

## 采后果实的果皮褐变机理及防褐变研究进展

白鸽, 王甄妮, 朱丹实, 吕长鑫, 曹雪慧

(渤海大学 食品科学与工程学院, 辽宁 锦州 121000)

**摘要:** **目的** 对果实在采后贮藏过程中果皮褐变的发生机理进行综述, 以期为延长果实采后的贮藏货架期提供理论依据。 **方法** 围绕在贮藏过程中引起果皮褐变的各种因素进行分析, 探究果皮褐变与能量状态、酶系统之间的关系, 通过了解果皮褐变发生的机理, 总结通过使用物理处理方法和化学处理方法来防止果皮褐变的研究进展, 为后续延长果实贮藏期的研究提供一定的参考。 **结论** 果实果皮褐变的原因主要为酶促褐变, 不同种类果实的果皮褐变机理不尽相同。目前, 国内外关于果实果皮褐变的发生机理仍存在争议, 且不同胁迫下的褐变机理、同类果实不同品种以及不同种类果实的褐变机理存在异同。需要通过大量实验, 总结不同因素导致褐变发生机理的异同点, 为针对性的果皮防褐变措施提供一定的理论依据。

**关键词:** 果皮; 能量状态; 酶; 防褐变

**中图分类号:** TS255.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)05-0080-08

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.05.010

### Research Progress on Browning Mechanism and Prevention of Postharvest Fruit

BAI Ge, WANG Zhen-ni, ZHU Dan-shi, LYU Chang-xin, CAO Xue-hui

(School of Food Science and Engineering, Bohai University, Jinzhou 121000, China)

**ABSTRACT:** The work aims to summarize the mechanism of fruit pericarp browning during postharvest storage in order to provide a theoretical basis for improving the shelf life of fruit after harvest. Various factors causing the pericarp browning during storage were analyzed to explore the relationship between pericarp browning and energy state and enzyme system. By investigating the pericarp browning mechanism, the physical and chemical treatments were summarized to prevent the pericarp browning progress, thus providing a certain reference for the future research on extending storage period of fruit. The browning mechanism of fruit pericarp is mainly accelerated by enzyme and the pericarp browning mechanism of different fruits is different. At present, there are still controversies about the mechanism of fruit pericarp browning at home and abroad. There were similarities and differences in the browning mechanism of different stress, different varieties of the same fruit and different kinds of fruit. A large number of experiments need to be conducted to summarize the similarities and differences of browning mechanism caused by different factors, so as to provide some theoretical basis for specific measures of preventing pericarp browning.

**KEY WORDS:** fruit pericarp; energy state; enzyme; browning prevention

果实一般由果皮和种子组成, 果实的外表面称为果皮, 成熟果实的果皮一般分为内、中、外等3层。

不同果实的果皮结构不同, 龙眼、荔枝等果实最外围的2层均为不可食用的硬壳, 梨果类果实果皮指最外

收稿日期: 2020-08-10

作者简介: 白鸽(1996—), 女, 渤海大学硕士生, 主攻农产品加工及贮藏。

通信作者: 曹雪慧(1978—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为果蔬加工与贮运。

层。果皮品质是果实状态的直接表现,也是影响消费者购买的首要因素。果皮颜色鲜艳、结构完整、体态饱满表明果实新鲜、营养损失少。果实在采后贮藏过程中极易发生果皮褐变,诱导果实果皮发生褐变的外部因素有果皮失水、低温胁迫、高温胁迫、病原菌感染、机械损伤等。文中拟总结各因素对果皮褐变的影响,为防止果实果皮褐变提供参考。

## 1 引起果皮褐变的因素

### 1.1 果皮失水

水分是维持果实营养物质和结构的必要条件。果皮失水会引起果皮细胞超微结构的变化,导致表皮结构破坏,发生严重的质壁分离现象,细胞间隙变小,细胞层次变得不明显。细胞质膜、液泡膜等结构逐渐降解,内容物聚集,果皮褐变加速,从而发生各种生理失调现象。尧金燕等<sup>[1]</sup>研究表明,如果荔枝果皮中的水分损伤一半以上,细胞膜的透过性将会增强,细胞内溶质渗透进入细胞质,细胞溶质的pH值发生变化,引起组织花色苷的结构发生变化,正常代谢受到影响,加速果皮褐变。林河通等<sup>[2]</sup>用聚乙烯薄膜袋包装龙眼,研究包装对龙眼果实果皮失水和果皮褐变的影响,结果表明,没有经过包装的对照组龙眼在贮藏过程中极易丢失水分,发生果皮褐变,并且随着贮藏时间的延长,果皮的失水越来越多,果皮的褐变现象也越来越严重,果皮细胞的细胞器和膜的完整性受到破坏;经过包装的龙眼,果皮失水和褐变现象被显著抑制,能够较长时间地保持较好的品质。梁琪琪等<sup>[3]</sup>将“净皮甜”石榴预冷后,用0.1 mm聚乙烯薄膜进行包装,以未经薄膜包装处理贮藏的石榴为对照,研究低温结合薄膜包装对采后石榴品质的影响,结果表明,在低温条件下,0.1 mm聚乙烯薄膜包装可以有效减缓果皮褐变指数的升高,延长石榴的贮藏期。综上,果皮失水增多,会加速果皮褐变现象的发生。

### 1.2 低温胁迫

适当的低温处理能够减缓采后果实的呼吸作用,使营养物质的消耗代谢减慢,延缓果实褐变、衰老和生理失调现象的发生,能够较长时间地保持较好的果实品质。过低的贮藏温度会使果实受到低温伤害,此时果实的代谢和各种生理反应将会受到影响,当细胞的结构发生损害时,果皮将会出现斑点等褐变现象,果实的质量和营养价值会降低。研究发现,桃的贮藏温度低于8℃时,会发生低温冷害,当表皮褐变严重时桃将开始腐烂,大大降低了桃的品质<sup>[4-5]</sup>。王志华等<sup>[6]</sup>以“红香酥”梨为实验材料,研究不同的低温条件对“红香酥”梨品质和贮藏期的影响,结果表明,-1.5℃低温贮藏环境虽能较好地抑制果实腐烂,但在贮藏后期果心出现严重褐变;-0.5℃和0.5℃的贮藏

环境能明显地抑制果皮和果心褐变,保持较好的果实品质。Li等<sup>[7]</sup>用纳米ZnO基低密度聚乙烯(NZLDPE)和低密度聚乙烯(LDPE)包装水蜜桃,在2℃下贮存40d,结果表明,经过包装的水蜜桃果实硬度较高,褐变指数较低,腐烂率较低。NZLDPE包装能更好地维持低温环境下水蜜桃的细胞壁结构,抑制果皮褐变和衰老,从而在冷害胁迫下保持良好的果实品质。虽然低温环境可延缓果皮褐变,但是不恰当的低温处理会导致果实发生低温冷害。

### 1.3 高温胁迫

热处理温度与贮藏效果有很大的关系,适当热处理可以减缓贮藏期间低温对果实的伤害,对果实的颜色和品质有益。热处理温度过高或者时间过长,将导致梨果类果实果皮中乙醇积累,造成果皮褐变,含花色苷的果实果皮在高温下花色苷的降解速度加快,导致果皮褐变,果实贮藏时间和货架期变短。Olesen等<sup>[8]</sup>将采后荔枝置于22℃水中浸泡1h后,分别放在48,52℃热水中处理2min和5min,结果表明,所有实验处理的荔枝褐变速度都明显减慢,其中经52℃热水浸泡2min后荔枝的色度下降最为缓慢,果皮褐变进程明显被抑制,腐烂率降低。Lichter等<sup>[9]</sup>发现,热处理温度太高或时间太长,荔枝果皮结构受损,果皮褐变加剧。热水处理会损伤果皮外层,降低果皮pH值,使果皮暴露,在热水中加入酸,可以抑制多酚氧化酶(PPO)活性,使花青素保持其色素形态,抑制荔枝果皮褐变。热处理既能延缓果皮褐变,亦能加速果皮褐变。

### 1.4 病原菌感染

果实营养丰富,甜度较高,水分含量较多,是微生物生长繁殖的最佳场所。病原菌侵染会导致果实表面微生物繁殖、果皮褐变衰老加剧,贮藏时间受到影响<sup>[10]</sup>。Chen等<sup>[11]</sup>发现龙眼果实遭受根霉侵染后,果皮细胞壁降解酶(CWDEs)的活性增加,加速果皮细胞壁成分的降解,果皮机械强度降低,导致果皮组织破坏,发生褐变,最终导致疾病和腐烂的发生。蔡学清<sup>[12]</sup>发现,荔枝采后常见的病原菌中以霜疫霉、青霉等最为严重,内生细菌处理可以提高荔枝果皮中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)等具有清除氧自由基功能的多种酶活性,降低荔枝果皮中丙二醛(MDA)含量,同时能够降低荔枝果皮中PPO、过氧化物酶(POD)和花色苷酶活性,从而在一定程度上延缓荔枝果皮的褐变速度。微生物繁殖速度快,侵染后寄生在果实中,造成果皮褐变甚至果实腐烂。

### 1.5 机械损伤

果实在采后运输、贮藏、摆放等过程中都极易受

到人为或者非人为的机械损伤,这种机械损伤将会使果实的结构和代谢发生变化,表皮受到伤害时容易发生微生物的侵染,果实果皮褐变的速度会加快。Montero等<sup>[13]</sup>发现柑橘发生机械损伤后容易产生油斑病,病变初期产生体积和形状不同的浅黄色或者白色斑点,斑点处会微微突起,中后期斑点会变成黄色甚至褐色,影响采后柑橘的商品价值。Zhao等<sup>[14]</sup>研究表明,黄瓜在发生机械损伤后,膜的 $\text{Ca}^{2+}$ 含量的下降速度加快, $\text{Ca}^{2+}$ 在植物中能够防止膜发生损伤和渗漏,并能加强壁结构。机械损伤刺激 $\text{Ca}^{2+}$ 从细胞膜移向细胞质,可能激活磷脂酶D(PLD)和脂氧合酶(LOX)的活性,损伤诱导的PLD和LOX可能通过增加基因引起相应的生理反应,造成果皮褐变和衰老。采后果实最易遭受机械损伤,从而加速果皮褐变。

果皮失水、低温胁迫、高温胁迫、病原菌感染、机械损伤是引起果皮褐变的外部因素,当果实受到外界环境威胁时,果实内部会发生能量代谢和多种酶的变化,并通过果皮颜色的变化表现出来。

## 2 能量状态与果皮褐变的关系

果实采后要进行生理代谢,能量是代谢基础。能量状态与果实果皮褐变的发生具有较大的关系,可以从果实采后的呼吸代谢变化、活性氧变化、细胞膜完整性程度等方面研究能量状态与果皮褐变的关系。

### 2.1 能量状态引起的呼吸代谢变化对果皮褐变的影响

采后果实是有机体,要进行一系列的生理代谢活动,细胞能量状态对于维持果实的正常生理代谢和贮藏期间的品质是必不可少的<sup>[15]</sup>。Chen等<sup>[16]</sup>研究发现,在贮藏期间的龙眼果实中ATP、ADP和能量电荷(EC)的水平将会下降,EC水平与龙眼果皮的褐变呈负相关。采后果实中的能量主要由呼吸代谢产生,果实中的ATP主要通过有氧呼吸代谢中的糖酵解、三羧酸循环、氧化磷酸化产生<sup>[17]</sup>。在贮藏期间,若呼吸代谢增强,则营养物质大量被消耗,果实褐变和衰老的速度加快。赵云峰等<sup>[18]</sup>研究发现,在贮藏后期龙眼的果实呼吸速率呈上升的趋势。气调贮藏就是通过调节气体的组成,降低采后贮藏过程中果实的呼吸作用,延缓果实褐变和衰老进程,从而延长果实的贮藏期<sup>[19]</sup>。Lin等<sup>[20]</sup>用没食子酸丙酯处理采后的龙眼,结果表明,经过没食子酸丙酯处理后的龙眼具有较高的ATP含量和EC水平,能够有效改善果皮褐变。采后果实的能量状态与呼吸代谢有关,能量亏损将刺激呼吸代谢产生更多的能量,加快营养物质的消耗,促进衰老和果皮褐变的进程。

### 2.2 能量状态引起的活性氧变化对果皮褐变的影响

组织能量水平较低会导致活性氧ROS的积累,ROS主要在线粒体中产生。ROS是在有氧代谢过程中将电子传递给氧分子时产生的有毒且比较活跃的一类含氧物质的总称。正常情况下ROS的产生和清除处于稳态,当组织能量不足时,不能及时清除过多的ROS,造成细胞内ROS的大量积累,各组分将受到损伤<sup>[21]</sup>。陈莲等<sup>[22]</sup>将解偶联剂DNP作用于采后龙眼果实,结果表明,经过DNP处理的龙眼果皮中ATP含量较低,果皮褐变较严重。DNP促进龙眼果皮褐变可能是由于DNP会导致组织能量不足,ROS清除速率减慢,造成ROS的积累,使膜系统的自我修复能力减弱,细胞膜的透过性增强,酚酶与酚类物质接触,氧化形成褐色物质。

### 2.3 能量状态变化引起的细胞膜完整性变化对果皮褐变的影响

植物细胞的细胞膜和亚细胞膜结构将细胞进行区域化,防止离子泄漏和其他有害反应发生。当细胞能量亏损时,膜的透过性增强,不饱和度下降,细胞膜的自我修复能力受损,导致果实果皮褐变和衰老的发生。果实细胞的能量(包括ADP,AMP,EC)对细胞膜结构的完整性有很大影响<sup>[23-24]</sup>。采后果实衰老的最初特征是细胞膜结构的完整性受到不可逆破坏,表现为膜渗透性增强,膜脂降解和过氧化,膜系统结构破坏,同时不饱和脂肪酸的含量会降低,膜流动性下降。当采后细胞膜透性增大时,果皮褐变程度严重,此时不饱和脂肪酸含量较低。较高的EC水平有助于细胞膜损伤修复,对维持细胞膜结构的完整性起到重要作用。Zhang等<sup>[25]</sup>研究表明,采后龙眼果实的病害指数、果皮褐变指数和细胞膜透性指数均较高,且与磷脂酶D、脂肪酶和脂质氧化酶的活性呈正相关,同时具有较低的膜磷脂含量和不饱和脂肪酸含量。桂圆的果皮褐变可能归因于受损细胞膜结构的完整性,以及膜磷脂的增加和不饱和脂肪酸的降解。林毅雄等<sup>[26]</sup>研究发现,DNP处理会导致龙眼果皮的ATP含量快速下降,呼吸速率加快,细胞膜透性增大,果皮离子传递泄漏,加速龙眼果实的果皮褐变。Lin等<sup>[27]</sup>给采后龙眼果实维持较高的ATP水平,增强果实的能量水平,抑制膜在降解过程中的相关酶活性,使龙眼果实细胞具有较高的不饱和度和完整的细胞结构,延缓果实衰老和果皮褐变的进程。

## 3 酶系统与果皮褐变的关系

果实采后除能量与果皮褐变有较大关系外,多种酶均与果皮褐变相关。褐变现象从本质上可以分为酶

促褐变和非酶褐变。酶促褐变是指在 PPO 和氧存在的情况下, 酚类物质氧化为醌后进一步聚合产生黑褐色物质。非酶褐变是由非酶原因引起的褐变, 其中包括: 蛋白质、氨基酸的氨基与游离羰醛基作用, 最终形成类黑素的美拉德反应; 在加热情况下, 没有氨基存在时糖发生的焦糖化反应; 抗坏血酸自身氧化引起的褐变等。果皮褐变以酶促褐变为主, 酶促褐变的机理一直是国内外的研究重点。果皮酶促褐变与 PPO, POD, CAT 等多种酶相关, 现将多种酶与果皮褐变的关系进行论述。

### 3.1 多酚氧化酶

PPO 被认为在酶促褐变中起到重要作用, 是国内外的研究重点。1960 年 Akamine 等<sup>[28]</sup>研究发现, PPO 在荔枝果实中作用于花色素苷, 催化形成类黑精物质, 使果皮发生褐变。冯立娟等<sup>[29]</sup>以不同品种的石榴为实验材料, 探究果皮褐变程度与相关酶活性、总酚含量和 DPPH 自由基清除率之间的关系, 结果表明, 果皮褐变及其相关酶活性、总酚含量和 DPPH 自由基清除率因品种的差异而存在一定的相关性和差异性。PPO 是影响石榴果皮褐变的主导酶。Wang 等<sup>[30]</sup>采用质量分数为 2% 的  $\text{CaCl}_2$  低温处理南果梨, 结果表明, 其能有效地抑制果实 PPO 基因的表达水平, 降低南果梨在贮藏期间的 PPO 活性, 抑制南果梨果皮褐变。目前许多研究表明, 多酚氧化酶具有 2 种形态, 即游离态和结合态, 只有游离态多酚氧化酶具有催化活性。当果实组织结构遭到破坏时, 结合态多酚氧化酶会转化为游离态, 导致游离态多酚氧化酶的含量增加, 表现出更强的催化活性, 加速组织衰老和果皮褐变。

### 3.2 过氧化物酶

POD 是催化氧化果皮酶促褐变的重要酶类之一。Lin 等<sup>[31]</sup>研究过氧化氢对龙眼果皮褐变、膜脂代谢和酚代谢的影响, 结果表明, 与对照组的龙眼果实相比,  $\text{H}_2\text{O}_2$  处理组的果实褐变指数和 POD 活性较高。一般认为果实采后褐变是多酚氧化酶和过氧化物酶将花青素快速降解产生褐变的副产品。POD 作用底物有上百种, 在组织内参与的反应较复杂, 催化氧化酚类、黄酮类物质, 加速衰老。Guo 等<sup>[32]</sup>研究发现, 在过氧化氢存在的情况下, POD 可使抗坏血酸和谷胱甘肽氧化分解, 对细胞膜脂造成破坏, 引起果皮褐变。同时也有其它不同的观点, 林艺芬等<sup>[33]</sup>比较了“东壁”和“福眼”龙眼果实的果皮褐变与酚类物质代谢的关系, 结果表明, 贮藏期间“东壁”龙眼果实的 PPO 和 POD 活性都低于“福眼”龙眼, 且“东壁”龙眼果实不容易发生果皮褐变。李政红<sup>[34]</sup>研究发现, 随着贮藏时间的延长, 雪青和满天红等 2 种梨的 POD 活性变化与褐变程度的趋势一致, 鸭梨和新梨 7 号等 2 种梨的

POD 活性变化与褐变程度的趋势相反, 说明 POD 活性与褐变程度的关系与品种有关。

### 3.3 过氧化氢酶和过氧化物歧化酶

CAT 和 SOD 是 2 种保护细胞膜的关键性酶, 可以清除自由基、活性氧等物质, 防止其对细胞膜造成损害。CAT 是一种内源性  $\text{H}_2\text{O}_2$  清除酶, CAT 活性下降将导致组织衰老和果皮褐变。Ma 等<sup>[35]</sup>研究外源乙烯对在  $0^\circ\text{C}$  贮藏环境中的梨果果皮褐变的影响, 结果表明,  $5\ \mu\text{L/L}$  乙烯处理显著提高了 CAT 和 SOD 等酶的活性, 防止皇冠梨发生果皮褐变。Tomas-Callejas 等<sup>[36]</sup>发现, SOD 能歧化细胞内的超氧化物, 及时清除过多的活性氧, 抑制果皮褐变现象。张有林等<sup>[37]</sup>以石榴为研究对象, 研究各种条件对果皮褐变的影响, 结果表明, CAT 活性与果实代谢强度、抵抗外界环境等有关。在贮藏过程中果皮 CAT 活性呈下降趋势, 褐变指数呈上升趋势。

### 3.4 苯丙氨酸解氨酶

PAL 是苯丙氨酸代谢途径中的重要酶也是影响反应速度的控制酶, 是各种酚类物质生成过程的关键酶, 对果皮和果实组织的褐变起到重要作用。蔡惠<sup>[38]</sup>对在贮藏期间中安梨果实的褐变进行了研究, 表明不同品系安梨果实的 PAL 活性在贮藏期间都呈先上升后下降的趋势, 果实褐变程度越低, PAL 活性越低。高雪<sup>[39]</sup>研究表明, 在贮藏过程中奉节脐橙果皮的 PAL 活性与果皮褐变率有较强的相关性。Jacques 等<sup>[40]</sup>认为, PAL 的升高促进了木质素和总酚的含量, 进而抑制了非冻害褐斑的产生。

## 4 果皮防褐变措施

目前防褐的措施较多, 总结归类后大致为通过物理方法和化学方法对果实进行处理, 防止果实果皮褐变, 延长果实贮藏期和货架期。

### 4.1 物理方法

物理方法一般通过调节温度或压力抑制酶和微生物的作用, 对果皮褐变起到调控作用。

#### 4.1.1 温度调节

通过调节温度抑制果实呼吸和酶活性等, 降低新陈代谢速率, 减缓果皮褐变, 同时防止低温对果实造成伤害<sup>[41]</sup>。闫师杰等<sup>[42]</sup>在梨冷藏前通过逐渐降温的方式, 使果实温度慢慢进入低温状态, 提高鸭梨中膜不饱和脂肪酸的含量, 从而抑制褐变。盛蕾<sup>[43]</sup>研究发现, 将采后南果梨进行程序降温和间歇升温处理, 能够降低果皮 PLD 和 LOX 的活性, 降低果皮细胞膜的损伤, 有效减缓果实果皮褐变。Biswas 等<sup>[44]</sup>将低温贮藏的番茄经过多次短时间的升温处理, 有效地缓解

了番茄的冷害程度,延长其贮藏时间,延缓衰老和褐变的进程。王艳颖等<sup>[45]</sup>认为,间歇升温可以减弱果实由膜脂过氧化造成的损伤,保护细胞膜结构,避免由酚类物质和酶接触造成的褐变现象。Zhang等<sup>[46]</sup>用45℃热水浸泡与甜菜碱共同处理冷藏枇杷果实,提高了过氧化氢酶等的活性,有效地缓解了冷害作用,抑制了枇杷果果皮褐变。

#### 4.1.2 压力调节

高压处理对多酚氧化酶有抑制作用。在高压处理过程中,无论是否添加热量,果实都要承受较高的压力(900 MPa),使微生物失活,抑制果皮褐变。Kingsly等<sup>[47]</sup>研究在高压条件下,热水预煮桃片对多酚氧化酶活性的影响,结果表明,当压力高于300 MPa时,配合质量分数为1%~12%的柠檬酸可以钝化桃中多酚氧化酶的活性,防止褐变的发生。Sulaiman<sup>[48]</sup>用高压处理(200, 600 MPa)、热处理(29~71℃)灭活草莓中的PPO,研究表明,在室温下600 MPa处理草莓5 min和15 min,会分别导致草莓果实中35%和82%的PPO失活,200 MPa处理对PPO的影响较小。Denoya等<sup>[49]</sup>在常温下用500, 600, 700 MPa处理对桃子分别保温1 min和5 min,结果表明,600 MPa处理5 min能成功抑制酶促褐变,保持抗坏血酸和酚类物质的含量。

## 4.2 化学方法

化学方法主要利用化学抑制剂与酶竞争性地结合酚类底物,从而使酚类底物结构发生改变,避免酶和酚类底物接触发生酶促褐变,起到延长果实贮藏期的作用。

#### 4.2.1 亚硫酸盐及硫酸盐

亚硫酸根离子具有强还原作用,可以抑制多酚氧化酶等酶的活性,抑制果皮褐变的发生。Wedzicha等<sup>[50]</sup>研究亚硫酸盐抑制褐变的机理,结果表明,亚硫酸盐能够抑制褐变主要是由于亚硫酸盐离子的亲核性。Wang等<sup>[51]</sup>用酸性亚硫酸钙作用于荔枝,结果表明,当亚硫酸钙溶液的质量分数大于1.25%时,可以显著抑制在贮藏期的荔枝果皮中多酚氧化酶和过氧化物酶的活性。酸性亚硫酸钙可以帮助清除自由基,保留果皮外壳的红色,抑制褐变和衰老,且不会对果实内部品质产生不利影响。

#### 4.2.2 巯基化合物

巯基化合物是对PPO和POD的有效抑制剂,对生成高抗氧化性物质有很大影响。Ali等<sup>[52]</sup>研究表明,L-半胱氨酸在质量分数为0.25%时,能显著降低荔枝果实的褐变指数、膜泄漏率、丙二醛含量,且能维持荔枝果皮的酸碱度,使其表现出较高的总花青素含量、2,2-二苯基-1-苦基肼(DPPH)清除自由基活性和总酚含量,从而使得POD和PPO活性、果皮褐变

指数下降。Brun-Mérimée S等<sup>[53]</sup>研究表明,由等摩尔的葡萄糖或果糖与谷胱甘肽制备的美拉德反应产物,在90℃下加热15~39 h后,能有效地抑制苹果多酚氧化酶的活性,抑制苹果果皮褐变和衰老的发生。

#### 4.2.3 其他物质

Ali等<sup>[54]</sup>研究了蛋氨酸对荔枝果实的抗褐变作用,用质量分数为0.25%的蛋氨酸溶液处理后,将荔枝果实放在5℃环境下冷藏28 d,能明显降低果实褐变的发生概率,提高果实的抗氧化活性。Lin等<sup>[19]</sup>研究没食子酸丙酯处理桂圆对果皮褐变的影响,结果表明,没食子酸丙酯可抑制贮藏前期和中期的龙眼果实NADK活性,提高NADP和NADPH含量,同时保持果实较高水平的ATP含量和能量,从而抑制龙眼果皮褐变的发生。Li等<sup>[55]</sup>研究氨基水杨酸钠(PAS-Na)对荔枝果皮褐变的影响,结果表明,PAS-Na可明显抑制果皮褐变的发生,降低荔枝果实的呼吸速率,抑制活性氧ROS的产生,降低衰老等相关基因的表达水平。此外PAS-Na处理可增强SOD的活性,维持细胞膜的完整性,降低相对膜泄漏率和MDA含量,控制荔枝果实采后果皮褐变的速率,延长贮藏寿命。综上,果实组分的多样性和引起果皮褐变因素的多样性对果皮防褐变工作带来了巨大的挑战。

## 5 结语

引起果实果皮褐变的因素较多,且发生机理不同,所采用的防褐变措施也各异。虽然研究者对果皮褐变进行了多年的研究,但是国内外关于果实果皮褐变的发生机理仍存在争议。不同胁迫下褐变原因与果实品种的差异导致褐变发生机理的区别都不是很明朗,还需要通过大量实验总结各因素导致褐变发生的机理,针对性地进行果皮防褐变措施的研究。目前,关于在果实加工贮藏过程中抑制果皮褐变的研究主要集中在热处理、酸处理、包装等方面,其各有优缺点,这些方法存在用量不规范、温度掌控困难等问题。根据果实种类的不同选择适宜的褐变抑制方法,以达到最佳护色效果,将某些提取物或者天然植物中的提取物用于抑制果实果皮的褐变,采用更加安全、环保、损害小、成本低的防褐变方法,是果蔬保鲜的发展方向。

## 参考文献:

- [1] 尧金燕,龙兴,彭宏祥,等.荔枝采后生物学研究及其在广西的发展现状[J].广西农业科学,2010,41(5):475—478.  
YAO Jin-yan, LONG Xing, PENG Hong-xiang, et al. Research on Postharvest Biology of Litchi and Its

- Development Status in Guangxi[J]. Guangxi Agricultural Sciences, 2010, 41(5): 475—478.
- [2] 林河通, 陈莲, 孔祥佳, 等. 包装对龙眼果实贮藏期间果皮失水褐变和细胞超微结构的影响[J]. 农业工程学报, 2007(12): 237—241.  
LIN He-tong, CHEN Lian, KONG Xiang-jia, et al. Effects of Packaging on Water Loss Browning and Cell Ultrastructure of Longan Fruit During Storage[J]. Chinese Journal of Agricultural Engineering, 2007(12): 237—241.
- [3] 梁琪琪, 张润光, 刘皓涵, 等. 低温结合薄膜包装对石榴果实采后生理及贮藏品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(8): 187—191.  
LIANG Qi-qi, ZHANG Run-guang, LIU Hao-han, et al. Effects of Low Temperature Combined with Film Packaging on Postharvest Physiology and Storage Quality of Pomegranate Fruits[J]. Food and fermentation industry, 2020, 46(8): 187—191.
- [4] PAN Lei-qing, ZHANG Qiang, ZHANG Wei, et al. Detection of Cold Injury in Peaches by Hyperspectra Reflectance Imaging and Artificial Neural Network[J]. Food Chemistry, 2016, 192: 134—141.
- [5] MONTEAGUDO A, FORCADA C F, ESTOPANAN G, et al. Biochemical Analyses and Expressin of Cold Transcription Factors of the Late PDO 'Calanda' Peach under Different Post-harvest Conditions[J]. Scientia Horticulturae, 2018, 238: 116—125.
- [6] 王志华, 高剑利, 王文辉, 等. 不同贮藏温度对“红香酥”梨果实品质和相关生理指标的影响[J]. 中国果树, 2020(5): 13—19.  
WANG Zhi-hua, GAO Jian-li, WANG Wen-hui, et al. Effect of Different Storage Temperature on Fruit Quality and Related Physiological Indexes of "Red-fragrant Crisp" Pear [J]. Chinese Fruit Tree, 2020(5): 13—19.
- [7] LI Dong, LI Li, LUO Zi-sheng, et al. Effect of Nano-ZnO-packaging on Chilling Tolerance and Pectin Metabolism of Peaches during Cold Storage[J]. Scientia Horticulturae, 2017, 225: 128—133.
- [8] OLESEN T, NACEY L, WILTSHIRE N, et al. Hot Water Treatments for the Control of Rots on Harvested Litchi (*Litchi Chinensis Sonn*) Fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2004, 32(2): 135—146.
- [9] LICHTER A, DVIR O, ROT I, et al. Hot Water Brushing: An Alternative Method to SO<sub>2</sub> Fumigation for Color Retention of Litchi Fruits[J]. Postharvest Biology and Technology, 2000, 18(3): 235—244.
- [10] 蒋佳男, 李海登, 李喜宏, 等. 纳米 TiO<sub>2</sub> 可降解包装材料对葡萄的保鲜效果研究[J]. 包装工程, 2019, 40(21): 1—6.  
JIANG Jia-nan, LI Hai-deng, LI Xi-hong, et al. Effect of Nano TiO<sub>2</sub> Biodegradable Packaging Material on Grape Preservation[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(21): 1—6.
- [11] CHEN Yi-hui, ZHANG Shen, LIN He-tong, et al. Phomopsis Longanae Chi-induced Changes in Activities of Cell Wall-degrading Enzymes and Contents of Cell Wall Components in Pericarp of Harvested Longan Fruit and Its Relation to Disease Development[J]. Frontiers in Microbiology, 2018, 9: 10—51.
- [12] 蔡学清. 荔枝采后主要病原菌的特性及内生细菌对其防治保鲜研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2010: 8—15.  
CAI Xue-qing. Characteristics of Main Pathogens after Litchi Harvest and Study on the Control and Preservation of Endophytic Bacteria[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2010: 8—15.
- [13] MONTERO C R S, SCHWARZ L, SANTOS L C D, et al. Oleocellosis Incidence in Citrus Fruit in Response to Mechanical Injuries[J]. Scientia Horticulturae, 2012, 134: 20—31.
- [14] ZHAO Yu-ying, QIAN Chun-lu, CHEN Ji-cheng, et al. Responses of Phospholipase D and Lipoxygenase to Mechanical Wounding in Postharvest Cucumber Fruit[J]. Journal of Zhejiang University Sciences, 2010(6): 443—450.
- [15] CHEN Yi-hui, SUN Jun-zheng, LIN He-tong, et al. Salicylic Acid Reduces the Incidence of Phomopsis Longanae Chi Infection in Harvested Longan Fruit by Affecting the Energy Status and Respiratory Metabolism[J]. Postharvest Biology & Technology, 2020, 160: 111—135.
- [16] CHEN Yi-hui, LIN He-tong, JIANG Yue-ming, et al. Phomopsis Longanae Chi-induced Pericarp Browning and Disease Development of Harvested Longan Fruit in Association with Energy Status[J]. Postharvest Biology & Technology, 2014, 93: 24—28.
- [17] LIN Yi-fen, LIN Yi-xiong, LIN He-tong, et al. Application of Propyl Gallate Alleviates Pericarp Browning in Harvested Longan Fruit by Modulating Metabolisms of Respiration and Energy[J]. Food Chemistry, 2018, 240: 863—869.
- [18] 赵云峰, 林河通, 林娇芬, 等. 龙眼果实采后呼吸强度、细胞膜透性和品质的变化[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2005, 34(2): 263—268.  
ZHAO Yun-feng, LIN He-tong, LIN Jiao-fen, et al. Changes in Respiration Intensity, Cell Membrane Permeability and Quality of Longan Fruit after Harvest[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2005, 34(2): 263—268.
- [19] ALI S, KHAN A S, MALIK A U, et al. Effect of Controlled Atmosphere Storage on Pericarp Browning, Bioactive Compounds and Antioxidant Enzymes of Litchi Fruits[J]. Food Chemistry, 2016, 206: 18—29.
- [20] LIN Yi-fen, LIN Yi-xiong, LIN He-tong, et al. Application of Propyl Gallate Alleviates Pericarp Browning in Harvested Longan Fruit by Modulating Metabolisms

- of Respiration and Energy[J]. *Food Chemistry*, 2018, 240(1): 863—869.
- [21] TIAN Shi-ping, QIN Guo-zheng, LI Bo-qiang. Reactive Oxygen Species Involved in Regulating Fruit Senescence and Fungal Pathogenicity[J]. *Plant Molecular Biology*, 2013, 82(6): 593—602.
- [22] 陈莲, 陈梦茵, 林河通, 等. 解偶联剂 DNP 处理对采后龙眼果实果皮褐变和活性氧代谢的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(11): 4019—4026.  
CHEN Lian, CHEN Meng-yin, LIN He-tong, et al. Effect of Uncoupling Agent DNP Treatment on Pericarp Browning and Reactive Oxygen Metabolism of Postharvest Longan Fruit[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(11): 4019—4026.
- [23] PAN Yong-gui, YUAN Meng-qi, ZHANG Wei-min, et al. Effect of Low Temperatures on Chilling Injury in Relation to Energy Status in Papaya Fruit during Storage[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2017, 125: 181—187.
- [24] HE Xue-mei, LI Li, SUN Jian, et al. Adenylate Quantitative Method Analyzing Energy Change in Postharvest Banana (*Musa Acuminata* L) Fruits Stored at Different Temperatures[J]. *Scientia Horticulturae*, 2017, 219: 118—124.
- [25] ZHANG Shen, LIN Yu-zhao, LIN He-tong, et al. Lasioidiplodia Pericarp Browning of Harvested Longan Fruit in Association with Membrane Lipids Metabolism[J]. *Food Chemistry*, 2018, 244: 93—101.
- [26] 林毅雄, 林艺芬, 陈莲, 等. 解偶联剂 DNP 处理对采后龙眼果实呼吸作用和细胞膜透性的影响[J]. *中国食品学报*, 2018, 18(2): 191—196.  
LIN Yi-xiong, LIN Yi-fen, CHEN Lian, et al. Effects of Uncoupling Agent DNP on Respiration and Cell Membrane Permeability of Postharvest Longan Fruit[J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2018, 18(2): 191—196.
- [27] LIN Yi-fen, CHEN Meng-yin, LIN He-tong, et al. Phomopsis Longanae-induced Pericarp Browning and Disease Development of Longan Fruit Can be Alleviated or Aggravated by Regulation of ATP Mediated Membrane Lipid Metabolism[J]. *Food Chemistry*, 2018, 269(15): 644—651.
- [28] AKAMINE E K, PREVENTING. The Darkening of Fresh Lychees Prepared for Export[R]. Technical Programme Report, Hawaii, 1960.
- [29] 冯立娟, 尹燕雷, 杨雪梅, 等. 不同石榴品种果皮褐变及其相关酶活性分析[J]. *果树学报*, 2017, 34(3): 354—362.  
FENG Li-juan, YIN Yan-lei, YANG Xue-mei, et al. Analysis of Fruit Skin Browning and Related Enzyme Activities of Different Pomegranate Varieties[J]. *Acta Fruticosa*, 2017, 34(3): 354—362.
- [30] ZHANG Lei, WANG Jun-wei, ZHOU Bing, et al. Calcium Inhibited Peel Browning by Regulating Enzymes in Membrane Metabolism of 'Nanguo' Pears during Post-ripeness after Refrigerated Storage[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 244: 15—21.
- [31] LIN Yi-fen, LIN He-tong, LIN Yi-xiong, et al. The Roles of Metabolism of Membrane Lipids and Phenolics in Hydrogen Peroxide-induced Pericarp Browning of Harvested Longan Fruit[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 111: 53—61.
- [32] GUO B, LIANG Y C, ZHU Y G, et al. Role of Salicylic Acid in Alleviating Oxidative Damage in Rice Roots (*Oryza Sativa*) Subjected to Cadmium Stress[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 147(3): 743—749.
- [33] 林艺芬, 林毅雄, 林河通, 等. “东壁”和“福眼”龙眼果实果皮褐变差异的生理机制[J]. *食品科学*, 2016, 37(20): 221—227.  
LIN Yi-fen, LIN Yi-xiong, LIN He-tong, et al. Physiological Mechanism of the Difference between the Peel Browning of Dongbi and Fuyan Longan Fruits[J]. *Food Science*, 2016, 37(20): 221—227.
- [34] 李政红. 梨果褐变机理研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2016: 2—8.  
LI Zheng-hong. Study on the Browning Mechanism of Pear [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2016: 2—8.
- [35] MA Yu-rong, YANG Meng-nan, WANG Jing-jing, et al. Application of Exogenous Ethylene Inhibits Postharvest Peel Browning of 'Huangguan' Pear[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 2029.
- [36] TOMAS-CALLEJAS A, MARTINEZ-HERMANDEZ G B, ARTES F, et al. Neutral and Acidic Electrolyzed Water as Emergent Sanitizers for Fresh-cut Mizuna Baby Leaves[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2011, 59(3): 298—306.
- [37] 张有林, 张润光. 石榴贮藏果皮褐变机理的研究[J]. *中国农业科学*, 2007(3): 573—581.  
ZHANG You-lin, ZHANG Run-guang. Study on the Browning Mechanism of Fruit Skin of Pomegranate during Storage[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007(3): 573—581.
- [38] 蔡惠. 安梨果实抗褐变机理的研究[D]. 秦皇岛: 河北科技师范学院, 2010: 1—12.  
CAI Hui. Research on Anti-browning Mechanism of Anli Fruit[D]. Qinghuangdao: Hebei Normal University of Science and Technology, 2010: 1—12.
- [39] 高雪. 奉节脐橙果皮褐变生理及相关基因的分离研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006: 5—10.  
GAO Xue. Separation of Physiology and Related Genes of Navel Orange Peel Browning from Fengjie[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006: 5—10.
- [40] JACQUES F, CAJUSTE I, MARNA T, Lafuente. Ethylene Induced Tolerance to Non-chilling Peel Pitting as Related to Phenolic Metabolism and Lignin Content in 'Navelate' Fruit Postharvest[J]. *Biology and Technology*, 2007, 45(2): 193—203.

- [41] 刘震远, 张洁, 贾晓昱, 等. 间歇升温处理对苹果贮藏品质的影响[J]. 包装工程, 2020, 41(3): 7—12.  
LIU Zhen-yuan, ZHANG Jie, JIA Xiao-yu, et al. Effect of Intermittent Heating Treatment on Apple Storage Quality[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(3): 7—12.
- [42] 闫师杰, 梁丽雅, 陈计峦, 等. 降温方法对不同采收期鸭梨采后果心褐变和膜脂组分的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 356—362.  
YAN Shi-jie, LIANG Li-ya, CHEN Ji-luan, et al. Effect of Cooling Method on Core Browning and Membrane Lipid Composition of Pear Harvested at Different Harvesting Stages[J]. Chinese Journal of Agricultural Engineering, 2010, 26(8): 356—362.
- [43] 盛蕾. 基于膜脂代谢的冷藏南果梨果皮褐变分子机制及防褐调控研究[D]. 沈阳农业大学, 2016: 35—43.  
SHENG Lei. Molecular Mechanism and Anti-browning Regulation of Chilled Nanguo Pear Peel Based on Membrane Lipid Metabolism[D]. Shenyang Agricultural University, 2016: 35—43.
- [44] BISWAS P, EAST A R, BRECHT J K. Intermittent Warming during Low Temperature Storage Reduces Tomato Chilling Injury[J]. Postharvest Biology and Technology, 2012, 74: 71—78.
- [45] 王艳颖, 胡文忠, 刘程惠, 等. 间歇升温对采后香蕉李贮藏中酶促褐变的影响[J]. 食品科学, 2010, 31(2): 245—249.  
WANG Yan-ying, HU Wen-zhong, LIU Cheng-hui, et al. Effects of Intermittent Heating on Enzymatic Browning in Postharvest Banana Plum Storage[J]. Food Science, 2010, 31(2): 245—249.
- [46] ZHANG Yu, JIN Peng, HUANG Yu-ping, et al. Effect of Hot Water Combined with Glycine Betaine Alleviates Chilling Injury in Cold Stored Loquat Fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 118: 141—147.
- [47] KINGSLEY A R P, BALASUBRAMANIAM V M, RASTOGI N K. Influence of High Pressure Blanching on Polyphenoloxidase Activity of Peach Fruits and Its Drying Behavior[J]. International Journal of Food Properties, 2009, 12(3): 671—680.
- [48] 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.
- [49] DENOYA G I, VAUDAGNA S R, CHAMORRO V C, et al. Suitability of Different Varieties of Peaches for Producing Minimally Processed Peaches Preserved by High Hydrostatic Pressure and Selection of Process Parameters[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 78: 367—372.
- [50] WEDZICHA B L, BELLION I, GODDARD S J. Inhibition of Browning by Sulfites[J]. Nutritional and Toxicological Consequences of Food Processing, 1991, 289(16): 217—236.
- [51] WANG C Y, CHEN Hang-jun, JIN Peng, et al. Maintaining Quality of Litchi Fruit with Acidified Calcium Sulfate[J]. Journal of Agricultural Food and Chemistry, 2010, 58(15): 8658—8666.
- [52] ALI S, KHAN A S, MALIK A U. Postharvest L-cysteine Application Delayed Pericarp Browning, Suppressed Lipid Peroxidation and Maintained Antioxidative Activities of Litchi Fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 121: 135—142.
- [53] BRUN MERIMÉE S, BILLAUD C, LOUARME L, et al. Effect of Glutathione and Maillard Reaction Products Prepared from Glucose or Fructose with Glutathione on Polyphenoloxidase from Apple-II Kinetic Study and Mechanism of Inhibition[J]. Food Chemistry, 2004, 84(2): 235—241.
- [54] ALI S, KHAN A S, MALIK A U, et al. Pre-storage Methionine Treatment Inhibits Postharvest Enzymatic Browning of Cold Stored "Gola" Litchi Fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 140: 100—106.
- [55] LI Tao-tao, SHI Ding-ding, WU Qi-xian, et al. Sodium Para-aminosalicylate Delays Pericarp Browning of Litchi Fruit by Inhibiting ROS-mediated Senescence during Postharvest Storage[J]. Food Chemistry, 2018, 36(2): 207—215.