

γ -氨基丁酸对鲜切马铃薯贮藏品质的影响

甘婉莹, 邓孟胜, 张杰, 李昭玲, 童凯*

(四川轻化工大学生物工程学院, 四川宜宾 644000)

摘要: 为探究 γ -氨基丁酸 (Gamma-aminobutyric Acid, GABA) 对鲜切马铃薯贮藏品质的影响, 用不同质量浓度 (10、15、20 和 25 g/L) GABA 溶液浸泡处理鲜切马铃薯片, 通过测定各处理在贮藏过程中色泽、水分、总酚、多酚氧化酶、丙二醛、相对电导率等指标的变化。结果表明, 不同质量浓度 GABA 处理均能有效抑制褐变, 至第 6 天时 L^* 值分别比对照高 1.69%~5.39%, 以 15 g/L GABA 浓度处理效果最佳, 有效抑制了多酚氧化酶 (Polyphenol Oxidase, PPO) 活性, 降低了总酚的利用; 进一步研究发现, GABA 处理中过氧化物酶 (Peroxidase, POD) 活性上升, 丙二醛含量和相对电导率均显著 ($P<0.05$) 下调; 另一方面, GABA 能够降低水分散失和减弱可溶性固形物和可滴定酸的损失, 进而有效维持鲜切马铃薯的品质。GABA 主要通过维持细胞膜完整性, 抑制 PPO 转化成酚类, 进而抑制酶促褐变反应。同时减缓水分和营养物质的损失, 最终保证鲜切马铃薯薄片的贮藏品质。

关键词: 鲜切; 马铃薯; γ -氨基丁酸; 贮藏品质

文章编号: 1673-9078(2023)10-178-184

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.10.1200

Effect of γ -aminobutyric Acid on the Storage Quality of Fresh-cut Potato

GAN Wanying, DENG Mengsheng, ZHANG Jie, LI Zhaoling, TONG Kai*

(School of Biological Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Yibin 644000, China)

Abstract: In order to explore the influences of gamma-aminobutyric acid (GABA) on the storage quality of fresh-cut potato, fresh-cut thin potato slices were soaked in GABA solutions at different concentrations (10, 15, 20 and 25 g/L). The changes of color, moisture content, total phenolic content, polyphenol oxidase content, malondialdehyde content and relative electrical conductivity during storage were measured. The results showed that all the GABA solutions at different concentrations could effectively inhibit browning, and the L^* values at the 6th day were 1.69%~5.39% higher than that of the control, with the best treatment being at the concentration of 15 g/L GABA, which effectively inhibited the activity of polyphenol oxidase (PPO) and reduced the utilization of total phenolics. Further investigations showed that in the GABA treatment, the activity of peroxidase (POD) increased, whilst the malondialdehyde content and relative conductivity significantly decreased ($P<0.05$). On the other hand, GABA could effectively maintain the quality of fresh-cut potato slices by reducing water loss, and the loss of soluble solids and titrable acids. GABA inhibited enzymatic browning reaction primarily through maintaining cell membrane integrity, and inhibiting PPO-catalyzed conversion of phenolics, while slowing down the loss of water and nutrients, and ultimately ensuring the storage quality of fresh-cut potato slices.

Key words: fresh-cut; potato; γ -aminobutyric acid; storage quality

引文格式:

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

GAN Wanying, DENG Mengsheng, ZHANG Jie, et al. Effect of γ -aminobutyric acid on the storage quality of fresh-cut potato [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(10): 178-184

鲜切果蔬是指果蔬采后经过清洗、消毒、去皮、切割、保鲜和包装等工序进入冷柜销售能够保持果蔬

收稿日期: 2022-09-21

基金项目: 四川省自然科学基金项目 (2022NSFSC1698); 四川轻化工大学校级科研项目 (2018RCL26)

作者简介: 甘婉莹 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬贮藏与保鲜, E-mail: 1828808072@qq.com

通讯作者: 童凯 (1987-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 功能性食品开发, E-mail: 543151146@qq.com

自身风味品质的便捷性食品^[1], 因其新鲜、方便, 符合当今快节奏的生活方式, 深受消费者的喜爱。马铃薯作为全球第四大主食之一, 富含淀粉、蛋白质、氨基酸等多种营养物质^[2]。然而马铃薯在去皮、切割过程中极易造成马铃薯组织结构破坏, 导致马铃薯发生呼吸速率加快、水分散失、酶促褐变和营养物质流失等不良的生理变化, 降低感官品质, 缩短货架期, 制约期产业的发展^[3]。因此, 延缓鲜切马铃薯贮藏期间的品质劣变是延长其贮藏期的关键。

目前, 延缓鲜切马铃薯贮藏期品质劣变多采用物理(如真空包装^[4]、气调包装^[5]、热处理^[6]和超声波处理^[7]等)和化学方法(如外源添加柠檬酸溶液^[8]、谷氨酸溶液^[9]、NaCl 溶液^[10]、生姜提取液^[11]等)。但关于 γ -氨基丁酸(Gamma-aminobutyric Acid, GABA) 延缓鲜切马铃薯贮藏品质鲜有报道, GABA 是一种广泛存在于动植物和微生物体内的非蛋白质四碳氨基酸, 具有安神、调节食欲、降血压、抗氧化和改善脂质代谢等多种生理功能, 且作为新型功能性活性因子已被批准在食品添加剂中使用^[12,13]。目前关于外源 GABA 处理在维持果蔬的贮藏品质方面已有一系列报道, GABA 能调节长期冷藏贮藏南国梨的线粒体氧化防御系统和维持线粒体结构, 有效减缓果皮褐变, 增强相关酶的基因表达^[14]; 葡萄采后施用 GABA 能提高抗氧化酶活性, 减缓贮藏期间的真菌腐败和冷害^[15]; GABA 处理能降低血橙冷藏期间酚类物质, 提高抗氧化酶的活性, 更好的保持血橙品质^[16]; GABA 处理后的冷藏番石榴^[17]和桃果李^[18], 冷害现象得到缓解, 表面褐化现象减轻, 维持较高的贮藏品质; 在蔬菜方面, GABA 处理后的双孢蘑菇^[19]、黄秋葵^[20]、双孢蘑菇菌盖^[21], 在贮藏过程中质量损失降低, 保持较高的硬度, PPO 活性受到抑制, 延缓了褐变进程, 保持良好品质和营养价值。本文针对鲜切马铃薯极易褐变影响贮藏品质等问题, 分析不同质量浓度的 GABA 处理鲜切马铃薯在贮藏期间的指标变化, 以期维持鲜切马铃薯贮藏品质及改善营养价值提供依据。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

马铃薯: 购于宜宾市农贸市场市售荷兰马铃薯, 购入时表皮无机械损伤、无霉变。

主要试剂: γ -氨基丁酸, 食品级; 二水合磷酸氢二钠; 二水合磷酸二氢钠; 邻苯二甲酸氢钾; 愈创木酚; 邻苯二酚; 次氯酸钠; 氢氧化钠; 没食子酸; 福林酚; 氢氧化钠; 丙酮; 碳酸钠; 30%过氧化氢; 交联聚乙烯基吡咯烷酮(Polyvinylpyrrolidone, PVPP); 硫代巴比妥酸(Thiobarbituric Acid, TBA); 三氯乙酸(Trichloroacetic Acid, TCA) 等均为分析纯; 无菌水。

1.2 主要仪器与设备

TG-16 台式高速冷冻离心机, 四川蜀科仪器有限公司; N5000 紫外可见分光光度计, 上海佑科仪器仪表有限公司; UltraScan VIS 台式色差仪, 上海亚荣生

化仪器厂; PC-16A 水分测定仪, 上海浦春计量仪器有限公司; DDSJ-307F 电导率仪, 上海仪电科学仪器股份有限公司; LB80T 手持糖度计, 广州市速为电子科技有限公司; FA12048 分析天平, 上海佑科仪器仪表有限公司。

1.3 方法

1.3.1 马铃薯处理

挑选粗细均匀、表皮无机械损伤、无斑点、无霉变的新鲜马铃薯, 洗净, 无菌水冲洗 2 次, 置于 200 μ L/L 的次氯酸钠溶液中浸泡 5 min, 沥水后去皮, 切成 0.3~0.5 cm 厚的均匀薄片, 以无菌水处理(CK) 为对照, 10、15、20、25 g/L 的 GABA 溶液浸泡 15 min 后, 晾干后置于 4 $^{\circ}$ C 恒温冰箱中贮藏。每个质量浓度随机分装入 21 个 PE 自封袋中, 每袋约 450 g, 分别在第 0、1、2、3、4、5 和 6 天随机取样进行色泽测定, 取样液氮冷冻后使用液氮研磨仪研磨成粉末后于 -80 $^{\circ}$ C 下贮存, 用于后续相关指标的测定。

1.3.2 指标测定

1.3.2.1 色泽

色差测定参考 Fan 等^[22]方法, 采用 Ultra Scan VIS 台式色差仪测定。见 2.1 数据分析。

1.3.2.2 水分含量的测定

水分含量采用 PC-16A 水分测定仪测定水分含量, 选取不同处理下相同质量马铃薯进行测定, 见 2.2 数据分析。

1.3.2.3 可溶性固形物的测定和可滴定酸的测定

可溶性固形物采用手持糖度计进行测定, 参考李艳婷等^[23]的方法, 见 2.3 数据分析。

可滴定酸含量采用酸碱滴定法进行测定, 参照 GB/T 8210-2011^[24]的方法并稍作改动, 见 2.3 数据分析。

1.3.2.4 多酚氧化酶活性和总酚含量的测定

多酚氧化酶(Polyphenol Oxidase, PPO) 活性参考陈嘉琪^[9]的方法, 以邻苯二酚为底物。以每克鲜重(FW) 果蔬样品每分钟在 410 nm 处的吸光吸光值变化 0.01 为一个酶活性单位(U), 实验结果以 U/(g·min) 表示, 见 2.4 数据分析。

总酚含量参考刘萁萁^[25]的方法测定, 以没食子酸标准曲线得出总酚含量 C, 实验结果以 (μ g/g) 表示, 见 2.4 数据分析。

1.3.2.5 过氧化物酶活性、丙二醛含量和相对电导率的测定

过氧化物酶(Peroxidase, POD) 活性测定参考陈嘉琪^[9]的方法, 以每克鲜重(FW) 果蔬样品每分

钟在 470 nm 处的吸光吸光值变化 0.01 为一个酶活性单位 (U)，实验结果以 U/(g·min)表示，见 2.5 数据分析。

丙二醛 (Malondialdehyde, MDA) 含量的测定参考贾国梁^[26]的方法略作修改。称取 1 g 马铃薯冻粉加入 3 mL 10%的三氯乙酸提取液，冰浴下研磨成匀浆，充分匀浆混匀后于 10 000 r/min 4 °C 离心 15 min 后得到待测上清液，吸取 1.5 mL 上清液加入 2 mL 0.6%的 TBA 混匀后于沸水中 15 min，取出后立即冰浴冷却至室温，10 000 r/min 4 °C 离心 15 min，在 450、532、600 nm 波长下测定其吸光值，结果以 mmol/g 表示。见 2.5 数据分析。

相对电导率采用王涛等^[27]的方法测定。

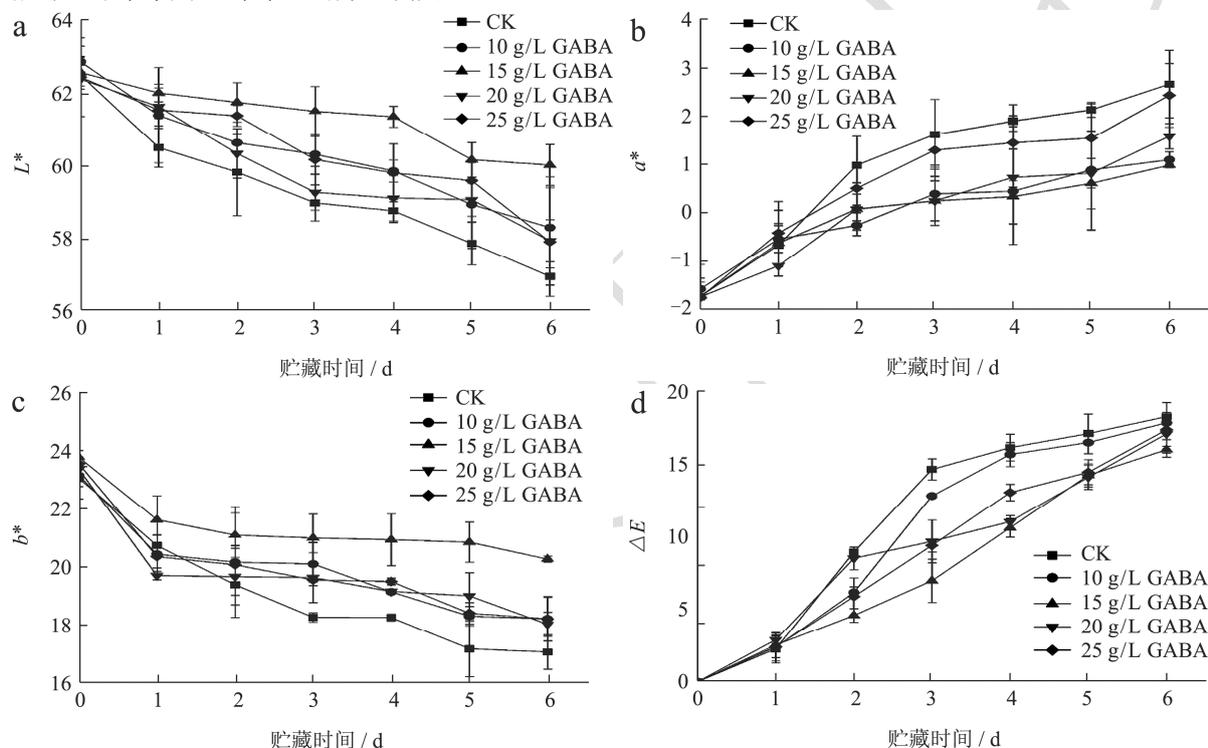


图 1 不同 GABA 质量浓度处理对鲜切马铃薯贮藏期间 L^* 值 (a)、 a^* 值 (b)、 b^* 值 (c) 和褐变指数 (d) 的影响

Fig.1 Effects of different GABA concentrations on L^* value (a), a^* value (b), b^* value (c) and Browning index (d) of fresh-cut potato during storage

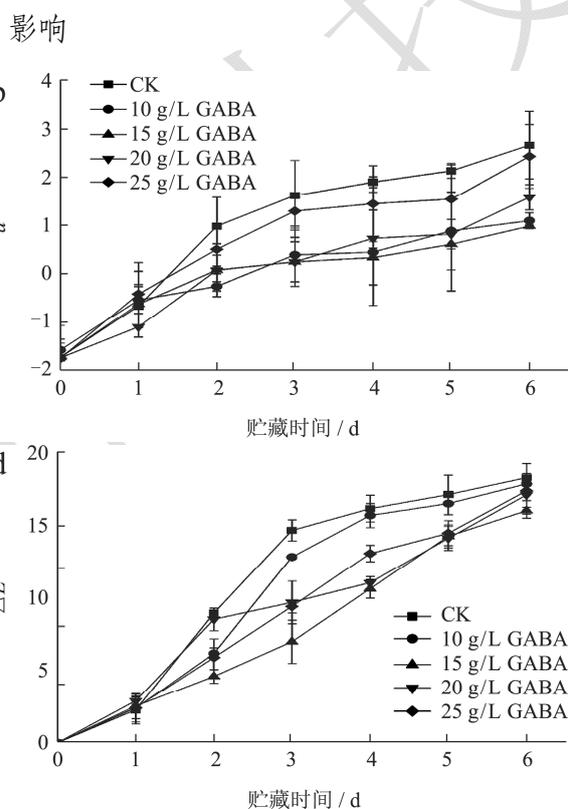
色泽是衡量鲜切马铃薯感官品质的直接指标。 L^* 值越大，褐变程度越小，表明鲜切马铃薯表面感官品质越好。贮藏期内各处理组 L^* 均下降，但 GABA 处理一直维持相对高的值，贮藏第 6 天时 15 g/L 浓度下 L^* 值比对照组高 3.07，在贮藏时间段 ΔE 的值均低于对照，对照组 ΔE 由 0 至 14.65，GABA 处理组则为 0 至 12.80、6.97、9.66 和 9.39，GABA 处理后变化较小有效保证了鲜切马铃薯外观色泽；黄蓝颜色 (b^*) 的变化对鲜切马铃薯颜色变化指标是重要的，在 6 d 的贮藏过程中不同处理下鲜切马铃薯的 b^* 值变化为 5.70、4.94、3.52、5.35 和 5.35，说明 GABA 处理对鲜切马

1.4 数据统计分析

实验结果以平均值±标准误差表示，用 Microsoft Excel 2010 进行基础数据处理，采用 Origin 2010 软件作图，用 IBM SPSS Statistics 16.0 进行数据统计分析，采用 Duncan 多重比较进行差异显著性分析 ($P < 0.05$)。所有实验样品均设 3 个重复。

2 结果与分析

2.1 不同质量浓度 GABA 对鲜切马铃薯褐变的影响



铃薯黄色的维持效果较对照好且 15 g/L 质量浓度下的效果最佳；在整个贮藏期内，红绿颜色 (a^* 值) 的变化对鲜切马铃薯的外观色泽影响不显著 ($P > 0.05$)。综合图 1 可以看出，在 1~3 d 贮藏时间内对照处理 L^* 、 b^* 和 ΔE 出现大幅度的变化而 GABA 处理变化较缓且以 15 g/L GABA 质量浓度处理最佳。

2.2 GABA 对鲜切马铃薯水分含量的影响

组织中水分含量是衡量鲜切马铃薯贮藏过程中新鲜程度的生理指标，如图 2，鲜切马铃薯整个贮藏期间水分含量整体呈下降趋势，贮藏前期水分含量变化

较缓慢随着时间延长水分含量变化速率较快,第6天时,对照和 10~25 g/L GABA 的水分含量分别为 71.92%、70.54%、76.84%、73.84%和 74.89%,不同 GABA 处理之间差异并不显著但对照与不同处理组之间有显著差异 ($P<0.05$)。其中 15 g/L GABA 处理在整个期间的水分含量均比其他处理组高,这说明此条件下对鲜切马铃薯体内的水分维持效果较好。

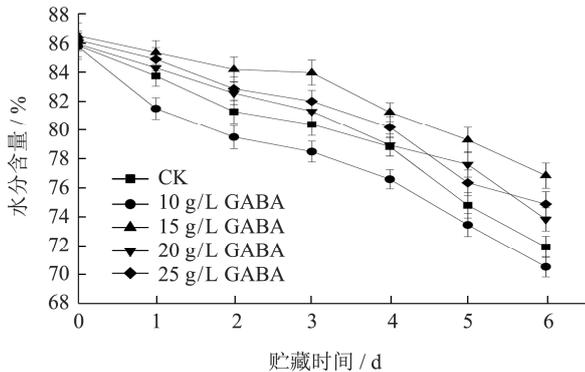


图2 不同 GABA 质量浓度处理对鲜切马铃薯贮藏期间水分含量的影响

Fig.2 Effects of different GABA concentrations on moisture content of fresh-cut potato during storage

2.3 不同 GABA 质量浓度对鲜切马铃薯可溶性固形物和可滴定酸的影响

可溶性固形物包括水溶性的糖、酸等物质可以判断果蔬中营养成分的流失状态^[28]。如图 3a 所示,随着贮藏时间的增加可溶性固形物含量的整体趋势在降低,6 d 时不同处理组的可溶性固形物含量分别为 3.60%、4.60%、5.20%、4.50%和 4.20%,且对照相比于不同质量浓度 GABA 处理之间差异显著 ($P<0.05$),其中 15 g/L GABA 处理与对照相差 1.60%,说明 15 g/L GABA 处理对抑制鲜切马铃薯体内可溶性固形物的流失具有较好的效果。

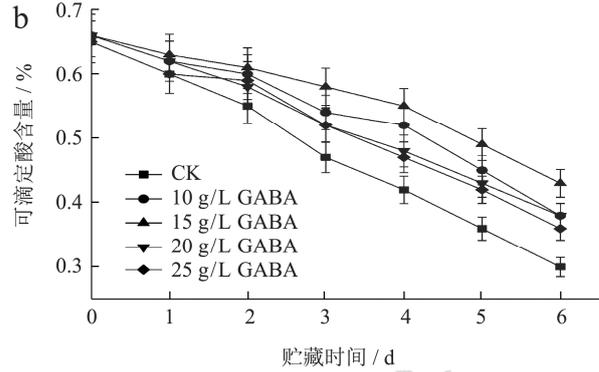
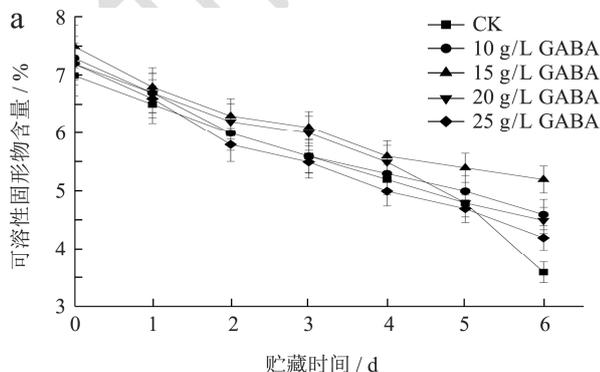


图3 不同 GABA 质量浓度处理对鲜切马铃薯贮藏期间可溶性固形物 (a) 和可滴定酸 (b) 的影响

Fig.3 Effects of different GABA concentrations on soluble solids (a) and titratable acids (b) of fresh-cut potato during storage

可滴定酸是果蔬重要的品质成分及风味物质来源,研究报道,GABA 参与果蔬体内有机酸的代谢。可滴定酸结果显示,整个贮藏期间,不同处理间的可滴定酸含量均呈稳定下降的趋势,但每个贮藏时间的可滴定酸含量均高于对照组,贮藏第 6 天时对照组可滴定酸含量下降 0.35%,不同质量浓度 GABA 处理分别下降: 0.28%、0.23%、0.28%和 0.29%,说明不同 GABA 处理有利于保持鲜切马铃薯具有较好的风味。

2.4 不同 GABA 质量浓度对鲜切马铃薯 PPO 活性和总酚含量的影响

多酚氧化酶 (PPO) 催化酚类物质最终形成褐色色素是酶促褐变的主要反应机制^[29,30],已有研究发现 GABA 处理抑制鲜切马铃薯褐变与 PPO 活性变化密切相关,如图 4a 所示,贮藏期间虽然所有处理的 PPO 活性随着贮藏时间而升高,但 GABA 处理后的 PPO 活性低于对照组,说明 GABA 处理能通过抑制鲜切马铃薯的 PPO 酶活性延缓褐变。6 d 时不同处理之间的 PPO 活性分别为 68.41、66.87、60.90、63.34 和 60.80 U/(g·min),在贮藏前期 PPO 活性变化激烈尤其以对照速率最快之后趋于平缓,猜测活性趋于平缓可能的原因是鲜切马铃薯中位于细胞质游离态的 PPO 具有催化活性被消耗完,而位于细胞膜结合态的 PPO 不具有催化活性^[31],这种变化趋势与 GABA 缓解杨桃果实采后品质相似^[32]。

酚类物质能够有效抵御氧化胁迫维持鲜切马铃薯发生褐变影响品质^[33]。如图 4b 所示,在 6 d 贮藏期,鲜切马铃薯中的酚类化合物明显减少,第 6 天时,各

处理的总酚含量分别为 0.066、0.081、0.082、0.073 和 0.051 mg/g, 不同质量浓度 GABA 处理与对照组之间差异显著 ($P < 0.05$), 这与 GABA 处理双孢蘑菇^[19]贮藏期间具有类似的变化趋势。贮藏前期不同处理之间变化较快贮藏后期相对缓慢且对照组低于 15、20、25 g/L GABA 处理, 整个贮藏期 15 g/L GABA 处理均高于其他处理组, 尤其在第 3 天 15 g/L GABA 处理比对照高 0.0384 mg/g。综上所述, 15 g/L GABA 处理能更好抑制贮藏前期总酚含量, 抑制酶促褐变底物的损耗从而达到降低酶促褐变发生的目的。

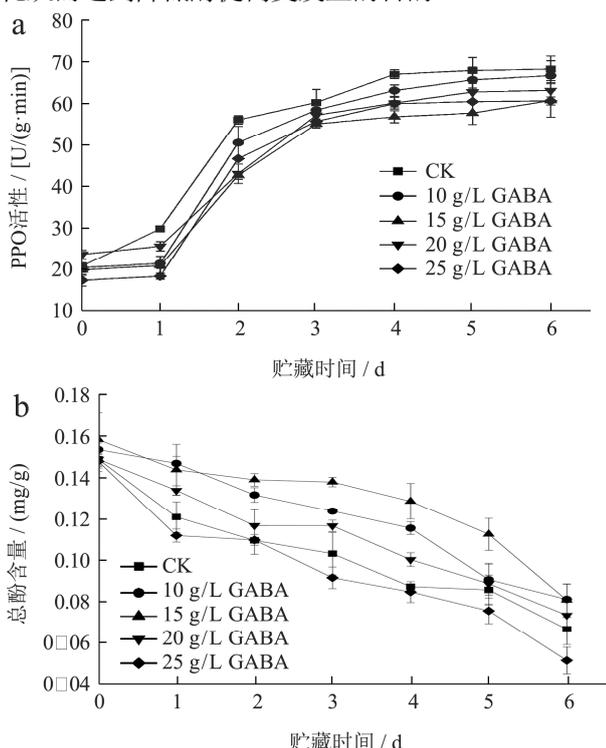


图 4 不同 GABA 质量浓度处理对鲜切马铃薯贮藏期间 PPO 活性 (a) 和总酚含量 (b) 的影响

Fig.4 Effects of different GABA concentrations PPO activity (a) and total phenols content (b) of fresh-cut potato during storage

2.5 不同 GABA 质量浓度对鲜切马铃薯 POD 活性、丙二醛含量和相对电导率的影响

过氧化物酶 (POD) 是植物处于逆境环境体内酶促防御系统产生的重要酶, 能将细胞中的过氧化氢还原为水从而清除内部的自由基减缓褐变进程^[34], 马铃薯经过切割处理后为修复破损的细胞壁 POD 活性应比处理前明显升高, 如图 5a 所示, 整个贮藏期间 POD 活性都整体呈上升趋势, 但不同质量浓度 GABA 处理的 POD 活性都高于对照, 说明 GABA 处理后清除鲜切马铃薯细胞内自由基的能力得到较大提高。贮藏期间对照组的 POD 活性升高 134.45 U/(g·min), 不同质

量浓度 GABA 处理组分别上升 305.97、368.07、315.73 和 233.43 U/(g·min), 第 6 天时对照组与不同质量浓度 GABA 处理组差异显著 ($P < 0.05$), 且 15 g/L GABA 处理 POD 活性时对照的 1.62 倍, 表明 15 g/L GABA 处理对于增加鲜切马铃薯的 POD 活性对自由基清除能力的效果最好。

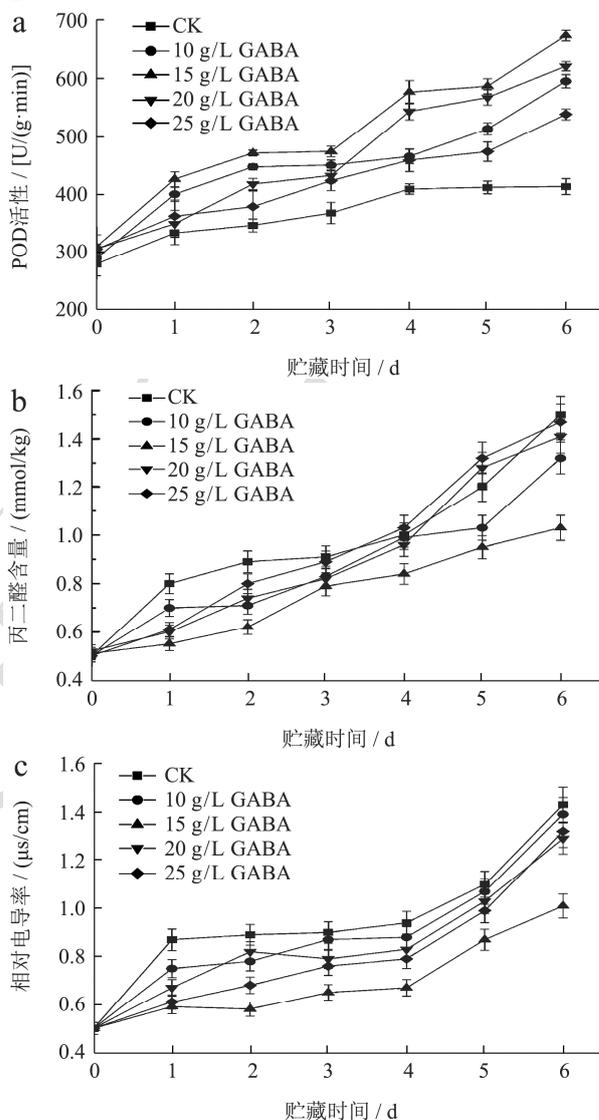


图 5 不同 GABA 质量浓度处理对鲜切马铃薯贮藏期间 POD 活性 (a)、丙二醛含量 (b) 和相对电导率 (c) 的影响

Fig.5 Effects of different GABA concentrations on POD activity (a), malondialdehyde content (b) and relative electrical conductivity (c) of fresh-cut potatoes during storage

丙二醛是果蔬细胞膜氧化的产物, 不断积累会造成鲜切马铃薯的细胞膜被破坏, 加速鲜切马铃薯的衰老, 丙二醛的含量越高则对细胞的破坏越严重^[35]。如图 5b, 贮藏期间鲜切马铃薯丙二醛的含量随贮藏时间延长而升高, 不同质量浓度 GABA 处理含量低于对照说明 GABA 处理能够延缓鲜切马铃薯的衰老保持新鲜度, 这与热处理结合 GABA 对鲜切苹果片^[36]的贮藏

藏过程中丙二醛的变化趋势类似。在贮藏第 6 天时,不同处理组丙二醛含量分别为 1.50、1.32、1.03、1.41 和 1.47 mmol/kg, 其中 15 g/L GABA 处理与其他处理组之间差异显著 ($P < 0.05$) 且低于对照低 0.47 mmol/kg, 说明 15 g/L GABA 处理能有效的维持细胞膜的完整性, 减缓鲜切马铃薯在贮藏过程中的脂膜过氧化进程, 维持较好的贮藏品质。

相对电导率是衡量细胞膜透性的重要指标, 相对电导率越大则细胞膜损伤程度越高^[37], 鲜切马铃薯相对电导率变化如图 5c, 相对电导率的变化整体趋势随着贮藏时间升高, 但贮藏期间对照处理比不同浓度 GABA 处理的相对电导率含量低说明 GABA 处理能够降低机械胁迫对细胞膜的损伤程度, 贮藏第 6 天不同处理组的相对电导率分别为 1.43、1.39、1.01、1.29 和 1.32 $\mu\text{s}/\text{cm}$, 且 15 g/L GABA 处理含量最低, 说明 15 g/L GABA 处理能有效的抑制相对电导率的升高, 减轻细胞膜损伤从而维持鲜切马铃薯的贮藏品质。

3 结论

γ -氨基丁酸是广泛存在于动植物体内非蛋白质氨基酸, 具有提高果蔬贮藏品质、抑制酶促褐变、减弱低温冷害等重要作用, 因此本研究 GABA 处理对鲜切马铃薯贮藏品质的影响。鲜切后的马铃薯自由基防御系统遭受破坏, 大量的自由基积累作用于细胞膜, 造成细胞膜结构破坏, 导致酚类物质流出。在有氧气存在的条件下被酚酶或氧化酶类催化氧化, 生成不稳定的邻醌, 随后邻醌发生自动氧化缩合, 形成褐色色素, 促进褐变, 影响鲜切马铃薯外观色泽。综上, GABA 可能作为小分子物质渗透进细胞中, 减少内溶物的流出; 有效抑制 PPO 酶活性, 阻碍 PPO 与酚类物质接触, 进而维持总酚含量处于较高水平; 通过提高体内 POD 酶活性, 清除细胞内氧自由基; 减少丙二醛的积累, 降低细胞膜的脂膜过氧化进程。GABA 处理能维持较高的可溶性固形物和可滴定酸含量, 保持马铃薯体内的水分含量在较高水平, 更好的维持鲜切马铃薯的外观色泽, 延缓贮藏品质。本研究为 GABA 作为食品添加剂应用于果蔬贮藏保鲜提供理论参考。

参考文献

[1] Dong T, Cao Y, Jiang C Z, et al. Cysteine protease inhibitors reduce enzymatic browning of potato by lowering the accumulation of free amino acids [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(8): 2467-2476.

[2] 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.

[3] 李清光. 鲜切生菜品质控制技术研究进展[J]. *食品工业*, 2018, 39(12): 226-229.

[4] 何萌, 王丹, 马越, 等. 不同包装材料对鲜切马铃薯贮藏品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(12): 316-319, 323.

[5] 张敏欢, 王莉梅, 王治洲, 等. 静电场结合自发气调包装对马铃薯贮藏期间的保鲜效果[J]. *食品科学*, 2019, 40(9): 269-275.

[6] 胡柏耿, 孙莎莎, 姜启兴, 等. 热烫对希森 6 号马铃薯鲜切薯条色泽和质构的影响[J]. *安徽农业科学*, 2021, 49(2): 175-178, 182.

[7] 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, 8.

[8] 额日赫木, 张琪, 崔娜, 等. 柠檬酸-超声波复合处理对鲜切马铃薯 PPO 和 POD 活性的抑制效果[J]. *农产品加工*, 2019, 11: 32-36.

[9] 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.

[10] 王红颖. NaCl 溶液处理块茎抑制鲜切马铃薯褐变技术及机理研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.

[11] 胡泳华, 孙铂雅, 石宝旋, 等. 生姜提取液对鲜切马铃薯贮藏品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(1): 247-251.

[12] 江波. GABA(γ -氨基丁酸)-一种新型的功能食品因子[J]. *中国食品学报*, 2008, 2: 1-4.

[13] 林杨, 唐琦勇, 楚敏, 等. γ -氨基丁酸的功能、生产及食品应用研究进展[J]. *中国调味品*, 2021, 46(6): 173-179.

[14] Li J, Zhou X, Wei B, et al. GABA application improves the mitochondrial antioxidant system and reduces peel browning in 'Nanguo' pears after removal from cold storage [J]. *Food Chemistry*, 2019, 297: 124903.

[15] Asgarian Z S, Karimi R, Ghabooli M, et al. Biochemical changes and quality characterization of cold-stored 'Sahebi' grapein response to postharvest application of GABA [J]. *Food Chemistry*, 2022, 373(PtA): 131401.

[16] Habibi F, Ramezani A, Guillén F, et al. Blood oranges maintain bioactive compounds and nutritional quality by postharvest treatments with γ -aminobutyric acid, methyl jasmonate or methyl salicylate during cold storage [J]. *Food Chemistry*, 2020, 306: 125634.

[17] 陈洪彬, 王慧玲, 蒋璇靓, 等. γ -氨基丁酸处理对冷藏番石榴果实品质和耐冷性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(14): 130-136.

[18] 宋春波. 外源 GABA 和褪黑素减轻桃果实采后冷害的机理研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.

[19] 李静, 李顺峰, 刘丽娜, 等. γ -氨基丁酸对双孢蘑菇贮藏品质的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(1): 273-278.

- [20] 殷菲彤,乔沛,李静,等. γ -氨基丁酸对黄秋葵采后品质及生理特性的影响[J].食品工业科技,2020,41(4):259-265.
- [21] Shekari A, Naghshib Hassani R, Soleimani Aghdam M. Exogenous application of GABA retards cap browning in *Agaricus bisporus* and its possible mechanism [J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 174: 111434.
- [22] Fan K, Zhang M, Bhandari B, et al. A combination treatment of ultrasound and ϵ -polylysine to improve microorganisms and storage quality of fresh-cut lettuce [J]. LWT - Food Science and Technology, 2019, 113: 108315.
- [23] 李艳婷,周铮,黄冬华,等.翠冠梨果不同部位可溶性固形物及硬度测定比较研究[J].中国南方果树,2022,51(3):148-152.
- [24] GB/T 8210-2011,柑桔鲜果检验方法[S].
- [25] 刘箕箕.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.
- [26] 贾国梁.电生功能水抑制鲜切山药酶促褐变的初步研究[D].泰安:山东农业大学,2015.
- [27] 王涛,郝利平,李月圆.长山药冷害发生机制的研究[J].食品科技,2018,43(8):54-58.
- [28] Petriccione M, Sanctis F D, Pasquariello M S, et al. The effect of chitosan coating on the quality and nutraceutical traits of sweet cherry during postharvest life [J]. Food & Bioprocess Technology, 2015, 8(2): 394-408.
- [29] Gao H, Zeng Q, Ren Z, et al. Effect of exogenous γ -aminobutyric acid treatment on the enzymatic browning of fresh-cut potato during storage [J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 55(12): 5035-5044.
- [30] Jiang Y M, Duan X W, Joyce D, et al. Advances in understanding of enzymatic browning in harvested litchi fruit [J]. Food Chemistry, 2004, 88(3): 443-446.
- [31] 李京赞,刘玉德,石文天,等.植物果蔬的褐变及抑制的研究[J].包装与食品机械,2019,37(1):63-68.
- [32] Ngaffo Mekontso Francine, Duan W H, Cisse El Hadji Malick, et al. Alleviation of postharvest chilling injury of carambola fruit by γ -aminobutyric acid: Physiological, biochemical, and structural characterization [J]. Front Nutr, 2021, 8: 752583.
- [33] Duan W H, Ngaffo M F, Li W, et al. Alleviation of postharvest rib-edge darkening and chilling injury of carambola fruit by brassinolide under lowtemperature storage [J]. Scientia Horticulturae, 2022, 299: 111-115.
- [34] 李江阔,曹森,张鹏,等.1-MCP 采前处理对葡萄采后相关酶活性与品质的影响[J].食品科学,2014,35(22):270-275.
- [35] 任心如.GABA 抑制采后双孢蘑菇褐变的作用机理[D].桂林:桂林理工大学,2021.
- [36] 张小燕,刘艾雯,籍奇岩,等.热处理结合 γ -氨基丁酸对鲜切苹果生理特性和品质的影响[J].食品工业科技,2020,41(14): 265-269,275.
- [37] 刘静.香菇褐变机理及控制技术研究[D].晋中:山西农业大学, 2019.