

果蔬机械损伤的生理及分子机制研究进展

王敏^{1,2}, 关博洋², 殷菲胧¹, 刘云芬¹, 廖玲燕¹, 潘中田¹, 帅良^{1*}

(1. 贺州学院 食品与生物工程学院/食品科学与工程技术研究院, 广西 贺州 542899;

2. 大连工业大学 食品学院, 辽宁 大连 116034)

摘要: 机械损伤是造成果蔬腐烂变质的重要原因, 解决果蔬机械损伤问题能有效延长果蔬的储藏货架期, 提高果蔬的商品价值。该文综述果蔬在采摘、运输、贮藏和销售过程中产生机械损伤的类型、机械损伤对果蔬生理特性和品质的影响, 以及机械损伤激活信号分子进行防御反应和基因表达调控的分子机制, 为减少果蔬机械损伤提出有效的防控措施奠定理论基础。

关键词: 果蔬; 机械损伤; 生理生化; 分子机制; 储藏和保鲜

Advances in Research on Physiological and Molecular Mechanisms of Mechanical Damage of Fruits and Vegetables

WANG Min^{1,2}, GUAN Bo-yang², YIN Fei-long¹, LIU Yun-fen¹,

LIAO Ling-yan¹, PAN Zhong-tian¹, SHUAI Liang^{1*}

(1. Food and Biological Engineering/Institute of Food Science and Engineering Technology, Hezhou University, Hezhou 542899, Guangxi, China; 2. College of Food Engineering, Dalian Polytechnic University, Liaoning 116034, Dalian, China)

Abstract: Mechanical damage is an important cause of decay and deterioration of fruits and vegetables. Solving the problem of mechanical damage of fruits and vegetables can effectively extend the shelf life of fruits and vegetables and increase the commodity value of fruits and vegetables. This article reviews the types of mechanical damage caused by fruits and vegetables in the process of picking, transportation, storage and sales, the impact of mechanical damage on the physiological characteristics and quality of fruits and vegetables, and the molecular mechanism of mechanical damage activating signal molecules for defense response and gene expression regulation, in order to reduce Effective prevention and control measures are put forward to lay the foundation for mechanical damage of fruits and vegetables.

Key words: fruits and vegetables; mechanical damage; physiology and biochemistry; molecular mechanism; storage and preservation

引文格式:

王敏, 关博洋, 殷菲胧, 等. 果蔬机械损伤的生理及分子机制研究进展[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(9): 205-211.

WANG Min, GUAN Boyang, YIN Feilong, et al. Advances in Research on Physiological and Molecular Mechanisms of Mechanical Damage of Fruits and Vegetables[J]. Food Research and Development, 2022, 43(9): 205-211.

我国水果和蔬菜等农产品资源丰富, 产量位居世界首位, 果蔬出口量占亚洲总出口量的 70% 以上, 其

中仅出口日本的果蔬总额每年达到 3 亿多美元^[1]。随着“一带一路”建设的发展, 2018 年我国与沿线国家的

基金项目: 国家自然科学基金项目(31860457); 广西自然科学基金青年基金项目(2018GXNSFBA281118、2019GXNSFBA245037、2020GXNSF-AA297153、2020GXNSFBA297111); 广西高等教育本科教学改革工程项目(2021JGZ160); 广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2021KY0705)

作者简介: 王敏(1998—), 女(汉), 硕士研究生, 研究方向: 果蔬贮藏保鲜。

* 通信作者: 帅良(1986—), 男, 副研究员, 博士, 研究方向: 果蔬贮藏保鲜。

果蔬交易额达到 760 亿美元,同比增长 16.4%^[2]。但正是由于出口需长时间储藏和远距离运输,增大了果蔬出现机械损伤的几率。水果和蔬菜含水量极高,营养物质丰富,挤压碰撞过程会使果蔬内部水分流失,引起果蔬品质下降。果蔬受到机械损伤后,微生物容易侵染破损部位,并在果蔬体内大量繁殖,加速果蔬的腐败变质,影响其食用价值和经济效益。据相关资料统计,我国果蔬机械伤每年损耗量约为 4 000 万吨,经济损失达 2 000 亿人民币^[3]。果蔬机械损伤不仅包括果蔬在采收、包装、运输和销售环节中因受到跌落、碰撞、振动、挤压、刺伤等作用而引起的果蔬破损等伤害,也包括果蔬在加工过程中受到的鲜切等伤害^[4]。因此,研究果蔬机械伤信号分子的防御机制,总结果蔬机械损伤生理生化特性,分析其影响因素,用科学的方法对果蔬进行损伤防护,从而降低果蔬出现机械

损伤的概率。

1 果蔬机械损伤的类型

1.1 静压损伤

静压损伤是指在储运过程中由于果蔬大量堆放而导致的果蔬损伤。随着静压时间的延长,果蔬要承受自身重力和上层果蔬压力引起的接触挤压形变和摩擦损伤,造成果蔬品质劣变。研究静压损伤通常采取外表层的黏弹性静载试验,以外载力大小和时间长短为依据判断损伤程度,通过测量接触面积和损伤直径描述损伤规律。近年来,国内外学者对于果蔬静压损伤的研究,主要集中在利用静态压缩法及 Burgers 的四单元模型探究果蔬静压损伤机理、探讨堆叠果蔬的压力分布和损伤面积的关系等。部分有关果蔬静压损伤的研究内容及成果见表 1。

表 1 果蔬静压损伤的研究

Table 1 Study on static pressure injury of fruits and vegetables

研究学者	研究对象	模型	研究内容及结果	文献
Lewis	苹果	有限元模型	利用超声波技术研究苹果静载压缩的接触面积和接触应力,结果表明,苹果损伤面积随着外载力的增加而增加,峰值应力从接触的中心迁移到临界载荷以上的边缘	[5]
杨晓清	河套蜜瓜	蠕变仿真模型	利用虚拟样机技术建立蠕变仿真模型,获得蠕变特性参数及回归方程;对影响河套蜜瓜静载蠕变损伤因素进行了分析研究,得出低温低压储藏可以减轻河套蜜瓜的静压伤害	[6]
Miraei	柚子	有限元模型	采用有限元法模拟了柚子果皮和果肉在两平行板之间压缩时的力学行为,结果表明加载方向对组织的应力分布和位移有明显的影响	[7]
Singh F	苹果、马铃薯	膨胀压力和拉伸比模型	提出应变能函数并建立膨胀压力与拉伸比之间的关系式,利用 Levenberg-Marquardt 算法对苹果和马铃薯组织的膨胀压力和拉伸比的预测值与实验值进行了相关分析,并对材料常数进行回归分析	[8]

1.2 振动损伤

振动损伤是由于果蔬的相互碰撞和低应力循环引起的延迟损伤,大多发生在运输过程中。运输振动对果实造成机械损伤,严重影响果蔬的组织流变特性,降低耐储性^[9]。影响果蔬振动损伤的因素主要分为三类。第一类是果蔬自身影响,如成熟度、硬度;第二类是运输车辆的内部结构和外部结构的影响,如运输车辆内部悬挂和堆码类型、车辆轴轮数量;第三类为不确定因素,如运输时间、速度和距离,路面平整程度,果蔬包装方式、堆码高度等。目前,主要采取稳态振动和随机振动两种方式研究果蔬的振动损伤,而果蔬在运输过程中往往是由随机振动引起的损伤。因此,以随机振动为模型研究果蔬的运输振动过程更具现实意义。Scalia 等^[10]在低温控制的条件下模拟运输条件,发现与对照组相比振动处理会降低草莓的品质性状。Fernando 等^[11]采用实际运输条件,在列车中放置不同

堆码位置和高度香蕉,结果表明在列车尾部堆码的香蕉损害最严重,每个堆码位置的损伤程度与列车的振动加速度密切相关。

1.3 冲击损伤

果蔬在采收、运输和销售过程中可能出现跌落、碰撞和敲击等产生较强的冲击力,使果蔬产生塑性变形等不可逆冲击损伤。冲击损伤程度主要与果蔬跌落高度、碰撞能量、碰撞次数、碰撞或跌落时其表面特性,以及果蔬自身成熟度、品种及大小有关^[12]。目前,关于冲击损伤影响的研究大部分都采用振动模拟、自由落体、冲击摆等试验方法,建立模型分析损伤程度和影响因素之间的关系。Zhou 等^[13]研究发现高强度机械冲击持续时间越短,樱桃损伤程度越高。Ghasem 等^[14]采用多元线性回归分析方法研究苹果的冲击损伤,建立了苹果果实损伤敏感性(以损伤体积衡量)的损伤预测模型,结果表明,提高温度、增大曲率半径可以降低

苹果的冲击损伤程度。

1.4 鲜切损伤

果蔬经过剥皮、切片和包装等简单加工后成为鲜切即食产品。由于鲜切果蔬在加工过程中受到物理损伤,果蔬极易发生酶促褐变、微生物侵染、腐败变质,降低商品价值。目前,国内外学者对鲜切果蔬的品质劣变做出许多研究。有研究表明,鲜切处理能提高果蔬体内苯丙氨酸解氨酶的活性,加速鲜切茼蒿^[15]、慈姑^[16]、荸荠^[17]等果蔬的褐变,导致果蔬品质下降。Liu等^[18]研究发现鲜切处理过程容易受微生物侵染,鲜切处理能引起苹果中细菌、霉菌和酵母菌含量大幅度的提高,影响苹果的营养价值,加速苹果腐败变质。还有学者研究发现,鲜切处理促进了黄瓜体内变形假单胞菌的生长,引起黄瓜口味的变化和营养物质的流失^[19]。

2 果蔬机械损伤的生理特性及影响因素

2.1 呼吸强度

果蔬体内需要能量进行生物大分子的转换更新,细胞结构的维持和修复。这些能量大部分由呼吸作用消耗有机物提供。有学者通过人工模拟试验方法,发现红富士和秦冠机械伤果在贮藏过程中呼吸强度均增大,且红富士果实呼吸峰提前^[20]。在黄瓜^[21]、猕猴桃^[22]和甘蓝^[23]等果蔬中也有类似现象的发生。还有学者研究表明临界高度以下,樱桃番茄跌落高度越高,呼吸速率越大^[24]。果蔬受到机械损伤后,呼吸作用逐渐增大,由此加强损伤组织的防御反应,促进愈伤组织的形成。机械伤也会导致果蔬正常代谢失衡,促进果蔬体内活性氧的积累,使其膜质系统发生过氧化反应;蛋白质、核酸等生物大分子遭到氧化,破坏果蔬细胞内外环境的稳定性,从而加速果实的衰老。

2.2 氧化酶活性

果蔬的过氧化物酶(peroxidase, POD)、多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)、过氧化氢酶(catalase, CAT)和超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)等的酶活性与自身的细胞膜透性和品质有重要关系^[25],提高酶活性能促进果蔬损伤愈合。有学者发现切片损伤会提高胡萝卜中 PPO 活性,诱导组织中酚类物质的产生和积累^[26]。有研究表明,机械损伤会抑制番茄^[27]、苹果^[28]和青椒^[29]等果蔬体内 POD 和 PPO 活性,导致果蔬品质劣变。同时,果蔬在遭受机械伤后会抑制体内 CAT 和 SOD 活性,破坏自身的抗氧化系统,造成果实体内 H₂O₂ 的大量积累,加速果蔬在贮存过程中的衰老腐败。机械损伤破坏了果蔬的组织结构,影响其细胞壁和细胞膜的完整性,引起酚类物质的积累,改变果蔬

体内的酶类物质活性,促进果蔬表皮褐变,导致果蔬品质下降。

2.3 γ -氨基丁酸

植物在遭受机械损伤、缺氧和干旱等胁迫时,体内 γ -氨基丁酸(γ -aminobutyric acid, GABA)在应激组织中快速积累对抗胁迫^[30-31],果蔬在遭受机械伤后也会出现类似现象。研究表明,成熟番茄经破碎后体内 GABA 含量会升高^[32]。Hou^[33]等发现鲜切过程激活了 GABA 的分流和多胺降解途径,诱导果蔬中 GABA 的积累。候莹等^[34]研究表明机械伤处理会引起猕猴桃中 GABA 的富集;朱惠文等^[35]发现较高温度的短时间储藏会促进鲜切胡萝卜中酚类物质和 GABA 的积累,提高抗氧化能力。Wang 等^[36]发现 CaCl₂ 或抗坏血酸(ascorbic acid, ASA)处理均能使胡萝卜丝中的 GABA 富集,延长储藏期。

2.4 硬度

根据果蔬品种和成熟度的差异,硬度也会有所不同。硬度是评价果蔬品质的重要指标,反映果蔬的新鲜度。但机械损伤普遍使苹果、黄花梨^[37]、青椒^[29]、番茄^[24, 27]等果蔬组织软化,导致果蔬品质下降。有研究表明,机械损伤使果蔬原果胶含量降低,可溶性果胶和纤维素含量升高^[38]。机械损伤还会改变果蔬组织细胞结构、细胞膜透性和酶活性,促进细胞中底物和酶的结合,导致细胞壁被分解,果实进一步软化。

2.5 可溶性固形物含量

可溶性固形物含量指果蔬细胞中含有可溶于水的糖类物质的含量大小,作为果蔬的主要营养物质,其含量可用于衡量果蔬品质的指标。果蔬中的糖类物质为呼吸作用提供底物,而机械损伤会引起果蔬呼吸速率的提高,促进糖代谢速率加快,加速果蔬品质劣变。研究表明,机械损伤会引起猕猴桃^[22]、哈密瓜^[39]等果实可溶性固形物含量升高,而机械伤苹果^[20]的可溶性固形物含量则是呈现先上升后下降的趋势。

3 果蔬机械损伤防御调控的分子机制

植物在受到机械损伤后,体内会产生一系列的激素信号分子进行防御反应和应答调控,加强植物自身修复,采摘后的果蔬也有类似反应。机械损伤会刺激果蔬信号分子的产生、转导和接收,激活果蔬的胁迫应答基因,诱导防御基因的表达。目前,对果蔬机械伤信号分子转导的调控路径尚未完全清楚,但已有研究表明水杨酸(salicylic acid, SA)^[40]、茉莉酸甲酯(methyl jasmonate, MeJA)^[41]和乙烯(ethylene, ET)^[42]等可作为信号分子,诱导防御基因的表达。

3.1 SA在果蔬机械损伤防御调控的分子机制

SA是植物抗逆性和防御性系统中的信号分子。Tada等^[43]提出SA介导防御基因的主要调节因子是NPR1。SA需要调节因子NPR1的参与激活PR基因的表达,启动防御机制^[44]。此外,NPR1还能与TGA类bZIP转录因子作用,激活PR基因的表达^[45]。SA常用作果蔬的保鲜剂。Chen等^[46]研究发现SA处理能促进机械伤葡萄中PAL mRNA的积累,提高PAL蛋白的含量和活性。陈夏鑫等^[47]发现SA能有效抑制*CuCHI*基因的表达,延缓鲜切荸荠的黄化。

3.2 茉莉酸在果蔬机械损伤防御调控的分子机制

茉莉酸(jasmonate JA)在茉莉酸羧基甲基转移酶的作用下生成茉莉酸甲酯(MeJA)^[48]。有学者发现MeJA在蛋白质水平上有反应,能使果蔬新陈代谢从生长转向防御^[49]。*COI1*在植物中是一个重要的调控基因,F-box蛋白*COI1*可以促进JAZ蛋白的降解,介导茉莉酸信号传导^[50]。还有研究表明,茉莉酸信号需要转录因子MYC2的参与启动JAZ蛋白,而且在Thr328残基上磷酸化偶联翻转能刺激MYC2转录活性^[51],诱导防御基因的表达。外源MeJA可参与果蔬防御信号的转导,激活果蔬的胁迫应答基因。Guo等^[52]研究表明MeJA诱导机械伤柑橘PR5的mRNA表达水平升高,抑制柑橘绿霉病的发生。

3.3 ET在果蔬机械损伤防御调控的分子机制

ET是植物生长调节的重要因子,也参与了胁迫反应的防御机制。APETALA2/乙烯反应因子(AP2/ERF)蛋白家族,通过参与次生代谢物的生物合成来介导植物的逆境反应^[53]。到目前为止,在拟南芥^[42]中已鉴定出5种乙烯受体ETR1、ETR2、ERS1、ERS2、EIN4,在番茄中已经分离出第7个乙烯受体LeETR7^[54]。机械伤胁迫促进花椰菜中*BO-ACS1*和*BO-ACS2*的基因表达,使花椰菜中伤乙烯含量显著提高^[55]。为减少胁迫后期伤乙烯的生成,Bu等^[56]发现UV-C处理抑制了机械伤番茄中*PME2.1*、*Cel1*、*PGcat*和*Exp1*基因的转录表达,降低乙烯的生成量。

3.4 转录因子在果蔬机械损伤防御调控的分子机制

基因表达调控是植物胁迫反应中最常见的方式。转录因子(transcription factors,TFs)感知逆境信号,在转录水平上调控下游防御基因表达,参与植物防御机制^[57]。植物受到逆境胁迫后,AP2/ERF、WRKY、BHLH、bZIP、MYB和NAC等6个主要TFs家族发挥重要作用^[58]。除了参与植物的防御反应外,还有研究表明WRKY转录因子与果蔬机械伤褐变呈高度相关。刘建汀等^[59]研究发现,4个WRKY基因*Unigene0018509*、

Unigene0021412、*Unigene0025291*和*Unigene0034271*参与鲜切丝瓜褐变的调控反应。此外,WRKY75还与番茄组织褐变有关^[60]。

4 果蔬机械损伤的防护措施

果蔬在采摘、运输、储藏和销售过程中极易受到机械损伤而影响其本身的营养价值,采取适合的物理减振装置和化学处理等防护措施能有效减缓果蔬机械伤的产生,延长果蔬的储藏期限,增加果蔬的经济效益。

4.1 减振防护

果蔬的物理减振装置通常要符合两个条件,一是能在最大程度上保护产品免受冲击、振动和静压等损伤,同时具有良好的通透性能,便于果蔬进行有氧呼吸。其次是经济性,包装材料要尽可能的便宜、易获取,还要便于果蔬的装卸和运输。目前,市场上常见的果蔬减振包装主要有瓦楞纸板、泡沫网袋、充气柱和聚乙烯泡沫塑料等^[61]。采取适合的物理减振装置能有效减低果蔬在运输过程中的呼吸强度和乙烯释放量,维持果蔬硬度和Vc含量,保持果蔬货架期的品质。

4.2 化学试剂防护

目前,国内外学者对果蔬机械损伤的化学防护措施做出许多研究,也取得了一定的成果。已有研究表明,1-MCP^[21]、异硫氰酸烯丙酯^[23]等处理能抑制果蔬呼吸强度,延缓果蔬衰老进程;CaCl₂^[27]、1-甲基环丙烯、乙烯吸收剂^[28]和腐胺^[29]处理均能提高机械伤果蔬体内的抗氧化酶活性,加强果蔬抗氧化能力;赤霉素^[15]、抗坏血酸和阿魏酸^[16]、6-苄氨基嘌呤^[17]能延缓鲜切莲藕和荸荠的褐变,保持鲜切果蔬的品质。

4.3 其他防护

除了物理减振装置和化学处理等防护措施外,还有学者采用等离子体活化水浸泡鲜切苹果,发现PAW处理能抑制鲜切苹果中细菌、霉菌和酵母菌的生长,减少微生物对果蔬的侵染^[18]。郑鄢燕^[19]等采用3%O₂+7%CO₂气调包装储藏,抑制了变形假单胞菌对黄瓜口味变化的影响,保持鲜切黄瓜的品质。

5 展望

果蔬在采后极易遭受机械损伤而导致品质下降。因此,研究果蔬机械损伤的生理特性和分子机制,采用合适的化学处理和减振装置,能有效减少果蔬机械损伤的产生。目前,国内外学者对果蔬机械损伤分子机制和生理特性的研究已取得一定成果与进展,但还有部分问题尚待研究探讨。

例如,果蔬在运输过程中受到的损伤大都是随机的、不确定的,通过自制振动装置研究果蔬振动损伤特性是存在一定局限性的,试验结果与现实也可能存在一定的差异。果蔬机械损伤会对果蔬原本的风味造成影响,而大多数学者都是针对损伤后果蔬营养物质的流失,对果蔬特征性芳香物质和口感变化的研究较少。近年来,国内外学者对 TFs 转录因子有一定的研究成果,但大多数限定于植物机械胁迫中,在果蔬机械伤的研究中非常有限。而且,果蔬机械损伤信号分子的调控机制尚未完全清楚,果蔬损伤愈合过程中的防御系统和调控路径还有待研究探讨。

参考文献:

- [1] 徐春梅. RECP 自贸协定下我国果蔬出口的风险预测与防范[J]. 中国果菜, 2021, 41(6): 137-143.
XU Chunmei. Risk forecast and prevention of fruit and vegetable export under RECP free trade agreement in China[J]. China Fruit & Vegetable, 2021, 41(6): 137-143.
- [2] 金缀桥, 杨逢珉, 郑旗. “一带一路”合作框架下食品安全标准对我国果蔬产品出口影响的研究[J]. 国际经济合作, 2020(1): 104-116.
JIN Zhui Qiao, YANG Fengmin, ZHENG Qi. ‘One belt, one road’co-operation framework, the impact of food safety standards on the export of fruits and vegetables in China[J]. International Economic Cooperation, 2020(1): 104-116.
- [3] 黄斯. 水果减振包装的研制及其在草莓、猕猴桃和葡萄贮运中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
HUANG Si. Development and application of anti-vibration package in the storage and transportation of strawberry, kiwifruit and grape[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [4] 虢露葭, 李萍, 侯晓荣, 等. 果蔬采后机械损伤特性研究进展[J]. 食品工业科技, 2013, 34(1): 389-391, 396.
GUO Lujia, LI Ping, HOU Xiaorong, et al. Research progress of mechanical damage in postharvest fruits and vegetables[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(1): 389-391, 396.
- [5] LEWIS R, YOXALL A, MARSHALL M B, et al. Characterising pressure and bruising in apple fruit[J]. Wear, 2008, 264(1/2): 37-46.
- [6] 杨晓清, 王春光. 河套蜜瓜机械特性与静载损伤关系的研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 31-37.
YANG Xiaoqing, WANG Chunguang. Relationship between mechanical properties and damage of Hetao muskmelons under static compression[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(3): 31-37.
- [7] MIRAEI ASHTIANI S H, SADRNI A H, MOHAMMADINEZHAD H, et al. FEM-based simulation of the mechanical behavior of grape-fruit under compressive loading[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 245: 39-46.
- [8] SINGH F, KATIYAR V K, SINGH B P. Analytical study of turgor pressure in apple and potato tissues[J]. Postharvest Biology and Technology, 2014, 89: 44-48.
- [9] LÜ Q, TANG M J. Detection of hidden bruise on kiwi fruit using hyperspectral imaging and parallelepiped classification[J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 12: 1172-1179.
- [10] LA SCALIA G, AIELLO G, MICELI A, et al. Effect of vibration on the quality of strawberry fruits caused by simulated transport[J]. Journal of Food Process Engineering, 2016, 39(2): 140-156.
- [11] FERNANDO I, FEI J G, STANLEY R. Measurement and analysis of vibration and mechanical damage to bananas during long-distance interstate transport by multi-trailer road trains[J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 158: 110977.
- [12] BLAHOVEC J, PAPRŠTEIN F. Susceptibility of pear varieties to bruising[J]. Postharvest Biology and Technology, 2005, 38(3): 231-238.
- [13] ZHOU J F, HE L, KARKEE M, et al. Analysis of shaking-induced cherry fruit motion and damage[J]. Biosystems Engineering, 2016, 144: 105-114.
- [14] ABEDI G, AHMADI E. Design and evaluation a pendulum device to study postharvest mechanical damage in fruits: Bruise modeling of red delicious apple[J]. Australian Journal of Crop Science, 2013, 7(7): 962-968.
- [15] 刘云芬, 田天容, 殷菲胧, 等. 赤霉素对鲜切莴苣酶促褐变及活性氧代谢的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(19): 215-220.
LIU Yunfen, TIAN Tianrong, YIN Feilong, et al. Effects of gibberellin on enzymatic browning and reactive oxygen species of fresh-cut lettuce[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(19): 215-220.
- [16] 廖玲燕, 凌月霜, 刘云芬, 等. 不同抗褐变剂处理对鲜切慈姑褐变的影响[J]. 食品工业, 2020, 41(5): 195-199.
LIAO Lingyan, LING Yueshuang, LIU Yunfen, et al. Effects of different anti-browning agents treatments on browning of fresh-cut arrowhead during cold storage[J]. Food Industry, 2020, 41(5): 195-199.
- [17] 刘云芬, 廖玲燕, 殷菲胧, 等. 6-苄氨基嘌呤处理对鲜切荸荠褐变及活性氧代谢的影响[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(12): 16-24.
LIU Yunfen, LIAO Yanling, YIN Feilong, et al. Effects of 6-benzylaminopurine on enzymatic browning and reactive oxygen species metabolism of fresh-cut Chinese water chestnuts[J]. Storage and Process, 2021, 21(12): 16-24.
- [18] LIU C H, CHEN C, JIANG A L, et al. Effects of plasma-activated water on microbial growth and storage quality of fresh-cut apple[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 59: 102256.
- [19] 郑鄢燕, 魏亚博, 王宇滨, 等. 气调贮藏对腐败菌引起的鲜切黄瓜品质、滋味和挥发性物质变化的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(5): 252-261.
ZHENG Yanyan, WEI Yabo, WANG Yubin, et al. Effect of controlled atmosphere storage on changes in quality, taste and volatile compounds of fresh-cut cucumber caused by spoilage bacteria[J]. Food Science, 2021, 42(5): 252-261.

- [20] 袁仲玉, 张晓晓, 田蓉, 等. 秦冠和红富士苹果对机械损伤的敏感性分析[J]. 中国食品学报, 2014, 14(1): 279–284.
YUAN Zhongyu, ZHANG Xiaoxiao, TIAN Rong, et al. Sensitivity analysis of mechanical damage on Qinguan and red Fuji apple[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2014, 14(1): 279–284.
- [21] 邓红军, 陈小红, 李萍, 等. 1-MCP 处理对采后机械损伤黄瓜生理生化特性的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 34(9): 332–335, 347.
DENG Hongjun, CHEN Xiaohong, LI Ping, et al. Effect of 1-methylcyclopropene treatments on physiological and chemical characteristics of cucumber fruits suffered mechanical damage during post-harvest[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(9): 332–335, 347.
- [22] 洪伟荣, 王璇, 刘馨岚, 等. 1-MCP 预处理对采后猕猴桃机械损伤导致品质变化的影响[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(2): 7–12.
HONG Weirong, WANG Xuan, LIU Xinlan, et al. Effect of 1-MCP pretreatment on kiwifruit quality changes caused by mechanical damage after harvest[J]. Storage and Process, 2021, 21(2): 7–12.
- [23] 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 Aili, HU Wenzhong, ZHANG Weina, et al. Effect of allyl isothiocyanate treatment on physiological metabolism of fresh-cut purple cabbage[J]. Food Science, 2018, 39(3): 252–258.
- [24] 张一. 亚临界载荷对樱桃番茄呼吸强度的影响[J]. 包装工程, 2016, 37(21): 152–156.
ZHANG Yi. Effect of subcritical load on breathing intensity of cherry tomatoes[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(21): 152–156.
- [25] YANG Z F, CAO S F, SU X G, et al. Respiratory activity and mitochondrial membrane associated with fruit senescence in postharvest peaches in response to UV-C treatment[J]. Food Chemistry, 2014, 161: 16–21.
- [26] SURJADINATA B B, CISNEROS-ZEVALLOS L. Biosynthesis of phenolic antioxidants in carrot tissue increases with wounding intensity[J]. Food Chemistry, 2012, 134(2): 615–624.
- [27] 刘瑶, 左进华, 郑秋丽, 等. 氯化钙对机械伤番茄果实生理特性的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(3): 264–269.
LIU Yao, ZUO Jinhua, ZHENG Qiuli, et al. Effect of CaCl_2 treatment on physiology characteristics of tomatoes with mechanical damage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(3): 264–269.
- [28] 孙庆申, 梁璐, 李梦洋, 等. 1-甲基环丙烯或乙烯吸收剂处理减轻机械损伤苹果劣变的研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(12): 3906–3912.
SUN Qingshen, LIANG Lu, LI Mengyang, et al. Study on the effects of 1-methylcyclopropene or ethylene absorbent treatment on alleviating deterioration of mechanically damaged apples[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(12): 3906–3912.
- [29] 王云香, 顾思彤, 左进华, 等. 腐胺对机械伤青椒果实生理品质和抗氧化能力的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(5): 259–263.
WANG Yunxiang, GU Sitong, ZUO Jinhua, et al. Effects of putrescine on physiological quality and antioxidant capacity of mechanically injured green bell pepper[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(5): 259–263.
- [30] KINNERSLEY A M, TURANO F J. Gamma aminobutyric acid (GABA) and plant responses to stress[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2000, 19(6): 479–509.
- [31] AGHDAM M S, LUO Z S, JANNATIZADEH A, et al. Employing exogenous melatonin applying confers chilling tolerance in tomato fruits by upregulating ZAT2/6/12 giving rise to promoting endogenous polyamines, proline, and nitric oxide accumulation by triggering arginine pathway activity[J]. Food Chemistry, 2019, 275: 549–556.
- [32] DEEWATTHANAWONG R, ROWELL P, WATKINS C B. γ -aminobutyric acid (GABA) metabolism in CO_2 treated tomatoes[J]. Postharvest Biology and Technology, 2010, 57(2): 97–105.
- [33] HOU Y, REN H, WANG K K, et al. Influence of fresh-cut process on γ -aminobutyric acid (GABA) metabolism and sensory properties in carrot[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 59(2): 552–561.
- [34] 侯莹, 祁雪鹤, 任慧, 等. 鲜切处理对猕猴桃中 γ -氨基丁酸富集的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(20): 58–63, 84.
HOU Ying, QI Xuehe, REN Hui, et al. Effect of fresh-cut treatment on γ -aminobutyric acid (GABA) accumulation in kiwi fruit[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(20): 58–63, 84.
- [35] 朱惠文, 汤静, 金鹏, 等. 贮藏温度对鲜切胡萝卜品质及总酚和 γ -氨基丁酸含量的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(9): 213–219.
ZHU Huiwen, TANG Jing, JIN Peng, et al. Effect of storage temperature on quality and total phenolic and γ -aminobutyric acid content in fresh-cut carrot[J]. Food Science, 2019, 40(9): 213–219.
- [36] WANG K K, XU F, CAO S F, et al. Effects of exogenous calcium chloride (CaCl_2) and ascorbic acid (AsA) on the γ -aminobutyric acid (GABA) metabolism in shredded carrots[J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 152: 111–117.
- [37] ZHOU R, SU S Q, YAN L P, et al. Effect of transport vibration levels on mechanical damage and physiological responses of Huanghua pears (*Pyrus pyrifolia* Nakai, cv. Huanghua)[J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 46(1): 20–28.
- [38] 王艳颖, 胡文忠, 庞坤, 等. 机械损伤对富士苹果采后软化生理的影响[J]. 食品研究与开发, 2008, 29(5): 132–136.
WANG Yanying, HU Wenzhong, PANG Kun, et al. Effects of mechanical damage on postharvest softening physiology of Fuji apples[J]. Food Research and Development, 2008, 29(5): 132–136.
- [39] 曾媛媛, 王锡昌, 周然, 等. 运输振动对哈密瓜贮藏品质的影响[J]. 食品与机械, 2016, 32(3): 141–144, 148.
ZENG Yuanyuan, WANG Xichang, ZHOU Ran, et al. Effects of transport vibration on storage quality of Hami melon[J]. Food & Machinery, 2016, 32(3): 141–144, 148.
- [40] HERRERA-VÁSQUEZ A, SALINAS P, HOLUIGUE L. Corrigendum: Salicylic acid and reactive oxygen species interplay in the transcriptional control of defense genes expression[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 964.
- [41] 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.
- [42] RIYAZUDDIN R, VERMA R, SINGH K, et al. Ethylene: A master regulator of salinity stress tolerance in plants[J]. Biomolecules, 2020, 10(6): 959.
- [43] TADA Y, SPOEL S H, PAJEROWSKA-MUKHTAR K, et al. Plant immunity requires conformational changes[corrected] of NPR1 via S-nitrosylation and thioredoxins[J]. Science, 2008, 321(5891): 952–956.
- [44] MOU Z L, FAN W H, DONG X N. Inducers of plant systemic acquired resistance regulate NPR1 function through redox changes[J]. Cell, 2003, 113(7): 935–944.
- [45] WU Y, ZHANG D, CHU J Y, et al. The *Arabidopsis* NPR1 protein is a receptor for the plant defense hormone salicylic acid[J]. Cell Reports, 2012, 1(6): 639–647.
- [46] CHEN J Y, WEN P F, KONG W F, et al. Effect of salicylic acid on phenylpropanoids and phenylalanine ammonia-lyase in harvested grape berries[J]. Postharvest Biology and Technology, 2006, 40(1): 64–72.
- [47] 陈夏鑫, 陈振林, 帅良, 等. 荸荠查尔酮异构酶基因的克隆与表达分析[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(4): 30–36.
- CHEN Xiabin, CHEN Zhenlin, SHUAI Liang, et al. Cloning and expression analysis of CHI gene in Chinese water chestnut[J]. Storage and Process, 2020, 20(4): 30–36.
- [48] KERAMAT B, KALANTARI K M, ARVIN M J. Effects of methyl jasmonate treatment on alleviation of cadmium damages in soybean[J]. Journal of Plant Nutrition, 2010, 33(7): 1016–1025.
- [49] CHEN Y Z, PANG Q Y, DAI S J, et al. Proteomic identification of differentially expressed proteins in *Arabidopsis* in response to methyl jasmonate[J]. Journal of Plant Physiology, 2011, 168(10): 995–1008.
- [50] SHEARD L B, TAN X, MAO H B, et al. Jasmonate perception by inositol-phosphate-potentiated COI1-JAZ co-receptor[J]. Nature, 2010, 468(7322): 400–405.
- [51] ZHAI Q Z, YAN L H, TAN D, et al. Phosphorylation-coupled proteolysis of the transcription factor MYC2 is important for jasmonate-signaled plant immunity[J]. PLoS Genetics, 2013, 9(4): e1003422.
- [52] GUO J, FANG W W, LU H P, et al. Inhibition of green mold disease in mandarins by preventive applications of methyl jasmonate and antagonistic yeast *Cryptococcus laurentii*[J]. Postharvest Biology and Technology, 2014, 88: 72–78.
- [53] 邵文靖, 石洁, 张普, 等. ERF 转录因子调控生物胁迫反应的研究进展[J]. 生物技术通报, 2021, 37(3): 136–143.
- SHAO Wenjing, SHI Jie, ZHANG Pu, et al. Research progress of ERF transcription factors in regulating biological stress responses [J]. Biotechnology Bulletin, 2021, 37(3): 136–143.
- [54] CHEN Y, HU G J, RODRIGUEZ C, et al. Roles of SIETR7, a newly discovered ethylene receptor, in tomato plant and fruit development[J]. Horticulture Research, 2020, 7: 17.
- [55] MCKERSIE B D, BOWLEY S R, HARJANTO E, et al. Water-deficit tolerance and field performance of transgenic alfalfa overexpressing superoxide dismutase[J]. Plant Physiology, 1996, 111(4): 1177–1181.
- [56] BU J W, YU Y C, AISIKAER G, et al. Postharvest UV-C irradiation inhibits the production of ethylene and the activity of cell wall-degrading enzymes during softening of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 86: 337–345.
- [57] MITSUDA N, OHME-TAKAGI M. Functional analysis of transcription factors in *Arabidopsis*[J]. Plant and Cell Physiology, 2009, 50(7): 1232–1248.
- [58] MERAJ T A, FU J Y, RAZA M A, et al. Transcriptional factors regulate plant stress responses through mediating secondary metabolism[J]. Genes, 2020, 11(4): 346.
- [59] 刘建汀, 朱海生, 温庆放, 等. 丝瓜 WRKY 转录因子基因的分离与褐变分析[J]. 农业生物技术学报, 2017, 25(12): 1950–1960.
- LIU Jianting, ZHU Haisheng, WEN Qingfang, et al. Isolation and browning analysis of WRKY transcription factor gene of luffa (*Luffa cylindrica*)[J]. Journal of Agricultural Biotechnology, 2017, 25(12): 1950–1960.
- [60] DAN Y H, ZHANG S, MATHERLY A. Regulation of hydrogen peroxide accumulation and death of *Agrobacterium*-transformed cells in tomato transformation[J]. Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC), 2016, 127(1): 229–236.
- [61] FADIJI T, COETZEE C, PATHARE P, et al. Susceptibility to impact damage of apples inside ventilated corrugated paperboard packages: Effects of package design[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 111: 286–296.

加工编辑:张璐

收稿日期:2021-08-07