\,000}{V_0 \times m_s \times t} \quad (1)$$

式中:

$R$ ——样品的呼吸速率, O<sub>2</sub> mg/kg·h;

$\varphi_1$ ——空白试验样品袋中 O<sub>2</sub> 体积分数, %;

$\varphi_2$ ——测定时样品袋中 O<sub>2</sub> 体积分数, %;

$V$ ——样品袋体积, L;

$M$ ——O<sub>2</sub> 的摩尔质量, 32 g/mol;

$V_0$ ——测定温度 O<sub>2</sub> 的摩尔体积, 24.5 L/mol;

$m_s$ ——样品质量, kg;

$t$ ——两次测定的间隔, h。

#### 1.3.3 外观及色度指标测定

利用色差仪对外观指标进行定量分析, 测定样品的  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值, 每个样品取 5 个点进行测定。每组 4 个样品, 并拍摄贮藏过程中样品的外观。

#### 1.3.4 褐变相关酶活指标及代谢产物含量的测定

##### 1.3.4.1 过氧化物酶 (POD) 的测定

参考试剂盒说明书进行操作。

##### 1.3.4.2 多酚氧化酶 (PPO) 的测定

参考试剂盒说明书进行操作。

##### 1.3.4.3 总酚 (TP) 含量的测定

参考试剂盒说明书进行操作。

##### 1.3.4.4 维生素 C (Vitamin C, Vc) 含量的测定

参考 Martiñon 等<sup>[20]</sup>的方法并稍作修改, 简述如下: 将 10.00 g 样品加入 10 mL 2 wt.% 草酸溶液并捣碎, 离心取上清液。将上清液用 1 wt.% 草酸定容至 100 mL。然后取 10 mL 滤液, 用已标定的 2,6-二氯

酞酚溶液进行滴定，直至溶液达到滴定终点（溶液由蓝变粉红色且 15 s 内不褪色），记录 2,6-二氯酞酚溶液的消耗量。每个处理组重复 3 次滴定，维生素 C 的含量通过以下公式计算：

$$A = \frac{(V_a - V_b) \times C \times T}{D \times W} \quad (2)$$

式中：

$A$ ——维生素 C 含量，mg/g；

$V_a$ ——样品提取液消耗的 2,6-二氯酞酚溶液的量，mL；

$V_b$ ——空白消耗的 2,6-二氯酞酚溶液的量，mL；

$C$ ——经过标定的 2,6-二氯酞酚标准液的浓度，mol/L；

$T$ ——1 mL 2,6-二氯酞酚溶液对维生素 C 的滴定度；

$D$ ——样品稀释倍数；

$W$ ——用于测定的样品质量，g。

### 1.3.4.5 丙二醛 (MDA) 含量的测定

参考试剂盒说明书进行操作。

### 1.3.5 菌落总数检测

参考国家标准 GB 4789.2-2022 执行<sup>[21]</sup>。

## 1.4 数据处理与分析

测定和结果分析采用 SPSS 22.0 进行处理。绘图采用 Origin 2022 软件处理。所有结果均表示为平均值 ± 标准误差。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同预冷方式下鲜切苹果的湿度、压力及紫外辐照强度曲线

图 2a、2b 分别展示了 UV 和 UV&VC 处理下真空腔体内部的湿度、压强和辐照强度的变化曲线。由图 2a、2b 可以看出，UV 处理下紫外线辐照强度迅速上升，但上升速率低于 UV&VC 处理组，且最终辐照强度也低于 UV&VC 组。这可能与环境中的相对湿度有关，真空状态下相对湿度（约 30%）明显低于常压下的相对湿度（约 75%）。一般而言，更低相对湿度条件下，紫外线可以减少因水蒸气的存在时出现折射和反射现象，从而更有利于紫外线的穿透，导致紫外线具有更快的辐照强度上升速率和更高的最终辐照强度值。此外，前期的预实验也获得了相似的结果，通过超声波雾化提高环境中相对湿度时，紫外线辐照强度上升速率及最终幅度值则会更小（结果未展示）。另外，真空过程能够降低环境中氧气浓度以及紫外线辐照时所产生的臭氧浓度。上述原因可能能够较好地解释为何 UV&VC

处理对鲜切苹果的护色效果要优于单独 VC 处理。

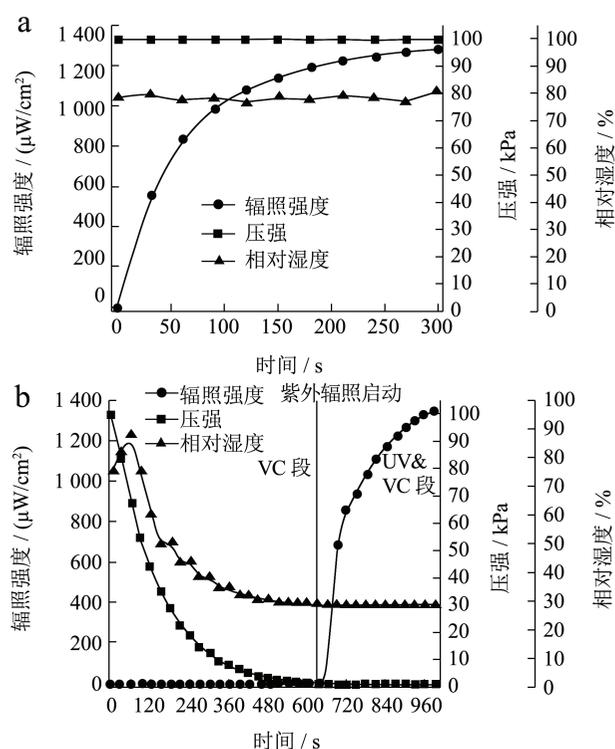


图 2 真空与非真空环境下的湿度、压力及辐照强度随时间的变化曲线

Fig.2 Curves of humidity, pressure, and irradiation intensity for ultraviolet irradiation

注：a 为非真空环境下湿度、压力及辐照强度随时间的变化曲线，b 为真空环境下湿度、压力及辐照强度随时间的变化曲线。

### 2.2 不同预冷方式对鲜切苹果贮藏过程中呼吸速率的影响

不同处理方式对贮藏过程中鲜切苹果呼吸速率变化详见表 1。由表 1 可知，贮藏第 1 天，VC 处理后鲜切苹果的呼吸速率明显低于其他三种处理方式，其主要原因可能是 VC 快速的冷却速率，有效地抑制了鲜切苹果的呼吸代谢。同时，UV 及 UV&VC 处理组的呼吸速率较高，可能是因为紫外线辐照增加了鲜切苹果细胞中活性氧 (Reactive Oxygen Species, ROS) 含量，迫使细胞增加代谢清除 ROS<sup>[22]</sup>。然而，在第 3、4 天时，VC 处理组呼吸速率反而高于 UV 和 UV&VC 处理组。与其它处理组不同的是，UV&VC 组呼吸速率呈逐渐下降趋势，其原因可能是真空预冷在迅速降低呼吸速率的同时，紫外线辐照导致呼吸作用相关酶不可逆地灭活<sup>[23]</sup>。整体而言，UV&VC 处理后鲜切苹果呼吸速率显著低于另外三种处理方式，说明 UV&VC 处理方式对鲜切苹果的贮藏更有优势。

表 1 不同预冷方式对鲜切苹果贮藏过程中呼吸速率的影响

Table 1 Effects of different precooling methods on the respiration rate of fresh-cut apples during storage

时间/d	呼吸速率/(O <sub>2</sub> mg/kg·h)			
	AB	UV	VC	UV&VC
1	38.87 ± 2.39 <sup>d</sup>	109.23 ± 14.37 <sup>a</sup>	20.21 ± 6.57 <sup>c</sup>	60.25 ± 5.83 <sup>b</sup>
2	34.11 ± 3.35 <sup>d</sup>	74.25 ± 10.28 <sup>a</sup>	15.55 ± 3.55 <sup>c</sup>	59.48 ± 6.36 <sup>b</sup>
3	34.60 ± 5.68 <sup>b</sup>	56.37 ± 14.53 <sup>b</sup>	111.56 ± 12.54 <sup>a</sup>	16.72 ± 5.58 <sup>c</sup>
4	120.89 ± 13.44 <sup>a</sup>	50.15 ± 7.48 <sup>c</sup>	82.05 ± 4.36 <sup>b</sup>	3.89 ± 0.58 <sup>d</sup>
5	42.37 ± 3.32 <sup>b</sup>	80.47 ± 5.86 <sup>a</sup>	80.08 ± 8.32 <sup>a</sup>	0.78 ± 0.12 <sup>c</sup>
平均值	47.97 ± 2.25 <sup>b</sup>	74.09 ± 4.70 <sup>a</sup>	47.89 ± 3.16 <sup>b</sup>	28.22 ± 1.65 <sup>c</sup>

注：同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ( $P < 0.05$ )。AB 为风冷，UV 为紫外辐照，VC 为真空预冷，UV&VC 为真空预冷复合紫外辐照。下同。

### 2.3 不同预冷方式对鲜切苹果贮藏过程外观品质的影响



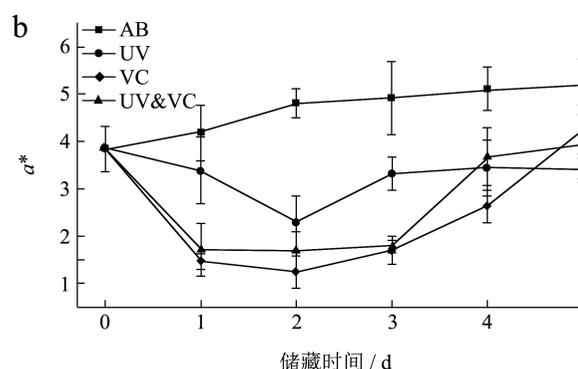
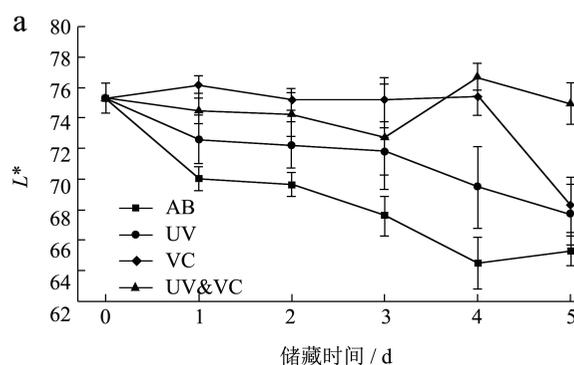
图 3 不同预冷方式后鲜切苹果贮藏过程外观变化

Fig.3 Images of fresh-cut apples during storage after different pre-cooling methods

注：AB 为风冷，UV 为紫外辐照，VC 为真空预冷，UV&VC 为真空预冷复合紫外辐照。下同。

不同处理方式对贮藏过程中鲜切苹果外观的变化见图 3、4。由图 3 可知，AB 和 UV 处理组褐变较快，贮藏第 3 天开始出现褐变。VC 和 UV&VC 处理组褐变程度低于 AB 和 UV 处理组，且 UV&VC 处理组在贮藏周期内褐变程度最低。由图 4 可知，VC 和 UV&VC 处理组的  $L^*$  值较 AB 和 UV 处理组下降较慢， $b^*$  值在前 4 d 的贮藏过程中基本不变。说明 VC 和 UV&VC 处理组样品在贮藏过程中褐变程度较小，其可能原因是真空预冷过程中，附着在表层的复合护色液渗透进入苹果细胞间隙内，并代替

了间隙中的空气和液体<sup>[24]</sup>，可有效降低苹果褐变的程度。此外，前期预实验发现，同时开启 UV 和 VC 反而会导致鲜切苹果褐变加速，这与其他学者研究结果相反<sup>[25]</sup>。推测其原因可能是在密闭的真空腔体内，紫外辐照生成的臭氧反而刺激了鲜切苹果内细胞氧化应激，从而生成大量醌类物质<sup>[26]</sup>。为了增强紫外对鲜切苹果褐变相关酶的抑制及杀菌效果，同时又避免因臭氧的产生而导致苹果剧烈氧化应激，在较高真空度下启动紫外线辐照是更理想的处理方式。



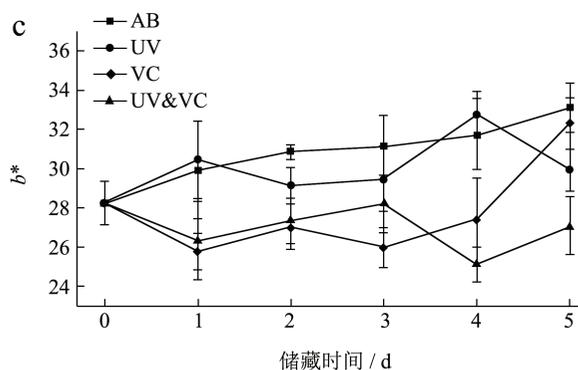


图4 不同预冷方式后鲜切苹果贮藏过程中  $L^*$ 、 $a^*$  和  $b^*$  值变化

Fig.4 Changes of  $L^*$ ,  $a^*$  and  $b^*$  value in fresh-cut apples with different pre-cooling methods during storage

## 2.4 不同预冷方式对鲜切苹果生理指标的影响

### 2.4.1 不同预冷方式对鲜切苹果褐变相关酶活力的影响

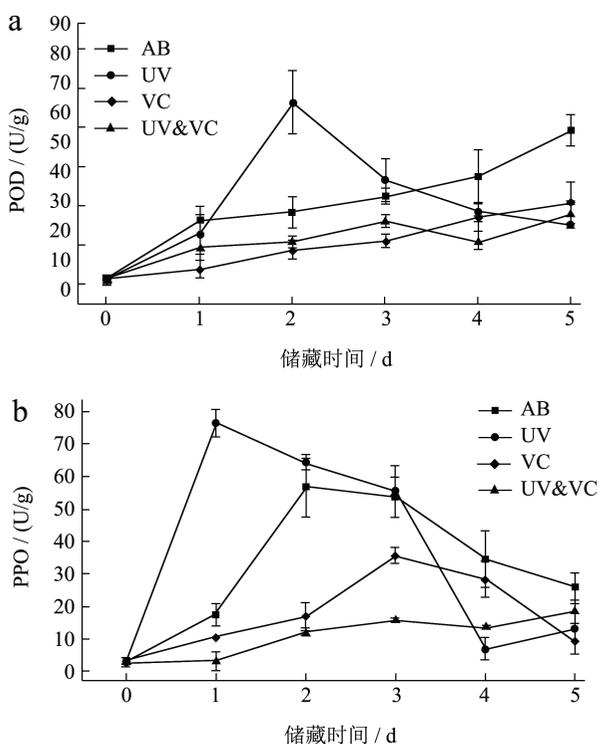


图5 不同预冷方式后鲜切苹果贮藏过程中褐变相关酶活力变化

Fig.5 Activities change of browning-related enzyme of fresh-cut apples with different pre-cooling methods during storage

图5描述了不同处理方式对贮藏过程中鲜切苹果PPO、POD活性的影响。由图5a可知, AB、VC和UV&VC处理组的POD活性均逐渐上升, 但AB处理组上升速率显著高于VC和UV&VC处理

组。其原因可能是真空预冷减缓了细胞代谢, 从而使POD活性保持较低水平<sup>[5]</sup>。另外, UV处理组POD活性在第2天达到峰值后迅速下降。由图5b可知, 四种预冷方式处理后的鲜切苹果PPO活性在贮藏过程中均出现先上升而下降的趋势, 但VC和UV&VC处理均可以推迟PPO活性达到峰值的时间, 且UV&VC处理组PPO活性在贮藏期内一直未达到峰值, 始终维持较低水平, 其原因可能是VC与UV处理在抑制PPO活性上存在着正协同效应<sup>[27]</sup>。

### 2.4.2 不同预冷方式对鲜切苹果相关代谢产物含量的影响

不同处理方式对贮藏过程中鲜切苹果相关代谢产物含量如图6所示, 由图6a可知, 四种处理方式下鲜切苹果的总酚含量在贮藏过程中均呈现下降趋势。AB处理组在储藏初期迅速降低, 而UV处理组下降较AB处理组更快, 其可能原因是UV产生的臭氧引起氧化应激, 从而加速酚类物质氧化<sup>[28]</sup>。UV&VC和VC处理组总酚下降速率低于AB和UV处理组。相对而言, UV&VC处理组总酚下降速率低于VC处理组, 表明UV&VC通过快速降温 and 抑制PPO和POD的活性有效地抑制了酚类物质的降解。类似地, 四种处理方式下鲜切苹果的维生素C随着贮藏时间延长而逐渐下降(图6b)。可能由于臭氧的存在<sup>[29]</sup>, UV处理组维生素C含量下降迅速。UV&VC处理组维生素C含量下降程度最低, 表明UV&VC处理可以有效减少鲜切苹果中维生素C的损失, 提高了鲜切苹果的营养价值。不同处理方式对鲜切苹果MDA含量的影响如图6c所示。AB处理组MDA含量随着保存时间的延长而逐渐上升, 随后于第4天开始达到稳定。UV处理组MDA含量也迅速上升, 且MDA含量显著高于其他处理组。UV&VC处理组MDA含量在贮藏过程中均低于其他处理组, 其原因可能是快速冷却和紫外线辐照协同可以有效地降低苹果细胞的呼吸作用以及脂质氧化程度<sup>[30]</sup>。

### 2.5 不同预冷方式对鲜切苹果菌落总数的影响

不同预冷方式对鲜切苹果贮藏过程中菌落总数的影响见表2。AB处理组在储存过程中菌落总数增长迅速, 从小于1 lg CFU/g(第0天)上升至5.87 lg CFU/g(第5天)。UV处理组的菌落总数从小于1 lg CFU/g(第0天)增至3.27 lg CFU/g(第

5天),说明UV处理能够减缓微生物在贮藏过程中的增长。然而,UV处理却加速了鲜切苹果的褐变,影响了鲜切苹果的外观品质。尽管VC处理组菌落总数在贮藏过程中低于AB处理组,但在第5天时依然达到了4.92 lg CFU/g。UV&VC处理组的菌落总数在贮藏过程与UV处理组菌落总数相似,在贮藏后期(第3天到第5天)更是表现出最低的菌落总数。因此说明,UV&VC处理不仅能够有效地抑制鲜切苹果贮藏过程中微生物的增长,也能够抑制PPO和POD的活性,降低了酶促褐变速率。

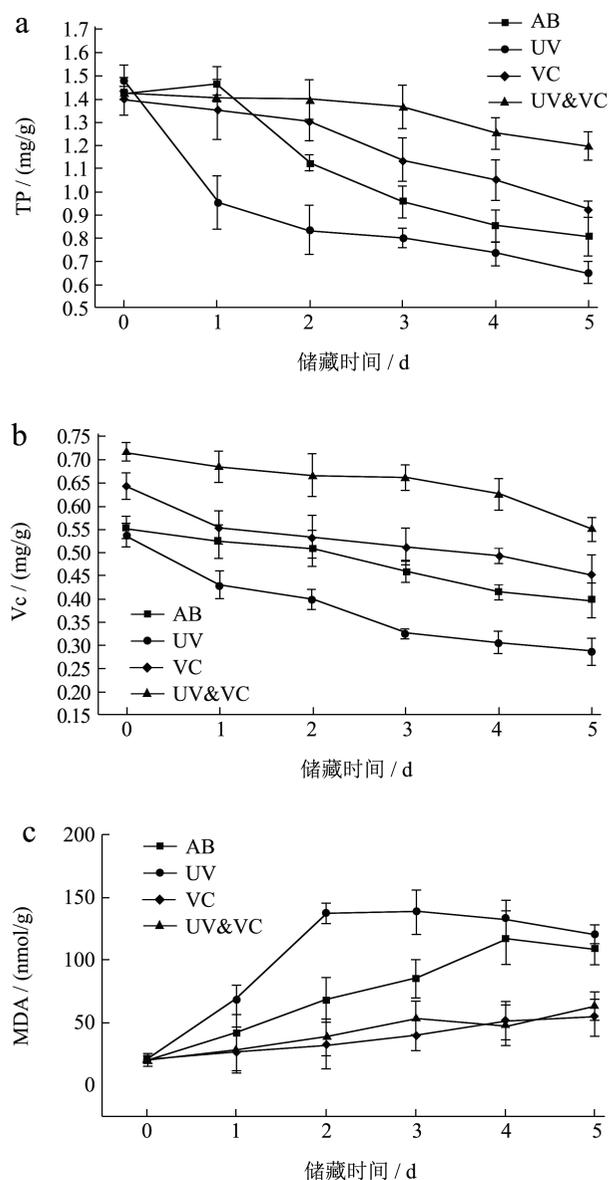


图6 不同预冷方式后鲜切苹果贮藏过程中褐变相关代谢产物含量

Fig.6 Change of browning-relating metabolites of fresh-cut apples with different pre-cooling methods during storage

表2 不同预冷方式对鲜切苹果贮藏过程中菌落总数的影响  
Table 2 Total bacterial count change of fresh-cut apples with different pre-cooling methods during storage

时间/d	菌落总数/(lg CFU/g)			
	AB	UV	VC	UV&VC
0	<1	<1	<1	<1
1	1.74 ± 0.04 <sup>a</sup>	1.08 ± 0.09 <sup>a</sup>	1.33 ± 0.24 <sup>a</sup>	1.13 ± 0.12 <sup>a</sup>
2	2.91 ± 0.36 <sup>a</sup>	1.95 ± 0.21 <sup>b</sup>	2.08 ± 0.32 <sup>b</sup>	2.01 ± 0.42 <sup>b</sup>
3	3.54 ± 0.26 <sup>a</sup>	2.32 ± 0.48 <sup>c</sup>	2.98 ± 0.43 <sup>b</sup>	2.25 ± 0.25 <sup>c</sup>
4	4.13 ± 0.74 <sup>a</sup>	2.92 ± 0.53 <sup>c</sup>	3.54 ± 0.63 <sup>b</sup>	2.72 ± 0.13 <sup>c</sup>
5	5.87 ± 1.15 <sup>a</sup>	3.67 ± 0.87 <sup>c</sup>	4.92 ± 1.32 <sup>b</sup>	3.33 ± 1.03 <sup>c</sup>

### 3 结论

相较于AB、UV和VC处理组而言,UV&VC处理不仅能够有效地抑制鲜切苹果贮藏过程中的PPO和POD活性和维持更高的维生素C和总酚的含量,而且还能够有效地降低鲜切苹果贮藏过程中的菌落总数。UV&VC能够有效地结合UV和VC彼此之间的优势,紫外辐照能够有效地降低真空预冷处理后鲜切苹果在贮藏过程中的菌落总数。同样,真空预冷环节能够明显增加紫外线的辐照强度和降低贮藏过程中鲜切苹果的酶活。总而言之,UV&VC作为一种复合型的处理方式能够成功地应用于鲜切苹果加工中。后期将继续优化UV&VC的操作参数,包括辐照强度、辐照时间、抽气速率和真空度等,以便获得更理想的保鲜效果。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 邓红军,杨明飞,刘伟,等.短波紫外线法处理对鲜切果蔬抗氧化系统影响的研究进展[J].食品安全质量检测学报,2021,12(14):5713-5719.
- [3] QUEVEDO R, PEDRESCHI F, BASTIAS J M, et al. Correlation of the fractal enzymatic browning rate with the temperature in mushroom, pear and apple slices [J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 65: 406-413.
- [4] GAO K, CHEN Q, BI J, et al. Changes in browning-related components of apple slices during different stages of instant controlled pressure drop-assisted hot air drying (AD-DIC) [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2016, 51(10): 2242-2250.
- [5] 李月新.臭氧处理对不同鲜切水果品质特性的影响[D].沈阳:沈阳农业大学,2023.
- [6] ZHU Z, GENG Y, SUN D W. Effects of operation

- processes and conditions on enhancing performances of vacuum cooling of foods: A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 85: 67-77.
- [7] TAO F, ZHANG M, YU H. Effect of vacuum cooling on physiological changes in the antioxidant system of mushroom under different storage conditions [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(4): 1302-1309.
- [8] HE S Y, YU Y Q, ZHANG G C, et al. Effects of vacuum pre-cooling on quality of mushroom after cooling and storage [J]. Advanced Materials Research, 2013, 699: 189-193.
- [9] HE S Y, ZHANG G C, YU Y Q, et al. Effects of vacuum cooling on the enzymatic antioxidant system of cherry and inhibition of surface-borne pathogens [J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(8): 2387-2394.
- [10] LI H, TAJKARIMI M, OSBURN B I. Impact of vacuum cooling on *Escherichia coli* O157:H7 infiltration into lettuce tissue [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2008, 74(10): 3138-3142.
- [11] VONASEK E, NITIN N. Influence of vacuum cooling on *Escherichia coli* O157:H7 infiltration in fresh leafy greens via a multiphoton-imaging approach [J]. Applied Environmental Microbiology, 2016, 82(1): 106-115.
- [12] RANJBARAN M, DATTA A K. Pressure-driven infiltration of water and bacteria into plant leaves during vacuum cooling: A mechanistic model [J]. Journal of Food Engineering, 2019, 246: 209-223.
- [13] ZHU Z, WU X, GENG Y, et al. Effects of modified atmosphere vacuum cooling (MAVC) on the quality of three different leafy cabbages [J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 94: 190-197.
- [14] LI C, WANG S, WANG J, et al. Ozone treatment promotes physicochemical properties and antioxidant capacity of fresh-cut red pitaya based on phenolic metabolism [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1016607.
- [15] UEDA Y, UEHARA N, SASAKI H, et al. Impacts of acute ozone stress on superoxide dismutase (SOD) expression and reactive oxygen species (ROS) formation in rice leaves [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2013, 70: 396-402.
- [16] LEE J K, WOO S Y, KWAK M J, et al. Effects of elevated temperature and ozone in *Brassica juncea* L.: growth, physiology, and ROS accumulation [J]. Forests, 2020, 11(1): 68.
- [17] WANG J, WU Z. Minimal processing of produce using a combination of UV-C irradiation and ultrasound-assisted washing [J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 182: 114901.
- [18] WANG D, CHEN L K, MA Y, et al. Effect of UV-C treatment on the quality of fresh-cut lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) root [J]. Food Chemistry, 2019, 278: 659-664.
- [19] 张桂. 果蔬采后呼吸强度的测定方法[J]. 理化检验(化学分册), 2005, 8: 596-597.
- [20] MARTIÑON M E, MOREIRA R G, CASTELL-PEREZ M E, et al. Development of a multilayered antimicrobial edible coating for shelf-life extension of fresh-cut cantaloupe (*Cucumis melo* L.) stored at 4 C [J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 56(2): 341-350.
- [21] GB 4789.2-2022食品微生物学检验-菌落总数测定[S].
- [22] RABELO M C, BANG W Y, NAIR V, et al. UVC light modulates vitamin C and phenolic biosynthesis in acerola fruit: Role of increased mitochondria activity and ROS production [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 21972.
- [23] ZHANG J, CHEN C, ZHANG D, et al. Reactive oxygen species produced via plasma membrane NADPH oxidase regulate anthocyanin synthesis in apple peel [J]. Planta, 2014, 240: 1023-1035.
- [24] 廖彩虎, 单斌, 钟瑞敏, 等. 基于真空预冷条件下的浸渍保鲜对鲜切莲藕品质的影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(6): 243-248, 210.
- [25] ALOTHMAN M, BHAT R, KARIM A A. UV radiation-induced changes of antioxidant capacity of fresh-cut tropical fruits [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2009, 10(4): 512-516.
- [26] ZHANG W, JIANG H, CAO J, et al. UV-C treatment controls brown rot in postharvest nectarine by regulating ROS metabolism and anthocyanin synthesis [J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 180: 111613.
- [27] MÜLLER A, NOACK L, GREINER R, et al. Effect of UV-C and UV-B treatment on polyphenol oxidase activity and shelf life of apple and grape juices [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2014, 26: 498-504.
- [28] LIU C, MA T, HU W, et al. Effects of aqueous ozone treatments on microbial load reduction and shelf life extension of fresh-cut apple [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2016, 51(5): 1099-1109.
- [29] ALOTHMAN M, BHAT R, KARIM A A. UV radiation-induced changes of antioxidant capacity of fresh-cut tropical fruits [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2009, 10(4): 512-516.
- [30] LI L, LI C, SUN J, et al. Synergistic effects of ultraviolet light irradiation and high-oxygen modified atmosphere packaging on physiological quality, microbial growth and lignification metabolism of fresh-cut carrots [J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 173: 111365.