

硫代乙酸糠酯对鲜切茄子褐变的抑制作用

冯岩岩, 梁晓颖, 公立群, 孙妍, 杨睿智, 王庆国

Inhibitory Effect of Furfuryl Thioacetate on Browning in Fresh-cut Eggplant

FENG Yanyan, LIANG Xiaoying, GONG Liqun, SUN Yan, YANG Ruizhi, and WANG Qingguo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022060175>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

氧化白藜芦醇对鲜切苹果及果汁褐变的影响

Effects of Oxyresveratrol on Browning of Fresh-cut Apples and Apple Juice

食品工业科技. 2019, 40(20): 285-289,295 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.20.046>

高压二氧化碳处理对鲜切荸荠褐变的影响

Effect of High-pressure Carbon Dioxide Processing on Fresh-cut Chinese Water Chestnut Browning

食品工业科技. 2021, 42(15): 283-288 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020100062>

静电场协同阻隔性包装对鲜切马铃薯贮藏过程中品质的影响

Effects of Electrostatic Field and Barrier Packaging on Fresh-cut Potatoes Quality during Storage

食品工业科技. 2018, 39(13): 262-267 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.13.048>

不同贮藏温度下鲜切紫甘薯褐变相关因素研究

Browning Related Factors of Fresh-cut Purple Sweet Potato under Different Storage Temperatures

食品工业科技. 2020, 41(6): 244-249,253 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.06.041>

氯化钠处理延缓鲜切粉葛褐变机理研究

Study on the mechanism of NaCl treatment delaying browning of fresh-cut *Pueraria*

食品工业科技. 2018, 39(4): 285-288,295 <https://doi.org/>

鲜切菠菜和香菜专用自发气调包装的研制

Development of Special Modified Atmosphere Packaging of Fresh-cut Spinach and Coriander

食品工业科技. 2020, 41(11): 287-293 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.11.044>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

冯岩岩, 梁晓颖, 公立群, 等. 硫代乙酸糠酯对鲜切茄子褐变的抑制作用 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(6): 361–365. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022060175

FENG Yanyan, LIANG Xiaoying, GONG Liquan, et al. Inhibitory Effect of Furfuryl Thioacetate on Browning in Fresh-cut Eggplant[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(6): 361–365. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022060175

· 贮运保鲜 ·

硫代乙酸糠酯对鲜切茄子褐变的抑制作用

冯岩岩, 梁晓颖, 公立群, 孙 妍, 杨睿智, 王庆国*
(山东农业大学食品科学与工程学院, 山东泰安 271000)

摘 要: 为延缓鲜切茄子在贮藏过程中的酶促褐变并延长其货架期, 以鲜切茄子为试材, 研究了最适浓度硫代乙酸糠酯 (Furfuryl thioacetate, FT) 处理对鲜切茄子感官质量评价、褐变度、褐变相关酶活性、总酚和醌含量及总抗氧化能力的影响。结果表明: 0.64 mmol/L FT 处理可抑制在低温贮藏条件下鲜切茄子的褐变, 较好地保持其总体感官质量, 延长鲜切茄子货架期至第 5 d。进一步研究表明, 与对照相比, 0.64 mmol/L FT 处理可以抑制鲜切茄子多酚氧化酶 (Polyphenol oxidase, PPO) 和过氧化物酶 (Polyphenol oxidase, POD) 的活性, 提高苯丙氨酸解氨酶 (Phenylalanine ammonia-lyase, PAL) 的活性和 DPPH 自由基清除率, 降低总酚和醌的含量。因此, FT 作为一种新型褐变抑制剂能较好地延缓鲜切茄子的褐变并延长其货架期。

关键词: 硫代乙酸糠酯, 鲜切, 茄子, 褐变, 货架期

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)06-0361-05

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022060175

本文网刊:



Inhibitory Effect of Furfuryl Thioacetate on Browning in Fresh-cut Eggplant

FENG Yanyan, LIANG Xiaoying, GONG Liquan, SUN Yan, YANG Ruizhi, WANG Qingguo*

(College of Food Science and Engineering, Shandong Agriculture University, Taian 271000, China)

Abstract: In order to delay the browning and prolong the shelf life of fresh-cut eggplant during storage, the optimal concentrations of furfuryl thioacetate (FT) on overall sensory quality, browning degree, the activities of enzymes related to browning, contents of total phenol and quinone, and total antioxidant capacity of fresh-cut eggplant during storage at 4 °C were investigated. The results showed that 0.64 mmol/L FT treatment significantly inhibited the browning, maintained its overall sensory quality, and prolonged the shelf life of fresh-cut eggplant during storage at 4 °C up to day 5. Further studies indicated that 0.64 mmol/L FT treatment suppressed the activities of polyphenol oxidase (PPO) and peroxidase (POD), increased phenylalanine ammonia-lyase (PAL) activity and DPPH free radical scavenging rate compared with control. In addition, 0.64 mmol/L FT treatment also decreased the contents of total phenol and quinone. Therefore, FT, as a novel anti-browning inhibitor, can delay the browning of fresh-cut eggplant and prolong its shelf life.

Key words: furfuryl thioacetate; fresh cut; eggplant; browning; shelf life

茄子作为一种重要的蔬菜作物, 富含丰富的矿物质、维生素和花青素等多种营养成分, 且具有较高的自由基清除能力, 能保护心血管, 还具有抗癌和抗衰老的作用^[1]。鲜切茄子既保留了茄子原有的营养, 又具有方便、即食的优点, 使鲜切茄子具有较好的市场前景^[2]。然而切割过程可能会导致鲜切茄子出现

水分流失、软化、微生物污染、褐变等问题, 从而降低鲜切茄子品质。其中, 酶促褐变是茄子加工中最主要的限制因素之一^[3]。

目前, 抑制鲜切茄子酶促褐变的主要方法多集中在使用生物化学保鲜剂, 如抗坏血酸、柠檬酸、阿魏酸、苯甲酸、谷氨酸等, 均可通过降低鲜切茄子多

收稿日期: 2022-06-20

基金项目: 山东省自然科学基金项目 (ZR2013CM012); 山东省泰山产业领军人才项目 (LJNY201702)。

作者简介: 冯岩岩 (1988-), 女, 博士研究生, 研究方向: 果蔬采后贮藏与加工, E-mail: yanyan_1600@126.com。

* 通信作者: 王庆国 (1965-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 果蔬采后贮藏与加工, E-mail: wqgyy@126.com。

酚氧化酶(Polyphenol oxidase, PPO)活性,延缓其褐变^[4-6]。近年来,天然植物提取物由于其本身环保、对人体安全有益,已引起人们的广泛关注^[7-9],尤其是天然植物提取物中含硫化合物。如3-巯基-2-丁醇作为一种竞争性褐变抑制剂,可以通过抑制PPO活性来减少酪氨酸的消耗^[10];麦角硫因处理能显著抑制双孢蘑菇和平菇的褐变,延长其货架期^[11-12]。

课题组前期通过对多种植物中的天然含硫成分的结构和特性进行分析,筛选出含硫物质硫代乙酸糠酯(Furfuryl thioacetate, FT)。FT天然存在于咖啡中,常作为食用调味剂广泛用于饮料、冷饮、糖果和其他食品中^[13]。目前,尚未见任何关于FT用于果蔬采后保鲜的相关报道。因此,本文以FT处理后的鲜切茄子为研究对象,研究了FT对鲜切茄子感官、褐变度、PPO、POD、PAL、总酚含量等的影响,为抑制鲜切茄子褐变提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

本文选用新鲜茄子(绿萼墨长茄)为试验材料,于2021年3月购买于泰安当地批发市场。购买时要求原料新鲜、形状均匀、无机械损伤、无老化、无病虫害等。FT 纯度>99%,食品级试剂,武汉卡诺斯科技有限公司;可溶性聚乙烯吡咯烷酮、邻苯二酚、愈创木酚、磷酸二氢钠、丙酮等均为国产分析纯级试剂。

CR-400手持色差计 柯尼卡美能达公司;TGL 20MC 高速冷冻离心机 长沙英泰有限公司;TU-1810PC 紫外分光光度计 北京普析通用仪器有限责任公司;YP6102 电子秤 上海精密仪器有限公司;Mini-20 制冰机 江苏雪科电器有限公司。

1.2 实验方法

以新鲜茄子为原料进行切后FT浸泡处理,根据预实验结果确定0.64 mmol/L FT为最佳处理条件。

首先将新鲜茄子去柄后用清水清洗,放入0.2 mL/L次氯酸钠溶液中消毒3 min,将去皮后的茄子纵向一分为二后切成2 cm左右的薄片,然后分别用0(对照)和0.64 mmol/L的FT溶液浸泡15 min,取出后沥干水分。每个浓度随机装入18个PE自封袋中,每袋约150 g,并置于4℃中贮藏。分别在第0、1、2、3、4和5 d随机取3袋,进行总体感官评价后,将剩余样品切碎后放入液氮中冷冻,再用液氮研磨仪研磨成粉末后于-80℃下贮存,用于后续相关指标的测定。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 总体感官评价 总体感官评价包括总体感官质量和褐变评价,参考Ma等^[14]的方法进行。由5名本实验室经过培训的人员进行评价,每个处理选取10片。总体感官评价低于6分即认为失去商品价值。

1.3.2 褐变度 参照Ru等^[10]的方法测定。取1 g

冷冻茄子粉末,加入5 mL蒸馏水,涡旋振荡。于25℃保温5 min后,在4℃条件下,10000 r/min离心10 min,取上清液于410 nm下测定褐变度。

1.3.3 多酚氧化酶(PPO)、过氧化物酶(POD)、苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性 分别参考Feng等^[15]、愈创木酚法^[16]、苯丙氨酸比色法^[17]的方法进行PPO、POD和PAL的活性。

1.3.4 醌含量 参考Meng等^[18]的方法,略有改动。取1 g冷冻茄子粉末于15 mL离心管中,加入5 mL甲醇,混匀,在25℃下超声处理30 min,10000 r/min离心10 min。取0.5 mL上清液与1 mL福林酚混匀,在室温下避光反应5 min后加入3 mL 10%的NaCO₃溶液和5 mL去离子水,混匀后于25℃恒温水浴中反应1 h,于437 nm下测定吸光度值。醌含量以OD/g表示。

1.3.5 总酚含量 取1 g冷冻茄子粉末于15 mL离心管中,加入5 mL 70%的丙酮,涡旋振荡,室温下放置2 h,参考刘箕箕^[19]的方法进行测定。

1.3.6 总抗氧化能力(DPPH) 取1 g茄子冷冻粉末于离心管内,用95%乙醇定容至10 mL后,在50℃下超声30 min,参考王红颖等^[20]的方法测定。

1.4 数据处理

所有样品均设3个重复。所有实验数据采用Excel 2021进行统计分析,以平均值±标准偏差形式表示。采用SPSS 17.0进行方差分析($P<0.05$ 表示差异显著),采用Sigmaplot 12.0进行作图。

2 结果与分析

2.1 FT对鲜切茄子贮藏过程中总体感官评价和褐变度的影响

鲜切产品总体感官质量分值越高,褐变分值越低,说明褐变抑制效果越好^[18]。褐变度通常被认为是一种间接度量指标,用于反映鲜切产品的褐变程度^[21-22]。如图1A和图1B所示,0 mmol/L FT处理(对照)鲜切茄子在第1 d已经严重褐变,总体感官质量分值低于6分,已失去商品价值;0.64 mmol/L FT处理在第4 d开始轻微褐变,贮藏至第5 d仍保持较好的品质,总体感官质量分值高于6分,仍具有商品价值。如图1C所示,随着贮藏时间的延长,鲜切茄子的褐变度逐渐升高,0.64 mmol/L FT处理的褐变度均显著低于对照($P<0.05$)。与对照相比,0.64 mmol/L FT处理能较好的保持鲜切茄子外观色泽(图1D)。以上结果表明0.64 mmol/L FT处理可显著抑制鲜切茄子的褐变,保持较好的感官品质,可延长鲜切茄子货架期至第5 d。

2.2 FT处理对鲜切茄子贮藏过程中PPO和POD活性的影响

贮藏过程中鲜切茄子PPO和POD活性的变化如图2所示,随着贮藏时间的延长,0 mmol/L FT处理(对照)的PPO和POD活性基本保持平稳趋势。

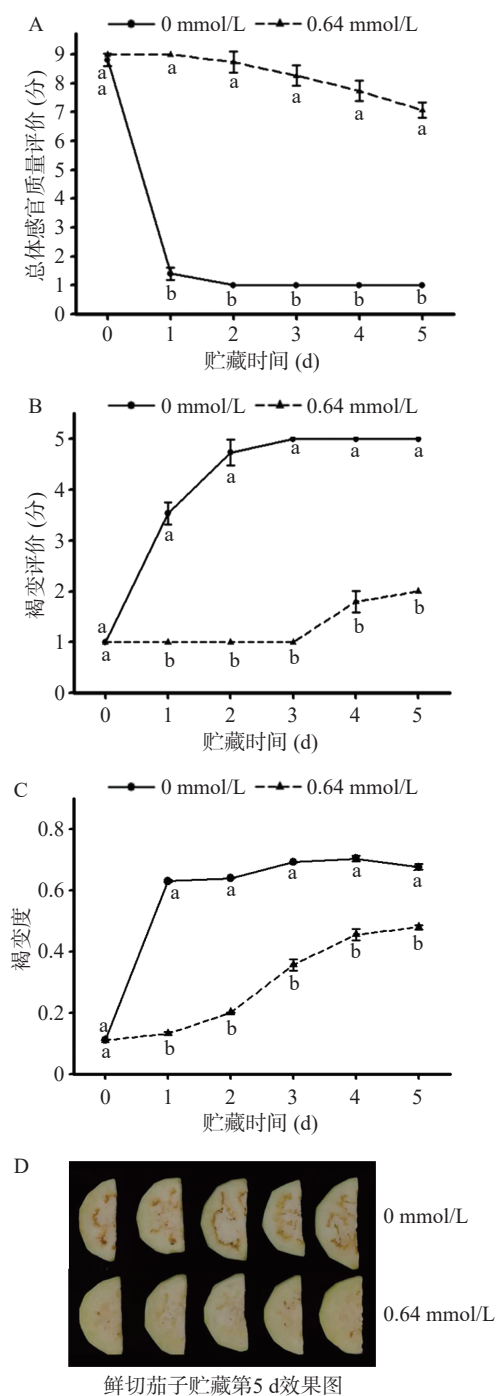


图 1 FT 对贮藏过程中鲜切茄子总体感官评价和褐变度的影响

Fig.1 Effects of FT on total sensory evaluation and browning degree of fresh-cut eggplant during storage

注: 不同字母表示在相同贮藏时间下不同处理之间存在显著差异 ($P < 0.05$); 图 2~图 5 同。

贮藏第 0 d, 0.64 mmol/L FT 处理的鲜切茄子 PPO 和 POD 的活性分别为 76.89 和 $97.78 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$, 而对照分别为 353.78 和 $193.22 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ 。0.64 mmol/L FT 处理后鲜切茄子 PPO 和 POD 的活性逐渐上升, 但在整个贮藏过程中显著低于对照 ($P < 0.05$)。以上结果表明, FT 处理可显著抑制鲜切茄子贮藏期间 PPO 和 POD 的活性。

PPO 是一种关键的氧化酶, 能催化酚类物质氧

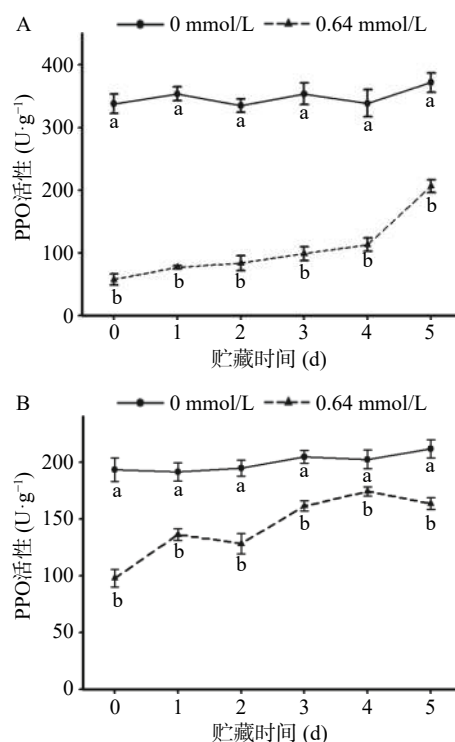


图 2 FT 对贮藏过程中鲜切茄子 PPO 和 POD 活性的影响

Fig.2 Effect of FT on PPO and POD activities of fresh-cut eggplant during storage

化成醌, 导致组织变色^[1]。研究表明不同品种的茄子褐变程度不同, 可能是由于 PPO 的活性不同所致^[23]。FT 处理可延缓 PPO 活性的升高, 从而降低酚类物质的分解, 进而延缓鲜切茄子颜色的变化。POD 是一种重要的氧化还原酶, 既能催化酚类物质形成黑色素, 也能作为逆境胁迫下酶促防御系统的关键酶, 参与生物体内自由基的清除^[18,24]。FT 处理后 POD 活性降低, 说明 POD 主要作为氧化酶参与反应, 抑制了酚类物质的分解。贮藏第 0 d, FT 处理后的 PPO 活性下降至对照的 $1/3$ 倍以上, 而 POD 活性下降程度不足对照的 $1/2$ 倍, 即 FT 处理对鲜切茄子 PPO 活性的抑制程度大于对 POD 的抑制程度。一般认为在鲜切果蔬褐变中, PPO 的贡献大于 POD 的贡献^[25]。因此 PPO 可能是 FT 抑制鲜切茄子酶促褐变的关键酶。

2.3 FT 处理对鲜切茄子贮藏过程中醌含量的影响

醌为鲜切果蔬酶促褐变产物, 鲜切果蔬中醌含量越高, 其褐变越严重^[18]。如图 3 所示, 随着贮藏时间的延长, 醌含量逐渐上升。贮藏第 0 d, 0 mmol/L FT 处理(对照)和 0.64 mmol/L FT 处理间无差异, 贮藏第 1 d 开始, 0.64 mmol/L FT 处理的鲜切茄子中醌含量显著低于对照 ($P < 0.05$)。结果表明 FT 处理可显著抑制醌含量, 从而减轻贮藏期间鲜切茄子的褐变。

2.4 FT 处理对鲜切茄子贮藏过程中 PAL 活性和总酚含量的影响

PAL 在调节苯丙烷代谢中酚类物质的生成方面发挥着重要的作用, 是苯丙烷代谢途径的关键限速

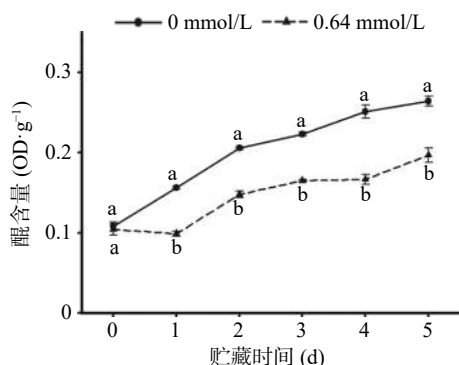


图3 FT处理对贮藏过程中鲜切茄子醌含量的影响

Fig.3 Effect of FT on quinone contents of fresh-cut eggplant during storage

酶, 酚类物质合成的第一个关键酶^[26]。当植物组织受到胁迫后, PAL活性会被激活以抵御胁迫反应, 它能催化苯丙氨酸向酚类物质转变。PAL活性的高低, 影响酚类物质的积累^[17]。由图4A可知, 0.64 mmol/L FT处理后PAL活性先上升后下降, 在整个贮藏过程中PAL活性显著高于0 mmol/L FT处理(对照)($P < 0.05$)。结果表明FT可显著提高PAL的活性, 促进酚类物质的生成。

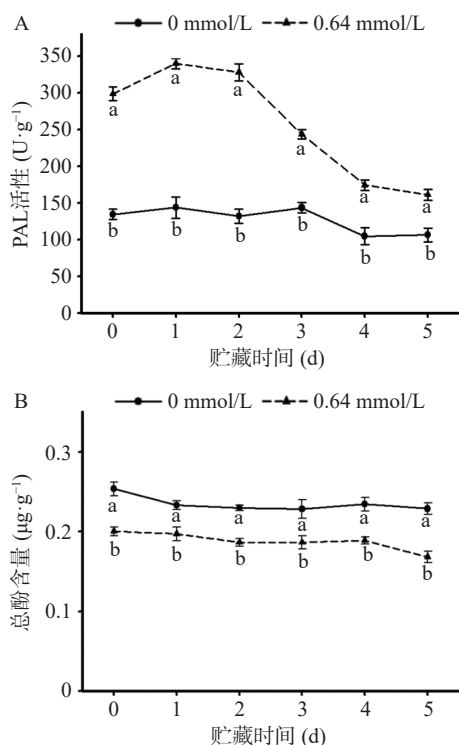


图4 FT处理对贮藏过程中鲜切茄子PAL活性和总酚含量的影响

Fig.4 Effect of FT on PAL activity and total phenols contents of fresh-cut eggplant during storage

酚类物质作为酶促褐变反应的底物, 是导致果蔬褐变的重要因素之一^[27]。FT处理后鲜切茄子中总酚含量变化如图4B所示, 随着贮藏时间的延长, 鲜切茄子的总酚含量缓慢下降。0.64 mmol/L FT处理的总酚含量显著低于对照($P < 0.05$)。关于酚类物质

酶促褐变中的作用存在较大的争议, 有研究发现酚类物质含量降低, 褐变减轻^[17], 也有研究表明由于较少的酚类物质转化成醌使酚类物质含量升高从而减轻褐变^[28]。Tang等^[29]研究表明, 在鲜切苹果酶促褐变过程中, 总酚含量与褐变程度无关。酚类物质具有抗氧化、清除自由基等多种生理活性。本试验FT可显著降低鲜切茄子总酚的含量, 这与图2的结果PPO和POD活性降低, 抑制了酚类物质的分解; PAL活性升高, 促进酚类物质生成结果相反, 原因可能是FT处理后大量的酚类物质参与鲜切茄子的氧化应激反应, 提高了其抗氧化能力^[30], 从而使总酚含量减少。

2.5 FT处理对鲜切茄子总抗氧化能力的影响

DPPH自由基清除能力是评价非酶抗氧化能力的常用方法之一。自由基清除率越高, 抗氧化能力越强, 褐变抑制效果越好^[18,31]。如图5所示, 0.64 mmol/L FT处理的DPPH自由基清除率显著高于0 mmol/L FT处理(对照)($P < 0.05$), 在整个贮藏过程中DPPH自由基清除率保持基本不变。结果表明0.64 mmol/L FT处理可显著提高鲜切茄子的DPPH自由基清除率, 进而提高其总抗氧化能力。

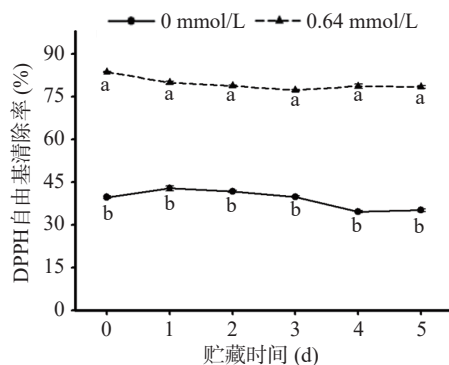


图5 FT对贮藏期间鲜切茄子DPPH自由基清除率的影响

Fig.5 Effects of FT on DPPH free radical scavenging rate in fresh-cut eggplant during storage

3 结论

FT作为一种天然抗褐变剂, 在浓度为0.64 mmol/L时可显著抑制鲜切茄子的褐变, 能较好地保持贮藏过程中鲜切茄子的感官品质, 延长鲜切茄子的货架期至5 d。FT通过抑制贮藏过程中鲜切茄子PPO和POD的活性, 抑制了酚类物质向醌的转化, 进而减少醌的生成; 激活PAL活性, 促进酚类物质的生成, 并提高其总抗氧化能力, 从而延缓贮藏期间鲜切茄子的褐变。本文仅从褐变角度研究了FT对鲜切茄子褐变效果的影响, 没有从微生物角度进行综合考虑, 若能从FT对鲜切茄子贮藏过程中微生物的影响进行研究, 将进一步为FT在鲜切茄子的应用提供理论依据。

参考文献

- [1] LIU X, ZHANG A, ZHAO J, et al. Transcriptome profiling reveals potential genes involved in browning of fresh-cut eggplant (*Solanum melongena* L.)[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 16081.
- [2] WU D, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Combined effects of

- microporous packaging and nano-chitosan coating on quality and shelf-life of fresh-cut eggplant[J]. *Food Bioscience*, 2021, 4: 101302.
- [3] GHIDELLI C, MATEOS M, ROJAS-ARUDO C, et al. Extending the shelf life of fresh-cut eggplant with a soy protein-cysteine based edible coating and modified atmosphere packaging[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2014, 95: 81–87.
- [4] BARBAGALLO R N, CHISARI M, PATANE C. Use *in vivo* of natural anti-browning agents against polyphenol oxidase activity in minimally processed eggplant[J]. *Chemical Engineering Transactions*, 2012, 27: 49–54.
- [5] GHIDELLI C, MATEOS M, ROJAS-ARUDO C, et al. Effect of antioxidants on enzymatic browning of eggplant extract and fresh-cut tissue[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2013, 38(4): 1501–1510.
- [6] LI X, JIANG Y, LI W, et al. Effects of ascorbic acid and high oxygen modified atmosphere packaging during storage of fresh-cut eggplants[J]. *Food Science and Technology International*, 2014, 20(2): 99–108.
- [7] TINELLO F, LANTE A. Recent advances in controlling polyphenol oxidase activity of fruit and vegetable products[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2018, 50: 73–83.
- [8] FRANCIOSO A, CONRADO A B, MOSCA L, et al. Chemistry and biochemistry of sulfur natural compounds: Key intermediates of metabolism and redox biology[J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2020: 8294158.
- [9] NWACHUKWU I D, SLUSARENKO A J, GRUHLKE M. Sulfur and sulfur compounds in plant defence[J]. *Natural Product Communications*, 2012, 7: 395–400.
- [10] RU X Y, TAO N, FENG Y Y, et al. A novel anti-browning agent 3-mercapto-2-butanol for inhibition of fresh-cut potato browning[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 170: 111324.
- [11] 靳祯亮, 黄琦辉, 周巧丽, 等. 麦角硫因处理对采后双孢蘑菇品质的影响[J]. *中国食品学报*, 2017, 17(3): 194–200. [JIN Z L, HUANG Q H, ZHOU Q L, et al. Effect of ergothioneine treatment on main quality of postharvest *Agaricus bisporus*[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2017, 17(3): 194–200.]
- [12] QIAN X, HOU Q, LIU J, et al. Inhibition of browning and shelf life extension of button mushroom (*Agaricus bisporus*) by ergothioneine treatment[J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 288: 110385.
- [13] API A M, BELSITO D, BISERTA S, et al. RIFM fragrance ingredient safety assessment, furfuryl thioacetate, CAS Registry Number 13678–68–7[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2020, 144: 111615.
- [14] MA Y R, WANG H Y, YAN H, et al. Pre-cut NaCl solution treatment effectively inhibited the browning of fresh-cut potato by influencing polyphenol oxidase activity and several free amino acids contents[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 178: 111543.
- [15] FENG Y Y, LIU Q Q, LIU P, et al. Aspartic acid can effectively prevent the enzymatic browning of potato by regulating the generation and transformation of brown product[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 166: 111209.
- [16] 徐鑫, 姚尧, 王庆国, 等. 回温抑制鲜切马铃薯褐变及影响游离氨基酸代谢的研究[J]. *农学报*, 2019, 9(9): 68–75. [XU X, YAO Y, WANG Q G, et al. Warming on browning inhibition and free amino acid metabolism of fresh-cut potatoes[J]. *Journal of Agriculture*, 2019, 9(9): 68–75.]
- [17] DONG T, SHI J Y, JIANG C Z, et al. A short-term carbon dioxide treatment inhibits the browning of fresh-cut burdock[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2015, 110: 96–102.
- [18] MENG Z, WANG T, MALIK A U, et al. Exogenous isoleucine can confer browning resistance on fresh-cut potato by suppressing polyphenol oxidase activity and improving the antioxidant capacity[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2022, 184: 111772.
- [19] 刘箕萁. 天冬氨酸抑制鲜切马铃薯褐变的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019. [LIU J J. Research on aspartic acid inhibiting the browning of fresh-cut potatoes [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2019.]
- [20] 王红颖, 刘博文, 王庆国, 等. 伤处理抑制鲜切马铃薯褐变的技术及机理研究[J]. *农学报*, 2019, 9(10): 75–83. [WANG H Y, LIU B W, WANG Q G, et al. The technique and mechanism of injury induction to inhibit fresh-cut potato browning[J]. *Journal of Agriculture*, 2019, 9(10): 75–83.]
- [21] 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*, 2018, 278: 659–664.
- [22] 牛丽芳, 杨颖, 易阳, 等. 紫外线照射及乙醇处理对鲜切荸荠褐变的影响[J]. *食品科技*, 2019, 44(11): 41–46. [NIU L F, YANG Y, YI Y, et al. The effect of ultraviolet irradiation and ethanol treatment on browning of fresh-cutting water chestnuts[J]. *Food Science and Technology*, 2019, 44(11): 41–46.]
- [23] MISHRAB B, GAUTAM S, SHARMA A. Free phenolics and polyphenol oxidase (PPO): The factors affecting post-cut browning in eggplant (*Solanum melongena*)[J]. *Food Chemistry*, 2013, 139(1-4): 105–114.
- [24] TAO N, WANG R H, XU X, et al. Xanthosine is a novel anti-browning compound in potato identified by widely targeted metabolomic analysis and *in vitro* test[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 171: 111367.
- [25] MAYRE A M. Polyphenol oxidases in plants and fungi: Going places? A review[J]. *Phytochemistry*, 2006, 67: 2318–2331.
- [26] TOMAS-BARBERAN F A, ESPIN J C. Phenolic compounds and related enzymes as determinants of quality in fruits and vegetables[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2010, 81(9): 853–876.
- [27] LYSIAK G P, MICHALSKA C A, WOJDYLO A. Postharvest changes in phenolic compounds and antioxidant capacity of apples cv. Jonagold growing in different locations in Europe[J]. *Food Chemistry*, 2020, 310: 125912.
- [28] LIU X, WANG T, LU Y, et al. Effect of high oxygen pretreatment of whole tuber on anti-browning of fresh-cut potato slices during storage[J]. *Food Chemistry*, 2019, 301: 125287.
- [29] TANG T, XIE X, REN X, et al. A difference of enzymatic browning unrelated to PPO from physiology, targeted metabolomics and gene expression analysis in Fuji apples[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 170: 111323.
- [30] 张梓兰. 荔枝果肉多酚抗氧化应激作用及其机制研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011. [ZHANG C L. Anti-oxidant stress effect and its mechanism of Litchi pulp polyphenols[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011.]
- [31] LIU X H, ZHANG A, 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: 6937.