

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241104012

引用格式: 宣晓婷, 钟雪珍, 尚海涛, 等. 射频和热激处理对水蜜桃冻藏褐变及品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(1): 234–242.

XUAN XT, ZHONG XZ, SHANG HT, *et al.* Effects of radio frequency and heat shock treatment on the browning and quality of honey peaches during frozen storage [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(1): 234–242. (in Chinese with English abstract).

# 射频和热激处理对水蜜桃冻藏褐变及品质的影响

宣晓婷<sup>1</sup>, 钟雪珍<sup>2</sup>, 尚海涛<sup>1</sup>, 张勇<sup>2</sup>, 林旭东<sup>1</sup>, 朱麟<sup>1\*</sup>

(1. 宁波市农业科学研究院农产品加工研究所, 宁波 315100; 2. 宁波市圆蓝食品科技有限公司, 宁波 315502)

**摘要:** **目的** 探究射频和热激处理对水蜜桃冻藏防褐变效果。**方法** 采用热激和不同时间的射频对水蜜桃进行预处理, 并监测其在冻藏7 d内的褐变及品质变化情况。**结果** 相较于热激处理, 射频处理对桃果固酸比、pH影响较小, 显著降低了电导率( $P<0.05$ ), 表明射频能更好地保持桃果细胞膜完整性; 基于褐变关键酶、底物和产物的研究发现, 射频处理对冻藏桃果多酚氧化酶活性、可溶性醌、总酚有很好的抑制作用, 对过氧化氢酶活性维持有一定作用, 可降低果实褐变程度, 更好地抵御活性氧对桃果机体的伤害; 较高温度的射频处理使得丙二醛含量有一定程度上升, 但无显著性差异( $P>0.05$ )。**结论** 射频处理对桃果冻藏褐变具有良好的抑制效果, 可以较好维持桃果的理化品质。

**关键词:** 射频; 水蜜桃; 褐变; 冻藏; 热激

## Effects of radio frequency and heat shock treatment on the browning and quality of honey peaches during frozen storage

XUAN Xiao-Ting<sup>1</sup>, ZHONG Xue-Zhen<sup>2</sup>, SHANG Hai-Tao<sup>1</sup>, ZHANG Yong<sup>2</sup>,  
LIN Xu-Dong<sup>1</sup>, ZHU Lin<sup>1\*</sup>

(1. Institute of Agricultural Products Processing, Ningbo Academy of Agricultural Sciences, Ningbo 315100, China;  
2. Ningbo Yuanlan Food Technology Co., Ltd., Ningbo 315502, China)

**ABSTRACT: Objective** To explore the browning prevention effects of radio frequency and heat shock treatment on honey peach during frozen storage. **Methods** Heat shock and radio frequency with different durations were used for pretreatment, and the changes in browning and quality were monitored over a 7 days frozen storage period. **Results** Compared with heat shock treatment, radio frequency treatment showed a smaller impact on the TSS/TA and pH of the peaches, and significantly reduced electrical conductivity ( $P<0.05$ ), indicating that it could be better maintain the integrity of the peach cell membrane by radio frequency pretreatment. Based on the studies of key enzymes, substrates, and products related to browning, it showed a good inhibitory effect of radio frequency treatment on the activity of polyphenol oxidase, soluble quinones, and total phenols in frozen peaches, and which had a certain effect on maintaining catalase activity. This could reduce the degree of fruit browning and better resist the

收稿日期: 2024-11-04

基金项目: 宁波市科技特派员项目(2024S212); 宁波市奉化区科技计划项目(202402105); 宁波市农业技术推广项目(2023NT011)

第一作者: 宣晓婷(1991—), 女, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为微生物控制与食品非热加工。E-mail: xuanxiaoting163@163.com

\*通信作者: 朱麟(1984—), 男, 研究员, 主要研究方向为农产品保鲜与高值化利用。E-mail: zhulin0822@163.com

damage of reactive oxygen species to the peach fruit. A slight increase in malondialdehyde content was observed under higher temperature of radio frequency treatment, but there was no significant difference ( $P>0.05$ ). **Conclusion** Radio frequency treatment has a good inhibitory effect on peach browning and can better maintain the physicochemical quality of the peaches.

**KEY WORDS:** radio frequency; honey peach; browning; frozen storage; heat shock

## 0 引言

水蜜桃为蔷薇科桃属植物果实,其口感鲜美、营养丰富,一直备受消费者喜爱。由于水蜜桃为季节性产品,且为呼吸跃变型果实,采后极易发生品质变化,限制鲜食水蜜桃的市场供应,而促使桃制品产业的蓬勃发展。近年来,桃制品种类日益丰富,包括桃罐头、桃干、桃味饮品等,满足了人们在不同季节对水蜜桃的需求<sup>[1]</sup>。桃果实中酚类物质含量较高,在加工和储存过程中易发生褐变<sup>[2]</sup>;且水蜜桃对于低温较为敏感,低温储藏时也难以避免缓慢酶促褐变的发生,因此,酶促褐变成为影响桃制品品质的关键因素之一<sup>[3-4]</sup>。

酶促褐变是在有氧条件下,植物中的酚类物质在多酚氧化酶(polyphenoloxidase, PPO)和过氧化物酶(peroxidase, POD)等酶的催化作用下,氧化形成醌类物质,进而聚合形成大分子褐色物质的化学反应<sup>[5-7]</sup>。酶促褐变对桃制品的色泽、口感与营养的影响均较为显著<sup>[8-9]</sup>。抑制酶促褐变的方法可以分为物理方法(低温处理、热激处理等)、化学方法(添加抗氧化剂、酸处理等)、生物方法(基因工程技术等)、综合方法(气调包装、真空包装等)<sup>[10]</sup>。其中热激处理作为传统的抑制果蔬褐变的方法已应用广泛,热激处理通过短时间的高温处理来改变酶的活性和结构,从而使酶失去活性。有报道苹果、香蕉等果品中 PPO 活性在 60~75 °C 均发生失活<sup>[11-12]</sup>。但热激处理易影响果蔬的营养和风味,同时如中心温度与表皮温度不一致可能会导致钝酶防褐变效果不均匀等问题。随着近年来非热加工技术的不断发展,脉冲、超高压、射频、超声波等物理场技术在钝酶方面的研究逐渐深入。射频是利用 3~300 MHz 的高频电磁波对物料进行加热和处理<sup>[13-14]</sup>。已有学者将射频技术应用用于 NFC 苹果汁的钝酶,发现射频处理苹果组织能够在苹果细胞破碎之前实现 PPO 钝化,同时保持果汁良好的色泽和总酚(total phenol, TP)等营养物质<sup>[15]</sup>,因此射频处理在果品钝酶方面有一定应用前景。

本研究采用热激和不同时间的射频对奉化水蜜桃进行预处理,并监测其在冻藏 7 d 内的褐变及品质变化情况,重点关注理化品质[可溶性固形物(total soluble solid, TSS)含量、可滴定酸(titratable acid, TA)、固酸比(TSS/TA)、pH、电导率]、褐变关键酶[PPO、过氧化氢酶(catalase, CAT)活性]、底物(总酚)和产物(可溶性醌含量)以及丙二醛

(malonaldehyde, MDA)含量。通过比较这两种处理方式的效果,以期有效解决桃果冻藏酶促褐变的问题,从而提高桃果的品质和稳定性,满足消费者对高品质桃加工品的需求。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

选择成熟度相似、无外观损伤、大小均匀的奉化“玉露”水蜜桃(桃直径不超过 8.5 cm),用 PE 袋包装并在 -0.5~1.0 °C 下冷藏待用。

CAT 试剂盒、PPO 试剂盒、MDA 试剂盒、总酚(total phenols, TP)试剂盒(北京索莱宝科技有限公司);甲醇(分析纯,国药集团化学试剂有限公司)。

### 1.2 仪器与设备

HGJL-5RFS 食品射频加工装备(合肥哈工金浪装备科技有限公司);PAL-BX/ACID F5 糖酸度仪(日本 ATAGO 爱拓股份有限公司);DDS-308A 数显电导率仪(上海仪电科学仪器股份有限公司);Ci64 色差仪(美国爱色丽有限公司);MS105DU 精密天平(精度 0.1 mg)、FE28 型 pH 计[梅特勒托利多科技(中国)有限公司];Readmax1900 光吸收全波长酶标仪(上海闪谱生物科技有限公司);HC-3018R 高速冷冻离心机(安徽中科中佳科学仪器有限公司);VORTEX1 振荡器(德国 IKA 公司)。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 射频处理

将大小均一、品质优良的水蜜桃于 5 kW、27.14 MHz 条件下进行射频处理(极板间距为 9 cm),待水蜜桃中心温度平衡后(约为 70 °C),分别继续处理 0、10、20、30 min 得到实验组(RF 组)样品,以不做任何处理的水蜜桃为对照组(CK 组),将 CK 组和实验组样品分别与 -18 °C 保存 0 d、7 d,以分析随时间延长水蜜桃品质的变化。

#### 1.3.2 热激处理

对大小均一、品质优良的水蜜桃热处理 10 min,待水蜜桃中心温度达 70 °C 时停止处理,得到热激后的实验组样品,将热激实验组样品分别与 -18 °C 保存 0 d、7 d,以分析随时间延长水蜜桃品质的变化。

### 1.4 测定方法

#### 1.4.1 TSS、TA 的测定

利用 ATAGO 糖酸度仪 PAL-BX/ACID F5 分别测定桃

果肉样品的 TSS 和 TA, 并计算 TSS/TA。

#### 1.4.2 电导率和 pH 测定

利用 DDS-308A 数显电导率仪和 pH 计分别测定电导率和 pH。

#### 1.4.3 色差测定

将水蜜桃果肉去皮打浆后利用 X-Rite 色差仪测定其色差值, 记录  $L^*$ 、 $a^*$  和  $b^*$ , 每个样品重复 6 次, 取其平均值。其中  $L$  表示明暗值, 正值为明、负值为暗;  $a$  表示红绿值, 正值为红色、负值为绿色;  $b$  表示黄蓝值, 正值为黄色、负值为蓝色。以未处理桃果的色值为初始值( $L_0^*$ 、 $a_0^*$  和  $b_0^*$ ), 按如公式(1)计算色差  $\Delta E$ 。

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (1)$$

式中:  $\Delta L = L^* - L_0^*$ ,  $\Delta a = a^* - a_0^*$ ,  $\Delta b = b^* - b_0^*$ 。

#### 1.4.4 PPO 活性测定

利用 PPO 活性测定试剂盒测定桃果肉样品。PPO 酶活计算如公式(2)。

$$\text{PPO 活性}/(\text{U/g}) = \Delta A \div 0.005 \times V_{\text{反应}} \div (W \times V_{\text{样}} \div V_{\text{样总}}) \div T \quad (2)$$

式中:  $\Delta A$  为 410 nm 处测定管和对照管吸光度差值;  $V_{\text{反应}}$  为反应体系总体积, mL; 0.005 为单位酶活力对应吸光值变化的量;  $V_{\text{样}}$  为加入反应体系中样本体积, mL;  $W$  为样本质量, g;  $V_{\text{样总}}$  为加入提取液体积, mL;  $T$  为反应时间, min。

#### 1.4.5 CAT 活性测定

利用 CAT 活性测定试剂盒测定桃果肉样品。CAT 酶活计算如公式(3)。

$$\text{CAT}/(\text{U/g}) = [\Delta A \times V_{\text{反应}} \div (\epsilon \times d) \times 10^6] \div (V_{\text{样}} \div V_{\text{样总}} \times W) \div T \quad (3)$$

式中:  $V_{\text{反应}}$  为反应体系总体积, mL;  $\epsilon$  为  $\text{H}_2\text{O}_2$  摩尔消光系数, 43.6 L/(mol · cm);  $d$  为 96 孔 UV 板光径, 0.6 cm;  $V_{\text{样}}$  为加入反应体系中样本体积, mL;  $V_{\text{样总}}$  为加入提取液体积, mL;  $W$  为样本质量, g。

#### 1.4.6 可溶性鞣含量测定

称取 10 mL 水蜜桃汁与 20 mL 甲醇匀浆, 定容 50 mL, 然后超声 30 min, 离心。取上清液于波长 437 nm 处测其吸光度。

#### 1.4.7 MDA 含量测定

利用 MDA 含量检测试剂盒测定桃果肉样品。MDA 计算如公式(4)。

$$\text{MDA 含量}/(\text{nmol/g}) = [\Delta A \times V_{\text{反应}} \div (\epsilon \times d) \times 10^9] \div (W \times V_{\text{样}} \div V_{\text{样总}}) \times F \quad (4)$$

式中:  $V_{\text{反应}}$  为反应体系总体积, L;  $\epsilon$  为 MDA 摩尔消光系数,  $1.55 \times 10^5$  L/(mol · cm);  $V_{\text{样}}$  为加入反应体系中样本体积, mL;  $d$  为 96 孔 UV 板光径, 0.6 cm;  $V_{\text{样总}}$  为加入提取液体积, mL;  $F$  为稀释倍数。

#### 1.4.8 TP 含量测定

利用 TP 含量检测试剂盒测定桃果肉样品。TP 计算如公式(5):

$$\text{总酚含量}/(\text{mg/g}) = \frac{x \times V_{\text{提取}}}{W} \quad (5)$$

式中:  $V_{\text{提取}}$  为加入提取液体积, mL;  $W$  为样本质量, g;  $x$  为样本质量浓度, mg/mL。

## 1.5 数据处理

所有实验结果均平行测定 3 次, 测定所得数据均以平均值  $\pm$  标准偏差的形式表示, 数据采用 SPSS19.0 软件进行显著性分析, 用 Origin 8.5 软件进行作图。

## 2 结果与分析

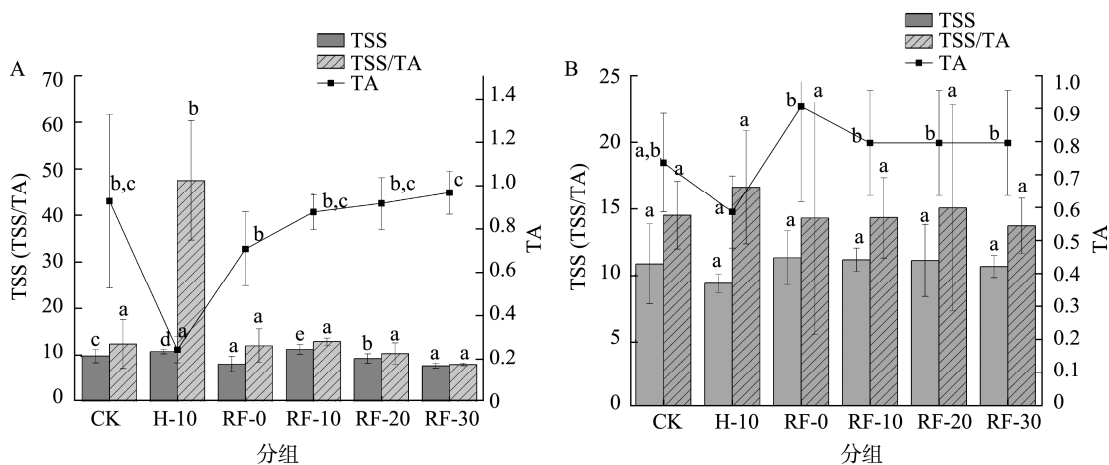
### 2.1 TSS/TA 分析

TSS 和 TA 能直接反映水蜜桃冷冻期贮藏品质的变化, 也是判定其成熟度的重要标志之一。图 1 为射频和热激处理对冷冻桃果 TSS 含量、TA 和 TSS/TA 的影响, 由图 1 可知, 射频和热激处理均显著改变了桃果的 TSS 含量、TA 和 TSS/TA ( $P < 0.05$ ), 其中热激处理桃果的 TA 含量下降最为显著, 下降了 73.66%, 进而使得热激处理的桃果 TSS/TA 提高到  $47.9 \pm 12.89$ 。这可能是由于热激处理使得桃果中不可溶性的多糖降解为可溶性糖, 进而增加糖度<sup>[16]</sup>; 同时热激处理对桃果细胞结构造成一定程度的损伤, 导致部分有机酸等水溶性营养成分流失<sup>[17]</sup>。随着射频处理的时间延长, 桃果的 TA 呈现逐渐上升的趋势, TSS 含量呈波动变化。冷冻桃果冻藏 7 d 后呈现相类似的结论, 热激处理会增加桃果的 TSS/TA, 射频处理对桃果 TSS/TA 的影响相对较小。

### 2.2 电导率和 pH 分析

通过电导率的分析可以间接反映桃果细胞膜通透性<sup>[18]</sup>。图 2 为射频和热激处理对冷冻桃果电导率的影响。由图 2 可知, 相比与对照组, 热激处理显著提高了桃果的电导率 ( $P < 0.05$ ), 而射频处理显著降低了桃果的电导率 ( $P < 0.05$ )。结果表明, 热激处理对桃果的细胞膜通透性有较大影响, 而射频处理能更好的保持桃果细胞膜的完整性。此外, 贮藏第 7 d 射频处理的桃果电导率均有所提升, 仅 RF-10 组下降, 而热激处理的电导率无明显变化, 可能的原因是由于在冷冻期间冰晶的存在导致桃果细胞膜进一步受损, 使得电导率上升, 而热激处理在第 0 d 时细胞膜已发生较大破坏, 因此贮藏期间没有进一步发生变化。

射频和热激处理对冷冻桃果 pH 的影响如图 3 所示。水蜜桃初始 pH 为  $4.63 \pm 0.12$  (近酸性), 射频和热激处理后桃果的 pH 未发生显著变化 ( $P > 0.05$ ), 但冷冻贮藏 7 d 后, 热激组和 RF-20 组桃果 pH 降低, 空白对照组和其余射频组桃果 pH 升高, 但不同组之间差异并不显著 ( $P > 0.05$ )。张婷婷等<sup>[19]</sup>在研究微波对苹果汁的褐变及品质影响时同样发现其对 pH、TSS、TA 等并无显著影响。



注: A. 贮藏第 0 d; B. 贮藏第 7 d。图中不同小写字母表示不同处理组间数据具有显著性差异( $P < 0.05$ ), 图 2~9 同。

图 1 射频和热激处理对冷冻桃果 TSS 含量、TA 和 TSS/TA 的影响

Fig.1 Effects of radio frequency and heat shock treatment on the TSS, TA and TSS/TA of honey peach during frozen storage

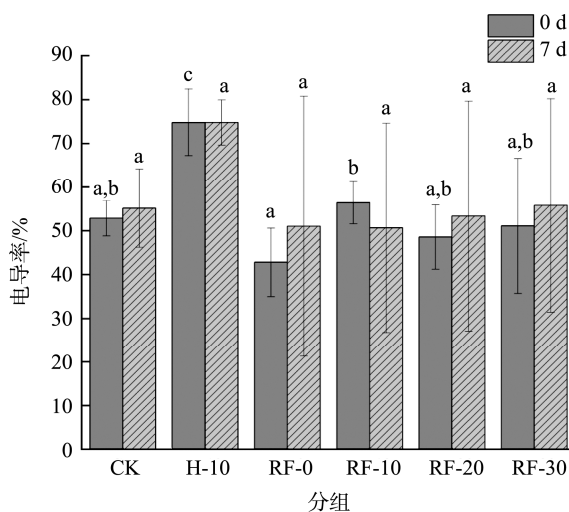


图 2 射频和热激处理对冷冻桃果电导率的影响

Fig.2 Effects of radio frequency and heat shock treatment on the conductivity of honey peach during frozen storage

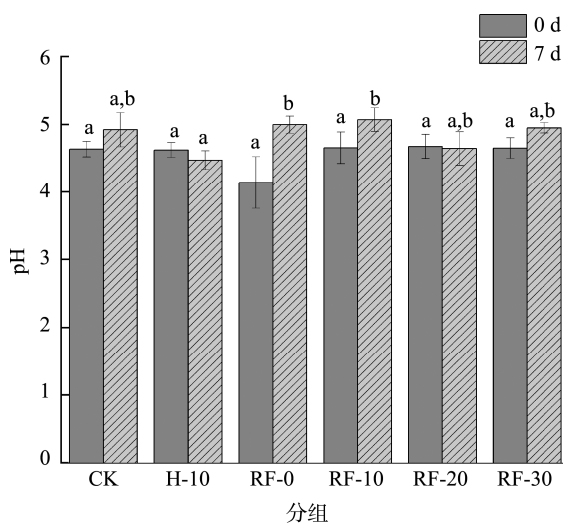


图 3 射频和热激处理对冷冻桃果 pH 的影响

Fig.3 Effects of radio frequency and heat shock treatment on the pH of honey peach during frozen storage

### 2.3 色差分析

色泽是食品材料最重要的外观特性之一,也是评价桃果的重要品质因素之一。射频和热激处理对桃果色泽的影响如图 4 和表 1 所示。如图 4 所示,射频组桃果随着处理时间的延长,色泽变化由外围逐渐向内部转变,直至 RF-30 组整体色泽较为均匀。相比于对照组和射频组,热激组桃果整体偏向暗红色。由表 1 可知,射频和热激处理整体上显著改变了桃果的色泽( $P < 0.05$ ),第 0 d 时,热激处理的  $\Delta E$  最小( $11.27 \pm 3.50$ )。随着射频处理时间的延长,其色泽变化程度越来越小,其中 RF-20 处理组的  $\Delta E$  最小,说明此处理条件的效果最为接近热激处理。热激处理主要影响了桃果的  $L^*$  和  $a^*$ ,使得桃果亮度提高、红度下降,而射频处理具有相似的规律。然而,在冷冻贮藏 7 d 后,热激和射频处理组的  $L^*$  和  $a^*$  均与空白对照组没有显著差异( $P > 0.05$ ),

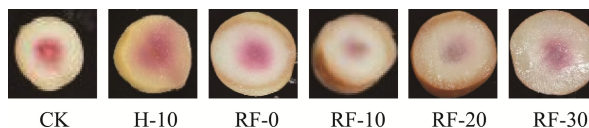


图 4 射频和热激处理对冷冻桃果色泽的影响

Fig.4 Effects of radio frequency and heat shock treatment on the colour of honey peach during frozen storage

但  $b^*$  呈现明显下降。因此,热激和射频处理对冷冻桃果的褐变有一定的抑制作用。

### 2.4 PPO 活性分析

PPO 是酶促褐变过程中作用于植物多酚类物质使其氧化产生醌类物质的关键作用酶<sup>[20]</sup>。图 5 为射频和热激处理对冷冻桃果 PPO 的影响。在未冷冻贮藏时,与空白对照组相比,热激处理降低了桃果中 PPO 活性 73.75%,不同射频处理分别降低了桃果中 PPO 活性 60.10%、60.00%、

表 1 射频和热激处理对冷冻桃果色泽的影响

Table 1 Effects of radio frequency and heat shock treatment on the colour of honey peach during frozen storage

时间/d	色泽	CK	H-10	RF-0	RF-10	RF-20	RF-30
0	$L^*$	40.26±1.97 <sup>a</sup>	50.54±3.32 <sup>b</sup>	64.38±4.12 <sup>c</sup>	56.39±3.21 <sup>bc</sup>	53.87±2.81 <sup>b</sup>	56.08±3.46 <sup>bc</sup>
	$a^*$	3.51±1.13 <sup>b</sup>	0.08±1.64 <sup>a</sup>	2.63±0.19 <sup>ab</sup>	2.22±0.85 <sup>ab</sup>	4.76±0.72 <sup>b</sup>	3.49±1.87 <sup>b</sup>
	$b^*$	8.54±1.07 <sup>a</sup>	5.62±0.36 <sup>a</sup>	7.78±0.53 <sup>a</sup>	6.89±1.52 <sup>a</sup>	7.35±1.57 <sup>a</sup>	7.70±1.58 <sup>a</sup>
	$\Delta E$	---	11.27±3.50 <sup>a</sup>	24.15±4.12 <sup>b</sup>	16.34±3.13 <sup>ab</sup>	13.77±2.97 <sup>b</sup>	15.97±3.44 <sup>ab</sup>
7	$L^*$	46.83±3.91 <sup>a</sup>	56.19±2.32 <sup>a</sup>	53.8±1.79 <sup>a</sup>	49.78±5.9 <sup>a</sup>	51.12±6.07 <sup>a</sup>	49.93±5.35 <sup>a</sup>
	$a^*$	3.80±0.53 <sup>a</sup>	2.85±1.90 <sup>a</sup>	0.72±0.66 <sup>a</sup>	2.38±2.18 <sup>a</sup>	2.88±0.61 <sup>a</sup>	3.11±1.19 <sup>a</sup>
	$b^*$	11.23±1.31 <sup>b</sup>	5.78±0.66 <sup>a</sup>	7.46±1.00 <sup>a</sup>	7.54±2.06 <sup>a</sup>	8.34±0.82 <sup>ab</sup>	8.83±1.08 <sup>ab</sup>
	$\Delta E$	---	11.04±1.99 <sup>a</sup>	8.63±1.11 <sup>a</sup>	7.03±2.46 <sup>a</sup>	6.94±2.68 <sup>a</sup>	5.18±3.84 <sup>a</sup>

注: 同行数据后不同小写字母表示不同处理下冷冻桃果样品间差异显著( $P<0.05$ ), ---表示无此项。

91.23%和 94.22%。因此平衡时间为 20 min 以上的射频处理可以实现 PPO 酶活性降低 90%，此时残留酶活性也很低，具有很好的护色效果。这是由于 PPO 耐热性较低，经较高温度处理时分子间热运动加剧，导致 PPO 酶空间构象改变，破坏了活性中心的三维结构从而降低了 PPO 活力，这与 KAMBLE 等<sup>[21]</sup>的结论相似。在冷冻贮藏第 7 d，空白对照组桃果的 PPO 活性呈现大幅度上升，是第 0 d PPO 活性的 4.49 倍；热激组桃果的 PPO 活性上升了 1.03 倍，RF-10、RF-20 和 RF-30 组桃果的 PPO 活性分别上升了 2.90 倍、9.20 倍和 3.84 倍。冷冻贮藏 7 d 后，RF-30 组的桃果 PPO 活性最低为(9.09±0.69) U/g。研究表明，射频处理对于冻藏桃果 PPO 活性有很好的抑制作用，可降低果实褐变程度，但在贮藏期间 PPO 活性仍会显著上升。

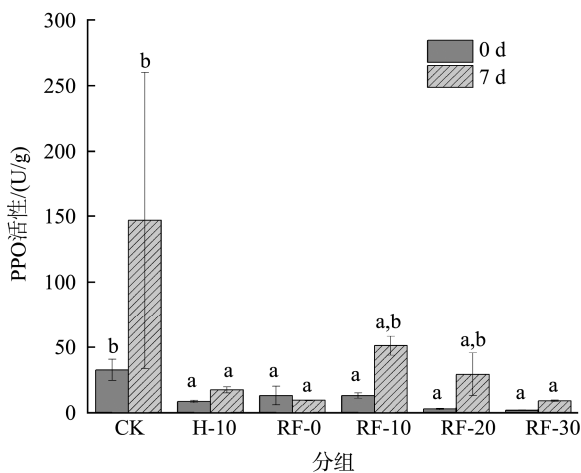


图 5 射频和热激处理对冷冻桃果 PPO 活性的影响

Fig.5 Effects of radio frequency and heat shock treatment on the PPO active of honey peach during frozen storage

## 2.5 CAT 活性分析

CAT 是参与清除自由基的抗氧化系统的关键酶之一，其作用于  $H_2O_2$  使其分解产生水和氧气，与超氧化物歧化

酶(superoxide dismutase, SOD)等关键酶起到协同抵御活性氧(reactive oxygen species, ROS)对桃果机体的伤害<sup>[22]</sup>。图 6 为射频和热激处理对冷冻桃果 CAT 的影响。热激、RF-0、RF-10、RF-20、RF-30 处理分别降低了桃果 CAT 活性 41.85%、24.39%、30.60%、56.22%和 54.67%，可以看出 RF-20 和 RF-30 射频处理对桃果中 CAT 活性有更为明显的抑制作用。在后续冷冻贮藏过程中，桃果 CAT 活性呈下降趋势，仅 RF-30 组 CAT 值上升。贮藏期 CAT 活性下降的原因可能与前期启动清除代谢过程中产生的 ROS 有关。这与赵迎丽等<sup>[23]</sup>的研究结果一致，玉露香梨在冷藏期间 CAT 活性呈现先快速上升后下降。刘倩婷等<sup>[24]</sup>研究表明褐变更为严重的石榴果皮 CAT 活性在贮藏后期明显下降，保持高的 CAT 酶活性更有利于果实的贮藏。因此，RF-30 射频处理对桃果 CAT 活性维持有一定作用，能更好的抵御 ROS 对桃果机体的伤害。

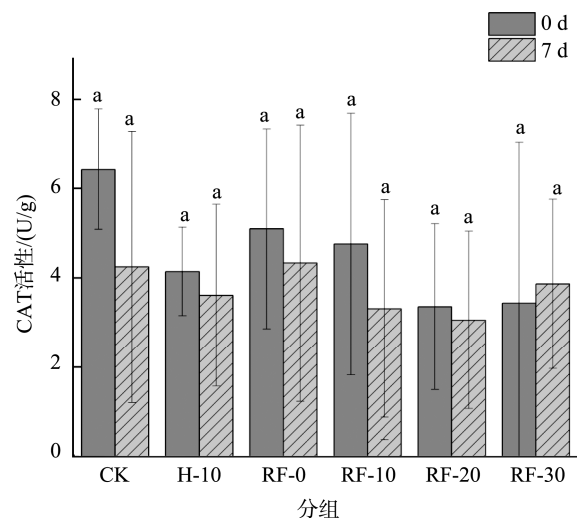


图 6 射频和热激处理对冷冻桃果 CAT 活性的影响

Fig.6 Effects of radio frequency and heat shock treatment on the CAT active of honey peach during frozen storage

## 2.6 可溶性醌含量分析

可溶性醌是桃果酶促褐变的重要产物之一, 桃果褐变加强则其含量增加。图 7 为射频和热激处理对冷冻桃果可溶性醌含量的影响。由图 7 可知, 桃果初始可溶性醌含量为  $0.12 \pm 0.01$ , 在贮藏第 0 d, 射频和热激处理降低了桃果中可溶性醌含量, 但差异并不显著 ( $P > 0.05$ ), 其中热激组和 RF-30 射频组桃果可溶性醌含量最低, 分别为  $0.10 \pm 0.01$  和  $0.11 \pm 0.01$ 。在冷冻贮藏第 7 d, 空白对照组和热激组桃果的可溶性醌含量均上升, 而射频组呈下降趋势。射频组桃果可溶性醌含量低于热激组和空白对照组。可见, 射频处理对桃果褐变具有良好的抑制效果。

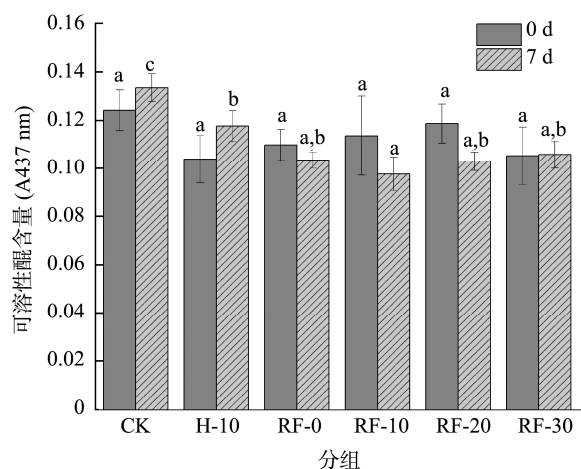


图 7 射频和热激处理对冷冻桃果可溶性醌含量的影响  
Fig.7 Effects of radio frequency and heat shock treatment on the soluble quinone content of honey peach during frozen storage

## 2.7 MDA 含量分析

MDA 是膜脂过氧化产物, 其含量越高表明细胞膜受到氧化损伤程度越高<sup>[25]</sup>。图 8 为射频和热激处理对冷冻桃果 MDA 含量的影响。由图 8 可知, 在贮藏第 0 d, 与空白对照组相比, 热激和射频处理桃果的 MDA 含量未发生显著变化 ( $P > 0.05$ ), 但其中 RF-30 射频处理组的 MDA 最高, 相似的规律在冷冻贮藏第 7 d 同样存在。说明射频和热激处理对桃果细胞膜损伤影响相似, 这是由于射频处理和热激处理均属于热处理, 对桃果细胞膜的完整性均有一定影响。有研究表明热处理的温度对果蔬冷害及 ROS 代谢的影响不相同, 艾文婷等<sup>[26]</sup>报道相较于新鲜黄瓜,  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 处理组 MDA 含量上升 49.5%, 但  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 处理组 MDA 含量却低于 CK 组。因此适宜的热处理能够减缓果品在低温胁迫下的不良反应。

## 2.8 TP 含量分析

TP 作为果品中重要的抗氧化活性物质, 能显著提升植物的抗胁迫性和抗病性, 但多酚容易被氧化形成色素物质而形成褐变。图 9 为射频和热激处理对冷冻桃果 TP

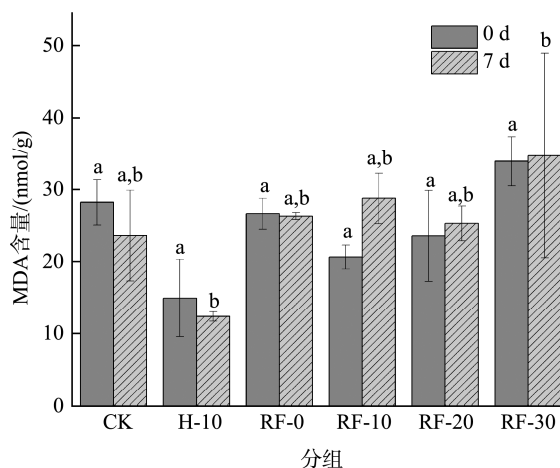


图 8 射频和热激处理对冷冻桃果 MDA 含量的影响  
Fig.8 Effects of radio frequency and heat shock treatment on the MDA content of honey peach during frozen storage

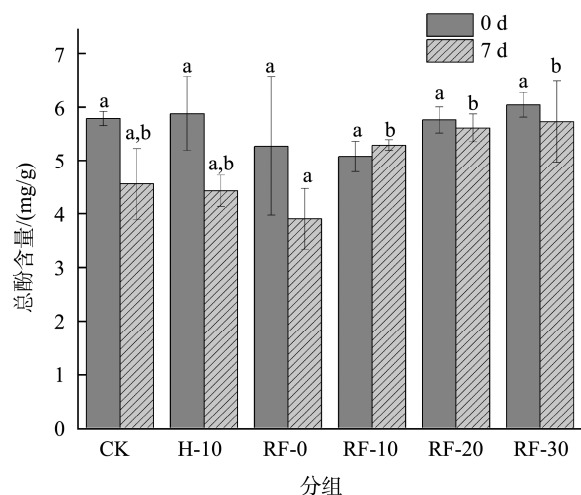


图 9 射频和热激处理对冷冻桃果 TP 含量的影响  
Fig.9 Effects of radio frequency and heat shock treatment on the TP content of honey peach during frozen storage

含量的影响。由图 9 可知, 空白对照组桃果的 TP 含量为  $(5.79 \pm 0.13)\text{ mg/g}$ 。相较于热激处理, 射频处理对桃果中 TP 含量的影响更为显著, 特别是 RF-10 处理组, TP 含量显著下降了 12.33%; 而当射频维持时间继续延长, 桃果中的 TP 含量逐渐上升至  $(6.04 \pm 0.23)\text{ mg/g}$ 。这是由于射频属于高频技术, 具有一定的辅助提取作用, 随着射频处理时间的延长, 桃果中 TP 的提取率逐渐升高<sup>[27]</sup>。相似的情况在热激处理中也发现, 热激处理组桃果的 TP 含量呈上升趋势, 比空白对照组上升了 1.6%。在冻藏 7 d 后, 桃果中 TP 含量整体呈现下降趋势, 其中 RF-10、RF-20 和 RF-30 射频处理组桃果多酚含量均高于对照组。冷冻贮藏期间 TP 含量的下降可能与氧化、聚合导致的结构变化相关<sup>[28]</sup>, 而射频处理对这一变化有一定的抑制作用。该结果表明, 射频处

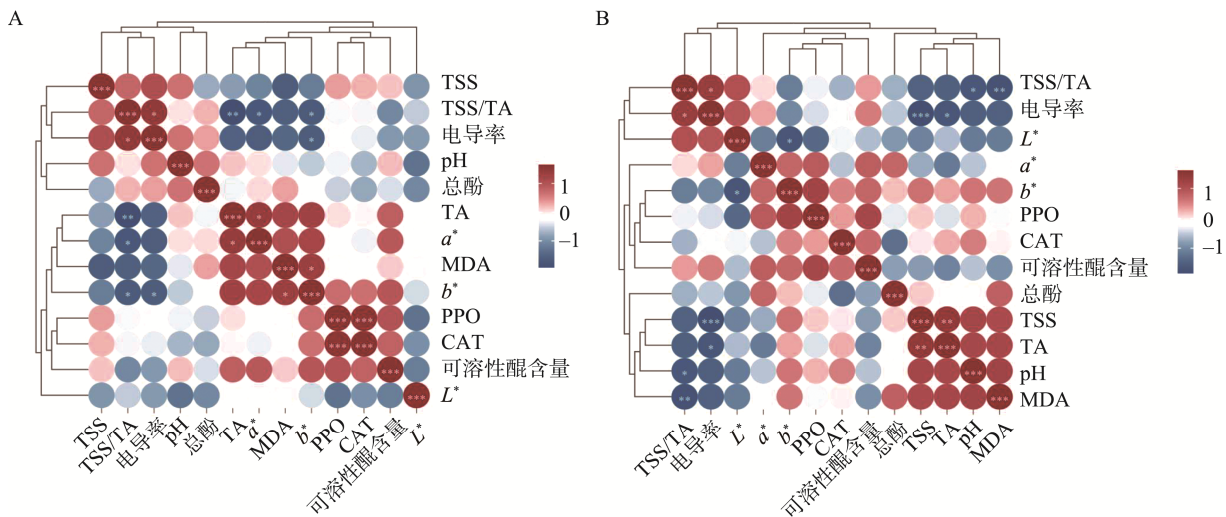
理前期能一定程度降低 TP 含量,但在冻藏期间又抑制了桃果中 TP 的降解。

近年来有许多学者关注果品贮藏期间酚类物质的变化规律,这是由于酚类物质相较于其他营养成分更易发生氧化褐变,进而对果品的品质带来显著不利影响。刘卫等<sup>[29]</sup>研究发现贮藏初期总酚降低较快,这是由于初期氧气和多酚底物含量较高,容易发生酚类化合物的氧化褐变反应,而随着底物的减少,多酚的氧化缩合反应也随之降低。贮藏后期,酚类化合物会与蛋白质发生络合反应进一步降低总酚含量<sup>[30]</sup>。相似的结果在柠檬<sup>[31]</sup>、月柿果品<sup>[32]</sup>等研究中发现。

## 2.9 相关性分析

对射频和热激处理的桃果样品理化品质进行相关性

分析,得到相关系数热图(图 10)。如图 10 所示,数据的相关系数对应显著性大小,相关系数越大表示两变量间越显著相关。在贮藏第 0 d, TA 与 TSS/TA 间呈显著( $P<0.05$ )负相关, CAT 和 PPO 间呈极显著( $P<0.01$ )正相关。在冷冻贮藏第 7 d, 电导率和 TSS 间呈极显著( $P<0.01$ )负相关, TSS/TA 和 MDA 呈显著( $P<0.05$ )负相关。类似地,相关研究发现, CAT 和 PPO 酶活呈正相关, TSS/TA 和 MDA 呈负相关<sup>[33-34]</sup>。这是由于水蜜桃褐变过程是 ROS 产生和积累的过程, CAT 和 PPO 均是桃果体内存在的酶促抗氧化防御系统的重要保护酶,射频和热激处理对桃果褐变的影响主要体现在 CAT 和 PPO 活性。此外,冻藏后桃果的 TSS/TA 值可间接反映桃果细胞膜透性,细胞膜完整性对于桃果的褐变具有重要意义,同时也会影响 MDA 含量。



注: A. 贮藏第 0 d, B. 为贮藏第 7 d。\*表示有一定相关( $P<0.1$ ), \*\*表示显著相关( $P<0.05$ ), \*\*\*表示极显著相关( $P<0.01$ )。

图 10 相关性热图

Fig.10 Heatmap of correlation coefficient

## 3 结论

本研究采用热激和不同时间的射频预处理奉化水蜜桃,并监测其在冻藏 7 d 内的褐变及品质变化情况。实验结果表明,射频和热激处理后桃果的 pH 未发生显著变化( $P>0.05$ ),但冻藏后 pH 发生了一定变化。相比于热激处理,射频处理对桃果 TSS/TA 的影响相对较小,显著降低了桃果的电导率( $P<0.05$ ),表明热激处理对桃果的细胞膜通透性有较大影响,而射频处理能更好的保持桃果细胞膜的完整性。冻藏后射频组桃果由于冰晶生成引起电导率进一步改变。此外,热激和射频处理对冷冻桃果的褐变均有一定的抑制作用。基于褐变关键酶、底物和产物的研究发现,射频处理对于冻藏桃果 PPO 活性有很好的抑制作用,对 CAT 活性维持有一定作用,可降低果实褐变程度,更好的抵御

ROS 对桃果机体的伤害,但在贮藏期间 PPO 活性仍会显著上升;射频处理前期能一定程度降低总酚含量,但在冻藏期间又抑制了桃果中总酚的降解;此外射频组桃果可溶性酚含量显著低于热激组和空白对照组( $P<0.05$ )。但较高温度的射频和热激处理使得丙二醛含量有一定程度上升。基于相关性分析发现褐变关键酶 CAT 和 PPO 间呈极显著( $P<0.01$ )正相关,而 TSS/TA 和 MDA 呈显著( $P<0.05$ )负相关。综上,射频处理对桃果褐变具有良好的抑制效果,可以较好维持桃果的理化品质。本研究为射频技术在果品钝酶领域的应用奠定了理论基础,由于本研究是基于氧化关键酶等进行钝酶机制研究,尚处于表观研究水平,未来基于分子水平的射频钝酶机制的研究将进一步开展,同时探究射频技术对果品内部代谢与细胞结构的影响,以期更全面地阐述射频钝酶的机制。

## 参考文献

- [1] 李玥, 张纯, 王润峥, 等. 现代食品加工技术在桃加工中的应用与进展[J]. 河北果树, 2023(4): 6-8.  
LI Y, ZHANG C, WANG RZ, *et al.* Application and progress of modern food processing technology in peach processing [J]. Hebei Fruits, 2023(4): 6-8.
- [2] 张纯, 李玥, 刘炳浩, 等. 河北省桃加工技术进展与发展趋势[J]. 河北果树, 2022(4): 1-2.  
ZHANG C, LI Y, LIU BH, *et al.* Progress and development trend of peach processing technology in Hebei Province [J]. Hebei Fruits, 2022(4): 1-2.
- [3] 龚意辉, 吴志蒙, 彭淑君, 等. 采后桃果实酶促褐变机理的研究进展[J]. 现代园艺, 2021, 44(13): 20-22, 6.  
GONG YH, WU ZM, PENG SJ, *et al.* Progress on enzymatic browning mechanism of harvested peach fruit [J]. Xiandai Horticulture, 2021, 44(13): 20-22, 6.
- [4] 陈维宁, 李旋, 王文月, 等. 桃酶促褐变机理与调控技术研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(7): 290-298.  
CHEN WN, LI X, WANG WY, *et al.* Research progress on the mechanism and regulation of enzymatic browning in peach fruit [J]. Food Sci, 2024, 45(7): 290-298.
- [5] 李京赞, 刘玉德, 石文天, 等. 植物果蔬的褐变及抑制的研究[J]. 包装与食品机械, 2019, 37(1): 63-68.  
LI JZ, LIU YD, SHI WT, *et al.* Advances in research on browning and inhibition of plant fruits and vegetables [J]. Packaging and Food Machinery, 2019, 37(1): 63-68.
- [6] 沈茹茹, 万冰, 张舒蓉, 等. 鲜切果蔬褐变问题研究现状[J]. 科技视界, 2017(16): 52-53.  
SHEN RR, WAN B, ZHANG SR, *et al.* Research status of the browning problem of freshly cut fruits and vegetables [J]. Science Technology Vision, 2017(16): 52-53.
- [7] 许传兵, 宋丽廷. 鲜切果蔬褐变控制研究进展[J]. 食品安全导刊, 2022(33): 188-192.  
XU CB, SONG LT. Research progress on browning control of fresh-cut fruits and vegetables [J]. China Food Safety Magazine, 2022(33): 188-192.
- [8] 王润峥, 王勇, 刘炳浩. 桃果汁护色澄清技术研究进展与发展趋势[J]. 河北果树, 2023(1): 1-2, 5.  
WANG RZ, WANG Y, LIU BH. Research progress and development trend of clarifying technology of peach juice [J]. Hebei Fruits, 2023(1): 1-2, 5.
- [9] 车曦, 高琳, 张仁堂, 等. 果蔬发酵黑化褐变机制及晚期糖基化产物调控研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(10): 381-387.  
CHE X, GAO L, ZHANG RT, *et al.* Research progress on mechanism of blackening and browning in fruit and vegetable fermentation and regulation of advanced glycosylation products [J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(10): 381-387.
- [10] 黄光荣, 陈劼. 切分果蔬的酶促褐变抑制[J]. 浙江科技学院学报, 2002(1): 21-25.  
HUANG GR, CHEN Z. Inhibition of enzymatic browning in minimally processed vegetables and fruits [J]. Journal of Zhejiang University of Science and Technology, 2002(1): 21-25.
- [11] 张勇, 池建伟, 温其标, 等. 香蕉多酚氧化酶褐变性质的研究[J]. 食品与发酵工业, 2004(5): 53-57.  
ZHANG Y, CHI JW, WEN QB, *et al.* Study on the browning characteristics of polyphenol oxidase in banana [J]. Food and Fermentation Industry, 2004(5): 53-57.
- [12] 仲飞. 红星苹果多酚氧化酶某些特性及其抑制剂的研究[J]. 园艺学报, 1998(2): 81-83.  
ZHONG F. Characteristics of polyphenol oxidase and its inhibition in red delicious apple [J]. Acta Horticulturae Sinica, 1998(2): 81-83.
- [13] 陈展册, 钟勇, 高文娜, 等. 进境水果检疫性粉蚧植物检疫处理技术研究进展[J]. 中国口岸科学技术, 2024, 6(S1): 11-20.  
CHEN ZC, ZHONG Y, GAO WN, *et al.* Research progress on plant quarantine treatment technology for quarantine mealybugs in imported fruits [J]. China Port Science and Technology, 2024, 6(S1): 11-20.
- [14] 刘静, 赵亚, 石启龙. 果蔬和水产品新型干燥预处理技术研究进展及未来展望[J]. 食品工业科技, 2022, 43(10): 32-42.  
LIU J, ZHAO Y, SHI QL. Research progress and future prospects of novel pretreatment technologies for the drying of fruits and vegetables and aquatic products [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(10): 32-42.
- [15] 田一雄. 基于射频与脉冲电场的 NFC 苹果汁钝酶杀菌新工艺研究[D]. 无锡: 江南大学, 2018.  
TIAN YX. Radio frequency combined with pulsed electric field treatment for endogenous enzyme and microbes [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018.
- [16] SHAMS MA, THOMPSON DR. Quantitative determination of pea losses as affected by conventional water blanching [J]. Journal of Food Science, 2010, 52(4): 1006-1009.
- [17] 高阳, 丁菲, 吴南生, 等. 漂烫时间对南酸枣果实糖酸组分的影响[J]. 江西农业大学学报, 2021, 43(4): 759-765.  
GAO Y, DING F, WU NS, *et al.* Effect of different blanching time lengths on sugar and acid components of choerospondias axillaris fruit [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2021, 43(4): 759-765.
- [18] 千春录, 朱芹, 高姗, 等. 外源褪黑素处理对采后水蜜桃冷藏品质及冷害发生的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(3): 702-708.  
QIAN CL, ZHU Q, GAO S, *et al.* Effects of exogenous melatonin treatment on cold storage quality and chilling injury of postharvest peach fruit [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2020, 36(3): 702-708.
- [19] 张婷婷, 蒲云峰, 侯福荣, 等. 微波预处理对苹果汁褐变及品质的影响[J]. 中国食品学报, 2020, 20(5): 166-173.  
ZHANG TT, PU YF, HOU FR, *et al.* Effect of microwave pretreatment on browning and quality of apple juice [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(5): 166-173.
- [20] SINGH B, SURI K, SHEVKANI K, *et al.* Enzymatic browning of fruit and vegetables: A review [J]. Enzymes in Food Technology, 2018, 1: 63-78.
- [21] KAMBLE HA, GATADE AA, SAHOO AK, *et al.* Effect of blanching treatment on antioxidant activity and color values of sugarcane juice [J]. Materials Today: Proceedings, 2021. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.03.706
- [22] SHI JL, GAO HF, WANG S, *et al.* Exogenous arginine treatment maintains the appearance and nutraceutical properties of hard-and soft-seed pomegranates in cold storage [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9(3): 103389.

- [23] 赵迎丽, 张微, 杨志国, 等. 不同可溶性固形物含量玉露香梨冷藏期抗氧化能力的变化[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(18): 40–45.  
ZHAO YL, ZHANG W, YANG ZG, *et al.* Changes in antioxidant capacity of ‘Yuluxiang’ pear with different soluble solid content during cold storage [J]. Food Research and Development, 2024, 45(18): 40–45.
- [24] 刘倩婷, 郭晓宏, 杜佳铭, 等. 3 种石榴果皮褐变与活性氧及膜脂代谢关系分析[J]. 中国食品学报, 2024, 24(5): 333–345.  
LIU QT, GUO XH, DU JM, *et al.* Analysis of browning and reactive oxygen species and membrane lipid metabolism in husk of three pomegranate cultivars [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(5): 333–345.
- [25] 张丽君, 李敏, 王静, 等. 石榴皮中黄酮类物质的提取及抗氧化研究[J]. 化学工程师, 2021, 35(9): 65–68.  
ZHANG LJ, LI M, WANG J, *et al.* Study on extraction and antioxidant activity of flavones from pomegranate [J]. Chemical Engineer, 2021, 35(9): 65–68.
- [26] 艾文婷, 张敏, 郝爽, 等. 热激温度对采后黄瓜冷害及活性氧代谢的影响[J]. 河南农业大学学报, 2019, 53(2): 244–250.  
AI WT, ZHANG M, HAO S, *et al.* Effects of heat shock temperature on chilling injury and active oxygen metabolism of postharvest cucumber fruits [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2019, 53(2): 244–250.
- [27] 刘家璇, 彭孟晨, 杨雪洁, 等. 射频预处理对杏果热风干燥特性及营养成分的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(3): 176–182.  
LIU JX, PENG MC, YANG XJ, *et al.* Effects of radio frequency pretreatment on hot air drying characteristics and nutrients of apricot [J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(3): 176–182.
- [28] 徐艺洁. 枸杞原浆加工过程中色泽变化与抑制方法的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.  
XU YJ. Study on color change and control methods during processing of Wolfberry pulp [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023.
- [29] 刘卫, 张明美, 宋颖, 等. 低盐腌制白萝卜非酶褐变动力学[J]. 食品科学, 2016, 37(13): 65–70.  
LIU W, ZHANG MM, SONG Y, *et al.* Kinetics of non-enzymatic browning in low-salt pickled radish [J]. Food Science, 2016, 37(13): 65–70.
- [30] 曹娜. 柠檬片干制过程中褐变机理及其控制新技术[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.  
CAO N. Browning mechanism and new control technology of lemon slices during drying [D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.
- [31] 刘晓静. 柠檬冻干片贮藏期间非酶褐变及风味品质变化的研究[J]. 仲恺农业工程学院, 2018. DOI: 10.27700/d.cnki.gzcn.2018.000091  
LIU XJ. Study on non-enzymatic browning and changes in flavor quality of freeze-dried lemon slice during storage [J]. Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2018. DOI: 10.27700/d.cnki.gzcn.2018.000091
- [32] 王春婷. 基于非酶褐变反应研究月柿果片在微波干燥中的变色机理[D]. 柳州: 广西科技大学, 2023.  
WANG CT. Study of color change mechanism of persimmon slices during microwave drying based on non-enzymatic browning reaction [D]. Liuzhou: Guangxi University of Science and Technology, 2023.
- [33] 李秋瑛, 胡铭文, 王宏勋, 等. 乙烯利处理对去皮莲藕酚类和活性氧代谢的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(8): 1–10.  
LI QY, HU MW, WANG HX, *et al.* Effects of ethephon treatment on phenol and active oxygen metabolism of peeled lotus root [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(8): 1–10.
- [34] 金莉莉, 文钰, 陈婉婷, 等. 短波紫外线处理结合近冰温贮藏对采后西梅的保鲜效果[J/OL]. 食品工业科技, 1-19. [2024-12-03]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024080014>  
JIN LL, WEN Y, CHEN WT, *et al.* Effects of UV-C treatment combined with near-freezing temperature storage on preservation of post-harvest prunes [J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 1-19. [2024-12-03]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024080014>

(责任编辑: 蔡世佳 于梦娇)