

γ -氨基丁酸对黄秋葵采后品质及生理特性的影响

殷菲胧, 乔沛, 李静, 王秀丽, 董新红*

(桂林理工大学化学与生物工程学院, 广西桂林 541004)

摘要:为研究 γ -氨基丁酸(γ -aminobutyric acid, GABA)处理对采后秋葵常温贮藏品质及生理特性的影响,分别用不同浓度(5、10、15 mmol/L)GABA水溶液浸泡黄秋葵3 min,以清水处理为对照,室温下(25 °C)贮藏,并定期测定黄秋葵贮藏过程中失重率、叶绿素、 V_c 含量、丙二醛含量、抗氧化酶活性等生理指标的变化。结果表明,10 mmol/L的GABA处理效果最好,能够明显减缓黄秋葵的采后失水,延缓叶绿素和 V_c 的降解,能明显提高过氧化氢酶(Catalase, CAT)和超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)活性,降低过氧化物酶(Peroxidase, POD)活性和减少丙二醛(Malondialdehyde, MDA)的积累。其中贮藏21 d的叶绿素含量比对照组(0.074 mg/g)高出37.49%, V_c 含量比对照组(3.61 mg/100 g)提高了69.23%,SOD活性相比对照组(47.05 U/g)提高了30.35%。相关性和主成分分析表明,黄秋葵贮藏时间和失重率、MDA含量呈极显著正相关($P < 0.01$),与叶绿素含量、 V_c 含量、CAT活性和POD活性呈极显著负相关($P < 0.01$);黄秋葵贮藏品质和综合评价指数均随贮藏时间增加而逐渐降低,而不同浓度的GABA处理能延缓黄秋葵贮藏品质的下降。这些结果表明适宜浓度的GABA处理可以延缓黄秋葵果荚的采后衰老,并保持良好的采后品质和营养价值,为GABA的应用及黄秋葵的采后保鲜提供理论依据。

关键词: γ -氨基丁酸(GABA),黄秋葵,采后品质,生理特性,主成分分析

Effect of GABA on the Quality and Physiological Characteristics of Postharvest Okra

YIN Fei-long, QIAO Pei, LI Jing, WANG Xiu-li, DONG Xin-hong*

(College of Chemistry and Bioengineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract:In order to study effects of γ -aminobutyric acid (GABA) treatment on the storage quality and physiological characteristics of post-harvested okra at room temperature, the okra was treated with different concentrations (5, 10, 15 mmol/L) of GABA for 3 min and then was stored at room temperature (25 °C), and water treatment group was used as a control. All physiological indexes such as weight loss rate, chlorophyll, V_c and malondialdehyde content and antioxidant enzyme activity were regularly determined. The results showed that 10 mmol/L GABA treatment showed the best preserving effects, which could significantly reduce the post-harvest water loss of okra, delay the degradation of chlorophyll and V_c , significantly increase catalase (CAT) activity and superoxide dismutase (SOD) activity, decrease peroxidase (POD) activity and accumulation of malondialdehyde (MDA). Chlorophyll content at 21 d was 37.49% higher than that of the control group (0.074 mg/g), V_c content was 69.23% higher than that of the control group (3.61 mg/100 g) and SOD activity was 30.35% higher than that of the control group (47.05 U/g). Correlation and principal component analysis (PCA) showed that weight loss rate and MDA were positively correlated with storage time of okra ($P < 0.01$), while chlorophyll content, V_c content, POD activity and CAT activity were negatively correlated with storage time ($P < 0.01$). The storage quality and comprehensive evaluation index of okra decreased gradually with storage time, different concentration of GABA treatment could delay the decline of okra storage quality. The results suggest that appropriate concentration of GABA treatment can delay the postharvest senescence of okra pod and maintain the good postharvest quality and nutritional value of okra, which provides a new theoretical basis for the application of GABA and post-harvest preservation of okra.

Key words: γ -aminobutyric acid (GABA); okra; postharvested physiology; physiological characteristics; principal component analysis (PCA)

收稿日期:2019-05-22

作者简介:殷菲胧(1994-),男,硕士研究生,研究方向:果蔬采后生物学,E-mail:Yfeilong1994@163.com。

*通讯作者:董新红(1977-),女,博士,副教授,研究方向:园艺产品采后生物学,E-mail:dongxhok@126.com。

基金项目:国家自然科学基金(31760472);广西中青年骨干教师基础能力提升项目(KY2016YB197);桂林理工大学博士科研启动基金(GLUTQD2003065);广西壮族自治区特聘专家项目(厅发[2018]39)。

中图分类号:TS255.3

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2020)04-0259-07

doi:10.13386/j.issn1002-0306.2020.04.044

引文格式: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.

黄秋葵 (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench), 被称为蔬菜之王,深受岭南地区大众所喜爱^[1]。黄秋葵本身水分含量高、表面积大,极易失水、衰老、褐变及纤维化,严重影响其商品价值,因此,研究黄秋葵的贮藏保鲜具有一定的实际应用价值,目前主要集中在物理(气调和冷藏)方面。辛松林等^[2]研究表明,气调可以有效的改善采后黄秋葵冷藏期间感官品质,延缓黄秋葵衰老。真空冷藏能明显降低黄秋葵失重率及推迟呼吸高峰出现,延缓可溶性糖含量下降^[3]。但气调库一次性投资较大,贮藏成本偏高;低温贮藏则物流成本偏高,需要投入大量人力、物力和财力。而采用化学方法又由于化学物质残留对人体具有毒副作用而受到限制。因此,寻找一种安全有效的生物保鲜技术就显得尤为重要。

果实的采后衰老是贮藏过程中普遍存在的一种现象,不仅影响其外观,同时还会造成其风味和营养的劣变。果实的采后衰老是由内在和外部环境因素所诱导和引起的一种主动过程,活性氧(ROS)的累积造成的膜脂过氧化损伤是生物体衰老的主要诱因^[4]。正常机体内活性氧代谢处于平衡稳定,不仅不会对机体造成损害,还能起到一定的信息传递功能^[5],但采后果蔬处于逆境胁迫条件下,富集的活性氧得不到有效清除,造成脂质、蛋白质及核酸的过氧化链式反应,加速果蔬的衰老褐变^[6]。因此,果蔬采后品质降低与活性氧代谢引起的生理反应密切相关,而良好的保鲜技术和方法可以有效减少活性氧的积累,减轻过氧化对膜质的损伤,从而延缓果蔬的衰老和劣变。

γ-氨基丁酸(GABA)是一种四碳氨基酸^[7],能有效减轻活性氧的积累,缓解逆境对有机体的伤害,并提高机体保护酶的活性^[8]。外源GABA能够促进桃^[9-10]、甜瓜和香蕉^[11]等果蔬内源GABA累积,增加抗氧化系统酶活性和保持能量水平,提高果实的抗逆性。目前GABA在采后黄秋葵常温贮藏品质及生理特性的影响还未见报道。本研究采用GABA对采后黄秋葵进行处理,首先对黄秋葵失重率、叶绿素含量和V_c含量进行分析,进而考察了GABA处理对黄秋葵抗氧化酶系活性、活性氧膜质过氧化产物的影响,旨在探讨GABA处理维持黄秋葵的采后品质,延缓其衰老的可能机理,为GABA作为保鲜剂的应用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料与仪器

黄秋葵 桂林市某农贸市场,挑选新鲜、完整、无破损的黄秋葵备用;GABA(99%) 上海阿拉丁生化科技股份有限公司;咪鲜胺(45%) 湖南新长山农业发展股份有限公司;所有实验用化学试剂 均为国产分析纯。

DK-S24 电热恒温水浴锅 上海精宏实验设备有限公司;SQP 电子天平 赛多利斯科学仪器有限公司;UV1800 紫外分光光度 岛津仪器(苏州)有限公司;FA2004C 分析天平 上海越平科学仪器有限公司;H2050R 台式高速冷冻离心机 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;Revco Ex F24086V 超低温冰箱 美国 Thermo 公司;LHS-250HC-II 恒温恒湿箱 上海一恒科学仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品处理 黄秋葵经清水处理晾干后,先用0.1%的咪鲜胺水溶液浸泡3 min后,每组70个,分别在5、10、15 mmol/L的GABA水溶液中充分浸泡3 min,以清水处理为对照,涂层均匀后,自然晾干,分别于常温条件(25℃)下贮藏。每3 d取样(10个),当天测定失重后液氮冷冻打粉并低温贮藏,用于测定其余指标。

1.2.2 失重率的测定 失重率参照帅良等^[12]方法,每组3个,共4组,采用称重法,按式(1)计算。

$$\text{失重率}(\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

式中: M₁ 代表采样0 d质量, g; M₂ 代表每次取样质量, g。

1.2.3 叶绿素含量测定 叶绿素含量测定参照李丽等^[13]采用丙酮提取法,重复3次,分别测定提取液在663和645 nm处吸光值,根据Arnon公式,得总叶绿素含量,按式(2)计算。

$$\text{叶绿素含量}(\text{mg/g}) = \frac{(20.29A_{645} + 8.05A_{663}) \times v}{m \times 1000} \quad \text{式(2)}$$

式中: v 代表采样提取液总体积, mL; m 代表取样质量, g; 20.29和8.05均为Arnon公式中由吸光系数分别得到的相关系数。

1.2.4 V_c含量测定 V_c含量测定参照李静等^[14]方法,采用2,6-二氯酚靛酚钠滴定法测定抗坏血酸,含量用mg/100 g表示。

2,6-二氯酚靛酚钠溶液标准滴定:以10 mL 0.1 mg/mL标准抗坏血酸溶液置于锥形瓶中,用2,6-二氯酚靛酚钠溶液滴定至微红色,15 s不褪色即为滴定终点,根据消耗的2,6-二氯酚靛酚钠溶液的量,计算出1 mL染料溶液相当于抗坏血酸质量(ρ)。每次取样均重复测3次。

样品提取测定:取预冷50 mL离心管,称取2 g秋葵粉,然后加入15 mL 20 g/L预冷的草酸溶液,漩涡振荡30 s,冰浴静止提取10 min,4℃下12000 r/min离心10 min,取10 mL上清液用2,6-二氯酚靛酚钠溶液滴定至微红色,15 s不褪色即为滴定终点,记下此时染料用量。同时以10 mL草酸溶液(20 g/L)作为空白,按照同样方法进行滴定。以上操作重复3次。V_c含量按式(3)计算。

$$V_c \text{ 含量}(\text{mg}/100 \text{ g}) = \frac{V \times (V_1 - V_0) \times \rho}{V_s \times m} \times 100 \quad \text{式(3)}$$

式中: V_1 代表样品滴定消耗染料体积, mL; V_0 代表空白滴定消耗染料体积, mL; ρ 代表 1 mL 染料溶液相当于抗坏血酸的质量, mg/mL; V_s 代表滴定时所取样品溶液体积, mL; V 代表样品提取液总体积, mL; m 代表样品质量, g。

1.2.5 丙二醛含量测定 丙二醛含量测定参照 Zhang 等^[15] 采取 TBA 显色法测定并稍作修改。取预冷 50 mL 离心管, 称取 2 g 秋葵粉, 然后加入 10 mL 预冷 10% TCA 溶液旋涡振荡 30 s, 冰水浴静置提取 10 min, 4 °C 下 12000 r/min 离心 20 min, 取上清液 2 mL, 加入 2 mL 的 TBA 溶液并在沸水浴加热 20 min, 降至室温, 于 5000 r/min 离心 15 min, 取上清液, 以 0.6% 的 TBA 溶液为空白, 测量其在 532、600 和 450 nm 处的吸光度。以上操作重复 3 次。按式(4)计算:

$$\text{MDA 含量}(\mu\text{mol}/\text{g}) = \{ [6.45 \times (\text{OD}_{532} - \text{OD}_{600}) - 0.56 \times \text{OD}_{450}] \times V \} / (V_s \times m \times 1000) \quad \text{式(4)}$$

式中: V 代表提取液总体积, mL; V_s 代表测定时所取样品提取液体积, mL; m 代表样品质量, g。

1.2.6 过氧化物酶(POD)活性测定 取预冷 50 mL 离心管, 称取 2 g 秋葵粉, 然后加入 10 mL 预冷 0.1 mol/L pH5.5 乙酸缓冲液(含 1 mmol/L PEG, 4% PVP 和 1% Triton X-100)旋涡振荡 30 s, 冰水浴静置提取 10 min, 4 °C 下 12000 r/min 离心 30 min, 取上清液, 低温保存备用。过氧化氢酶活性参考 Chu 等^[16] 进行测定, 以上操作重复 3 次。

1.2.7 过氧化氢酶活性及超氧化物歧化酶活性测定 取预冷 50 mL 离心管, 称取 2 g 秋葵粉, 然后加入 10 mL 预冷 0.1 mol/L pH7.8 磷酸缓冲液(含 5 mmol/L DTT 和 5% PVP)旋涡振荡 30 s, 冰水浴静置提取 10 min, 4 °C 下 12000 r/min 离心 30 min, 取上清液, 过氧化氢酶活性参考 Gao 等^[17] 的方法进行测定; 超氧化物歧化酶活性测定参考 Chen 等^[18] 的方法进行测定, 以上操作重复 3 次。

1.3 数据处理

实验结果采用 SPSS 19.0 软件进行单因素方差分析(Duncan 法, 显著水平 $P < 0.05$) 和因子分析, 采用 OriginPro 8.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 GABA 处理对黄秋葵失重率的影响

果实失重率是评价采后果蔬贮藏品质, 反映采后果实内容物消耗速率的重要指标^[12]。如图 1 所示, 随着贮藏时间的延长, 黄秋葵的失重率均呈逐渐上升趋势, 其中对照组 21 d 失重率最高为 11.1%。5 和 10 mmol/L 的 GABA 处理能明显减缓采后黄秋葵的水分损失, 尤其贮藏前期(3~12 d)的果实失重率与对照组有显著差异($P < 0.05$), 其中 5 mmol/L 的 GABA 处理组效果最好, 在 21 d 时失重率仅为 8.7%。与对照相比, 15 mmol/L 的 GABA 处理则促进了黄秋葵水分损失, 表现为失重率提高。说明低

浓度 GABA 处理对于减少黄秋葵货架期的水分损失, 对保持其新鲜品质具有较好效果。

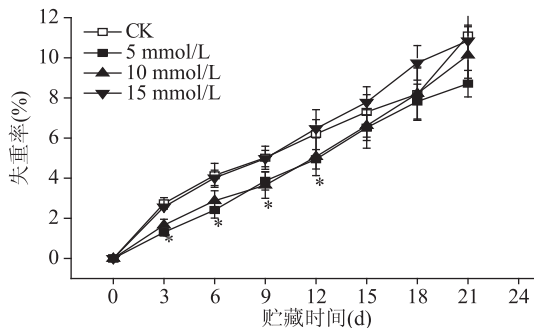


图1 GABA 处理对黄秋葵失重率的影响

Fig.1 Effect of GABA treatment on the weight loss rate of okra

注: * 表示 10 mmol/L GABA 与 CK 组存在显著差异 ($P < 0.05$); ** 表示 10 mmol/L GABA 与 CK 组存在极显著差异 ($P < 0.01$); 无标识表示无显著差异, 全文同(通过最终分析 10 mmol/L GABA 效果最好, 因此显著差异只标注 10 mmol/L GABA)。

2.2 GABA 处理对黄秋葵叶绿素含量的影响

叶绿素广泛存在于植物及果蔬中, 其含量的降低会造成果蔬出现严重的黄化现象, 影响其商品价值^[19]。由图 2 可知, 在常温贮藏期间, 对照组和处理组叶绿素含量在贮藏过程中不断下降, 对照组叶绿素含量由 0 d 的 0.1269 mg/g 降为 21 d 的 0.0745 mg/g, 降低 41.3%。10 mmol/L GABA 处理效果最好, 叶绿素含量 3 d 后一直极显著高于对照组 ($P < 0.01$), 从 0 d 的 0.1269 mg/g 降至 21 d 的 0.1025 mg/g, 降低 19.2%, 且 21 d 叶绿素含量为对照组的 137.58%。说明 10 mmol/L GABA 处理能减缓叶绿素的降解, 使黄秋葵果荚保持良好的外观品质。5 和 15 mmol/L 的 GABA 处理虽然也能抑制叶绿素含量降低, 但与对照组差异不显著。

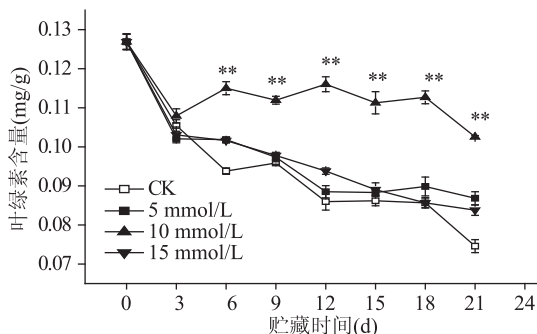


图2 GABA 处理对黄秋葵叶绿素含量的影响

Fig.2 Effect of GABA treatment on chlorophyll content of okra

2.3 GABA 处理对黄秋葵 V_c 含量的影响

V_c 作为还原性物质, 可消除和减轻活性氧等自由基对细胞的伤害^[19], 通过测定其含量可以反映采后黄秋葵生理状况^[20]。由图 3 可知, 所有处理组黄秋葵的 V_c 含量均在贮藏过程中逐渐下降。对照组的 V_c 含量下降幅度最大, 由 0 d 的 13.30 mg/100 g 降至 21 d 的 3.61 mg/100 g, 下降 72.9%; 而 10 mmol/L

GABA 处理组效果最佳, V_c 含量显著高于对照组 ($P < 0.05$), V_c 含量由 0 d 的 13.30 mg/100 g 降至 21 d 的 6.11 mg/100 g, 下降 54.1%。与对照相比, 在贮藏末期(21 d), 各种浓度的 GABA 处理均能明显提高黄秋葵的 V_c 含量, 10 mmol/L GABA 处理组 V_c 含量为对照组的 169.2%, 具有极显著差异 ($P < 0.01$)。说明 GABA 处理能有效减缓黄秋葵中 V_c 的降解, 维持较高水平的 V_c 含量, 保持黄秋葵果荚良好的营养品质。

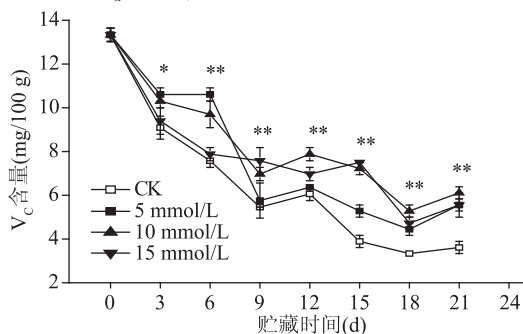


图3 GABA处理对黄秋葵 V_c 含量的影响

Fig.3 Effect of GABA treatment on V_c content of okra

2.4 GABA 处理对黄秋葵丙二醛 (MDA) 含量的影响

MDA 是脂质过氧化的主要产物之一, 其含量的多少可作为采后秋黄葵贮藏期间衡量细胞膜透性和稳定性的重要指标之一^[21]。由图 4 可以看出, 在常温贮藏过程中, 对照组黄秋葵中 MDA 含量呈逐渐升高趋势(由 0 d 的 $5.1 \times 10^{-3} \mu\text{mol/g}$ 上升至 21 d 的 $11.97 \times 10^{-3} \mu\text{mol/g}$), 不同处理组 MDA 含量均呈先增加后稍降的趋势, 且 MDA 含量均显著低于对照组 ($P < 0.05$)。在低温贮藏的鲜切石榴^[22]和低 O_2 高 CO_2 处理后贮藏的白玉枇杷^[23]的贮藏过程中, 发现类似的 MDA 变化现象。因此, GABA 处理能明显延缓黄秋葵贮藏过程中细胞膜脂质过氧化进程, 降低膜脂过氧化对细胞的损伤, 减慢衰老褐变的速度, 有助于延长黄秋葵采后的货架期。

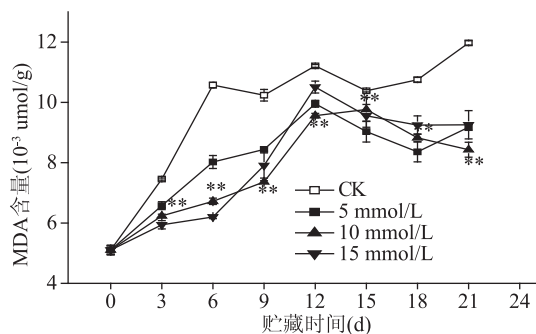


图4 GABA处理对黄秋葵丙二醛(MDA)含量的影响

Fig.4 Effect of GABA treatment on malondialdehyde (MDA) content of okra

2.5 GABA 处理对黄秋葵过氧化物酶 (POD) 活性的影响

过氧化物酶(POD)可以催化过氧化氢的氧化反应, 加速果蔬衰老褐变^[24]。由图 5 可知, 15 mmol/L GABA 处理组与对照组 POD 活性变化基本一致, 呈

先上升后降低的趋势且贮藏前期(0~9 d)显著 ($P < 0.05$) 低于对照组, 贮藏后期则与对照组差别不大。5 mmol/L 的 GABA 处理组 POD 活性呈逐渐下降趋势, 一直低于对照组, 且在 0~9 d 呈现显著差异 ($P < 0.05$), 12 d 之后无显著性差异 ($P > 0.05$); 10 mmol/L GABA 处理组 POD 活性逐渐下降且 15 d 之前显著低于对照组 ($P < 0.05$), 18 d 无显著差异。与对照相比, 不同浓度的 GABA 处理会不同程度降低黄秋葵的 POD 活性, 这与热激处理的鲜切甜椒^[25]和褪黑素处理的荔枝^[15]中 POD 活性变化一致。结果表明不同浓度 GABA 处理(15 mmol/L 处理后期除外)均可以明显降低 POD 活性, 尤以 10 mmol/L GABA 处理效果最佳。

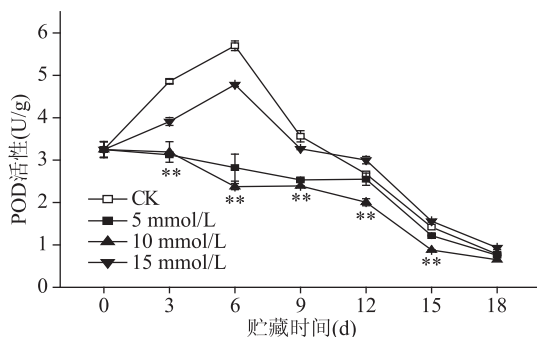


图5 GABA处理对黄秋葵过氧化物酶(POD)活性的影响

Fig.5 Effect of GABA treatment on POD activity of okra

2.6 GABA 处理对超氧化物歧化酶 (SOD) 活性

超氧化物歧化酶(SOD)可以通过歧化反应清除 O_2^- 并将其转化为低毒的 H_2O_2 , 从而降低活性氧自由基对组织细胞的损害, 延缓果蔬的衰老^[26]。由图 6 可知, 在贮藏过程中, 各处理组的黄秋葵 SOD 活性均先上升后下降, 10 mmol/L GABA 处理组的 SOD 活性自 6 d 后显著高于对照 ($P < 0.01$), 5 和 15 mmol/L 的 GABA 处理组在贮藏中期(6~18 d) SOD 活性显著高于对照组 ($P < 0.05$), 贮藏后期(18~21 d) 则与对照组无显著差异 ($P > 0.05$)。这表明 GABA 处理可以明显提高采后黄秋葵常温储藏期间 SOD 活性, 降低活性氧积累和损伤。

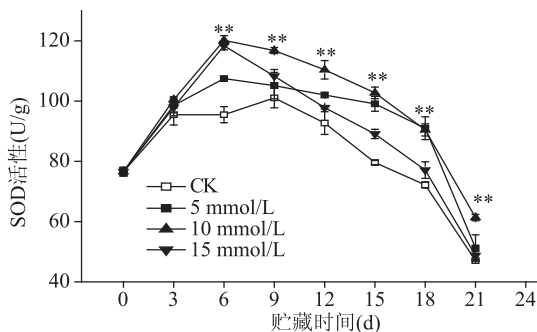


图6 GABA处理对黄秋葵超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响

Fig.6 Effect of GABA treatment on SOD activity of okra

2.7 GABA 处理对过氧化氢酶 (CAT) 活性

CAT 催化 H_2O_2 生成无毒性的水和分子氧从而降低活性氧自由基对组织细胞的损害, 延缓果蔬的衰老, CAT 活性可以反映采后果蔬对抗胁迫反应的

表1 各生理指标间的相关性分析
Table 1 Correlation analysis of all physiological indexes

相关系数	贮藏时间(d)	失重率	叶绿素	V _c	MDA	SOD	POD	CAT
贮藏时间(d)	1							
失重率	0.972**	1						
叶绿素	-0.682**	-0.746**	1					
VC	-0.897**	-0.910**	0.816**	1				
MDA	0.787**	0.807**	-0.763**	-0.822**	1			
SOD	-0.013	-0.026	-0.055	-0.119	0.053	1		
POD	-0.767**	-0.643**	0.244	0.508**	-0.360*	0.218	1	
CAT	-0.944**	-0.966**	0.792**	0.885**	-0.850**	0.113	0.619**	1

注: *代表差异显著, $P < 0.05$; **代表差异极显著, $P < 0.01$ 。

能力^[27]。由图7可知,不同处理组CAT活性变化基本一致,呈逐渐下降的趋势,其中5和10 mmol/L的GABA处理组高于对照组,尤其是10 mmol/L的GABA处理组效果具有极显著差异($P < 0.01$),5 mmol/L的GABA处理后期(9 d之后)效果明显($P < 0.05$),而15 mmol/L GABA处理组与对照组无显著差异($P > 0.05$)。说明适宜浓度的GABA(5和10 mmol/L)处理可提高黄秋葵果荚中CAT活性,促进活性氧清除,降低膜脂过氧化,从而保持果荚的良好品质。

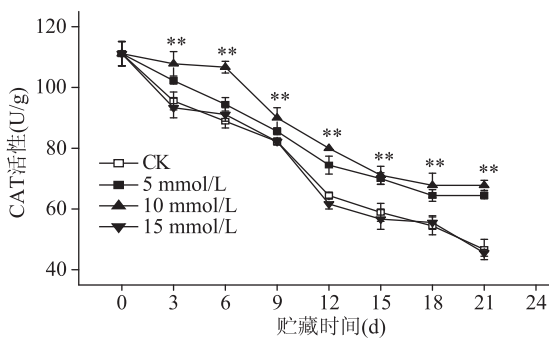


图7 GABA处理对黄秋葵过氧化氢酶(CAT)活性的影响
Fig.7 Effect of GABA treatment on CAT activity of okra

2.8 相关性分析

对黄秋葵保鲜的各生理指标进行相关性分析,结果如表1所示。黄秋葵贮藏时间和失重率、MDA含量呈极显著正相关($P < 0.01$),与叶绿素含量、V_c含量、CAT活性和POD活性呈极显著负相关($P < 0.01$)。该结果进一步说明随着贮藏的进行,果实的失水率也逐渐提高,叶绿素和V_c逐渐降解,酶活性降低不足以及时清除植物体内产生的活性氧,随着活性氧积累,膜脂过氧化损伤加剧,导致黄秋葵果荚的外观和食用品质下降,直至最后衰老变质。

2.9 主成分分析

主成分分析旨在利用降维的思想使问题简单化,同时得到更加科学有效的数据信息。目前关于采后果蔬贮藏品质方面应用较少,因此本文采用主成分分析法,以综合评价指数来判定不同处理组在常温贮藏过程中果蔬品质的变化。由表2可知,对黄秋葵保鲜过程中的指标进行标准化处理之后进行主成分分析,第1、2主成分特征值分别为4.663和1.189,第1、2主成分

贡献率分别为66.62%和16.984%,前2个主成分特征值均大于1且累积贡献率达到83.604%,可见前2个主成分可以说明秋黄葵采后常温贮藏期间有关数据的变化趋势,完全符合主成分分析的基本要求,因此取前2个主成分进行数据分析。

表2 各指标特征值及方差贡献率
Table 2 Characteristic values and variance contribution rate of each indicator

主成分	特征值	方差贡献率 (%)	累积方差贡献率 (%)
1	4.663	66.620	66.620
2	1.189	16.984	83.604
3	0.679	9.699	93.303
4	0.230	3.279	96.582
5	0.130	1.855	98.437
6	0.090	1.286	99.723
7	0.019	0.277	100

由表3可知可用2个变量Y₁、Y₂代替原来的7个指标,得出线性组合为(其中Z₁~Z₇均为标准化变量):

$$FAC1-1 = -0.208Z_1 + 0.181Z_2 + 0.203Z_3 - 0.19Z_4 + 0.004Z_5 + 0.131Z_6 + 0.209Z_7; Y_1 = FAC1-1 \times \sqrt{4.663}$$

$$FAC2-1 = -0.49Z_1 - 0.203Z_2 - 0.126Z_3 + 0.139Z_4 + 0.747Z_5 + 0.443Z_6 + 0.085Z_7; Y_2 = FAC2-1 \times \sqrt{1.189}$$

同时以选取的第1、第2主成分的方差贡献率 α_1 (66.62%)、 α_2 (16.984%)作为权数,构建综合评价模型: $F = \alpha_1 Y_1 + \alpha_2 Y_2$,即 $F = 0.6629Y_1 + 0.16984Y_2$ 。F值代表秋黄葵贮藏品质。

表3 各指标得分向量

特征向量	第1主成分	第2主成分
失重率	-0.208	-0.049
叶绿素	0.181	-0.203
V _c	0.203	-0.126
MDA	-0.19	0.139
SOD	0.004	0.747
POD	0.131	0.443
CAT	0.209	0.085

由图 8 可知,贮藏期间,黄秋葵综合评价指数均逐渐降低,这与实验结果中随着贮藏时间延长,黄秋葵贮藏品质逐渐下降相一致,其中 GABA 处理组相比对照组明显延缓了黄秋葵衰老进程,即在一定程度上保持了秋葵的贮藏品质,综合评定以 10 mmol/L 处理效果最好。

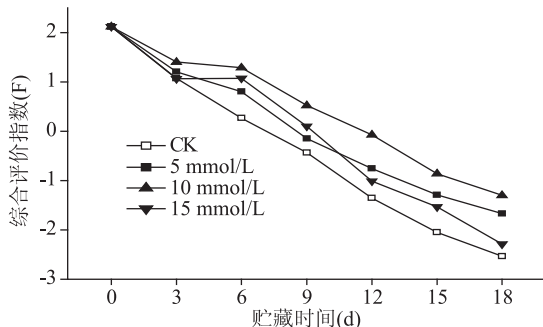


图 8 GABA 处理对综合评定指数的影响

Fig.8 Effect of GABA treatment

on the comprehensive assessment index

3 结论与讨论

研究表明,GABA 处理在一定程度上可抑制采后黄秋葵常温储藏期间水分的损失、POD 活性、活性氧产生及丙二醛含量的积累,减缓叶绿素和 V_c 的降解。同时也不同程度提高了秋葵常温贮藏期间 SOD 活性和 CAT 活性,综合评定以 10 mmol/L GABA 处理效果最好。相关性分析中,叶绿素含量与 V_c 含量极显著正相关($P < 0.01$),说明二者在黄秋葵采后贮藏过程中变化一致,随着黄秋葵果实的发黄老化, V_c 含量逐渐降低;叶绿素和 V_c 含量变化与 MDA 浓度和失重率极显著负相关($P < 0.01$),说明 MDA 浓度可以直观的作为秋葵贮藏过程中贮藏品质的评价指标。主成分分析表明,随着贮藏时间的延长,黄秋葵品质相关的综合评价指数均逐渐降低,不同浓度 GABA 明显延缓了黄秋葵采后的品质下降,即在一定程度上保持了黄秋葵的贮藏品质。

对于不同的生理指标,三种浓度(5、10 和 15 mmol/L)影响效果并不完全一致。10 mmol/L 对各生理指标的影响效果表现为有利于黄秋葵采后贮藏,而 5 和 15 mmol/L 总体表现不够稳定,说明选择合适的 GABA 浓度对果蔬进行保鲜处理也是一个很重要的考虑因素。另外,有研究表明,外源 GABA 处理可以刺激某些生长植株逆境胁迫条件下乙烯的产生^[28-29]。那么究竟 GABA 处理是否刺激了刺激采后黄秋葵中乙烯的产生,黄秋葵各生理指标受不同浓度影响的变化是否与刺激乙烯合成的时间和剂量有关? 这些问题还有待进一步研究。

丙二醛是 ROS 发生膜质过氧化的重要产物,是研究植物衰老生理和逆境胁迫生理的常用指标^[20]。理论上来说,随着采后果蔬的不可逆衰老进行,果蔬中 MDA 含量会逐渐增多直至果实衰老腐败失去食用品质和商业价值。但在本研究中,对照组的 MDA 含量呈现不断上升趋势,而经 GABA 处理后,黄秋葵中 MDA 含量在贮藏前期(0~12 d)明显逐步上升,后

期则开始不断下降(5 mmol/L 处理组 18 d 后又升高)。这种现象其实在其他果实的采后贮藏过程中也有发现^[22-23],可能与具体的贮藏条件和处理方式有关。

早期研究认为,可以清除植物体内的 ROS 防御酶系统主要有 SOD、POD、CAT 和抗坏血酸过氧化物酶(APX)等保护酶,保护酶活性的增加,可以及时清除系统产生的活性氧自由基,避免膜脂过氧化,保护膜系统完整性,从而延缓果实衰老^[30]。但近年来研究发现,POD 既可将活性氧 H_2O_2 分解为 H_2O 清除掉,也可以催化 H_2O_2 氧化,将酚类物质和类黄酮物质氧化聚合形成褐色物质,引起果蔬的衰老褐变^[14]。本研究中,GABA 处理对黄秋葵的 SOD 和 CAT 活性均有不同程度的提高,但却降低了其 POD 活性。Zhang 等^[15]研究也发现,褪黑素处理可以降低采后荔枝贮藏过程中的 POD 和 PPO 活性,从而有效延缓了荔枝的褐变进程。刘洪竹等^[25]研究热激处理对鲜切甜椒 POD 活性变化影响时,也有同样发现^[24]。也许 POD 在果蔬采后生理中的具体作用机理还需进行更多研究。

总之,合适浓度的 GABA 处理能有效延缓黄秋葵采后衰老,保持果荚较好的品质。GABA 参与了有机体多个生物反应过程,在比较广泛剂量范围内对人体几乎无毒性,所以 GABA 在延缓果蔬采后衰老,保持果蔬品质方面将有良好的应用前景。

参考文献

- [1]徐碧珍,沈文杰,李育军,等.黄秋葵育种及其研究前景[J].长江蔬菜,2018,466(20):45-50.
- [2]辛松林,秦文,李慧妍,等.不同保鲜方法对黄秋葵果实贮藏品质及活性氧代谢的影响[J].北方园艺,2017(23):164-169.
- [3]蒋跃明,傅家瑞,徐礼根.膜对采后园艺作物衰老的影响[J].广西植物,2002,22(2):160-166.
- [4]许俊齐,童斌,王瑞,等.不同预冷方式对采后黄秋葵保鲜效果的影响[J].食品工业科技,2014,35(9):312-315.
- [5]Forman H J, Maiorino M, Ursini F, et al. Signaling functions of reactive oxygen species[J]. Biochemistry, 2010, 49(5):835-842.
- [6]Apel K, Hirt H. Reactive oxygen species: Metabolism, oxidative stress, and signal transduction[J]. Annual Review of Plant Biology, 2004, 55(1):373-399.
- [7]余辰. γ -氨基丁酸对梨果实青霉病抗性的诱导作用及相关机理研究[D].杭州:浙江大学,2014:17-18.
- [8]Shelp B J, Bozzo G G, Trobacher C P, et al. Hypothesis/review: Contribution of putrescine to 4-aminobutyrate (GABA) production in response to abiotic stress[J]. Plant Science, 2012, 193:130-135.
- [9]Shang H, Cao S, Yang Z, et al. Effect of exogenous γ -aminobutyric acid treatment on proline accumulation and chilling injury in peach fruit after long-term cold storage [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2011, 59(4):1264-1268.
- [10]Yang A, Cao S, Yang Z, et al. γ -Aminobutyric acid treatment reduces chilling injury and activates the defence response of peach

- fruit [J]. Food Chemistry, 2011, 129(4): 1619–1622.
- [11] Wang Y, Luo Z, Huang X, et al. Effect of exogenous γ -aminobutyric acid (GABA) treatment on chilling injury and antioxidant capacity in banana peel [J]. Scientia Horticulturae, 2014, 168: 132–137.
- [12] 帅良, 廖玲燕, 罗焘, 等. 1-MCP 处理对百香果贮藏品质的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(15): 281–284.
- [13] 李丽, 何雪梅, 李昌宝, 等. 炭疽病菌侵染对香蕉采后品质变化及抗病相关酶活性的影响[J]. 现代食品科技, 2017(9): 89–96.
- [14] 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.
- [15] Zhang Y Y, Huber D J, Hu M J, et al. Delay of postharvest browning in litchi fruit by melatonin via the enhancing of antioxidative processes and oxidation repair [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66: 7475–7484.
- [16] Chu W, Gao H, Chen H, et al. Effects of cuticular wax on the postharvest quality of blueberry fruit [J]. Food Chemistry, 2017, 239: 68–74.
- [17] Gao H, Zhang Z K, Chai H K, et al. Melatonin treatment delays postharvest senescence and regulates reactive oxygen species metabolism in peach fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 118: 103–110.
- [18] Chen X H, Zhen Y H, Yang Z F, et al. Effects of high oxygen treatments on active oxygen metabolism and fruit decay in postharvest strawberry [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2005, 28: 99–102.
- [19] Ali S, Khan A S, Malik A U, et al. Postharvest application of antibrowning chemicals modulates oxidative stress and delays pericarp browning of controlled atmosphere stored litchi fruit [J]. Food Biochemistry, 2019, 43: e12746.
- [20] Forte L G, Massolo J F, Concellón A, et al. Effects of ethylene and 1-MCP on quality maintenance of fresh cut celery [J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 148: 176–183.
- [21] Mehdy M C. Active oxygen species in plant defense against pathogens [J]. Plant Physiology, 1994, 105(2): 467–472.
- [22] 申琳, 王茜, 陈海荣, 等. 低温贮藏对鲜切石榴籽粒品质及活性氧代谢的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(12): 4336–4340.
- [23] 马佳佳, 隋思瑶, 丁青青, 等. 低 O_2 高 CO_2 对常温贮藏白玉枇杷品质及活性氧代谢的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(5): 1089–1096.
- [24] Luo Y, Ming J, Zeng K F. Disease-resistant mechanism of post-harvest fruits and vegetables induced by a ntagonists [J]. Food Science, 2010, 31(9): 297–300.
- [25] 刘洪竹, 赵习姮, 陈双颖, 等. 热激处理对鲜切甜椒活性氧代谢及贮藏品质的影响[J]. 食品工业科技, 2014, 35(1): 310–314.
- [26] Gao H, Zhang Z K, Chai H K, et al. Melatonin treatment delays postharvest senescence and regulates reactive oxygen species metabolism in peach fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 118: 103–110.
- [27] Jiang L I, Hou T, Yuan X, et al. Effect of storage temperature and packing method on the decay and physiology of fresh leaves of gynura bicolor D. C [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2010, 34(5): 14–18.
- [28] Kathiresan A. γ -Aminobutyric acid stimulates ethylene biosynthesis in sunflower [J]. Plant Physiology, 1997, 115(1): 129–135.
- [29] Shi S Q, Shi Z, Jiang Z P, et al. Effects of exogenous GABA on gene expression of caragana intermedia roots under NaCl stress: Regulatory roles for H_2O_2 and ethylene production [J]. Plant Cell and Environment, 2010, 33(2): 149–162.
- [30] 孙爱萍, 郑永华, 杨海燕, 等. 1-甲基环丙烯处理对采后甜瓜活性氧相关代谢的影响[J]. 食品科学, 2010, 31(10): 326–329.
- [31] Pirsahab, et al. Chitosan modified N, S-doped TiO_2 and N, S-doped ZnO for visible light photocatalytic degradation of tetracycline [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 132: 360–373.
- [25] 王磊. 氮硫改性二氧化钛可见光催化降解水中的曙红 Y [D]. 南宁: 广西民族大学, 2011.
- [26] Zhou F, Song H, Wang H, et al. N-doped TiO_2 /sepiolite nanocomposites with enhanced visible-light catalysis: Role of N precursors [J]. Applied Clay Science, 2018, 166: 9–17.
- [27] Suwannaruang T, Kamonsuangkasem K, Kidkhunthod P, et al. Influence of nitrogen content levels on structural properties and photocatalytic activities of nanorice-like N-doped TiO_2 with various calcination temperatures [J]. Materials Research Bulletin, 2018, 105: 265–276.
- [28] Chen H, Li X, Wan R, et al. A DFT study on modification mechanism of (N, S) interstitial co-doped rutile TiO_2 [J]. Chemical Physics Letters, 2018, 695: 8–18.
- [29] 董林利, 邓靖, 汤建新. PVA 活性包装膜对圣女果保鲜性能研究 [J]. 包装工程, 2014, 35(9): 132–27–31.
- [30] 宋贤良, 周家华, 朱翠华, 等. 大豆蛋白纳米二氧化钛复合膜的制备及性能研究 [J]. 现代化工, 2007, (12): 40–41, 43.
- [31] Thakur R, Pristijono P, Scarlett C J, et al. Starch-based films: Major factors affecting their properties [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 132: 1079–1089.
- [32] Ntsoane M L, Luca A, Zude-Sasse M, et al. Impact of low oxygen storage on quality attributes including pigments and volatile compounds in ‘Shelly’ mango [J]. Scientia Horticulturae, 2019, 250: 174–183.
- [33] Mditshwa A, Magwaza L S, Tesfay S Z, et al. Postharvest factors affecting vitamin C content of citrus fruits: A review [J]. Scientia Horticulturae, 2017, 218: 95–104.

(上接第 258 页)