

油菜素唑对鲜切马铃薯酶促褐变的抑制作用

邓孟胜, 谢灵鸿, 温颖颖, 欧团魁, 孙文奥, 李慧娜, 章兴勇, 李东*
(四川轻化工大学生物工程学院, 四川宜宾 644000)

摘要: 为探究油菜素内酯 (Brassinolide, BR) 合成抑制剂油菜素唑 (Brassinazole, BRZ) 对鲜切马铃薯酶促褐变的作用效果, 该实验以不同摩尔浓度 (20、40、60 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) BRZ 溶液浸泡处理鲜切马铃薯丝, 测定马铃薯在贮藏中色泽、多酚氧化酶、总酚、抗氧化酶等指标变化。结果表明: 贮藏期间, 40 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ BRZ 处理对鲜切马铃薯褐变抑制效果最佳, ΔE 比对照组降低了 39.10%~53.31%, 至 24 h 时处理组内源 BR 含量比对照组降低了 5.14%。处理组鲜切马铃薯呼吸强度和失水率显著低于空白组 ($P<0.05$), 并抑制了鲜切马铃薯多酚氧化酶、苯丙氨酸解氨酶活性, 促进了鲜切马铃薯中总酚积累; 其次, BRZ 处理增强了马铃薯过氧化物酶、超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、抗坏血酸过氧化物酶活性, 降低了鲜切马铃薯过氧化氢积累, 抑制了相对电导率的增加和丙二醛的产生。综上, 40 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ BRZ 处理通过降低内源 BR 含量, 促进鲜切马铃薯酚类积累、调控相关酶活等, 抑制酶促褐变反应, 有效维持了鲜切马铃薯良好的品质, 为鲜切果蔬酶促褐变抑制剂的开发提供理论支撑。

关键词: 鲜切马铃薯; 油菜素唑; 酶促褐变; 酚类物质; 抗氧化; 品质
文章编号: 1673-9078(2026)03-145-152 **DOI:** 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.3.1913

Inhibitory Effect of Brassinazole on the Enzymatic Browning of Fresh-cut Potatoes

DENG Mengsheng, XIE Linghong, WEN Yingying, OU Tuankui, SUN Wen'ao, LI Huina, ZHANG Xingyong, LI Dong*
(School of Biological Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Yibin 644000, China)

Abstract: To investigate the effects of brassinazole (BRZ), a brassinolide (BR) synthesis inhibitor, on the enzymatic browning of fresh-cut potatoes, shredded fresh-cut potatoes were soaked in BRZ solutions with varying concentrations (20, 40, and 60 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$). Thereafter, changes in indicators, such as color, polyphenol oxidase, total phenols, moisture, and antioxidant enzymes, in potatoes were measured during storage. Results showed that treatment with 40 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ BRZ solution had the best inhibitory effect on the browning of fresh-cut potatoes during storage, with the ΔE reducing by 39.10%~53.31% compared to that of the control group. Following 24 h of storage, endogenous BR content in the treated groups was reduced by 5.14% compared to that of the control group. The respiratory intensity and water loss rate of fresh-cut potatoes in the treated groups were significantly lower than those in the control group. BRZ treatment also inhibited polyphenol oxidase and phenylalanine ammonia-lyase activity and promoted the accumulation of total phenols in fresh-cut potatoes. In addition, BRZ treatment enhanced peroxidase, superoxide dismutase, catalase, and ascorbate peroxidase activity in potatoes, reduced the accumulation of hydrogen peroxide in fresh-cut potatoes, and inhibited increases in the relative electrical conductivity and production of malondialdehyde. In conclusion, the results showed that treatment with 40 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ BRZ solution effectively inhibited the enzymatic browning of potatoes by reducing the endogenous BR content,

引文格式:
邓孟胜, 谢灵鸿, 温颖颖, 等. 油菜素唑对鲜切马铃薯酶促褐变的抑制作用[J]. 现代食品科技, 2026, 42(3): 145-152.
DENG Mengsheng, XIE Linghong, WEN Yingying, et al. Inhibitory effect of brassinazole on the enzymatic browning of fresh-cut potatoes [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(3): 145-152.

收稿日期: 2024-12-24 ; 修回日期: 2025-04-18 ; 接受日期: 2025-04-28
基金项目: 四川省自然科学基金项目 (2022NSFSC1698) ; 四川轻化工大学研究生创新基金项目 (Y2023253) ; 四川轻化工大学研究生创新基金项目 (Y2024191)
作者简介: 邓孟胜 (1989-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 果蔬保鲜, E-mail : Dsqc87@suse.edu.cn
通讯作者: 李东 (1982-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 果蔬保鲜, E-mail : 4469344@qq.com

promoting the accumulation of phenolics, and regulating browning-related enzyme activities, thereby effectively maintaining the quality of fresh-cut potatoes. This study provides a theoretical basis for the development of enzymatic browning inhibitors for fresh-cut fruit and vegetables.

Key words: fresh-cut potato; brassinazole; enzymatic browning; phenols; antioxidant; quality

马铃薯又名土豆, 富含碳水化合物、蛋白质、维生素等营养物质, 是我国重要的粮蔬兼用作物^[1]。鲜切马铃薯因其易于加工、营养丰富等特点, 深受消费者的喜爱^[2]。然而, 马铃薯在鲜切后快速褐变, 容易导致加工和贮运过程中品质与安全性降低。

酶促褐变主要是酚类底物在多酚氧化酶 (Polyphenol Oxidase, PPO) 等氧化酶作用下发生氧化并聚合, 最终形成黑色素的过程^[3]。研究表明, 减少绿原酸、酪氨酸等酚类的利用, 可以显著延缓果蔬的酶促褐变过程, González 等^[4]应用 CRISPR/Cas9 突变马铃薯 *PPO2* 基因, 降低 PPO 催化利用酚类的活性, 有效抑制表面褐变; 另外, 改变过氧化物酶 (Peroxidase, POD)、苯丙氨酸解氨酶 (L-phenylalanine Ammonialyase, PAL) 等酚类代谢相关酶活性均能影响褐变^[5]。另一方面, 鲜切导致果蔬组织内活性氧积累, 进而破坏细胞结构、并产生丙二醛 (Malondialdehyde, MDA) 等物质, 而通过降低内源活性氧水平, 可以维持细胞的完整性, 从而阻止酚类物质与 PPO、POD 等酶接触反应, 进一步延缓酶促褐变的过程^[6]。

目前, 鲜切马铃薯酶促褐变的抑制方法主要分为化学、物理方法, 化学抑制剂相比于物理方法具有方便、成本较低、保鲜时间长等特点^[7]。研究报道, 油菜素内酯是一类多羟基类固醇, 作为植物生长调节剂常被用于植物中, 被称为第六大植物激素^[8]。Han 等^[9]发现 BR 促进了马铃薯块茎创面木质素和木质素多酚的积累, 并有效地降低了马铃薯块茎的失重率。单国雷等^[10]研究表明 2,4-表油菜素内酯降低了辣椒果实的 MDA 含量和总抗氧化能力。油菜素唑 (Brassinazole, BRZ) 是一种植物生长调节剂, 能够特异性抑制内源油菜素内酯 (Brassinolide, BR) 合成, 调控植物抗氧化性、细胞膜完整性等^[11]。研究发现 BRZ 能够降低马铃薯芽组织的 BR 含量, 调控超氧化物歧化酶 (Superoxide Dismutase, SOD)、POD 以及过氧化氢酶 (Catalase, CAT) 活性, 并降低过氧化氢 (Hydrogen Dioxide, H_2O_2) 含量^[12]。根据 BRZ 对 BR 的抑制作用, 推测 BRZ 能够影响果蔬酶促褐变反应, 因此有必要进一步分析 BRZ 对果蔬酶促褐变的影响, 并揭示其调控酶促褐变的功能机制。该研究针对鲜切马铃薯酶促褐变问题, 分析不同摩尔浓度 BRZ 对鲜切马铃薯色泽的

差异, 并进一步分析 BRZ 处理鲜切马铃薯在贮藏期间各项指标变化, 以延缓鲜切马铃薯酶促褐变及维持良好的贮藏品质。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

马铃薯块茎 (荷兰 15 号), 购买于宜宾市蓉戎超市, 挑选无发芽、无绿变、大小均匀、无病虫害、无机械损伤的块茎进行试验。

油菜素唑, 北京酷来搏科技有限公司; 交联聚乙烯吡咯烷酮, 上海源叶生物科技有限公司; 丙酮、巯基乙醇、硼酸、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠、没食子酸、三氯甲烷, 上海麦克林生化科技有限公司; 愈创木酚, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 福林酚, 上海蓝季科技发展有限公司; 30% 过氧化氢, 成都市金山化学试剂有限公司; 无水碳酸钠、盐酸, 成都市科隆化学有限公司; 苯丙氨酸, 上海易恩化学技术有限公司; 植物油菜素内酯 ELISA 试剂盒, 北京华博德亿生物技术有限公司; 过氧化氢含量检测试剂盒, 上海吉至生化科技有限公司; 超氧化物歧化酶试剂盒, 北京索莱宝生物科技有限公司; 所有试剂及药品均为国产分析纯。

N5000PLUS 紫外-可见分光光度计, 上海佑科仪器仪表有限公司; TG16 高速离心机, 上海卢湘仪离心机仪器有限公司; YH-100001 电子天平, 五鑫衡器有限公司; DZKW-4 电热恒温水浴锅, 北京中兴伟业世纪仪器有限公司; YL31201903044 实验室 pH 计, 上海佑科仪器仪表有限公司; UltraScanVIS 台式色差仪, HunterLab; DDSJ-307F 雷磁电导率仪, 上海仪电科技有限公司; Micro Pod 小果蔬采后监测系统, 图拉扬科技有限公司; PC-16A 水分测定仪, 上海浦春计量仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 试验设计

油菜素唑用少量二甲基亚砜溶解, 并用超纯水进行浓度稀释^[13]。将马铃薯清洗干净, 置于 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 次氯酸钠溶液中浸泡 5 min 消毒, 擦干表面水分后去除马铃薯的表皮, 使用削丝器削成大小均匀的马铃薯丝

(宽为 5 mm, 厚为 5 mm, 长为 4 cm), 并用去离子水反复洗去马铃薯丝表面淀粉, 将马铃薯丝分别置于浓度为 0、20、40、60 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 BRZ 中浸泡 10 min^[14], 并用厨房用纸轻轻擦干表面水分, 置于室温避光贮藏, 进行鲜切马铃薯色差分析。同样地, 以超纯水中添加等量的二甲基亚砷处理为对照, 40 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ BRZ 处理马铃薯用于后续实验理化指标的测定。

1.2.2 色泽测定

参考 Sukhonthara 等^[15]的方法, 实验采用 UltraScanVIS 台式色差仪对鲜切马铃薯丝表面色泽进行测定, L^* 值表示亮度, a^* 值表示红绿, b^* 值表示黄蓝, ΔE 表示总色差, 计算公式如下:

$$\Delta E = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中:

ΔE ——总色差;

ΔL^* —— L^* 样品- L^* 标准;

Δa^* —— a^* 样品- a^* 标准;

Δb^* —— b^* 样品- b^* 标准。

1.2.3 植物油菜素内酯 (BR) ELISA测定

采用 ELISA 酶联免疫试剂盒方法测定 BR 含量, 单位用 ng/L 表示, 结果重复测定三次。

1.2.4 呼吸强度和失水率测定

参考代文婷等^[16]的方法测定呼吸强度, 将马铃薯丝放入 Micro Pod 小水果采后检测系统仪进行测定, 单位用 $\text{mg}/(\text{kg}\cdot\text{h})$ 表示, 结果重复测定三次。

失水率测定: 将马铃薯丝放入 PC-16A 水分测定仪进行测定, 质量分数单位为 %, 计算公式如下:

$$A = \frac{Ma - Mb}{Ma} \quad (2)$$

式中:

A ——马铃薯丝失水率, %;

Ma ——未烘干前马铃薯丝质量, g;

Mb ——烘干后马铃薯丝质量, g。

1.2.5 总酚含量、苯丙氨酸解氨酶活性、多酚氧化酶活性测定

根据 Meng 等^[17]的方法并略作修改, 采用没食子酸标准曲线法测定总酚含量, 单位用 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 表示, 结果重复测定三次。

参考陈嘉琪^[18]的方法并略作修改, 采用硼酸缓冲液+L-苯丙氨酸溶液法测定马铃薯 PAL 活性, 每 20 s 测量 PAL 在波长 290 nm 处吸光度的变化量, 记 120 s, 以每分钟每克样品吸光值变化 0.01 为一个酶活单位 (U), PAL 活性单位用 $\text{U}/(\text{g}\cdot\text{min})$ 表示, 结果重复测

定三次。

参考 Dong 等^[19]的方法并略作修改, 采用邻苯二酚法测定马铃薯 PPO 活性, 每隔 20 s 测量 PPO 在波长 410 nm 处吸光度的变化量, 记 120 s, 以每分钟每克样品吸光值变化 0.01 为一个酶活单位 (U), PPO 活性单位用 $\text{U}/(\text{g}\cdot\text{min})$ 表示, 结果重复测定三次。

1.2.6 过氧化物酶、抗坏血酸过氧化物酶、超氧化物歧化酶、过氧化氢酶活性测定

参考 Lin 等^[20]的方法并略作修改, 采用愈创木酚法测定马铃薯 POD 活性, 每隔 20 s 测量 POD 在波长 470 nm 处吸光度的变化量, 记 120 s, 以每分钟每克样品吸光值变化 0.01 为一个酶活单位 (U), POD 活性单位用 $\text{U}/(\text{g}\cdot\text{min})$ 表示, 结果重复测定三次。

参考 Yan 等^[21]的方法并略作修改, 采用乙二胺四乙酸+抗坏血酸法测定马铃薯 APX (Ascorbate Peroxidase, APX) 活性, 每隔 20 s 测量 APX 在波长 290 nm 处吸光度的变化量, 记 120 s, 以每分钟每克样品吸光值变化 0.01 为一个酶活单位 (U), APX 活性单位用 $\text{U}/(\text{g}\cdot\text{min})$ 表示, 结果重复测定三次。

采用北京索莱宝生物科技有限公司的检测试剂盒方法测定 SOD 活性, SOD 活性单位用 $\text{U}/(\text{g}\cdot\text{min})$ 表示, 结果重复测定三次。

参考王桐^[22]的方法并略作修改, 采用过氧化氢法测定马铃薯 CAT 活性, 每隔 20 s 测量 CAT 在波长 290 nm 处吸光度的变化量, 记 120 s, 以每分钟每克样品吸光值变化 0.01 为一个酶活单位 (U), CAT 活性单位用 $\text{U}/(\text{g}\cdot\text{min})$ 表示, 结果重复测定三次。

1.2.7 过氧化氢含量测定

采用上海吉至生化科技有限公司的含量检测试剂盒方法测定 H_2O_2 含量, H_2O_2 含量单位用 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 表示, 结果重复测定三次。

1.2.8 相对电导率、丙二醛含量测定

参考周丽荣等^[23]的方法并略作修改, 结果以 % 表示, 实验重复测定三次。

参考甘婉莹等^[24]的方法并略作修改, 采用分光光度法测定马铃薯 MDA 含量, 分别于 532、600、450 nm 下测定上清液的吸光值, MDA 含量单位用 $\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$ 表示, 结果重复测定三次。

1.3 数据统计与分析

试验重复测定三次, 利用 SPSS 27 软件对数据进行分析, 采用邓肯多重比较进行差异显著性分析, $P < 0.05$ 表示差异具有统计学意义, 并用 Origin 2024 进行绘图。

2 结果与讨论

2.1 不同浓度BRZ处理对马铃薯色泽的影响

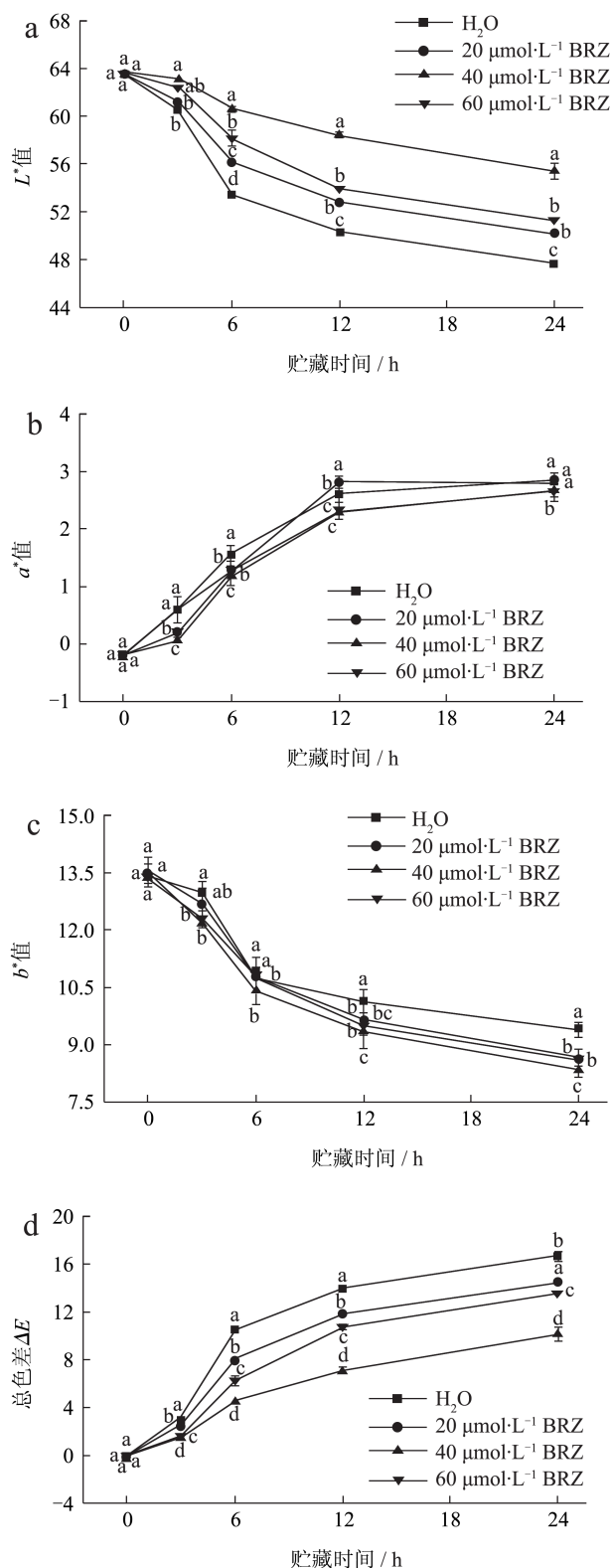


图1 BRZ处理后鲜切马铃薯贮藏过程中色差的变化
Fig.1 Changes in color during the storage of fresh-cut potatoes after BRZ treatment

研究发现,鲜切处理后,各组马铃薯的 L^* 值普遍下降,但经过BRZ处理后, L^* 值的下降得到了有效控制。在贮藏24 h时,40 μmol·L⁻¹ BRZ处理组的 L^* 值比对照组高了16.19% (图1a)。在贮藏期间,BRZ处理组与对照组 a^* 值均增加(图1b),但40 μmol·L⁻¹ BRZ处理组的变化最小,由-0.19上升至2.67,而对照组变化最大,由-0.19增加到2.84。 b^* 值在整个贮藏期间均有所下降(图1c),且各处理组 b^* 值始终低于对照组。如图1d所示,在贮藏的前3 h内,BRZ处理组 ΔE 与对照组之间差异不大,但在贮藏6 h后,BRZ处理组的 ΔE 显著高于对照组($P < 0.05$),并且在整个贮藏期间,BRZ处理组的 ΔE 始终低于对照组。在整个贮藏过程中,20 μmol·L⁻¹ BRZ处理组 ΔE 增加了14.40,而40 μmol·L⁻¹ BRZ处理组 ΔE 变化最小,为10.10,对照组则增加了16.60。这些结果表明,不同浓度的BRZ处理均能较好地保持鲜切马铃薯外观品质,其中40 μmol·L⁻¹ BRZ的保鲜效果最佳,故选择40 μmol·L⁻¹ BRZ进行后续理化实验。

2.2 BRZ处理对马铃薯BR含量的影响

如图2所示,随着贮藏时间的延长,BR含量先上升后降低。在贮藏3 h时,处理组的BR含量高于对照组,推测可能是马铃薯鲜切后受到刺激胁迫,BRZ未能有效诱导BR。在贮藏6 h时,处理组的BR (35.82 μg·L⁻¹)显著低于对照组(38.34 μg·L⁻¹)含量($P < 0.05$),而在贮藏6 h后的整个贮藏时间内,处理组BR含量均低于对照组。至24 h时,处理组BR含量为31.99 μg·L⁻¹,比对照组低了5.13%。Chen等^[25]的研究也证实了BRZ处理能够降低水稻的总BR含量。推测可能是BRZ通过抑制油菜素内酯的合成,进而影响鲜切马铃薯的品质变化。

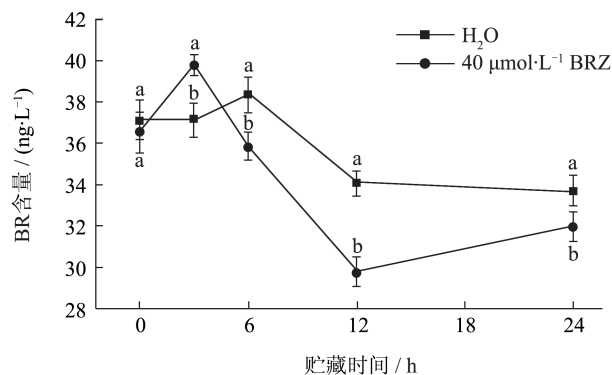


图2 BRZ处理后鲜切马铃薯贮藏过程中BR含量的变化
Fig.2 Changes in BR content during storage of fresh-cut potatoes after BRZ treatment

2.3 BRZ处理对马铃薯呼吸强度和失水率的影响

马铃薯呼吸速率与细胞正常代谢密切相关,呼吸

强度^[26]和失水率^[27]可反映马铃薯代谢能力和抗逆境能力,是衡量马铃薯贮藏寿命的重要指标。由图 3a 所示,在贮藏 6 h 时,两组马铃薯的呼吸强度均达到峰值。此时,处理组马铃薯的呼吸强度增加量(82.30%)显著低于对照组(199.83%)的增加量($P<0.05$)。且在整个贮藏期间,处理组呼吸强度均低于空白组,说明 BRZ 处理能够降低马铃薯的呼吸强度,减少马铃薯代谢,从而有利于保持鲜切马铃薯的品质并延长其贮藏期。在整个贮藏期间(图 3b),处理组马铃薯的失水率均显著低于空白组($P<0.05$)。李梅等^[28]也研究发现,复配保鲜剂处理能够降低贮藏期间马铃薯丝的呼吸强度和失水率。实验结果表明,BRZ 处理能够降低马铃薯的失水率,增强其抗逆境能力,保持水分含量,从而延缓马铃薯褐变反应。

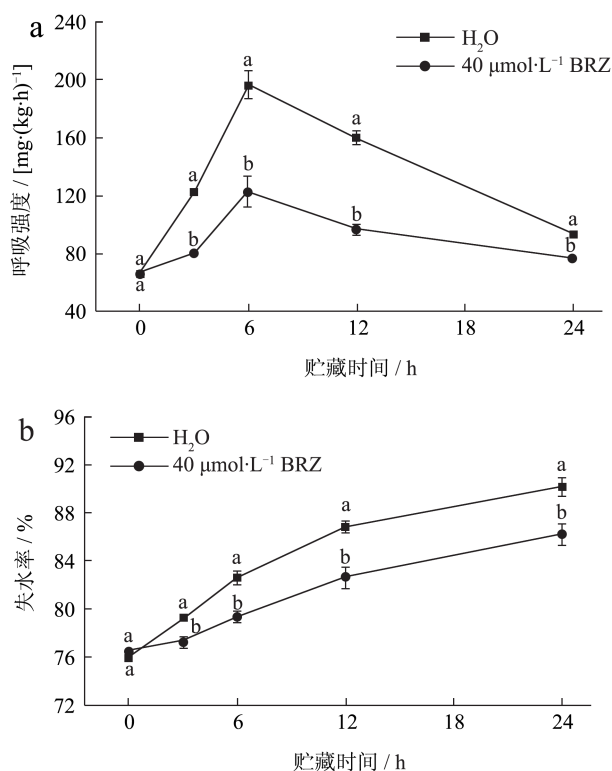


图 3 BRZ 处理后鲜切马铃薯呼吸强度和失水率随时间的变化曲线

Fig.3 The change curves of respiratory intensity and water loss rate of fresh-cut potatoes over time after BRZ treatment

注: a 为呼吸强度; b 为失水率。

2.4 BRZ处理对马铃薯总酚、PAL活性、PPO活性的影响

在贮藏期间,两组马铃薯的总酚含量和 PPO 活性均先上升后降低(图 4a、4c)。在贮藏 6 h 内,处理组马铃薯的总酚增加量为 20.41%,比对照组高出 8.57%,显著促进了酚类的积累($P<0.05$)。在贮藏 3 h 时,处理组马铃薯的 PPO 活性为 13.30 U·g⁻¹·min⁻¹,比对

照组 PPO 活性低了 20.83%。在整个贮藏期间,两组 PAL 活性始终上升(图 4b)。在贮藏 3 h 时,BRZ 处理组马铃薯的 PAL 活性(29.46%)增加量显著低于对照组(43.68%)增加量($P<0.05$)。综上,马铃薯鲜切后机体抵御外界胁迫, PAL 活性持续上升,此时 PAL 酶活被激活导致总酚含量增加。马铃薯的 PPO 活性在贮藏前期迅速增加,推测可能是鲜切后马铃薯组织受到损伤,马铃薯内部发生一系列生理生化反应,导致 PPO 活性上升,随后可能是因为温度、pH 等变化,使 PPO 活性下降^[29]。BRZ 处理后马铃薯的 PPO、PAL 活性降低,总酚含量增加,甘婉莹等^[24]研究了 γ-氨基丁酸处理对鲜切马铃薯的影响,与本研究结果相似。实验表明, BRZ 可能通过抑制 PPO 和 PAL 活性,减少酚类物质的消耗,从而延缓了鲜切马铃薯酶促褐变反应。

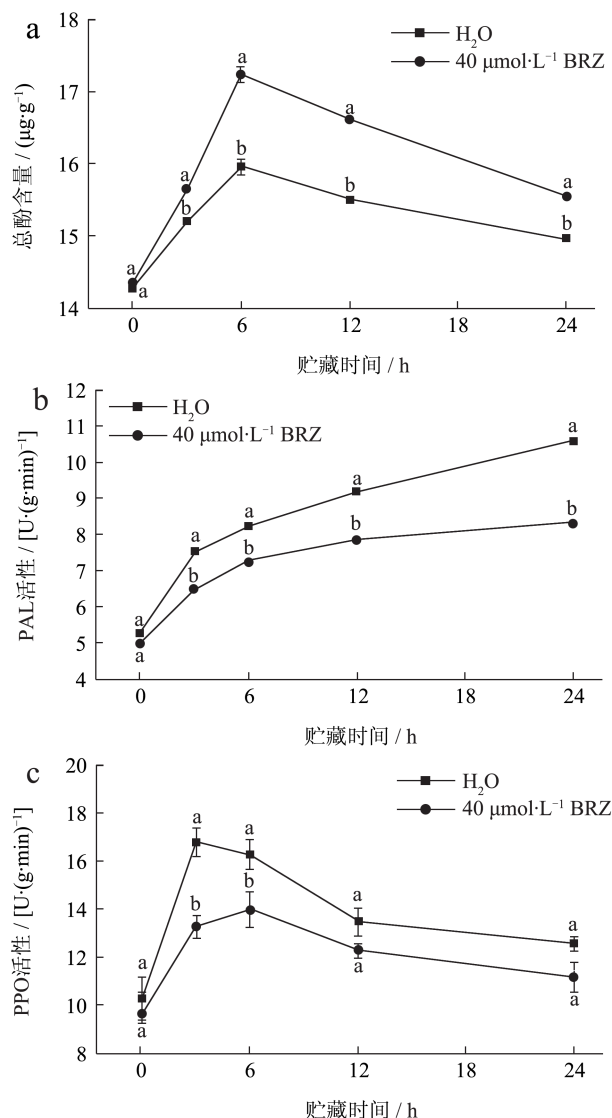


图 4 BRZ 处理后鲜切马铃薯总酚含量及酶活随时间的变化曲线

Fig.4 The change curves of total phenol content and enzyme activity in fresh-cut potatoes over time after BRZ treatment

注: a 为总酚含量; b 为 PAL 活性; c 为 PPO 活性。

2.5 BRZ处理对马铃薯POD活性、APX活性、SOD活性、CAT活性的影响

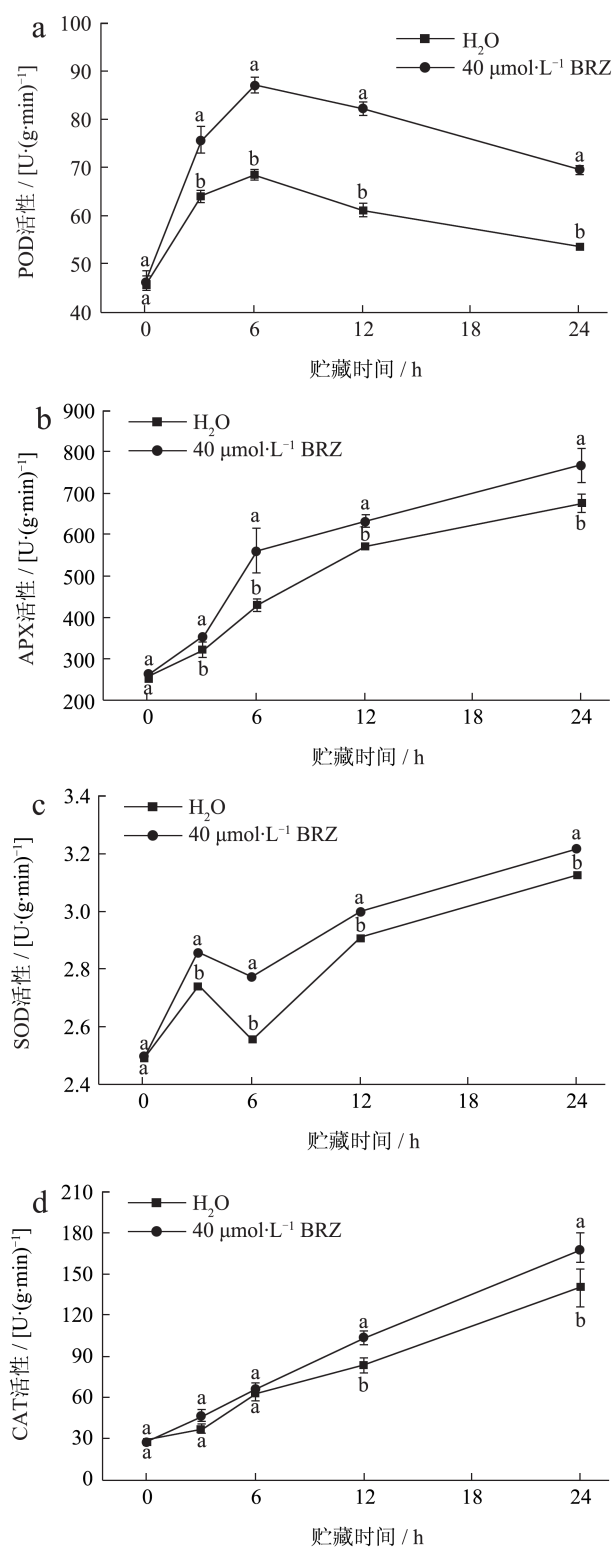


图5 BRZ处理后鲜切马铃薯贮藏过程中植物抗氧化酶活性的变化

Fig.5 Changes in the activity of plant antioxidant enzymes during the storage of fresh-cut potatoes after BRZ treatment

注: (a) POD; (b) APX; (c) SOD; (d) CAT。

植物抗氧化酶在保护细胞受氧化损伤中起着至关重要的作用, 增加抗氧化酶活性能够保护细胞不受氧化损伤^[30]。如图5所示, 在整个贮藏期间, 处理组马铃薯的POD、APX、SOD、CAT酶活均高于对照组。在贮藏3 h内, 处理组与对照组的酶活性均差别不大, 这与图1的色差结果吻合, 说明马铃薯鲜切后细胞抗逆境能力增强, 各类抗氧化酶活性可能还未能完全激活。贮藏6 h时, 处理组的POD、APX、SOD、CAT活性分别为87.20、561.67、2.77、64.75 U·g⁻¹·min⁻¹, 比对照组的酶活性分别增加了27.49%、30.62%、8.50%、4.44%, 至贮藏24 h时, 处理组的酶活分别比对照组高了1.30、1.14、1.03、1.19倍, 这说明贮藏后期对马铃薯褐变影响的主要抗氧化酶为POD, APX和CAT效果次之。乔金^[31]也证实了乙烯利处理能够提高贮藏期间鲜切马铃薯丝的抗氧化酶活性。综上, 马铃薯鲜切后细胞膜受到损伤, 其抗逆境能力增强, 内部抗氧化能力减弱, 经BRZ处理后增加了马铃薯POD、APX、CAT、SOD活性, 参与诱导马铃薯抗逆境胁迫, 进而增强了马铃薯抗氧化能力, 有效延缓了褐变的发生。

2.6 BRZ处理对马铃薯过氧化氢含量的影响

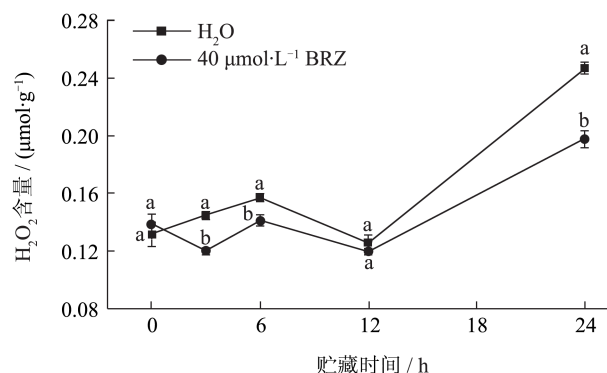


图6 BRZ处理后鲜切马铃薯贮藏过程中过氧化氢含量的变化
Fig.6 Changes in hydrogen peroxide content during storage of fresh-cut potatoes after BRZ treatment

植物体内的H₂O₂是一种重要的活性氧, 降低H₂O₂含量能够延缓植物细胞氧化, 增加贮藏期等^[32]。如图6所示, 在整个贮藏期间, BRZ处理组马铃薯的H₂O₂含量始终低于对照组。在贮藏3 h时, BRZ处理组马铃薯的H₂O₂含量为0.12 μmol·g⁻¹, 比对照组马铃薯H₂O₂含量低了0.03 μmol·g⁻¹。贮藏第24 h时, BRZ处理组马铃薯的H₂O₂含量为0.20 μmol·g⁻¹, 比对照组含量低了27.74%。研究报道, 4 μmol·L⁻¹ BRZ促进了番茄中活性氧积累, 进而降低植株的抗旱性^[33], 而本实验中发现40 μmol·L⁻¹ BRZ处理激活了POD、APX等抗氧化酶活性, 显著抑制了鲜切导致的H₂O₂含量激增(图6)。同样地, 运用100 μmol·L⁻¹ BRZ处理抑制

了马铃薯芽组织中的 H_2O_2 含量积累,提升马铃薯整薯贮藏性能^[12]。综上,推测 BRZ 对 H_2O_2 的调控可能与生理状态有关,同时具有浓度依赖性,但 BRZ 浓度的高低对鲜切马铃薯过氧化氢含量的变化研究仍需进一步验证。

2.7 BRZ处理对马铃薯相对电导率、MDA含量的影响

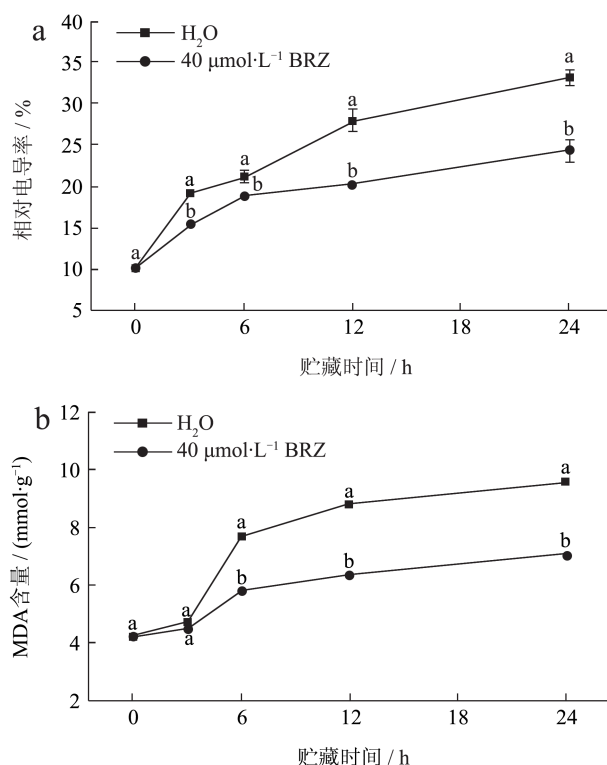


图7 BRZ处理后鲜切马铃薯贮藏过程中相对电导率、MDA含量的变化

Fig.7 Changes in relative conductivity and MDA content during storage of fresh-cut potatoes after BRZ treatment

相对电导率是衡量马铃薯细胞膜透性的重要指标,反应细胞膜的损伤程度,相对电导率越高则机体细胞膜损伤程度越高^[34],而MDA是脂肪氧化的产物,反应细胞膜脂过氧化程度,MDA的含量越小表示样品越新鲜^[35]。在贮藏期间,两组马铃薯的相对电导率和MDA含量一直上升(图7a、7b)。在贮藏3h时,BRZ处理组马铃薯的相对电导率为15.37%,比对照组低了3.76%,BRZ处理组马铃薯的MDA含量为 $4.47 \text{ mmol}\cdot\text{g}^{-1}$,对照组马铃薯的MDA含量为 $4.70 \text{ mmol}\cdot\text{g}^{-1}$,两组MDA含量无显著差异($P<0.05$)。至24h时,BRZ处理组马铃薯的相对电导率为24.29%,比对照组低了8.80%,BRZ处理组马铃薯的MDA含量为 $7.08 \text{ mmol}\cdot\text{g}^{-1}$,比对照组低了25.94%。王金玲等^[36]也研究表明,外源褪黑素能够降低贮藏期间青皮核桃的相对电导率和

MDA含量。综上,说明BRZ对鲜切马铃薯的细胞破裂有明显的阻碍作用,抑制了马铃薯酶促褐变的速率,延缓细胞的衰老,有效维持了细胞的完整性^[37]。

3 结论

该文分析了油菜素内酯合成抑制剂BRZ对鲜切马铃薯酶促褐变的影响,发现 $40 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ BRZ处理效果最佳,至24h时 ΔE 为对照组的60.90%,并降低了内源BR含量。进一步发现BRZ处理降低了鲜切马铃薯呼吸强度和失水率,抑制了PAL和PPO酶活,有效减少了酚类物质的利用转化,增强了POD、APX、CAT、SOD等抗氧化酶活性,减少 H_2O_2 积累,维持了细胞膜的完整性,进而抑制了马铃薯酶促褐变。研究揭示了BRZ对马铃薯的褐变抑制作用,有效延缓了马铃薯品质的劣变,为鲜切果蔬褐变抑制剂的开发提供数据支撑,但对于BRZ调控酶促褐变的其他途径仍有待进一步研究。

参考文献

- [1] 曹贞菊,陈明俊,罗小波,等.马铃薯褐变机制及控制技术研究进展[J].中国瓜菜,2024,37(11):1-18.
- [2] ZUO X, CHANG C, WANG H, et al. Citral alleviates surface discoloration of fresh-cut potato by regulating energy metabolism [J]. Scientia Horticulturae, 2024, 338: 113601.
- [3] WANG T, YAN T, SHI J, et al. The stability of cell structure and antioxidant enzymes are essential for fresh-cut potato browning [J]. Food Research International, 2023, 164: 112449.
- [4] GONZALEZ M N, MASSA G A, ANDERSSON M, et al. Reduced enzymatic browning in potato tubers by specific editing of a polyphenol oxidase gene via ribonucleoprotein complexes delivery of the CRISPR/Cas9 system [J]. Front Plant Sci, 2019, 10: 1649.
- [5] 程丽林,吴波,袁海君,等.鲜切果蔬贮藏保鲜技术研究进展[J].保鲜与加工,2019,19(1):147-152.
- [6] 李政红.梨果褐变机理研究[D].保定:河北农业大学,2016.
- [7] MA Y, WANG H, 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.
- [8] HUANG H, WANG D, BELWAL T, et al. A novel W/O/W double emulsion co-delivering brassinolide and cinnamon essential oil delayed the senescence of broccoli via regulating chlorophyll degradation and energy metabolism [J]. Food Chemistry, 2021, 356: 129704.
- [9] YE H, RUIRUI Y, XUEJIAO Z, et al. Brassinosteroid accelerates wound healing of potato tubers by activation of reactive oxygen metabolism and phenylpropanoid metabolism [J]. Foods, 2022, 11(7): 906.
- [10] 单国雷,陈飞,袁凌云,等.油菜素内酯对辣椒果实贮藏及抗氧化能力的影响[J].安徽农业大学学报,2021,48(5):750-756.

- [11] CHEN Y, WU D, ZHANG Y, et al. Brassinolide alleviated drought stress faced by bulbil formation of *Pinellia ternata* by reducing ROS metabolism and enhancing AsA-GSH cycle [J]. *Scientia Horticulturae*, 2024, 323: 112525.
- [12] 邓孟胜.油菜素内酯调控马铃薯块茎萌芽的机制研究[D].雅安:四川农业大学,2020.
- [13] 金思佳.GABA缓解抑郁作用及作用机理研究与GABA硬糖的研制[D].南昌:南昌大学,2023.
- [14] 刘汝凤.切前脯氨酸处理抑制马铃薯酶促褐变的研究[D].泰安:山东农业大学,2020.
- [15] SUKHONTHARA S, KAEWKA K, THEERAKULKAIT C. Inhibitory effect of rice bran extracts and its phenolic compounds on polyphenol oxidase activity and browning in potato and apple puree [J]. *Food Chemistry*, 2016, 190: 922-927.
- [16] 代文婷,刘战霞,陈伟君,等.脂氧合酶对甜瓜果实熟软化生理及相关基因表达的影响[J].*江苏农业科学*,2024,52(1):128-133.
- [17] 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.
- [18] 陈嘉琪.谷氨酸溶液处理抑制鲜切马铃薯褐变的研究[D].泰安:山东农业大学,2021.
- [19] DONG T, CAO Y, LI G, et al. A novel aspartic protease inhibitor inhibits the enzymatic browning of potatoes [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 172: 111353.
- [20] LIN D, SHUAI L, XU X, et al. Salicylic acid inhibition on browning of fresh-cut taro by regulating phenolic compounds and active oxygen metabolism [J]. *LWT*, 2024, 206: 116591.
- [21] YAN H, LI Q, PARK S C, et al. Overexpression of CuZnSOD and APX enhance salt stress tolerance in sweet potato [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2016, 109: 20-27.
- [22] 王桐.异亮氨酸抑制鲜切马铃薯褐变的技术及机制研究[D].泰安:山东农业大学,2022.
- [23] 周丽荣,周剑,赵秀芳,等.肉桂酸钾对鲜切生姜保鲜效果的影响[J].*现代食品*,2024,30(13):165-170.
- [24] 甘婉莹,邓孟胜,张杰,等. γ -氨基丁酸对鲜切马铃薯贮藏品质的影响[J].*现代食品科技*,2023,39(10):178-184.
- [25] CHEN Y, CHEN H, XIANG J, et al. Rice spikelet formation inhibition caused by decreased sugar utilization under high temperature is associated with brassinolide decomposition [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2021, 190: 104585.
- [26] 王香君,殷浩,刘刚,等.采后桑椹冰温保鲜研究[J].*食品工业*,2020, 41(9):193-198.
- [27] 阿地拉·阿不都拉.三种保鲜剂对苹果贮藏过程中品质的影响[D].阿拉尔:塔里木大学,2021.
- [28] 李梅,田世龙,颜敏华,等.复配保鲜剂对半熟化马铃薯丝低温贮藏生理生化变化的初步研究[J].*农业科技通讯*,2012,12:64-67.
- [29] 王斌,林薇,袁晓.鲜切果蔬褐变机理及防控技术研究进展[J].*食品科学*,2025,46(7):367-384.
- [30] CHEN N, DAI X, HU Q, et al. Sprayable double-stranded RNA mediated RNA interference reduced enzymatic browning of fresh-cut potatoes [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2023, 206: 112563.
- [31] 乔金.谷氨酸抑制鲜切马铃薯褐变关键基因的筛选及StERF-BR1-like的调控机制研究[D].泰安:山东农业大学,2024.
- [32] 王玲,陈锐雯,陈敏惠,等.过氧化氢调控菜心采后木质化的机理初探[J].*现代食品科技*,2022,38(5):96-107.
- [33] 聂书明.油菜素内酯外源施用与其受体过表达对番茄耐旱性和品质的影响[D].杨凌:西北农业科技大学,2018.
- [34] 陈恬,侯亚茹,李弘文,等.乳酸钙对鲜切生菜生理特性及抗氧化品质的影响[J].*山西农业科学*,2024,52(5):143-151.
- [35] 杨丽婷,杨倩,王黎丽,等.铁棍山药黏液复合乳液保鲜鲜切马铃薯研究[J].*食品与发酵工业*,2021,47(8):46-53.
- [36] 王金玲,张玲玲,党鹏燕,等.外源水杨酸对盐胁迫下甘蓝型油菜幼苗生理变化的影响[J].*绵阳师范学院学报*,2024,43(11):60-67.
- [37] DONG T, CAO Y, LI G, et al. Enhanced expression of serine protease inhibitor StSPI128 alleviates the enzymatic browning in fresh-cut potatoes via increasing antioxidant abilities [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2022, 192: 112022.