

# 桃酶促褐变机理与调控技术研究进展

陈维宁, 李 旋, 王文月, 毕金峰\*

(中国农业科学院农产品加工研究所, 农业农村部农产品加工重点实验室, 北京 100193)

**摘要:** 桃是我国古老的果品之一, 极具营养价值和商品价值。桃是典型的呼吸跃变型果实, 采后贮藏中内部易发生褐变, 且桃加工中褐变速率快、程度高, 较难控制, 对果实品质和经济价值造成影响。目前针对桃加工褐变特征和机理研究的系统性不强, 调控技术方法针对性不足, 效果不明显。本文针对桃果实酶促褐变特征、机理、褐变关键因子及褐变调控手段等相关国内外研究现状进行梳理, 并对桃酶促褐变调控技术进行梳理, 旨在为桃贮藏及加工中酶促褐变的调控提供参考, 促进桃鲜食和加工制品的品质提升。

**关键词:** 桃; 酶促褐变; 褐变机理; 调控技术

## Research Progress on the Mechanism and Regulation of Enzymatic Browning in Peach Fruit

CHEN Weining, LI Xuan, WANG Wenyue, BI Jinfeng\*

(Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

**Abstract:** Peaches are an ancient fruit in China, with great nutritional and commercial value. Peach fruit is a typical respiratory climacteric fruit, which is prone to browning within a short period of time after harvesting, and rapid browning and high browning degree occur during peach processing, which are difficult to control, affecting the quality and economic value of the fruit. At present, systematic research on the characteristics and mechanism of peach browning is lacking, as well as effective control techniques and methods. In this paper, the current status of research on the characteristics and mechanism of and the key factors for enzymatic browning in peach fruit is reviewed, and the techniques used for its control are summarized, aiming to provide a reference for the regulation of enzymatic browning during peach storage and processing and consequently to promote the quality improvement of fresh and processed peach products.

**Keywords:** peach; enzymatic browning; browning mechanism; regulation techniques

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230728-311

中图分类号: TS255.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2024) 07-0290-09

引文格式:

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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230728-311. <http://www.spkx.net.cn>

CHEN Weining, LI Xuan, WANG Wenyue, et al. Research progress on the mechanism and regulation of enzymatic browning in peach fruit[J]. Food Science, 2024, 45(7): 290-298. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230728-311. <http://www.spkx.net.cn>

桃 (*Amygdalus persica* Linn) 原产于中国, 是蔷薇科 (Rosaceae) 李属 (*Prunus*) 植物果实, 迄今已有 4 000 年的栽培历史。桃果实果肉细腻, 滋味鲜美, 气味芳香, 富含 VB<sub>1</sub>、VB<sub>2</sub>、VB<sub>3</sub> 等多种维生素, 钾、磷、镁、铁等多种矿物质元素, 以及多种具有抗氧化活性的多酚类

物质。据统计, 2021年世界桃栽培总面积为150.5万 hm<sup>2</sup>, 总产量为2 499.4万 t, 为世界第三大落叶果树树种; 中国桃栽培总面积为82.3万 hm<sup>2</sup>, 总产量为1 600.0万 t。

桃为呼吸跃变型果实, 采后依然存在较强的呼吸作用, 在呼吸顶峰出现后快速成熟衰老。由于桃果实

收稿日期: 2023-07-28

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-30-5-02)

第一作者简介: 陈维宁 (2000—) (ORCID: 0009-0009-5144-5193), 男, 硕士研究生, 研究方向为农产品加工理论与技术。

E-mail: cwn25222@163.com

\*通信作者简介: 毕金峰 (1970—) (ORCID: 0000-0001-8664-8788), 男, 研究员, 博士, 研究方向为果蔬食品制造与营养科学。E-mail: bjfcaas@126.com

的采收时间多为盛夏，环境温度与湿度较高，呼吸代谢作用旺盛，后熟迅速，贮运过程中容易发生褐变，使果实的理化品质与商品价值下降<sup>[1-3]</sup>。除此之外，在桃的不同加工方式中，褐变是其中的共性问题。桃制品褐变的发生以酶促褐变为主，在特定环境条件下，多酚氧化酶（polyphenol oxidase, PPO）、过氧化物酶（peroxidase, POD）等内源酶催化果肉组织中的多酚氧化生成醌类，并进一步聚合形成大分子褐色物质，发生快速褐变，除此之外，酶促褐变产物及中间物也会促发包括美拉德反应在内的非酶褐变。褐变是桃在采后贮藏、运输及加工过程中极常见的现象，是桃果实及加工产品品质劣变、营养损失最明显的特征之一，严重影响桃果实的外观、风味及营养，已经成为桃贮藏加工增值和销售的主要障碍。不同品种的桃应用于不同的加工方式，同时对桃制品褐变的影响不同<sup>[4-5]</sup>。近年来，国内外对于果蔬褐变机理的相关研究从不同角度开展，提出了多种假说；同时，对于果蔬褐变的调节、控制工艺技术研究在不断创新和提升<sup>[6-11]</sup>。但与苹果、梨、龙眼等易褐变果蔬相比，桃的褐变速度快，褐变程度高，鲜切桃在切开后数秒至数分钟就开始褐变，导致食用品质快速降低；同时由于桃是一种冷敏感性果实，低温下也会发生内源性褐变<sup>[5,12]</sup>。现阶段，针对桃果实的特殊性，开展其加工褐变机理针对性调控技术研究还不够深入和系统。因此，对桃的褐变机理进行研究，确定褐变的关键因子，以进行针对性的调控十分必要。

本文旨在围绕桃果实采后及加工中褐变为主的品质劣变问题，梳理近年来桃贮运和加工中褐变理论、褐变相关因子、酶促褐变机制、影响因素及褐变控制技术手段，综合论述和探讨桃采后加工褐变的控制方法和技术，为桃贮藏及加工过程中褐变的调控提供一定的理论依据和技术参考，促进桃及桃制品品质提升。

## 1 桃酶促褐变机理研究现状

### 1.1 桃酶促褐变理论研究

酶促褐变是在合适的条件下，以酚类化合物为底的多种底物在PPO的催化下被氧化成醌类化合物，醌类物质进一步经过一系列的缩合反应形成褐色聚合物的过程。

桃的酶促褐变涉及复杂的生理过程，尽管关于酶促褐变已经开展了大量研究，但目前其机制仍不清楚。酶促褐变的过程涉及多个理论，其中酚-酶区域分布假说、自由基伤害假说和保护酶系统假说为目前果蔬酶促褐变普遍认可和接受的褐变理论<sup>[13]</sup>。酚-酶区域分布假说认为果蔬中的酚类物质与PPO分别存在于细胞中不同区域，其中游离酚类物质主要存在于液泡中，而PPO主要集中

于细胞质和细胞器质膜中，二者被质膜所分隔。当酚类物质与PPO之间的区域阻隔被打破时，二者接触后快速发生反应使果肉发生褐变<sup>[14-15]</sup>。自由基伤害假说认为在一般情况下，植物果实内存在多酶防御系统，使植物体内的自由基与活性氧保持动态平衡状态；当受到环境影响或伤害时，果实组织内部自由基含量快速上升，并对糖、蛋白质、脂质、核苷酸等物质进行攻击，使其分子结构发生改变，破坏膜的稳定性与完整性，从而引起果实褐变的发生<sup>[15-16]</sup>。保护酶系统假说认为POD、超氧化物歧化酶（superoxide dismutase, SOD）、过氧化氢酶（catalase, CAT）等多种类酶及抗氧化物质等共同构成了一个相对完整的抗氧化防御系统，使果实组织内部的自由基处于动态平衡的状态。当果实受到环境胁迫伤害时，酶系统平衡失调，SOD及CAT的活性下降，保护能力下降；自由基的含量上升，同时膜脂过氧化产物丙二醛（malondialdehyde, MDA）和H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量上升，果实组织内部会发生包括褐变在内的一系列生理生化反应<sup>[16-18]</sup>。现阶段，桃的酶促褐变机理研究依然以酚-酶区域分布假说为基础理论，但由于生物体处在动态变化的过程中，模拟体系无法完整反映真实体系的全部生理生化活动，桃果实褐变的机制仍然有待于阐明。

Jiang Yuqian等<sup>[19]</sup>研究发现采用1-甲基环丙烯（1-methylcyclopropene, 1-MCP）和植酸对鲜切桃进行单独或联合处理后，鲜切桃中的PPO与POD活性均有所下降，果实的褐变程度也被抑制。但是，果实褐变的被抑制程度与内源酶活性的下降程度并不呈直接线性关系。除此之外，1-MCP和植酸能够提高细胞壁与细胞膜的完整性，并且细胞壁与细胞膜完整性更高的桃褐变程度更低。这项研究结果表明，与PPO及POD的活性相比，细胞膜与细胞壁的完整性可能对桃果实褐变的影响更大，这是解析桃酶促褐变机制的重要方向。

### 1.2 桃酶促褐变内部因素

不同品种桃在贮藏加工中褐变发生存在显著不同，这与其内在种质基因密切相关。我国桃种质资源丰富，涉及油桃、毛桃、粘核桃、离核桃、白肉桃或黄肉桃。不同品种、不同成熟度、不同贮运条件的鲜食桃果实褐变的速度与程度有显著差异。加工用桃在果汁、果干、果粉、果酱等产品加工中存在不同程度褐变。我国部分代表桃品种及其普遍加工方式与褐变状况如表1所示。

表1 我国部分代表食用桃品种  
Table 1 Some representative edible peach varieties in China

名称	产地	品类	加工方式	褐变程度
深州蜜桃	河北深州	粘核红肉	鲜食	易褐变
肥城蜜桃	山东肥城	粘核白肉	鲜食、罐头	易褐变
锦绣黄桃	上海	粘核黄肉	罐头、果脯	不易褐变
华光油桃	河南	粘核油桃	鲜食	不易褐变
早露蟠桃	新疆石河子	粘核蟠桃	鲜食、制汁	不易褐变

不同桃品种基于其品质特性在贮运和不同加工方式中褐变的发生和控制存在很大差异, 研究发现, 在鲜切桃的贮藏过程中, 4个品种桃的褐变程度由强到弱为‘新川中岛’ > ‘艳红’ > ‘夏之梦’ > ‘美香’, 且随着贮藏时间的延长, 褐变程度和速度的差异逐渐增大<sup>[4]</sup>。

酶促褐变发生的关键因素是多酚、酶、氧, 其中多酚与酶为桃褐变的内部因素。不同品种桃酚类底物的种类与含量不同, 褐变催化酶的含量和活力也不相同, 因此会出现不同的褐变状况。

### 1.2.1 桃酶促褐变的关键酶

目前国内外的研究大多数认为PPO在桃的酶促褐变反应中起到最主要作用。除此之外, SOD、POD、苯丙氨酸解氨酶(L-phenylalanine ammonia-lyase, PAL)、CAT等多种酶也与氧化褐变密切相关。

#### 1.2.1.1 PPO

PPO是一种含铜离子的氧化还原酶, 广泛存在于动物、植物、真菌及细菌中<sup>[20]</sup>(图1)。PPO分子主要由铜离子辅酶区与主酶区构成, 其中铜离子辅酶区为主要活性功能区域。活性区域中有2个铜离子活性位点CuA区域和CuB区域, 其中CuA区域含3个保守组氨酸残基和1个半胱氨酸残基, CuB区域含3个或4个保守组氨酸残基<sup>[21]</sup>。根据其催化反应类型的不同, 可以将PPO分为单酚氧化酶、双酚氧化酶与漆酶<sup>[22]</sup>。桃果实中的PPO会随着桃的品种、成熟度的不同而表现出不同的结构特性和催化活性<sup>[23]</sup>。

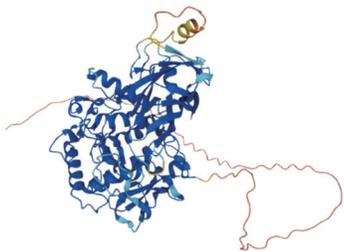


图1 桃果实PPO的三维轮廓图(来源于UniProt数据库)  
Fig. 1 3D profile of peach fruit PPO (source: UniProt library)

在酶促褐变中, PPO主要催化内源性酚类物质, 在有氧的条件下催化单羟基酚氧化羟基化生成邻位二羟基酚, 再催化邻位酚脱水氧化为醌类物质。醌类物质具有很高活性, 会进一步聚合或与氨基酸、蛋白质等物质发生氧化聚合生成更高相对分子质量的黑色素或褐色素<sup>[24-25]</sup>。酚-酶区域假说认为, 在果蔬组织受到伤害, 如破损、切割, 或果蔬自然成熟衰老的过程中, 组织细胞中的质膜受到损伤, 多酚物质从液泡中大量释放, 同时PPO被释放至细胞质中, 催化活性增强, 在有氧条件下与细胞内源酚类物质接触, 发生快速反应, 引起褐变。

PPO存在多种不同的状态, 其中分子质量为64 kDa的PPO是最重要的一种<sup>[26]</sup>。PPO具有大量的同工酶且性质差别较大, 因此不同环境条件下PPO之间的活性差异较大。有研究发现, PPO在酸性条件下的活性最高<sup>[27-28]</sup>,

另有学者发现, 在中性条件下PPO的活性最高<sup>[29-30]</sup>, 这一差异与其来源不同密切相关<sup>[31-34]</sup>。温度对PPO活性的影响表明其在20~60℃有较好的热稳定性, 在温度高于80℃时, PPO失活<sup>[35-36]</sup>。

#### 1.2.1.2 POD

POD是以铁卟啉为辅基, 存在于过氧化物酶体中的标志酶<sup>[37]</sup>。POD是参与酶促褐变的重要酶之一, 催化H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>还原为H<sub>2</sub>O, 并以酚类物质作为POD催化反应的间接底物, 催化其氧化聚合, 导致组织褐变<sup>[38-39]</sup>。Christine等<sup>[40]</sup>发现, 梨中的POD本身并不参与多酚物质的氧化过程, 但是在PPO存在的时候, POD会加剧多酚的氧化。这主要与PPO催化多酚物质氧化生成H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 以及醌类物质可作为POD的催化底物有关。

作为褐变过程中最重要的2种酶, POD与PPO之间关系十分密切, Grison等<sup>[41]</sup>研究发现, 玉米根系POD也具有PPO活性, 铜离子螯合剂在抑制PPO活性的同时也对POD活性有抑制作用。林琳<sup>[42]</sup>发现, POD与PPO的同工酶电泳图谱一致, 同时分离得到的纯POD用PPO的酶染方法能够显示PPO的同工酶谱。

#### 1.2.1.3 SOD

SOD是一类金属酶, 根据辅酶结构中金属离子的不同, 主要可以分为铜锌超氧化物歧化酶、锰超氧化物歧化酶及铁超氧化物歧化酶。SOD是生物体内一种重要的抗氧化酶, 3种类型的酶均具有催化超氧阴离子自由基(O<sub>2</sub><sup>-</sup>·)发生歧化反应的作用<sup>[43]</sup>。氧自由基在SOD的作用下生成H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 并在CAT或POD的作用下催化转换为H<sub>2</sub>O, 进而使体内的氧自由基处于较低水平, 氧化还原处于平衡状态。

与PPO和POD不同, SOD并不直接参与多酚底物的氧化褐变形成深色物质, 而是起到系统平衡作用。当SOD的活性受到影响时, 组织内部的平衡被打破, 褐变就会快速发生。桃果实受到环境胁迫或物理损伤时, 果实组织内氧自由基的含量快速上升, SOD也随之激活, 其活性呈现出先上升后下降的趋势<sup>[44]</sup>。当SOD的活性上升时, 大量的氧自由基被歧化生成H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 并在POD的催化下产生H<sub>2</sub>O和O<sub>2</sub>; 而当SOD的活性下降时, 大量氧自由基积累, 形成高氧化还原势能, 从而攻击膜脂, 对质膜稳定性造成影响, 区域分隔被打破, 酚类物质与PPO快速接触, 发生褐变。

### 1.2.2 桃酶促褐变的底物

桃果实中酚类物质是重要的酶促褐变底物, 目前, 从桃果实中已经分离鉴定出30余种酚类化合物, 多属于酚酸类、黄烷醇类、黄酮醇类和花色苷类化合物。其中, 桃果肉中的主要酚类有绿原酸、新绿原酸、儿茶素和表儿茶素, 其次为芦丁、槲皮素和根皮苷, 另外还存在微量的没食子酸、阿魏酸和根皮素<sup>[45-52]</sup>。酚类物质作为酶促褐变反应的底物, 不同种类与含量的多酚参与氧化产生深色物质的种类与速率不同, 最终桃果实的褐变程度也会有所不同。因此, 对桃果实中的酚类物质进行研究十分必要。

不同成熟度的桃果实中酚类物质的含量有所不同。严娟等<sup>[23]</sup>测定不同溶质型桃‘加纳岩’和‘雨花三号’在成熟过程中的多酚含量,发现2种桃果实的多酚含量在成熟过程中整体呈现下降的趋势,在成熟中期含量最低。

不同品种桃之间的多酚物质含量有所不同(表2)。严娟等<sup>[52]</sup>对不同肉色桃果肉的多酚物质进行比较,总酚含量由高到低分别为红肉桃、黄肉桃和白肉桃。几种多酚物质中,新绿原酸和阿魏酸的含量无显著差异;绿原酸与芦丁含量表现为红肉桃显著高于黄肉桃和白肉桃,同时其含量在黄肉桃中显著高于白肉桃;儿茶素、表儿茶素含量表现为红肉桃显著高于白肉桃和黄肉桃,而黄肉桃、白肉桃之间无显著差异。总之,酚类组分在红肉桃、黄肉桃及白肉桃中的含量依次下降,酚类组分是重要的次级代谢产物,黄酮类色素物质的形成建立在苯丙素代谢基础上,引起中间代谢物如绿原酸、儿茶素、芦丁含量的积累。此外,研究表明,有色桃品种对褐变的敏感度降低,其中大量的黄酮类多酚具有更高的抗氧化性,可维持果实体系的氧化还原平衡。蔡志翔等<sup>[51]</sup>比较不同种质和肉质桃的总酚含量,发现总体表现为硬肉类型和不溶质类型大于溶质类型和软肉类型,且硬肉类型显著大于溶质类型和硬质类型。不同肉质间绿原酸、儿茶素、表儿茶素、芦丁含量高低趋势均与总酚含量类似;不同肉质桃之间新绿原酸、阿魏酸含量差异不显著。多酚以游离态和结合态存在于果肉组织中,硬肉质桃、软肉质桃及溶质桃多酚总量没有显著差异,但存在形式不同,因此不同肉质桃对褐变的敏感度存在差异,溶质桃和软质桃易褐变,甚至在贮运中遇到机械碰撞迅速褐变,而硬质桃耐贮运,且褐变敏感度相对较低,这是基于褐变控制考虑,针对鲜食及加工桃品种选择和育种的重要方向。

表2 多种桃中酚类物质种类与含量研究  
Table 2 Studies on the types and contents of phenolics in different varieties of peach

研究对象	研究结果	参考文献
7种美国产粘核桃	7种粘核桃中均含有大量的绿原酸和新绿原酸,而仅有Bolinha和Corona 2个品种的桃整果中含有黄酮醇,且仅有Corona和Halford 2个品种桃整果中含有花青素	[46]
3种美国市售桃	3种美国市售商业桃John Boy II、PF23、Redhaven中多酚的种类相近、含量差异不显著,其中山奈酚-3-O-芸香糖苷含量最高,表儿茶素、矢车菊素-3-葡萄糖苷、绿原酸其次	[47]
3种不同产地黄桃	商业成熟桃与采后成熟桃的总酚含量有显著差异,多产地采后成熟桃的总酚含量均显著低于商业成熟桃的总酚含量;与去皮桃果相比,带皮桃果的总酚含量差异更显著	[48]
10种桃纯液、3种桃浓缩液	经过浓缩后的桃浆,多酚种类由10种减少至8种,一直存在的有原儿茶酸、新绿原酸、绿原酸、咖啡酸和绿原酸异构体;有5种酚类未检出,分别为原花青素B <sub>2</sub> 、(+)-儿茶素、原花青素B <sub>1</sub> 、原花青素B <sub>3</sub> 、(-)-表儿茶素;同时新出现了3种酚类物质,分别为羟甲基糖醛、2-呋喃酸、对羟基肉桂酸;测得的所有酚类物质含量都有所上升	[49]
13种意大利市售桃	13种桃中多酚物质的含量为酚酸类>黄酮醇类>黄酮醇类,且大部分多酚物质的含量随着贮藏时间的延长而下降,只有少部分如Stark Red Gold中的总黄酮醇含量出现非线性变化	[50]
257种桃	257种桃中,总酚含量平均值由高到低为红肉桃>黄肉桃>白肉桃,方差最大的为白肉桃;257种桃果肉中酚类物质的平均含量由高到低为绿原酸>新绿原酸>儿茶素>芦丁>表儿茶素>阿魏酸,但新绿原酸和绿原酸分别为极差最大的酚类物质	[51]

### 1.3 桃酶促褐变外部因素

酶促褐变本质上是由相关酶系统催化多酚底物发生的一系列氧化还原反应,氧浓度、环境温度、pH值等,都会影响酶的催化活性和整体的反应速度,因此外部因素对褐变反应有显著影响。

氧是桃果实酶促褐变的必须条件,PPO催化多酚物质氧化的过程需要有氧参与,同时,氧分子会进一步影响激活PPO的活性<sup>[53]</sup>。氧可以直接参与酶和多酚底物之间的反应;同时,细胞组织中存在的活性氧也可以参与褐变。正常情况下,果肉细胞中的活性氧在多酶系统的影响下处于动态平衡状态,这种平衡一旦被打破,氧自由基大量累积,攻击膜系统使酶和酚类底物接触,或直接参与多酚氧化,导致褐变的快速发生。

温度是影响桃果实酶促褐变的一个关键因素。PPO、POD等酶促褐变关键酶的活性随着温度的变化而改变。当温度为20~60℃时,PPO与POD均能够保持较高的活性;温度为30~50℃时,2种酶的活性出现峰值。桃果实品种不同,褐变关键酶的最适温度也有所不同。此外,当贮藏温度过低时,桃果实会发生冷害,组织细胞膜体系发生相变,完整性受到损伤,使酶系统与多酚底物接触而发生褐变。

酸碱度也会对桃果实酶促褐变产生影响。不同品种桃中褐变关键酶的最适pH值不同,当体系pH值与酶的适宜pH值差距过大时,酶的活性会受到影响,导致氧化多酚物质的能力下降。

针对桃贮运过程中的褐变控制,适当的温度和气调是目前普遍使用的手段,而对桃加工中酶促褐变,低温、隔氧、调酸、加抗氧化剂是目前加工褐变中通过外部因素进行控制的主要途径。与酶促褐变密切相关的外部因素之间是相互影响、协同作用的,因此不同品种桃在贮运加工中褐变的控制一般综合几方面因素参数的优化。

## 2 桃酶促褐变调控技术研究现状

目前,在桃果实的褐变调控中,常用的手段有热处理灭酶、添加抗氧化剂、高压处理技术、气调贮藏技术等,通过抑制多种催化褐变反应酶的活性、加入褐变底物取代物、采用褐变产物降解物及调节果实采后呼吸作用以对褐变进行控制。针对桃加工中酶促褐变常采用热处理、高压处理等物理手段;针对鲜食桃褐变一般采用气调、抗氧化剂等制剂处理等方法进行控制。

### 2.1 物理处理技术

#### 2.1.1 超高压加工技术

超高压加工技术是指在室温条件下,利用100~1 000 MPa甚至更高的压力处理食品,使蛋白质变性,褐变相关酶失活,从而可以对褐变起到一定的抑制效果。

赵光远等<sup>[54]</sup>采用超高压技术处理鲜榨桃汁,发现压力到达400 MPa之前,PPO活性随着压力升高而增加;超过400 MPa时,PPO活性快速下降。同时,随着保压时间的延长或处理温度的上升,PPO活性也呈下降趋势。可以通过提高处理压力和处理温度、延长保压时间的方法抑制PPO的活性。Chukwan等<sup>[55]</sup>对粘核桃和离核桃在100~500 MPa的压力下处理10 min后发现,当压力达到100 MPa后PPO活性受到一定影响;但压力从100 MPa升高至400 MPa,PPO的活性没有显著差异;但当压力升高至500 MPa时,PPO活性快速下降。主要原因是当压力达到200 MPa时,PPO被一定程度激活,细胞膜完整性受到影响,酚类物质与酶充分接触发生褐变,因此需要足够高的压力以抑制酶的活性,这与赵光远等<sup>[54]</sup>的研究结论基本一致。Dermesonlouoglou等<sup>[56]</sup>采用渗透脱水联合高压加工技术对鲜切桃进行处理,以提高其冷藏期间的稳定性。发现渗透脱水联合高压加工技术能显著抑制褐变,经冷藏较长时间后鲜切桃的颜色也能保持稳定。

超高压处理技术能够较为有效抑制PPO的活性,以此抑制桃加工过程中的褐变。其中处理压力是非常重要的指标,直接影响到处理结果。通常,压力超过400 MPa才能抑制PPO活性。但随着压力的升高,果实膜系统完整性会受到影响,反而会加剧酶与酚类物质接触促进褐变生成。因此将超高压技术与其他技术联合使用,以在保持膜稳定性同时抑制酶的活性,可以作为未来探索研究的方向之一。

### 2.1.2 高压静电场加工前处理技术

高压静电场是重要的物理场处理技术之一,具有高效低耗、无毒无害、无污染等优点。果蔬组织内的电荷性物质在高压静电场处理情况下发生定向移动,影响果蔬细胞内物质流动和能量分布,从而抑制果蔬采后各类生物化学反应进程,对果蔬保鲜具有积极作用。已有研究表明,高压静电保鲜技术结合低温能够抑制水蜜桃PPO活性。

戴瀚铖<sup>[57]</sup>通过对贮藏前桃进行不同强度的高压静电场处理,并将桃置于不同温度下贮藏,发现不同强度静电场处理的桃在10℃贮藏时褐变无显著差异。贮藏温度5℃和7.5℃时,电场强度越高,褐变程度越低。对其中的相关酶进行活力测定,发现高压静电场增加了鲜切桃PAL、肉桂酸-4-羟化酶、4-香豆酸、辅酶A连接酶等多酚代谢积累关键酶的活性,降低了PPO、POD等褐变关键酶的活性,延缓原儿茶酸、儿茶素、绿原酸等含量的下降,延缓了褐变的发生。

高压静电场作为一种低消耗、无污染的物理保鲜加工处理方法,能够有效抑制褐变相关关键酶的活性,延缓贮藏及加工过程中桃果实的褐变。但现阶段高压静电

场应用于桃果实加工处理依然较少,有较大的研究开发空间。

### 2.1.3 微波加工前处理技术

微波通常是指频率为300 MHz~300 GHz的电磁波,其能量传递无需经历由表及里的过程,而是通过电磁场直接到达物料中心,通过分子振动实现褐变等品质改变反应的发生,高效率、低流失。通常,微波的频率越低,穿透性越强。微波可以通过热效应升温使PPO发生不可逆变性,导致酶的失活;也可以通过非热效应破坏酶的空间结构,进而使酶的活力下降。因此,微波处理可以基于对酶促褐变关键酶的干预应用于桃果实加工褐变调控中。

Zhou Linyan等<sup>[58]</sup>对不同功率微波处理的桃泥品质进行分析,发现经微波处理的桃泥中PPO活性均显著下降,PPO活性降低速率随着处理时间的延长而减缓。同时,微波处理的桃泥总多酚含量、总黄酮含量和抗氧化能力均有所上升。Zhang Shaoying等<sup>[59]</sup>应用不同功率与时间的微波对桃进行处理,发现不同功率处理桃中PPO的活性均有所下降,处理时间达到120 s时PPO活性无显著差异,微波功率越高,PPO活性降低的速率越快。除此之外,微波处理提高了桃样品的酸度,同时提高了氨基氮的含量,有效抑制了褐变。微波270 W处理90 s或450 W处理30 s桃汁的褐变能够得到有效抑制。

微波处理所需的时间较短,能够较快速地对酶产生不可逆影响,抑制酶的活性,从而减少褐变的发生。其中,微波功率是微波处理的一个关键因素,能够直接影响处理的时间与处理结果。

### 2.1.4 气调贮藏技术

气调贮藏是通过调控果实贮藏库中气体组成,如CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>,以及湿度、温度等条件,抑制相关酶的活性和相关生理活动的进行,进而有效控制果实贮藏期间的呼吸速率和衰老进程,抑制褐变,从而保证果实及其加工制品的品质和价值。除此之外,目前还有通过调节N<sub>2</sub>等气体、添加1-MCP等乙烯抑制剂的方法,达到调控果蔬贮藏褐变的效果。

Zhou Huijuan等<sup>[60]</sup>通过调节桃果实贮藏空间中多种气体的含量和组成,提高N<sub>2</sub>和CO<sub>2</sub>的浓度,降低O<sub>2</sub>的浓度,以对桃果实褐变进行控制。结果表明,气调贮藏方法抑制了果实ATP亚甲基酶的蛋白质表达,降低了其他代谢相关酶的活性,抑制了果实的呼吸作用,维持了较高的组织内糖水平,抑制了果实的褐变。经过气调贮藏的桃果实褐变程度约为未经处理桃果实的30%。何双等<sup>[61]</sup>通过调节O<sub>2</sub>与CO<sub>2</sub>,并加入1-MCP的方法控制黄桃贮藏过程中的褐变。结果表明,在处理初期PPO、POD的活性呈下降趋势,对褐变起到了有效抑制作用。但在中后期,黄桃中的自由基含量上升,从而诱导了2种酶活性的上升。

气调贮藏技术能够有效抑制贮藏过程中桃果实发生的冷害与褐变,在较长时间内维持果实品质。但经过长时间贮藏后再取出进行处理时,是否能在短时或长时加工中延续对褐变的抑制,仍需要进一步的研究。

## 2.2 化学处理技术

### 2.2.1 酶抑制型护色剂保鲜技术

酶抑制型护色剂通过螯合酶的活性辅基或是替代酶活性位点的氨基酸残基,抑制相关酶的活性,从而控制鲜切果蔬褐变的发生。最常用的酶抑制型护色剂主要有抗坏血酸及其盐类、4-己基间苯二酚、柠檬酸、含巯基(-SH)化合物等<sup>[62]</sup>。

Gohari等<sup>[63]</sup>使用外源脯氨酸和L-半胱氨酸对冷藏桃褐变进行控制,发现这种处理方法抑制了PPO的活性,同时提高了SOD、CAT和抗坏血酸过氧化物酶(ascorbateperoxidase, APX)的活性,提高了低温环境下果实的抗氧化能力;同时,桃果实PAL/PPO活性比值升高,导致酚类化合物含量升高,褐变水平降低。Gao Hui等<sup>[64]</sup>研究0.1 mmol/L褪黑素(melatonin, MT)在1℃贮藏28 d期间对桃果实冷害、膜脂肪酸含量和酚类代谢的影响。结果表明,MT处理防止了膜脂质过氧化,并有助于保持桃果实中不饱和脂肪酸与饱和脂肪酸的较高比例。MT处理还刺激了葡萄糖-6-磷酸脱氢酶、莽草酸脱氢酶和苯丙氨酸解氨酶的活性,同时还抑制了PPO和POD的活性,有效抑制了桃贮藏过程中的褐变。Zhao Yaoyao等<sup>[65]</sup>通过使用天然植物激素茉莉酸对桃果实进行处理,发现茉莉酸处理增加了乙烯产量并且可以防止桃果实可溶性糖含量下降。可溶性糖含量在抵抗低温胁迫、清除活性氧和稳定膜方面起到了多重正向效应,避免了活性氧攻击膜体系,导致区域效应被打破,有效抑制了褐变的发生。

酶抑制型护色剂通过抑制褐变中催化多酚氧化的关键酶,能够显著阻止或延缓褐变的发生。但在使用抑制剂的同时,也会向产品中引入新的化学物质,这些化学物质本身或与果实组分的反应产物可能存在一定的负面作用,因此寻找高效、无害的护色剂将会成为未来研究重点。

### 2.2.2 生理调节型护色剂保鲜技术

钙是植物生长过程中一种必需的营养元素,在植物正常生理代谢活动中发挥重要作用。钙离子是构成细胞壁的重要元素,可以与细胞壁中的果胶类物质结合,形成果胶钙,提高细胞壁物质稳定性,提高膜的抗氧化能力,降低自由基对膜系统的伤害。除此之外,钙能抑制果蔬的呼吸强度,减缓呼吸进程,通过减弱果实内源代谢活动,抑制褐变的进行。

Lo'ay等<sup>[66]</sup>采用纳米钙离子与抗坏血酸共同对‘佛罗里达王子’桃进行处理,发现桃果实中的APX、CAT、

SOD和谷胱甘肽还原酶等抗氧化酶的活性均有所上升;H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>和氧自由基的含量有所下降,桃果实的褐变得到了一定的抑制。Zhi Huanhuan等<sup>[67]</sup>采用钙离子的微酸性电解水(slightly acidic electrolyzed water, SAEW)对桃果实进行处理。结果表明,SAEW抑制了桃果实中PPO活性的增加和酚类化合物的积累,同时添加钙离子的SAEW对PPO的活性有更为显著的抑制效果。除此之外,在贮藏期间,SOD、CAT和POD等酶的活性有所上升。与对照组相比,在SAEW中添加或不添加Ca<sup>2+</sup>的处理显著减少了贮藏期间的组织褐变。

生理调节型护色剂通过调控桃果实中抗氧化酶的活性或加强细胞膜系统的稳定性,降低氧自由基攻击的影响以抑制褐变。与酶抑制型护色剂类似,部分生理调节型护色剂需要后续处理,以避免对人体健康的危害。

## 2.3 联合处理保鲜技术

采用多种物理或化学手段共同对桃果实进行处理,以抑制其褐变的处理方法称为联合方法。联合多种手段同时针对酶、多酚底物、细胞膜系统、活性氧等褐变形成因子进行处理,以抑制酶活性或者保护细胞膜系统,从而更加高效地抑制桃果实的褐变。

在桃贮藏和运输过程中褐变的控制方面,Li Yali等<sup>[68]</sup>采用紫外线B(UV-B)辐照联合1-MCP熏蒸的方法对桃果实进行处理。结果表明,1.46 kJ/m<sup>2</sup> UV-B照射结合1 μL/L 1-MCP熏蒸有效提高了总酚含量,抑制了PPO和POD的活性,增强了膜的稳定性,减缓了呼吸代谢,对桃果实的褐变起到了有效的抑制作用。Huang Dandan等<sup>[69]</sup>采用海藻酸钠(sodium alginate, SA)与NO联合方法对桃果实进行处理。结果表明,10 mg/g SA联合10 μmol/L NO能够延缓硬度、果实亮度和可溶性固形物含量的降低,同时抑制PPO、PAL、POD、脂肪氧化酶等褐变关键酶的活性;除此之外,还降低了氧自由基、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>的积累量,增加了CAT和SOD的活性,SA与NO联合方法能够有效抑制桃的褐变。王美红等<sup>[70]</sup>研究采用CaCl<sub>2</sub>和1-MCP单独或复合处理对桃果实采后贮藏期间品质的影响。结果表明,经过处理后的桃果实贮藏过程中呼吸强度与乙烯释放强度显著下降,褐变出现时间推迟,褐变程度显著下降。其中,CaCl<sub>2</sub>和1-MCP复合处理效果优于单独处理。谢小燕等<sup>[71]</sup>研究程序降温分别与1-MCP和保鲜纸协同处理对蟠桃贮藏品质和果皮褐变的影响,发现程序降温协同保鲜纸处理能够有效降低MDA含量和相对电导率,抑制PPO和POD活性,进而有效控制褐变。

在桃加工中,目前的超高压等物理处理和抗氧化剂联合作用,但是在能效和成本方面还存在一定限制,同时联合2种或多种处理手段,并通过优化关键参数,以加强对褐变的控制,将是桃加工中控制褐变形成积累的重要方向。

### 3 结 语

桃采后贮藏及加工过程中发生的酶促褐变是影响果实和制品品质的重要因素,不但会引起加工后产品的色泽品质劣变进而导致商品价值的降低,同时褐变中产生的醌类物质及其聚合色素大分子对人体健康会产生影响。因此,对桃酶促褐变及其调控手段进行深入探索十分必要。长期以来,国内外研究一直在持续进行并取得了一些成果,但其中仍然存在一些问题尚待深入探讨。

1) 桃酶促褐变机理深入研究:酶促褐变机理研究对于控制桃的保鲜和加工品质具有重大意义。现阶段,包括酚-酶区域假说在内的多种理论研究仍停留在假说层面,与桃贮藏和加工中褐变形成的实际情况存在一定的差距。桃酶促褐变是果实应对外界不良刺激的应激性生理活动,参与物质的种类繁多而复杂,单一层面的假说难以完全概括。除此之外,多数对桃酶促褐变机理的研究多以模拟体系为基础,在真实食品体系中的研究不足。后续应继续对酶促褐变的理论进行更深入的研究,为褐变调控提供理论基础。2) 桃褐变机理分子生物学层面的深入研究:桃在受到外界刺激后,正常生理代谢发生很大变化,多种褐变相关酶基因表达量上升,导致褐变快速发生。与此同时果实内部代谢发生变化,褐变前后代谢组分差异显著。转录组学、蛋白质组学和代谢组学作为新一代技术,可以深入研究桃果实褐变的关键基因与代谢通路,从分子层面对桃酶促褐变作出解释。除此之外,PPO对多酚物质催化方式、二者结合方式、结合位点等问题还需要进一步明确。对此,分子动力学模拟作为新的研究方法,可以对酶的作用方式作出预测,进行针对性调控。3) 桃贮藏期间酶促褐变因子控制:桃贮藏期间会产生2次呼吸高峰和1次乙烯释放高峰。乙烯释放高峰先于呼吸高峰出现,且出现时间受到乙烯调节剂、外界温度等多种因素影响,但由于桃冷敏感性,在低温下会发生冷害,导致果实品质的下降并引发内源性褐变,因此无法单一地通过降低温度控制褐变。在后续的研究中应更多地考虑通过延后乙烯释放高峰和呼吸高峰的时间,避免果实的过度成熟,及提高果实的抗氧化能力,以控制褐变。4) 桃加工酶促褐变关键因素研究:多酚、酶、氧气、温度、pH值等因素共同影响桃果实的酶促褐变,但不同品种的桃果实中酚类物质与酶的种类和含量不同,因此褐变的速度和程度也不同。最新的研究表明,细胞壁、细胞膜与质膜的完整性也可能对酶促褐变产生显著影响且影响作用可能超过酶活性。同时,桃果胶的降解、果胶酸与多酚反应、褐变中间物与氨基酸反应等都会加速桃加工中褐变程度,而相关研究对桃加工制品褐变的调控仍有重要意义。因此,加工体系的多种影响因素对褐变的影响机制仍需要进一步系统

地进行分析与评价,寻找其中的关键物质,为不同品种桃加工的酶促褐变调控提供理论依据与研究方向。5) 提高桃加工褐变控制单元的产业化程度:现阶段大部分桃褐变调控技术仅停留在实验研究阶段,未能投入工业生产中。除此之外,桃皮、核、渣等副产品的精深加工中可能出现的褐变问题尚无针对性研究方案与解决方法。面对企业实际生产中原料数量、贮藏条件、产品需求等状况,如何开发出安全、可靠、成本合理、易于应用的褐变控制设备并加速推进产品生产,是桃加工褐变控制研究满足市场需求非常重要的一环,也是未来高品质桃制品加工生产的必然方向。

### 参考文献:

- [1] 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;26. DOI:10.14051/j.cnki.xddy.2021.13.008.
- [2] 周慧娟,苏明申,叶正文,等.桃果实采后生理生化及冷害研究进展[J].果树学报,2017,34(9):1204-1212. DOI:10.13925/j.cnki.gsx.20170046.
- [3] 凌晨,谢兵,洪羽婕,等.外源钙和钙调素拮抗剂对冷藏桃果实耐冷性的影响[J].食品科学,2019,40(1):240-248. DOI:10.7506/spkx.1002-6630-20180521-296.
- [4] 戴瀚成,成纪予.不同品种鲜切桃贮藏期品质变化与主成分分析[J].包装工程,2021,42(19):85-92. DOI:10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.19.012.
- [5] 吴春霞.桃果实采后物流机械伤与冷害控制以及不同品种冷害敏感性研究[D].杭州:浙江大学,2020:38-46.
- [6] NICOLAS J J, RICHARD-FORGET C F, GOUPY M P, et al. Enzymatic browning reactions in apple and apple products[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 1994, 34(2): 109-157.
- [7] FRIEDMAN M. Food browning and its prevention: an overview[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1996, 44(3): 631-653. DOI:10.1021/jf950394r.
- [8] LEE M K, HWANG Y H, RYU H, et al. Gallia rhois water extract inhibits enzymatic browning in apple juice partly by binding to and inactivating polyphenol oxidase[J]. Food Chemistry, 2022, 383: 132277. DOI:10.1016/j.foodchem.2022.132277.
- [9] 冯晓帅.肥城桃褐变相关因子分析[D].泰安:山东农业大学,2015:1-3.
- [10] 乜兰春,孙建设,辛蓓,等.苹果果实酶促褐变底物及多酚氧化酶活性的研究[J].园艺学报,2004(4):502-504. DOI:10.16420/j.issn.0513-353x.2004.04.021.
- [11] 程建军,王震新,于静海,等.苹果梨和鸭梨酶促褐变机理的研究[J].食品科学,2000,21(2):71-74. DOI:10.3321/j.issn:1002-6630.2000.02.024.
- [12] 何辉,乔勇进,柳洪入,等.桃果实冷害发生机理及御冷措施研究进展[J].食品工业科技,2023,44(4):496-505. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2022050016.
- [13] 孙芝杨,钱建亚.果蔬酶促褐变机理及酶促褐变抑制研究进展[J].中国食物与营养,2007(3):22-24. DOI:10.1016/0031-9422(79)80057-6.
- [14] HOWARD L R, GRIFFIN L E. Lignin formation and surface discoloration of minimally processed carrot sticks[J]. Journal of Food Science, 1993, 58(5): 1065. DOI:10.1111/j.1365-2621.1993.tb06113.x.
- [15] MAYER A M, HAREL E. Polyphenol oxidases in plants[J]. Phytochemistry, 1979, 18(2): 193-215. DOI:10.1016/0031-9422(79)80057-6.

- [16] 蒋跃明, 陈绵达, 林植芳, 等. 香蕉低温酶促褐变[J]. 植物生理学报, 1991(2): 157-163.
- [17] 沈金玉, 黄家音, 李晓莉. 果蔬酶促褐变机理及其抑制方法研究进展[J]. 食品研究与开发, 2005(6): 150-156. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2005.06.048.
- [18] 何学利. 植物体内的保护酶系统[J]. 现代农业科技, 2010(10): 37-38. DOI:10.3969/j.issn.1007-5739.2010.10.016.
- [19] JIANG Y Q, WANG X D, LI X J, et al. Combination of 1-methylcyclopropene and phytic acid inhibits surface browning and maintains texture and aroma of fresh-cut peaches[J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, 200: 112328. DOI:10.1016/j.postharvbio.2023.112328.
- [20] MAYER ALFRED M. Polyphenol oxidases in plants and fungi: going places? A review[J]. ChemInform, 2006, 67(21): 2318-2331. DOI:10.1002/chin.200705260.
- [21] DHANASHREE P, VIRENDRA R K. Extraction and purification of polyphenol oxidase: a review[J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2018, 14: 431-437. DOI:10.1016/j.bcab.2018.03.010.
- [22] PETRA F, HERMANN H, MARGARITA B, et al. Polyphenoloxidase from riesling and dornfelder wine grapes (*Vitis vinifera*) is a tyrosinase[J]. Food Chemistry, 2015, 183: 49-57. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.03.016.
- [23] 阚娟, 林仙佩, 万冰, 等. 不同溶质型桃果实成熟过程中酚类代谢与抗氧化能力的研究[J]. 现代食品科技, 2017, 33(6): 74-79. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.6.011.
- [24] ESPIN J, JOLIVET S, WICHERS H. Inhibition of mushroom polyphenol oxidase by agaritine[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1998, 46(8): 2976-2980. DOI:10.1021/jf9802732.
- [25] YORUK R, MARSHALL M R. Physicochemical properties and function of plant polyphenol oxidase: a review[J]. Journal of Food Biochemistry, 2003, 27(5): 361-422. DOI:10.1111/j.1745-4514.2003.tb00289.x.
- [26] MARQUES L, MACHEIX J, FLEURIET A. Characterization of multiple forms of polyphenoloxidase from apple fruit[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 1995, 33(2): 193-200. DOI:10.1080/0022933.2010.521595.
- [27] LIU W, ZOU L Q, LIU J P, et al. The effect of citric acid on the activity, thermodynamics and conformation of mushroom polyphenoloxidase[J]. Food Chemistry, 2013, 140(1/2): 289-295. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.02.028.
- [28] MCEVILY J A, IYENGAR R, OTWELL S W. Inhibition of enzymatic browning in foods and beverages[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 1992, 32(3): 253-273. DOI:10.1080/10408399209527599.
- [29] 孙蕾, 王大明, 乔勇进, 等. 果实褐变机理及研究进展[J]. 经济林研究, 2002(2): 92-94. DOI:10.3969/j.issn.1003-8981.2002.02.014.
- [30] 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.
- [31] SIDDIQ M, DOLAN K D. Characterization of polyphenol oxidase from blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.)[J]. Food Chemistry, 2017, 218: 216-220. DOI:10.1016/j.foodchem.2016.09.061.
- [32] LIU F, ZHAO J H, GAN Z L, et al. Comparison of membrane-bound and soluble polyphenol oxidase in Fuji apple (*Malus domestica* Borkh. cv. Red Fuji)[J]. Food Chemistry, 2015, 173: 86-91. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.09.169.
- [33] BIBHUTI B M, SATYENDRA G, ARUN S. Purification and characterization of polyphenol oxidase (PPO) from eggplant (*Solanum melongena*)[J]. Food Chemistry, 2012, 134(4): 1855-1861. DOI:10.1016/j.foodchem.2012.03.098.
- [34] ZHOU D, LI L, WU Y W, et al. Salicylic acid inhibits enzymatic browning of fresh-cut Chinese chestnut (*Castanea mollissima*) by competitively inhibiting polyphenol oxidase[J]. Food Chemistry, 2015, 171: 19-25. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.08.115.
- [35] 陈刚, 马晓, 谢梦淑. 富士苹果多酚氧化酶特性及褐变抑制研究[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(6): 1107-1110. DOI:10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2017.06.029.
- [36] 田兰兰, 郭玉蓉, 牛鹏飞, 等. 富士苹果中多酚氧化酶特性的研究[J]. 农产品加工(学刊), 2011(3): 20-23; 39. DOI:10.3969/j.issn.1671-9646(X).2011.03.005.
- [37] CHIBBAR R N, CELLA R, HUYSTEE R B V. The heme moiety in peanut peroxidase[J]. Canadian Journal of Biochemistry and Cell Biology, 1984, 62(11): 1046-1050. DOI:10.1139/o84-134.
- [38] DOWD F P, NORTON A R. Browning-associated mechanisms of resistance to insects in corn callus tissue[J]. Journal of Chemical Ecology, 1995, 21(5): 583-600. DOI:10.1007/BF02033703.
- [39] KEVIN C V, STEPHEN O D. Function of polyphenol oxidase in higher plants[J]. Physiologia Plantarum, 1984, 60(1): 106-112. DOI:10.1111/j.1399-3054.1984.tb04258.x.
- [40] CHRISTINE R, FLORENCE R F, CLAUDE R, et al. A kinetic study of the inhibition of palmito polyphenol oxidase by L-cysteine[J]. International Journal of Biochemistry and Cell Biology, 1996, 28(4): 457-463. DOI:10.1016/1357-2725(95)00148-4.
- [41] GRISON R, PILET P E. Maize root peroxidases: relationship with polyphenol oxidases[J]. Phytochemistry, 1985, 24(11): 457-463. DOI:10.1016/S0031-9422(0)80659-7.
- [42] 林琳. 福眼龙眼(*Dimocarpus longan* Lour. cv. Fuyan) POD的分离纯化与若干采后生理的初步研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2003: 21-38.
- [43] 刘金锋, 谭海宁, 滕莉, 等. 季铵化壳聚糖对超氧化物歧化酶的化学修饰研究[J]. 中国药学杂志, 2011, 46(14): 1117-1121.
- [44] 李富军, 翟衡, 杨洪强, 等. 1-MCP和AVG对肥城桃果实采后衰老的影响[J]. 果树学报, 2004(3): 272-274.
- [45] TOMÁS-BARBERÁN A F, GIL I M, CREMIN P, et al. HPLC-DAD-ESIMS analysis of phenolic compounds in nectarines, peaches, and plums[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(10): 4748-4760. DOI:10.1021/jf0104681.
- [46] CHANG S, TAN C, FRANKEL N E, et al. Low-density lipoprotein antioxidant activity of phenolic compounds and polyphenol oxidase activity in selected clingstone peach cultivars[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48(2): 147-151. DOI:10.1021/jf9904564.
- [47] OLURANTI E C, OLGA P I. Phenolic and carotenoid composition of canned peaches (*Prunus persica*) and apricots (*Prunus armeniaca*) as affected by variety and peeling[J]. Food Research International, 2013, 54(1): 448-455. DOI:10.1016/j.foodres.2013.07.016.
- [48] MONICA S, LEONARDO S, ANTONIO M, et al. Phenolic characterization of sicilian yellow flesh peach (*Prunus persica* L.) cultivars at different ripening stages[J]. Journal of Food Quality, 2012, 35(4): 255-262. DOI:10.1111/j.1745-4557.2012.00452.x.
- [49] BENGOCHEA L M, SANCHO I A, BARTOLOMÉ, et al. Phenolic composition of industrially manufactured purées and concentrates from peach and apple fruits[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1997, 45(10): 4071-4075. DOI:10.1021/jf9703011.
- [50] ANDREOTTI C, RAVAGLIA D, RAGAINI A, et al. Phenolic compounds in peach (*Prunus persica*) cultivars at harvest and during fruit maturation[J]. Annals of Applied Biology, 2008, 153(1): 11-23. DOI:10.1111/j.1744-7348.2008.00234.x.
- [51] 蔡志翔, 严娟, 宿子文, 等. 不同类型桃种质资源主要酚类物质含量评价[J]. 园艺学报, 2022, 49(5): 1008-1022. DOI:10.16420/j.issn.0513-353x.2021-0138.

- [52] 严娟, 蔡志翔, 沈志军, 等. 桃3种颜色果肉中10种酚类物质的测定及比较[J]. 园艺学报, 2014, 41(2): 319-328. DOI:10.16420/j.issn.0513-353x.2014.02.007.
- [53] JEAN-PIERRE A, FRANCIS C, LOÏC L, et al. Modelling the interactions between free phenols, *L*-ascorbic acid, apple polyphenoloxidase and oxygen during a thermal treatment[J]. Food Chemistry, 2013, 138(2/3): 1289-1297. DOI:10.1016/j.foodchem.2012.10.083.
- [54] 赵光远, 纵伟. 超高压处理对鲜榨桃汁中多酚氧化酶(PPO)活力影响的研究[J]. 饮料工业, 2007(3): 24-27.
- [55] CHUKWAN T, GARY S M, JUDY J, et al. The effect of high pressure processing on clingstone and freestone peach cell integrity and enzymatic browning reactions[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2017, 39: 230-240. DOI:10.1016/j.ifset.2016.12.011.
- [56] DERMESONLOUOGLOU E K, ANGELIKAKI F, GIANNAKOUROU M C, et al. Minimally processed fresh-cut peach and apricot snacks of extended shelf-life by combined osmotic and high pressure processing[J]. Food and Bioprocess Technology, 2019, 12(3): 371-386. DOI:10.1007/s11947-018-2215-1.
- [57] 戴瀚铖. 鲜切桃品种筛选及高压静电场保鲜技术研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2021: 19-21; 31-37.
- [58] ZHOU L Y, CHIA Y T, BINGOL G, et al. Effect of different microwave power levels on inactivation of PPO and PME and also on quality changes of peach puree[J]. Current Research in Food Science, 2022, 5: 41-48. DOI:10.1016/J.CRFS.2021.12.006.
- [59] ZHANG S Y, WEN Y J. Microwave pre-treatment reduced the browning of peach juice[J]. Advanced Materials Research, 2013, 2586(774/776): 614-620. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.774-776.614.
- [60] ZHOU H J, ZHANG X N, SU M S, et al. Controlled atmosphere storage alleviates internal browning in flat peach fruit by regulating energy and sugar metabolisms[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2022, 186: 107-120. DOI:10.1016/J.PLAPHY.2022.07.003.
- [61] 何双, 李高阳, 蒋成, 等. 气调贮藏对黄桃风味和软化及褐变相关酶的影响[J]. 现代农业科技, 2019(7): 202-205; 218.
- [62] MADHU K, HIMADRI M, ROBIN J, et al. Development and structural characterization of edible films for improving fruit quality[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2017, 12: 121. DOI:10.1016/j.fpsl.2017.02.003.
- [63] GOHARI G, MOLAEI S, KHEIRY A, et al. Exogenous application of proline and *L*-cysteine alleviates internal browning and maintains eating quality of cold stored flat 'Maleki' peach fruits[J]. Horticulturae, 2021, 7(11): 469-481. DOI:10.3390/horticulturae7110469.
- [64] GAO H, LU Z M, YANG Yue, et al. Melatonin treatment reduces chilling injury in peach fruit through its regulation of membrane fatty acid contents and phenolic metabolism[J]. Food Chemistry, 2018, 245: 659-666. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.10.008.
- [65] ZHAO Y Y, SONG C C, DAVID B A, et al. Jasmonic acid treatment alleviates chilling injury in peach fruit by promoting sugar and ethylene metabolism[J]. Food Chemistry, 2020, 338: 1128005. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.128005.
- [66] LO'AY A A, ISMAIL H, KASSEM H S. Postharvest treatment of 'Florida Prince' peaches with a calcium nanoparticle-ascorbic acid mixture during cold storage and its effect on antioxidant enzyme activities[J]. Horticulturae, 2021, 7(11): 499. DOI:10.3390/horticulturae7110499.
- [67] ZHI H H, LIU Q Q, DONG Y, et al. Effect of calcium dissolved in slightly acidic electrolyzed water on antioxidant system, calcium distribution, and cell wall metabolism of peach in relation to fruit browning[J]. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2017, 92(6): 621-629. DOI:10.1080/14620316.2017.1309994.
- [68] LI Y L, LIU S, CHEN S Q, et al. Physicochemical changes in fresh-cut peaches with the combined treatment of UV-B irradiation and 1-MCP[J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 184: 111755. DOI:10.1016/j.postharvbio.2021.111755.
- [69] HUANG D D, WANG C Y, ZHU S H, et al. Combination of sodium alginate and nitric oxide reduces browning and retains the quality of fresh-cut peach during cold storage[J]. Food Science and Technology International, 2021, 28(8): 735-743. DOI:10.1177/10820132211056102.
- [70] 王美红, 李一诺, 葛柯良, 等. 1-MCP (1-甲基环丙烯)与CaCl<sub>2</sub>处理对桃果实采后贮藏品质及生理的影响[J]. 植物生理学报, 2021, 57(5): 1113-1122. DOI:10.13592/j.cnki.ppj.2020.0607.
- [71] 谢小燕, 刘德讲, 李芳杰, 等. 程序降温协同1-MCP和保鲜纸两种处理对新疆蟠桃贮藏品质和果皮褐变的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(19): 223-231. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20211011-107.