

- 荷兰《文摘与引文数据库》(Scopus)
- 瑞典开放存取期刊目录 DOAJ
- 美国《化学文摘》CA
- 英国《食品科技文摘》FSTA
- 日本科学技术振兴机构数据库JST
- 世界期刊影响力指数(WJCI)报告
- 食品科学与工程领域高质量科技期刊分级目录第一方阵T1
- 北大核心期刊
- 中国精品科技期刊
- 中国科技核心期刊CSTPCD
- 中国核心学术期刊RCCSE
- 中国农林核心期刊A
- 中国生物医学Sino Med

不同贮藏期对鲜切菜山药和铁棍山药货架期品质的影响

田甜,赵雅琦,王清,秦占军,潘媛,时文林,左进华,袁树枝,岳晓珍,封碧红

Effects of Different Storage Periods on the Shelf-life Quality of Fresh-cut Vegetable Yam and Iron Stick Yam

TIAN Tian, ZHAO Yaqi, WANG Qing, QIN Zhanjun, PAN Yuan, SHI Wenlin, ZUO Jinhua, YUAN Shuzhi, YUE Xiaozhen, and FENG Bihong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022110189>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

包装方式对糌粑粉贮藏品质及货架期的影响

Influence of Packaging Method on the Storage Quality and Shelf Life of Zanba

食品工业科技. 2021, 42(22): 321-328 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021030335>

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>

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>

环境因子对扁形绿茶贮藏品质影响研究及货架期预测初探

Effects of Environmental Factors on Storage Quality of Flat Green Tea and Preliminary Study on Shelf Life

食品工业科技. 2020, 41(12): 275-280 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.12.045>

不同包装对冷藏和货架期黑布朗李果实质品质及乙烯释放速率的影响

Effects of different packaging on the quality and ethylene release rate of black plum fruit during cold storage and the subsequent shelf life

食品工业科技. 2017(14): 272-275 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.14.053>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

田甜, 赵雅琦, 王清, 等. 不同贮藏期对鲜切菜山药和铁棍山药货架期品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(18): 387–397. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110189

TIAN Tian, ZHAO Yaqi, WANG Qing, et al. Effects of Different Storage Periods on the Shelf-life Quality of Fresh-cut Vegetable Yam and Iron Stick Yam[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(18): 387–397. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110189

· 贮运保鲜 ·

不同贮藏期对鲜切菜山药和铁棍山药货架期品质的影响

田甜^{1,2}, 赵雅琦^{1,2}, 王清², 秦占军², 潘媛¹, 时文林^{1,2}, 左进华², 袁树枝², 岳晓珍², 封碧红^{1,*}

(1. 广西大学农学院, 广西南宁 530004;

2. 北京市农林科学院农产品加工与食品营养研究所, 农业农村部蔬菜产后处理重点实验室,
果蔬农产品保鲜与加工北京市重点实验室, 北京 100097)

摘要: 本研究以‘长山细毛山药’菜山药及‘河南温县’铁棍山药为试验材料, 研究在 4 °C 贮藏 0、30 和 60 d 对鲜切山药货架期酚类物质含量和褐变关键酶活性的影响。结果表明, 两种鲜切山药褐变指数均随货架期的延长而增大, 但随着贮藏期的延长, 菜山药的褐变指数较低, 而铁棍山药的褐变指数则较高。货架期第 8 d 时, 贮藏 30 d 的鲜切菜山药的褐变指数仅比贮藏 60 d 的低 4.6%, 差异不显著, 而同期的鲜切铁棍山药其褐变指数比贮藏 60 d 的低 8.4%, 差异显著 ($P < 0.05$)。鲜切铁棍山药随着贮藏期和货架期的延长, 其货架期内呼吸速率、乙烯释放量、木质素含量、酚类物质、绿原酸、褐变关键酶活性均增加; 然而, 鲜切菜山药呼吸速率、木质素含量随贮藏期的延长而下降, 褐变关键酶活性随贮藏期的延长而呈先升后降的趋势, 酚类物质货架后期有所上升, 其他指标与铁棍山药的变化规律比较一致。进一步相关性分析表明, 随着贮藏时间的延长, 铁棍山药中酚类物质和酶活性变化较大, 且与褐变指数呈正相关, 而菜山药随着贮藏时间的变化, 褐变指数只与酶活性之间成正相关性。总之, 菜山药更适于鲜切加工, 贮藏 60 d 其鲜切产品货架期可达 8 d, 而铁棍山药贮藏 60 d 鲜切产品货架期只有 4 d。

关键词: 山药, 贮藏期, 鲜切, 褐变, 货架期

中图分类号: TS254.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)18-0387-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110189



本文网刊:

Effects of Different Storage Periods on the Shelf-life Quality of Fresh-cut Vegetable Yam and Iron Stick Yam

TIAN Tian^{1,2}, ZHAO Yaqi^{1,2}, WANG Qing², QIN Zhanjun², PAN Yuan¹, SHI Wenlin^{1,2}, ZUO Jinhua²,
YUAN Shuzhi², YUE Xiaozhen², FENG Bihong^{1,*}

(1. College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Institute of Agricultural Products Processing and Food Nutrition, Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences,
Key Laboratory of Vegetable Post-production Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing Key
Laboratory of Fruit, Vegetable and Agricultural Products Preservation and Processing, Beijing 100097, China)

Abstract: In this study, the effects of storage at 4 °C for 0, 30 and 60 d on the phenolic content and browning key enzyme activities of fresh-cut yam during shelf life were investigated using 'Changshan fine hair yam' vegetable yam and 'Henan Wenxian' iron stick yam as test materials. The results showed that the browning index of both fresh-cut yams increased with the extension of shelf life, but with the extension of storage period, the browning index of vegetable yam was lower, while the browning index of iron stick yam was higher. At the 8th day of shelf period, the browning index of fresh-cut vegetable yam stored for 30 d was only 4.6% lower than that stored for 60 days, with no significant difference, while the browning

收稿日期: 2022-11-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31960618); 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系资助项目 (CARS-23); 北京市农林科学院协同创新中心建设项目 (KJCX201915); 北京市农林科学院青年基金项目 (QNJJ202235)。

作者简介: 田甜 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品贮藏保鲜, E-mail: 2324403542@qq.com。

* 通信作者: 封碧红 (1975-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 园艺产品采后保鲜与生物技术, E-mail: 160390074@qq.com。

index of fresh-cut iron stick yam for the same period was 8.4% lower than that stored for 60 days, and the difference was significant ($P<0.05$). Increase in respiration rate, ethylene release, lignin content, phenolics, chlorogenic acid, and browning key enzyme activities during the shelf life of fresh-cut iron stick yam as storage period and shelf life increased. However, the respiration rate and lignin content of fresh-cut yam decreased with the prolongation of storage period, the browning key enzyme activity showed a rising and then decreasing trend with the prolongation of storage period, and the phenolic substances increased in the late shelf stage, and other indicators were more consistent with the change pattern of iron stick yam. Further correlation analysis showed that the phenolic substances and enzyme activities in iron stick yam varied more with the storage time and were positively correlated with the browning index, while the browning index of vegetable yam varied with the storage time and was only positively correlated with the enzyme activity. In conclusion, vegetable yam was more suitable for fresh-cut processing, and the shelf-life of fresh-cut products can reach 8 days after 60 days of storage, while the shelf-life of fresh-cut product of iron stick yam was only 4 days after 60 d of storage.

Key words: yam; storage period; fresh cut; browning; shelf life

山药(*Dioscorea opposita* Thunb.)又名土薯、山芋等,是薯蓣科、薯蓣属一年或多年生缠绕草质藤本植物的块茎部分,在我国广泛种植。山药富含多种营养物质,除多糖、蛋白质与氨基酸、金属微量元素外,还含有皂苷、多酚、尿囊素等成分^[1],同时山药也是重要药材,在治疗糖尿病、抗肿瘤、保护肝肾功能、免疫调节等方面发挥着重要作用^[2]。因鲜切果蔬干净新鲜、营养卫生且方便快捷,受到越来越多消费者的关注与喜爱。在鲜切加工时,山药的细胞组织结构会遭到不同程度的破坏,暴露于空气中,和氧气结合后,山药鲜切产品会发生一系列生理生化反应,导致其颜色褐变,营养物质流失,商品及食用价值丧失,货架期缩短,限制山药产业的发展^[3]。

目前,关于山药鲜切产品的保鲜研究,主要有物理方法如低温贮藏^[4]、涂膜包装^[5]等;化学方法如 1-甲基环丙烯^[6]等。李佩艳等^[7]发现,0.3% 草酸浸泡处理能够抑制褐变关键酶活性,降低酚类物质含量,从而抑制鲜切山药褐变。马卓云^[8]将鲜切山药置于冰温 4、14 和 25 ℃ 条件下贮藏发现,冰温贮藏可有效延缓鲜切山药褐变速度。低温贮藏是一种有效维持果蔬品质,延长保鲜期的方法。然而关于不同山药品种及贮藏时间对鲜切产品及其货架品质变化规律研究报道不多。

‘长山细毛山药’是中国山药之乡——山东省济宁地区传统的栽培品种,济宁栽培山药的历史悠久,栽培面积为 333.3~400 hm²,年产量 1 万~1.5 万 t^[9]。而铁棍山药是河南省温县特产,被国家质检准为“国家地理标志保护产品”,全县常年种植 3.5 万亩左右,年产值在 20 亿元左右^[10]。因此本试验选择北方典型的两个山药品种‘长山细毛山药’菜山药及‘河南温县’铁棍山药作为试验材料,在 4 ℃ 下贮藏 0 d、30 d 和 60 d,对两个品种山药进行鲜切处理,以筛选出最适合鲜切加工的山药品种及贮藏时间,为山药鲜切加工行业提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

‘长山细毛山药’菜山药 产自山东省滨州市邹平县,4 月种植,9 月收获;‘铁棍山药’ 产自河南省

焦作市温县,3 月种植,11 月收获。选择大小相近、无机械损伤、无病虫害的新鲜菜山药和铁棍山药作为试验材料;浓盐酸、甲醇、冰醋酸 天津市光复科技发展有限公司;愈创木酚、磷酸氢二钠 西陇化工股份有限公司;次氯酸钠、邻苯二酚 国药集团化学试剂有限公司,上述试剂均为分析纯;芦丁(≥98%)标准品 德思特生物技术有限公司;没食子酸(≥98%)标准品 合肥博美生物科技有限责任公司;PE 保鲜塑料袋,40 cm×25 cm,厚度为 0.04 mm 北京鑫雄纸塑包装材料有限公司。

LY-QCJ-GS 高速切菜机 宁波香山绿缘轻工机械制造厂;CR400 色差计 日本 Konica Minolta 公司;UV-1800 紫外分光光度计 上海精密科学仪器有限公司;TGL-20M 高速台式冷冻离心机 湖南湘仪离心机有限公司;F-940 便携式气体分析仪 美国 FELIX 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 山药分组及鲜切加工方法 将山药贮藏于 4 ℃,湿度 80~85% 条件下,用 0.03 mm PE 膜覆盖,分别于贮藏第 0 d、30 d 和 60 d 进行取样鲜切处理^[11]。山药切分处理前用清水洗净后去皮,用高速切菜机切成约 5 mm 厚的圆片。将山药片放入浓度为 0.06% 的次氯酸钠溶液浸泡 2 min 杀菌,用纱布擦去表面水分,然后装入 0.03 mm PE 保鲜袋(长约 43 cm,宽约 27 cm)中,每袋放 9 片,折口包装,贮藏于 4 ℃,相对湿度 80~85% 的条件下 8 d,每 2 d 进行观察、测定呼吸速率、乙烯释放速率和色差等指标,并取样保存于 -80 ℃ 冰箱。每组试验进行 3 次重复。

1.2.2 褐变指数、呼吸强度和乙烯释放量的测定
褐变指数(browning index, BI):用 CR400 色差计测定 L、a 和 b 值,参考 Palou 等^[12]的计算方法如下,

$$BI = [100 \times (x - 0.31)] / 0.172 \quad \text{式 (1)}$$

$$x = \frac{a \pm 1.75L}{5.645L + a - 3.012b} \quad \text{式 (2)}$$

呼吸强度:采用 F-940 便携式气体分析仪测定。将山药切片放入密闭呼吸室,置于 4 ℃ 的冷库中 30 min 后用仪器测定呼吸强度,每组样品重复测

定 3 次。

乙烯释放量测定采用气相色谱法。将约 50 g 山药切片(菜山药约 10 片, 铁棍山药约 30 片)置于 500 mL 的密闭容器中 1 h, 抽取 1 mL 气体, 将气体注入安捷伦 7820A 气相色谱仪中, 将仪器设定为载气压力及流量 0.5 MPa, 30 mL/min, 辅助器压力、流量为氢气压力 0.4 MPa, 检测器室温为 200 °C; 采用无分流的进样方式, 1 min 后打开分流阀。

1.2.3 代谢产物的测定

1.2.3.1 总酚含量的测定 参考 Hagen 等^[13]的方法, 根据 Folin-Ciocalteu 方法测定总酚。将苯酚提取物适当稀释并与 Folin-Ciocalteu 试剂混合, 然后加入碳酸钠(7.5%, w/v)。将混合物在室温下放置 90 min。在 760 nm 波长处测吸光度, 以没食子酸质量浓度为 x(mg/L)、吸光度为 y 制作标准曲线, 得到线性回归方程 $y=0.938x+0.038(R^2=0.9947)$, 总酚含量单位为 mg/g。

1.2.3.2 类黄酮含量的测定 类黄酮含量的测定: 参考徐冬颖等^[14]的方法, 用 1.5 mL 水稀释 0.5 mL 提取液, 并加入 0.5 mL 10%(w/v)氯化铝。适当混合后, 加入 0.1 mL 乙酸钾(1 mol/L)和 2.8 mL 水。室温静置 30 min 后在 510 nm 波长处测吸光度, 以芦丁质量浓度为 x(mg/L)、吸光度为 y 制作标准曲线, 得到线性回归方程为 $y=0.0378x+0.0323(R^2=0.999)$, 单位为 mg/g。

1.2.3.3 酚类物质的测定 各酚类物质的测定: 参考 Xu 等^[15]的方法。取 3.0 g 样品, 加入 3 mL 的甲醇(70%), 超声处理 40 min(40 kHz), 在 10000×g 下离心 15 min。取上清液经 0.22 μm 微孔滤膜过滤, 外标法进行 HPLC 分析。使用 YMC-C₁₈ 色谱柱(250 mm×4.6 mm, 5 μm)进行 HPLC 分析。进样量为 20 μL, 流速为 0.4 mL/min, 柱温 25 °C, 检测波长 280 nm, 流动相为甲醇(A)和 1% 的甲酸水(B)溶液, 梯度洗脱模式: 0~10 min, 75%~60% A; 10~60 min, 60%~40% A; 60~65 min, 40%~75% A, 重复测定 3 次。

1.2.3.4 木质素含量的测定 木质素的测定: 参考 Yin 等^[16]的方法。称取 2.0 g 样品, 加入 95% 乙醇 5 mL, 于 12000×g, 4 °C 条件下离心 20 min, 用 95% 乙醇冲洗沉淀物 3 次, 再用乙醇-己烷(1:2, v/v)冲洗 3 次, 收集沉淀物, 干燥过夜后溶解于 1 mL 含 25% 冰醋酸的溴化乙酰(v/v)溶液, 在 70 °C 条件下温育 30 min, 然后加入 2 mol/L 的 NaOH 溶液 1 mL 终止反应。加入冰醋酸 2 mL 和 7.5 mol/L 的盐酸羟胺, 并将其置于 4 °C, 12000×g 条件下离心 10 min。取上清 500 μL 用冰醋酸稀释 10 倍, 于 280 nm 波长处测定吸光值, 重复测定 3 次。

1.2.4 酶活测定 苯丙氨酸解氨酶(Phenylalanine ammonialyase, PAL)、多酚氧化酶(Polyphenol oxidase, PPO)和过氧化物酶(Peroxidase, POD)的测定:

参考徐冬颖等^[14]的方法。于 290 nm(PAL)、420 nm(PPO)、470 nm(POD)波长处测定吸光值, 重复测定 3 次。将一个 PAL、PPO 活性单位 U 定义为, 每克样品在 1 min 内吸光度增加 0.01 所需的酶量。将一个 POD 活性单位 U 定义为, 在 1 min 内吸光度增加 1 所需的酶量。

肉桂酸-4-羟化酶(Cinnamic acid 4-hydroxylase, C4H)和 4-香豆酰辅酶 A 连接酶(4-Coumaryl coA ligase, 4CL)的测定: 参考范存斐等^[17]的方法。于 340 nm(C4H)、333 nm(4CL)波长处测定吸光值, 重复测定 3 次。C4H、4CL 活性单位 U 定义为, 每克样品在 1 min 内引起吸光度增加 0.01 所需的酶量。

1.3 数据处理

利用软件 SPSS 17.0 对本试验数据进行统计与分析, 并进行显著性差异检验($P<0.05$), 图中数据间的差异性用不同小写字母表示; 利用 Origin 软件作图, 试验重复 3 次。

2 结果与分析

2.1 不同贮藏期对山药鲜切产品外观品质及褐变指数的影响

褐变直接影响鲜切山药的外观品质和商品价值, 褐变指数反映了鲜切产品的褐变程度^[18]。如图 1A 和图 1B 示, 随着鲜切山药货架期的延长, 两个品种的褐变程度加重。贮藏后菜山药鲜切产品的褐变程度较低, 各处理组到第 6 d 为止仍具商品性; 而铁棍山药鲜切产品的褐变程度较高, 贮藏 0 d 和贮藏 30 d, 有效货架期均为 6 d; 贮藏 60 d, 有效货架期为 4 d。

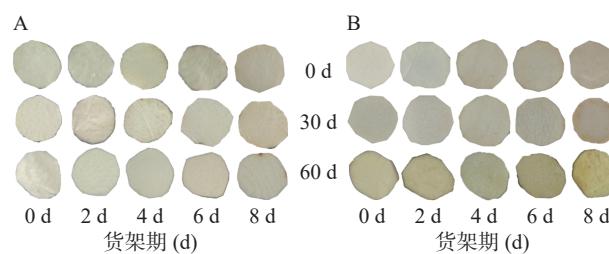


图 1 不同贮藏期对鲜切菜山药(A)和铁棍山药(B)褐变的影响

Fig.1 Effects of different storage stages on browning of fresh-cut vegetable yam (A) and iron stick yam (B)

如图 2A 和图 2B 示, 两个品种鲜切山药货架期的褐变指数均呈上升趋势。贮藏 0 d 菜山药褐变指数显著($P<0.05$)高于另两处理组, 贮藏 30 d 菜山药的褐变指数仅比贮藏 60 d 的低 4.6%, 差异不显著。各处理组菜山药在鲜切山药货架期第 8 d 时, 褐变指数分别上升 11.57%(贮藏 0 d)、48.46%(贮藏 30 d)和 33.60%(贮藏 60 d); 而各处理组铁棍山药在鲜切山药货架期第 8 d 时, 褐变指数分别上升了 62.12%(贮藏 0 d)、61.01%(贮藏 30 d)、45.36%(贮藏 60 d), 各处理组差异显著($P<0.05$), 表明随着贮藏期延长, 菜山药鲜切产品货架期内的褐变程度较低, 铁棍山药

鲜切产品货架期内的褐变程度较高。此外,从两个品种的比较中可以看出,鲜切山药货架期第0 d时两种山药的褐变指数差异不明显,鲜切山药货架期第8 d时,菜山药的褐变指数小于铁棍山药。

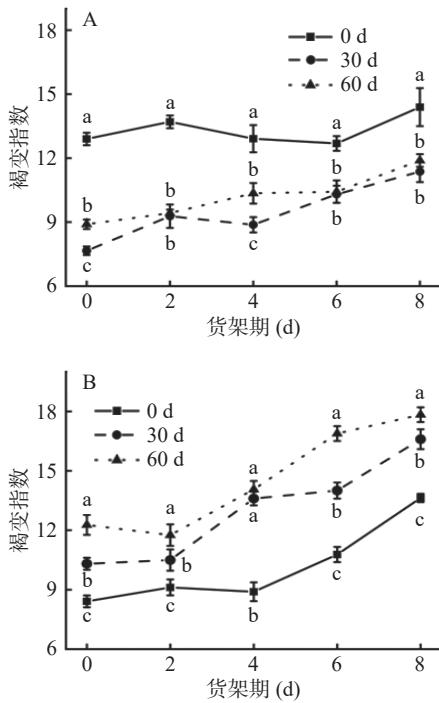


图2 不同贮藏期对鲜切菜山药(A)和铁棍山药(B)褐变指数的影响

Fig.2 Effect of different storage periods on the browning index of fresh-cut vegetable yam (A) and iron stick yam (B)

注:图中a、b、c不同的小写字母表示差异达 $P<0.05$ 显著水平;图3~图7同。

2.2 不同贮藏期对山药块茎鲜切产品呼吸强度、乙烯释放量的影响

呼吸作用消耗营养物质,直接影响鲜切产品营养品质^[19]。如图3A示,贮藏0和30 d的菜山药鲜切山药货架初期呼吸强度大于贮藏60 d的菜山药,随着贮藏期的延长呼吸速率呈先下降后再上升趋势,而60 d贮藏期菜山药呼吸强度则先上升再下降,这可能是因为经过切分处理,山药细胞组织结构遭到破坏,呼吸速率加快,呈现出上升的现象,后低温贮藏抑制了呼吸,且在贮藏过程中呼吸代谢消耗,呈现出下降的现象^[11]。如图3B示,铁棍山药各处理组的呼吸速率呈先下降后上升趋势,鲜切山药货架期2~8 d,贮藏30和60 d的铁棍山药呼吸强度显著大于贮藏期0 d组($P<0.05$)。第8 d货架期时,贮藏0、30及60 d菜山药的鲜切产品呼吸强度分别为51.94、66.01和8.30 mg/(kg·h)。可见菜山药贮藏时间长短与其鲜切产品货架期内呼吸强度未表现出明显相关性。第8 d货架期时,各组铁棍山药的鲜切产品呼吸强度由高到低依次为60、30和0 d,可以推断,与菜山药不同,铁棍山药的呼吸速率随着贮藏时间的延长而增大。

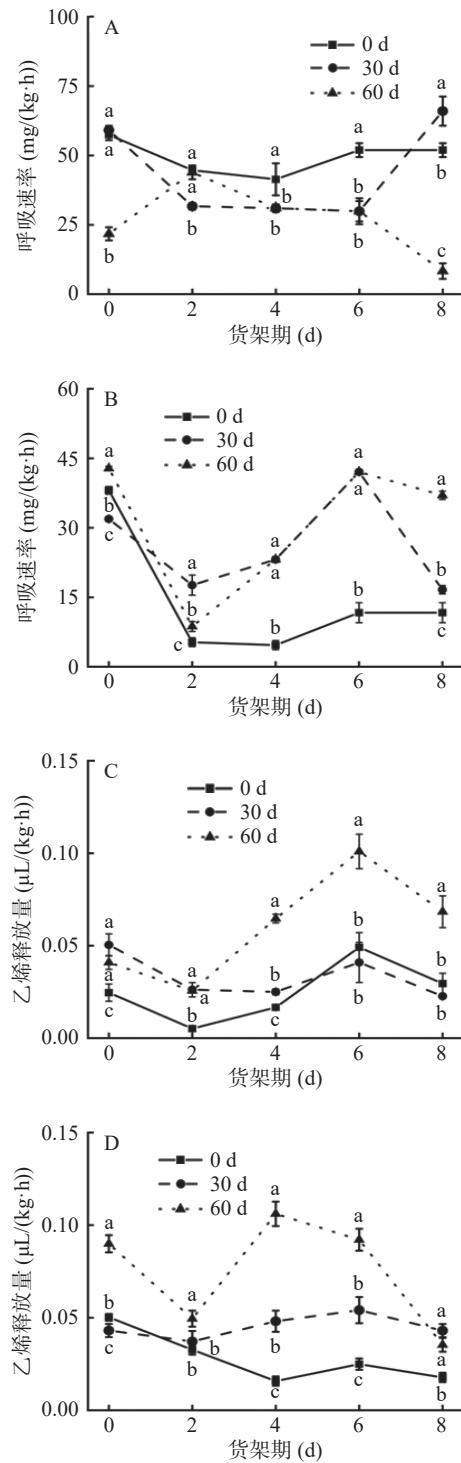


图3 不同贮藏期对鲜切菜山药(A、C)和铁棍山药(B、D)呼吸速率与乙烯释放量的影响

Fig.3 Effects of different storage stages on respiration rate and ethylene release of fresh-cut vegetable yam (A, C) and iron stick yam (B, D)

果蔬受到机械损伤后,会释放大量乙烯,加速产品衰老,降低产品品质^[19]。如图3C和图3D所示,两个品种山药的乙烯释放量均表现为先下降,再上升,然后下降的趋势,其中贮藏30 d铁棍山药的乙烯释放量在货架期内无明显变化,贮藏60 d各处理组表现出较高乙烯释放量且变化剧烈。货架期第8 d时,贮藏0、30和60 d菜山药的鲜切产品乙烯释放

量分别为 0.029 、 0.023 、 $0.068 \mu\text{L}/(\text{kg}\cdot\text{h})$; 铁棍山药鲜切产品各处理组乙烯释放量分别为 0.017 、 0.043 和 $0.035 \mu\text{L}/(\text{kg}\cdot\text{h})$, 相较于鲜切山药货架期 0 d , 各处理组分别下降了 64.60% 、 60.02% 和 60.71% 。总体而言, 经过 60 d 的贮藏处理, 两个品种山药的鲜切产品在货架期内生成较多乙烯, 而贮藏了 0 或 30 d 后, 两个品种山药的鲜切产品乙烯释放量总体上处于一个较低水平。

2.3 不同贮藏期对鲜切山药酚类物质含量影响

在酶的催化下, 酚类物质氧化生成醌, 引起褐变, 直接影响鲜切产品的色泽、风味、品质^[20]。如图 4A 和图 4B 所示, 货架期内, 各组菜山药的鲜切产品总酚含量呈先下降再上升的趋势; 而各组铁棍山药鲜切产品的总酚含量总体呈上升趋势。鲜切产品货架期第 8 d 时, 贮藏 0 d 菜山药的总酚含量最低, 比贮藏 30 d 和 60 d 的分别低 24.63% 和 18.33% ; 贮藏 60 d 铁棍山药的总酚含量比贮藏 0 d 的高 22.85% , 而贮藏 0 d 和贮藏 30 d 的铁棍山药差异不明显。综上所述, 经过一定时间的贮藏, 两个品种山药在鲜切山药货架期内酚类物质含量保持较高水平, 这可能是由于衰老, 次生代谢物不断累积所致^[3]。此外, 从品种间比较可以看出, 菜山药酚类物质的含量总体上低于铁棍山药。

引起山药褐变的酚类物质主要是绿原酸^[21]。从表 1 可知, 两个品种山药含量最高的酚类物质均为绿原酸, 菜山药中未检测到对香豆酸。随着贮藏期的延长, 在鲜切产品货架期第 0 d 时, 菜山药中绿原酸含量在 $3.992\sim4.042 \text{ mg/kg}$ 之间波动, 而铁棍山药中绿原酸含量的变化较大, 且贮藏 60 d 时, 增幅为

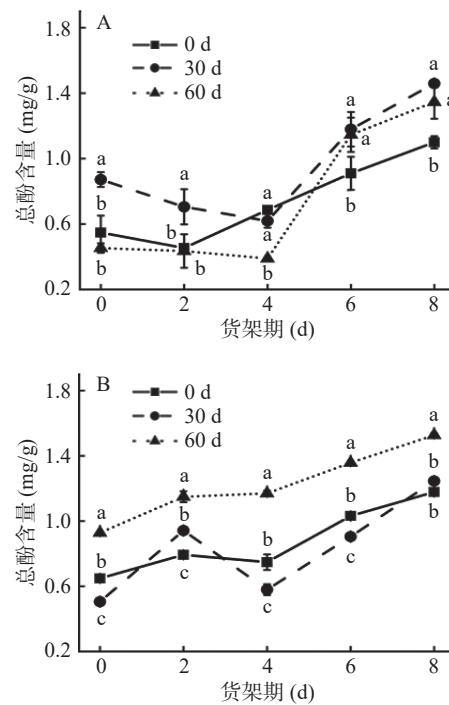


图 4 不同贮藏期对鲜切菜山药(A)和铁棍山药(B)总酚含量的影响

Fig.4 Effects of different storage stages on total phenolics of fresh-cut vegetable yam (A) and iron stick yam (B)

288%, 显著高于菜山药($P<0.05$), 这也与图 1 中两种山药褐变趋势相一致。此外, 在鲜切产品货架期第 0 d , 贮藏 60 d 时铁棍山药中的肉桂酸和没食子酸含量增幅分别为 277% 和 125% , 均显著高于同期的菜山药($P<0.05$), 且菜山药无类似的大幅增加的变化趋势, 由此推测随着贮藏期的延长, 铁棍山药鲜切产品中酚类物质含量变化最为明显。

表 1 不同贮藏期对鲜切菜山药和铁棍山药酚类物质含量的影响

Table 1 Effects of different storage stages on phenolics content of fresh-cut vegetable yam and iron stick yam

编号	酚类种类	贮藏时间	山药品种	不同品种鲜切山药不同货架期各种酚类物质含量(mg/kg)				
				0 d	2 d	4 d	6 d	8 d
1	没食子酸	0 d	菜山药	2.425±0.210 ^a	1.993±0.067 ^b	2.347±0.167 ^b	2.731±0.362 ^b	2.749±0.322 ^a
			铁棍山药	2.403±0.085 ^a	2.579±0.120 ^a	4.501±0.417 ^a	3.380±0.380 ^a	2.583±0.190 ^b
		30 d	菜山药	2.296±0.198 ^b	2.531±0.303 ^b	1.752±0.240 ^b	2.260±0.320 ^b	2.694±0.187 ^b
		60 d	铁棍山药	3.744±0.032 ^a	3.780±0.055 ^a	3.757±0.291 ^a	2.898±0.165 ^a	3.893±0.154 ^a
	儿茶素	0 d	菜山药	3.345±0.090 ^b	3.609±0.097 ^b	4.344±0.105 ^b	3.470±0.160 ^b	3.435±0.140 ^b
			铁棍山药	5.417±0.018 ^a	5.392±0.245 ^a	5.768±0.306 ^a	4.794±0.086 ^a	4.025±0.118 ^a
		30 d	菜山药	1.356±0.051 ^b	1.564±0.064 ^b	3.152±0.086 ^a	2.713±0.144 ^b	2.698±0.134 ^b
2	儿茶素	30 d	铁棍山药	2.578±0.069 ^a	2.176±0.019 ^a	3.152±0.009 ^a	3.481±0.057 ^a	3.303±0.040 ^a
			菜山药	1.603±0.049 ^b	1.870±0.057 ^b	1.980±0.051 ^b	2.677±0.157 ^a	1.828±0.143 ^b
		60 d	铁棍山药	2.491±0.171 ^a	2.822±0.089 ^a	2.791±0.109 ^a	2.326±0.025 ^b	2.868±0.089 ^a
	绿原酸	0 d	菜山药	2.018±0.194 ^b	1.340±0.145 ^b	1.307±0.153 ^b	1.869±0.127 ^b	2.595±0.161 ^b
			铁棍山药	2.315±0.026 ^a	2.103±0.065 ^a	2.324±0.099 ^a	4.335±0.305 ^a	3.554±0.131 ^a
		30 d	菜山药	4.157±0.923 ^a	2.124±0.391 ^b	3.997±0.028 ^a	4.702±0.349 ^a	4.644±0.238 ^b
3	绿原酸	30 d	铁棍山药	1.451±0.021 ^b	3.413±0.099 ^a	3.607±0.013 ^b	3.997±0.028 ^b	5.831±0.086 ^a
			菜山药	3.992±0.657 ^a	4.441±0.326 ^a	3.917±0.288 ^b	4.337±0.525 ^b	5.850±0.231 ^b
		60 d	铁棍山药	3.147±0.078 ^b	4.465±0.122 ^a	4.887±0.210 ^a	5.499±0.125 ^a	6.373±0.279 ^a
			菜山药	4.042±0.209 ^b	3.803±0.300 ^b	3.341±0.095 ^b	4.688±0.345 ^b	5.181±0.159 ^b
			铁棍山药	5.633±0.124 ^a	5.889±0.110 ^a	6.418±0.154 ^a	6.360±0.106 ^a	6.474±0.113 ^a

续表1

编号	酚类种类	贮藏时间	山药品种	不同品种鲜切山药不同货架期各种酚类物质含量(mg/kg)				
				0 d	2 d	4 d	6 d	8 d
4	对羟基苯甲酸	30 d	菜山药	1.245±0.043 ^a	1.685±0.115 ^a	2.495±0.063 ^a	2.565±0.106 ^a	2.498±0.137 ^b
			铁棍山药	1.290±0.021 ^a	1.548±0.029 ^b	2.497±0.053 ^a	2.664±0.028 ^a	2.626±0.084 ^a
			菜山药	1.619±0.155 ^a	1.431±0.109 ^a	1.262±0.137 ^a	1.809±0.156 ^a	2.180±0.131 ^b
		60 d	铁棍山药	0.986±0.094 ^b	0.805±0.063 ^b	0.947±0.056 ^b	1.316±0.023 ^b	2.553±0.043 ^a
			菜山药	1.991±0.171 ^a	1.423±0.086 ^b	2.045±0.144 ^a	1.648±0.151 ^b	1.986±0.110 ^a
			铁棍山药	1.890±0.032 ^a	1.573±0.033 ^a	1.393±0.071 ^b	1.857±0.071 ^a	0.826±0.050 ^b
5	阿魏酸	30 d	菜山药	2.196±0.077 ^b	1.427±0.094 ^b	2.643±0.072 ^b	3.416±0.327 ^b	4.126±0.262 ^a
			铁棍山药	3.013±0.077 ^a	2.243±0.136 ^a	3.460±0.072 ^a	3.915±0.173 ^a	3.641±0.071 ^b
			菜山药	1.196±0.233 ^b	2.716±0.114 ^b	2.785±0.049 ^a	7.219±0.373 ^a	9.652±0.575 ^a
		60 d	铁棍山药	2.784±0.018 ^a	2.887±0.063 ^a	2.683±0.023 ^a	2.997±0.129 ^b	4.365±0.223 ^b
			菜山药	3.598±0.204 ^a	2.035±0.339 ^b	3.425±0.333 ^b	6.821±0.544 ^a	9.275±0.192 ^a
			铁棍山药	3.159±0.018 ^b	2.697±0.067 ^a	4.003±0.411 ^a	3.702±0.254 ^b	3.574±0.386 ^b
6	肉桂酸	30 d	菜山药	0.405±0.124 ^a	0.293±0.038 ^a	0.305±0.019 ^b	0.417±0.022 ^b	0.351±0.029 ^b
			铁棍山药	0.110±0.032 ^b	0.207±0.006 ^b	0.852±0.093 ^a	0.797±0.044 ^a	0.663±0.016 ^a
			菜山药	0.222±0.024 ^a	0.160±0.053 ^b	0.177±0.051 ^b	0.342±0.076 ^b	0.384±0.068 ^b
		60 d	铁棍山药	0.174±0.010 ^b	0.248±0.010 ^a	0.270±0.055 ^a	0.479±0.001 ^a	0.589±0.009 ^a
			菜山药	0.203±0.115 ^b	0.203±0.033 ^a	0.232±0.025 ^a	0.311±0.048 ^b	0.571±0.070 ^b
			铁棍山药	0.415±0.011 ^a	0.228±0.064 ^a	0.204±0.015 ^a	0.506±0.039 ^a	0.621±0.004 ^a
7	对香豆酸	30 d	菜山药	ND	ND	ND	ND	ND
			铁棍山药	0.966±0.071 ^a	0.788±0.006 ^a	1.264±0.051 ^a	1.398±0.010 ^a	1.537±0.047 ^a
			菜山药	ND	ND	ND	ND	ND
		60 d	铁棍山药	0.846±0.004 ^a	0.938±0.026 ^a	0.951±0.004 ^a	0.685±0.006 ^a	1.012±0.099 ^a
			菜山药	ND	ND	ND	ND	ND
			铁棍山药	1.192±0.013 ^a	1.511±0.119 ^a	1.373±0.006 ^a	1.625±0.054 ^a	1.381±0.006 ^a

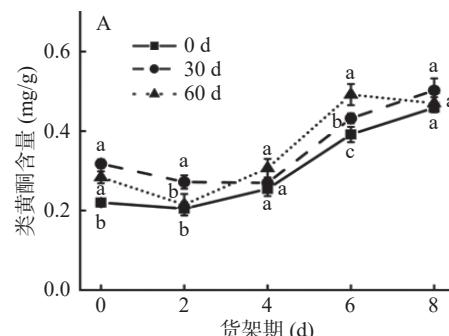
注: ND表示为未检测到(no detection);同一列中不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$)。

2.4 不同贮藏期对鲜切山药类黄酮和木质素含量的影响

黄酮类物质抗氧化活性强,清除活性氧与自由基能力突出,是一种重要的次级代谢物^[22]。如图5A和图5B所示,在鲜切产品货架期内各组菜山药和铁棍山药类黄酮含量均呈上升趋势,但铁棍山药贮藏30 d内呈现出先升高后下降再升高的趋势,可能是因为山药鲜切后,进一步生物合成用于保护作用,导致类黄酮含量上升,又由于山药中微生物发酵产生乳酸,导致pH下降,抑制了类黄酮的合成,再次上升可能是低温诱导鲜切山药中类黄酮的积累^[23]。贮藏期长短对菜山药类黄酮含量的影响不显著($P>0.05$),但贮藏0 d菜山药黄酮类物质含量略低。与菜山药不同,经60 d贮藏处理后,铁棍山药类黄酮含量显著高于另两个处理组($P<0.05$),鲜切产品货架期第8 d时,贮藏0 和30 d铁棍山药类黄酮含量仅相差0.02 mg/g,差异不显著。可见经过一定时间的贮藏处理,两个品种山药在鲜切产品货架期内会累积较多类黄酮,且铁棍山药中类黄酮的含量高于菜山药。

木质素在细胞壁的累积,造成产品木质化,导致产品品质下降^[24]。如图5C示,菜山药各处理组鲜切产品货架期内的木质素含量呈先上升再下降趋势,可能是因为机械损伤会诱导木质素合成,促进木质素的积累,加速组织木质化^[11],后下降可能是因为木质

素生物合成过程中, PAL、POD、PPO三个酶的活性受到了一定的抑制,抑制了木质素的合成^[25]。如图5D示,随着鲜切产品货架期的延长,铁棍山药木质素含量呈上升趋势。菜山药分别于贮藏0 d鲜切产品货架期第6 d、贮藏30 d和鲜切产品60 d货架期第4 d达到峰值。鲜切产品货架期第8 d时,贮藏0、30 和60 d的菜山药木质素含量分别为103.05、79.38 和73.58 mg/g,相较于峰值降了38.26%、40.06% 和40.23%,贮藏0 d菜山药木质素显著高于另两个处理组($P<0.05$);鲜切产品货架期第8 d时,贮藏60 d的铁棍山药与贮藏30 和0 d的相比,木质素含量分别增加了41.78% 和159.51%,各处理组差异显著($P<0.05$)。表明随着贮藏期的延长,菜山药鲜切产品货架期木质素含量降低,铁棍山药鲜切产品货架期内木质素含量上升,木质化程度增加。



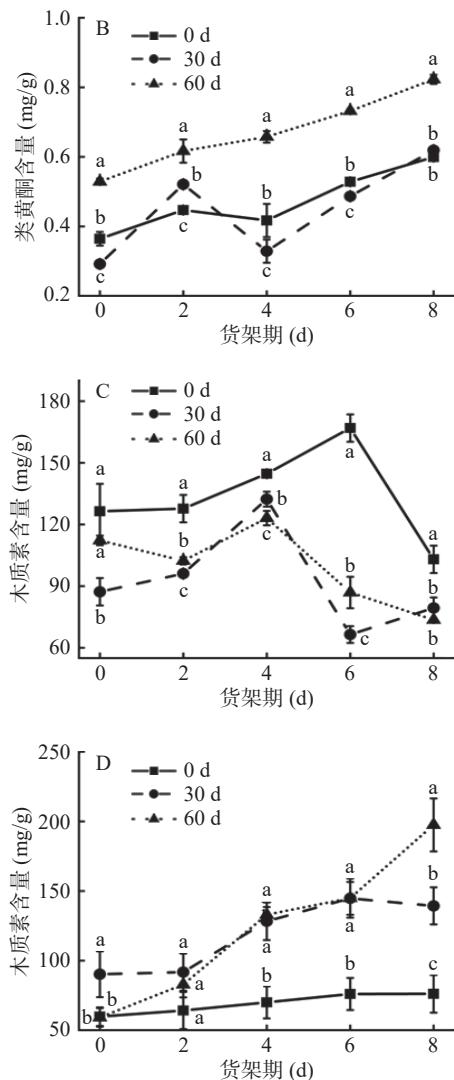


图 5 不同贮藏期对鲜切菜山药(A、C)和铁棍山药(B、D)类黄酮及木质素含量的影响

Fig.5 Effects of different storage stages on flavonoid and lignin contents of fresh-cut vegetable yam (A, C) and iron stick yam (B, D)

2.5 不同贮藏期对鲜切山药货架期褐变相关酶活性的影响

2.5.1 不同贮藏期对鲜切山药货架期 PAL、PPO、POD 活性的影响 植物受到机械损伤后通过苯丙烷代谢产生酚类物质, PAL 是苯丙烷代谢过程中的关键酶^[26]。PAL 将苯丙氨酸分解成反式肉桂酸和黄酮类物质。如图 6A 和图 6B 示, 鲜切产品货架期内两个品种山药的 PAL 活性均呈上升趋势, 与木质素含量变化正相关。贮藏 60 d 铁棍山药的鲜切产品 PAL 活性维持在一个较高水平, 货架期内变化不大。菜山药在鲜切产品货架期第 2 d 时, 各处理组的 PAL 活性无显著差异。鲜切产品货架期第 8 d 时, 贮藏 30 d 的菜山药 PAL 活性分别是贮藏 0 d 和 60 d 的 2.2 和 2.3 倍; 铁棍山药各处理组分别是第 0 d 时 6.25 倍、2.5 倍和 1.3 倍, 说明经过 30 d 贮藏处理, 菜山药鲜切产品在货架期的 PAL 活性得到了有效提高, 贮藏 60 d 后的铁棍山药鲜切产品在货架期

内有较高的 PAL 活性, 促进酚类物质的合成。

PPO 是催化山药发生酶促褐变的重要物质。如图 6C 和图 6D 示, 两个品种山药鲜切产品货架期内 PPO 活性均呈上升趋势。经 60 d 贮藏后, 菜山药的 PPO 活性显著高于贮藏 0 和 30 d ($P<0.05$); 贮藏 0 d 后, 铁棍山药鲜切产品货架期内的 PPO 活性维持在一个较低水平, 整体变化不大。在鲜切产品货架期第 8 d 时, 菜山药各处理组的 PPO 活性分别上升了 0.01、0.05 和 0.06 U; 铁棍山药贮藏 30 和 60 d 的 PAL 活性分别是贮藏 0 d 的 3.5 和 2.4 倍。此外, 比较两个品种可以看出, 菜山药鲜切产品的 PPO 活性整体上低于铁棍山药。

POD 能够和酚类物质反应, 与 PPO 协同作用引起褐变^[27]。如图 6E 示, 菜山药鲜切产品货架期内 POD 活性整体呈上升趋势, 而铁棍山药鲜切产品在货架期内 POD 活性呈先下降再上升, 然后下降的趋势(图 6F)。贮藏 60 d 的菜山药 POD 活性在货架期内处于一个较低水平, 鲜切产品货架期第 8 d 时, 各组菜山药 POD 活性分别为 0.32、0.42 和 0.10 U, 各组间差异显著($P<0.05$)。鲜切产品货架期第 6 d 时, 铁棍山药各处理组 POD 酶活性分别 0.04、0.13 和 0.17 U, 至货架期第 8 d, 各处理组分别下降了 74.05%、39.08% 和 4.21%, 各处理组铁棍山药差异显著($P<0.05$), 可见贮藏期长短对铁棍山药 POD 酶活性的影响显著。

2.5.2 不同贮藏期对山药货架期 C4H、4CL 酶活性的影响 C4H 参与了木质素的合成, 催化肉桂酸转化为木质素单体的前体^[28]。如图 7A 和图 7B 所示, 在鲜切产品货架期内, 两个品种山药的 C4H 活性总体呈上升趋势。贮藏 0 d 铁棍山药的 C4H 活性明显高于另两个处理组($P<0.05$)。菜山药鲜切产品货架期第 2 d 时, 各处理组的 C4H 活性无明显差异, 鲜切产品货架期第 2 d 后, 贮藏 30 d 菜山药 C4H 活性开始剧烈上升, 并于第 6 d 达到峰值, 酶活性为 0.043 U, 至鲜切产品货架期第 8 d 时, 菜山药各处理组的 C4H 活性分别为 0.011、0.030 和 0.026 U。铁棍山药鲜切产品货架期第 8 d 时, 贮藏 0 d 的 C4H 酶活性分别是另两个处理组的 1.3 倍(贮藏 30 d)和 1.5 倍(贮藏 60 d)。表明 30 d 贮藏可有效促进菜山药 C4H 活性上升, 0 d 未贮藏时铁棍山药鲜切产品在货架期内 C4H 活性提高。

4CL 是木质素合成过程中的关键酶, 在木质素合成过程中发挥重要作用^[29]。如图 7C 所示, 在鲜切产品货架期内, 菜山药各处理组 4CL 活性呈上升趋势。如图 7D 示, 铁棍山药贮藏期 30 和 60 d 组整体呈上升趋势, 而 0 d 组则先上升再下降, 这可能与 4CL 参与苯丙烷类代谢物的生物合成有关^[30]。贮藏 30 d 菜山药货架期内 4CL 活性显著低于另两个处理组($P<0.05$), 鲜切产品货架期第 8 d 时, 贮藏 0 和 60 d 的菜山药 4CL 活性仅相差 0.00067 U。铁棍山药鲜

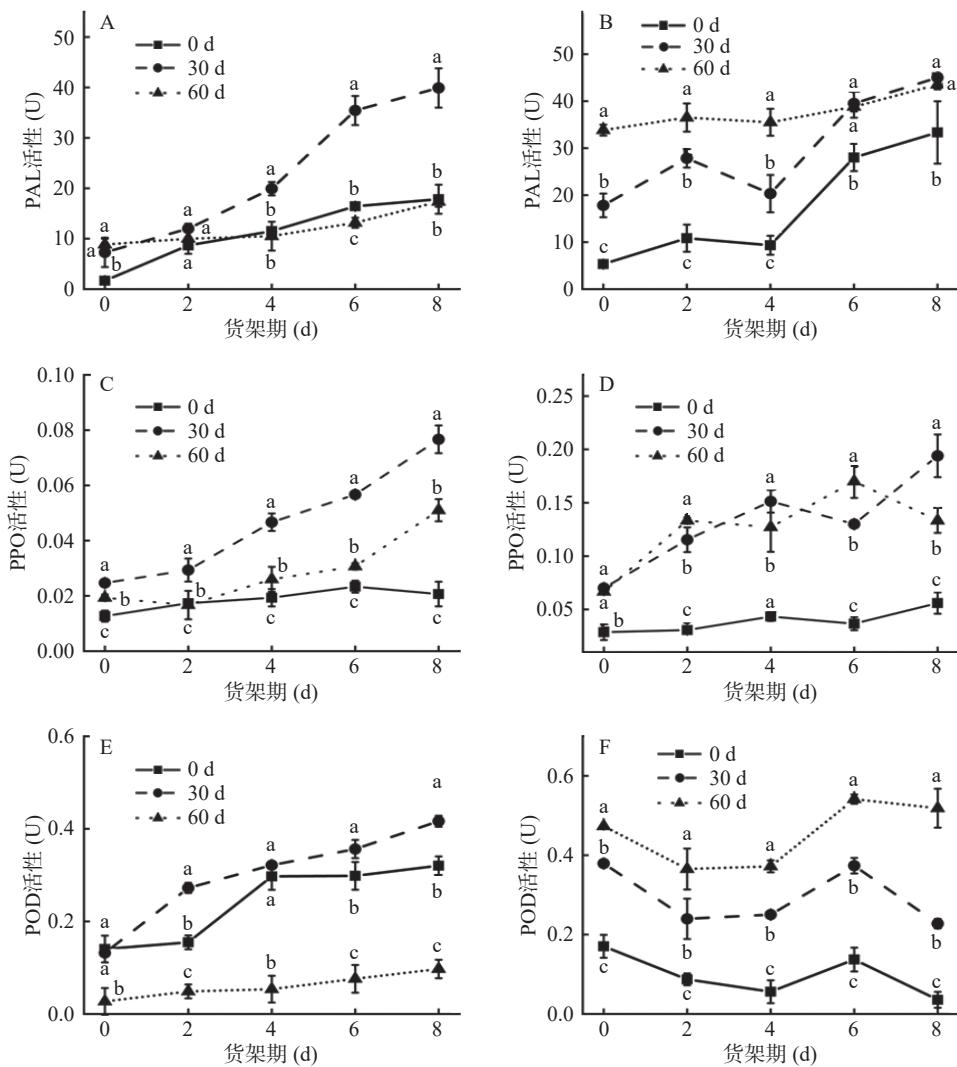


图 6 不同贮藏期对鲜切菜山药(A、C、E)和铁棍山药(B、D、F)PAL、PPO、POD 活性的影响

Fig.6 Effects of different storage stages on PAL, PPO, and POD activity of fresh-cut vegetable yam (A, C, E) and iron stick yam (B, D, F)

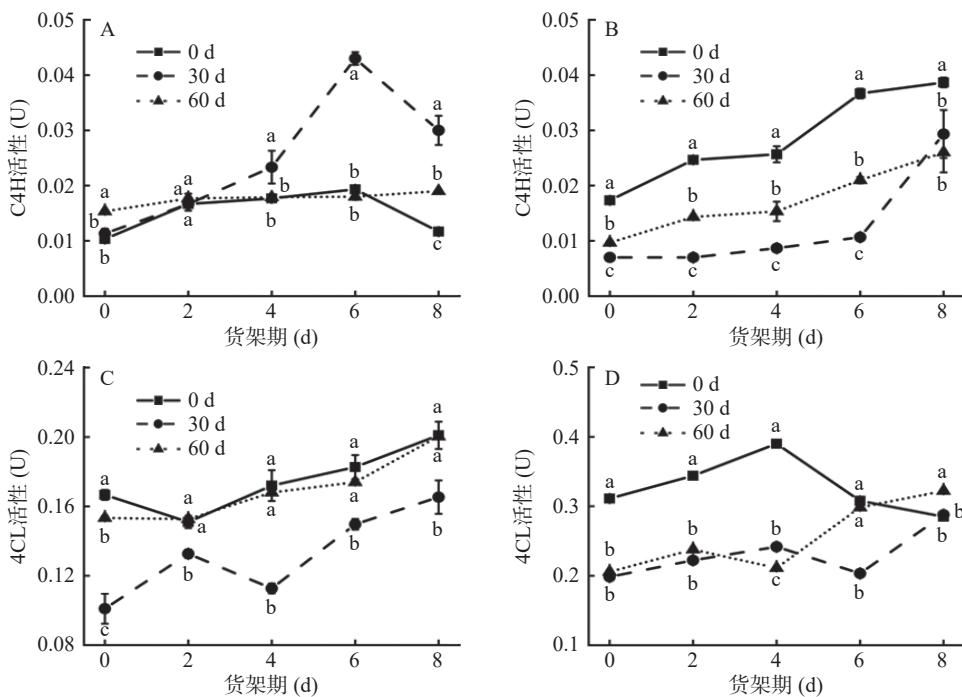


图 7 不同贮藏期对鲜切菜山药(A、C)和铁棍山药(B、D)C4H、4CL 活性的影响

Fig.7 Effects of different storage stages on C4H and 4CL activity of fresh-cut vegetable yam (A, C) and iron stick yam (B, D)

切产品货架期第 4 d 时, 贮藏 0 d 的 4CL 酶活性达到峰值, 此时铁棍山药各处理组酶活性分别为 0.172、0.113 和 0.168 U, 至鲜切产品货架期第 8 d 时, 贮藏 0 d 的铁棍山药酶活性下降了 33.99%, 贮藏 30 d 和 60 d 的铁棍山药酶活性分别上升了 28.58% 和 6.14%。此外, 从两个品种间对比发现, 菜山药的 4CL 酶活性显著低于铁棍山药。

2.6 不同贮藏期鲜切山药各指标皮尔森相关性矩阵

通过对不同处理组的各项指标相关性分析发现, 不同品种山药经过不同时间贮藏处理后各项指标

相关性差异较大。随着贮藏时间的延长, 贮藏 30 d 菜山药的鲜切产品褐变指数与 4CL 活性、阿魏酸含量呈极显著正相关($P<0.01$), 与 PAL、PPO、POD 活性呈显著正相关($P<0.05$)(图 8C); 贮藏 60 d 菜山药的鲜切产品褐变指数与木质素含量、4CL 活性呈极显著正相关($P<0.05$)(图 8E)。与菜山药相比, 铁棍山药的变化情况不同, 贮藏 0 d 铁棍山药的鲜切产品褐变指数与总酚、类黄酮含量呈极显著正相关($P<0.01$), 与 C4H、PAL、PPO 活性及绿原酸、对香豆酸含量呈显

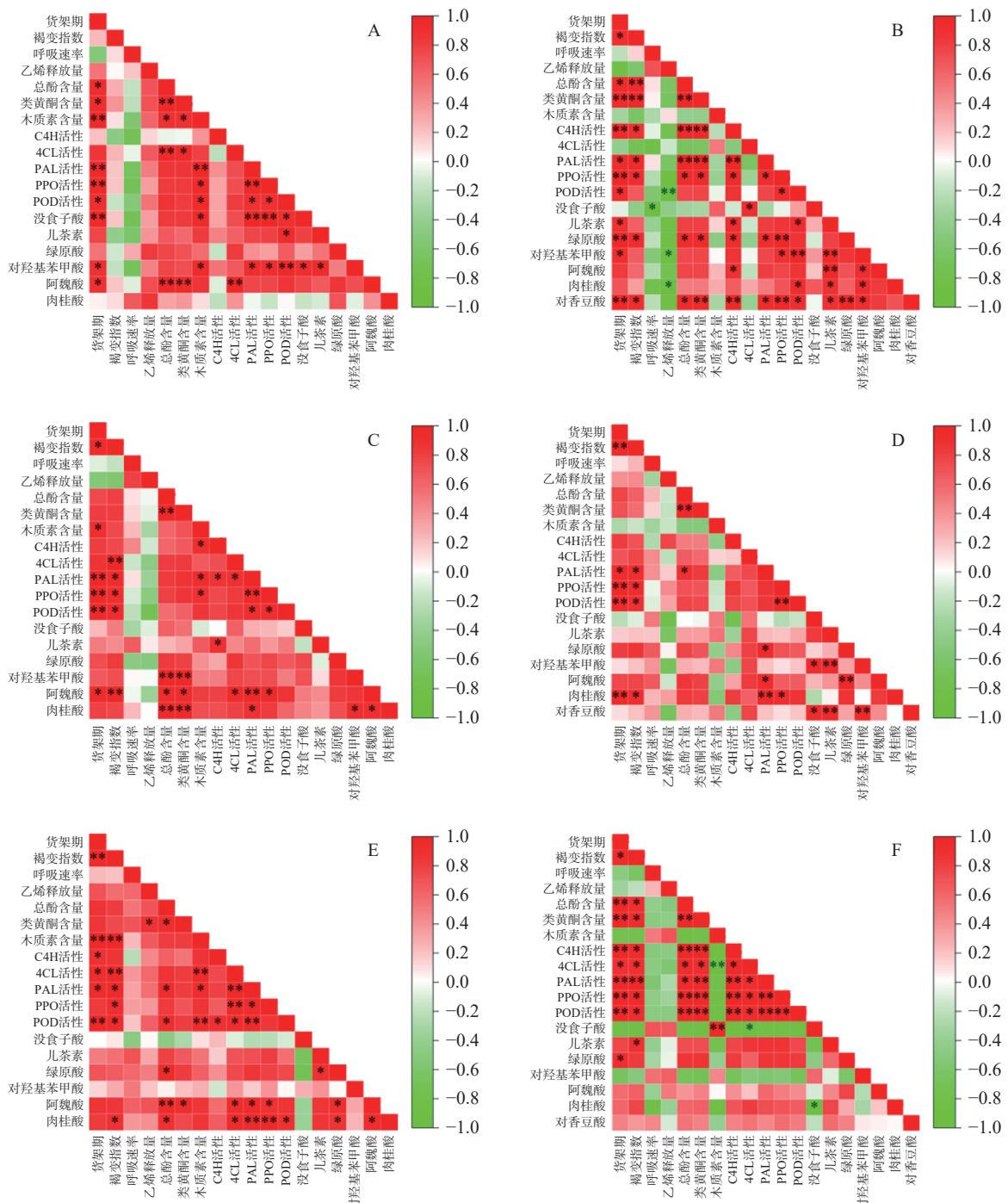


图 8 菜山药(A-0 d, C-30 d, E-60 d)和铁棍山药(B-0 d, D-30 d, F-60 d)各指标皮尔森相关性矩阵

Fig.8 Pearson correlation matrix of each indicator of vegetable yam (A-0 d, C-30 d, E-60 d) and iron stick yam (B-0 d, D-30 d, F-60 d)

注: *表示显著相关($P<0.05$); **表示极显著相关($P<0.01$)。

著正相关($P<0.05$)(图 8B), 贮藏 30 d 铁棍山药的鲜切产品褐变指数与 PAL、PPO、POD 及肉桂酸含量呈显著正相关($P<0.05$)(图 8D); 贮藏 60 d 铁棍山药的鲜切产品褐变指数与总酚、类黄酮含量呈极显著正相关($P<0.01$), 与 C4H、PAL、PPO 活性及绿原素、对香豆酸含量呈显著正相关($P<0.05$)(图 8F)。综上可知, 随着贮藏时间的延长, 铁棍山药中酚类物质和酶活性变化较大, 且与褐变指数呈正相关; 而菜山药随着贮藏时间的变化, 褐变指数只与酶活性之间成正相关性。

3 讨论与结论

山药鲜切加工后色泽、质地的变化, 导致营养品质下降, 商品价值降低, 货架期缩短^[3]。本试验测定了不同贮藏期两个典型山药品种在鲜切产品 8 d 货架期内的褐变程度, 发现随着贮藏期的延长, 菜山药鲜切产品的褐变程度较低; 而贮藏后铁棍山药鲜切产品的褐变程度较高。此外, 通过对两个品种山药发现, 货架前期, 菜山药和铁棍山药的褐变指数差异不明显, 随着货架期延长, 菜山药的褐变速度低于铁棍山药, 说明随着贮藏时间的延长, 菜山药的鲜切产品能够在货架期内更好的维持其外观品质。

酚类物质是果蔬褐变的底物, 山药因鲜切加工而受到机械损伤, 酚类底物发生氧化褐变, 严重影响产品品质^[31]。有研究表明, 引起山药发生褐变的关键酚类底物是绿原酸^[21], 本试验发现绿原素是山药鲜切片中含量最高的酚类物质, 两个品种山药各贮藏时间的绿原酸含量均与总酚含量表现出正相关, 进一步从底物角度说明山药发生褐变的原因与绿原酸关系密切, 且随着贮藏时间的延长, 铁棍山药中绿原酸含量的变化高于菜山药, 这可能是铁棍山药褐变程度高于菜山药的原因之一。

鲜切加工导致果蔬细胞结构被破坏, 诱发山药组织合成酚类物质, 酚类物质发生酶促氧化是褐变现象发生的重要原因^[32]。本试验测定了不同贮藏期的菜山药和铁棍山药在货架期内多种酶活性, 结果表明两个品种山药鲜切产品的褐变指数与酶活性表现出较强相关性。随着贮藏时间的延长, 菜山药贮藏 60 d 后表现出较低的褐变关键酶活性, 这可能是其鲜切产品酚类物质含量变化小于铁棍山药的主要原因, 从而导致其褐变程度低于铁棍山药。

综上, 随着贮藏时间的延长, 不同品种山药其鲜切产品褐变的程度也不同, 菜山药的褐变指数较低, 而铁棍山药的褐变指数则较高。鲜切铁棍山药随着贮藏期和货架期的延长, 其货架期内呼吸速率、乙烯释放量、木质素含量、酚类物质、绿原酸和褐变关键酶活性均增加; 然而, 鲜切菜山药呼吸速率、木质素含量随贮藏期的延长而下降, 褐变关键酶活性随贮藏期的延长而呈现出先升后降的趋势, 酚类物质货架后期有所上升, 其他指标与铁棍山药的变化规律比较一致。本研究发现菜山药鲜切产品酚类物质含量和褐

变关键酶活性总体上低于铁棍山药, 鲜切产品的褐变速度和严重程度低于铁棍山药, 菜山药是更适合作为鲜切加工的山药品种, 贮藏 60 d 其鲜切产品货架期可达 8 d, 而铁棍山药贮藏 60 d 鲜切产品货架期只有 4 d。

参考文献

- [1] 梁杉, 王琨, 刘佩瑶, 等. 山药多糖结构、生物活性及其机制研究进展[J/OL]. 食品科学: 1–14 [2022-04-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20220310.1301.016.html>. [LIANG Shan, WANG Kun, LIU Peiyao, et al. Research progress on the structure, biological activity and mechanism of yam polysaccharides [J/OL]. Food Science: 1–14 [2022-04-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20220310.1301.016.html>.]
- [2] 范晓阳, 候彦婕, 贾世艳, 等. 山药化学成分及皂苷类成分药理作用的研究进展[J]. 中医药信息, 2021, 38(9): 79–84. [FAN Xiaoyang, HOU Yanjie, JIA Shiyan, et al. Research progress on the pharmacological effects of the chemical constituents and saponins of Chinese yam[J]. Information on Traditional Chinese Medicine, 2021, 38(9): 79–84.]
- [3] 王梅. 鲜切山药天然保鲜技术研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2017. [WANG Mei. Research on natural fresh-keeping technology of fresh cut Chinese yam [D]. Guiyang: Guizhou University, 2017.]
- [4] 胡丽莎, 王艳颖, 蒋元元, 等. 不同温度下真空包装对鲜切马铃薯贮藏品质的影响[J]. 现代园艺, 2018(21): 24–26. [HU Lisha, WANG Yanying, JIANG Yuanyuan, et al. The effect of vacuum packaging on the storage quality of fresh cut potatoes at different temperatures[J]. Modern Horticulture, 2018(21): 24–26.]
- [5] ZHANG G J, GU L B, LU Z F, et al. Browning control of fresh-cut Chinese yam by edible coatings enriched with an inclusion complex containing star anise essential oil[J]. RSC Advances, 2019 (9): 5002–5008.
- [6] 苑宁, 寇莉萍. 1-MCP 处理对鲜切山药贮藏品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2011, 32(9): 205–209. [YUAN Ning, KOU Liping. 1-Effect of MCP treatment on storage quality of fresh cut Chinese yam[J]. Food Research and Development, 2011, 32(9): 205–209.]
- [7] 李佩艳, 党东阳, 尹飞. 草酸对鲜切山药贮藏保鲜的影响[J]. 河南农业科学, 2020, 49(7): 168–173. [LI Peian, DANG Dongyang, YIN Fei. Effect of oxalic acid on fresh cut yam storage[J]. Henan Agricultural Science, 2020, 49(7): 168–173.]
- [8] 马卓云, 于潇潇, 杨舒乔, 等. 冰温贮藏对鲜切山药品质的影响及货架期的预测[J]. 农产品加工, 2021(2): 4–9. [MA Zhuoyun, YU Xiaoxiao, YANG Shuqiao, et al. Effect of ice temperature storage on the quality of fresh cut yams and prediction of shelf life[J]. Agricultural Product Processing, 2021(2): 4–9.]
- [9] 刘少军, 王云, 姚甜甜, 等. 邹平长山细毛山药优质栽培技术[J]. 种子科技, 2018, 36(12): 57–58. [LIU Shaojun, WANG Yun, YAO Tiantian, et al. High quality cultivation technology of Zouping Changshan fine hair yam[J]. Seed Science and Technology, 2018, 36(12): 57–58.]
- [10] 李汉儒. 温县铁棍山药种植户生产经营行为研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2022. [LI Hanru. Research on the production and management behavior of the farmers of Tiebang yam in Wen County [D]. Guiyang: Guizhou University, 2022.]
- [11] 徐超, 赵雅琦, 王清, 等. 不同贮藏期马铃薯块茎鲜切后货架品质变化规律[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(9): 208–215. [XU

- Chao, ZHAO Yaqi, WANG Qing, et al. The law of shelf quality change of potato tubers after fresh cutting in different storage periods[J]. Food and Fermentation Industry, 2022, 48(9): 208–215.]
- [12] PALOU E, LOPEZ-MALO A, BARBOSA-CANOVAS G V, et al. Polyphenoloxidase activity and color of blanched and high hydrostatic pressure treated banana puree[J]. *Journal of Food Science*, 1999, 64(1): 42–45.
- [13] HAGEN S F, BORGE G I A, BENGTSSON G B, et al. Phenolic contents and other health and sensory related properties of apple fruit (*Malus domestica* Borkh., cv. Aroma): Effect of postharvest UV-B irradiation[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2007, 45(1): 1–10.
- [14] 徐冬颖, 周福慧, 蒋海峰, 等. 真空包装结合避光处理对鲜切马铃薯的品质影响[J]. 食品科学, 2020, 41(13): 184–192. [XU Dongying, ZHOU Fuhui, JIANG Haifeng, et al. The effect of vacuum packaging combined with shading treatment on the quality of fresh cut potatoes[J]. Food Science, 2020, 41(13): 184–192.]
- [15] XU D, GU S, ZHOU F, et al. Mechanism underlying sodium isoascorbate inhibition of browning of fresh-cut mushroom (*Agaricus bisporus*)[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 173: 111357.
- [16] YIN Y, BI Y, LI Y, et al. Use of thiamine for controlling *Alternaria alternata* postharvest rot in Asian pear (*Pyrus bretschneideri* Rehd. cv. Zaosu)[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2012, 47(10): 2190–2197.
- [17] 范存斐, 毕阳, 王云飞, 等. 水杨酸对厚皮甜瓜采后病害及苯丙烷代谢的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(3): 584–589. [FAN Cunfei, BI Yang, WANG Yunfei, et al. Effects of salicylic acid on post harvest diseases and phenylpropane metabolism of thick skinned muskmelon[J]. China Agricultural Sciences, 2012, 45(3): 584–589.]
- [18] 王锋, 杨青珍, 赵旗峰, 等. 外源褪黑素对甜樱桃果实褐变和品质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(5): 340–347. [WANG Feng, YANG Qingzhen, ZHAO Qifeng, et al. Effect of exogenous melatonin on browning and quality of sweet cherry fruit[J]. Food Industry Science and Technology, 2022, 43(5): 340–347.]
- [19] ZHANG Z, GAO W, WANG R, et al. Changes in main nutrients and medicinal composition of Chinese yam (*Dioscorea opposita*) tubers during storage[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2014, 51(10): 2535–2543.
- [20] 钱井, 满杰, 韦强, 等. UV-C 和超声波处理对鲜切山药的保鲜效果[J]. 食品与机械, 2022, 38(1): 123–128. [QIAN Jing, MAN Jie, WEI Qiang, et al. The fresh-keeping effect of UV-C and ultrasonic treatment on fresh cut yams[J]. Food and Machinery, 2022, 38(1): 123–128.]
- [21] 李山林, 张雁, 廖娜, 等. 淮山褐变机理及其控制技术研究进展 [J/OL]. 食品工业科技: 1–14 [2022-03-18]. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021070184. [LI Shanlin, ZHANG Yan, LIAO Na, et al. Research progress on browning mechanism and control technology in huashan[J/OL]. Food Industry Science and Technology: 1–14 [2022-03-18]. doi:10.13386/j.issn1002-0306.2021070184.]
- [22] 方玉梅, 韩世明. 刺梨根、茎、叶中黄酮的抗氧化活性[J]. 北方园艺, 2021(14): 51–54. [FANG Yumei, HAN Shiming. Antioxidant activity of flavonoids in roots, stems and leaves of *Rosa roxburghii*[J]. Northern Horticulture, 2021(14): 51–54.]
- [23] 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.
- [24] QI X, JI Z, LIN C, et al. Nitric oxide alleviates lignification and softening of water bamboo (*Zizania latifolia*) shoots during postharvest storage[J]. *Food Chemistry*, 2020, 332: 127416.
- [25] 黄程前. 鲜切毛竹笋生理生化变化及保鲜技术研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2014. [HUANG Chengqian Study on Physiological and biochemical changes and fresh keeping techniques of fresh cut moso bamboo shoots[D]. Hangzhou: Zhejiang Agriculture and Forestry University, 2014.]
- [26] 邵文俊, 胡文忠, 姜爱丽, 等. 鲜切果蔬次生代谢产物合成的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2016, 37(18): 362–366. [SHAO Wenjun, HU Wenzhong, JIANG Aili, et al. Research progress on synthesis of secondary metabolites of fresh cut fruits and vegetables[J]. Food Industry Science and Technology, 2016, 37(18): 362–366.]
- [27] TEOH L S, LASEKAN O, ADZAHAN N M, et al. The effect of combinations of UV-C exposure with ascorbate and calcium chloride dips on the enzymatic activities and total phenolic content of minimally processed yam slices[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 120: 138–144.
- [28] 丁霄, 曹彩荣, 李朋波, 等. 植物木质素的合成与调控研究进展 [J]. 山西农业科学, 2016, 44(9): 1406–1411. [DING Xiao, CAO Cairong, LI Pengbo, et al. Research progress in synthesis and regulation of plant lignin[J]. Shanxi Agricultural Science, 2016, 44(9): 1406–1411.]
- [29] 田晓明, 颜立红, 向光锋, 等. 植物 4-香豆酸:辅酶 A 连接酶研究进展 [J]. 生物技术通报, 2017, 33(4): 19–26. [TIAN Xiaoming, YAN Lihong, XIANG Guangfeng, et al. Research progress of plant 4-coumaric acid:coenzyme A ligase[J]. Biotechnology Bulletin, 2017, 33(4): 19–26.]
- [30] 冯岩岩, 王庆国. 高能电子束辐照对鲜切牛蒡贮藏品质和褐变的影响[J]. 保鲜与加工, 2013, 13(5): 29–33. [FENG Yanyan, WANG Qingguo. Effects of high-energy electron beam irradiation on the storage quality and browning of fresh cut burdock[J]. Preservation and Processing, 2013, 13(5): 29–33.]
- [31] ZHAO L, WANG D, MA Y, et al. Yellow pigment formation, pigment composition, and quality of fresh-cut yam (*Dioscorea opposita*) slices[J]. Royal Society of Chemistry, 2020, 10: 1104–1113.
- [32] 郁志芳, 彭贵霞, 夏志华, 等. 鲜切山药酶促褐变机理的研究 [J]. 食品科学, 2003(5): 44–49. [YU Zhifang, PENG Guixia, XIA Zhihua, et al. Study on the mechanism of enzymatic browning of fresh cut Chinese yam[J]. Food Science, 2003(5): 44–49.]