

高压二氧化碳保鲜双孢蘑菇的工艺优化

李静¹, 李顺峰¹, 田广瑞¹, 王安建¹, 刘丽娜¹, 袁青丽²

(1.河南省农科院农副产品加工研究所, 河南郑州 450002;

2.河南农业大学食品科学技术学院, 河南郑州 450002)

摘要:为了优化高压二氧化碳(high pressure carbon dioxide, HPCD)保鲜双孢蘑菇的工艺,在单因素实验基础上,采用响应面法分析 HPCD 处理压力、处理时间和处理温度对双孢蘑菇硬度和颜色的影响并对其进行优化。结果表明, HPCD 保鲜双孢蘑菇的最佳工艺条件为:处理压力 0.3 MPa,处理时间 3 min,处理温度 17 °C;与对照相比,该条件 HPCD 处理后的双孢蘑菇可以更好的保持其硬度和颜色,低温贮藏 8 d 后的硬度为 191.7 N(提高了 18.85%),褐变指数(BI)为 33.13(降低了 16.80%)。因此,HPCD 技术可以应用于双孢蘑菇的贮藏保鲜,具有良好的前景。

关键词:双孢蘑菇,高压二氧化碳,硬度,颜色

Optimization of high pressure carbon dioxide treatment on button mushroom (*Agaricus bisporus*) preservation

LI Jing¹, LI Shun-feng¹, TIAN Guang-rui¹, WANG An-jian¹, LIU Li-na¹, YUAN Qing-li²

(1.Institute of Agro-products Processing, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China;

2.Collage of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract:In order to optimize the high pressure carbon dioxide (HPCD) treatment on button mushroom (*Agaricus bisporus*) preservation, the effects of treatment pressure, time and temperature on the firmness and color of button mushroom were studied. Moreover, on the basis of single-factor test, response surface methodology was used to optimize the conditions of button mushroom preservation. The results showed that the optimum HPCD treatment conditions of treatment pressure, time and temperature were 0.3 MPa, 3 min and 17 °C, respectively. Under these conditions, the firmness and color of button mushroom can be maintained better than control. After storage 8 d at low temperature, the firmness and BI of button mushroom were 191.7 N (increased by 18.85%) and 33.13 (decreased by 16.80%), respectively. Thus, HPCD technology can be applied to button mushroom preservation which has a good prospect.

Key words: button mushroom; high pressure carbon dioxide; firmness, color

中图分类号:TS255.3

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2016)07-0226-06

doi:10.13386/j.issn1002-0306.2016.07.035

刚采收的双孢蘑菇含水量高达 90% 以上,呼吸代谢旺盛,由于菇体表面无保护组织,不能阻止外界的物理伤害、微生物侵染及水分散失,极易发生失水、褐变、开伞、软化、甚至腐烂等品质劣变现象,比市场中的其他新鲜果蔬货架期短,常温仅能保存 1~3 d^[1-4]。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,而褐变是导致双孢蘑菇感官品质降低的重要因素^[3-5]。研究表明,双孢蘑菇采后的褐变主要是酶促褐变,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^[4-8]。随着人们生活水平和安全意识的不断提高,对食品安全和品质的要求也越来越高,绿色环保的保鲜技术成为人

们的研究热点。研究发现高压二氧化碳(high pressure carbon dioxide, HPCD)在低温条件下能有效杀菌和钝化酶的活性^[9-10],从而抑制果蔬及其产品的品质劣变,目前已有 HPCD 处理用于果汁、鲜切果蔬褐变控制和保鲜的相关报道^[9-14],但未见将该处理用于双孢蘑菇采后品质控制的报道。

本文将 HPCD 应用于双孢蘑菇的保鲜,在研究 HPCD 处理的压力、时间和温度对双孢蘑菇硬度和颜色等感官品质影响的基础上,对双孢蘑菇的 HPCD 处理条件进行优化,旨在为双孢蘑菇保鲜提供理论依据和新的技术方法。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

收稿日期:2015-08-07

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

基金项目:河南省农业科学院科技发展专项资金项目(20148409)。

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 20 h 后立即运回实验室冷藏。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实验。

FA2004C 分析天平 上海越平科学仪器有限公司;SHZ-B 水浴恒温振荡器 上海博远实业有限公司医疗设备厂;H2050R 高速冷冻离心机 湘仪离心机仪器有限公司;UV1800 型紫外分光光度计 日本岛津公司;Color Flex EZ 色差仪 美国 Hunterlab 公司;TMS-Pro 质构仪 美国 FTC 公司;高压二氧化碳装置 由实验室定制。

1.2 实验方法

1.2.1 样品处理 分别将双孢蘑菇放入 HPCD 装置反应釜中,抽真空后按设定的条件分别处理,处理完毕后缓慢释放 CO₂ 至完全,将处理完的样品置于 4 °C 条件下贮藏 8 d 后测定硬度、颜色等指标。

HPCD 处理条件:处理温度和压力分别为 20 °C 和 0.3 MPa 时,考察处理时间 1、3、5 min 对双孢蘑菇贮藏效果的影响;处理温度为 20 °C 时,考察 0.1、0.3、0.5 MPa 压力条件下处理 3 min 对双孢蘑菇贮藏效果的影响;处理压力为 0.3 MPa 时,考察 10、20、30 °C 温度条件下处理 3 min 对双孢蘑菇贮藏效果的影响。

1.2.2 硬度测定 采用美国 Food Technology Corporation (FTC) 公司生产的质构仪 TMS-Pro 对双孢蘑菇进行全质构分析 (TPA),测定参数如下:直径 5 cm 的圆柱形平板探头,压缩程度为 30%,测试速率为 1.0 mm·s⁻¹,触发力为 0.3 N。室温下进行检测,每组处理 12 个重复。

1.2.3 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,每组处理 12 个重复。反映颜色变化褐变指数 (BI)^[8] 的计算公式如下:

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

其中: $x = (a^* + 1.75L^*) / (5.645L^* + a^* - 3.012b^*)$ 。

1.2.4 响应面优化实验设计 在单因素实验的基础上,根据 Box-Beknhen 中心组合实验设计原理,以双孢蘑菇低温贮藏 8 d 后的硬度和 BI 为响应值,以 HPCD 处理压力、时间和温度为影响因素,设计三因素三水平响应面分析实验 (表 1),对双孢蘑菇的 HPCD 处理工艺条件进行优化,确定最佳处理条件。

表 1 响应面分析实验因素与水平表

Table 1 Factors and levels used in response surface analysis

水平	A 压力 (MPa)	B 时间 (min)	C 温度 (°C)
-1	0.1	1	10
0	0.3	3	20
1	0.5	5	30

1.2.5 数据处理 所有实验都进行 3 次平行,实验结果用平均值 ± 标准偏差表示,采用 SPSS 17.0 软件进行 ANOVA 分析 (显著性水平 $p < 0.05$),采用 SigmaPlot12.5 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同压力二氧化碳处理对双孢蘑菇硬度和色泽的影响

硬度是反映双孢蘑菇品质、代谢和水分变化的重要指标,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,颜色是消费者判断双孢蘑菇是否可接受的重要参数^[3-5],本实验从测定的亮度 (L*) 和褐变指数 (BI) 等指标来反映双孢蘑菇的颜色变化。

在 20 °C 条件下采用不同压力的二氧化碳处理双孢蘑菇 3 min,结果如图 1 和表 2 所示。从图 1 可以看出,双孢蘑菇的硬度随贮藏时间的延长呈逐渐下降趋势,然而与对照相比,HPCD 短时处理保持双孢蘑菇硬度的效果并不明显,且处理之间无显著差异 ($p > 0.05$),仅在贮藏后期比对照略硬一些。双孢蘑菇的软化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^[15]。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^[8];研究发现高浓度二氧化碳短期预处理能够显著抑制葡萄、杏、桃、甜樱桃和草莓等果实贮藏过程中的后熟软化进程,保持果实硬度,这与较高的二氧化碳处理浓度抑制了病原菌和生理导致的软化有关^[16-21],而 HPCD 处理同样能够减少果蔬表面微生物数量的增加^[10]。因此,0.3 MPa 二氧化碳短时处理能够抑制这种由微生物诱导的软化,可能与其降低了双孢蘑菇表面微生物数量有关。从表 2 可以看出,双孢蘑菇的 L* 值随着贮藏时间的延长逐渐下降,而 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。0.3 MPa 二氧化碳短时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,HPCD 短时处理对双孢蘑菇的护色效果并不理想,0.1 MPa ($p > 0.05$) 和 0.3 MPa ($p < 0.05$) 二氧化碳短时处理的双孢蘑菇的 BI 在贮藏 6 d 后才低于对照,而 0.5 MPa 二氧化碳短时处理的双孢蘑菇的 BI 仅在贮藏 8 d 后略低于对照且无显著差异 ($p > 0.05$),这

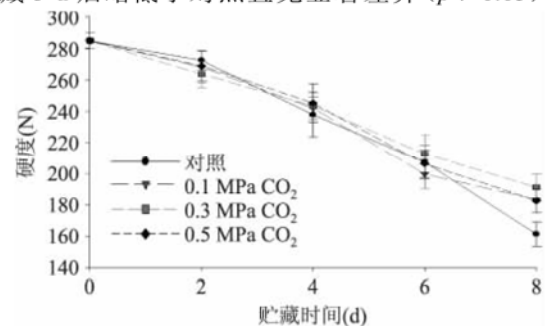


图 1 不同压力二氧化碳处理对双孢蘑菇低温贮藏期间硬度变化的影响
Fig.1 Effect of different pressure of HPCD on firmness change of button mushrooms during low temperature storage

可能与处理破坏了双孢蘑菇的细胞结构有关。综合 L^* 、BI 等指标来看,0.3 MPa 二氧化碳短时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 BI 低于对照,且存在显著差异 ($p < 0.05$)。综合考虑不同压力二氧化碳对双孢蘑菇贮藏期间硬度和颜色变化的影响,在 20 °C 条件下选择 0.3 MPa 二氧化碳处理双孢蘑菇为宜。

表 2 不同压力二氧化碳处理对双孢蘑菇低温贮藏期间颜色变化的影响
Table 2 Effect of different pressure of HPCD on color change of button mushrooms during low temperature storage

处理	L^*	BI
0 d		
对照	87.34 ± 0.72 ^a	19.40 ± 0.88 ^c
0.1 MPa	84.38 ± 1.09 ^b	21.97 ± 1.78 ^b
0.3 MPa	85.35 ± 0.79 ^b	22.80 ± 1.05 ^{ab}
0.5 MPa	84.06 ± 1.11 ^b	24.64 ± 0.47 ^a
2 d		
对照	84.08 ± 0.83 ^a	25.97 ± 1.82 ^b
0.1 MPa	80.06 ± 1.47 ^b	27.73 ± 2.47 ^{ab}
0.3 MPa	81.26 ± 0.61 ^b	29.71 ± 1.41 ^{ab}
0.5 MPa	80.25 ± 0.48 ^b	30.78 ± 2.20 ^a
4 d		
对照	81.68 ± 1.05 ^a	30.24 ± 1.77 ^b
0.1 MPa	79.78 ± 0.93 ^{bc}	33.77 ± 1.03 ^a
0.3 MPa	81.18 ± 0.63 ^{ab}	31.80 ± 1.21 ^{ab}
0.5 MPa	79.47 ± 0.82 ^c	33.64 ± 0.88 ^a
6 d		
对照	79.58 ± 0.87 ^a	35.14 ± 1.07 ^a
0.1 MPa	79.28 ± 1.04 ^a	34.28 ± 1.71 ^{ab}
0.3 MPa	79.69 ± 0.72 ^a	32.59 ± 1.10 ^b
0.5 MPa	79.47 ± 0.54 ^a	34.64 ± 0.48 ^{ab}
8 d		
对照	77.61 ± 0.68 ^b	39.82 ± 1.02 ^a
0.1 MPa	78.83 ± 1.16 ^{ab}	34.68 ± 1.12 ^b
0.3 MPa	80.68 ± 1.27 ^a	33.21 ± 0.83 ^b
0.5 MPa	79.09 ± 1.10 ^{ab}	38.28 ± 0.99 ^a

注:数值以平均值 ± 标准偏差表示, $n = 12$; 同列不同字母表示差异显著 ($p < 0.05$), 表 3、表 4 同。

2.2 不同处理时间对双孢蘑菇硬度和色泽的影响

在 20 °C 条件下采用 0.3 MPa 二氧化碳分别处理双孢蘑菇 1、3、5 min, 结果如图 2 和表 3 所示。从图 2 可以看出, 贮藏初期, 各处理的硬度均低于对照, 这可能与高压处理对双孢蘑菇组织的损伤有关; 随着贮藏时间的延长, 各处理保持双孢蘑菇硬度的效果逐渐显现, 尤其是在贮藏后期, 处理之后的双孢蘑菇硬度下降缓慢, 与对照之间存在显著差异 ($p < 0.05$), 这可能与高压二氧化碳降低了双孢蘑菇表面微生物数量有关。随着 HPCD 处理时间的延长, 双孢蘑菇的硬度呈先上升后下降的趋势, 各处理之间的差异并不显著 ($p > 0.05$), 但是处理 3 min 的效果略好于

其他处理。从表 3 可以看出, 双孢蘑菇的 L^* 值随着贮藏时间的延长逐渐下降, 而 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, 在贮藏初期, 各处理的 L^* 值低于对照, 而 BI 却高于对照; 而贮藏末期 (8 d), 各处理组 L^* 值显著高于对照 ($p < 0.05$), 而 BI 值显著低于对照 ($p < 0.05$)。随着 HPCD 处理时间的延长, 双孢蘑菇的 L^* 值呈先上升后下降的趋势, BI 则呈先下降后上升的趋势, 各处理之间的差异并不显著, 但是处理 3 min 的效果略好于其他处理。综合硬度、 L^* 、BI 等指标来看, 0.3 MPa 二氧化碳处理双孢蘑菇的 3 min 的保鲜效果较好, 因此在 20 °C 条件下选择 0.3 MPa 二氧化碳处理双孢蘑菇 3 min 为宜。

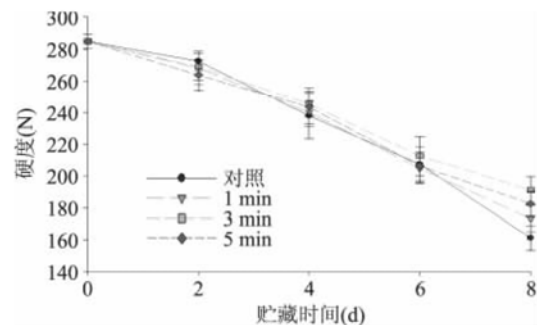


图 2 0.3 MPa 二氧化碳处理不同时间对双孢蘑菇低温贮藏期间硬度变化的影响

Fig.2 Effect of different time of 0.3 MPa HPCD on firmness change of button mushrooms during low temperature storage

2.3 不同处理温度对双孢蘑菇硬度和色泽的影响

分别在 10、20、30 °C 条件下采用 0.3 MPa 二氧化碳处理双孢蘑菇 3 min, 结果如图 3 和表 4 所示。从图 3 可以看出, 10、20 °C 条件下的处理对双孢蘑菇硬度的保持效果较好, 尤其是在贮藏后期显著优于对照, 但两者之间无显著差异 ($p > 0.05$); 而 30 °C 条件下的处理效果较差, 显著低于对照 ($p < 0.05$), 这可能与较高温度加速了双孢蘑菇的衰老有关。从表 4 可以看出, 双孢蘑菇的 L^* 值随着贮藏时间的延长逐渐下降, 而 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, 在贮藏初期, 各处理的 L^* 值低于对照, 而 BI 却高于对照; 而贮藏末期 (8 d) 10、20 °C 处理组 L^* 值显著高于对照 ($p < 0.05$), BI 显著低于对照 ($p < 0.05$)。随着贮藏时间的延长, 到贮藏后期各处理的 L^* 值均高于对照, BI 则低于对照, 尤其是贮藏 8 d 时, 各处理的 L^* 值和 BI 与对照之间存在显著差异 ($p < 0.05$)。与硬度相似, 10、20 °C 条件下的处理对双孢蘑菇的护色效果较好, 尤其是在贮藏后期显著优于对照, 但两者之间无显著差异 ($p > 0.05$); 而 30 °C 条件下的处理护色效果较差, 与对照无显著差异 ($p > 0.05$)。综合硬度 L^* 、BI 等指标来看, 10、20 °C 条件下 0.3 MPa 二氧化碳处理双孢蘑菇的 3 min 的保鲜效果较好, 考虑到处理成本问题, 选择 20 °C 为适宜的处理温度。

表3 0.3 MPa 二氧化碳处理不同时间
对双孢蘑菇低温贮藏期间颜色变化的影响
Table 3 Effect of different time of 0.3 MPa HPCD
on color change of button mushrooms
during low temperature storage

处理	L^*	BI
0 d		
对照	87.34 ± 0.72 ^a	19.40 ± 0.88 ^c
1 min	85.38 ± 1.02 ^b	21.57 ± 1.58 ^b
3 min	85.35 ± 0.79 ^b	22.80 ± 1.05 ^{ab}
5 min	84.46 ± 1.01 ^b	24.04 ± 0.36 ^a
2 d		
对照	84.08 ± 0.83 ^a	25.97 ± 1.82 ^b
1 min	80.86 ± 0.98 ^b	27.43 ± 2.24 ^{ab}
3 min	81.26 ± 0.61 ^b	29.71 ± 1.41 ^a
5 min	80.55 ± 0.53 ^b	30.68 ± 2.02 ^a
4 d		
对照	81.68 ± 1.05 ^a	30.24 ± 1.77 ^a
1 min	79.88 ± 0.89 ^b	32.57 ± 0.93 ^a
3 min	81.18 ± 0.63 ^{ab}	31.80 ± 1.21 ^a
5 min	79.97 ± 0.73 ^b	32.24 ± 0.87 ^a
6 d		
对照	79.58 ± 0.87 ^a	35.14 ± 1.07 ^a
1 min	79.68 ± 0.94 ^a	33.08 ± 1.64 ^{ab}
3 min	79.69 ± 0.72 ^a	32.59 ± 1.10 ^b
5 min	79.57 ± 0.65 ^a	33.67 ± 0.58 ^{ab}
8 d		
对照	77.61 ± 0.68 ^c	39.82 ± 1.02 ^a
1 min	79.23 ± 1.36 ^{ab}	33.88 ± 1.02 ^b
3 min	80.68 ± 1.27 ^a	33.21 ± 0.83 ^b
5 min	79.00 ± 1.02 ^{ab}	34.18 ± 0.95 ^b

表4 0.3 MPa 二氧化碳条件下不同处理温度
对双孢蘑菇低温贮藏期间颜色变化的影响
Table 4 Effect of different temperature of 0.3 MPa HPCD
on color change of button mushrooms
during low temperature storage

处理	L^*	BI
0 d		
对照	87.34 ± 0.72 ^a	19.40 ± 0.88 ^c
10 °C	85.48 ± 0.89 ^b	21.27 ± 1.58 ^{bc}
20 °C	85.35 ± 0.79 ^b	22.80 ± 1.05 ^{ab}
30 °C	83.96 ± 0.91 ^b	24.14 ± 0.57 ^a
2 d		
对照	84.08 ± 0.83 ^a	25.97 ± 1.82 ^c
10 °C	81.36 ± 1.07 ^b	26.63 ± 2.07 ^{bc}
20 °C	81.26 ± 0.61 ^b	29.71 ± 1.41 ^{ab}
30 °C	80.75 ± 0.48 ^b	30.48 ± 2.13 ^a
4 d		
对照	81.68 ± 1.05 ^a	30.24 ± 1.77 ^b
10 °C	80.88 ± 0.93 ^{ab}	31.97 ± 1.05 ^{ab}
20 °C	81.18 ± 0.63 ^{ab}	31.80 ± 1.21 ^{ab}
30 °C	79.79 ± 0.93 ^b	33.34 ± 0.89 ^a
6 d		
对照	79.58 ± 0.87 ^a	35.14 ± 1.07 ^a
10 °C	79.68 ± 0.94 ^a	32.78 ± 1.34 ^b
20 °C	79.69 ± 0.72 ^a	32.59 ± 1.10 ^b
30 °C	79.03 ± 0.64 ^a	34.97 ± 0.58 ^a
8 d		
对照	77.61 ± 0.68 ^c	39.82 ± 1.02 ^a
10 °C	79.83 ± 0.96 ^{ab}	34.48 ± 1.12 ^b
20 °C	80.68 ± 1.13 ^a	33.21 ± 0.83 ^b
30 °C	78.36 ± 0.89 ^{bc}	38.18 ± 0.78 ^a

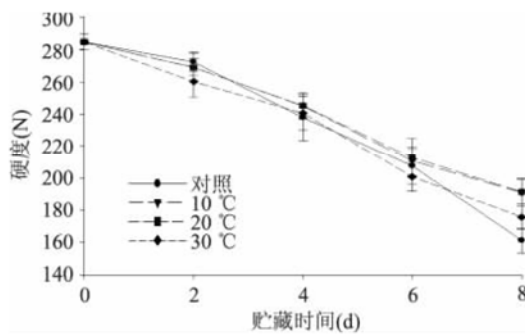


图3 0.3 MPa 二氧化碳条件下不同处理温度
对双孢蘑菇低温贮藏期间硬度变化的影响
Fig.3 Effect of different temperature of 0.3MPa HPCD
on firmness change of button mushrooms
during low temperature storage

2.4 响应面实验结果与分析

2.4.1 响应面实验方案与结果 在单因素实验的基础上,根据 Design Expert V8.0.6 软件的 Box-Beknhen 中心组合实验设计原理,以双孢蘑菇低温贮藏 8 d 后的硬度和 BI 为响应值,设计三因素三水平响应面分析实验,对双孢蘑菇的 HPCD 处理压力、时间、温度进一步优化,实验设计及结果见表 5。

表5 Box-Behnken 实验设计与结果

Table 5 Design and results of Box-Behnken experiments

实验号	A	B	C	硬度(N)	BI
1	-1	-1	0	166.2	36.38
2	-1	1	0	175.1	34.69
3	-1	0	-1	166.0	36.01
4	0	-1	1	159.3	38.95
5	0	0	0	191.1	33.21
6	0	1	1	167.9	39.30
7	0	-1	-1	173.1	35.18
8	1	0	-1	182.3	36.74
9	0	0	0	191.1	33.21
10	1	-1	0	165.6	36.57
11	1	0	1	167.9	40.01
12	-1	0	1	168.5	37.87
13	1	1	0	174.5	39.40
14	0	0	0	191.1	33.21
15	0	1	-1	182.3	36.13
16	0	0	0	191.1	33.21
17	0	0	0	191.1	33.21

表6 硬度回归模型方差分析

Table 6 Variance analysis for regression equation of firmness

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	Pr > F
模型	1923.79	9	213.75	21.71	0.0003
A	26.28	1	26.28	2.67	0.1463
B	158.42	1	158.42	16.09	0.0051
C	201.00	1	201.00	20.42	0.0027
AB	-2.274E-013	1	-2.274E-013	-2.310E-014	1.0000
AC	71.40	1	71.40	7.25	0.0309
BC	0.090	1	0.090	9.142E-003	0.9265
A ²	430.58	1	430.58	43.74	0.0003
B ²	476.45	1	476.45	48.40	0.0002
C ²	405.41	1	405.41	41.18	0.0004
残差	68.91	7	9.84		
失拟项	68.91	3	22.97		
纯误差	0.000	4	0.000		
总和	1992.70	16			

$R^2 = 0.9654$

2.4.2 响应面实验方差分析 利用 Design Expert V8.0.6 软件对表 5 的实验数据进行二次多项回归拟合,获得双孢蘑菇硬度和 BI 回归模型:

$$\text{硬度} = 191.1 + 1.81A + 4.45B - 5.01C - 4.23AC - 0.15BC - 10.11A^2 - 10.64B^2 - 9.81C^2 \quad \text{式(2)}$$

$$\text{BI} = 33.21 + 1.35A + 0.80B + 1.88C + 1.13AB + 0.10AC - 0.15BC + 2.78A^2 + 0.27B^2 + 3.91C^2 \quad \text{式(3)}$$

表 6 和表 7 分别为硬度和 BI 回归模型方差分析结果。从表中可以看出两个模型回归均显著 ($p < 0.01$), R^2 分别为 0.9654 和 0.9685, 且失拟项均不显著, 这说明两个模型与实际实验拟合程度较好, 可用上述回归方程描述各因子与响应值的关系, 对双孢蘑菇的 HPCD 处理工艺进行预测。从表 6 的 F 值可以看出所选因素对双孢蘑菇硬度影响从强到弱依次为: C、A、B, 在总的作用因素中 B、C、AC、A²、B²、C² 的差异显著 ($p < 0.05$); 从表 7 的 F 值可以看出所选因素对双孢蘑菇 BI 影响从强到弱依次为: C、A、B, 在总的作用因素中 A、B、C、AB、A²、C² 的差异显著 ($p < 0.05$)。

通过 Design Expert V8.0.6 软件分析预测双孢蘑菇的最大硬度预测值为 192.4 N, 此时的工艺条件为二氧化碳压力 0.33 MPa, 处理时间 3.42 min, 处理温度 17.10 °C; 双孢蘑菇的最小 BI 预测值为 32.40, 此时的工艺条件为二氧化碳压力 0.29 MPa, 处理时间 1.00 min, 处理温度为 17.40 °C。综合考虑硬度和 BI 得到的优化条件为二氧化碳压力 0.29 MPa, 处理时间 3.19 min, 处理温度 17.57 °C, 此时的硬度和 BI 分别为 191.9 N 和 33.01。为了便于操作, 将工艺进行适当处理为: 二氧化碳压力 0.3 MPa, 处理时间 3 min, 处理温度 17 °C, 进行 3 次验证实验, 结果显示, 双孢蘑菇的硬度和 BI 分别为 (191.7 ± 0.4) N 和 33.13 ± 0.09 , 与预测值相差不大, 说明方程与实际情况拟合良好, 充分验证了所建模型的正确性, 说明响应面法适用于 HPCD 处理双孢蘑菇工艺参数的优化。

实验表明, 双孢蘑菇的高密度二氧化碳处理最佳工艺为: 二氧化碳压力 0.3 MPa, 处理时间 3 min, 处理温度 17 °C, 该条件下, 双孢蘑菇可以较好的保持其硬度和颜色, 低温贮藏 8 d 后的硬度为 191.7 N, 比对照高 18.85%, 而 BI 为 33.13, 比对照低 16.80%。

表7 BI 回归模型方差分析

Table 7 Variance analysis for regression equation of BI

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	Pr > F
模型	157.27	9	17.47	23.95	0.0002
A	14.50	1	14.50	19.87	0.0029
B	5.18	1	5.18	7.10	0.0322
C	28.39	1	28.39	38.90	0.0004
AB	5.11	1	5.11	7.00	0.0331
AC	0.042	1	0.042	0.058	0.8172
BC	0.090	1	0.090	0.12	0.7358
A ²	32.63	1	32.63	44.72	0.0003
B ²	0.30	1	0.30	0.41	0.5428
C ²	64.49	1	64.49	88.39	<0.0001
残差	5.11	7	0.73		
失拟项	5.11	3	1.70		
纯误差	0.000	4	0.000		
总和	162.38	16			

$R^2 = 0.9685$

3 结论

单因素实验中, 经 HPCD 处理过的双孢蘑菇在低温贮藏 8 d, 其硬度和褐变指数 (BI) 均显著优于对照。这说明 HPCD 处理对双孢蘑菇具有一定的保鲜效果。

响应面分析得出的最佳工艺条件为: 二氧化碳压力 0.3 MPa, 处理时间 3 min, 处理温度 17 °C, 该条件下, 双孢蘑菇可以较好的保持其硬度和颜色; 低温贮藏 8 d 后的硬度为 191.7 N, 比对照高 18.85%, 而

BI 为 33.13, 比对照低 16.80%。

本文研究结果初步提示 HPCD 技术可以应用于双孢蘑菇的贮藏保鲜, 为双孢蘑菇的贮藏保鲜提供了一种新的途径, 具有良好的前景, 但其保鲜机理还有待进一步的研究。

参考文献

[1] 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.

[2] 徐丽婧, 高丽朴, 王清, 等. 辐照保鲜技术及其在双孢蘑菇保鲜中的应用 [J]. 食品工业科技, 2014, 35 (9): 392-395.

[3] Fernandes A, Antonio AL, Oliveira MBPP, 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] 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.

[5] 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.

[6] 邹强, 石代勇, 刘达玉, 等. 涂膜处理和酸处理对提高双孢蘑菇储藏稳定性的研究 [J]. 食品工业科技, 2013, 34 (23): 311-314.

[7] 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.

[8] 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, 139: 107-113.

[9] Spilimbergo S, Bertuccio A. Non-thermal bacteria inactivation with dense CO₂ [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2003, 84: 627-638.

[10] Garcia-Gonzalez L, Geeraerd AH, 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, 117: 1-28.

[11] Bi XF, Wu JH, Zhang Y, et al. High pressure carbon dioxide treatment for fresh-cut carrot slices [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2011, 12: 298-304.

[12] Chen JL, Zhang J, Song LJ, 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, Biasoli F, et al. Effects of supercritical CO₂ and N₂O pasteurisation on the quality of fresh apple juice [J]. Food Chemistry, 2009, 115: 129-136.

[14] Niu S, Xu ZH, Fang YD, 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: 91-97.

[15] Zivanovic S, Buescher RW, Kim KS. Textural changes in mushrooms (*Agaricus bisporus*) associated with tissue ultrastructure and composition [J]. Journal of Food Science, 2000, 65: 1404-1408.

[16] 张平, 李志文, 王莉, 等. 短时高浓度二氧化碳处理对冰温贮藏期间葡萄果实软化生理的影响 [J]. 食品工业科技, 2012, 33 (4): 368-373.

[17] 张辉, 逢焕明, 李学文, 等. CO₂ 熏蒸处理对采后杏果贮藏品质的影响 [J]. 新疆农业大学学报, 2008, 32 (1): 56-59.

[18] Caprioli I, Lafuente M T, Rodrigo M J, et al. Influence of postharvest treatments on quality, carotenoids, and abscisic acid content of stored Spring Belle peach (*Prunus persica*) fruit [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57 (15): 7056-7063.

[19] Tian S P, Fan Q, Xu Y, et al. Evaluation of the use of high CO₂ concentrations and cold storage to control *Monilinia fructicola* on sweet cherries [J]. Postharvest Biology and Technology, 2001, 22 (1): 53-60.

[20] Harker F R, Elgar H J, Watkins C B, et al. Physical and mechanical changes in strawberry fruit after high carbon dioxide treatments [J]. Postharvest Biology and Technology, 2000, 19 (2): 139-146.

[21] Oscar G B, María B, María T S, et al. The effects of high CO₂ levels on anthocyanin composition, antioxidant activity and soluble sugar content of strawberries stored at low non-freezing temperature [J]. Food Chemistry, 2010, 122 (3): 673-678.

(上接第 225 页)

[13] 闫永胜, 遼洋, 韩娟, 等. 聚合物-盐双水相技术及研究进展 [J]. 吉林师范大学学报: 自然科学版, 2014, 03: 6-16.

[14] 刘兴丽. 紫甘薯花青素双水相提取工艺及酒精性肝损伤预防效果研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2013. 19-21.

[15] Yingchun Wua, Yun Wang. Extraction and preliminary purification of anthocyanins from grape juice in aqueous two-phase system [J]. Separation and Purification Technology, 2014, 124: 170-178.

[16] 赵慧芳, 王小敏, 阎连飞, 等. 黑莓果实中花色苷的提取

和测定方法研究 [J]. 食品工业科技, 2008, 29 (5): 176-179.

[17] 冯建光, 谷文英. 葡萄皮红色素的示差法测定 [J]. 食品工业科技, 2002, 23 (9): 85-86.

[18] 张华. 双水相/三液相萃取分离天然产物有效成分 [D]. 大连: 大连理工大学, 2009.

[19] 郭菲, 刘继, 黄彭, 等. 响应面分析法优化紫茄皮花色苷的提取工艺 [J]. 食品工业科技, 2014, 35 (6): 268-276.

[20] 孙文娟. 紫薯花色苷提取、脱味、稳定性及其结构初步鉴定 [D]. 无锡: 江南大学, 2015.