

# GABA 处理对双孢蘑菇活性氧代谢和膜脂过氧化的影响

李 静<sup>1</sup> 李 霞<sup>1</sup> 陈翠松<sup>1</sup> 董新红<sup>1</sup> 刘丽娜<sup>2</sup> 李顺峰<sup>2</sup>

(1. 桂林理工大学化学与生物工程学院 广西桂林 541004;

2. 河南省农业科学院农副产品加工研究中心 河南郑州 450002)

**摘 要:** 为探讨  $\gamma$ -氨基丁酸 (GABA) 处理对双孢蘑菇 (*Agaricus bisporus*) 活性氧代谢和膜脂过氧化的影响, 采用 5 mmol/L GABA 浸泡处理双孢蘑菇 5 min, 然后于 4 °C 条件下贮藏 12 d, 测定双孢蘑菇颜色变化、相对电导率、膜脂过氧化产物丙二醛 (MDA) 的含量、超氧阴离子生成速率、 $H_2O_2$  的含量以及过氧化氢酶 (CAT)、超氧化物歧化酶 (SOD) 等抗氧化酶活性的变化。结果表明, GABA 处理能够显著提高抗氧化酶 CAT 和 SOD 的活性, 降低双孢蘑菇的相对电导率、超氧阴离子产生速率和减少 MDA、过氧化氢的积累, 延缓细胞膜透性和脂质过氧化进程, 进而较好的保持双孢蘑菇的  $L^*$  值, 降低其褐变指数, 因此 GABA 可以用作双孢蘑菇的护色保鲜剂。

**关键词:** 双孢蘑菇  $\gamma$ -氨基丁酸 活性氧 抗氧化酶 褐变

## Effects of GABA Treatment on Activate Oxygen Metabolism and Membrane Lipid Peroxidation of *Agaricus bisporus*

LI Jing<sup>1</sup> LI Xia<sup>1</sup> CHEN Cui-song<sup>1</sup> DONG Xin-hong<sup>1</sup> LIU Li-na<sup>2</sup> LI Shun-feng<sup>2</sup>

(1. College of Chemistry and Bioengineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;

2. Institute of Agro-products Processing, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** In order to investigate the effect of  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA) treatment on active oxygen metabolism and membrane lipid peroxidation of *Agaricus bisporus*, *A. bisporus* were dipped for 5 min in 5 mmol/L GABA, then stored at 4 °C for 12 d. Changes of the browning, membrane permeability, lipid peroxidation, reactive oxygen species, and antioxidant enzymes activity in the mushroom tissue were measured. The results showed that the GABA treatment could significantly increase the activities of SOD and CAT, and reduce the relative leakage rate, the production rate of superoxide anion and the accumulation of the contents of MDA and  $H_2O_2$ . And then, the cell membrane permeability and lipid peroxidation were delayed. Furthermore, the browning of *A. bisporus* was inhibited with higher  $L^*$  value and lower browning index. Therefore, GABA could be used as a color preservative for *A. bisporus*.

**Key words:** *Agaricus bisporus*; GABA; reactive oxygen species; antioxidant enzyme; browning

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2019)03-0275-06

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2019.03.043

引文格式: 李静, 李霞, 陈翠松, 等. GABA 处理对双孢蘑菇活性氧代谢和膜脂过氧化的影响 [J]. 食品工业科技, 2019, 40 (3): 275-280.

双孢蘑菇 (*Agaricus bisporus*) 采后极易发生失水、褐变、开伞、软化、甚至腐烂等品质劣变现象, 常温条件下仅能保存 1~3 d<sup>[1-5]</sup>, 其中褐变是双孢蘑菇外观品质下降的重要因素<sup>[3-7]</sup>。研究表明, 双孢蘑菇采后的褐变主要是酶促褐变, 酚类物质、多酚氧化酶和氧是酶促褐变的必要物质条件<sup>[4]</sup>。正常情况下, 多酚氧化酶和酚类物质在细胞中呈区域化分布, 因不能接触并不会发生褐变反应; 但是当生物体受到损伤或自然衰老时, 尤其是活性氧的积累导致维持细

胞区域化的膜系统发生过氧化损伤, 使细胞内酚类物质渗出, 酶与底物接触, 发生褐变反应, 进而引起组织褐变<sup>[8-10]</sup>。因此, 双孢蘑菇的褐变与活性氧代谢、膜脂过氧化密切相关。实际上, 果蔬体内存在完整的活性氧清除系统, 包括各种抗氧化酶和抗氧化剂<sup>[10]</sup>。因此, 可以通过提高抗氧化酶活性和保持抗氧化剂含量来减缓活性氧积累和膜脂过氧化程度, 维持细胞膜完整性, 达到延长果蔬货架期的目的<sup>[5-10]</sup>。

收稿日期: 2018-06-29

作者简介: 李静 (1981-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向: 农产品贮藏与加工, E-mail: ruochenjl@163.com。

基金项目: 广西自然科学基金资助 (2017GXNSFBA198074)。

目前控制双孢蘑菇褐变的方法主要是化学方法,虽然其具有效果好、操作简单、成本低的优点,但是用量不当易造成环境污染,危害人体健康<sup>[1-3,5-9]</sup>。随着人们对食品安全和品质要求的提高,迫切需要研究和开发绿色环保的保鲜技术。 $\gamma$ -氨基丁酸( $\gamma$ -aminobutyric acid, GABA)是一种广泛存在于生物体内的四碳非蛋白质氨基酸,该物质对环境和人体健康无任何毒副作用,目前作为一种新型食品功能性因子已被批准在食品中使用<sup>[11-12]</sup>。研究表明,外源 GABA 能促进桃、香蕉等果实内源 GABA 和脯氨酸的积累,提高抗氧化系统酶活性和维持能量水平,降低活性氧的积累和膜脂过氧化程度,进而提高果实的抗冷性<sup>[13-15]</sup>。前期研究发现 GABA 能有效的延缓双孢蘑菇的品质劣变<sup>[10,16]</sup>,但是 GABA 对双孢蘑菇活性氧代谢和膜脂过氧化的影响还不清楚。

本研究旨在确定 GABA 处理对双孢蘑菇褐变、细胞膜透性、膜脂过氧化、活性氧积累及抗氧化酶活性的影响,进一步揭示该处理对双孢蘑菇的作用机理,为 GABA 在双孢蘑菇保鲜中的应用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

双孢蘑菇 购自全州新军生态菌家庭农场有限公司,采收预冷后直接运回实验室冷藏,挑选大小均匀(菇盖直径约 3~5 cm)、成熟度一致、色白、无开伞、无机械损伤和无病虫害的菇体进行试验; GABA (99%) 上海阿拉丁生化科技股份有限公司;  $H_2O_2$ 、SOD 测试盒 南京建成生物工程研究所; 所有检测用化学试剂 均为国产分析纯。

Color Flex EZ 色差仪 美国 Hunterlab 公司; TMS-Pro 质构仪 美国 Food Technology Corporation (FTC) 公司; UV1800 紫外分光光度计 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 ExF24086V 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; H18733 便携式电导率仪 北京中仪友信科技有限公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 样品处理 根据前期预实验筛选结果,常温( $20 \pm 1$ ) °C 下,采用 5 mmol/L GABA 溶液浸泡处理双孢蘑菇 5 min,取出晾干后装入镂空的塑料筐中并用保鲜膜覆盖,然后置于( $4 \pm 1$ ) °C 下冷藏,以清水浸泡的双孢蘑菇为对照。分别于 3、6、9、12 d 取样,液氮冻干粉碎后于 -80 °C 超低温冰箱贮藏备用。

1.2.2 颜色评价 用色差仪测定双孢蘑菇盖的亮度  $L^*$ 、红绿度  $a^*$ 、黄蓝度  $b^*$ ,仪器用标准白板( $L^* = 94.11$ 、 $a^* = -1.08$ 、 $b^* = 2.13$ )校正,每个处理测定 12 个整菇。采用  $L^*$  值和褐变指数(BI)评价双孢蘑菇的颜色变化,BI 计算公式如下<sup>[11]</sup>:

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

$$\text{式中: } x = \frac{a^* + 1.75L^*}{5.645L^* + a^* - 3.012b^*}$$

1.2.3 细胞膜透性测定 采用相对电导率(REC)评价细胞膜的透性,相对电导率的测定参照李静等<sup>[9]</sup>的方法。分别取菇盖的上中下三个位置用打孔器将切成直径为 1.0 cm、厚 0.2 cm 的圆片,取 1.0 g 圆片在一定体积去离子水中浸泡 1 h ( $25 \pm 1$  °C)后,用电导率仪测定活组织提取液的电导率,然后将含有样品组织的浸泡液煮沸 30 min 并用去离子水补足体积后,测定总电导率。活组织电导率占总电导率的百分比即为相对电导率。

1.2.4 膜脂过氧化测定 采用丙二醛(MDA)含量评价蘑菇膜脂过氧化程度,MDA 含量的测定参照 Liu 等<sup>[17]</sup>的方法并略作修改。准确称取 1.0 g 冻干菇粉加入 7.0 mL 三氯乙酸,冰浴条件下提取 10 min,  $12000 \times g$  离心 20 min ( $4$  °C),取 1.0 mL 上清液加入 5.0 mL 0.67% 硫代巴比妥酸(用 0.05 mol/L NaOH 溶解)混匀后在 100 °C 加热 20 min,快速冷却至室温后在  $12000 \times g$  离心 10 min,分别测定上清液在 450、532、600 nm 处的吸光值,分别记为  $OD_{450}$ 、 $OD_{532}$ 、 $OD_{600}$ 。MDA 的计算公式如下:

$$\text{MDA 含量}(\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}) = \{ [6.45(\text{OD}_{532} - \text{OD}_{600}) - 0.56\text{OD}_{450}] \times \text{提取液总体积} \} / (\text{样品质量} \times 1000) \quad \text{式(2)}$$

### 1.2.5 超氧阴离子产生速率的测定

1.2.5.1 标准曲线的制作 用  $\text{KNO}_2$  制作标准曲线,  $\text{NO}_2^-$  物质的量乘以 2 作为  $\text{O}_2^-$  物质的量,以吸光值为纵坐标,  $\text{O}_2^-$  物质的量为横坐标,得出标准曲线方程式  $y_1 = 0.005x_1 - 0.004$ ,  $R^2 = 0.9998$ ,其中  $y_1$  为吸光值,  $x_1$  为  $\text{O}_2^-$  物质的量,单位为  $\mu\text{mol/L}$ 。

1.2.5.2 双孢菇中超氧阴离子产生速率的测定 参照 Yan 等<sup>[18]</sup>的方法。准确称取 1.0 g 冻干菇粉,加入 5.0 mL 0.05 mol/L pH7.8 的磷酸缓冲液(含 0.001 mol/L EDTA, 0.3% Triton X-100 和 2% PVP),冰浴条件下提取 10 min,  $12000 \times g$  离心 20 min ( $4$  °C),取 1.0 mL 上清液,加入 1.0 mL 0.05 mol/L pH7.8 的磷酸缓冲液和 1.0 mL 0.001 mol/L 盐酸羟胺溶液,混匀后于 25 °C 条件下保温 1 h; 然后加入 1.0 mL 0.017 mol/L 对氨基苯磺酸和 1.0 mL 0.007 mol/L  $\alpha$ -萘胺,混匀后于 25 °C 条件下保温 20 min 进行显色反应,最后测定 530 nm 处的吸光值,以不进行保温 1 h 的样品测定结果作为参比对照,根据样品管显色液和对照管显色液吸光值的差值,从标准曲线查出相应的  $\text{O}_2^-$  物质的量,以每分钟每克样品(鲜重)产生的  $\text{O}_2^-$  物质的量作为  $\text{O}_2^-$  产生的速率,单位为  $\text{nmol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$  表示。计算公式如下:

$$\text{超氧阴离子产生速率}(\text{nmol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}) = \frac{[(\text{OD}_{530} + 0.004) \times \text{提取液总体积} \times 1000]}{(0.005 \times \text{吸取样品液体积} \times \text{反应时间} \times \text{样品质量})} \quad \text{式(3)}$$

1.2.6 过氧化氢含量的测定 采用  $\text{H}_2\text{O}_2$  测试盒测定。

1.2.7 SOD 和 CAT 活性的测定 粗酶液提取: 称取 1.0 g 冻干菇粉,加 7 mL 0.1 mol/L pH7.8 的磷酸缓冲液,冰浴提取 10 min,  $4$  °C 条件下,  $12000 \times g$  离心 30 min,上清液即为粗酶液。SOD 活性采用 SOD 测

试盒测定。CAT 活性测定参照 Liu 等<sup>[19]</sup>的方法并略作修改:取 2.4 mL 50 mmol/L pH7.0 磷酸钠缓冲液加 0.1 mL 粗酶液于 25 ℃ 水浴预热 2~3 min,再加入 0.5 mL 40 mmol/L  $H_2O_2$ ,摇匀,立即计时, $H_2O_2$ 的降解表示为 240 nm 处吸光度的下降。每 30 s 记录 1 次,记录 5 min。以 1 min 内  $OD_{240}$ 降低 0.01 为一个酶活力单位(U),CAT 活性表示为  $U \cdot mg \cdot prot^{-1}$ 。蛋白质含量的测定采用考马斯亮蓝染色法。

### 1.3 数据处理

所有实验均重复 3 次,实验结果用  $\bar{x} \pm s$  表示,采用 SPSS 17.0 软件进行单因素方差分析(Duncan 法,显著水平  $p < 0.05$ )和相关性分析,采用 SigmaPlot 12.5 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 GABA 处理对双孢蘑菇颜色的影响

颜色是消费者判断双孢蘑菇是否可接受的重要参数之一,本实验采用亮度( $L^*$ )和褐变指数(BI)等指标来反映双孢蘑菇的颜色变化<sup>[1,3]</sup>。从图 1 可以看出,双孢蘑菇的  $L^*$  值随着贮藏时间的延长呈下降趋势,而 BI 则呈上升趋势,这与褐变物质的不断积累有关。最初 3 d 对照与处理之间的  $L^*$  值和 BI 并无显著差异( $p > 0.05$ ),但随着贮藏时间的延长,两者的差异逐渐明显,GABA 处理组的  $L^*$  值显著高于对照( $p < 0.05$ ),而 BI 则显著低于对照( $p < 0.05$ );冷藏 12 d,GABA 处理组的  $L^*$  值为 76.47,下降了 8.80%,低于对照的下降率(14.77%),而处理组 BI 的变化约为对照的 2/3。以上结果表明,GABA 处理能够较好的抑制双孢蘑菇的褐变。

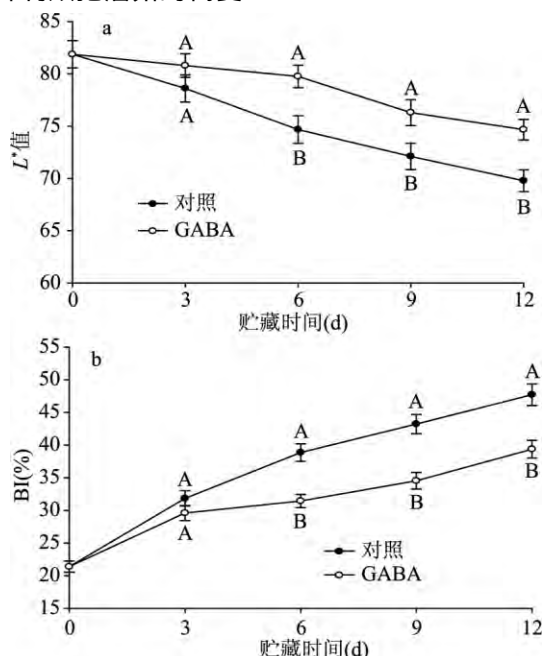


图 1 GABA 处理对双孢蘑菇低温贮藏期间  $L^*$  和 BI 的影响

Fig.1 Effect of GABA treatment on  $L^*$  and BI of button mushrooms during low temperature storage

注:同一时间不同组别不同大写字母表示差异显著( $p < 0.05$ );图 2~图 7 同。

### 2.2 GABA 处理对双孢蘑菇细胞膜透性和膜脂过氧化的影响

相对电导率和 MDA 含量是衡量细胞膜透性和稳定性的两个重要指标<sup>[8,14-15]</sup>。一般认为相对电导率可间接反映细胞膜的损伤程度;而 MDA 是细胞膜脂质过氧化的主要产物,其含量的多少可间接反映细胞膜脂质过氧化的程度<sup>[8,14-15]</sup>。GABA 处理对双孢蘑菇相对电导率和 MDA 含量的影响分别如图 2 和图 3 所示。

由图 2 中可以看出,随着贮藏时间的延长,对照组和 GABA 处理组双孢蘑菇的相对电导率均呈增大趋势,但 GABA 处理组的相对电导率均低于对照组。贮藏前期,两组数据的差异并不显著( $p > 0.05$ ),但随着贮藏时间的延长,GABA 处理组的相对电导率显著低于对照组( $p < 0.05$ )。贮藏 12 d 后 GABA 处理组的相对电导率为 27.75%,提高了 35.70%,远低于对照组的提高率 57.95%,这说明 GABA 对双孢蘑菇细胞膜具有保护作用。如图 3 所示,在 12 d 的低温贮藏期内,对照组和 GABA 处理组双孢蘑菇的 MDA 含量变化趋势基本一致,呈现增加后降低的趋势,均在贮藏 6 d 达到最高值 5.71 和 5.18  $\mu mol \cdot mg \cdot prot^{-1}$ 。在整个贮藏期内,GABA 处理组的 MDA 含量均低于对照组,GABA 处理组贮藏 12 d 的 MDA 含量为 4.80  $\mu mol \cdot mg \cdot prot^{-1}$ 与对照组差异显著( $p < 0.05$ ),这表明 GABA 能够减缓双孢蘑菇细胞膜脂的过氧化进程。

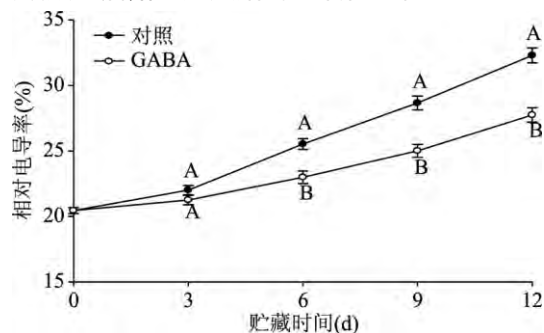


图 2 GABA 处理对双孢蘑菇低温贮藏期间相对电导率的影响

Fig.2 Effect of GABA treatment on relative leakage rate of button mushrooms during low temperature storage

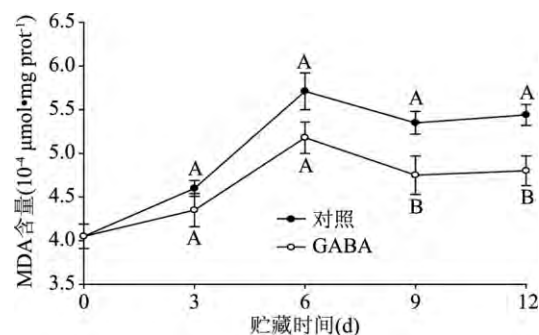


图 3 GABA 处理对双孢蘑菇低温贮藏期间 MDA 含量变化的影响

Fig.3 Effect of GABA treatment on MDA content of button mushrooms during low temperature storage

### 2.3 GABA 处理对双孢蘑菇活性氧的影响

$O_2^{\cdot -}$  和  $H_2O_2$  等活性氧导致的脂质过氧化会严重损害细胞膜的稳定性,导致衰老<sup>[8,14,15,20]</sup>。图4和图5分别表示 GABA 处理对双孢蘑菇  $O_2^{\cdot -}$  产生速率和  $H_2O_2$  含量的影响。从图4中可以看出,随着贮藏时间的延长,双孢蘑菇  $O_2^{\cdot -}$  产生速率呈先下降后上升的趋势,对照组和 GABA 处理组在贮藏6 d 出现最小值,分别为 16.19 和 13.74  $nmol \cdot min^{-1} \cdot g^{-1}$ 。然而 GABA 处理组双孢蘑菇的  $O_2^{\cdot -}$  产生速率一直低于对照组,且贮藏6 d 后,两者的差距开始呈显著趋势( $p < 0.05$ )。由图5可知, $H_2O_2$  含量随着贮藏时间的延长呈增加趋势。贮藏9 d 后两者呈显著差异( $p < 0.05$ );对照组和 GABA 处理组贮藏12 d 的  $H_2O_2$  含量分别为 46.91 和 40.91  $\mu mol \cdot g \cdot prot^{-1}$ 。同  $O_2^{\cdot -}$  产生速率一样,GABA 处理组双孢蘑菇的  $H_2O_2$  含量在整个贮藏期均低于对照组。这种影响趋势与 GABA 处理对相对电导率和 MDA 含量的影响趋势基本一致,这说明活性氧的积累与细胞膜透性和膜脂过氧化程度的增大有关。

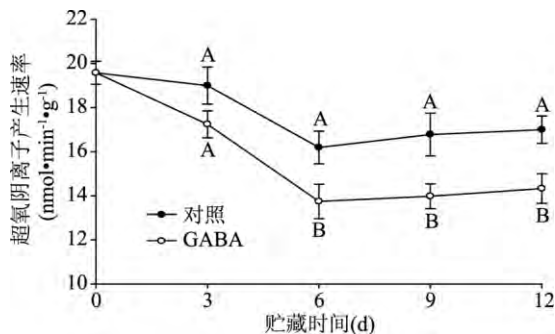


图4 GABA 处理对双孢蘑菇低温贮藏期间超氧阴离子产生速率的影响

Fig.4 Effect of GABA treatment on superoxide production rate of button mushrooms during low temperature storage

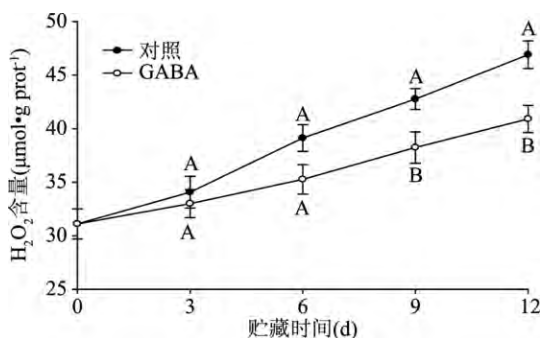


图5 GABA 处理对双孢蘑菇低温贮藏期间  $H_2O_2$  含量的影响

Fig.5 Effect of GABA treatment on  $H_2O_2$  content of button mushrooms during low temperature storage

### 2.4 GABA 处理对双孢蘑菇抗氧化酶活性的影响

SOD 能通过歧化反应清除体内过多的超氧阴离子,将其转化为毒性较低的  $H_2O_2$  和  $O_2$ , $H_2O_2$  再经由 CAT 催化而生成无毒性的  $H_2O$  和  $O_2$ ,从而能减少自由基对细胞的伤害,并进一步延缓衰老进程的发生<sup>[8,20]</sup>。GABA 处理对双孢蘑菇 SOD 和 CAT 活性的

影响分别见图6和图7。从图6可以看出 SOD 活性呈先升高后降低的趋势,对照组和 GABA 处理组在贮藏3 d 达到最高值,分别为 1.40 和 1.56  $U \cdot mg \cdot prot^{-1} \cdot min^{-1}$ ,在整个贮藏期内,GABA 处理的 SOD 活性均显著高于对照组( $p < 0.05$ ),这说明 GABA 可以明显提高双孢蘑菇 SOD 的活性。图7显示双孢蘑菇 CAT 的活性呈先略微升高后下降的趋势,对照组和 GABA 处理组在贮藏3 d 达到最高值,分别为 12.66 和 12.92  $U \cdot mg \cdot prot^{-1}$ ,但两者的差异并不显著( $p > 0.05$ );然而随着贮藏时间的延长,对照组的 CAT 活性急剧下降,贮藏12 d 的活性下降到 10.22  $U \cdot mg \cdot prot^{-1}$ ,GABA 处理组的 CAT 活性也有所降低,贮藏12 d 的活性为 11.75  $U \cdot mg \cdot prot^{-1}$ ,但其活性整体高于对照组。结合图4中  $H_2O_2$  的含量变化可知,GABA 处理组  $H_2O_2$  的含量低于对照,这与 CAT 活性高于对照有关。以上结果说明,GABA 处理可以延缓双孢蘑菇的衰老进程。

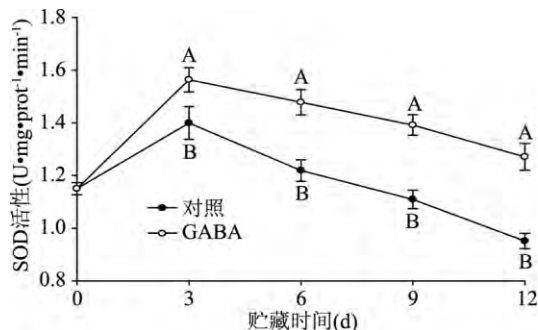


图6 GABA 处理对双孢蘑菇低温贮藏期间 SOD 活性变化的影响

Fig.6 Effect of GABA treatment on SOD activity of button mushrooms during low temperature storage

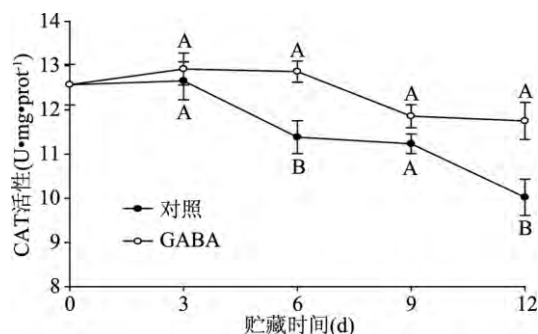


图7 GABA 处理对双孢蘑菇低温贮藏期间 CAT 活性变化的影响

Fig.7 Effect of GABA treatment on CAT activity of button mushrooms during low temperature storage

### 2.5 相关性分析

采用 SPSS 22.0 软件对各指标进行相关性分析,各指标相关性结果如表1、表2所示。对照组双孢蘑菇褐变指数(BI)与相对电导率显著正相关( $p < 0.05$ ),与 CAT 活性显著负相关( $p < 0.05$ ),与贮藏天数和  $H_2O_2$  含量极显著正相关( $p < 0.01$ ),与  $L^*$  值极显著负相关( $p < 0.01$ );而  $L^*$  值与 BI、贮藏天数、相对电导率和  $H_2O_2$  含量极显著负相关( $p < 0.01$ ),与 CAT 活性显著正相关( $p < 0.05$ ) (表1),这一结果说明双



表1 对照组各指标相关性分析

Table 1 Correlation analysis of indexes for CK

相关系数	$L^*$ 值	BI	天数	REC	MDA	$O_2^- \cdot$	$H_2O_2$	SOD	CAT
$L^*$ 值	1								
BI	-0.991**	1							
天数	-0.995**	0.980**	1						
REC	-0.981**	0.952*	0.993**	1					
MDA	-0.851	0.876	0.801	0.762	1				
$O_2^- \cdot$	0.842	-0.849	-0.786	-0.758	-0.974**	1			
$H_2O_2$	-0.994**	0.973**	0.998**	0.996**	0.809	-0.802	1		
SOD	0.627	-0.520	-0.665	-0.750	-0.337	0.408	-0.702	1	
CAT	0.939*	-0.897*	-0.948*	-0.973**	-0.778	0.769	-0.965**	0.815	1

注: \*  $p < 0.05$ ; \*\*  $p < 0.01$ ; 表 2 同。

表2 处理组各指标相关性分析

Table 2 Correlation analysis of indexes for GABA treatment

相关系数	$L^*$ 值	BI	天数	REC	MDA	$O_2^- \cdot$	$H_2O_2$	SOD	CAT
$L^*$ 值	1								
BI	-0.923*	1							
天数	-0.975**	0.973**	1						
REC	-0.984**	0.931*	0.982**	1					
MDA	-0.558	0.721	0.716	0.619	1				
$O_2^- \cdot$	0.740	-0.854	-0.853	-0.753	-0.947*	1			
$H_2O_2$	-0.989**	0.957*	0.996**	0.993**	0.665	-0.811	1		
SOD	0.084	0.260	0.067	-0.107	0.392	-0.398	-0.008	1	
CAT	0.888*	-0.644	-0.770	-0.839	-0.201	0.421	-0.817	0.457	1

孢蘑菇褐变与细胞膜透性、活性氧代谢密切相关。双孢蘑菇经 GABA 处理后 BI 与相对电导率和  $H_2O_2$  含量显著正相关 ( $p < 0.05$ ), 与贮藏天数极显著正相关 ( $p < 0.01$ ), 与  $L^*$  值显著负相关 ( $p < 0.05$ ); 而  $L^*$  值与贮藏天数、相对电导率和  $H_2O_2$  含量极显著负相关 ( $p < 0.01$ ), 与 CAT 活性显著正相关 ( $p < 0.05$ ), 与 BI 显著负相关 ( $p < 0.05$ ) (表 2), 这一结果说明 GABA 处理可以抑制双孢蘑菇褐变的发生。

### 3 讨论与结论

褐变是影响果蔬外观的首要因素, 双孢蘑菇采后极易发生褐变, 降低其外观品质<sup>[3-4]</sup>。对于已发生褐变的果蔬通常采用褐变指数来评价其褐变的程度, 同时可以结合  $L^*$  值、 $\Delta E$  等来辅助评价果蔬颜色的变化。本研究采用 BI 结合  $L^*$  值来评价双孢蘑菇的褐变程度, 结果表明  $L^*$  值与 BI 显著负相关 ( $p < 0.05$ )。与文献[13-15]的研究结果相似, GABA 处理能够较好的保持双孢蘑菇的  $L^*$  值和降低其褐变指数, 冷藏 12 d, GABA 处理组的  $L^*$  值为 76.47, 下降了 8.80%, 低于对照的下降率 (14.77%), 而处理组 BI 的变化约为对照的 2/3。

双孢蘑菇受到损伤或处于逆境时, 会造成膜脂过氧化, 细胞膜的选择透性逐渐丧失, 这种细胞膜结构的变化破坏了酪氨酸酶与酚类底物在细胞中的区域化分布, 为酶与底物的接触创造有利条件<sup>[8-10]</sup>。许多研究表明<sup>[3-4, 10]</sup>, 维持子实体中细胞膜的完整性和选择透性对抑制酶促褐变有积极作用。本研究表明 GABA 处理能够较好的保持双孢蘑菇细胞膜的完整

性, GABA 处理组贮藏 12 d 的相对电导率和 MDA 含量分别为 27.75% 和  $4.80 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ , 显著低于对照组 ( $p < 0.05$ )。

双孢蘑菇的成熟衰老与活性氧代谢及膜脂过氧化作用密切相关<sup>[8-9, 16-20]</sup>。超氧阴离子和过氧化氢是最常见的两种活性氧, 当组织受到机械损伤等胁迫时就会产生并积累活性氧。活性氧积累较少时, 组织内的抗氧化酶类 (如 SOD、CAT 等) 及抗氧化物质就会及时将其清除, 进而保持活性氧代谢的平衡; 但当这些抗氧化酶类及抗氧化物质不能及时将积累的活性氧清除时, 就会对组织细胞造成伤害, 加速衰老进程。研究表明外源 GABA 能提高桃、香蕉等果实抗氧化系统酶活性, 降低活性氧的积累和膜脂过氧化程度, 进而提高果实的抗冷性, 降低冷害引起的褐变<sup>[13-15]</sup>。本研究同样表明, GABA 处理能够提高抗氧化酶 SOD 和 CAT 的活性, 降低超氧阴离子产生速率和减少过氧化氢的积累, 延缓细胞膜透性和脂质过氧化进程, 进而降低双孢蘑菇的褐变程度。综上所述, GABA 可以作为一种护色保鲜剂应用于双孢蘑菇的采后贮藏。

### 参考文献

- [1] Gao MS, Feng LF, Jiang TJ. Browning inhibition and quality preservation of button mushroom (*Agaricus bisporus*) by essential oils fumigation treatment [J]. Food Chemistry, 2014, 149: 107-113.
- [2] Jiang TJ. Effect of alginate coating on physicochemical and

sensory qualities of button mushrooms (*Agaricus bisporus*) under a high oxygen modified atmosphere [J]. Postharvest Biology and Technology 2013, 76: 91–97.

[3] Singh P, Langowski H, Wanib AA, et al. Recent advances in extending the shelf life of fresh *Agaricus* mushrooms: A review [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2010, 90 (9): 1393–1402.

[4] Jolivet S, Aapin N, Wichers HJ, et al. *Agaricus bisporus* browning: a review [J]. Mycological Research, 1998, 102 (12): 1459–1483.

[5] Nerya O, Luzzatto RBT, Musa R, et al. Prevention of *Agaricus bisporus* postharvest browning with tyrosinase inhibitors [J]. Postharvest Biology and Technology 2006, 39 (3): 272–277.

[6] Khan ZU, Aisikaer G, Khan RU, et al. Effects of composite chemical pretreatment on maintaining quality in button mushrooms (*Agaricus bisporus*) during postharvest storage [J]. Postharvest Biology and Technology 2014, 95: 36–41.

[7] 李云云, 赵春霞, 程曦, 等. 高氧气调包装对双孢蘑菇微生物及其品质的影响 [J]. 食品科学, 2016, 37 (2): 261–265.

[8] 王丽芳, 王晓拓, 王志东. 贮藏温度对双孢蘑菇褐变和抗氧化活性的影响及动力学研究 [J]. 现代食品科技, 2015, 31 (2): 157–163.

[9] 李静, 李顺峰, 田广瑞, 等. 短时高压二氧化碳对双孢蘑菇褐变和活性氧代谢的影响 [J]. 食品工业科技, 2016, 37 (14): 308–312, 319.

[10] 闵婷, 谢君, 郑梦林, 等. 果蔬采后酶促褐变的机制及控制技术研究进展 [J]. 江苏农业科学, 2016, 44 (1): 273–276.

[11] 余辰.  $\gamma$ -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.

[12] Shelp BJ, Bozzo GG, Trobacher CP, et al. Hypothesis/review: Contribution of putrescine to 4-aminobutyrate (GABA) production

in response to abiotic stress [J]. Plant Science, 2012, 193–194: 130–135.

[13] Shang HT, Cao SF, Yang ZF, et al. Effect of exogenous  $\gamma$ -aminobutyric acid treatment on proline accumulation and chilling injury in peach fruit after long-term cold storage [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59, 1264–1268.

[14] Wang YS, Luo ZS, Huang XD, et al. Effect of exogenous  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA) treatment on chilling injury and antioxidant capacity in banana peel [J]. Scientia Horticulturae, 2014, 168: 132–137.

[15] Yang AP, Cao SF, Yang ZF, et al.  $\gamma$ -Aminobutyric acid treatment reduces chilling injury and activates the defence response of peach fruit [J]. Food Chemistry, 2011, 129 (4): 1619–1622.

[16] 李静, 李顺峰, 刘丽娜, 等.  $\gamma$ -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.

[17] Liu ZL, Wang XY. Changes in color, antioxidant, and free radical scavenging enzyme activity of mushrooms under high oxygen modified atmospheres [J]. Postharvest Biology and Technology 2012, 69: 1–6.

[18] Yan B, Dai Q, Liu X, et al. Flooding-induced membrane damage lipid oxidation and activated oxygen generation in corn leaves [J]. Plant Soil, 1996, 179: 261–268.

[19] Liu ZL, Wang XY, Zhu JY, et al. Effect of high oxygen modified atmosphere on post-harvest physiology and sensorial qualities of mushroom [J]. International Journal of Food Science and Technology 2010, 45: 1097–1103.

[20] 李顺峰, 李静, 王安建, 等. 适宜真空充氮热处理减缓鲜切双孢蘑菇细胞壁降解 [J]. 食品科技, 2015, 40 (11): 318–324.

(上接第 274 页)

[17] 张德双, 金同铭, 徐家炳, 等. 几种主要营养成分在大白菜不同叶片及部位中的分布规律 [J]. 华北农学报, 2000 (1): 108–111.

[18] Golubkina N A, Kosheleva O V, Krlvenkov L V, et al. Intersexual differences in plant growth, yield, mineral composition and antioxidants of spinach (*Spinacia oleracea* L.) as affected by selenium form [J]. Scientia Horticulturae 2017 (225): 350–358.

[19] Amagloh F K, Atuna R A, McBride R, et al. Nutrient and Total Polyphenol Contents of Dark Green Leafy Vegetables, and Estimation of Their Iron Bio-accessibility Using the *In Vitro* Digestion/Caco-2 Cell Model [J]. Foods (Basel, Switzerland), 2017, 6 (7): 1123–1129.

[20] 梁凤玲. 矮青青菜贮藏期品质变化规律及保鲜技术研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012: 1–53.

[21] 李延清, 张艳芬, 王宇鹏, 等. 溧阳白芹贮藏期间品质及

生理生化特性的变化 [J]. 食品科学, 2007, 28 (11): 570–575.

[22] 李岩, 冯毓琴. 密闭气体环境对夏菠菜硝酸盐、亚硝酸盐及贮藏品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2014, 35 (9): 324–328, 359.

[23] Tian Y, Hou J-S, Dan L. Effect of water stress on senescence physiology of spinach leaves during cold storage [J]. Storage and Process 2014 (14): 10–15.

[24] Al-Qurashi A D, Awad M A, Mohamed S A, et al. Postharvest chitosan, trans-resveratrol and glycine betaine dipping affect quality, antioxidant compounds, free radical scavenging capacity and enzymes activities of Sukkari bananas during shelf life [J]. Scientia Horticulturae 2017 (219): 173–181.

[25] 姚亚明, 彭菁, 刘檀, 等. 壳聚糖处理结合纳米包装对黄花菜贮藏品质及生理的影响 [J]. 食品科学, 2016 (20): 282–286.

权威 · 核心 · 领先 · 实用 · 全面