

鲜切果蔬褐变机理及防控技术研究进展

王 斌¹, 林 薇¹, 袁 晓^{1,2,*}

(1.韶关学院生物与农业学院, 广东省粤北食药资源利用与保护重点实验室, 粤北特色果蔬工程技术研究中心, 广东 韶关 512005; 2.华南农业大学园艺学院, 广东省果蔬保鲜重点实验室, 广东 广州 510642)

摘 要: 鲜切果蔬因具有方便快捷和干净卫生的优点而深受消费者欢迎, 是一种新的果蔬消费形式, 有很大的发展潜力。但果蔬经过鲜切加工后完整性丧失, 鲜切果蔬在贮藏和销售期间切面很容易褐变, 严重影响鲜切果蔬的商品性和保鲜期, 制约鲜切果蔬产业的发展。阐释鲜切果蔬褐变发生机理, 并总结抗褐变保鲜技术的研究进展, 能为新型安全高效的抗褐变技术研发提供参考。本文从鲜切果蔬褐变类型、影响褐变的因素和防控思路等角度, 系统综述了鲜切果蔬褐变发生机制和抗褐变技术研究现状, 重点介绍了活性氧代谢和膜脂代谢在鲜切果蔬褐变中的潜在作用, 以期鲜切果蔬的褐变防控提供参考, 降低鲜切果蔬产业中的经济损失。

关键词: 鲜切果蔬; 切面褐变; 多酚氧化酶; 膜脂代谢; 抗褐变技术

Research Progress in Mechanism and Preventive Technologies for the Browning of Fresh-Cut Fruits and Vegetables

WANG Bin¹, LIN Wei¹, YUAN Xiao^{1,2,*}

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Utilization and Conservation of Food and Medicinal Resources in Northern Region, Guangdong Provincial Engineering and Technology Research Center of Special Fruit and Vegetables in Northern Region, College of Biology and Agriculture, Shaoguan University, Shaoguan 512005, China; 2. Guangdong Province Key Laboratory of Postharvest Science of Fruits and Vegetables, College of Horticulture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Fresh-cut fruits and vegetables are highly favored by consumers due to their convenience and cleanliness, which have significant development potential as a new consumption format for fruits and vegetables. The cut surface of fresh-cut fruits and vegetables is prone to browning during storage and sale, which significantly affects the marketability and shelf life, thereby hindering the development of the fresh-cut product industry. Elucidating the mechanism underlying browning in fresh-cut fruits and vegetables and summarizing recent progress in the development of browning prevention technologies could provide valuable insights for the development of new, safe, and efficient anti-browning techniques. This article provides a systematic review of the mechanism underlying browning in fresh-cut fruits and vegetables, along with the state-of-the-art development of anti-browning technologies, from the perspectives of browning types, influencing factors, and preventive strategies. In addition, this review highlights the potential roles of reactive oxygen species (ROS) metabolism and membrane lipid metabolism in the browning process of fresh-cut fruits and vegetables, aiming to offer references for browning prevention in fresh-cut fruits and vegetables, thereby reducing economic losses in the fresh-cut fruit and vegetable industry.

Keywords: fresh-cut fruit and vegetable; cut surface browning; polyphenol oxidase; membrane lipid metabolism; anti-browning technologies

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240828-208

中图分类号: TS255.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2025) 07-0367-18

引文格式:

王斌, 林薇, 袁晓. 鲜切果蔬褐变机理及防控技术研究进展[J]. 食品科学, 2025, 46(7): 367-384. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240828-208. <http://www.spkx.net.cn>

WANG Bin, LIN Wei, YUAN Xiao. Research progress in mechanism and preventive technologies for the browning of fresh-cut fruits and vegetables[J]. Food Science, 2025, 46(7): 367-384. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240828-208. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2024-08-28

基金项目: 广东省教育厅重点科研平台和项目 (2024GCZX006)

第一作者简介: 王斌 (1991—) (ORCID: 0000-0002-6812-235X), 男, 副教授, 博士, 研究方向为采后果蔬贮藏加工。

E-mail: b_wang@sgu.edu.cn

*通信作者简介: 袁晓 (1989—) (ORCID: 0009-0009-1979-4465), 女, 实验员, 硕士, 研究方向为采后果蔬贮藏加工。

E-mail: yxiao@sgu.edu.cn

水果和蔬菜（简称为果蔬）中含有丰富的维生素、矿物质、膳食纤维和抗氧化活性物质等营养成分，对保持人体健康至关重要^[1-2]。大量的研究表明，日常饮食中增加果蔬的摄入对人体健康很有益，如降低慢性病风险、促进肠道健康和改善消化、减少炎症和氧化应激损伤、增强免疫能力、有助于体质量保持等^[3]。鲜切果蔬又称为最少加工果蔬或轻加工果蔬，是指一类经整理、清洗、去皮、切割、灭菌、护色和包装等一系列的预加工后（图1），再在消费市场销售的果蔬产品形式^[4]。与未经鲜切加工的果蔬相比，鲜切果蔬具有方便快捷、可食率高、新鲜卫生等优点，深受消费者喜爱，尤其受都市消费者的青睐^[5]。但鲜切处理如去皮、切分等对果蔬造成不可避免的机械伤，鲜切果蔬实质上是“受伤”的果蔬，在采后运销过程中极易出现变味、变色（褐变）、腐烂等问题，导致鲜切果蔬的贮运期很短^[6]。其中，褐变是影响鲜切果蔬产品外观和商品性的主要因素，直接影响消费者的购买决定。褐变后的果蔬通常需要废弃化处理，会造成很大的经济损失，严重制约鲜切果蔬产业的可持续发展。因此，迫切需要阐明鲜切果蔬的褐变发生机理，并有针对性地研发安全高效的新型抗褐变保鲜技术。

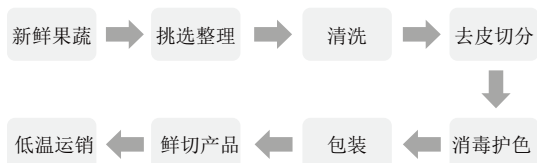


图1 鲜切果蔬生产加工的基本流程

Fig. 1 Process flow chart of the production and processing of fresh-cut fruits and vegetables

尽管近几年国内外发表了一些有关鲜切果蔬褐变的综述性文章^[7-10]，但几乎所有文章均认为酚酶介导的酶促褐变是导致鲜切果蔬产生褐变的主要原因。随着研究手段和技术的更迭升级，近几年的研究发现除酚酶外，其他因子如黄酮类物质的从头合成、细胞膜脂代谢和活性氧（reactive oxygen species, ROS）等可能也是影响鲜切果蔬褐变的重要因素^[11-13]。因此，有必要更新鲜切果蔬褐变发生机制和防控技术研发方面的最新研究进展，以期研发安全高效的新型抗褐变技术提供参考，为鲜切果蔬产业的高质量发展奠定基础。

1 鲜切果蔬褐变的主要类型

褐变指食品在加工、储存或烹饪过程中，因酶反应、氧化反应或其他化学反应导致的食物外观颜色加深的现象^[14]。根据其发生机制，褐变可分为酶促褐变和非酶促褐变两大类^[15-16]（图2）。

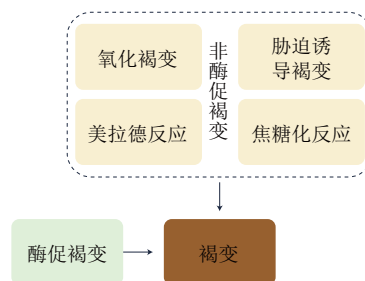


图2 食品中发生的主要褐变类型

Fig. 2 Major types of browning occurring in foods

1.1 酶促褐变

酶促褐变是在酚代谢酶的作用下，以酚类物质为主的反应底物与氧气发生酶促反应生成醌类物质，醌类化合物再经过一系列的非酶促反应，最终氧化聚合形成一类称为黑色素的物质^[17]。多酚氧化酶（polyphenol oxidase, PPO）和过氧化物酶（peroxidase, POD）是介导酶促褐变的两种主要酚代谢酶。目前，大量的研究证明，PPO和POD均参与了鲜切果蔬的酶促褐变反应^[18-19]。此外，漆酶（laccase, LAC）也是一种PPO，一些果蔬的酶促褐变与LAC有关^[20]。LAC通常是多基因家族，荔枝（*Litchi chinensis*）基因组中含有39个LcLAC基因，其中28个LcLAC基因在荔枝果皮中表达，大部分LcLAC基因的表达随果实发育和采后果皮褐变呈下降趋势；定位于内质网和液泡中的LcLAC7和LcLAC14-3在采收后表达上调，且LcLAC7蛋白对（-）-表儿茶素具有催化活性，对针叶树醇的催化活性相对较低，表明LcLAC7通过催化原花青素聚合参与荔枝果皮褐变^[21]。鸭梨（*Pyrus bretschneideri*）LAC活性与采收时间高度相关，多个PbLACs在鸭梨果心褐变过程中表达上调，而急速降温处理能同时抑制鸭梨果心褐变和PbLAC6、PbLAC7和PbLAC14的表达^[22]，表明LAC参与了鸭梨的果心褐变。

1.2 非酶促褐变

非酶促褐变是除酶促褐变以外的其他形式褐变的总称，主要包括氧化褐变、美拉德反应、焦糖化反应和胁迫诱导的褐变等^[23]。

氧化褐变主要包括抗坏血酸（VC）氧化降解和多酚类物质自身氧化。目前的研究表明，VC氧化降解引起的褐变主要与果汁和葡萄酒的褐变有关。电氧化处理过程中降低了VC保留率，并导致非酶褐变反应的增加，表明电氧化处理加重橙汁褐变与VC氧化降解有关^[24]。在对模型葡萄酒体系的研究中发现，当VC与（+）-儿茶素在45℃条件下孵育14 d后，反应产物在440 nm波长处的吸光度显著增加。但（+）-儿茶素与过氧化氢（H₂O₂）共孵育时，不能产生与VC降解相同程度的褐变。液相色谱分析发现，VC和H₂O₂分别与（+）-儿茶素反应生成的产物不是同一种化合物^[25]。但在鲜切果蔬中的研究表明，外源VC

处理能抑制褐变。联合使用VC和酸性聚磷酸盐,能有效控制鲜切苹果 (*Malus pumila*) 褐变^[26]。与在鲜切苹果中的褐变抑制效应类似,外源处理VC也可抑制鲜切荸荠 (*Eleocharis dulcis*) 褐变(黄化)^[27]。外源VC处理能抑制一些种类的鲜切果蔬褐变^[28],表明VC降解引起的氧化褐变不是造成鲜切果蔬褐变的主要原因。

除VC氧化降解外，多酚类化合物的自身氧化、多酚物质与蛋白聚合也会导致褐变现象^[29]，但目前在鲜切果蔬褐变中研究得很少。在绿茶中，黄烷-3-醇是一种没食子酰基儿茶酸，会发生自动氧化反应形成 δ 或 γ -型DhC₅，导致绿茶褐变^[30]。在苹果汁褐变过程中，表儿茶素、儿茶素、绿原酸和咖啡酸的含量与苹果汁褐变密切相关，随着儿茶素的氧化降解，绿原酸酐和儿茶素含量迅速下降，随后儿茶素与儿茶素酐经过复杂的聚合反应形成褐色聚合物^[31]。美拉德反应和焦糖化反应均需要在高温条件下才会发生^[32]，而鲜切果蔬要求贮藏在5℃及以下低温^[33]。因此，鲜切果蔬在贮运过程中不可能通过美拉德反应和焦糖化反应发生褐变。

此外, 果蔬仍是有生命活性的生命体, 在采后运销时仍进行生命活动, 最低程度地维持果蔬的生命活动是延长果蔬贮藏寿命的基本原理^[34]。去皮和切割等加工方式会对果蔬造成机械伤, 机械伤本身是一种非生物胁迫^[6]。通常情况下, 果蔬为了保护自己并降低机械损伤的影响, 会激活自身的愈伤保护机制, 诱导合成一些有色化合物, 如黄酮类物质^[35], 这些化合物在切面的积累会导致切面颜色加深。在胁迫条件下诱导自身新合成化合物是植物应对胁迫的一种保守性保护机制^[36-38]。在鲜切荸荠褐变过程中, 苯丙烷途径中与黄酮合成相关的基因被显著诱导, 2种黄酮类化合物(圣草酚和柚皮素)的含量显著增加^[27]。此外, 紫外照射也会诱导褐色物质的合成积累。白葡萄(*Vitis vinifera* var. Superior)在短波紫外线(ultraviolet-C, UV-C)照射后, 22℃条件下贮藏3d时果皮表面出现了褐变症状, 并提高了反式白藜芦醇含量, 加厚了果皮组织的细胞壁^[39]。但适宜剂量的UV-C辐照处理又能抑制鲜切果蔬褐变。鲜切前和鲜切后的UV-C处理均能显著抑制鲜切梨的褐变, 提高鲜切梨PPO活性, 降低苯丙氨酸解氨酶(phenylalanine ammonia lyase, PAL)活性和总酚含量, 同时还能提高鲜切梨的抗氧化酶活性^[40]。在鲜切莲藕(*Nelumbo nucifera* Gaertn.)中也报道了相似的结果, 在UV-C处理5min和10min后, 鲜切莲藕的褐变度、可溶性鞣含量以及PPO、POD和PAL活性均显著降低^[41]。这些研究表明, UV-C在调控鲜切果蔬褐变过程中表现出明显的剂量和处理时长依赖效应, UV-C的抗褐变效果也可能与果蔬种类有关。

2 鲜切果蔬的褐变机制

2.1 多酚代谢酶与褐变的关系

如前所述,目前较为受到认可的观点为PPO和POD等多酚代谢酶介导的酶促反应是促使鲜切果蔬发生褐变的主要原因(图3)。但另外一些研究结果显示,PPO和POD与鲜切果蔬的褐变并不总是直接相关^[9-16]。在芒果皮下褐变过程中,总酚含量增加,但PPO和POD活性却显著降低,说明芒果皮下褐变可能与PPO和POD活性无关^[42]。研究表明,不同品种的马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)易褐变性差异明显,但不同品种马铃薯发生褐变的难易程度与PPO和POD活性、总酚含量以及VC含量等指标之间没有显著相关性,且酚类化合物及代谢酶不是限制鲜切马铃薯褐变速率的主要因子^[43]。‘Topaz’品种苹果的总酚含量、PPO和POD活性均非常低,但在鲜切后也很容易褐变,表明‘Topaz’苹果的褐变不是通过酚酶介导的酶促褐变形成的^[44]。Landi等^[45]的研究也表明,POD似乎与鲜切莴苣(*Lactuca sativa* L.)褐变没有直接关系。薄荷提取物处理鲜切芋头后,处理组的PPO和POD活性比对照组更高,但褐变程度比对照组低^[46]。卷心生菜(*Lactuca sativa*) PPO活性在切割处理前后及后续的贮藏期间保持不变,且能抑制褐变的热烫处理,不影响PPO活性及变化趋势^[47]。这些研究表明,PPO和POD等酚代谢酶在鲜切果蔬褐变中的具体作用机制仍不明确。

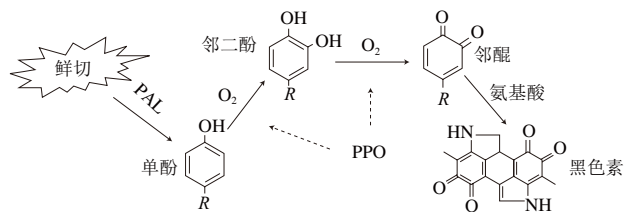


图3 PAL和PPO在酶促褐变中的可能作用
Fig.3 Possible roles of PAL and PPO in enzymatic browning

*PAL*是植物通过苯丙烷途径合成酚类化合物的关键合成酶,当植物受到物理伤害时会促进*PAL*的转录,并提高*PAL*活性^[48]。荸荠中并没有PPO的主要底物,但鲜切荸荠在贮藏过程中仍会发生褐变^[49]。通过*PAL*途径合成的绿原酸、2-咖啡酰酒石酸和异绿原酸等酚类化合物是PPO等酚代谢酶的主要底物^[50]。4个茼蒿*PAL*基因强烈响应切割产生的伤信号,而乙酸处理显著抑制鲜切茼蒿褐变并下调机械伤诱导*PALs*基因的表达,且乙酸在体内和体外对茼蒿*PAL*活性均表现出很强的抑制作用^[51]。这些结果表明,有些果蔬在没有PPO底物时,切割处理通过激活*PAL*活性生成PPO的反应底物,随后发生PPO介导的酶促褐变(图3)。

此外，在酶促褐变反应中，PPO等酚代谢酶催化酚类物质氧化形成的氧化产物（如邻醌）是无色的，醌再

聚合成褐色的聚合物仍需要进行多个高度复杂的聚合反应^[52]。目前针对酶促褐变的研究主要集中在酚酶催化酚合成邻醌这一环节,但决定褐色化合物形成的关键在于后续邻醌的再度氧化聚合。因此,酚代谢酶介导的氧化反应是酶促褐变途径的上游事件,PPO等酚酶在酶促褐变反应中的精确作用仍值得研究。

2.2 细胞膜与鲜切果蔬褐变的关系

“区室化”学说是另一种较认可的酶促褐变理论。在非胁迫条件下,细胞内各组分被膜系统分隔在不同的细胞器(区室)中,相互之间不能直接接触^[53]。但果蔬组织在受到切割处理时,会不可避免地发生细胞破裂,导致原本分隔在不同细胞器中的组分可以直接接触,相互间发生反应。酚类物质被释放出来与酚酶发生反应,酚随后被氧化聚合为褐色的聚合物,使得切割部位表现出褐变现象^[54]。同时,切分产生的伤信号还会传递到果蔬组织内部诱导组织产生协同伤害防御反应,导致在远离切割部位的组织也发生褐变^[55]。

膜系统(包括细胞膜和细胞器被膜)是将不同化合物分隔在区室中的关键细胞结构,主要由脂质和蛋白质组成,主要功能是控制膜内外物质的选择性交换、蛋白的分泌和运输等^[56-57]。其中,磷脂双分子层是构成细胞膜的基本支架。近几年的许多研究表明,膜脂降解引起的细胞膜功能完整性下降与鲜切果蔬褐变密切相关^[13]。南果梨(*Pyrus ussuriensis* ‘Nanguo Pear’)在鲜切后极易发生褐变,在南果梨褐变过程中,磷脂和脂肪酸含量、磷脂酶D(phospholipase D, PLD)和脂氧合酶(lipoxygenase, LOX)的活性以及基因表达发生显著变化。果实经PLD特异性抑制剂正丁醇处理后,降低了PLD活性和基因表达水平,延缓了褐变进展,并有助于保持细胞膜超微结构的完整性^[58]。11个代谢物的相对含量在鲜切芋头(*Colocasia esculenta*)褐变过程中持续增加,其中10个含量持续增加的代谢物是脂质或脂质代谢物,表明细胞膜脂在鲜切芋头褐变过程中发生了降解。在鲜切芋头褐变过程中利用转录组分析进一步发现,受切分处理诱导的差异表达基因显著富集在亚麻酸代谢途径^[59]。由于亚麻酸是组成细胞膜的主要脂质成分,表明膜脂代谢与鲜切芋头褐变密切相关。

脂肪酸代谢酶的活性及编码基因的表达在鲜切后以及鲜切果蔬褐变过程中增加,以LOX为代表的脂肪酸代谢酶是引起细胞膜脂代谢的关键酶。LOX是一类含非血红素铁的双加氧酶,能催化多不饱和脂肪酸形成含有共轭双键的氢过氧化物,是催化多不饱和脂肪酸(如磷脂)氧化的主要酶^[60-61]。植物细胞膜脂中富含的亚油酸和亚麻酸是LOX的主要反应底物,LOX以膜脂中的不饱和脂肪酸为底物发生加氧反应,导致细胞膜脂过氧化^[62]。不同品种的梨果实鲜切后,高LOX活性的品种更容易发

生褐变,不饱和脂肪酸含量高的梨品种在鲜切后更不易褐变^[63]。随着鲜切芋头褐变加重,*CeLOX6*表达量逐渐增加,*CeLOX6*表达模式与褐变指标 ΔE 呈显著正相关^[64]。此外,在鲜切芋头褐变过程中,催化脂肪酸过氧化反应的丙二烯氧化物合成酶(allene oxide synthase, AOS)基因的表达模式与鲜切芋头褐变进程也高度相关^[65]。

此外,许多抑制LOX活性的采后处理方法能有效缓解鲜切果蔬褐变。如硫化氢(H_2S)处理能显著抑制鲜切苹果褐变, RNA-Seq分析发现, H_2S 处理后表达下调的DEGs主要是脂质降解酶编码基因,包括LOX和PLD编码基因^[66]。高浓度 CO_2 处理能显著抑制鲜切莴苣褐变,并抑制LOX活性和膜脂过氧化,保持细胞膜完整性和细胞区室化功能^[67]。在鲜切荸荠也观察到了相似的结果,即2 MPa的高压 CO_2 (high pressure carbon dioxide, HPCD)处理显著抑制了LOX活性,处理组的鲜切荸荠含有更低含量的丙二醛(malondialdehyde, MDA),表明HPCD处理是通过缓解膜脂过氧化,从而延缓鲜切荸荠的褐变^[12]。这些研究表明, LOX等脂肪酸代谢酶参与机械伤信号诱导的细胞膜脂代谢, LOX介导的膜脂代谢可能是引起鲜切果蔬褐变的重要原因。

膜系统完整性损失导致的细胞区室化功能下降,使底物与酶直接接触,可能是鲜切果蔬发生褐变的关键原因之一。基于此理论绘制鲜切处理通过诱导细胞膜和细胞器被膜降解,导致鲜切果蔬发生褐变的可能机制图(图4)。在鲜切加工前,果蔬细胞的磷脂双分子层排列紧致,细胞膜和细胞器被膜是完整的,酚类化合物和PPO等酚酶被膜系统分隔在不同的细胞器中。但经过切分处理,磷脂双分子层结构开始紊乱,许多磷脂尾部的脂肪酸发生了降解,细胞膜和细胞器被膜的完整性丧失,酚类化合物和PPO等酚酶从细胞器中释放出来,在胞内和胞外同时发生了直接的结合反应,从而导致酶促褐变的发生。

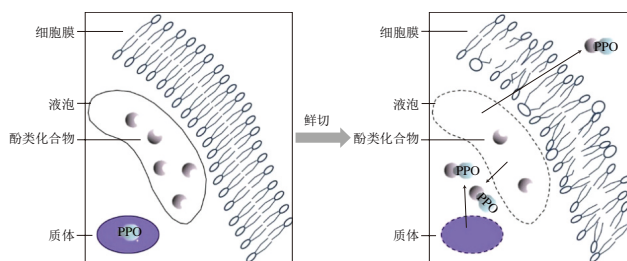


图4 细胞膜在防止鲜切果蔬褐变中的作用机制

Fig. 4 Mechanism of action of the cell membrane in preventing the browning of fresh-cut fruits and vegetables

2.3 ROS代谢与鲜切果蔬褐变的关系

ROS是生物体内一类化学性质活跃的含氧自由基的总称,具有很强的氧化活性,主要包括 H_2O_2 、超氧阴离子、羟自由基和单线态氧^[68]。在非胁迫环境中,细胞

内的ROS主要由线粒体产生,在线粒体呼吸过程中ROS随电子传递链复合体泄露至线粒体外。此时,细胞内ROS的生产和清除过程处于动态平衡,呼吸过程中产生的ROS能及时被清除,不会对细胞造成氧化损伤^[69]。但当生物体受到非生物胁迫时,呼吸作用加剧,通过线粒体电子链释放出大量ROS,短时过量生成的ROS超过了ROS清除系统的清除能力,使ROS在细胞内积累,最终对细胞造成氧化损伤^[70]。此外,胁迫也会刺激线粒体等细胞器大量生成ROS^[71]。如前所述,切割等加工处理损伤属于物理性机械伤,对鲜切果蔬而言也是非生物胁迫的一种类型。植物组织在受到机械伤胁迫处理后,会刺激体内生成大量ROS^[72]。

目前,许多研究表明ROS代谢与鲜切果蔬褐变紧密关联。茄子(*Solanum melongena* L.)在切割处理后ROS会迅速积累,一些ROS代谢酶如超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、抗坏血酸过氧化物酶(ascorbate peroxidase, APX)和过氧化氢酶(catalase, CAT)的活性迅速改变。SOD和APX活性在鲜切后10 min时达到最高值,随后下降;而CAT活性急剧增加,在3 min内便达到峰值,在30 min后才开始下降^[73]。CAT是特异代谢H₂O₂的关键酶,直接使用0.05%质量分数的外源CAT处理鲜切马铃薯5 min能有效缓解鲜切马铃薯褐变。同时,外源CAT处理提高了内源CAT、APX和谷胱甘肽过氧化物酶活性,增强对1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基的清除能力,降低H₂O₂和O₂⁻·含量^[74]。Ru Xueyin等^[75]在鲜切莴苣褐变的研究中发现,外源施用γ-氨基丁酸(γ-aminobutyric acid, GABA)通过调节ROS和膜脂代谢抑制鲜切莴苣褐变。Sun Yangyang等^[76]发现南果梨的果皮褐变与果实对ROS的清除能力减弱有关。

这些研究证实,ROS代谢与鲜切果蔬褐变密切相关。鲜切诱导的ROS会使胞内ROS生成与代谢的动态平衡失衡,导致过量ROS在胞内积累,对构成细胞结构的生物大分子如膜脂造成氧化损伤,从而加速鲜切果蔬褐变,表明ROS造成的氧化损伤是鲜切果蔬加速褐变的重要原因。这也解释了一些提高鲜切果蔬ROS代谢能力的采后处理技术能在一定程度上延缓鲜切果蔬褐变的原因。

2.4 黄酮合成与鲜切果蔬褐变的关系

一些特定种类的黄酮类化合物具有浅黄或棕黄的色泽,如柚皮素和圣草酚,机械伤会诱导这些黄酮类化合物的生物合成^[77]。通过对鲜切荸荠褐变部位的化合物进行分离和鉴定后发现,柚皮素和圣草酚这两种黄酮类物质的含量在鲜切荸荠褐变部位显著积累^[11]。在鲜切荸荠褐变过程中,与黄酮类化合物合成有关基因的表达和相关酶的活性显著增加,且与鲜切荸荠褐变高度相关^[78]。

此外,外源施用阿魏酸通过反馈调控黄酮生物合成的方式能有效抑制鲜切荸荠褐变^[19]。在对鲜切芋头褐变的研究中发现,参与黄酮类化合物生物合成的基因表达和酶活性随褐变不断增加,而抑制黄酮类化合物的合成能抑制鲜切芋头褐变^[79]。八棱海棠(*Malus robusta* Rehd.)和新疆野苹果(*Malus sieversii* Roem.)的褐变特性差异很大,转录组学分析鉴定的差异表达基因显著富集在黄酮生物合成途径中,代谢组学鉴定的差异积累代谢物许多是黄酮类物质,表明黄酮合成能力的差异是决定不同品种苹果外植体易褐变的主要因素^[80]。这些研究表明,黄酮类物质在切面的合成积累可能也是造成鲜切果蔬褐变的重要原因,其他类型的果蔬褐变是否也与黄酮的合成积累有关,值得进一步研究。黄酮类化合物在切割处理后合成积累,表明由黄酮积累引起的褐变是机械伤胁迫诱导的褐变,属于非酶促褐变。

3 影响鲜切果蔬褐变的因素

3.1 果蔬种类和品种

果蔬种类是决定褐变特性的根本原因,因为不同种类果蔬的酚类物质含量、褐变相关酶活性、含水量和质地(组织结构)等方面存在巨大差异,这些因素直接影响了采后果蔬的褐变特性。例如,一些果蔬如土豆、苹果、梨、莴苣、莲藕、山药(*Dioscorea opposita*)等,由于其内部含有较高含量的酚类物质或较高活性的酚代谢酶,因此在切割或损伤后更容易发生褐变。相反,一些果蔬由于酚类物质含量较低、脂肪酸代谢酶或酚代谢酶的活性不高,鲜切后褐变相对不容易发生^[81]。

同一果蔬种类不同品种的褐变特性也存在明显差异。5个品种(‘Monalisa’ ‘Spunta’ ‘Liseta’ ‘Cara’ 和 ‘Agria’)马铃薯的易褐变性存在显著差异,‘Monalisa’品种最易褐变,而‘Agria’品种最不易褐变^[43]。八棱海棠果的外植体比新疆野苹果更容易褐变^[80],而‘Majda’苹果是一个天然不易褐变的品种^[82]。机械采收导致食用橄榄果皮褐变,在评估的106个橄榄品种中,14个品种的抗褐变性能较好,在机械损伤处理3 h后也没有出现任何褐变症状,表明不同品种橄榄的褐变特性主要由遗传因素决定^[83]。由此可知,品种特性是决定果蔬是否容易褐变的关键因素。因此,后续研究应重点鉴定决定鲜切果蔬褐变的关键调控因子,通过生物育种的方式创制不易褐变的果蔬新种质,有望从根本上解决鲜切果蔬的褐变问题,破解制约鲜切果蔬产业高质量发展的难题。

3.2 贮藏温度

尽管目前对鲜切果蔬褐变机理的认识还不统一,但不管是哪种类型的褐变,都必须要有酶的参与才能进行。贮藏温度影响鲜切果蔬褐变,主要与温度影响酶活性有关。通常认为酶属于蛋白质的范畴,而蛋白质的构

象受温度的直接影响^[84]。在一定温度范围内,酶的活性与温度正相关,温度越高,酶活性越强^[85]。当超过最适反应温度后,在高温条件下许多酶的活性会降低,甚至完全失活。这也是一些类型的鲜切果蔬经过热烫处理后,褐变被明显抑制的重要原因,热烫处理使参与褐变的酶活性下降,甚至完全失活。比如,鲜切芋头在20℃贮藏24 h时切面就会发生严重褐变,而在4℃低温贮藏12 d时的褐变仍比在20℃贮藏24 h时要轻很多^[65]。鲜切芒果(*Mangifera indica*)的感官品质在12℃贮藏时下降速率比在5℃贮藏时更快,货架期缩短了至少3 d^[86]。但将鲜切卷心生菜在50℃热烫处理1 min后,切割诱导的褐变、PAL和POD活性被显著抑制^[47]。

低温贮藏具有降低呼吸作用强度,减少乙烯释放,抑制病原微生物活动的效果^[87-89]。因此,低温是鲜切果蔬贮藏和运销的基础条件,但许多果蔬对低温敏感,在冷害临界温度条件下贮藏时就会发生冷害,尤其是热带、亚热带产果蔬^[90]。褐变也是果蔬发生冷害的典型症状之一^[91]。在对桃(*Prunus persica* L. Batsch)果实冷害的研究中发现,LAC基因*PpLAC7*和*PpLAC9*的表达水平与褐变指数呈现相同的变化趋势,GABA处理能够减轻桃果实褐变程度,下调*PpLAC7*和*PpLAC9*的表达,表明LAC介导的酶促褐变与桃果实冷害褐变有关^[92]。目前,少有鲜切果蔬褐变与冷害直接相关的研究报道,是否低温贮藏造成的冷害也是引起鲜切果蔬褐变的重要原因,值得进一步探究。在4℃条件下贮藏的鲜切油桃(*Prunus persica* var. *Nectarina*)呼吸速率更高,而8℃贮藏的鲜切油桃褐变速率更快,褐变症状更明显^[93]。综上,阐释冷害与鲜切果蔬褐变的关系,对鲜切果蔬抗褐变保鲜技术的研发至关重要。

3.3 微生物

果蔬鲜切后失去了外表皮的保护,在贮运过程中极易被病原菌感染,寄生在切面的微生物能利用鲜切果蔬提供的养分迅速生长繁殖,且切割处理导致的养分暴露为微生物的生长繁殖创造了更加有利的营养条件。尽管微生物与鲜切果蔬褐变直接相关的文献报道较少,但微生物也是加重褐变症状的可能因素之一。因为在植物组织中接种微生物时,在接种部位表现出明显的褐色菌斑^[94-96]。即使贮藏在低温(4℃)条件下,经过12 d的贮藏,与0 d相比芋头切面的细菌总数显著增加,而抽真空包装能在减少微生物总数的同时,有效控制鲜切芋头褐变^[6]。表明病原微生物在低温贮藏条件下仍继续生长繁殖,微生物繁殖可能与鲜切果蔬褐变有关。病原微生物对鲜切果蔬的感染属于自然感染,尽管观察不到明显的病斑,但微生物的繁殖不可避免地造成鲜切产品外观品质变化,比如褐变加重,这意味着切面微生物的繁殖不仅影响鲜切产品的安全性,也不可避免地降低感官品质。进一步说明,鲜切加工环节中的灭菌(消毒)步骤

必不可少,对保持鲜切产品的感官品质和保证食品安全至关重要。

3.4 包装方式

氧气是限制PPO介导的酶促褐变反应的重要因素(图3),包装方式主要通过调节包装环境中的气体含量,影响褐变相关酶的活性和基因表达,最终影响鲜切果蔬褐变。与普通包装相比,抽真空包装能有效降低包装环境中的氧气含量,并显著降低鲜切芋头PAL和PPO活性,抑制总酚、总黄酮和总醌含量的增加,提高CAT和贮藏后期POD活性^[6]。使用具有选择性透过气体性能的薄膜包装鲜切果蔬是一种简易的自发气调包装方式,能调节包装环境中的气体组分^[97]。有研究表明,自发气调包装通过调节气体组分和各组分的相对含量抑制PAL和PPO等褐变相关酶的活性,对茄子(*Solanum melongena* L.)^[98]、洋蓟(*Cynara scolymus* L.)^[99]和生菜^[100]等鲜切果蔬具有较好的抗褐变作用。此外,包装环境中的氧气含量也会影响微生物的生长繁殖,氧气含量低不利于好氧微生物的生长繁殖。包装能有效减少果蔬产品的失水,包装方式也可能通过影响产品的失水调节果蔬褐变。荔枝果皮失水会加重褐变进程,通过果梗为离体荔枝补充水分,能缓解失水造成的果皮褐变^[101]。

除上述因素外,采收后鲜切前的贮藏时间^[102]、采收季节、采收成熟度、采收方式和采前栽培措施^[103]等因素可能也会影响果蔬的褐变特性。这些因素共同决定了果蔬在加工和贮藏过程中的褐变速度和程度,从而影响鲜切果蔬的品质和货架寿命。

4 鲜切果蔬褐变防控技术

根据鲜切果蔬褐变发生机制,防止鲜切果蔬褐变的主要思路有降低反应底物浓度、抑制相关酶活性、调控ROS代谢和膜脂代谢等^[104]。由于褐变底物在果蔬成熟时已形成,在实际操作中很难降低底物浓度。因此,主要从钝化相关酶活性、降低O₂和ROS含量以及使用抗氧化剂等方面抑制褐变反应。基于这一基本思路,抗褐变保鲜技术总体可归纳为三大类,即化学方法、物理方法和生物方法。

4.1 化学方法

化学方法主要利用对酶活性具有调节作用的抗褐变剂处理鲜切果蔬,实现对褐变的控制效果。阿魏酸、肉桂酸、VC和VE等化合物虽天然存在于生物体中^[105-107],但受制于提取成本高、得率低、工艺复杂等限制,一般通过化学法合成这些天然产物。有研究表明,外源施用这些化学合成的天然产物能很好地控制鲜切果蔬褐变。利用10 mmol/L的阿魏酸处理鲜切芋头能降低PAL和PPO活性,减少总酚和总黄酮含量,提高CAT和POD等抗氧化

化酶的活性^[108]。阿魏酸处理在鲜切荸荠中也得到了相似结果^[27]。不同质量浓度的肉桂酸处理鲜切芋头,低至0.1 g/L的肉桂酸即可显著控制鲜切芋头褐变^[79],表明肉桂酸处理在抑制鲜切芋头褐变中的高效性。此外,在体外实验中证实,肉桂酸还可能与PPO活性位点的Cu²⁺结合,竞争性抑制芋头PPO活性。鲜切茼蒿在外源VC(5 mmol/L)处理后,PPO活性降低了90%^[45]。热力学分析和分子对接分析进一步证实,VC可以螯合位于PPO活性中心的Cu²⁺,并通过疏水作用与PPO蛋白的氨基酸残基相互作用^[109]。此外,也有研究表明外源VE处理对鲜切荸荠的褐变具有较好的抑制作用^[110]。

一些研究证实,组成植物精油的化合物也具有抑制褐变的作用。丁香酚是丁香精油和丁香罗勒精油的主要组分^[111-112],具有怡人的芳香气味,可作为调香剂应用于日化领域。最近几年的研究发现,外源丁香酚处理能抑制鲜切茼蒿^[113]和鲜切荸荠的褐变^[114-115]。丁香酚处理的鲜切产品在低温贮藏期间具有更低的PAL、PPO和POD活性,且丁香酚对相关酶活性的抑制作用呈现明显的浓度效应。值得指出的是,在世界卫生组织国际癌症研究机构公布的致癌物清单中,丁香酚赫然在列,这表明消费者对化学保鲜剂抱有谨慎态度是不无依据的。香茅醛是香茅属植物精油的主要组成成分,同时具有抗菌和消炎作用^[116]。近年来的研究发现,香茅醛对鲜切果蔬褐变也有抑制效果。在低温贮藏的鲜切芋头中施用低剂量的香茅醛,能降低总酚和总可溶性醌含量,抑制PAL、POD和PPO活性,下调褐变相关基因的表达^[117]。百里酚处理同样能抑制龙眼果皮褐变,并降低PPO和POD活性^[118]。表明来源于植物精油的天然化合物对鲜切果蔬的褐变具有较好的抑制作用,考虑到食品安全问题,在鲜切果蔬保鲜中应谨慎使用这类褐变抑制剂。

一些氨基酸或氨基酸类似物对鲜切果蔬也具有抗褐变效应。GABA是一种氨基酸,广泛存在于生物体,许多研究发现GABA具有抑制鲜切果蔬褐变的能力。外源GABA处理会降低MDA含量、相对电导率和膜代谢相关酶的活性,并增强ROS代谢酶活性以及相应基因的表达水平,表明GABA通过调控ROS和膜脂代谢,缓解鲜切茼蒿褐变^[75]。在鲜切马铃薯中也取得相似结果,即外源GABA处理能够显著降低冷藏鲜切马铃薯的褐变^[119]。值得注意的是,GABA还是一种肠-脑轴中潜在的后生元介质,GABA的失衡与神经疾病(如阿尔茨海默病和帕金森病)以及心理障碍(包括焦虑、抑郁和压力等)有关^[120],有必要关注消费者通过食用GABA处理的鲜切果蔬是否影响身体健康。外源施用半胱氨酸处理能增强鲜切白蘑菇(*Agaricus campestris*)和马铃薯ROS清除能力,减少水分散失率,增加内源H₂S含量,从而延缓鲜切产品褐变^[121-122]。此外,有研究发现精氨酸也可抑制鲜切苹果和茼蒿褐变,且精氨酸处理不影响鲜切苹果的口感^[123]。

除上述提到的化学抗褐变剂外,其他化合物对鲜切果蔬褐变也有较好的抑制作用,如柠檬酸、草酸、植酸、氯化钠、氯化钙等。具体化合物及其作用机制见表1。

表1 已报道的化学褐变抑制剂
Table 1 Reported chemical browning inhibitors

化合物	果蔬类型	作用机制	参考文献
阿魏酸	荸荠和芋头	抑制黄醌类物质的重头合成和积累,对PPO基因的表达和活性也有抑制作用	[27,108]
肉桂酸	芋头	通过反馈抑制苯丙烷途径,减少黄醌类物质的合成,对PPO活性具有直接抑制作用	[79]
VC	苹果和茼蒿	直接与PPO活性位点结合,抑制活性	[9,45]
VE	荸荠	抑制PPO活性升高,并延缓VC含量的下降	[110]
丁香酚	荸荠和茼蒿	抑制褐变相关酶的活性,对酶活性的抑制作用呈现明显的浓度效应	[113-115]
香茅醛	芋头	抑制褐变相关酶活性,缓解膜脂过氧化,并在基因层面下调相关基因的表达	[117]
GABA	苹果、荸荠和马铃薯	调控ROS和膜脂代谢,缓解膜脂过氧化程度,降低褐变相关酶活性	[9,75,119]
半胱氨酸	蘑菇和马铃薯	调控ROS代谢,减少失水,增加内源H ₂ S含量,增强抗氧化活性	[121-122,124]
精氨酸	苹果和茼蒿	比抗坏血酸钙的抗褐变作用更强,不影响鲜切苹果的口感	[9,123]
柠檬酸	苹果	调节pH值使PPO活性降低	[9,125]
草酸	苹果、茼蒿和莲藕	降低呼吸速率和组织相对电导率	[9,126-127]
氯化钙	芒果	提高组织内部的Ca ²⁺ 含量	[128]
富氢水	天麻	调控ROS代谢和能量代谢	[129]
乙醇	茄子、山药和茼蒿	抑制PPO和POD活性,减少失水,保持细胞膜完整性	[51,130-131]
乙酸	茼蒿	抑制4个胁迫信号诱导PAL基因的表达,并在体内外对PAL活性具有抑制作用	[51]
苏多精	茼蒿	降低酚类物质合成和氧化代谢相关酶活性	[132]
氯化钠	粉葛、马铃薯、山药和苹果	推迟PPO活性高峰出现,抑制POD活性	[9,133-135]
二乙酰	茼蒿	抑制黄醌合成相关酶活性和基因表达,提高抗氧化活性	[136]
植酸	苹果	抑制木质素合成,增强抗氧化活性,减少酚类物质的合成和氧化	[9,137]
α -硫辛酸	梨	降低PPO活性,提高SOD、CAT和PAL活性,但上调酚合成相关基因的表达	[138]
抗坏血酸钙	油桃	抑制PPO活性和微生物生长,但保持总酚含量稳定	[139]
次氯酸钠和酸化亚氯酸钠	胡萝卜、土豆和甜薯	完全抑制PPO活性,并减少微生物菌落数	[140]
焦亚硫酸钠	雪莲果	抑制PPO活性,并改变反应环境pH值	[141]
N-乙酰半胱氨酸	苹果和菠萝	延缓可溶性糖、VC和酚类物质的降解	[9,142]
羟基吡啶酮衍生物	蘑菇和苹果	抑制酪氨酸酶活性	[143]

从这些研究可知,化学褐变抑制剂主要通过与PPO等酶的活性位点直接作用调控酶活性,或通过间接调控ROS代谢酶活性缓解氧化损伤,或通过诱导内源信号物质的合成,从而控制鲜切果蔬褐变。尽管化学抗褐变剂具有成本低、效果好、性能稳定等优点,但化学保鲜剂的抗褐变效果具有明显的浓度效应,使用高浓度的化学褐变抑制剂可能会增加食品安全风险,势必也会增加消费者对保鲜剂使用的顾虑和抵触心理,不利于鲜切果蔬产业的长远发展。因此,研发替代化学方法的保鲜技术或许是未来鲜切果蔬产业的重点发展方向。

4.2 物理方法

4.2.1 热处理

热处理是指在贮藏前将鲜切果蔬置于热水、热空气或热蒸气等环境中处理一定时间,达到控制褐变效果的

一种处理方法。热处理具有钝化褐变相关酶活性、保护细胞膜完整性和流动性、增强抗氧化活性的效果^[144]。鲜切苹果在热处理后,抑制了PAL活性及总酚含量的增加,SOD和CAT活性显著提高,增强了对H₂O₂的清除能力。同时,热处理还诱导了MYB、AP2-EREBP和热激转录因子等热响应转录因子基因的表达,表明热处理抑制鲜切苹果褐变,可能与热激转录因子通过调控ROS代谢和酚类物质氧化有关^[145]。此外,还在芋头^[146]、桃^[147]、荸荠^[148-149]和甘蔗(*Saccharum officinarum* L.)^[150]等多种类型的鲜切果蔬中确认了热处理的抗褐变效果,表明热处理保鲜效果的稳定性。但热处理的温度和时长对鲜切产品的品质影响很大,不当处理温度或时长可能带来一些负面效果,比如组织受损(烫伤)、产生异味等^[151]。热处理可能还会导致一些果蔬的营养品质下降,如热敏成分维生素和花青素等在热处理后会降解或生物活性下降。

作为一种安全性很高、易于实施、成本低、简单实用的物理保鲜技术,热处理在鲜切果蔬保鲜中的应用有良好的前景。考虑到热处理技术对鲜切果蔬起到良好保鲜效果的同时,可能也会带来一些不期望的负面影响,因此,仍需更多研究进一步优化热处理条件,最大限度地减少热处理技术造成的负面效果,为热处理技术在鲜切果蔬保鲜产业中的高效应用奠定基础。

4.2.2 物理波处理

有研究发现,一些类型的物理波如超声波、微波和脉冲电场处理对鲜切果实褐变有较好的抑制作用。300 W功率的微波处理鲜切山药,能有效抑制山药褐变,保持山药切面的亮度,抑制PPO和POD活性,并维持细胞膜完整性^[152]。在对鲜切番茄(*Solanum lycopersicum* L.)的研究中发现,微波处理可提高多酚、类黄酮和番茄红素含量,增强对DPPH自由基的螯合能力^[153]。40 kHz超声波处理鲜切甘薯(*Ipomoea batatas* L.) 10 min,能有效降低PPO和POD活性,提高总抗氧化能力^[154]。鲜切菠萝(*Ananas comosus* L.)在25 W功率的超声波处理10 min,PAL活性提高了2倍,而PPO和POD的活性显著降低^[155]。脉冲电场处理的鲜切马铃薯在4℃贮藏6 d时仍保持明亮的外观,而对照组在2 d时外观色泽开始恶化^[156]。与其他物理方法相比,物理波具有无损、非接触、节能环保、操作简单和营养损失少等优点。物理波的非热效应或机械效应能使蛋白构象发生改变,影响相关酶的活性,从而对鲜切果蔬的褐变产生抑制效果。

4.2.3 辐照处理

紫外线照射具有使用简单、无残留、无污染和与产品直接接触等优点,由于对鲜切产品的保鲜效果较

好,近些年受到广泛关注。根据波长不同,可将紫外线分为长波紫外线(UV-A, $\lambda=320\sim400$ nm)、中波紫外线(UV-B, $\lambda=280\sim320$ nm)和短波紫外线(UV-C, $\lambda=200\sim280$ nm)3种。在鲜切果蔬保鲜的研究中,UV-C照射处理比另两种波长紫外线照射的保鲜效果更好。UV-C分别处理鲜切马铃薯5 min和10 min,能提高总可溶性固形物含量和切面亮度(L^*)^[157]。在鲜切莲藕中,使用75 W功率的UV-C处理能降低褐变度,钝化PAL、PPO和POD活性^[41]。在紫外线照射后,通常会触发果蔬的抗逆反应,包括合成非酶抗氧化物(如羟基肉桂酸和抗坏血酸等抗氧化物),降低紫外照射的影响,表明紫外线辐照处理可能通过诱导合成非酶抗氧化物,增强鲜切果蔬的抗氧化能力,并钝化褐变相关酶活性,从而控制鲜切果蔬褐变。

4.2.4 臭氧处理

臭氧是氧气的同素异形体,具有很高的安全性,美国食药监局早在2001年批准臭氧可直接作用于食品行业^[158],通常作为消毒剂和抗菌剂在食品中使用。臭氧的半衰期很短(约30 min),会自动分解为O₂。使用臭氧保鲜鲜切果蔬具有无污染、无残留等优点,有很好的应用前景。臭氧水(2 $\mu\text{mol/L}$)处理能使鲜切马铃薯具有更高的 L^* 值、更低的 a^* 值,而气体臭氧处理对PPO活性没有影响^[159],表明臭氧形态对鲜切果蔬的抗褐变至关重要。臭氧处理鲜切菠萝和香蕉20 min,能提高总酚和总黄酮含量,增强铁还原/抗氧化能力(ferric reducing/antioxidant power, FRAP)和DPPH自由基清除能力;当处理时长超过20 min时,番石榴(*Psidium guajava* L.)的VC、多酚和总黄酮含量反而降低,抗氧化活性下降^[160]。表明处理时长影响臭氧的保鲜效果,果蔬种类可能也会影响臭氧的保鲜效果。

4.2.5 包装技术

已报道的能控制鲜切果蔬褐变的包装技术主要有涂膜包装、真空包装和气调包装3种。

涂膜包装是利用可食性成膜材料,在鲜切产品表面喷涂形成薄膜的一种包装方式。可食性涂膜材料主要有果胶、壳聚糖、卡拉胶、羧甲基纤维素、海藻酸钠、大豆分离蛋白和淀粉等天然提取物^[161]。魔芋、壳聚糖和大豆分离蛋白单独涂膜处理能降低鲜切山药呼吸强度,减少质量和水分损失,显著抑制PPO和POD活性,3种材料按一定比例制备的复合膜透光率、阻氧性和水蒸气透过系数等指标优于单种材料膜,不同材料复合涂膜则明显增强对鲜切山药褐变的抑制作用^[162]。果胶涂膜包装能显著抑制鲜切苹果褐变,果胶涂膜同时与抗坏血酸或氯化钙复合使用,能增强涂膜包装的保鲜效果^[163]。壳聚糖与

沙棘 (*Hippophae rhamnoides* L.) 提取物通过氢键结合, 形成的复合涂膜溶液处理鲜切莴苣, 能显著提高抗氧化活性和抗菌性能^[164]。玉米淀粉与木瓜多糖复合制备的涂膜材料, 具有良好的抗氧化性、保湿性和抗菌性能, 对鲜切苹果褐变具有很好的控制作用^[165]。这些研究表明, 不同的涂膜材料能通过化学键相互作用, 形成新的复合材料, 且涂膜包装能和其他褐变控制技术很好整合, 复合处理进一步强化保鲜效果。

真空包装不仅能降低微生物的生长速率, 有效减少腐败菌数量, 还能抑制酚代谢酶活性, 降低酶促褐变反应速率, 延缓组织衰老和变色。普遍认为, 真空包装通过抽真空的方式, 降低包装环境中的气体含量, 达到保鲜效果。避光条件下, 真空包装能显著降低鲜切马铃薯褐变指数和质量损失率, 降低总酚、类黄酮和过氧化氢含量, 抑制PPO、POD和PAL活性, 减少病原微生物总数^[166]。真空包装的鲜切芋头在4℃贮藏12 d时的色泽与0 d无明显差异, 表明真空包装特别适合鲜切芋头的保鲜^[6]。真空包装的抗褐变效果已在多种鲜切产品中得到验证^[167], 但真空包装环境中的氧气含量很低, 是否会诱导鲜切果蔬的无氧呼吸, 从而产生一些有害物质影响鲜切产品品质, 值得更多研究进一步明确。

气调包装是将鲜切果蔬包装在具有阻隔气体交换或选择性透过气体的包装材料中从而达到控制包装环境中气体组分目的的一种包装方式。通常而言, 气调包装主要通过降低包装环境中的O₂和CO₂比率, 降低鲜切果蔬呼吸作用强度和乙烯释放量, 控制好氧微生物生长繁殖, 达到保鲜的目的^[168]。通过气调包装鲜切木瓜, 可保持鲜切木瓜贮藏期外观颜色的稳定, 将货架期延长至21 d^[169]。与普通包装相比, 气调包装能显著抑制鲜切菠萝蜜 (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) 的褐变, 使鲜切菠萝蜜的货架期增加至10 d^[70]。此外, 增大气调时的CO₂压力, 也能有效控制鲜切果蔬褐变。2 MPa的高压CO₂处理显著抑制LOX活性, 但会增强SOD活性, 降低MDA和H₂O₂含量, 表明适当压力的CO₂处理可以增强内部组织的抗氧化活性, 从而延缓鲜切荸荠的品质恶化^[12]。但气调包装的鲜切果蔬贮藏在不适当温度时, 反而更有利于腐败菌的生长, 加速鲜切果蔬腐败变质^[170]。表明低温贮藏是保证气调包装保鲜效果的重要基础。

除上述提到的物理抗褐变保鲜技术外, 一些其他物理性方法如脉冲电场、超高压、纳米材料包装等对鲜切果蔬的褐变也有较好的抑制效果, 具体见表2。此外, 多种物理抗褐变技术的联合使用能取得更好的保鲜效果。比如, 在果胶涂膜包装前, 使用氯化钙或抗坏血酸处理, 能显著增强涂膜包装对鲜切苹果褐变的抑制效果^[163]。

表2 已报道的物理抗褐变技术

Table 2	Reported physical techniques for browning prevention		
处理方法	果蔬类型	作用机制	参考文献
热处理	芋头、荸荠、桃、甘蔗、百合和卷心生菜	抗褐变效果依赖处理温度和时长, 热处理钝化PPO等与褐变相关的酶活性, 增强对ROS的清除能力, 缓解细胞膜的氧化损伤	[47,146-150,171]
微波	山药和番茄	抑制PPO和POD活性, 并维持细胞膜完整性; 提高多酚、类黄酮和番茄红素含量, 增强对DPPH自由基的螯合能力	[152-153]
超声波	甘薯和菠萝	提高PAL活性, 有效降低PPO和POD活性, 提高总抗氧化能力	[154-155]
脉冲电场	马铃薯和草莓	保持外观品质, 影响微生物稳定性; 增强抗氧化性, 延缓果实软化	[156,172]
UV-C	马铃薯、莲藕、茄子和蚕豆	提高总可溶性固形物含量和切面亮度 (L^*); 降低褐变度, 钝化PAL、PPO和POD活性	[41,157,173-174]
臭氧	马铃薯、香蕉、菠萝、竹笋和番石榴	保持亮度, 同时具有抑菌杀菌作用, 抗褐变效果与臭氧形态和处理时长有关	[159-160,175]
涂膜包装	桃、苹果、生菜和莴苣	具有保湿和抗菌作用, 能抑制PPO活性, 增强抗氧化活性; 能很好地与其他保鲜技术结合处理, 多种涂膜材料复合使用能增强褐变抑制效果	[9,162-165,176-177]
真空包装	菠萝、杏鲍菇、紫甘薯、皇冠梨、马铃薯、芋头和莲藕	降低总酚、类黄酮和过氧化氢含量, 抑制PPO、POD和PAL活性, 减少病原微生物总数, 缓解膜脂过氧化	[6,166-167]
气调包装	木瓜、竹笋和菠萝蜜	降低包装环境中O ₂ 和CO ₂ 比率, 降低鲜切果蔬呼吸作用强度和乙烯释放量, 控制好氧微生物生长繁殖	[169,175,178]
高碳二氧化碳包装	荸荠、莴苣和梨	抑制电子渗透率增加, 通过调控糖代谢抑制糖组分的降解, 控制酶促褐变	[12,179-180]
纳米材料包装	番茄、甘蔗和苹果	降低O ₂ /CO ₂ 通透系数, 抑制微生物生长, 增强抗氧化活力	[181-183]
超高压	甜椒、苹果、草莓和桃	降低PPO活性, 降低总酚含量, 影响细胞完整性	[12,184-187]
等离子体	苹果和马铃薯	钝化PPO活性	[125,188]

4.3 生物方法

4.3.1 植物生长调节剂类

目前, 已公开报道的可控制鲜切果蔬褐变的植物生长调节剂主要有一氧化氮 (NO)、H₂S、6-苄氨基嘌呤 (6-benzylaminopurine, 6-BA)、24-表油菜素内酯 (24-epibrassinolide, EBR)、水杨酸 (salicylic acid, SA) 及其甲酯 (MeSA) 和褪黑素 (melatonin, MT) 等^[124,189]。

NO是一种气体信号分子, 使用NO供体2,2'-(羟基亚硝基胍基)-双乙胺 (2,2'-(hydroxynitrosohydrazino)-bisethanamine, DETANO) 处理鲜切莴苣, 能显著抑制褐变度的增加, 500 μL/L的NO处理1 h的抗褐变效果最好^[190]。不同类型的NO供体处理鲜切苹果能抑制PPO活性, 降低细胞膜电子渗透率、呼吸速率和MDA含量, DETANO的处理效果比NO气调要好^[191]。

有观点认为, H₂S是继NO和一氧化碳 (CO) 之后的第3种气体信号分子^[192]。近几年的研究表明, H₂S作为信号分子通过调控果蔬自身的防御反应, 表现出延缓果实成熟衰老、提高抗冷性和抗病性、缓解鲜切果蔬褐变等多重作用。H₂S处理鲜切荸荠, 提高了ROS代谢酶如CAT、SOD、APX和谷胱甘肽还原酶活性, 却降低了PAL、POD和PPO等酚合成和代谢相关酶的活性^[193]。代谢组分析结果表明, H₂S处理通过降低异戊二烯醇脂的积累, 并延缓氨基酸的代谢速率, 抑制鲜切苹果褐变^[194]。

MT是一种色胺类物质,最初在松果体分泌物中分离鉴定出,近几年的研究表明,植物中也含有MT^[195]。MT不仅自身具有清除自由基的活性,同时还能通过调控植物的抗氧化系统,促进ROS代谢,外源MT处理能控制多种类型的鲜切果蔬褐变。0.1 mmol/L MT处理鲜切梨能降低MDA和H₂O₂含量,提高总酚含量和抗氧化活性,延缓VC的降解,并同时下调POD、PPO和LOX编码基因的表达水平^[196]。外源MT处理鲜切莲藕能增强ROS代谢能力,降低酚代谢相关酶的活性,表明MT处理通过调控ROS和酚的氧化代谢,阻止鲜切莲藕褐变。进一步利用基因共表达分析发现,MT处理能激活MYB5、MYB6和MYB308基因的表达,被MT激活的MYB基因表达趋势与PPO基因表达以及黄酮合成相关基因的表达负相关^[197]。MT被证实能抑制鲜切苹果、鲜切梨、鲜切马铃薯和鲜切芋头等多种类型果蔬的褐变,且MT的保鲜效果与处理浓度密切相关^[198]。

6-BA属于细胞分裂素类化合物,具有促进植物生长、抑制衰老的作用。6-BA处理能有效抑制鲜切莴苣褐变,代谢组联合转录组的分析表明,6-BA处理显著抑制酚类物质的合成积累,尤其是莴苣亭,下调酚合成途径相关基因的表达^[199]。表明6-BA通过抑制酚类物质的合成,抑制鲜切莴苣褐变。EBR属于油菜素内酯类化合物,具有调节植物生长发育、增强抗逆性、促进光合作用等作用。利用EBR处理鲜切莲藕,能通过降低LOX活性和MDA含量缓解膜脂过氧化,通过降低PAL和PPO活性抑制酚类物质的氧化代谢,同时增强APX、CAT和POD等ROS清除酶的活性,延缓VC的降解,从而抑制鲜切莲藕褐变^[200]。

此外,也有研究发现1-甲基环丙烯(1-methylcyclopropene, 1-MCP)对鲜切果蔬具有抗褐变效果。1-MCP是乙烯受体竞争性抑制剂,可与乙烯受体特异结合,抑制乙烯介导的生理反应。用1-MCP处理鲜切苹果能抑制伤反应,并抑制伤信号诱导的褐变^[201]。上述研究表明,施用特定种类的植物生长调节剂对鲜切果蔬具有很好的保鲜效果,其可能通过激活系统性防御反应调控鲜切果蔬褐变。值得注意的是,植物激素通常具有很高的安全性,但化学合成的植物生长调节剂是否与植物激素具有相同的安全性,有待深入研究,以减少消费者对食品保鲜剂安全使用的顾虑。

4.3.2 植物提取物类

植物中本身含有丰富的活性物质,具有抗菌和抗氧化等活性,通过提取、浓缩等技术制得的植物提取物显示出良好的抗褐变效果。米糠是稻谷加工过程中的副产物,米糠中富含肉桂酸、香豆酸和阿魏酸等植源性抗氧

化物质,米糠提取物处理鲜切荸荠能很好地控制褐变,可能与米糠中的阿魏酸和肉桂酸等物质抑制PPO活性有关^[202]。薄荷是药食两用植物,薄荷提取物(如薄荷醇)在食品领域中有广泛应用。在鲜切芋头抗褐变保鲜研究中发现,薄荷提取物通过降低PAL活性抑制酚和黄酮类化合物合成,但对PPO活性没有显著影响。同时,薄荷提取物能增强鲜切芋头的自由基清除能力,成分分析表明,薄荷提取物中含有丰富的酚类化合物,如阿魏酸、肉桂酸和咖啡酸等^[46]。表明薄荷提取物中的酚类化合物增强了鲜切芋头的抗氧化活性,抗氧化活性的增强有助于缓解切分处理造成的氧化损伤。此外,竹叶提取物^[203]、茶叶提取物(茶多酚)^[204]和沙棘叶提取物^[205]等也对鲜切果蔬具有较好的抗褐变保鲜效果。这些研究表明,植物提取物通常富含多酚类化合物,并具有较强的ROS自由基清除活性,能通过自身的抗氧化活性缓解鲜切处理诱导的氧化损伤,并调控鲜切产品酚类化合物的合成代谢,从而抑制鲜切果蔬褐变。

此外,一些果蔬副产物的提取物也具有抗褐变作用,比如菠萝果皮、葡萄籽、椰子肉、芒果皮和甘蔗渣等^[206-207]。植物提取物中的活性成分种类十分多样,不同提取物的抗褐变作用机制也有较大不同。植物提取物同时还具有成分天然、安全性高、抗氧化能力强等优点,但植物提取物通常是混合物形式,提取物中的化合物是单独发挥作用,还是与其他成分协同调节鲜切果蔬褐变,尚需利用生物化学的方法进一步分离鉴定。

4.3.3 动物提取物类

一些研究表明,来自蜂蜜、鱼皮、蛋清、乳清和贻贝等动物产品中的化合物具有较强的酚代谢酶活性抑制作用,为鲜切果蔬褐变的防控提供了另一种策略。蜂蜜可能是理想的PPO天然活性抑制剂,与对照组相比,蜂蜜对甘薯PPO活性的抑制率为41.49%~48.00%^[208]。这可能是蜂蜜中含有丰富的黄酮类物质,能与PPO活性中心的Cu²⁺结合,从而抑制PPO活性。来自鱼皮、蛋清和乳清等产品中的活性肽可能也是天然的抗褐变剂。用来自鳕鱼皮的1%活性肽处理鲜切马铃薯,能显著降低PPO和POD活性^[209]。活性肽具有与酚酶底物相似的化学结构,可能通过与PPO等酶结合成复合物,抑制反应底物与酚酶的结合。蓝贻贝(*Mytilus edulis*)提取物中含有牛磺酸和其他亚磺酸衍生物等化合物,这些化合物可以作为抗氧化剂和酶促褐变抑制剂,抑制鲜切苹果和马铃薯等产品的褐变^[210]。此外,具有良好的成膜性能和抗菌性能,并在鲜切果蔬涂膜包装中广泛应用的壳聚糖也是动物产品提取物,壳聚糖在海洋节肢动物的甲壳、昆虫的甲壳、菌类和藻类的细胞膜、软体动物的壳中广泛存在。

生物类褐变抑制剂对鲜切果蔬褐变的抑制作用及作用机制见表3。

表 3 已报道的生物类褐变抑制剂				
Table 3 Reported biological browning inhibitors				
类别	抑制剂	果蔬类型	作用机制	参考文献
植物生长调节剂类	NO	苜蓿、苹果、马铃薯和桃	能抑制PPO活性,降低细胞膜电子渗透率、呼吸速率和MDA含量;抗褐变效果与处理浓度、时长和供体类型有关	[124,190-191, 211-212]
	H ₂ S	荸荠、苹果、荔枝、莲藕、马铃薯和桃	增强鲜切果蔬对ROS的清除能力,抑制酚的生物合成和代谢;减少异戊二烯醇脂质的积累,延缓氨基酸的消耗	[124,193-194, 213-215]
	MT	芋头、莲藕、苹果、梨、双孢菇和马铃薯	具有浓度效应,0.05 mmol/L MT处理可能是一个通用浓度;具有抑制PPO和POD活性、下调褐变相关酶编码基因的表达、调控ROS代谢和缓解膜脂过氧化的作用	[196-198, 216-217]
	6-BA	苜蓿	调节酚类物质的合成积累,尤其是芪苣亭	[199]
	EBR	莲藕和茄子	缓解膜脂过氧化,抑制酚类物质的氧化代谢,增强ROS清除酶活性,延缓VC降解	[200,218]
	SA	芋头、板栗和梨	抑制酚的合成和氧化代谢,增强抗氧化酶活性	[219-221]
	1-MCP	苹果、蘑菇和芒果	抑制伤反应及伤反应诱导的褐变	[201,222-223]
	米糠提取物	荸荠	米糠中的阿魏酸和肉桂酸等物质可能抑制PPO活性	[202]
	薄荷提取物	芋头	富含酚类物质,通过酚类化合物的抗氧化活性,增强鲜切果蔬自由基清除能力	[46]
	竹叶提取物	苹果	增强抗氧化活性,对酚的代谢没有影响	[203]
植物提取物类	茶叶提取物	马铃薯	通过苯丙烷途径降低酚酶底物含量,增强抗氧化酶活性,缓解VC和谷胱甘肽等非酶抗氧化物的分解代谢,主活性成分可能是茶多酚	[204]
	沙棘叶提取物	马铃薯	可能通过富含的没食子酸,竞争性抑制PPO活性	[205]
	仙人掌多糖	马铃薯	增强超声波的抗褐变作用,降低PPO活性	[224]
	马齿苋提取物	马铃薯	抑制PPO和POD活性,增强鲜切马铃薯抗氧化活性,缓解膜脂过氧化	[225]
	柑橘叶提取物	甘薯	降低PPO和POD活性,提高酚类物质含量及对DPPH自由基的清除能力	[226]
动物提取物类	蜂蜜	甘薯	抑制PPO活性	[208]
	活性肽	马铃薯	通过与PPO和POD等酚酶结合形成复合物,减少酚酶与底物接触机会	[209]
	贻贝提取物	苹果和马铃薯	直接抑制PPO活性,有效成分可能是牛磺酸及其衍生物	[210]

5 结 语

鲜切果蔬的新鲜外观是直接影响消费者购买决定的首要因素,切面褐变是制约鲜切果蔬产业高质量和可持续发展的关键生产问题之一。因此,迫切需要探明鲜切果蔬褐变发生机制,研发有效控制鲜切果蔬褐变的新型保鲜技术,为鲜切果蔬产业的高质量发展奠定基础。综合现有文献资料表明,鲜切果蔬的褐变是一个高度复杂、且与多种因子有关的生化过程,可能同时涉及酶促和非酶促褐变。此外,切分诱导的ROS积累可能是引起鲜切果蔬褐变的重要原因,而膜脂代谢造成的细胞膜完整性和功能下降,可能是决定鲜切果蔬褐变的关键因素。随着分子生物学和生物信息学的快速发展,新技术在鲜切果蔬保鲜领域研究中的应用势必能更有效地揭示鲜切果蔬褐变机理,为鲜切果蔬褐变技术的研发和调控机制的研究提供新思路。

为控制鲜切果蔬褐变,目前已研发了许多抗褐变保鲜技术,主要包括化学抗褐变剂处理法、物理方法和生物褐变抑制剂处理法。尽管一些单一处理方法能在一定程度上抑制鲜切果蔬褐变,多种处理方法的联合使用可能对鲜切果蔬褐变有更好的防控效果。但不同保鲜方法的作用机制可能存在较大差异,在联合使用多种处理技术时应考虑不同方法间的协同作用或拮抗作用。鉴于消费者对食品安全的考虑,在研发鲜切果蔬保鲜技术时应兼顾消费者对食品安全的顾虑和保鲜效果的有效性,以期能研发出既不影响鲜切果蔬安全性,同时又能高效抑制鲜切果蔬褐变的新型保鲜方法。生物类褐变抑制剂具有成分天然、来源广泛等特点,通常认为比化学合成保鲜剂更安全。基于此,可充分利用种类丰富的生物资源,从生物体(植物、动物和微生物)中挖掘鉴定更安全高效的天然褐变抑制剂,为鲜切果蔬的安全性提供基础保障。近几年的研究表明,细胞膜完整性是决定鲜切果蔬褐变的重要因素,未来可重点从保持细胞膜完整性和功能的角度研发新型抗褐变保鲜技术。

参考文献:

[1] TOH J Y, TAN V M H, LIM P C Y, et al. Flavonoids from fruit and vegetables: a focus on cardiovascular risk factors[J]. Current Atherosclerosis Reports, 2013, 15(12): 368. DOI:10.1007/s11883-013-0368-y.

[2] EGGERSDORFER M, WYSS A. Carotenoids in human nutrition and health[J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 2018, 652: 18-26. DOI:10.1016/j.abb.2018.06.001.

[3] SLAVIN J L, LLOYD B. Health benefits of fruits and vegetables[J]. Advances in Nutrition, 2012, 3(4): 506-516. DOI:10.3945/an.112.002154.

[4] 张晓芳, 胡文忠, 刘程惠, 等. 清洗技术对鲜切果蔬微生物与品质影响的研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(13): 336-342. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020.13.053.

[5] 相启森, 张嵘, 范刘敏, 等. 大气压冷等离子体在鲜切果蔬保鲜中的应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(1): 368-372. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020030152.

[6] 袁晓, 易景怡, 付龙威, 等. 真空包装结合低温贮藏对鲜切芋头的保鲜效果[J]. 食品工业科技, 2024, 45(11): 280-288. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2023070122.

[7] 程丽林, 吴波, 袁海君, 等. 鲜切果蔬贮藏保鲜技术研究进展[J]. 保鲜与加工, 2019, 19(1): 147-152.

[8] SUI X, MENG Z, DONG T T, et al. Enzymatic browning and polyphenol oxidase control strategies[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2023, 81: 102921. DOI:10.1016/j.copbio.2023.102921.

[9] FAN X T. Chemical inhibition of polyphenol oxidase and cut surface browning of fresh-cut apples[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 63(27): 8737-8751. DOI:10.1080/10408398.2022.2061413.

[10] 尉磊, 王云香, 朱璇, 等. LED光处理对鲜切果蔬品质影响的研究进展[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(6): 102-108. DOI:10.3969/j.issn.1009-6221.2024.06.014.

[11] PAN Y G, LI Y X, YUAN M Q. Isolation, purification and identification of etiolation substrate from fresh-cut Chinese waterchestnut (*Eleocharis tuberosa*)[J]. Food Chemistry, 2015, 186: 119-122. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.03.070.

- [12] ZHU L J, HU W F, MURTAZA A, et al. Browning inhibition in fresh-cut Chinese water chestnut under high pressure CO₂ treatment: regulation of reactive oxygen species and membrane lipid metabolism[J]. Food Chemistry, 2023, 427: 136586. DOI:10.1016/j.foodchem.2023.136586.
- [13] WANG T T, YAN T, SHI J K, et al. The stability of cell structure and antioxidant enzymes are essential for fresh-cut potato browning[J]. Food Research International, 2023, 164: 112449. DOI:10.1016/j.foodres.2022.112449.
- [14] MCEVILY A J, IYENGAR R, OTWELL W S. 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.
- [15] ZHAO X, DUAN C Q, LI S Y, et al. Non-enzymatic browning of wine induced by monomeric flavan-3-ols: a review[J]. Food Chemistry, 2023, 425: 136420. DOI:10.1016/j.foodchem.2023.136420.
- [16] MOON K M, KWON E B, LEE B, et al. Recent trends in controlling the enzymatic browning of fruit and vegetable products[J]. Molecules, 2020, 25(12): 2754. DOI:10.3390/molecules25122754.
- [17] TILLEY A, MCHENRY M P, MCHENRY J A, et al. Enzymatic browning: the role of substrates in polyphenol oxidase mediated browning[J]. Current Research in Food Science, 2023, 7: 100623. DOI:10.1016/j.crf.2023.100623.
- [18] CHISARI M, BARBAGALLO R N, SPAGNA G. Characterization of polyphenol oxidase and peroxidase and influence on browning of cold stored strawberry fruit[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(9): 3469-3476. DOI:10.1021/jf063402k.
- [19] CIOU J Y, LIN H H, CHIANG P Y, et al. The role of polyphenol oxidase and peroxidase in the browning of water caltrop pericarp during heat treatment[J]. Food Chemistry, 2011, 127(2): 523-527. DOI:10.1016/j.foodchem.2011.01.034.
- [20] LERTSIRI S, PHONTREE K, THEPSINGHA W, et al. Evidence of enzymatic browning due to laccase-like enzyme during mash fermentation in Thai soybean paste[J]. Food Chemistry, 2003, 80(2): 171-176. DOI:10.1016/S0308-8146(02)00251-0.
- [21] LIU B, ZHONG R H, WEI J B, et al. Genome-wide identification and analysis of the laccase gene family in *Litchi chinensis* Sonn. provides new insights into pericarp browning[J]. Postharvest Biology and Technology, 2024, 217: 113108. DOI:10.1016/j.postharvbio.2024.113108.
- [22] 王梓宇, 张引引, 李月圆, 等. 漆酶LAC表达与鸭梨果心褐变的关系[J]. 中国农业科学, 2020, 53(24): 5073-5080. DOI:10.3864/j.issn.0578-1752.2020.24.010.
- [23] PARAVISINI L, PETERSON D G. Mechanisms non-enzymatic browning in orange juice during storage[J]. Food Chemistry, 2019, 289: 320-327. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.03.049.
- [24] FUSTIER P, ST-GERMAIN F, LAMARCHE F, et al. Non-enzymatic browning and ascorbic acid degradation of orange juice subjected to electroreduction and electro-oxidation treatments[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2011, 12(4): 491-498. DOI:10.1016/j.ifset.2011.07.014.
- [25] BRADSHAW M P, PRENZLER P D, SCOLLARY G R. Ascorbic acid-induced browning of (+)-catechin in a model wine system[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(2): 934-939. DOI:10.1021/jf000782f.
- [26] SAPERS G M, HICKS K B, PHILLIPS J G, et al. Control of enzymatic browning in apple with ascorbic acid derivatives, polyphenol oxidase inhibitors, and complexing agents[J]. Journal of Food Science, 1989, 54(4): 997-1002. DOI:10.1111/j.1365-2621.1989.tb07931.x.
- [27] SONG M B, WU S J, SHUAI L, et al. Effects of exogenous ascorbic acid and ferulic acid on the yellowing of fresh-cut Chinese water chestnut[J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 148: 15-21. DOI:10.1016/j.postharvbio.2018.10.005.
- [28] SUTTIRAK W, MANURAKCHINAKORN S. Potential application of ascorbic acid, citric acid and oxalic acid for browning inhibition in fresh-cut fruits and vegetables[J]. Walailak Journal of Science and Technology, 2010, 7: 5-14. DOI:10.2004/WJST.V7I1.47.
- [29] ZHOU X, IQBAL A, LI J X, et al. Changes in browning degree and reducibility of polyphenols during autooxidation and enzymatic oxidation[J]. Antioxidants, 2021, 10(11): 1809. DOI:10.3390/antiox10111809.
- [30] TAN J F, VINCKEN J P, VAN ZADELHOFF A, et al. Presence of free gallic acid and gallate moieties reduces auto-oxidative browning of epicatechin (EC) and epicatechin gallate (ECg)[J]. Food Chemistry, 2023, 425: 136446. DOI:10.1016/j.foodchem.2023.136446.
- [31] XU Z J, YANG Z H, JI J F, et al. Polyphenol mediated non-enzymatic browning and its inhibition in apple juice[J]. Food Chemistry, 2023, 404: 134504. DOI:10.1016/j.foodchem.2022.134504.
- [32] MURATA M. Browning and pigmentation in food through the Maillard reaction[J]. Glycoconjugate Journal, 2021, 38(3): 283-292. DOI:10.1007/s10719-020-09943-x.
- [33] 国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 即食鲜切果蔬加工卫生规范: GB 31652—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [34] 王斌, 武春爽, 汤冰琳, 等. 黄瓜果实CsMYB62克隆及其对CsGR-RBP3表达的调控[J]. 核农学报, 2022, 36(5): 907-917. DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2022.05.0907.
- [35] KOJIMA M, KIMURA N, MIURA R. Regulation of primary metabolic pathways in oyster mushroom mycelia induced by blue light stimulation: accumulation of shikimic acid[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 8630. DOI:10.1038/srep08630.
- [36] DIAS M C, PINTO D C G A, SILVA A M S. Plant flavonoids: chemical characteristics and biological activity[J]. Molecules, 2021, 26(17): 5377. DOI:10.3390/molecules26175377.
- [37] LAOUE J, FERNANDEZ C, ORMEÑO E. Plant flavonoids in Mediterranean species: a focus on flavonols as protective metabolites under climate stress[J]. Plants, 2022, 11(2): 172. DOI:10.3390/plants11020172.
- [38] PETRUSSA E, BRAIDOT E, ZANCANI M, et al. Plant flavonoids: biosynthesis, transport and involvement in stress responses[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2013, 14(7): 14950-14973. DOI:10.3390/ijms140714950.
- [39] GONZÁLEZ-BARRIO R, SALMENKALLIO-MARTTILA M, TOMÁS-BARBERÁN F A, et al. Etiology of UV-C-induced browning in var. Superior white table grapes[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(15): 5990-5996. DOI:10.1021/jf0504115.
- [40] 陈晨, 姜爱丽, 刘程惠, 等. UV-C处理对鲜切‘皇冠’梨褐变的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(24): 5081-5090. DOI:10.3864/j.issn.0578-1752.2020.24.011.
- [41] 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. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.11.102.
- [42] LI G Q, JOYCE D C, MARQUES J R, et al. Postharvest factors affect under-skin browning in ‘Honey Gold’ mango fruit[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101(13): 5671-5677. DOI:10.1002/jsfa.11221.
- [43] CANTOS E, TUDELA J A, GIL M I, et al. Phenolic compounds and related enzymes are not rate-limiting in browning development of fresh-cut potatoes[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(10): 3015-3023. DOI:10.1021/jf0116350.

- [44] SERRA S, ANTHONY B, SESILLO F B, et al. Determination of post-harvest biochemical composition, enzymatic activities, and oxidative browning in 14 apple cultivars[J]. *Foods*, 2021, 10(1): 186. DOI:10.3390/foods10010186.
- [45] LANDI M, DEGL'INNOCENTI E, GUGLIELMINETTI L, et al. Role of ascorbic acid in the inhibition of polyphenol oxidase and the prevention of browning in different browning-sensitive *Lactuca sativa* var. *capitata* (L.) and *Eruca sativa* (Mill.) stored as fresh-cut produce[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2013, 93(8): 1814-1819. DOI:10.1002/jsfa.5969.
- [46] YUAN X, TANG B L, WANG Y K, et al. Inhibitory effects of peppermint extracts on the browning of cold-stored fresh-cut taro and the phenolic compounds in extracts[J]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2023, 7: 1191396. DOI:10.3389/fsufs.2023.1191396.
- [47] ABEEL C V, RAES K, SAMPERS I. Effect of mild heat treatment on browning-related parameters in fresh-cut iceberg lettuce[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2019, 43(7): e12906. DOI:10.1111/jfbc.12906.
- [48] SALTVEIT M E. Wound induced changes in phenolic metabolism and tissue browning are altered by heat shock[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2000, 21(1): 61-69. DOI:10.1016/S0925-5214(00)00165-4.
- [49] 潘永贵, 陈维信. 鲜切荸荠中黄化物质研究[J]. *食品研究与开发*, 2008, 29(2): 33-36. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2008.02.011.
- [50] 韩聪. 鲜切胡萝卜酚类物质合成积累及其调控机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.
- [51] HUANG S J, LIN S Y, WANG T T, et al. Combining acetic acid and ethanol as an anti-browning treatment for lettuce butt discoloration through repression of the activity and expression of phenylalanine ammonia lyase[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 164: 111151. DOI:10.1016/j.postharvbio.2020.111151.
- [52] SU J J, GENG Y Q, YAO J B, et al. Quinone-mediated non-enzymatic browning in model systems during long-term storage[J]. *Food Chemistry: X*, 2022, 16: 100512. DOI:10.1016/j.fochx.2022.100512.
- [53] YAO L, WU X M, JIANG X, et al. Subcellular compartmentalization in the biosynthesis and engineering of plant natural products[J]. *Biotechnology Advances*, 2023, 69: 108258. DOI:10.1016/j.biotechadv.2023.108258.
- [54] TOLEDO L, AGUIRRE C. Enzymatic browning in avocado (*Persea americana*) revisited: history, advances, and future perspectives[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2017, 57(18): 3860-3872. DOI:10.1080/10408398.2016.1175416.
- [55] 程双, 胡文忠, 马跃, 等. 鲜切果蔬酶促褐变发生机理的研究[J]. *食品工业科技*, 2010, 31(1): 74-77; 80. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2010.01.043.
- [56] SIMON-PLAS F, PERRAKI A, BAYER E, et al. An update on plant membrane rafts[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2011, 14(6): 642-649. DOI:10.1016/j.pbi.2011.08.003.
- [57] TANG R J, LUAN M D, WANG C, et al. Plant membrane transport research in the post-genomic era[J]. *Plant Communications*, 2020, 1(1): 100013. DOI:10.1016/j.xplc.2019.100013.
- [58] SUN Y Y, SUN H J, LUO M L, et al. Membrane lipid metabolism in relation to core browning during ambient storage of 'Nanguo' pears[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 169: 111288. DOI:10.1016/j.postharvbio.2020.111288.
- [59] WANG B, WANG G, YUAN X, et al. Metabolomics and transcriptomic profiles reveal membrane lipid metabolism being an important factor of sliced taro browning[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2024, 214: 113000. DOI:10.1016/j.postharvbio.2024.113000.
- [60] BABENKO L M, SHCHERBATIUK M M, SKATERNA T D, et al. Lipoxygenases and their metabolites in formation of plant stress tolerance[J]. *Ukrainian Biochemical Journal*, 2017, 89(1): 5-21. DOI:10.15407/ubj89.01.005.
- [61] SINGH P, ARIF Y, MISZCZUK E, et al. Specific roles of lipoxygenases in development and responses to stress in plants[J]. *Plants*, 2022, 11(7): 979. DOI:10.3390/plants11070979.
- [62] 胡廷章, 胡宗利, 屈霄霄, 等. 植物脂肪氧化酶的研究进展[J]. *生物工程学报*, 2009, 25(1): 1-9. DOI:10.3321/j.issn:1000-3061.2009.01.001.
- [63] LI Z H, ZHANG Y X, GE H B. The membrane may be an important factor in browning of fresh-cut pear[J]. *Food Chemistry*, 2017, 230: 265-270. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.03.044.
- [64] 袁晓, 杨盼迪, 林冲, 等. 脂氧合酶基因 *LOX6* 克隆及其表达与鲜切芋头褐变的相关性[J]. *山东农业科学*, 2023, 55(12): 17-25. DOI:10.14083/j.issn.1001-4942.2023.12.003.
- [65] 袁晓, 杨盼迪, 王斌. *AOS1* 基因克隆及其在鲜切芋头褐变中的表达模式分析[J]. *广东农业科学*, 2023, 50(9): 198-206. DOI:10.16768/j.issn.1004-874X.2023.09.021.
- [66] CHEN C, JIANG A L, LIU C H, et al. Hydrogen sulfide inhibits the browning of fresh-cut apple by regulating the antioxidant, energy and lipid metabolism[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 175: 111487. DOI:10.1016/j.postharvbio.2021.111487.
- [67] MA W L, LI J X, MURTAZA A, et al. High-pressure carbon dioxide treatment alleviates browning development by regulating membrane lipid metabolism in fresh-cut lettuce[J]. *Food Control*, 2022, 134: 108749. DOI:10.1016/j.foodcont.2021.108749.
- [68] WASZCZAK C, CARMODY M, KANGASJÄRVI J. Reactive oxygen species in plant signaling[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2018, 69: 209-236. DOI:10.1146/annurev-arplant-042817-040322.
- [69] NADARAJAH K K. ROS homeostasis in abiotic stress tolerance in plants[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, 21(15): 5208. DOI:10.3390/ijms21155208.
- [70] APEL K, HIRT H. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2004, 55: 373-399. DOI:10.1146/annurev-arplant.55.031903.141701.
- [71] MHAMDI A, VAN BREUSEGEM F. Reactive oxygen species in plant development[J]. *Development*, 2018, 145(15): dev164376. DOI:10.1242/dev.164376.
- [72] MITTLER R, ZANDALINAS S I, FICHMAN Y, et al. Reactive oxygen species signalling in plant stress responses[J]. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 2022, 23(10): 663-679. DOI:10.1038/s41580-022-00499-2.
- [73] LIU X H, ZHANG A D, SHANG J, et al. Study on browning mechanism of fresh-cut eggplant (*Solanum melongena* L.) based on metabolomics, enzymatic assays and gene expression[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 6937. DOI:10.1038/s41598-021-86311-1.
- [74] QIAO L P, HAN X Y, WANG H L, et al. Novel alternative for controlling enzymatic browning: catalase and its application in fresh-cut potatoes[J]. *Journal of Food Science*, 2021, 86(8): 3529-3539. DOI:10.1111/1750-3841.15827.
- [75] RU X Y, YOU W L, ZHANG J L, et al. γ -Aminobutyric acid treatment inhibits browning and promotes storage quality by regulating reactive oxygen species and membrane lipid metabolism in fresh-cut stem lettuce[J]. *Food Chemistry*, 2024, 459: 140420. DOI:10.1016/j.foodchem.2024.140420.
- [76] SUN Y Y, LUO M L, GE W Y, et al. Phenylpropanoid metabolism in relation to peel browning development of cold-stored 'Nanguo' pears[J]. *Plant Science*, 2022, 322: 111363. DOI:10.1016/j.plantsci.2022.111363.

- [77] KANG J N, LEE W H, WON S Y, et al. Systemic expression of genes involved in the plant defense response induced by wounding in *Senna tora*[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22(18): 10073. DOI:10.3390/ijms221810073.
- [78] SONG M B, SHUAI L, HUANG S Q, et al. RNA-Seq analysis of gene expression during the yellowing developmental process of fresh-cut Chinese water chestnuts[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 250: 421-431. DOI:10.1016/j.scienta.2019.02.081.
- [79] XIAO Y H, ZHANG J L, JIANG Y Y, et al. Cinnamic acid treatment reduces the surface browning of fresh-cut taro[J]. Scientia Horticulturae, 2022, 291: 110613. DOI:10.1016/j.scienta.2021.110613.
- [80] YANG C, SUN N, QIN X, et al. Multi-omics analysis reveals the biosynthesis of flavonoids during the browning process of *Malus sieversii* explants[J]. Physiologia Plantarum, 2024, 176(2): e14238. DOI:10.1111/ppl.14238.
- [81] 连毅, 李燕. 果蔬褐变及其影响因素研究进展[J]. 食品与药品, 2006, 8(10): 32-36. DOI:10.3969/j.issn.1672-979X.2006.10.010.
- [82] CEBULJ A, VANZO A, HLADNIK J, et al. Apple (*Malus domestica* borkh.) cultivar 'Majda', a naturally non-browning cultivar: an assessment of its qualities[J]. Plants, 2021, 10(7): 1402. DOI:10.3390/plants10071402.
- [83] GOLDENTAL-COHEN S, BITON I, MANY Y, et al. Green olive browning differ between cultivars[J]. Frontiers in Plant Science, 2019, 10: 1260. DOI:10.3389/fpls.2019.01260.
- [84] DONG M. A minireview on temperature dependent protein conformational sampling[J]. The Protein Journal, 2021, 40(4): 545-553. DOI:10.1007/s10930-021-10012-x.
- [85] ELIAS M, WIECZOREK G, ROSENNE S, et al. The universality of enzymatic rate-temperature dependency[J]. Trends in Biochemical Sciences, 2014, 39(1): 1-7. DOI:10.1016/j.tibs.2013.11.001.
- [86] DEA S, BRECHT J K, NUNES M C N, et al. Occurrence of chilling injury in fresh-cut 'Kent' mangoes[J]. Postharvest Biology and Technology, 2010, 57(1): 61-71. DOI:10.1016/j.postharvbio.2010.02.005.
- [87] 黄泳彦, 易景怡, 王斌. 采后黄瓜响应低温胁迫的转录组学分析[J]. 热带作物学报, 2023, 44(1): 35-48. DOI:10.3969/j.issn.1000-2561.2023.01.005.
- [88] WANG J Y, ZHANG M, GAO Z X, et al. Smart storage technologies applied to fresh foods: a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 58(16): 2689-2699. DOI:10.1080/10408398.2017.1323722.
- [89] SHAH H M S, KHAN A S, SINGH Z, et al. Postharvest biology and technology of loquat (*Eriobotrya japonica* Lindl.)[J]. Foods, 2023, 12(6): 1329. DOI:10.3390/foods12061329.
- [90] SHAN Y X, ZHANG D D, LUO Z S, et al. Advances in chilling injury of postharvest fruit and vegetable: extracellular ATP aspects[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2022, 21(5): 4251-4273. DOI:10.1111/1541-4337.13003.
- [91] 王斌, 袁晓, 蒋园园, 等. 采后黄瓜冷害及耐冷性调控研究进展[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(2): 596-608. DOI:10.3969/j.issn.1000-4440.2020.02.034.
- [92] 王康, 杨民杰, 吴思宜, 等. 桃漆酶基因家族鉴定及其与冷害褐变的关系[J]. 生物工程学报, 2022, 38(1): 264-274. DOI:10.13345/j.cjb.210381.
- [93] PALUMBO M, CEFOLA M, PACE B, et al. Volatile metabolites to assess the onset of chilling injury in fresh-cut nectarines[J]. Foods, 2024, 13(7): 1047. DOI:10.3390/foods13071047.
- [94] POSTMA W J, SLOOTWEG E J, REHMAN S, et al. The effector SPRYSEC-19 of *Globodera rostochiensis* suppresses CC-NB-LRR-mediated disease resistance in plants[J]. Plant Physiology, 2012, 160(2): 944-954. DOI:10.1104/pp.112.200188.
- [95] HONG J K, HWANG I S, HWANG B K. Functional roles of the pepper leucine-rich repeat protein and its interactions with pathogenesis-related and hypersensitive-induced proteins in plant cell death and immunity[J]. Planta, 2017, 246(3): 351-364. DOI:10.1007/s00425-017-2709-5.
- [96] SUKARTA O C A, ZHENG Q, SLOOTWEG E J, et al. Glycine-rich RNA-binding protein 7 potentiates effector-triggered immunity through an RNA recognition motif[J]. Plant Physiology, 2022, 189(2): 972-987. DOI:10.1093/plphys/kiac081.
- [97] 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. DOI:10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.15.002.
- [98] 谢晶, 王肽, 杨胜平. 复合保鲜剂结合MAP对鲜切茄子贮藏品质的影响[J]. 食品与机械, 2015, 31(4): 134-137. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2015.04.036.
- [99] GHIDELLI C, MATEOS M, ROJAS-ARGUDO C, et al. Novel approaches to control browning of fresh-cut artichoke: effect of a soy protein-based coating and modified atmosphere packaging[J]. Postharvest Biology and Technology, 2015, 99: 105-113. DOI:10.1016/j.postharvbio.2014.08.008.
- [100] 余江涛, 谢晶. 臭氧水处理结合气调包装对鲜切生菜保鲜效果的影响[J]. 食品与机械, 2015, 31(1): 111-115. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2015.01.026.
- [101] FANG F, LIU B, FU L Y, et al. Water supply via pedicel reduces postharvest pericarp browning of litchi (*Litchi chinensis*) fruit[J]. Foods, 2024, 13(5): 814. DOI:10.3390/foods13050814.
- [102] HUNJEK D D, PRANJIĆ T, REPALIĆ M, et al. Fresh-cut potato quality and sensory: effect of cultivar, age, processing, and cooking during storage[J]. Journal of Food Science, 2020, 85(8): 2296-2309. DOI:10.1111/1750-3841.15353.
- [103] WANG X Y, ZHANG X M, JIA P, et al. Transcriptomics and metabolomics provide insight into the anti-browning mechanism of selenium in freshly cut apples[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1176936. DOI:10.3389/fpls.2023.1176936.
- [104] 黄彭, 丁捷, 胡晓敏, 等. 鲜切果蔬物理防褐保鲜的研究进展[J]. 园艺学报, 2021, 48(6): 1217-1232. DOI:10.16420/j.issn.0513-353x.2020-0484.
- [105] MATHEW S, ABRAHAM T E. Ferulic acid: an antioxidant found naturally in plant cell walls and feruloyl esterases involved in its release and their applications[J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2004, 24(2/3): 59-83. DOI:10.1080/07388550490491467.
- [106] STEENACKERS W, EL HOUARI I, BAEKELANDT A, et al. *Cis*-Cinnamic acid is a natural plant growth-promoting compound[J]. Journal of Experimental Botany, 2019, 70(21): 6293-6304. DOI:10.1093/jxb/erz392.
- [107] LIAO G L, XU Q, ALLAN A C, et al. *L*-Ascorbic acid metabolism and regulation in fruit crops[J]. Plant Physiology, 2023, 192(3): 1684-1695. DOI:10.1093/plphys/kiad241.
- [108] WANG B, HUANG Y Y, ZHANG Z M, et al. Ferulic acid treatment maintains the quality of fresh-cut taro (*Colocasia esculenta*) during cold storage[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 884844. DOI:10.3389/fnut.2022.884844.
- [109] WEN Y T, LIANG Y Q, CHAI W M, et al. Effect of ascorbic acid on tyrosinase and its anti-browning activity in fresh-cut Fuji apple[J]. Journal of Food Biochemistry, 2021, 45(12): e13995. DOI:10.1111/jfbc.13995.

- [110] 肖永谦, 叶海霞, 王诗韵, 等. VE对鲜切荸荠酶促褐变的影响[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(10): 23-28. DOI:10.3969/j.issn.1009-6221.2021.10.004.
- [111] HARO-GONZÁLEZ J N, CASTILLO-HERRERA G A, MARTÍNEZ-VELÁZQUEZ M, et al. Clove essential oil (*Syzygium Aromaticum* L. Myrtaceae): extraction, chemical composition, food applications, and essential bioactivity for human health[J]. Molecules, 2021, 26(21): 6387. DOI:10.3390/molecules26216387.
- [112] MARCHESE A, BARBIERI R, COPPO E, et al. Antimicrobial activity of eugenol and essential oils containing eugenol: a mechanistic viewpoint[J]. Critical Reviews in Microbiology, 2017, 43(6): 668-689. DOI:10.1080/1040841X.2017.1295225.
- [113] CHEN X N, REN L P, LI M L, et al. Effects of clove essential oil and eugenol on quality and browning control of fresh-cut lettuce[J]. Food Chemistry, 2017, 214: 432-439. DOI:10.1016/j.foodchem.2016.07.101.
- [114] ZHU L J, HU W F, MURTAZA A, et al. Eugenol treatment delays the flesh browning of fresh-cut water chestnut (*Eleocharis tuberosa*) through regulating the metabolisms of phenolics and reactive oxygen species[J]. Food Chemistry: X, 2022, 14: 100307. DOI:10.1016/j.fochx.2022.100307.
- [115] CHEN Z, XU Y H, LU Y, et al. Effect and mechanism of eugenol on storage quality of fresh-peeled Chinese water chestnuts[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 965723. DOI:10.3389/fpls.2022.965723.
- [116] SHARMA R, RAO R, KUMAR S, et al. Therapeutic potential of *Citronella* essential oil: a review[J]. Current Drug Discovery Technologies, 2019, 16(4): 330-339. DOI:10.2174/1570163815666180718095041.
- [117] WANG B, WANG Y K, HUANG Y Y, et al. Anti-browning effects of citronellal on fresh-cut taro (*Colocasia esculenta*) slices under cold storage condition[J]. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2022, 6: 1001362. DOI:10.3389/fsufs.2022.1001362.
- [118] KHAN M R, HUANG C X, DURRANI Y, et al. Chemistry of enzymatic browning in longan fruit as a function of pericarp pH and dehydration and its prevention by essential oil, an alternative approach to SO₂ fumigation[J]. PeerJ, 2021, 9: e11539. DOI:10.7717/peerj.11539.
- [119] GAO H Y, ZENG Q, REN Z N, et al. Effect of exogenous γ -aminobutyric acid treatment on the enzymatic browning of fresh-cut potato during storage[J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 55(12): 5035-5044. DOI:10.1007/s13197-018-3442-1.
- [120] BRAGA J D, THONGNGAM M, KUMRUNGSEE T. Gamma-aminobutyric acid as a potential postbiotic mediator in the gut-brain axis[J]. NPJ Science of Food, 2024, 8(1): 16. DOI:10.1038/s41538-024-00253-2.
- [121] JIANG W W, ZHU D, ZHAO L G, et al. L-Cysteine treatment delayed the quality deterioration of fresh-cut button mushrooms by regulating oxygen metabolism, inhibiting water loss, and stimulating endogenous H₂S production[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(1): 974-984. DOI:10.1021/acs.jafc.2c06795.
- [122] CERIT İ, PFAFF A, ERCAL N, et al. Postharvest application of thiol compounds affects surface browning and antioxidant activity of fresh-cut potatoes[J]. Journal of Food Biochemistry, 2020, 44(10): e13378. DOI:10.1111/jfbc.13378.
- [123] WILLS R B H, LI Y X. Use of arginine to inhibit browning on fresh cut apple and lettuce[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 113: 66-68. DOI:10.1016/j.postharvbio.2015.11.006.
- [124] LI G Q, WANG X X, ZHU H M, et al. Use of different food additives to control browning in fresh-cut potatoes[J]. Food Science & Nutrition, 2023, 11(12): 7967-7973. DOI:10.1002/fsn3.3714.
- [125] ADAM A M, JEGANATHAN B, VASANTHAN T, et al. Dipping fresh-cut apples in citric acid before plasma-integrated low-pressure cooling improves *Salmonella* and polyphenol oxidase inactivation[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(8): 3425-3434. DOI:10.1002/jsfa.11690.
- [126] PACE B, CAPOTORTO I, PALUMBO M, et al. Combined effect of dipping in oxalic or in citric acid and low O₂ modified atmosphere, to preserve the quality of fresh-cut lettuce during storage[J]. Foods, 2020, 9(8): 988. DOI:10.3390/foods9080988.
- [127] ALI S, KHAN A S, ANJUM M A, et al. Effect of postharvest oxalic acid application on enzymatic browning and quality of lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) root slices[J]. Food Chemistry, 2020, 312: 126051. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.126051.
- [128] NGAMCHUACHIT P, SIVERTSEN H K, MITCHAM E J, et al. Effectiveness of calcium chloride and calcium lactate on maintenance of textural and sensory qualities of fresh-cut mangos[J]. Journal of Food Science, 2014, 79(5): C786-C794. DOI:10.1111/1750-3841.12446.
- [129] DONG B Y, ZHU D Q, YAO Q P, et al. Hydrogen-rich water treatment improves fresh-cut *Gastrodia elata* quality by regulating reactive oxygen species metabolism and energy metabolism during low temperature storage[J]. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2023, 7: 1274701. DOI:10.3389/fsufs.2023.1274701.
- [130] HU W Z, JIANG A L, TIAN M X, et al. Effect of ethanol treatment on physiological and quality attributes of fresh-cut eggplant[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2010, 90(8): 1323-1326. DOI:10.1002/jsfa.3943.
- [131] GAO J, ZHU Y Q, LUO F Y. Effects of ethanol combined with ascorbic acid and packaging on the inhibition of browning and microbial growth in fresh-cut Chinese yam[J]. Food Science & Nutrition, 2018, 6(4): 998-1005. DOI:10.1002/fsn3.647.
- [132] KIM D H, KIM H B, CHUNG H S, et al. Browning control of fresh-cut lettuce by phytoncide treatment[J]. Food Chemistry, 2014, 159: 188-192. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.03.040.
- [133] 宋康华, 张鲁斌, 谷会, 等. 氯化钠处理延缓鲜切粉葛褐化机理研究[J]. 食品工业科技, 2018, 39(4): 285-288; 295. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2018.04.052.
- [134] 许彬, 李慧星, 赵婷婷. 柠檬酸与五种褐变抑制剂的交互作用对马铃薯护色的影响[J]. 中国食品添加剂, 2015, 26(3): 163-169. DOI:10.3969/j.issn.1006-2513.2015.03.019.
- [135] 李山林, 张雁, 廖娜, 等. 淮山褐变机理及其控制技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(13): 434-444. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2021070184.
- [136] LI X T, ZHANG S, WANG Q G, et al. Diacetyl inhibits the browning of fresh-cut stem lettuce by regulating the metabolism of phenylpropane and antioxidant ability[J]. Foods, 2023, 12(4): 740. DOI:10.3390/foods12040740.
- [137] FANG T, YAO J, DUAN Y Q, et al. Phytic acid treatment inhibits browning and lignification to promote the quality of fresh-cut apples during storage[J]. Foods, 2022, 11(10): 1470. DOI:10.3390/foods11101470.
- [138] MEN C L, WU C C, ZHANG J, et al. α -Lipoic acid treatment regulates enzymatic browning and nutritional quality of fresh-cut pear fruit by affecting phenolic and carbohydrate metabolism[J]. Food Chemistry, 2024, 458: 140223. DOI:10.1016/j.foodchem.2024.140223.
- [139] FALAGÁN N, ARTÉS F, AGUAYO E. Natural additives to preserve quality and improve nutritional value of fresh-cut nectarine[J]. Food Science and Technology International, 2016, 22(5): 429-439. DOI:10.1177/1082013215621816.

- [140] SUN S H, KIM S J, KWAK S J, et al. Efficacy of sodium hypochlorite and acidified sodium chlorite in preventing browning and microbial growth on fresh-cut produce[J]. Preventive Nutrition and Food Science, 2012, 17(3): 210-216. DOI:10.3746/pnf.2012.17.3.210.
- [141] 蔡文韬, 夏延斌. 鲜切雪莲果护色效果的研究[J]. 现代食品科技, 2012, 28(3): 274-277. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2012.03.024.
- [142] GONZÁLEZ-AGUILAR G A, RUIZ-CRUZ S, SOTO-VALDEZ H, et al. Biochemical changes of fresh-cut pineapple slices treated with antibrowning agents[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2005, 40(4): 377-383. DOI:10.1111/j.1365-2621.2004.00940.x.
- [143] SHAO L L, WANG X L, CHEN K, et al. Novel hydroxypyridinone derivatives containing an oxime ether moiety: synthesis, inhibition on mushroom tyrosinase and application in anti-browning of fresh-cut apples[J]. Food Chemistry, 2018, 242: 174-181. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.09.054.
- [144] SIVAKUMAR D, FALLIK E. Influence of heat treatments on quality retention of fresh and fresh-cut produce[J]. Food Reviews International, 2013, 29(3): 294-320. DOI:10.1080/87559129.2013.790048.
- [145] 陈蕾. 热处理对鲜切苹果褐变的抑制作用及其转录组学分析[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018. DOI:10.7666/d.Y3597896.
- [146] 王斌, 方美珊, 肖艳辉, 等. 热处理条件筛选及其提高鲜切芋头贮藏品质的生理机制[J]. 食品工业科技, 2020, 41(10): 284-288; 293. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020.10.047.
- [147] KOUKOUNARAS A, DIAMANTIDIS G, SFAKIOTAKIS E. The effect of heat treatment on quality retention of fresh-cut peach[J]. Postharvest Biology and Technology, 2008, 48(1): 30-36. DOI:10.1016/j.postharvbio.2007.09.011.
- [148] 苗泽钰, 黄慧中, 张顺庭, 等. 热处理对鲜切荸荠贮藏品质的影响及机制研究[J]. 食品科技, 2022, 47(6): 44-51. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2022.06.041.
- [149] PENG L T, JIANG Y M. Effects of heat treatment on the quality of fresh-cut Chinese water chestnut[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2004, 39(2): 143-148. DOI:10.1046/j.0950-5423.2003.00767.x.
- [150] LUO Z S, LI D D, XIE J W, et al. Effects of heat treatment on quality and browning of fresh-cut sugarcane[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2015, 39(6): 688-696. DOI:10.1111/jfpp.12278.
- [151] 韩晨瑞, 申靖, 刘航, 等. 鲜切果蔬物理保鲜技术研究进展[J]. 食品科技, 2022, 47(11): 17-23. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2022.11.001.
- [152] 蔡佳昂, 匡世瑶, 张敏. 微波对鲜切山药护色及品质的保持[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(19): 138-143. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.020890.
- [153] MAHIEDDINE B, AMINA B, FAOUZI S M, et al. Effects of microwave heating on the antioxidant activities of tomato (*Solanum lycopersicum*) [J]. Annals of Agricultural Sciences, 2018, 63(2): 135-139. DOI:10.1016/j.aas.2018.09.001.
- [154] PAN Y F, CHEN L, PANG L L, et al. Ultrasound treatment inhibits browning and improves antioxidant capacity of fresh-cut sweet potato during cold storage[J]. RSC Advances, 2020, 10(16): 9193-9202. DOI:10.1039/c9ra06418d.
- [155] YEOH W K, ALI A. Ultrasound treatment on phenolic metabolism and antioxidant capacity of fresh-cut pineapple during cold storage[J]. Food Chemistry, 2017, 216: 247-253. DOI:10.1016/j.foodchem.2016.07.074.
- [156] KATSOU LI M, DERMESONLOUGLOU E, DIMOPOULOS G, et al. Shelf-life enhancement applying pulsed electric field and high-pressure treatments prior to osmotic dehydration of fresh-cut potatoes[J]. Foods, 2024, 13(1): 171. DOI:10.3390/foods13010171.
- [157] PELAÍĆ Z, ČOŠIĆ Z, REPAJIĆ M, et al. Effect of UV-C irradiation on the shelf life of fresh-cut potato and its sensory properties after cooking[J]. Food Technology and Biotechnology, 2022, 60(2): 166-177. DOI:10.17113/ftb.60.02.22.7182.
- [158] DE SOUZA L P, FARONI L R D, HELENO F F, et al. Effects of ozone treatment on postharvest carrot quality[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 90: 53-60. DOI:10.1016/j.lwt.2017.11.057.
- [159] CALDER B L, SKONBERG D I, DAVIS-DENTICI K, et al. The effectiveness of ozone and acidulant treatments in extending the refrigerated shelf life of fresh-cut potatoes[J]. Journal of Food Science, 2011, 76(8): S492-S498. DOI:10.1111/j.1750-3841.2011.02371.x.
- [160] ALOTHMAN M, KAUR B, FAZILAH A, et al. Ozone-induced changes of antioxidant capacity of fresh-cut tropical fruits[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2010, 11(4): 666-671. DOI:10.1016/j.ifset.2010.08.008.
- [161] FIRDOUS N, MORADINEZHAD F, FAROOQ F, et al. Advances in formulation, functionality, and application of edible coatings on fresh produce and fresh-cut products: a review[J]. Food Chemistry, 2023, 407: 135186. DOI:10.1016/j.foodchem.2022.135186.
- [162] 马利华, 秦卫东, 陈学红, 等. 可食性膜特性与鲜切山药涂膜保鲜效果的研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(17): 326-329; 333. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2013.17.044.
- [163] MOREIRA M R, ÁLVAREZ M V, MARTÍN-BELLOSO O, et al. Effects of pulsed light treatments and pectin edible coatings on the quality of fresh-cut apples: a hurdle technology approach[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(1): 261-268. DOI:10.1002/jsfa.7723.
- [164] FENG K X, FENG X L, TAN W J, et al. Development of a food preservative from sea buckthorn together with chitosan: application in and characterization of fresh-cut lettuce storage[J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 14: 1080365. DOI:10.3389/fmicb.2023.1080365.
- [165] MA Y L, ZHAO Y Q, XIE J L, et al. Optimization, characterization and evaluation of papaya polysaccharide-corn starch film for fresh cut apples[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 166: 1057-1071. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2020.10.261.
- [166] 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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190704-059.
- [167] SON J, HYUN J E, LEE J W, et al. Combined application of antibrowning, heat treatment and modified-atmosphere packaging to extend the shelf life of fresh-cut lotus root[J]. Journal of Food Science, 2015, 80(6): C1178-C1187. DOI:10.1111/1750-3841.12894.
- [168] QU P, ZHANG M, FAN K, et al. Microporous modified atmosphere packaging to extend shelf life of fresh foods: a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(1): 51-65. DOI:10.1080/10408398.2020.1811635.
- [169] TABASSUM N, KHAN M A. Modified atmosphere packaging of fresh-cut papaya using alginate based edible coating: quality evaluation and shelf life study[J]. Scientia Horticulturae, 2020, 259: 108853. DOI:10.1016/j.scienta.2019.108853.
- [170] CHUA D, GOH K, SAFTNER R A, et al. Fresh-cut lettuce in modified atmosphere packages stored at improper temperatures supports enterohemorrhagic *E. coli* isolates to survive gastric acid challenge[J]. Journal of Food Science, 2008, 73(3): M148-M153. DOI:10.1111/j.1750-3841.2008.00698.x.
- [171] KAN J, XIE W J, WAN B, et al. Heat-induced tolerance to browning of fresh-cut lily bulbs (*Lilium lancifolium* Thunb.) under cold storage[J]. Journal of Food Biochemistry, 2019, 43(5): e12816. DOI:10.1111/jfbc.12816.

- [172] AVALOS-LLANO K R, MARTÍN-BELLOSO O, SOLIVA-FORTUNY R. Effect of pulsed light treatments on quality and antioxidant properties of fresh-cut strawberries[J]. Food Chemistry, 2018, 264: 393-400. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.05.028.
- [173] COLLADO E, VENZKE K T, MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ G B, et al. UV-C pretreatment of fresh-cut faba beans (*Vicia faba*) for shelf life extension: effects of domestic microwaving for consumption[J]. Food Science and Technology International, 2020, 26(2): 140-150. DOI:10.1177/1082013219873227.
- [174] LEMOS M L, GUTIÉRREZ D R, FARIAS M J, et al. Effect of UV-C treatments on quality and browning-related enzyme activity of fresh-cut eggplant (*Solanum melongena* L.) during cold storage[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(11): e16986. DOI:10.1111/jfpp.16986.
- [175] 陈磊, 黄杰, 杨瑞, 等. 臭氧结合气调包装对毛竹笋的保鲜作用[J]. 食品科学, 2021, 42(15): 200-205. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200709-135.
- [176] WANG X T, ZHU J X, TANG T J, et al. Carboxymethyl chitosan coating infused with linalool-loaded molten globular β -lactoglobulin nanoparticles for extended preservation of fresh-cut apples[J]. Food Chemistry, 2024, 460: 140578. DOI:10.1016/j.foodchem.2024.140578.
- [177] LI L, YI P, LI C B, et al. Influence of polysaccharide-based edible coatings on enzymatic browning and oxidative senescence of fresh-cut lettuce[J]. Food Science & Nutrition, 2021, 9(2): 888-899. DOI:10.1002/fsn3.2052.
- [178] RANA S S, PRADHAN R C, MISHRA S. Image analysis to quantify the browning in fresh cut tender jackfruit slices[J]. Food Chemistry, 2019, 278: 185-189. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.11.032.
- [179] HAQUE M A, ASADUZZAMAN M, MAHOMUD M S, et al. High carbon-di-oxide modified atmospheric packaging on quality of ready-to-eat minimally processed fresh-cut iceberg lettuce[J]. Food Science and Biotechnology, 2021, 30(3): 413-421. DOI:10.1007/s10068-021-00881-4.
- [180] WANG D, MA Q, BELWAL T, et al. High carbon dioxide treatment modulates sugar metabolism and maintains the quality of fresh-cut pear fruit[J]. Molecules, 2020, 25(18): 4261. DOI:10.3390/molecules25184261.
- [181] ZHU Y J, LI D, BELWAL T, et al. Effect of nano-SiO₂/chitosan complex coating on the physicochemical characteristics and preservation performance of green tomato[J]. Molecules, 2019, 24(24): 4552. DOI:10.3390/molecules24244552.
- [182] LUO Z S, WANG Y S, WANG H H, et al. Impact of nano-CaCO₃-LDPE packaging on quality of fresh-cut sugarcane[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2014, 94(15): 3273-3280. DOI:10.1002/jsfa.6680.
- [183] LI W H, LI L, CAO Y, et al. Effects of PLA film incorporated with ZnO nanoparticle on the quality attributes of fresh-cut apple[J]. Nanomaterials, 2017, 7(8): 207. DOI:10.3390/nano7080207.
- [184] TECHAKANON C, SMITH G M, JERNSTEDT J, et al. The effect of high pressure processing on clingstone and freestone peach cell integrity and enzymatic browning reactions[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 39: 230-240. DOI:10.1016/j.ifset.2016.12.011.
- [185] SULAIMAN A, SILVA F V M. High pressure processing, thermal processing and freezing of 'Camarosa' strawberry for the inactivation of polyphenoloxidase and control of browning[J]. Food Control, 2013, 33(2): 424-428. DOI:10.1016/j.foodcont.2013.03.008.
- [186] ZHANG F, CHAI J J, ZHAO L, et al. The impact of N₂-assisted high-pressure processing on the microorganisms and quality indices of fresh-cut bell peppers[J]. Foods, 2021, 10(3): 508. DOI:10.3390/foods10030508.
- [187] LI F L, ZHANG F, CHEN R X, et al. Effects of high-pressure homogenization treatment on the development of antioxidant *Zanthoxylum bungeanum* leaf powder films for preservation of fresh-cut apple[J]. Foods, 2023, 13(1): 22. DOI:10.3390/foods13010022.
- [188] AIHAITI A, MAIMAITIYIMING R, WANG L, et al. Processing of fresh-cut potato using plasma-activated water prepared by decreasing discharge frequency[J]. Foods, 2023, 12(12): 2285. DOI:10.3390/foods12122285.
- [189] GARCÍA C J, GARCÍA-VILLALBA R, GIL M I, et al. LC-MS untargeted metabolomics to explain the signal metabolites inducing browning in fresh-cut lettuce[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(22): 4526-4535. DOI:10.1021/acs.jafc.7b01667.
- [190] WILLS R B H, PRISTIJO P, GOLDING J B. Browning on the surface of cut lettuce slices inhibited by short term exposure to nitric oxide (NO)[J]. Food Chemistry, 2008, 107(4): 1387-1392. DOI:10.1016/j.foodchem.2007.09.066.
- [191] HUQUE R, WILLS R B H, PRISTIJO P, et al. Effect of nitric oxide (NO) and associated control treatments on the metabolism of fresh-cut apple slices in relation to development of surface browning[J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 78: 16-23. DOI:10.1016/j.postharvbio.2012.12.006.
- [192] 段冰, 杨睿, 窦媛, 等. 硫化氢在果蔬贮藏保鲜中的应用及机制研究进展[J]. 果树学报, 2021, 38(6): 1004-1012. DOI:10.13925/j.cnki.gsbx.20200294.
- [193] DOU Y, CHANG C M, WANG J, et al. Hydrogen sulfide inhibits enzymatic browning of fresh-cut Chinese water chestnuts[J]. Frontiers in Nutrition, 2021, 8: 652984. DOI:10.3389/fnut.2021.652984.
- [194] CHEN C, XIE J N, GANG J, et al. Metabolomic insights into the browning inhibition of fresh-cut apple by hydrogen sulfide[J]. Food Chemistry, 2024, 447: 139005. DOI:10.1016/j.foodchem.2024.139005.
- [195] AMEEN M, ZAFAR A, MAHMOOD A, et al. Melatonin as a master regulatory hormone for genetic responses to biotic and abiotic stresses in model plant *Arabidopsis thaliana*: a comprehensive review[J]. Functional Plant Biology, 2024, 51: FP23248. DOI:10.1071/FP23248.
- [196] ZHENG H H, LIU W, LIU S, et al. Effects of melatonin treatment on the enzymatic browning and nutritional quality of fresh-cut pear fruit[J]. Food Chemistry, 2019, 299: 125116. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.125116.
- [197] ZHANG C, XIN Y, WANG Z W, et al. Melatonin-induced myeloblastosis viral oncogene homologs alleviate fresh-cut lotus root browning during storage by attenuating flavonoid biosynthesis and reactive oxygen species[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(11): 5452-5461. DOI:10.1002/jsfa.12619.
- [198] XIAO Y H, XIE J, WU C S, et al. Effects of melatonin treatment on browning alleviation of fresh-cut foods[J]. Journal of Food Biochemistry, 2021, 45(9): e13798. DOI:10.1111/jfbc.13798.
- [199] LIU Y F, LIAO L Y, YIN F L, et al. Integration of metabolome and transcriptome profiling reveals the effect of 6-benzylaminopurine on the browning of fresh-cut lettuce during storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 192: 112015. DOI:10.1016/j.postharvbio.2022.112015.
- [200] GAO H, CHAI H K, CHENG N, et al. Effects of 24-epibrassinolide on enzymatic browning and antioxidant activity of fresh-cut lotus root slices[J]. Food Chemistry, 2017, 217: 45-51. DOI:10.1016/j.foodchem.2016.08.063.
- [201] MAO L C, LU F J, WANG G Z. Application of *L*-methylcyclopropene reduces wound responses and maintains quality in fresh-cut apple[J].

- Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition, 2007, 16(Suppl 1): 111-115.
- [202] 宋慕波, 孙翊然, 刘英健, 等. 米糠提取物处理对鲜切荸荠黄化的影响[J]. 广东农业科学, 2024, 51(1): 1-9. DOI:10.16768/j.issn.1004-874X.2024.01.001.
- [203] BIN Y Q, TIAN M X, XIE J N, et al. Bamboo leaf extract treatment alleviates the surface browning of fresh-cut apple by regulating membrane lipid metabolism and antioxidant properties[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2024, 104(5): 2888-2896. DOI:10.1002/jsfa.13181.
- [204] GUAN Y G, LU S N, SUN Y, et al. Tea polyphenols inhibit the occurrence of enzymatic browning in fresh-cut potatoes by regulating phenylpropanoid and ROS metabolism[J]. Plants, 2024, 13(1): 125. DOI:10.3390/plants13010125.
- [205] ZHANG Z M, PENG Y, MENG W B, et al. Browning inhibition of seabuckthorn leaf extract on fresh-cut potato sticks during cold storage[J]. Food Chemistry, 2022, 389: 133076. DOI:10.1016/j.foodchem.2022.133076.
- [206] HAMDAN N, LEE C H, WONG S L, et al. Prevention of enzymatic browning by natural extracts and genome-editing: a review on recent progress[J]. Molecules, 2022, 27(3): 1101. DOI:10.3390/molecules27031101.
- [207] DEUCHANDE T, FUNDO J, RODRIGUES D, et al. Antioxidant effects of phenolic extract from sugarcane straw and mannan extract from brewer's spent yeast on fresh-cut apples[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(15): 7529-7538. DOI:10.1002/jsfa.12829.
- [208] LIM W Y, CHEUN C F, WONG C W. Inhibition of enzymatic browning in sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.)) with chemical and natural anti-browning agents[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(11): e14195. DOI:10.1111/jfpp.14195.
- [209] LIU X, LU Y Z, 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. DOI:10.1016/j.postharvbio.2018.08.001.
- [210] SCHULBACH K F, JOHNSON J V, SIMONNE A H, et al. Polyphenol oxidase inhibitor from blue mussel (*Mytilus edulis*) extract[J]. Journal of Food Science, 2013, 78(3): C425-C431. DOI:10.1111/1750-3841.12059.
- [211] IAKIMOVA E T, WOLTERING E J. Nitric oxide prevents wound-induced browning and delays senescence through inhibition of hydrogen peroxide accumulation in fresh-cut lettuce[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2015, 30: 157-169. DOI:10.1016/j.ifset.2015.06.001.
- [212] 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, 2022, 28(8): 735-743. DOI:10.1177/10820132211056102.
- [213] WANG L, ZHANG C, SHI K L, et al. Hydrogen sulfide enhances browning repression and quality maintenance in fresh-cut peaches via modulating phenolic and amino acids metabolisms[J]. Foods, 2023, 12(6): 1158. DOI:10.3390/foods12061158.
- [214] SUN Y, ZHANG W, ZENG T, et al. Hydrogen sulfide inhibits enzymatic browning of fresh-cut lotus root slices by regulating phenolic metabolism[J]. Food Chemistry, 2015, 177: 376-381. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.01.065.
- [215] GAO Z Y, ZHAO K K, ZHANG Z K, et al. Hydrogen sulfide alleviates pericarp browning in lichi fruit by modulating energy and sugar metabolisms[J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15: 1421203. DOI:10.3389/fpls.2024.1421203.
- [216] MIN T, LU K Y, CHEN J H, et al. Biochemical mechanism of fresh-cut lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) root with exogenous melatonin treatment by multiomics analysis[J]. Foods, 2022, 12(1): 44. DOI:10.3390/foods12010044.
- [217] SHEKARI A, HASSANI R N, AGHDAM M S, et al. The effects of melatonin treatment on cap browning and biochemical attributes of *Agaricus bisporus* during low temperature storage[J]. Food Chemistry, 2021, 348: 129074. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.129074.
- [218] GAO H, KANG L N, LIU Q, et al. Effect of 24-epibrassinolide treatment on the metabolism of eggplant fruits in relation to development of pulp browning under chilling stress[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(6): 3394-3401. DOI:10.1007/s13197-014-1402-y.
- [219] LIN D S, SHUAI L, XU X L, et al. Salicylic acid inhibition on browning of fresh-cut taro by regulating phenolic compounds and active oxygen metabolism[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 206: 116591. DOI:10.1016/j.lwt.2024.116591.
- [220] 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.
- [221] ADHIKARY T, GILL P S, JAWANDHA S K, et al. Browning and quality management of pear fruit by salicylic acid treatment during low temperature storage[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101(3): 853-862. DOI:10.1002/jsfa.10692.
- [222] WANG X Y, YANG Z F, CUI J X, et al. Nitric oxide made a major contribution to the improvement of quality in button mushrooms (*Agaricus bisporus*) by the combined treatment of nitric oxide with 1-MCP[J]. Foods, 2022, 11(19): 3147. DOI:10.3390/foods11193147.
- [223] DE SOUSA A E D, FONSECA K S, DA SILVA GOMES W K, et al. Control of browning of minimally processed mangoes subjected to ultraviolet radiation pulses[J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 54(1): 253-259. DOI:10.1007/s13197-016-2457-8.
- [224] CHENG D W, MA Q Y, ZHANG J H, et al. *Cactus polysaccharides* enhance preservative effects of ultrasound treatment on fresh-cut potatoes[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 90: 106205. DOI:10.1016/j.ultsonch.2022.106205.
- [225] LIU X, YANG Q, LU Y Z, et al. Effect of purslane (*Portulaca oleracea* L.) extract on anti-browning of fresh-cut potato slices during storage[J]. Food Chemistry, 2019, 283: 445-453. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.01.058.
- [226] FANG X G, HAN J H, LOU X F, et al. Effect and mode of different concentrations of citrus peel extract treatment on browning of fresh-cut sweetpotato[J]. Foods, 2023, 12(20): 3855. DOI:10.3390/foods12203855.