

农产品贮藏加工

超声处理控制鲜切甘薯褐变的生理机制

潘艳芳¹, 陈晓彤¹, 杨维巧², 贾晓昱¹, 张继明³, 李喜宏¹

(1.天津科技大学 食品工程与生物技术学院天津科技大学省部共建食品营养与安全国家重点实验室, 天津 300457; 2.天津捷盛东辉保鲜科技有限公司, 天津 300403; 3.国投中鲁果汁股份有限公司, 北京 100037)

摘要:目的 针对甘薯鲜切后易氧化褐变问题, 研究超声处理对鲜切甘薯酶促褐变影响的机制, 确定最佳的超声处理时间。方法 甘薯经鲜切后, 先在 25 ℃, 40 kHz 下超声处理不同时间(0, 5, 10, 20 min), 然后测定其在 4 ℃冷藏期间对甘薯色泽、丙二醛(MDA)含量、褐变相关酶活性及酚类底物含量的影响。结果 适宜时间的超声处理能有效保持鲜切甘薯的亮度和色度, 抑制 MDA 的积累, 钝化多酚氧化酶(PPO)和过氧化物酶(POD)的活性, 激发苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性, 提高了甘薯总酚含量和抗氧化能力, 延缓了褐变的发生。结论 以超声处理 10 min 的防褐变效果最佳, 处理 20 min 会对甘薯组织造成损伤, 从而加重褐变。

关键词:甘薯; 鲜切; 酶促褐变; 超声处理

中图分类号: TS255.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)09-0001-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.09.001

Physiological Mechanism for Browning Inhibition in Fresh-cut Sweet Potato by Ultrasound

PAN Yan-fang¹, CHEN Xiao-tong¹, YANG Wei-qiao², JIA Xiao-yu¹, ZHANG Ji-min³, LI Xi-hong¹

(1. State Key Laboratory of Food Nutrition and Safety by Tianjin University of Science and Technology and Ministry of Education, School of Food Engineering and Biotechnology, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China; 2. Tianjin Gasin-dh Fresh-keeping Technology Co., Ltd., Tianjin 300403, China; 3. SDIC Zhonglu Fruit Juice Co., Ltd., Beijing 100037, China)

ABSTRACT: The work aims to study the physiological mechanism of ultrasonic treatment on enzymatic browning in view of the oxidative browning of fresh-cut sweet potato and find the optimal ultrasonic treatment time. Fresh-cut sweet potato slices were treated with ultrasound for 0, 5, 10 and 20 min at frequency of 40 kHz and temperature of 25 ℃. The color, malondialdehyde content, browning related enzyme activities and total phenol content of fresh-cut sweet potato at 4 ℃ storage were tested. Moderate ultrasonic time effectively maintained the brightness and color of fresh-cut sweet potato, inhibited the accumulation of malondialdehyde, passivated the activity of polyphenol oxidase and peroxidase, stimulated the activity of phenylalanine ammonia-lyase, improved the total phenol content and antioxidant capacity, and ultimately delayed browning of fresh-cut sweet potato. The best anti-browning effect is achieved by ultrasonic treatment for 10 min, and ultrasonic treatment for 20 min will cause damage to sweet potato tissue and aggravate browning.

收稿日期: 2019-03-18

基金项目: “十三五”国家重点研发计划(2018YFD0401305-5); 天津市科技计划(18ZXRHNC00070, 17PTWYHZ 00030); 天津市食品冷链物流工程技术中心建设项目(20171204)

作者简介: 潘艳芳(1991—), 女, 天津科技大学博士, 主要研究方向为农产品物流保鲜与加工。

通信作者: 李喜宏(1960—), 男, 博士, 天津科技大学教授, 主要研究方向为农产品保鲜生物学与技术、食品保鲜材料与食品安全等。

KEY WORDS: sweet potato; fresh-cut; enzymatic browning; ultrasonic treatment

甘薯作为天然“生理碱性”食物^[1],具有营养成分平衡、食疗保健及药用价值突出等特点,是一种理想的食品加工原料^[2]。鲜切甘薯是供消费者立即食用或餐饮业直接使用的新型甘薯加工产品^[3],因其便捷、利用率高和营养价值保留度高等特点,在甘薯产业发展比例越来越大^[1]。由于甘薯在去皮、切分等过程中受机械伤而产生逆境胁迫,表现为呼吸强度增大、膜脂过氧化程度加深、酚类物质氧化加剧等^[3],最终导致切割面的褐变及腐败变质^[4],因此严重制约了鲜切甘薯的产业发展。

已有研究表明,鲜切甘薯褐变主要为酶促褐变,多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)是产生褐变的氧化酶,存在于质体和细胞质中^[4],绿原酸是主要催化底物,存在于液泡中^[5]。甘薯受到切割后细胞完整性被破坏,酚-酚酶的区域化分布被打破,游离态 PPO 与从液泡中溢出的绿原酸接触,在氧气作用下经一系列氧化聚合生成黑褐色醌类物质^[6]。过氧化物酶(Peroxidase, POD)和苯丙氨酸解氨酶(Phenylalanine ammonia-lyase, PAL)均为促进褐变关键酶^[3,7]。在生产实践中,由于底物和氧气去除困难,因此控制酶促褐变的主要措施是抑制参与褐变相关酶的活性。

相较于化学方法的毒副残留和生物方法的不易实现,物理防褐变技术作为一种安全有效的果蔬保鲜方法,已在多种果蔬保鲜中广泛应用。其中,超声波(频率>20 kHz)处理不会对果蔬造成明显的机械破坏和升温作用,在果蔬防褐变上可弥补其他方法的不足。超声抑制果蔬褐变源于钝化酶活性,一方面超声空化作用产生高能量的自由基可改变酶分子的空间构象,另一方面超声机械效应产生的冲击波和剪切力可破坏酶分子的结构^[8]。国内外研究报道表明,适当的超声功率和超声时间可显著控制马铃薯^[8-9]、芒果^[10]、黄瓜^[11]、苹果^[12]等鲜切产品的酶促褐变,保持良好的感官品质。目前,关于超声处理对鲜切甘薯酶学特性及与褐变关系的研究很少。

文中实验通过研究超声波对鲜切甘薯在冷藏过程中褐变相关酶活及色泽、酚类底物含量等褐变相关指标,明确超声处理对鲜切甘薯酶促褐变的影响机制,确定最佳超声处理时间,为鲜切甘薯加工中褐变控制及保鲜技术开发提供技术基础和理论依据。

1 实验

1.1 材料处理

供试甘薯为采收于河北雄县的龙薯 9 号,挑选大

小均一,薯块色泽和硬度正常,薯形完整无病虫害、无机械伤的果实,清洗去表皮,切成厚度为 3~4 mm 的薄片,分别进行不同时间超声处理:25 °C 下 40 kHz 超声处理 5, 10, 20 min(以自来水清洗为对照),沥干后采用 PE 保鲜袋(280 mm × 180 mm)封装于 4 °C 恒温冰箱贮藏 10 d。每隔 2 d 随机抽取样品测定指标。

1.2 主要仪器设备与试剂

主要仪器设备:AUY120 型电子天平,安捷伦科技有限公司;HP-200 色差仪,上海汉谱科技有限公司;SY-2-6 恒温水浴锅,天津市欧诺仪器仪表有限公司;5804R 高速冷冻离心机,德国 Eppendorf 公司;UV-2550PC 型紫外-可见分光光度计,岛津企业管理(中国)有限公司;KQ2200DE 型数控超声波清洗器,昆山市超声仪器有限公司。

主要试剂:三氯乙酸、硫代巴比妥酸、氢氧化钠、愈创木酚、H₂O₂、聚乙烯吡咯烷酮、邻苯二酚、盐酸、甲醇、硼酸、乙二胺四乙酸、β-巯基乙醇等,均为分析纯。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 色泽的测定

手持 HP-200 全自动色差仪在甘薯切面随机选取 3 个点进行正反面测定^[13](每个样品测定 6 次),记录 L*, a* 和 b* 值。其中, L* 值表示亮度,计算色度 $C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$, 两者值越大则表示甘薯切片越新鲜。

1.3.2 丙二醛(MDA)含量的测定

采用硫代巴比妥酸法^[14]测定,结果以 μmol/g 表示。

1.3.3 PPO, POD, PAL 活性的测定

PPO, POD 和 PAL 活性分别采用邻苯二酚法、愈创木酚法和苯丙氨酸法进行测定^[14]。均以每克鲜甘薯每分钟吸光度值变化 0.01 为 1 个酶活力单位(U),结果以 U/g 表示。

1.3.4 总酚含量的测定

采用福林-酚法测定^[1],总酚含量以每克鲜甘薯中绿原酸的质量计,单位为 mg/g。

1.4 数据处理与分析

全部实验均设 3 次重复实验,采用 Excel 2016 分析数据计算标准偏差,并制图;采用 SPSS 19.0 软件进行差异显著性分析, P<0.05 为显著。

2 结果与分析

2.1 超声时间对鲜切甘薯亮度和色度的影响

甘薯经鲜切后出现失水、褐变等问题引起组织色变, 鲜切甘薯在 4 °C 贮藏过程中亮度 L^* 和色度 C^* 均呈下降趋势 (图 1)。其中, 对照组和超声 20 min 处理组的亮度和色度下降速度最快, 贮藏第 10 d 时 L^* 值分别降低 8.96 (Control) 和 9.80 (超声 20 min)、 C^* 值分别降低 11.17 (Control) 和 10.85 (超声 20 min), 说明未处理或超声时间过长均不利于甘薯片色泽的保持。超声 20 min 鲜切甘薯色泽降低可能是由于长时间的超声空化作用导致甘薯花色苷的降解, 这与草莓上的研究结果一致^[15]。超声 5 min 和 10 min 处理组的亮度 L^* 和色度 C^* 显著高于对照组 ($P < 0.05$), 对鲜切甘薯色值的保持有促进作用。另外, 2 组超声处理的亮度 L^* 在第 4 d 后逐渐平缓 (图 1a), 但整体色度 C^* 一直下降 (图 1b), 说明适当时间的超声处理对鲜切甘薯亮度的保持作用大于色度。

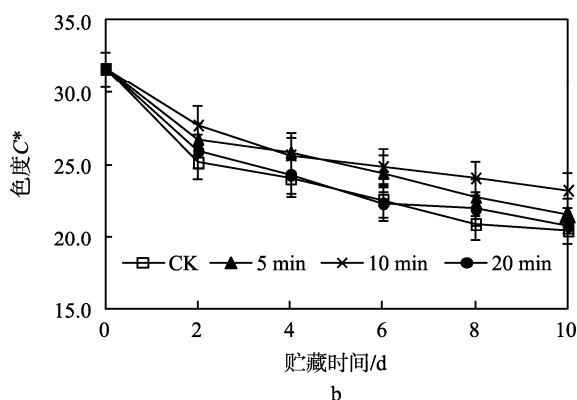
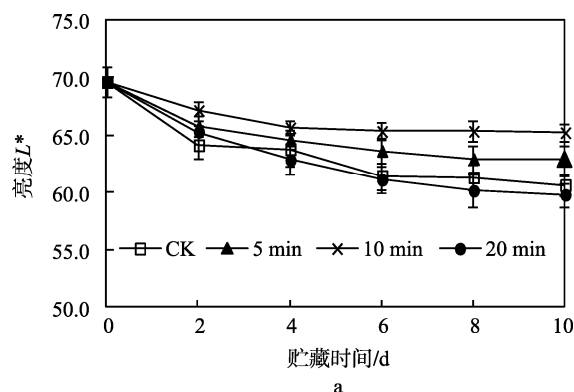


图 1 不同超声处理后鲜切甘薯亮度和色度的变化
Fig.1 Change in luminance and color saturation of fresh-cut sweet potato treated for different ultrasonic time

2.2 超声时间对鲜切甘薯 MDA 含量的影响

甘薯鲜切后遭受逆境伤害, 组织中活性氧产生和清除之间出现平衡紊乱, 导致活性氧的积累, 进而促进膜脂过氧化作用, 产生 MDA, 最终引起细胞膜的

硬化和细胞死亡^[10]。由图 2 可知, 对照组与超声组鲜切甘薯的 MDA 含量在贮藏 2 d 内均呈现上升趋势, 除超声 20 min 处理组在第 4 天达到 MDA 含量峰值外, 其余 3 组均在第 2 天达到峰值, 说明鲜切甘薯的膜脂过氧化程度逐渐增加。贮藏 4 d 后可能由于经过 2~4 d 的稳定, 甘薯自身的细胞膜保护系统发挥了作用, 通过有效清除活性氧自由基使细胞内氧化还原体系重新回到平衡状态^[16], 各组 MDA 含量均出现下降趋势。从第 6 天开始, 随着贮藏时间的延长, 甘薯的自身修复水平逐渐下降, 各组 MDA 含量又开始上升并趋于稳定。整个贮藏过程中, 超声 5 min 和 10 min 能显著抑制鲜切甘薯 MDA 含量的积累, 其中以处理 10 min 效果最佳。超声 20 min 可能由于处理时间过长, 甘薯细胞组织受到一定程度的破坏后代谢紊乱加剧, MDA 氧化产物始终处于较高水平。由此可知, 超声处理可在合适时间内 (5~10 min) 缓解切割机械伤对甘薯细胞完整性的损害。

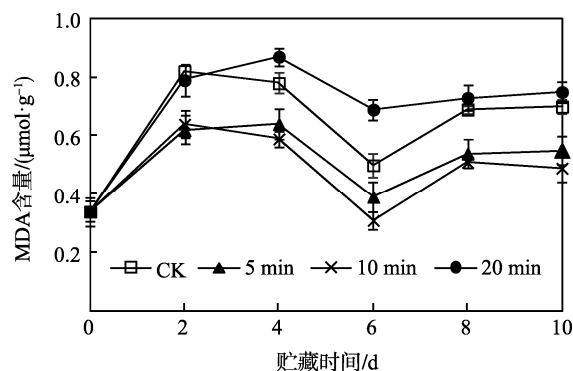


图 2 不同超声处理后鲜切甘薯 MDA 含量的变化
Fig.2 Change in MDA content of fresh-cut sweet potato treated for different ultrasonic time

2.3 超声时间对鲜切甘薯 PPO, POD 和 PAL 酶活的影响

超声处理对果蔬生理酶活既有激活作用, 也有钝化作用, 主要与超声波的频率、处理时间、温度等有关^[17-18]。如图 3a—b 所示, 甘薯经切分胁迫后 PPO 和 POD 被激活呈现上升趋势, 引起甘薯中多酚底物氧化褐变, 随后出现不同程度的下降。与对照组相比, 超声处理 5 min 和 10 min 均能显著抑制酶活性 ($P < 0.05$), 其中 PPO 活性高峰从第 2 天推迟到第 4 天, POD 活性高峰从第 4 天推迟到第 6 天; 超声处理 10 min 抑制酶活的效果最佳, PPO 和 POD 活性峰值分别降低 2.6 U/g 和 15.6 U/g。超声处理 20 min 酶活呈现不规则变化, 且在贮藏结束时活性均处于较高水平, 可能是超声时间过长易在超声波探头周围形成密集的空化云, 阻碍能量的传播, 从而降低了钝化效果^[18]。对于 PAL 活性 (图 3c), 切分胁迫同样激发了酶活的增加, 但不同于超声处理对 PPO

和 POD 的钝化作用,超声显著诱导 PAL 活性的提高,这与对马铃薯^[19]、菠萝^[20]的研究结果一致,可能是超声处理产生的自由基使甘薯组织处于氧化应激状态,进一步提高 PAL 活性保护甘薯细胞免受氧化损伤^[18,20],结果以超声处理 10 min 诱导效果最显著,增强了鲜切甘薯对外界刺激的抵御能力。

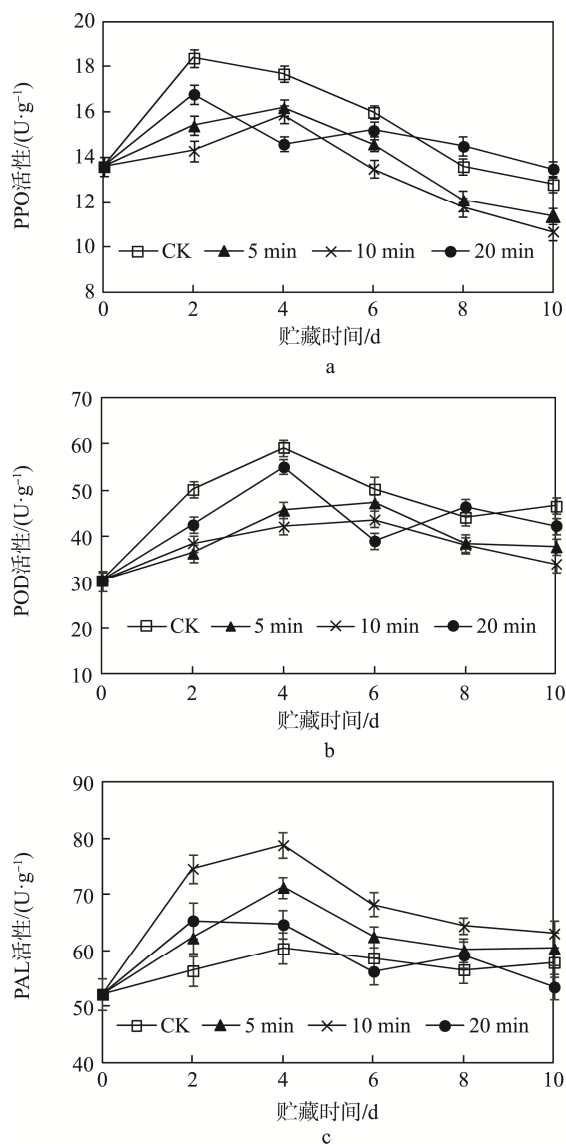


图3 不同超声处理后鲜切甘薯 PPO, POD 和 PAL 活性的变化

Fig.3 Change in PPO, POD and PAL activity of fresh-cut sweet potato treated for different ultrasonic time

2.4 超声时间对鲜切甘薯总酚含量的影响

甘薯所含多酚类物质一方面具有天然的抗氧化活性,另一方面作为 PPO 的底物参与甘薯的褐变反应。如图 4,鲜切甘薯的总酚含量在贮藏中先上升后下降,且均在第 4 天达到峰值。在 0~4 d 内总酚含量上升可能是由于甘薯切分后的机械损伤会刺激本丙烷在代谢途径中合成单分子或聚合类的酚类物质,以

修复受损组织,防止病原体进一步侵入^[19],后期下降可能是由于 PPO 等酶氧化褐变不断消耗酚类物质,以及 PAL 酶活的降低(图 3c)延缓了酚类物质的合成。贮藏 10 d,对照组和超声处理 20 min 的总酚含量下降明显,分别下降 21.4%和 32.1%。超声处理 5 min 和 10 min 更有利于甘薯总酚含量的保留,在前 6 d 超声处理 10 min 的总酚含量显著高于处理 5 min ($P<0.05$),之后差异不显著。

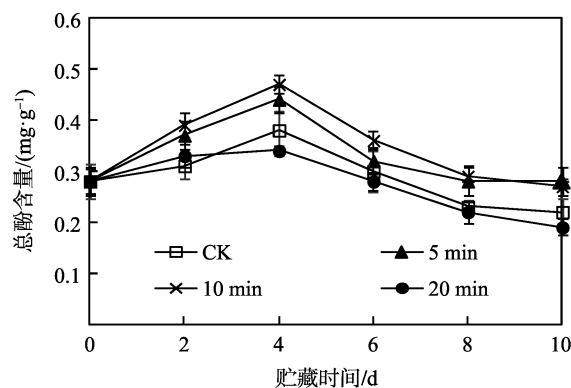


图4 不同超声处理后鲜切甘薯多酚含量的变化

Fig.4 Change in total polyphenol content of fresh-cut sweet potato treated for different ultrasonic time

3 结语

甘薯鲜切后会受到外界刺激,诱发膜脂过氧化程度加深、MDA 含量升高,同时参与褐变的 PPO, POD 酶活性被激发, PAL 催化的底物总酚含量也明显增多,引起酚类物质氧化加剧,最终导致切割面的褐变,以及甘薯亮度和色度的下降。超声空化作用所伴随的机械效应和热效应等协同破坏酶蛋白的空间结构,从而钝化酶活性,能有效维持鲜切甘薯贮藏期间较低的 PPO 和 POD 活性。超声处理过程中自由基的形成使甘薯组织产生氧化应激,增加 PAL 活性参与活性氧的防御机制。此外,超声处理能有效抑制 MDA 含量的积累和亮度 L^* 的下降,提高了甘薯的总酚含量和抗氧化能力。综上所述,超声处理可抑制鲜切甘薯的酶促褐变。文中实验在温度 25 °C 下、40 kHz 超声 10 min 时效果最佳,处理 20 min 会对甘薯组织细胞造成一定程度的损伤,贮藏后期更易发生褐变及产品变质。

参考文献:

- [1] 王礼群, 刘硕, 杨春贤, 等. 鲜切甘薯不同部位褐变机理差异[J]. 食品科学, 2018, 39(1): 285—290.
WANG Li-qun, LIU Shuo, YANG Chun-xian, et al. Mechanism of Browning in Different Parts of Fresh-cut Sweet Potato[J]. Food Science, 2018, 39(1): 285—290.

- [2] 潘艳芳. 红薯蛋白质组学及浓缩汁生物有效性研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2016.
PAN Yan-fang. Proteomic Investigation on Sweet Potato and Bioavailability of Concentrate Juice[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2016.
- [3] 刘程惠, 胡文忠, 王艳颖, 等. 不同贮藏温度下鲜切甘薯的生理生化变化[J]. 食品工业科技, 2012, 33(17): 342—345.
LIU Cheng-hui, HU Wen-zhong, WANG Yan-ying, et al. Changes of Physiology and Biochemistry of Fresh-cut Sweet Potato at Different Storage Temperatures[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(17): 342—345.
- [4] 罗佳丽. 鲜切紫薯褐变机理及控制技术研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
LUO Jia-li. Studies on the Browning Mechanism and Preservation Technology of Fresh-cut Purple Sweet Potato[D]. Chongqing: Southwest University, 2013.
- [5] 郁志芳, 夏志华, 陆兆新. 鲜切甘薯酶促褐变机理的研究[J]. 食品科学, 2005(5): 54—59.
YU Zhi-fang, XIA Zhi-hua, LU Zhao-xin. Enzymatic Browning Mechanism of Fresh Cut Sweet Potatoes (*Ipomoea Batatas*) [J]. Food Science, 2005(5): 54—59.
- [6] 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.
- [7] 张莉会, 乔宇, 廖李, 等. 不同酶抑制剂对控制鲜切山药褐变的研究[J]. 食品工业, 2018, 39(10): 82—86.
ZHANG Li-hui, QIAO Yu, LIAO Li, et al. Study on the Control of the Browning of Fresh Cut Yam by Different Enzyme Inhibitors[J]. The Food Industry, 2018, 39(10): 82—86.
- [8] AMARAL R D A, BENEDETTI B C, PUJOLA M. et al. Effect of Ultrasound on Quality of Fresh-cut Potatoes During Refrigerated Storage[J]. Food Engineering Reviews, 2015, 7(2): 176—184.
- [9] 杨明冠, 朱传合. 超声处理抑制鲜切马铃薯酶促褐变的机理研究[J]. 农产品加工, 2016(6): 1—5.
YANG Ming-guan, ZHU Chuan-he. Study on Mechanism of Ultrasound Inhibiting Enzymatic Browning of Fresh-cut Potato[J]. Farm Products Processing, 2016(6): 1—5.
- [10] JESSIKA G S, FERNANDES F A N, OLIVEIRA L D S, et al. Influence of Ultrasound on Fresh-cut Mango Quality Through Evaluation of Enzymatic and Oxidative Metabolism[J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(7): 1532—1542.
- [11] FAN K, ZHANG M, JIANG F J. Ultrasound Treatment to Modified Atmospheric Packaged Fresh-cut Cucumber: Influence on Microbial Inhibition and Storage Quality[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019(2): 3.
- [12] PUTNIK P, BURSAĆ KOVAČEVIĆ D, HERCEG K, et al. Influence of Anti-browning Solutions, Air Exposure, and Ultrasound on Color Changes in Fresh-cut Apples During Storage[J]. Journal of Food Processing & Preservation, 2017, 64(6): e13288.
- [13] ORDÓÑEZ-SANTOS L E, MARTÍNEZ-GIRÓN J, ARIAS-JARAMILLO M E. Effect of Ultrasound Treatment on Visual Color, Vitamin C, Total Phenols, and Carotenoids Content in Cape Gooseberry Juice[J]. Food Chemistry, 2017, 233: 96—100.
- [14] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导书[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007.
CAO Jian-kang, JIANG Wei-bo, ZHAO Yu-mei. Physiological and Biochemical Experiments of Fruits and Vegetables after Harvest[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007.
- [15] GANI A, BABA W N, AHMAD M, et al. Effect of Ultrasound Treatment on Physico-chemical, Nutraceutical and Microbial Quality of Strawberry[J]. LWT-food Science and Technology, 2016, 66: 496—502.
- [16] 郑亚男, 胡文忠, 姜爱丽, 等. 茉莉酸甲酯对鲜切甘薯伤害防御反应的研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(2): 368—372.
ZHENG Ya-nan, HU Wen-zhong, JIANG Ai-li, et al. Research of Methyl Jasmonate on the Wounding Defense Response for Fresh-cut Sweet Potatoes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(2): 368—372.
- [17] 刘伟, 宋弋, 廖小军, 等. 超声波技术在果蔬采后贮藏保鲜中的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(23): 206—216.
LIU Wei, SONG Yi, LIAO Xiao-jun, et al. Research Advance on the Ultrasonic Technology in Postharvest Fruits and Vegetables Storage[J]. Food Research and Development, 2017, 38(23): 206—216.
- [18] 程新峰, 蒋凯丽, 朱玉钢, 等. 超声波灭酶机制及其在食品加工中的应用[J]. 食品工业科技, 2016, 37(8): 351—357.
CHENG Xin-feng, JIANG Kai-li, ZHU Yu-gang, et al. The Mechanism of Enzyme Inactivation Induced by Ultrasound and Its Application in Food Processing[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(8): 351—357.
- [19] WANG Q, CAO Y, ZHOU L, et al. Effects of Postharvest Curing Treatment on Flesh Colour and Phenolic Metabolism in Fresh-cut Potato Products[J]. Food Chemistry, 2015, 169(2): 246—254.
- [20] 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.