

## 鲜切果蔬酚类物质生物合成机制及抗氧化活性研究进展

管玉格<sup>1</sup>, 王怡<sup>2</sup>, 袁宁<sup>2</sup>, 萨仁高娃<sup>3</sup>, 冯可<sup>4</sup>, 胡文忠<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>浙江农林大学食品与健康学院 杭州 311300

<sup>2</sup>大连民族大学生命科学院 辽宁大连 116600

<sup>3</sup>珠海科技学院药学与食品科学学院 广东珠海 519040

<sup>4</sup>澳门科技大学医学院 澳门 999078)

**摘要** 近年来,随着人们生活水平的提高,保健意识的增强以及生活节奏的加快,鲜切果蔬产品因具有“方便、安全、营养、新鲜”的特点而受到广大消费者的青睐。果蔬在鲜切加工过程中,不可避免地受到机械损伤,启动自身的防御体系合成酚类等次生代谢产物。酚类物质的积累不仅可用于抵御和修复机械损伤,还能显著提高鲜切果蔬的抗氧化活性。对果蔬进行鲜切预处理,进而提高鲜切果蔬的抗氧化保健功效,受到采后领域学者的广泛关注。目前基于酚类物质的生物合成机制及抗氧化活性的生理、生化研究,在提高鲜切果蔬营养价值方面取得了重要进展。本文综述鲜切果蔬酚类物质的生物合成机制及其贮藏期间抗氧化活性的变化规律,为研究提高酚类物质含量和抗氧化活性的方法提供新的思路。

**关键词** 鲜切果蔬; 酚类物质; 生物合成机制; 抗氧化活性

**文章编号** 1009-7848(2024)02-0397-10 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.02.036

鲜切果蔬是以新鲜果蔬为原料,经清洗、去皮、切割或切分、修整、包装等加工制成的一种半加工果蔬或预制果蔬<sup>[1]</sup>,具有“即食、即用、既烹”的特点。此外,果蔬经鲜切加工处理后产生的皮渣、果核等下脚料经综合加工再利用,具有减少城市生活垃圾的环保优点。随着人们生活水平的提高,保健意识的增强,鲜切果蔬产品越来越被广大消费者喜爱。然而,鲜切果蔬在加工过程中,受到机械损伤会启动自身的防御体系,合成更多的酚类次生代谢物,以达到抵御机械损伤的目的。早在上世纪 90 年代,Babic 等<sup>[2]</sup>发现胡萝卜经鲜切处理后出现绿原酸积累的现象。近年的研究也发现,鲜切胡萝卜<sup>[3]</sup>、鲜切马铃薯<sup>[4]</sup>、鲜切火龙果<sup>[5]</sup>及鲜切洋葱<sup>[6]</sup>等由于受到切割加工处理的伤害、刺激,同样也诱导了酚类物质短时间的快速合成和积累。酚类物质是果蔬中重要的抗氧化物质之一,它们的积累是提高果蔬抗氧化功效的重要表现。本文综述鲜切果蔬酚类物质的生物合成机制及抗氧化活性研究进展。

### 1 鲜切果蔬酚类物质的生物合成机制

鲜切果蔬在加工过程的生理代谢平衡遭到破坏,此时,组织对机械损伤胁迫产生快速响应,不但会诱发大量的伤信号【如活性氧(ROS)、茉莉酸(JA)、乙烯(ET)、水杨酸(SA)】,激活植物细胞中防御体系关键基因的转录与表达,合成防御酶系统,而且还会启动次生代谢途径合成次级代谢物,增强果蔬机体抵御机械损伤的能力。植物次生代谢物主要包括萜类、含氮化合物和酚类 3 大类物质,其中,酚类物质是果蔬中最重要的次级代谢产物之一,在植物防御机械损伤、抗氧化及抗病毒、细菌和真菌等方面发挥着重要作用<sup>[7]</sup>。

#### 1.1 苯丙烷代谢途径

植物中酚类次生代谢物的合成主要通过苯丙烷代谢途径完成,迄今为止,酚酸、黄酮、黄烷醇、原花色素、木质素、羟基肉桂酸酯等 8 000 多种酚类物质都可通过此途径合成<sup>[8]</sup>。在苯丙烷中心代谢途径中,苯丙氨酸解氨酶(PAL)、肉桂酸 4-羟化酶(C4H)和 4-香豆酸辅酶 A 连接酶(4CL)<sup>[9]</sup>被认为是 3 个关键酶,在苯丙烷类代谢物向类黄酮和木质素等其它不同类型产物转化过程中发挥着决定性作用。类黄酮和木质素的合成则位于苯丙烷代谢的下游途径,其中,查尔酮合成酶(CHS)催化 *p*-香豆素 CoA 合成查尔酮,并引导前体物合成类黄

收稿日期: 2023-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(32202120)

第一作者: 管玉格,女,博士,讲师

E-mail: gyg@zafu.edu.cn

酮<sup>[10]</sup>。羟基肉桂酰基转移酶可通过催化咖啡酰转移到辅酶 A 上,引导代谢物转向木质素的生物合成进程。在木质素的合成途径中,咖啡酸转移酶通过催化咖啡酸和阿魏酸的甲基发生转移,为木质素的合成提供所需的前体物质,随后,这些中间代谢产物在肉桂醇脱氢酶的催化作用下,合成木质素。

苯丙烷代谢途径产生的酚类次生代谢产物不仅在植物生长发育过程中供给营养成分,而且还可以调节和促进植物对机械损伤、低温、干旱、紫外辐射等非生物逆境的抗性<sup>[11]</sup>。干旱胁迫条件下,苦荞的 PAL 活性及次生代谢产物(酚类和类黄酮)含量显著提高。甘蓝型油菜在逆境环境下,通过提升 4CL 活性,引导一般苯丙烷代谢途径向木质素合成途径转化,促进了木质素的合成,提高了木质素积累量,增强了甘蓝型油菜的抗倒伏能力。Li 等<sup>[12]</sup>研究发现,机械损伤诱导了火龙果在贮藏 2 天内的 PAL 活性,加快了酚类物质的生物合成速率,使酚类含量提高了 90%。Guan 等<sup>[12-13]</sup>研究发现,机械损伤通过诱导西兰花中 PAL、C4H 和 4CL 基因的表达,增强这些酶的活性,促进了苯丙烷代谢途径的快速运转,使儿茶素、对羟基苯甲酸、咖啡酸、儿茶素没食子酸、芥子酸、肉桂酸、槲皮素含量分别增加了 1.0、1.4、4.6、3.1、43.4、4.8 倍和 14.2 倍。Zhou 等<sup>[14]</sup>研究表明,机械损伤通过诱导马铃薯中 PAL、C4H、4CL、CHS 酶活性,提高了咖啡酸、对香豆酸、阿魏酸、木质素含量,合成的这些酚类物质不仅可以作为抗体,还可形成绝缘性物质,阻止细胞壁渗透气体和水分,使马铃薯产生稳定的结构性物质,为愈伤进程提供了物质基础,从而加快马铃薯受伤部位的愈合速率,提高马铃薯的抗性。

## 1.2 糖代谢和氨基酸代谢途径

新鲜果蔬在鲜切加工过程中,通过自身的防御体系采取不同的响应策略去应答机械损伤,合成次级代谢物是重要的响应之一,而这种次级代谢的积极调控离不开初级代谢的能量支持和原料供给<sup>[15]</sup>。初级代谢过程中产生的糖、氨基酸、核苷酸、脂类等中间代谢物可为次级代谢途径的顺利进行提供所需的能源和前体物质,因此在调控酚类物质合成途径中发挥着重要的作用。

糖类物质可为植物机体代谢产物的合成提供碳骨架和反应所需的能量,因此,糖类物质被认为是植物抵御机械损伤合成次级代谢物所需的能量基础和原料保障。陈琪<sup>[16]</sup>研究发现长春花在机械损伤胁迫下,蔗糖、麦芽糖、呋喃果糖等多种糖类含量都显著升高,而果糖和葡萄糖等单糖因在抵御机械损伤过程中被大量消耗,其含量显著降低。Li 等<sup>[17]</sup>的研究同样表明,鲜切处理促进了火龙果果糖和葡萄糖的分解,并通过调控氢-ATP 酶、细胞色素 C 氧化酶和琥珀酸脱氢酶活性,提高了 ATP 和 ADP 含量,为酚类物质的合成提供所需的能量,进而加快了酚类物质的合成速率。当植物处于其它逆境条件下,糖代谢进程也会受到影响<sup>[18]</sup>,例如,胡萝卜在金属镉和铅的胁迫环境下糖类含量有很大的波动,银杏叶在干旱和低温环境下可溶性糖的合成速率加快。Zhao 等<sup>[19]</sup>研究表明,香菇在高温胁迫环境下,糖酵解、氨基糖和核苷酸糖、戊糖和葡萄糖醛酸交换等多条与糖代谢相关的通路均发生显著变化。另有研究指出,植物的不同部位受到机械损伤后,其糖代谢途径的变化存在差异。当长春花的上位叶受损后,与糖代谢相关的 2 个代谢通路包括果糖和甘露糖代谢、半乳糖代谢被机械损伤显著诱导,加速了糖代谢速率;而下位叶通过诱导半乳糖代谢、氨基糖和核苷酸糖代谢抵御机械损伤;当其根部受到机械损伤后的糖类代谢物含量显著高于叶受损处理组<sup>[16]</sup>。以上研究表明,机械损伤对糖代谢的诱导和调控具有普遍性,又具有特异性,它与果蔬生物学特性、逆境环境、损伤部位及贮藏环境等密切相关。

糖类物质通过糖酵解和磷酸戊糖代谢,氧化分解成赤藓糖-4-磷酸和磷酸烯醇式丙酮酸,随后在 3-脱氧-2 阿拉伯庚酮糖-7-磷酸(DAHP)合成酶的催化作用下合成 DAHP,进入氨基酸合成途径生成苯丙氨酸。苯丙氨酸作为苯丙烷代谢的起始底物,进入苯丙烷代谢参与酚类物质的合成。Han 等<sup>[19]</sup>研究表明,机械损伤诱导了胡萝卜中苯丙氨酸含量的积累,提高了酚酸、花青素、黄酮和异黄酮等酚类代谢产物,使鲜切胡萝卜的总酚含量提高至 5.2 倍。Devoto 等<sup>[20]</sup>研究表明,机械损伤通过诱导 DAHP 基因的上调,加快了拟南芥中糖类物质向氨基酸转化的速率,提高了酚类物质的积

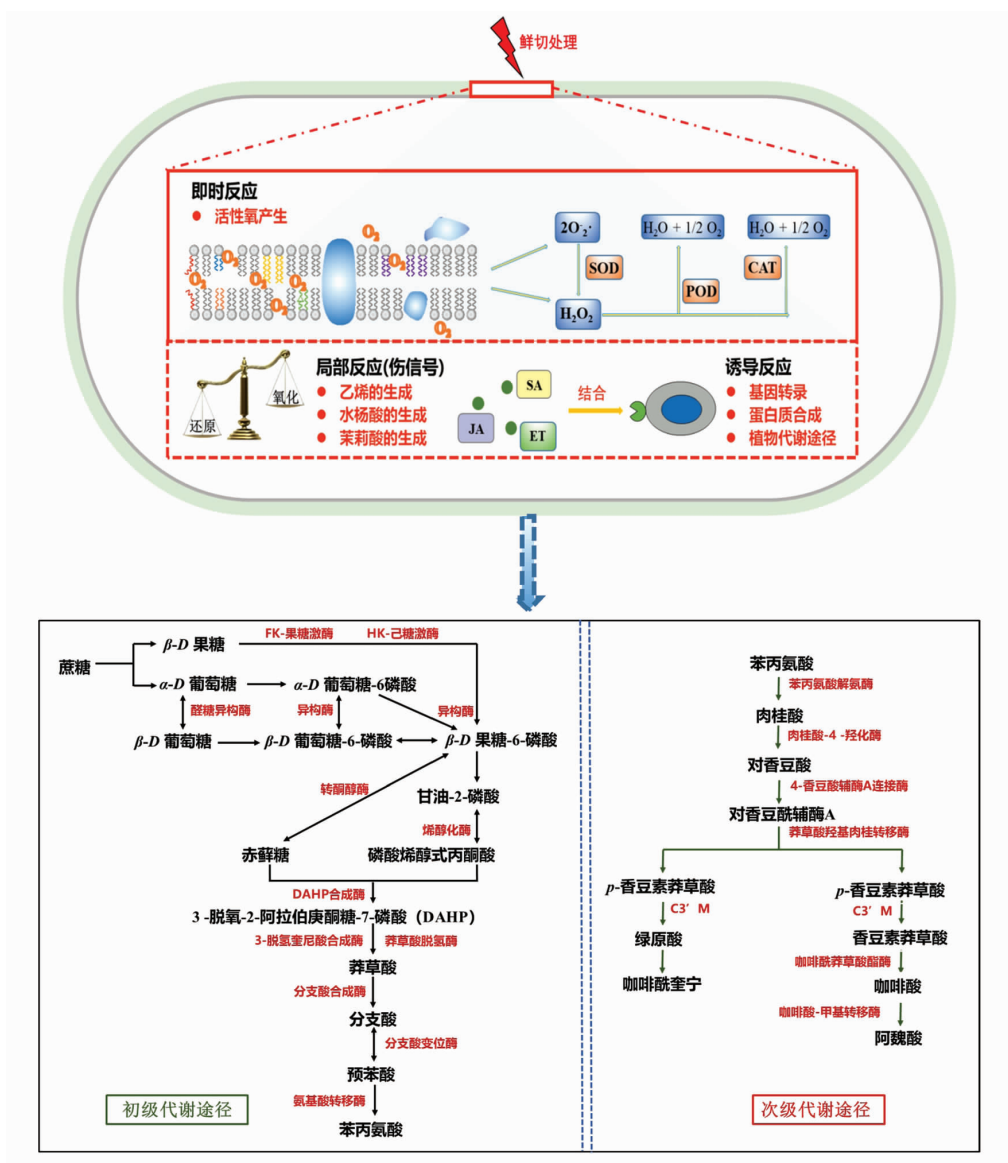


图 1 鲜切果蔬酚类物质生物合成机制

Fig.1 Biosynthetic mechanism of phenolic substances of fresh-cut fruits and vegetables

累量, 增强了拟南芥对致病性丁香假单胞菌菌株的抵抗力。另外 Han 等<sup>[19]</sup>研究发现, 机械损伤通过诱导鲜切胡萝卜中果糖激酶、己糖激酶、烯醇酶、莽草酸激酶、分支酸合酶和分支酸变位酶基因的上调表达, 加快了糖类物质的分解速率, 为酚类物质的合成提供有利条件。研究者为了进一步揭示糖类物质对鲜切产品酚类物质合成的影响, 采用外源果糖和葡萄糖处理鲜切胡萝卜, 结果发现, 外源糖类物质处理能有效提高酚类物质的合成速率, 这些结果表明, 糖代谢对酚类物质的合成具有直接的调控作用, 同时也说明鲜切果蔬中糖类物

质的消耗与酚类物质的合成有密切关系。Torres-Contreras 等<sup>[21]</sup>采用转录组学方法研究西兰花对机械损伤的响应机制, 结果发现, 机械损伤处理后西兰花中参与 TCA 循环、磷酸戊糖途径及糖酵解等糖代谢相关途径的 38 个基因表现为显著上、下调。同时, 机械损伤诱导了西兰花中分支酸变位酶和预苯酸脱水酶基因的上调表达, 加快了糖代谢中产物向氨基酸代谢方向的进行。

以上的研究表明机械损伤可通过诱导糖代谢、氨基酸代谢等多条初级代谢途径的关键基因及蛋白的表达, 进一步调控次级代谢进程, 提高合

成酚类物质的速率,这也说明初级代谢和次级代谢二者之间存在复杂的相互调控作用<sup>[22-23]</sup>。基于已有的研究,本论文总结了鲜切果蔬酚类物质的生物合成机制如图1所示:新鲜果蔬经鲜切处理后,损伤组织与空气中的O<sub>2</sub>接触,会瞬时触发ROS的产生,并启动JA、ET和SA等信号分子的快速合成,进而将伤信号扩大并传递至未受伤的部位,诱导基因的转录及蛋白质的合成,从而加快了糖类物质的快速分解及莽草酸、苯丙氨酸的生成,为酚类次级代谢物的合成提供碳骨架和能量;同时,信号分子通过调控苯丙烷代谢途径中PAL、ACL和CH等基因及蛋白的表达,最终加快了酚类物质的生物合成。

## 2 鲜切果蔬酚类物质含量的变化

机械损伤会对鲜切果蔬的酚类代谢产生两方面的影响。一方面,机械损伤会造成细胞生物膜的破裂,使受伤部位组织暴露在空气中,在O<sub>2</sub>存在的前提下,多酚氧化酶(PPO)催化果蔬中原有的酚类物质发生氧化,生成具有杀菌功能的醌类物质;另一方面,机械损伤会激活鲜切果蔬苯丙烷代谢途径,生成不同种类的酚类物质,增强抵御氧化胁迫的能力。在以鲜切胡萝卜<sup>[24]</sup>、洋葱<sup>[25]</sup>、马铃薯、火龙果、生菜等多种果蔬为试验材料的研究中发现,机械损伤会诱导这些果蔬中酚类物质的合成(表1)。然而,机械损伤对果蔬中酚类物质的合成积累还与果蔬种类、切分方式及贮藏环境等诸多因素的影响。

### 2.1 果蔬的种类

Reyes等<sup>[6]</sup>研究了10种常见鲜切蔬菜在15℃条件下贮藏2d内的酚类物质含量的变化,发现鲜切西葫芦和鲜切马铃薯的总酚含量有所下降,鲜切白球甘蓝的总酚含量未有显著变化,而鲜切生菜、芹菜、胡萝卜、白萝卜和甘薯的总酚含量有所上升。同时,Chen等<sup>[26]</sup>和Oms-oliu等<sup>[27]</sup>的研究也发现鲜切洋葱和鲜切梨果实中的酚类物质含量呈现出相反的变化趋势。Shen等<sup>[28]</sup>研究发现,鲜切蜜桔在贮藏期间香豆酸和咖啡酸含量有显著上升趋势,而芥子酸和阿魏酸含量没有明显变化。这说明同一种果蔬在鲜切处理后的不同单体酚类的含量变化也存在着差异。此外,Yamdeu等<sup>[29]</sup>研究了11

个品种的马铃薯经鲜切处理后在贮藏期间酚类物质含量的变化,结果发现,不同品种的鲜切马铃薯酚类物质含量虽存在差异,但几种酚类物质含量的变化具有相似的趋势,其中芥子酸、咖啡酸、绿原酸、鞣花酸、原儿茶酸、没食子酸、阿魏酸含量均随着贮藏时间的增加而增加,而对香豆酸含量呈现下降趋势。以鲜切洋葱为试验材料发现,在贮藏期间,其香豆酸、香草酸、阿魏酸、咖啡酸含量显著增加,结合鲜切马铃薯在贮藏期间各种酚类物质的动态变化,说明不同种类的鲜切果蔬酚类物质含量的变化存在显著差异。

### 2.2 切分方式

在食品加工工业生产和家庭烹饪过程中,通常会涉及到不同的切分方式,不同切分方式会伴随着不同的损伤强度,Bernadeth课题组定义了损伤强度为新鲜果蔬经切割处理后新形成的伤口面积(cm<sup>2</sup>)与果蔬质量(g)的比值(A/W)。该课题组将胡萝卜切成片(4.2 cm<sup>2</sup>/g)、丁(6.0 cm<sup>2</sup>/g)、丝(23.5 cm<sup>2</sup>/g)3种形式,研究了不同损伤强度对胡萝卜酚类物质合成的影响,结果发现切丝的胡萝卜中绿原酸、二咖啡酰奎宁酸和阿魏酸等多种酚类物质含量最高,丁状胡萝卜次之,片状最小。类似的研究结果在鲜切火龙果<sup>[9]</sup>中也有报道,即不同切分方式处理后的火龙果酚类物质含量提升幅度显著不同,其中,切片提高63%,半片提高78%,4等分片提高90%。高梵等<sup>[30]</sup>研究了损伤强度对红心萝卜总酚含量的影响,其酚类物质变化规律与鲜切胡萝卜和火龙果的结果类似,即损伤强度越大,红心萝卜的总酚含量积累量越高。然而,损伤强度对不同果蔬酚类物质含量的影响并不完全一致,如高损伤强度的鲜切处理利于提升西兰花中的5-O-咖啡酰奎尼酸和咖啡酸含量,而低损伤强度的处理更利于提升西兰花中的3-O-咖啡酰奎尼酸含量<sup>[31]</sup>。Torres-Contreras等<sup>[4]</sup>发现片状和丁状马铃薯总酚含量比鲜切处理前马铃薯分别高出100%和65%;而丝状马铃薯总酚含量却始终低于未经切分处理的马铃薯。Artes等<sup>[32]</sup>在鲜切柠檬上的研究也发现了类似的结果,即总酚积累量最高的现象并不是出现在损伤强度最大的1/4片状柠檬中,而是出现在中损伤强度的1/2片状柠檬中。

### 2.3 贮藏温度

韩聪<sup>[33]</sup>研究了多种蔬菜在 4 ℃和 20 ℃条件下贮藏期间总酚含量的变化,结果表明,鲜切洋葱于 20 ℃条件下的总酚含量比对照组高出 2.2 倍,显著高于 4 ℃贮藏的总酚含量;20 ℃贮藏 2 d 时,鲜切胡萝卜的总酚含量提高至 4.5 倍,而在 4 ℃条件下其酚类物质最高提高至 2.0 倍,说明贮藏温度越高越有利于鲜切胡萝卜总酚含量的增加;鲜切大葱的总酚含量在 20 ℃贮藏前 5 d 一直上升,而在 4 ℃贮藏的前 3 d 有小幅上升,随后呈不断下降趋势,这说明提高温度虽能显著提高鲜切大葱的总酚含量,但同时也加速了大葱风味和营养的流失,缩短了鲜切产品的货架期。类似的结论在鲜切香菜<sup>[34]</sup>中也有报道,低温贮藏有利于维持鲜切果蔬的食用品质,较高温贮藏在一定程度上有利于酚类物质的合成积累和抗氧化活性的提高。以琵琶果实为对象的研究发现<sup>[35]</sup>,低温预贮藏诱导了琵琶中酚类物质的积累,增强了琵琶果实的抗氧化能力,有效保持了果实的品质,有效抵御了冷害现象的发生。在芒果<sup>[36]</sup>、桃<sup>[37]</sup>中的研究也证实了通过这种低温调控的方法可有效抑制酚类物质和抗坏血酸等抗氧化物质含量的下降。因此,贮藏温度对鲜切果蔬酚类代谢的调控,还与果蔬自身的生物学特性有关,并不能通过单一控制温度来衡量鲜切果蔬的酚类物质,而是要通过研究温度对鲜切果蔬品质的影响,来确定在保持鲜切产品酚类物质的同时,保证其食用品质的最佳贮藏温度。

## 3 鲜切果蔬抗氧化活性的变化

健康和营养学调查显示:膳食结构中水果和蔬菜所占比例较大的人群,患心脑血管疾病、精神障碍以及各种癌症的发生风险几率较低<sup>[38]</sup>。这主要是因为新鲜果蔬是酚类物质和维生素等抗氧化物质的优良来源,从摄入这些食物资源而获得的抗氧化物质可以清除人体内过量的自由基增加机体抵御氧化损伤和癌症、心血管等疾病的发生<sup>[38]</sup>,其中,酚类物质被认为是果蔬抗氧化能力的主要贡献者<sup>[39]</sup>。如表 1 所示,机械损伤诱导了鲜切胡萝卜、马铃薯、火龙果、西葫芦、杏鲍菇、大葱、生菜、芹菜、甘薯、香菇<sup>[40]</sup>、芒果<sup>[41]</sup>、洋葱<sup>[42]</sup>、莴苣<sup>[43]</sup>、菠萝<sup>[44]</sup>、紫甘蓝<sup>[45]</sup>、草莓<sup>[46]</sup>和西兰花<sup>[47]</sup>中酚类物质的合

成,使酚类物质的积累量提高了 1.1~5.2 倍,显著提高了鲜切产品的抗氧化能力。其中,以胡萝卜为试验材料的研究结果表明,鲜切处理可通过诱导苯丙烷代谢进程中的 PAL 基因和蛋白的上调,加快了酚类物质的合成速率,使酚类物质积累量提高至 5.2 倍,抗氧化能力增加 5.5 倍。类似的研究结果在鲜切西兰花中也有报道,机械损伤通过提高鲜切西兰花酚类物质的积累量,提高了机体清除活性氧的能力,使 DPPH·、ABTS·<sup>+</sup>和 O<sub>2</sub><sup>-</sup>清除能力提高了 36.5%~157.0%。

为了解析鲜切果蔬酚类物质对细胞抗氧化的功效,Guan 等<sup>[12]</sup>以人乳腺癌 MCF-7 细胞为载体的抗氧化活性研究结果表明,鲜切处理诱导果蔬合成的酚类物质抑制了 MCF-7 细胞中还原型二氯荧光素氧化为氧化型二氯荧光素的速率,降低了细胞内的氧化损伤程度,显著提高了果蔬清除人病变细胞活性氧的能力,使细胞抗氧化能力值增加了 52.7%~86.5%,细胞抗氧化活性的 EC<sub>50</sub> 值降低了 33.6%~51.2%,反映在试验结果中即为荧光强度值的减少。由于酚类物质种类繁多,研究者进一步研究了不同种类的单体酚类物质对细胞抗氧化活性的影响,结果发现,细胞抗氧化能力的大小为:槲皮素>儿茶素没食子酸>绿原酸>咖啡酸>芥子酸>儿茶素>羟基苯甲酸>肉桂酸,而芦丁对 MCF-7 细胞未显示出抗氧化活性<sup>[48]</sup>。因此,鲜切处理主要是通过诱导合成更多的槲皮素和绿原酸,增强了鲜切西兰花的细胞抗氧化活性。

此外,以鲜切胡萝卜、火龙果、洋葱、苹果为实验材料的研究结果表明,过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)等抗氧化酶和果蔬抗氧化能力之间具有正相关关系。这表明,果蔬在鲜切加工过程中,除了合成的酚类次级代谢产物会影响鲜切产品的抗氧化活性外,果蔬还会启动自身清除 ROS 的系统,这一响应机制在调控鲜切产品的抗氧化活性中也发挥着重要的作用。然而,以青椒和黄瓜为材料的研究发现,鲜切处理使其总酚含量分别提高了 5.5%和 89.3%,抗氧化能力却未呈现出升高的现象<sup>[34]</sup>。造成这一结果的原因可能是,鲜切处理提高了果蔬组织中多酚氧化酶活性,加快了酚类物质的氧化速率,使果蔬中积累的酚类物质主要参与氧化进程,而未发

挥增加抗氧化能力的功能<sup>[49]</sup>。另一方面是由于鲜切处理增加了果蔬细胞汁液的外渗,使空气中的氧气更容易进入到果蔬组织中,引起植物机体自由基的不断积累,造成细胞膜的破坏,从而加快了膜脂过氧化进程<sup>[50]</sup>。然而,由于机械损伤引起的膜脂过氧化现象,是导致鲜切产品抗氧化能力降低

的重要原因,因此,通过减缓膜脂过氧化程度,是提高果蔬机体抗氧化能力的有效途径之一<sup>[51]</sup>。由上可知,鲜切处理对果蔬抗氧化能力的影响不仅来自于酚类物质的合成和积累,而是由防御系统的多种关键蛋白、基因、代谢物共同调控的结果。

表1 新鲜果蔬和鲜切果蔬的总酚含量和抗氧化能力

Table 1 Total phenols content and antioxidant activity of fresh and fresh-cut fruits and vegetables

果蔬种类	总酚含量/mg·(100 g) <sup>-1</sup> 鲜重	鲜切后总酚含量/mg·(100 g) <sup>-1</sup> 鲜重	总酚含量增加倍数	抗氧化能力增加倍数	参考文献
胡萝卜	48.1	250.3	5.2	5.5	[24]
马铃薯	50.2	95.5	1.9	1.5	[4]
火龙果	602.4	1 250.2	2.1	1.8	[5]
香菇	100.9	114.2	1.1	1.6	[40]
芒果	50.2	58.9	1.2	1.5	[41]
洋葱	298.4	451.9	1.5	2.0	[42]
西葫芦	9.2	12.1	1.3	1.5	[33]
杏鲍菇	30.3	41.5	1.4	1.7	[33]
大葱	35.2	50.5	1.4	1.8	[33]
生菜	20.1	29.8	1.5	1.1	[6]
芹菜	23.8	26.7	1.1	4.4	[6]
甘薯	90.5	110.2	1.2	1.1	[6]
莴苣	4.1	6.2	1.5	1.5	[43]
菠萝	20.1	29.6	1.5	1.6	[44]
紫甘蓝	22.0	27.2	1.2	1.4	[45]
草莓	52.1	62.5	1.2	1.1	[46]
西兰花	43.3	65.9	1.5	1.6	[47]

#### 4 结语

鲜切果蔬酚类物质的生物合成不仅取决于苯丙烷代谢途径,还和糖代谢、氨基酸代谢及信号分子的调控有着复杂的内在联系,未来的研究可利用磷酸化定量蛋白组学、转录组学及代谢组学等现代生物学技术探究酚类物质合成过程中的关键基因、蛋白及中间代谢产物,并进一步探究各代谢通路之间的相互作用关系,为深入解析鲜切果蔬酚类物质生物合成机制提供理论基础,并为提高鲜切产品潜在的营养价值提供新的思路。目前,鲜切处理诱导果蔬合成的酚类物质可增强机体自身的化学抗氧化活性已经被证实,然而,其对人体细胞的抗氧化功效会有哪些影响还鲜有报道,尤其是其对细胞发挥抗氧化的作用机制尚不明晰,未来的研究可通过细胞模型,分析细胞内抗氧化酶活性、抗氧化物质含量及抗氧化应激反应关键蛋

白的含量,进一步揭示鲜切处理诱导合成的酚类物质对细胞抗氧化活性的调控机制。此外,可以动物为实验载体,探究其对体内抗氧化活性的影响及作用机制,为阐明鲜切果蔬作为预加工产品产生具有抗氧化活性和药物功效的酚类物质奠定理论基础。

#### 参 考 文 献

- [1] 胡文忠. 鲜切果蔬科学与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 2-70.  
HU W Z. Science and technology of fresh-cut fruits and vegetables[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009: 2-70.
- [2] BABIC I, AMIOT M J, NGUYEN-THE C, et al. Changes in phenolic content in fresh ready-to-use shredded carrots during storage[J]. Journal of Food

- Science, 1993, 58: 351–356.
- [3] CISNEROS –ZEVALLOS L. The use of controlled postharvest abiotic stresses as a tool for enhancing the nutraceutical content and adding-value of fresh fruits and vegetables[J]. Journal of Food Science, 2003, 68(5): 1560–1565.
- [4] TORRES –CONTRERAS A M, NAIR V, CISNEROS–ZEVALLOS L, et al. Plants as biofactories: Stress-induced production of chlorogenic acid isomers in potato tubers as affected by wounding intensity and storage time[J]. Industrial Crops and Products, 2014, 62: 61–66.
- [5] LI X A, LONG Q H, GAO F, et al. Effect of cutting styles on quality and antioxidant activity in fresh-cut pitaya fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2017, 124: 1–7.
- [6] REYES L F, VILLARREAL J E, CISNEROS –ZEVALLOS L. The increase in antioxidant capacity after wounding depends on the type of fruit or vegetable tissue[J]. Food Chemistry, 2007, 101(3): 1254–1262.
- [7] CISNEROS –ZEVALLOS L, JACOBO –VELAZQUEZ D A. Controlled abiotic stresses revisited: From homeostasis through hormesis to extreme stresses and the impact on nutraceuticals and quality during pre- and postharvest applications in horticultural crops[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(43): 11877–11879.
- [8] ZHANG X, LIU C J. Multifaceted regulations of gateway enzyme phenylalanine ammonia-lyase in the biosynthesis of phenylpropanoids[J]. Molecular Plant, 2015, 8(1): 17–27.
- [9] DONG N Q, LIN H X. Contribution of phenylpropanoid metabolism to plant development and plant-environment interactions[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2021, 63(1): 180–209.
- [10] APPELHAGEN I, THIEDIG K, NORDHOLT N, et al. Update on transparent testa mutants from *Arabidopsis thaliana*: Characterisation of new alleles from an isogenic collection[J]. Planta, 2014, 240(5): 955–970.
- [11] DU W X, AVENA –BUSTILLOS R J, BREKSA A P, et al. Effect of UV-B light and different cutting styles on antioxidant enhancement of commercial fresh-cut carrot products[J]. Food Chemistry, 2012, 134(4): 1862–1869.
- [12] GUAN Y G, HU W Z, JIANG A L, et al. The effect of cutting style on the biosynthesis of phenolics and cellular antioxidant capacity in wounded broccoli[J]. Food Research International, 2020, 137: 109565.
- [13] GUAN Y G, HU W Z, JIANG A L, et al. Effect of methyl jasmonate on phenolic accumulation in wounded broccoli[J]. Molecules, 2019, 24(19): 3537.
- [14] ZHOU F H, JIANG A L, FENG K, et al. Effect of methyl jasmonate on wound healing and resistance in fresh-cut potato cubes[J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 157: 110958.
- [15] ZHAO X, YANG H L, CHEN M J, et al. Reference gene selection for quantitative real-time PCR of mycelia from *Lentinula edodes* under high-temperature stress[J]. BioMed Research International, 2018, 2018: 1–10.
- [16] 陈琪. 应用代谢组学研究长春花响应机械损伤的代谢基础[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2018.
- CHEN Q. The metabolic profiles of *Catharanthus roseus* in response to mechanical wound based on metabonomics strategies[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2018.
- [17] LI X A, LI M L, WANG L, et al. Methyl jasmonate primes defense responses against wounding stress and enhances phenolic accumulation in fresh-cut pitaya fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 145: 101–107.
- [18] WANG Y, XU L, SHEN H, et al. Metabolomic analysis with GC-MS to reveal potential metabolites and biological pathways involved in Pb and Cd stress response of radish roots[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 18296.
- [19] HAN C, LI J, JIN P, et al. The effect of temperature on phenolic content in wounded carrots[J]. Food Chemistry, 2017, 215: 116–123.
- [20] DEVOTO A, ELLIS C, MAGUSIN A, et al. Expression profiling reveals COI1 to be a key regulator of genes involved in wound- and methyl jasmonate-induced secondary metabolism, defence, and hormone interactions[J]. Plant Molecular Biology, 2005, 58(4): 497–513.
- [21] TORRES –CONTRERAS A M, SENES –GUERRERO C, PACHECO A, et al. Genes differentially expressed in broccoli as an early and late response to wounding stress[J]. Postharvest Biology and Technol-

- ogy, 2018, 145: 172–182.
- [22] HU W Z, GUAN Y G, JI Y R, et al. Effect of cutting styles on quality, antioxidant activity, membrane lipid peroxidation, and browning in fresh-cut potatoes[J]. Food Bioscience, 2021, 44: 101435.
- [23] GUAN Y G, HU W Z, XU Y P, et al. Proteomic analysis validates previous findings on wounding-responsive plant hormone signaling and primary metabolism contributing to the biosynthesis of secondary metabolites based on metabolomic analysis in harvested broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*) [J]. Food Research International, 2021, 145: 110388.
- [24] GUAN Y G, HU W Z, XU Y P, et al. Metabolomics and physiological analyses validates previous findings on the mechanism of response to wounding stress of different intensities in broccoli[J]. Food Research International, 2020, 140: 110058.
- [25] BERNO N D, TEZOTTO-ULIANA J V, TADEU D, et al. Storage temperature and type of cut affect the biochemical and physiological characteristics of fresh-cut purple onions[J]. Postharvest Biology and Technology, 2014, 93: 91–96.
- [26] CHEN C, HU W Z, ZHANG R D, et al. Levels of phenolic compounds, antioxidant capacity, and microbial counts of fresh-cut onions after treatment with a combination of nisin and citric acid[J]. Horticulture Environment and Biotechnology, 2016, 57(3): 266–273.
- [27] OMS-OLIU G, SOLIVA-FORTUNY R, MARTIN-BELLOSO O. Edible coatings with antibrowning agents to maintain sensory quality and antioxidant properties of fresh-cut pears[J]. Postharvest Biology and Technology, 2008, 50(1): 87–94.
- [28] SHEN Y, SUN Y J, QIAO L P, et al. Effect of UV-C treatments on phenolic compounds and antioxidant capacity of minimally processed Satsuma mandarin during refrigerated storage [J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 76: 50–57.
- [29] YAMDEU GALANI J H, MANKAD P M, SHAH A K, et al. Effect of storage temperature on vitamin C, total phenolics, UPLC phenolic acid profile and antioxidant capacity of eleven potato (*Solanum tuberosum*) varieties[J]. Horticultural Plant Journal, 2017, 3(2): 73–89.
- [30] 高梵, 李晓安, 韩聪, 等. 不同切割损伤强度对红心萝卜抗氧化活性的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(7): 97–103.
- [31] GAO F, LI X A, HAN C, et al. Effect of fresh-cut treatments at different wounding intensities on antioxidant properties of postharvest red-fleshed radish[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2015, 6(7): 97–103.
- [32] MARIEL T, VIMAL N, LUIS C Z, et al. Stability of bioactive compounds in broccoli as affected by cutting styles and storage time[J]. Molecules, 2017, 22(4): 636.
- [33] ARTES F, GOMEZ P A, ARTES-HERNANDEZ F J F S, et al. Physical, physiological and microbial deterioration of minimally fresh processed fruits and vegetables[J]. Food Science Technology International, 2007, 13(3): 177–188.
- [34] 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.
- [35] HAN C. Biosynthesis and accumulation of phenolic compounds in fresh-cut carrot and its possible regulatory mechanisms[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017.
- [36] 韩聪, 李晓安, 高梵, 等. 贮藏温度对鲜切香菜营养成分和抗氧化活性的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(7): 2496–2501.
- [37] HAN C, LI X A, GAO F, et al. Effects of storage temperature on nutritional compositions and antioxidant activity of fresh-cut coriander [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2015, 6(7): 2496–2501.
- [38] CAI C, XU C J, SHAN L L, et al. Low temperature conditioning reduces postharvest chilling injury in loquat fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2006, 41(3): 252–259.
- [39] 赵志磊, 顾玉红, 赵玉梅, 等. 冷激处理对芒果贮藏冷害及相关酶的影响[J]. 河北农业大学学报, 2007, 30(4): 27–30.
- [40] ZHAO Z L, GU Y H, ZHAO Y M, et al. Effect of cold shock treatment on chilling injury and enzyme in mango fruit (*Mangifera indica* L.) [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2007, 30(4): 27–30.
- [41] JIN P, WANG K T, SHANG H T, et al. Low-temperature conditioning combined with methyl jasmonate treatment reduces chilling injury of peach fruit[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2009, 89(10): 1690–1696.
- [42] STANNER S A, HUGHES J, KELLY C N, et al.



- A review of the epidemiological evidence for the 'antioxidant hypothesis'[J]. *Public Health Nutrition*, 2004, 7(3): 407-422.
- [39] HAMINIUK C, MACIEL G M, PLATA-OVIEDO M, et al. Phenolic compounds in fruits—an overview [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2012, 47(10): 2023-2044.
- [40] OMS-OLIU G, AGUILO-AGUAYO I, MARTIN-BELLOSO O, et al. Effects of pulsed light treatments on quality and antioxidant properties of fresh-cut mushrooms (*Agaricus bisporus*) [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2010, 56(3): 216-222.
- [41] ROBLES-SÁNCHEZ R M, ROJAS-GRAÜ M A, ODRIOZOLA-SERRANO I, et al. Influence of alginate-based edible coating as carrier of antibrowning agents on bioactive compounds and antioxidant activity in fresh-cut Kent mangoes [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2013, 50(1): 240-246.
- [42] HAN C, JI Y, LI M L, et al. Influence of wounding intensity and storage temperature on quality and antioxidant activity of fresh-cut welsh onions [J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 212: 203-209.
- [43] 李静, 季悦, 李美琳, 等. 切割方式对鲜切莴苣品质及抗氧化活性的影响 [J]. *食品科学*, 2018, 39(3): 275-280.
- LI J, JI Y, LI M L, et al. Effect of cutting styles on quality and antioxidant activity of fresh-cut lettuce [J]. *Food Science*, 2018, 39(3): 275-280.
- [44] 季悦, 李静, 王雷, 等. 茉莉酸甲酯处理对鲜切菠萝品质及抗氧化活性的影响 [J]. *食品科学*, 2018, 39(1): 258-263.
- JI Y, LI J, WANG L, et al. Effect of methyl jasmonate treatment on quality and antioxidant activity of fresh-cut pineapples [J]. *Food Science*, 2018, 39(1): 258-263.
- [45] 姜爱丽, 胡文忠, 张维娜, 等. 异硫氰酸烯丙酯处理对鲜切紫甘蓝生理代谢的影响 [J]. *食品科学*, 2018, 39(3): 252-258.
- JIANG A L, HU W Z, ZHANG W N, et al. Effect of allyl isothiocyanate treatment on physiological metabolism of fresh-cut purple cabbage [J]. *Food Science*, 2018, 39(3): 252-258.
- [46] LI M, LI X, LI J, et al. Responses of fresh-cut strawberries to ethanol vapor pretreatment: Improved quality maintenance and associated antioxidant metabolism in gene expression and enzyme activity levels [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(31): 8382-8390.
- [47] GUAN Y G, HU W Z, JIANG A L, et al. Influence of cut types on quality, antioxidant substances and antioxidant activity of fresh cut broccoli [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2020, 55(8): 3019-3030.
- [48] WOLFE K L, LIU R H. Structure-activity relationships of flavonoids in the cellular antioxidant activity assay [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(18): 8404-8411.
- [49] CHEN C, HU W Z, HE Y B, et al. Effect of citric acid combined with UV-C on the quality of fresh-cut apples [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 115: 126-131.
- [50] COELHO-JUNIOR L F, FERREIRA-SILVA S L, VIEIRA M R, et al. Darkening, damage and oxidative protection are stimulated in tissues closer to the yam cut, attenuated or not by the environment [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99: 334-342.
- [51] 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.

### Biosynthetic Mechanism of Phenolic Substances and Their Antioxidant Activity in Fresh-cut Fruits and Vegetables: A Review

Guan Yuge<sup>1</sup>, Wang Yi<sup>2</sup>, Yuan Ning<sup>2</sup>, Sarengaowa<sup>3</sup>, Feng Ke<sup>4</sup>, Hu Wenzhong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Food and Health, Zhejiang Agricultural and Forestry University, Hangzhou 311300

<sup>2</sup>College of Life Science, Dalian Minzu University, Dalian 116600, Liaoning

<sup>3</sup>School of Pharmacy and Food Science, Zhuhai College of Science and Technology, Zhuhai 519040, Guangdong

<sup>4</sup>Faculty of Medicine, Macau University of Science and Technology, Macau 999078)

**Abstract** In recent years, with the improvement of people's living standards, the enhancement of health awareness and the acceleration of the pace of life, fresh-cut fruits and vegetables are increasingly favored by consumers due to its characteristics of convenient, safe, nutritious and fresh. However, cutting causes fruit and vegetable suffer irreparable mechanical damage, which may active its own defense system to synthesize phenolic substance secondary metabolites in order to resist and repair mechanical damage and enhance the antioxidant activity of fresh-cut fruits and vegetables. The pretreatment fresh-cutting operation improved the antioxidant and health benefits of fruits and vegetables has received widespread attention from postharvest scholars. In particular, it has the important progress on improving the potential nutritional value of fresh-cut fruits and vegetables based on physiological and biochemical studies on the biosynthesis mechanism of phenolic substances. Collectively, this paper reviewed the biosynthetic mechanism of phenolic substances and their antioxidant activity in fresh-cut fruits and vegetables, which aimed to provide a theoretical basis for elucidating that fresh-cut fruits and vegetables, as pre-processed products, produced more phenols and further improved the antioxidant activity of fresh fruits and vegetables. Meanwhile, this paper will provide new insights into the method that can effectively improve the phenolic substances content and antioxidant activity in fresh-cut fruits and vegetables.

**Keywords** fresh-cut fruits and vegetables; phenolic substance; biosynthetic mechanism; antioxidant activity