

高压二氧化碳处理对双孢蘑菇贮藏品质的影响

Effect of high-pressure carbon dioxide treatment to keeping quality of button mushroom (*Agaricus bisporus*)

李 静 李顺峰 田广瑞 王安建 聂 波 袁青丽

LI Jing LI Shun-feng TIAN Guang-rui WANG An-jian NIE Bo YUAN Qing-li

(河南省农科院农副产品加工研究所, 河南 郑州 450002)

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

摘要:为了探讨高压二氧化碳处理对双孢蘑菇贮藏品质的影响,分别采用不同高压二氧化碳对双孢蘑菇进行瞬时处理,然后于 4℃条件下贮藏 8 d,测定失重率、硬度、颜色、总酚和抗坏血酸含量以及 PPO、PAL 和 POD 活性的变化。结果表明:0.3 MPa 高压二氧化碳瞬时处理对双孢蘑菇贮藏保鲜效果最佳,该处理能较好保持双孢蘑菇的硬度、降低其失重率和抑制其褐变,同时还能促进双孢蘑菇多酚和抗坏血酸的积累、降低 PPO 和 POD 的活性以及提高 PAL 的活性。因此,0.3 MPa 二氧化碳处理可以较好保持双孢蘑菇的贮藏品质。
关键词:双孢蘑菇;高压二氧化碳;品质;颜色

Abstract: The purpose of this study was to investigate the effect of high-pressure carbon dioxide (HPCD) treatment on quality of button mushroom (*Agaricus bisporus*). Mushrooms were dipped for short time in different HPCD, then stored at 4℃ for 8 days (d). Changes in the weight loss, firmness, color, total phenolics, ascorbic acid and activities of polyphenol oxidase (PPO), phenylalanine ammonia lyase (PAL), and peroxidase (POD) were measured. The results indicated that 0.3 MPa CO₂ maintained a high level of firmness, delayed browning, promoted the accumulation of phenolics, ascorbic acid, inhibited the activities of PPO and POD, and increased PAL activity during the storage period. Thus, 0.3 MPa HPCD treatment has positive effects on improving the quality and colour of button mushrooms.

Keywords: button mushroom; high-pressure carbon dioxide; quality; color

双孢蘑菇(*Agaricus bisporus*)是一种高蛋白低脂肪食用菌,肉质肥厚,味鲜美,且富含碳水化合物、蛋白质、氨基酸、

维生素、矿物质等,具有较高的营养和药用价值^[1-2]。然而双孢蘑菇采后水分含量高,呼吸代谢旺盛,且菌盖表面无保护结构,易失水和遭受外界物理伤害、微生物污染等,最终导致褐变、开伞、菇柄伸长、软化、甚至腐烂等品质劣变现象,常温仅可保存 1~3 d^[2-5]。褐变是导致双孢蘑菇感官品质下降的一个重要因素。研究表明,双孢蘑菇采后的褐变主要是酶促褐变^[3],其控制方法多以化学方法为主,虽然该法具有操作简单、成本低、效果好的优点,但仍存在不稳定、滥用等问题,尤其是亚硫酸盐等化学药剂普遍存在高残留、人体健康危害和环境污染等问题^[5-7]。

高压二氧化碳(HPCD)在低温条件下能有效杀菌和钝化酶的活性^[8-9],从而抑制果蔬及其产品的品质劣变。张华等^[10]发现 HPCD 处理能够抑制鲜切莲藕 PPO、POD 的活性,显著减缓了鲜切莲藕的褐变;Bi 等^[11]发现 HPCD 能够降低胡萝卜片表面微生物数量,抑制内源酶 PPO、POD 和 PME 的活性,增大细胞膜透性,但是可以较好地保持胡萝卜片的硬度;HPCD 能够降低哈密瓜汁^[12]、苹果汁^[13-14]、香蕉泥^[15]等果蔬产品的褐变,迄今尚未见将 HPCD 处理用于双孢蘑菇采后品质控制的报道。

本研究拟将高压二氧化碳处理应用于双孢蘑菇的保鲜,研究其对双孢蘑菇贮藏品质的影响,旨在为双孢蘑菇保鲜提供理论依据和新方法。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料

双孢蘑菇:洛阳奥达特食用菌技术开发有限公司,采收后分层放入贮运保鲜箱预冷后立即运回实验室进行处理,选取大小、成熟度一致、颜色洁白、无开伞、无病虫害和机械损伤的蘑菇进行试验。

1.1.2 主要仪器设备

分析天平:FA2004C 型,上海越平科学仪器有限公司;

基金项目:河南省农业科学院科技发展专项资金项目(编号:20148409)

作者简介:李静(1981—),女,河南省农科院副研究员,博士。

E-mail:ruochenjl@163.com

收稿日期:2015-07-07

水浴恒温振荡器:SHZ-B型,上海博远实业有限公司医疗设备厂;

高速冷冻离心机:H2050R型,湘仪离心机仪器有限公司;

紫外分光光度计:UV1800型,日本岛津公司;

色差计:Color Flex EZ型,美国Hunterlab公司;

质构仪:TMS-Pro型,美国Food Technology Corporation(FTC)公司;

高压二氧化碳装置:本实验室定制。

1.2 方法

1.2.1 样品的处理 常温(20±1)℃条件下,将双孢蘑菇放入高压二氧化碳装置的反应釜内,根据前期预试验结果,抽真空后分别在0.1、0.3、0.5 MPa二氧化碳条件下处理3 min,恢复常压后取出,放置于塑料筐内并用保鲜膜覆盖后于(4±1)℃下贮藏,以未处理的双孢蘑菇为对照。分别于2、4、6、8 d取样,测定鲜样的硬度、重量、颜色等指标后,用液氮将鲜样冻干粉碎后贮藏于-80℃冰箱备用。

1.2.2 失重率测定 参照文献[2],测定贮藏前后双孢蘑菇的重量,按式(1)计算失重率。

$$WLR = \frac{m_0 - m_n}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

WLR——失重率,%;

m_0 ——贮藏前即第0天的双孢蘑菇重量,g;

m_n ——第n天的双孢蘑菇重量,g。

1.2.3 硬度测定 采用TMS-Pro质构仪对双孢蘑菇进行全质构分析(TPA),记录双孢蘑菇硬度的变化,每个处理测定12个整菇。测定参数:直径5 cm的圆柱形平板探头,压缩程度30%,测试速率1.0 mm/s,触发力0.3 N。

1.2.4 颜色评价 用Hunterlab ColorFlex EZ色差仪测定双孢蘑菇盖的CIE L^* (白/黑)、 a^* (红/绿)、 b^* (黄/蓝),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。反映颜色变化的总色差(ΔE^*)和褐变指数(BI)^[2,15]按式(2)、(3)计算:

$$\Delta E^* = \sqrt{(L^*-94.11)^2 + [a^*-(-2)]^2 + (b^*-2.13)^2} \quad (2)$$

$$BI = \frac{(a^*+1.75L^*)-0.31(5.645L^*+a^*-3.012b^*)}{0.172(5.645L^*+a^*-3.012b^*)} \times 100\% \quad (3)$$

1.2.5 总酚含量测定 采用福林酚法。根据文献[16],修改如下:取双孢蘑菇冻干粉1.0 g,加入60%甲醇7 mL,在40℃下震荡(100 r/min)提取2 h,15 000×g离心10 min。取0.1 mL上清液加入稀释至1/10的福林酚试剂4.9 mL,反应8 min后,加入质量分数为20%的 Na_2CO_3 1.5 mL,在760 nm处测量吸光值,每组样品做3次平行求平均值。以吸光度为纵坐标、以没食子酸质量分数为横坐标,绘制标准曲线,所得回归方程为 $y_1 = 0.017 1x_1 - 0.005 7$, $R^2 = 0.997 7$,线性范围为0.01~0.05 mg/mL,根据该方程计算样品中总酚的质量分数,样品中总酚的质量分数用没食子酸

当量(mg/g·FW)表示。

1.2.6 抗坏血酸含量测定 根据文献[17],修改如下:取双孢蘑菇冻干粉1.0 g,加入质量分数为1%的偏磷酸7 mL,室温下提取45 min,然后在10 000×g下离心5 min。取1 mL上清液和9 mL浓度为0.5 mg/mL的2,6-二氯酚反应30 min,在515 nm处测量吸光值,每组样品做3次平行求平均值。以吸光度为纵坐标、以标准抗坏血酸的质量分数为横坐标,绘制标准曲线,所得回归方程为 $y_2 = -4.556x_2 + 0.748 8$, $R^2 = 0.999 9$,线性范围为0.025~0.100 mg/mL,根据该方程计算样品中抗坏血酸质量分数,结果以mg/g·FW表示。

1.2.7 PPO、POD、PAL活性测定 取双孢蘑菇冻干粉1.0 g,加入50 mmol/L pH 7.8磷酸钠缓冲液(含0.8 g/L PVP和1 mmol/L EDTA)7 mL,摇匀后10 000 r/min离心15 min(4℃),上清液即为粗酶液,根据文献[2]的方法测定PPO、PAL和POD的活性。蛋白质含量的测定采用考马斯亮蓝染色法,以牛血清蛋白做标准曲线。

1.2.8 数据处理 采用SPSS 17.0和SigmaPlot 12.5软件对数据进行分析处理,所有试验均重复3次。

2 结果与讨论

2.1 高压二氧化碳处理对双孢蘑菇失水的影响

失水是双孢蘑菇采后的重要生理变化之一。刚采收的双孢蘑菇含水量高达90%以上,由于菇体表面无保护组织,水分极易通过蒸腾作用而散失,造成蘑菇子实体质量减轻、萎蔫变软、鲜度下降^[5-7]。由图1可知,随着贮藏时间的延长,双孢蘑菇的失重率逐渐增大,在贮藏过程中对照的失重率略高于高压二氧化碳处理的,贮藏8 d后高达14.58%;随着处理压强从0.1 MPa增大到0.5 MPa,双孢蘑菇的失重率呈先降后升的趋势,其中0.3 MPa二氧化碳瞬时处理的失重率最低,贮藏8 d后失重率为9.23%,比对照的低36.69%。这可能与高压二氧化碳处理降低了双孢蘑菇的呼吸有关,但随着压力的增大,高压对细胞结构的破坏作用加大,又加剧了细胞水分的流失。

2.2 高压二氧化碳瞬时处理对双孢蘑菇硬度的影响

硬度是反映双孢蘑菇品质、代谢和水分变化的重要指标,

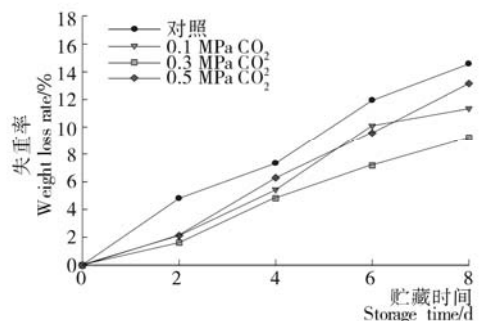


图1 HPCD处理对双孢蘑菇低温贮藏期间失重变化的影响
Figure 1 Effect of different HPCD treatments on weight loss change of button mushrooms during low temperature storage

硬度的快速下降是双孢蘑菇采后货架期短和易受真菌侵染的主要原因之一^[2, 5-7]。由图 2 可知,双孢蘑菇的硬度随贮藏时间的延长呈逐渐下降趋势;与对照相比,高压二氧化碳处理的双孢蘑菇硬度保持效果并不明显,且处理之间无显著差异($P>0.05$),仅在贮藏后期较对照的略硬。软化的发生可能与采后蘑菇表面细菌酶引起的细胞壁降解和内源性自溶素活性的增强有关^[18]。假单胞菌属(*Pseudomonads*)细菌等微生物能够分解细胞内基质和减小中央液泡,导致部分细胞破裂和丧失膨压,进而使蘑菇变软^[2];研究^[9]表明,高压二氧化碳能够减少果蔬表面微生物数量的增加,然而压力的大小不仅影响组织表面微生物数量的多少,同时也会对组织本身造成一定的损害。0.1 MPa 压力对蘑菇组织的损害虽小,但对表面微生物的抑制效果差;0.5 MPa 压力对表面微生物的抑制效果虽好,但对蘑菇组织的损伤大。因此,0.3 MPa 二氧化碳处理对蘑菇硬度保持效果较好,可能与该处理在较好保持蘑菇组织完整性的同时可以抑制由微生物诱导的软化有关。

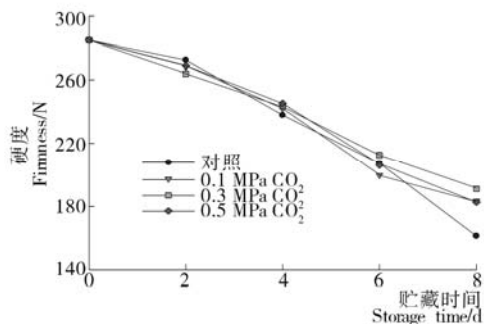


图 2 HPCD 处理对双孢蘑菇低温贮藏期间硬度变化的影响
Figure 2 Effect of different HPCD treatments on firmness change of button mushrooms during low temperature storage

2.3 高压二氧化碳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,本试验通过测定亮度(L^*)、总色差(ΔE^*)和褐变指数(BI)等指标来反映双孢蘑菇的颜色变化^[2, 19]。由表 1 可知,双孢蘑菇的 L^* 值随着贮藏时间的延长逐渐下降, ΔE^* 和 BI 则逐渐上升。对照的 L^* 值下降速度较快,贮藏 8 d 后 L^* 值从 87.34 降到 77.61,而其他处理贮藏 2 d 后 L^* 值的波动不大,仅 0.3 MPa 二氧化碳处理的双孢蘑菇贮藏 8 d 后的 L^* 值高于对照且存在显著差异($P<0.05$)。从短期护色效果来看,高压二氧化碳处理对双孢蘑菇的护色效果并不理想,0.1, 0.3 MPa 二氧化碳处理的双孢蘑菇的 ΔE^* 和 BI 在贮藏 6 d 后才低于对照,而 0.5 MPa 二氧化碳处理的 ΔE^* 和 BI 仅在贮藏 8 d 后略低于对照且无显著差异($P>0.05$),可能与处理破坏了双孢蘑菇的细胞结构有关。研究^[20]表明,微生物的侵染能够活化双孢蘑菇多酚氧化酶,进而加速酶促褐变的发生,而 0.1 MPa 处理对表面微生物的抑制效果较差(如前所述),因此,综合来看,0.3 MPa 二氧化碳处理对双孢蘑菇的护色效果较好,贮藏 8 d 后的 L^* 高于对照、而 ΔE^* 和 BI 均低于对照,且存在显著差异($P<0.05$)。

表 1 HPCD 处理对双孢蘑菇低温贮藏期间颜色变化的影响[†]
Table 1 Effect of different HPCD treatments on color change of button mushrooms during low temperature storage

贮藏时间/d	处理压力/MPa	L^*	ΔE^*	BI/%
0	对照	87.34±0.72 ^a	14.92±1.03 ^b	19.40±0.88 ^c
	0.1	84.38±1.09 ^b	16.64±0.34 ^a	21.97±1.78 ^c
	0.3	85.35±0.79 ^b	16.95±0.64 ^a	22.80±1.05 ^{bc}
	0.5	84.06±1.11 ^b	18.03±1.25 ^a	24.64±0.47 ^a
2	对照	84.08±0.83 ^a	19.64±1.09 ^b	25.97±1.82 ^b
	0.1	80.06±1.47 ^c	20.76±1.75 ^{ab}	27.73±2.47 ^{ab}
	0.3	81.26±0.61 ^{bc}	21.36±0.81 ^{ab}	29.71±1.41 ^{ab}
	0.5	80.25±0.48 ^c	22.07±0.83 ^a	30.78±2.20 ^a
4	对照	81.68±1.05 ^a	22.43±1.07 ^a	30.24±1.77 ^b
	0.1	79.78±0.93 ^a	23.31±1.04 ^a	33.77±1.03 ^a
	0.3	81.18±0.63 ^a	22.10±0.72 ^a	31.80±1.21 ^{ab}
	0.5	79.47±0.82 ^a	23.38±0.86 ^a	33.64±0.88 ^a
6	对照	79.58±0.87 ^a	24.40±0.63 ^a	35.14±1.07 ^a
	0.1	79.28±1.04 ^a	24.36±1.52 ^a	34.28±1.71 ^{ab}
	0.3	79.69±0.72 ^a	23.21±1.07 ^{ab}	32.59±1.10 ^b
	0.5	79.47±0.54 ^a	23.38±0.31 ^b	34.64±0.48 ^a
8	对照	77.61±0.68 ^b	26.77±0.73 ^a	39.82±1.02 ^a
	0.1	78.83±1.16 ^{ab}	24.46±1.78 ^{ab}	34.68±1.12 ^b
	0.3	80.68±1.27 ^a	23.00±1.12 ^b	33.21±0.83 ^b
	0.5	79.09±1.10 ^{ab}	25.28±1.20 ^{ab}	38.28±0.99 ^a

[†] 同列字母不同者差异显著($P<0.05$)。

2.4 高压二氧化碳处理对双孢蘑菇总酚和抗坏血酸含量的影响

多酚是双孢蘑菇体内主要的抗氧化物质,该类物质具有维护健康、预防癌症和心血管疾病的作用。本研究表明双孢蘑菇体内的总酚含量在整个贮藏期呈下降趋势(图 3)。贮藏初期(2 d)各处理的总酚含量低于对照的含量,但处理之间并无显著差异($P>0.05$),随着贮藏时间的延长,除了 0.5 MPa 二氧化碳处理的双孢蘑菇在贮藏 4 d 和 8 d 时总酚含

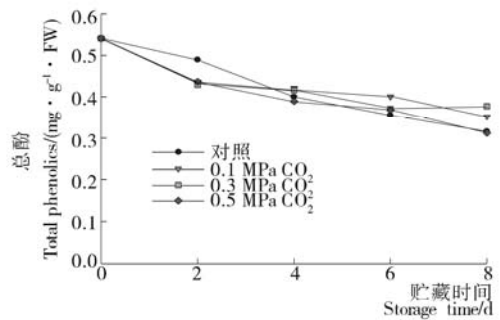


图 3 HPCD 处理对双孢蘑菇低温贮藏期间总酚变化的影响
Figure 3 Effect of different HPCD treatments on total phenolics change of button mushrooms during low temperature storage

是贮藏 8 d 时 0.1、0.3 MPa 二氧化碳处理与对照之间仍存在显著差异 ($P < 0.05$)。如前所述,在贮藏前期,各处理对双孢蘑菇的褐变抑制效果并不明显,而贮藏后期各处理对褐变的抑制效果则逐渐显现,这表明低褐变程度可能与高总酚含量有关,总酚含量是双孢蘑菇褐变的限制因素^[18,21]。本研究表明 0.3 MPa 以下高压二氧化碳处理能够较好地保持双孢蘑菇总酚的含量,进而减轻其褐变程度,提高其商品和营养价值。

抗坏血酸是双孢蘑菇体内重要的营养成分之一,然而该物质不稳定,易被氧化,是双孢蘑菇褐变的原因之一。由图 4 可知,尽管各处理双孢蘑菇体内的抗坏血酸含量均随着贮藏时间的延长而降低,但 0.1、0.3、0.5 MPa 二氧化碳处理均可显著降低抗坏血酸含量的损失,贮藏 8 d 后抗坏血酸含量分别为 0.28、0.28、0.26 mg/g · FW,分别比对照的高 18.12%、16.82%、10.93%,说明 0.5 MPa 以下高压二氧化碳处理可以较好地保持双孢蘑菇抗体内的坏血酸含量。

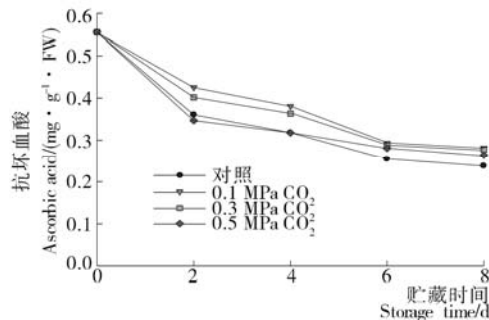


图 4 HPCD 处理对双孢蘑菇低温贮藏期间抗坏血酸变化的影响

Figure 4 Effect of different HPCD treatments on ascorbic acid change of button mushrooms during low temperature storage

2.5 高压二氧化碳处理对双孢蘑菇 PPO、POD、PAL 活性的影响

双孢蘑菇褐变主要是由多酚氧化酶催化酚类化合物氧化形成的,其中酪氨酸酶是双孢蘑菇体内的最主要的多酚氧化酶^[5-6],酪氨酸酶在双孢蘑菇体内存在活化型和潜伏型两种状态。一般情况下,95%以上的酪氨酸酶未被激活,处于潜伏状态;菇盖表面分布大量活化型和潜伏型的酪氨酸酶。潜伏状态的酪氨酸酶在机械损伤及感染微生物时即被活化,因而菇体表面极易发生酶促褐变^[5-7,20]。由图 5 可知,贮藏 2 d 时,高压二氧化碳处理的 PPO 活性高于对照的,随着贮藏时间的延长,各处理的 PPO 活性逐渐低于对照的,尤其是 0.1、0.3 MPa 二氧化碳处理的 PPO 活性显著低于对照的。

此外,苯丙氨酸解氨酶(PAL)和过氧化物酶(POD)也与酶促褐变密切相关。PAL 是酚类代谢关键酶,催化 L-苯丙氨酸去氨基反应生成酚类物质^[22]。由图 6 可知,PAL 活性呈逐渐下降趋势,贮藏 4 d 后,0.1、0.3 MPa 二氧化碳处理的 PAL 活性均高于对照的,0.5 MPa 处理组的 PAL 活性仅在 4~6 d 时高于对照的。普遍认为双孢蘑菇的褐变是酚类物质

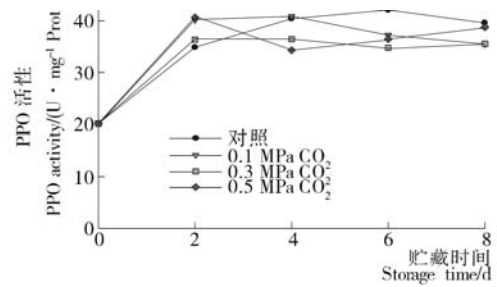


图 5 HPCD 处理对双孢蘑菇贮藏期间 PPO 活性变化的影响

Figure 5 Effect of different HPCD treatments on PPO activity change of button mushrooms during low temperature storage

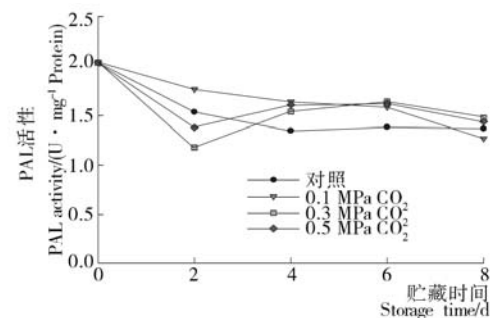


图 6 HPCD 处理对双孢蘑菇贮藏期间 PAL 活性变化的影响
Figure 6 Effect of different HPCD treatments on PAL activity change of button mushrooms during low temperature storage

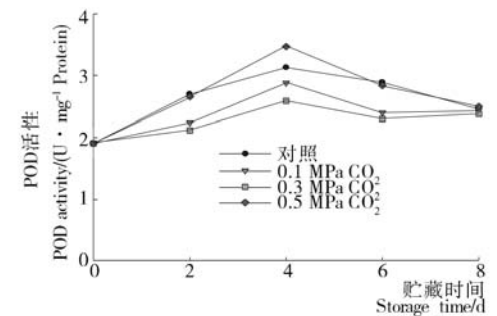


图 7 HPCD 处理对双孢蘑菇贮藏期间 POD 活性变化的影响

Figure 7 Effect of different HPCD treatments on POD activity change of button mushrooms during low temperature storage

氧化生成的黑色素积累导致的,而 PPO 和 POD 在黑色素的形成中具有协同催化作用。由图 7 可知,0.1、0.3 MPa 二氧化碳处理的 POD 低于对照的;0.5 MPa 二氧化碳处理的 POD 与对照的基本一致,而贮藏 4 d 时却高于对照。尽管如此,随着时间的推移,各处理 POD 活性的变化趋势是相似的,都是先升高达到峰值然后再下降。

本研究结果表明,0.1、0.3 MPa 二氧化碳处理降低了 PPO 和 POD 的活性,抑制了双孢蘑菇的褐变。这可能与

0.1, 0.3 MPa 二氧化碳瞬时处理可以降低细胞的 pH 值^[9]、使双孢蘑菇具有较高的抗坏血酸含量(图 4)有关^[21]。此外,有研究^[23]表明,某些水果中酚类物质和花色素苷的积累与 PAL 活性的增加呈正相关,本研究中高压二氧化碳处理可能激发了双孢蘑菇酚类物质的积累。

3 结论

随着贮藏时间的延长,双孢蘑菇的硬度、总酚含量、抗坏血酸含量逐渐下降,失重率和褐变程度逐渐增加,PPO 活性逐渐增强,POD 活性先升后降,而 PAL 活性则逐渐减弱。与对照相比,0.1 MPa 和 0.3 MPa 二氧化碳处理对双孢蘑菇均有一定的保鲜效果,其中后者的保鲜效果最佳,该处理能较好地保持双孢蘑菇的硬度、降低其失水率和抑制其褐变,同时还能促进双孢蘑菇多酚和抗坏血酸的积累、降低 PPO 和 POD 的活性以及提高 PAL 的活性。而 0.5 MPa 二氧化碳处理会加速双孢蘑菇的品质劣变,这可能与较高压力对双孢蘑菇组织的损害较大有关。综上所述,0.3 MPa 二氧化碳处理可以较好地保持双孢蘑菇的贮藏品质,但其作用机理还有待进一步的研究。

参考文献

- [1] Brennan M, Le Port G, Gormley R. Post-harvest treatment with citric acid or hydrogen peroxide to extend the shelf life of fresh sliced mushrooms[J]. LWT - Food Science and Technology, 2000, 33(4): 285-289.
- [2] Gao Mang-sha, Feng Li-fang, Jiang Tian-jia. Browning inhibition and quality preservation of button mushroom (*Agaricus bisporus*) by essential oils fumigation treatment [J]. Food Chemistry, 2014, 149: 107-113.
- [3] Fernandes Â, Antonio A L, Oliveira M B P P, et al. Effect of gamma and electron beam irradiation on the physico-chemical and nutritional properties of mushrooms: a review[J]. Food Chemistry, 2012, 135(2): 641-650.
- [4] 谢雯君, 王则金. 蘑菇采后生理及保鲜技术研究进展[J]. 食品与机械, 2005, 21(3): 69-75.
- [5] Singh P, Langowski H, Wanib A A, 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): 1 393-1 402.
- [6] 刘战丽, 王相友. 双孢蘑菇采后生理生化及保鲜技术研究进展 [J]. 食品研究与开发, 2011, 32(11): 183-185.
- [7] 孟德梅, 申琳, 陆军, 等. 双孢菇采后感官品质变化的因素分析与保鲜技术研究进展[J]. 食品科学, 2010, 31(15): 283-287.
- [8] Spilimbergo S, Bertuocco A. Non-thermal bacteria inactivation with dense CO₂ [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2003, 84: 627-638.
- [9] Garcia-Gonzalez L, Geeraerd A H, Spilimbergo S, et al. High pressure carbon dioxide inactivation of microorganisms in foods: The past, the present and the future[J]. International Journal of Food Microbiology, 2007, 11(1): 1-28.
- [10] 张华, 董月强, 李星科, 等. 高密度二氧化碳技术对鲜切莲藕酶活性的影响[J]. 食品与机械, 2013, 29(1): 170-172, 176.
- [11] Bi Xiu-fang, Wu Ji-hong, Zhang Yan, et al. High pressure carbon dioxide treatment for fresh-cut carrot slices [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2011, 12(3): 298-304.
- [12] Chen Ji-luan, Zhang Jing, Song Li-jun, et al. Changes in microorganism, enzyme, aroma of hami melon (*Cucumis melo* L.) juice treated with dense phase carbon dioxide and stored at 4 °C[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2010, 11: 623-629.
- [13] Gasperi F, Aprea E, Biasioli F, et al. Effects of supercritical CO₂ and N₂O pasteurisation on the quality of fresh apple juice [J]. Food Chemistry, 2009, 115(1): 129-136.
- [14] Niu Shuang, Xu Zeng-hui, Fang Yu-dan, et al. Comparative study on cloudy apple juice qualities from apple slices treated by high pressure carbon dioxide and mild heat[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2010, 11(1): 91-97.
- [15] Palou E, Lopez-Malo A, Barbosa-Canovas G V, et al. Polyphenoloxidase activity and colour of blanched and high hydrostatic pressure treated banana puree[J]. Journal of Food Science, 1999, 64: 42-45.
- [16] Goncalves E M, Pinheiro J, Abreu M, et al. Carrot (*Daucus carota* L.) peroxidase inactivation, phenolic content and physical changes kinetics due to blanching[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 97(4): 574-581.
- [17] Vaz J A, Barros L, Martins A, et al. Chemical composition of wild edible mushrooms and antioxidant properties of their water soluble polysaccharidic and ethanolic fractions[J]. Food Chemistry, 2011, 126(2): 610-616.
- [18] Zivanovic S, Buescher R W, Kim K S. Textural changes in mushrooms (*Agaricus bisporus*) associated with tissue ultrastructure and composition[J]. Journal of Food Science, 2000, 65(8): 1 404-1 408.
- [19] Jiang Tian-jia. 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(1): 91-97.
- [20] Weijn A, Bastiaan-Net S, Wichers H J, et al. Melanin biosynthesis pathway in *Agaricus bisporus* mushrooms[J]. Fungal Genetics and Biology, 2013, 55: 42-53.
- [21] Sapers G M. Browning of foods: control by sulfites, antioxidants, and other means [J]. Food Technology, 1993, 47(10): 75-84.
- [22] Benoit MA, D'Aprano G, Lacroix M. Effect of γ -irradiation on phenylalanine ammonia-lyase activity, total phenolic content, and respiration of mushrooms (*Agaricus bisporus*) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48(12): 6 312-6 316.
- [23] Wang Kai-tuo, Jin Peng, Cao Shi-feng, et al. Methyl jasmonate reduces decay and enhances antioxidant capacity in Chinese bayberries[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(13): 5 809-5 815.