

热风预处理对冷藏鲜切双孢蘑菇生理生化性质的影响

李顺峰, 李 静, 王安建, 魏书信, 田广瑞

(河南省农业科学院农副产品加工研究所, 河南 郑州 450002)

摘 要: 为延长鲜切双孢蘑菇的货架期, 研究不同时间热风预处理(40 ℃、相对湿度85%)对冷藏(4 ℃、相对湿度85%)鲜切双孢蘑菇生理生化指标的影响。结果表明, 热风处理5~10 min可显著降低鲜切双孢蘑菇过氧化物酶、多酚氧化酶活性, 提高苯丙氨酸解氨酶活性和总酚含量, 抑制超氧阴离子自由基产生速率, 显著提高超氧化物歧化酶活性和抗坏血酸含量, 延缓抗坏血酸过氧化物酶活性的下降速率, 以上结果表明, 适宜热风处理可抑制鲜切双孢蘑菇酶促褐变的发生、抑制活性氧代谢、提高其抗氧化能力, 最终延缓其衰老进程。相关性分析表明, 鲜切双孢蘑菇褐变由酶促褐变和非酶促褐变所引起, 而热风处理是通过抑制酶促褐变来延缓褐变发生的。

关键词: 热风处理; 鲜切双孢蘑菇; 褐变; 抗氧化; 自由基

Effects of Hot Air Pretreatment on Physiological and Biochemical Properties of Fresh-Cut *Agaricus bisporus* during Cold Storage

LI Shunfeng, LI Jing, WANG Anjian, WEI Shuxin, TIAN Guangrui

(Institute of Agricultural Products Processing, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: To extend the shelf life of fresh-cut *Agaricus bisporus*, the effects of different time periods of hot air pretreatment at 40 ℃ and 85% relative humidity (RH) on physiological and biochemical indices of fresh-cut *A. bisporus* during cold storage (4 ℃, RH 85%) were investigated. Results showed that hot air pretreatment for 5–10 min significantly reduced the activities of peroxidase and polyphenol oxidase, increased phenylalanine ammonia-lyase activity and total phenol content, inhibited superoxide anion generation rate, and markedly enhanced superoxide dismutase activity and ascorbate content, slowed down the decline in ascorbate peroxidase activity of fresh-cut *A. bisporus*. The results suggest that appropriate hot air treatment can inhibit enzymatic browning and reactive oxygen species metabolism of fresh-cut *A. bisporus*, and finally slow down senescence. The correlation analysis showed that the browning of fresh-cut *A. bisporus* was caused by enzymatic browning and non-enzymatic browning, and hot air treatment can delay the occurrence of browning by inhibiting the enzymatic browning.

Key words: hot air treatment; fresh-cut *Agaricus bisporus*; browning; antioxidant; free radicals

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201624045

中图分类号: TS255.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2016) 24-0285-07

引文格式:

李顺峰, 李静, 王安建, 等. 热风预处理对冷藏鲜切双孢蘑菇生理生化性质的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(24): 285-291.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201624045. <http://www.spkx.net.cn>

LI Shunfeng, LI Jing, WANG Anjian, et al. Effects of hot air pretreatment on physiological and biochemical properties of fresh-cut *Agaricus bisporus* during cold storage[J]. Food Science, 2016, 37(24): 285-291. (in Chinese with English abstract)

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201624045. <http://www.spkx.net.cn>

双孢蘑菇 (*Agaricus bisporus*) 因其味道鲜美、营养价值高而成为世界上栽培和消费量最大的食用菌^[1], 但因其菌盖表面无明显的保护结构, 在采后的贮藏运输及

加工过程中极易发生褐变, 进而导致品质下降, 货架期缩短^[2]。双孢蘑菇因采后褐变在常温的货架期仅有1~3 d^[2-3], 而每年因此造成的损失约占其年产量的15%左右^[4]。双孢

收稿日期: 2016-05-16

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (31301588); 河南省农业科学院自主创新基金项目 (2013ZZ43)

作者简介: 李顺峰 (1982—), 男, 助理研究员, 博士, 研究方向为农产品贮藏与加工。E-mail: lishunfeng2000@163.com

蘑菇经鲜切加工后由于受到了机械损伤及自由基等氧化胁迫的影响,更易发生褐变,货架期也更短^[4]。因此,延长鲜切双孢蘑菇货架期的关键是找到切实可行的褐变控制措施。

热处理是以适宜温度(一般为35~50℃)处理果蔬,以杀死或抑制病原微生物的活性,改变酶活性,从而达到贮藏保鲜效果的一种物理保鲜技术,它具有无化学残留、对人体无害、对环境无污染的优点,在果蔬贮藏保鲜中具有较好的应用前景^[5]。热处理不仅可以抑制侵染性病害的发生,还可抑制多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)活性、降低组织含氧量,从而抑制褐变的发生。近年来,将热处理应用到鲜切果蔬中用于防止褐变及保鲜方面的研究表明,其在鲜切马铃薯^[6]、山药^[7]、茼蒿^[8-9]、梨^[10]、生菜^[11]等保鲜方面有较好的效果,但鲜见将其应用到鲜切双孢蘑菇保鲜的报道。本研究采用40℃、相对湿度(relative humidity, RH)85%的热风对鲜切双孢蘑菇处理不同时间,考察其对酶促褐变和自由基代谢的影响,为其在鲜切双孢蘑菇保鲜上的应用提供理论依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料

新鲜双孢蘑菇采自河南省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。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双孢蘑菇进行实验。

1.2 仪器与设备

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; UV1800型紫外-可见分光光度计 岛津仪器(苏州)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; 控制型试管研磨机 德国IKA集团; 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; Color Flex EZ色差计 美国HunterLab公司。

1.3 方法

1.3.1 样品处理

去除双孢蘑菇菇柄,将其纵切为厚度为0.5 cm的菇片,在温度40℃、RH 85%恒温恒湿箱中分别对其进行1、5、10、20、30 min热风处理,然后放入托盘用聚乙烯(polyethylene, PE)保鲜膜(氧气透过率(14 200±40)% (cm³/(m²·24 h))、CO₂透过率(65 000±20)% (cm³/(m²·24 h))、透湿量(68±20)% (g/(m²·24 h))包裹后在4℃、RH 85%条件下进行贮藏,以不进行热风处理的双孢菇片为对

照,每个处理重复3次,每次100 g,每2 d取样1次,进行色泽评价后将样品用液氮冷冻并粉碎后置-80℃冰箱保存备用。

1.3.2 色泽评价

取10片双孢蘑菇片,用Color Flex EZ色差计测定菇片 L^* 、 a^* 、 b^* ,然后根据式(1)计算褐变指数(browning index, BI)^[12-13]。

$$BI/\% = \frac{a^* + 1.75L^*}{5.645L^* + a^* - 3.012b^*} - 0.31 \times 100 \quad (1)$$

0.172

1.3.3 PPO和过氧化物酶(peroxidase, POD)活性的测定

酶液提取:称取2.0 g双孢蘑菇粉,与50 mmol/L pH 5.5乙酸缓冲液(含0.8 g/L交联聚乙烯吡咯烷酮)冰浴提取10 min,定容至10 mL,10 000 r/min离心20 min(4℃),上清液用于测定PPO和POD活性。PPO和POD活性参照Gao Mengsha^[3]、Jiang Tianjia^[14]等的方法测定。

1.3.4 苯丙氨酸解氨酶(phenylalanine ammonia-lyase, PAL)活性的测定

称取2.0 g双孢蘑菇粉,0.4 g聚乙烯吡咯烷酮,并量取10 mL含5 mmol/L巯基乙醇的0.05 mol/L pH 8.5硼酸钠缓冲液,冰浴提取10 min,10 000 r/min离心15 min(4℃),上清液用于测定PAL活性。PAL活性参照Gao Mengsha等^[3]的方法测定。

1.3.5 总酚(total phenolics, TP)含量的测定

TP含量采用福林-酚法测定,用没食子酸当量(mg/g)表示^[15]。

1.3.6 超氧阴离子自由基(O₂⁻·)产生速率和过氧化氢(H₂O₂)含量的测定

O₂⁻·产生速率参照Li Shunfeng等^[16]和Liu Jun等^[17]的方法测定。

H₂O₂含量参照Zheng Xiaohua等^[18]的方法测定。

1.3.7 超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)和过氧化物酶(catalase, CAT)活性的测定

SOD和CAT活性参照Xu Wentao等^[19]和Liu Jun等^[17]的方法测定。

1.3.8 抗坏血酸(ascorbic acid, AsA)含量的测定

称取2.0 g双孢蘑菇粉,加入质量分数6%三氯乙酸溶液冰浴研磨后定容至10 mL,10 000 r/min离心10 min(4℃),上清液采用Kampfenkel等^[20]的方法测定AsA含量。

1.3.9 抗坏血酸过氧化物酶(ascorbate peroxidase, APX)活性的测定

APX活性参照Khan^[21]、Jiang Tianjia^[15]、李顺峰^[22]等方法测定。

1.3.10 蛋白质含量的测定

蛋白质含量采用考马斯亮蓝法^[23]测定。

1.4 数据处理

所有实验平行3次, 实验结果用 $\bar{x} \pm s$ 表示, 采用SPSS 22.0软件进行ANOVA分析(显著性水平 $P < 0.05$)和相关性分析, 采用OriginPro 9.2软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同热风处理时间对鲜切双孢蘑菇BI的影响

色泽是评价一种产品能否被消费者接受的一个重要指标, 也是评价产品质量优劣的一个重要指标^[24]。褐变是反映双孢蘑菇品质劣变的重要因素, 而BI是评价产品褐变的一个综合指标, BI越大, 说明褐变越严重。由图1可知, 随着贮藏时间的延长, 对照组(0 min)和热风处理组鲜切双孢蘑菇BI均呈现上升趋势。在贮藏中后期(4~10 d), 5~20 min热风处理组的BI显著($P < 0.05$)低于对照和其他处理组, 说明5~20 min热风处理组可以延缓鲜切双孢蘑菇褐变的发生, 按Gormley^[25]对双孢蘑菇货架期的评分标准, 热风处理5~20 min可延长货架期2~4 d。

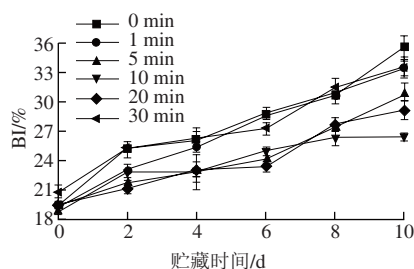


图1 不同热风处理时间对鲜切双孢蘑菇BI的影响

Fig. 1 Effect of different time periods of hot air treatment on browning index of fresh-cut *Agaricus bisporus*

2.2 不同热风处理时间对鲜切双孢蘑菇PPO和POD活性的影响

PPO是一类催化酚类成醌, 并最终引起酶促褐变的含铜氧化还原酶^[26]。POD是以铁卟啉为辅基、以 H_2O_2 为电子受体催化酚类和胺类化合物等底物氧化的一类氧化还原酶, 具有消除 H_2O_2 和酚类、胺类毒性的双重作用^[26]。从图2A可以看出, 在贮藏期间, 各处理组鲜切双孢蘑菇PPO活性均呈先上升后下降的趋势, 并在第6天达到峰值。热风处理1 min和30 min PPO活性与对照无显著差别, 但热风处理5~20 min PPO活性显著低于对照组。从图2B可以看出, 在贮藏前期(0~4 d), 对照和各处理组POD活性均呈下降趋势, 但随着贮藏时间的延长, 除20 min热风处理组外, 其余各处理组在第6天POD活性均显著上升并在此时达到峰值, 之后POD活性均呈下降趋势, 并且5~20 min处理组POD活性相对较低, 以上结果说明热风处理5~20 min可显著抑制PPO和POD活性的升高。

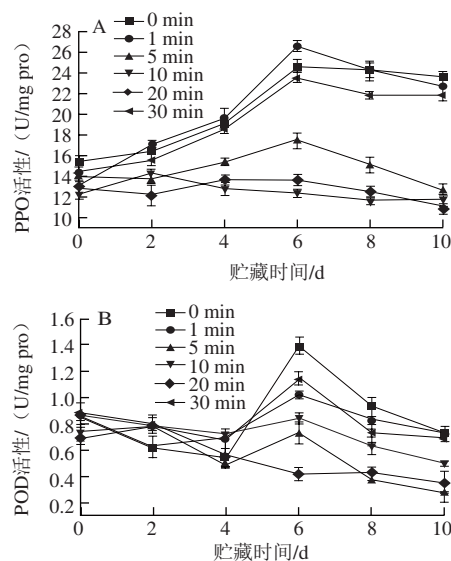


图2 不同热风处理时间对鲜切双孢蘑菇PPO (A) 和POD (B) 活性的影响

Fig. 2 Effects of different time periods of hot air treatment on PPO and POD activities of fresh-cut *Agaricus bisporus*

2.3 不同热风处理时间对鲜切双孢蘑菇TP含量和PAL活性的影响

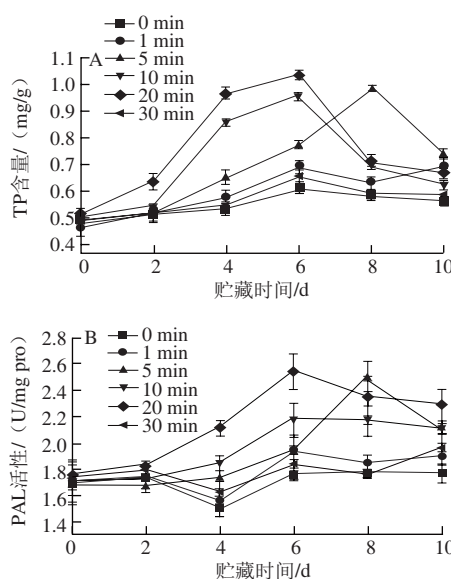


图3 不同热风处理时间对鲜切双孢蘑菇TP含量 (A) 和PAL活性 (B) 的影响

Fig. 3 Effect of different time periods of hot air treatment on total phenolic content and PAL activity of fresh-cut *Agaricus bisporus*

酚类化合物是引起双孢蘑菇酶促褐变的底物, 同时也是一种重要的抗氧化物质, 对肿瘤、冠心病有良好的防治效果。酶促褐变的程度与酚类化合物含量及PPO活性的高低有关。PAL是许多植物次生物质(如黄酮类物质、酚类物质、木质素等)生物合成途径——苯丙烷代谢的关键酶, 与抗逆境胁迫等密切相关^[3]。由图3A可以

看出,随着贮藏时间的延长,对照组(0 min)和热风处理组鲜切双孢蘑菇TP含量呈先升高后下降的趋势,并且1、30 min处理组变化与对照组相似,在整个贮藏过程中TP均保持在较低水平。除5 min处理组TP在第8天达到最高(0.99 mg/g)外,对照组和其余各处理组均在第6天达到最大,分别为0.63、0.70、0.96、1.03、0.67 mg/g,且热风处理5~20 min TP含量显著高于其他处理组。以上结果表明,热风处理5~20 min可显著提高鲜切双孢蘑菇TP含量。由图3B可知,随着贮藏时间的延长,1、30 min处理组PAL活性变化与对照组相似,在整个贮藏过程中PAL活性均波动保持在较低水平,5~20 min处理组呈先升高再下降的趋势。在贮藏中后期(4~10 d),热风处理5~20 min尤其是10~20 min处理组PAL活性显著高于对照组和其他处理组,这一结果与TP含量变化趋势相一致(图3A)。Liu Fengjuan等^[27]采用38 °C热空气处理枇杷果实也得到了类似的结果。

2.4 不同热风处理时间对鲜切双孢蘑菇中活性氧的影响

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。 O_2^- 和 H_2O_2 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。

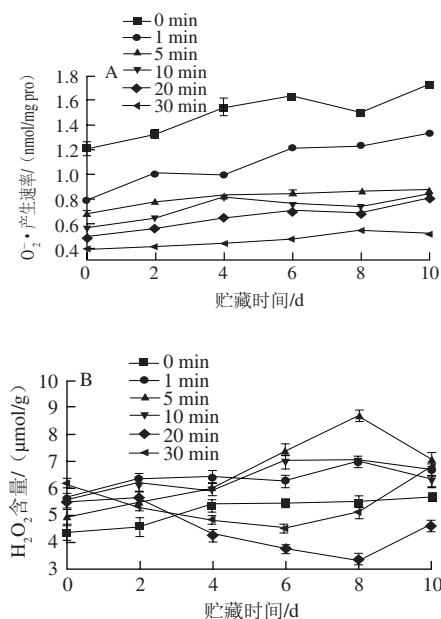


图4 不同热风处理时间对鲜切双孢蘑菇 O_2^- 产生速率(A)和 H_2O_2 含量(B)的影响

Fig. 4 Effect of different time periods of hot air treatment on the generation rate of superoxide anion and hydrogen peroxide content of fresh-cut *Agaricus bisporus*

由图4A可知,在整个贮藏过程中,所有组的 O_2^- 产生速率均呈缓慢上升趋势,且与对照组相比,各热风处理组 O_2^- 产生速率均显著低于对照组,并且热风处理时间越长, O_2^- 含量越低。这一结果可能是由于热处理促进了受损细胞的愈合;提高了抗氧化酶类或/和抗氧化物质的含量,清除了产生的 O_2^- 。由图4B可以看出,随着贮藏时间的延长,对照组和处理30 min组鲜切双孢蘑菇 H_2O_2 含量呈现先下降后升高的趋势,分别在贮藏8、6 d出现最小值3.5、5.0 μmol/g,且在整个贮藏过程中 H_2O_2 含量保持在较低水平;另外,除热风处理1 min组 H_2O_2 含量呈缓慢上升趋势(由4.7 μmol/g升至5.8 μmol/g),其他热风处理组(5~20 min)均呈先升高后降低的趋势,在贮藏第8天出现峰值分别是8.8、7.2、7.1 μmol/g,且在整个贮藏过程中 H_2O_2 含量高于其他组并保持在较高水平。以上表明,热风处理组 H_2O_2 含量(特别是5~20 min组)在整个贮藏期高于对照组,这可能是与 O_2^- 降低有关(图4A),但 H_2O_2 并未像 O_2^- 一样呈现规律性变化,这可能与 H_2O_2 清除体系有关。

2.5 不同热风处理时间对鲜切双孢蘑菇中抗氧化酶活性的影响

SOD、CAT和APX是植物组织细胞内活性氧防御体系的主要酶系统,对维持活性氧代谢平衡有重要作用。SOD是消除 O_2^- 、CAT和APX是消除 H_2O_2 的抗氧化酶,较高的抗氧化酶活性可避免活性氧过量积累,减少氧化损伤^[27]。

由图5A可以看出,随着贮藏时间的延长,除热风处理30 min组SOD活性呈下降趋势外,其他组SOD活性均呈缓慢上升趋势且热风处理组显著高于对照组。热风处理(1~20 min)能显著提高鲜切双孢蘑菇SOD活性,在降低 O_2^- 含量(图4A)的过程中起关键作用,增强鲜切双孢蘑菇的抗氧化性。由图5B可知,随着贮藏时间的延长,除热风处理20 min组CAT活性显著升高外,其他组CAT活性呈缓慢上升趋势且热处理组与对照组无显著差异($P>0.05$)。说明热风处理对鲜切双孢蘑菇CAT活性影响不大,不能清除 H_2O_2 含量以致热风处理组 H_2O_2 含量高于对照组。从图5C可以看出,在整个贮藏过程中,所有组鲜切双孢蘑菇APX活性均呈先升高后降低的趋势,热风处理组并不能显著提高贮藏中鲜切双孢蘑菇APX活性,但可延缓贮藏后期(6~10 d)APX活性的下降速率,尤以热风处理5~10 min最为明显。以上结果与汪开拓等^[28]采用48 °C热空气处理杨梅果实和Liu Fengjuan等^[27]采用38 °C热空气处理枇杷果实可延缓其贮藏期间SOD、CAT和APX活性的下降结果相一致。

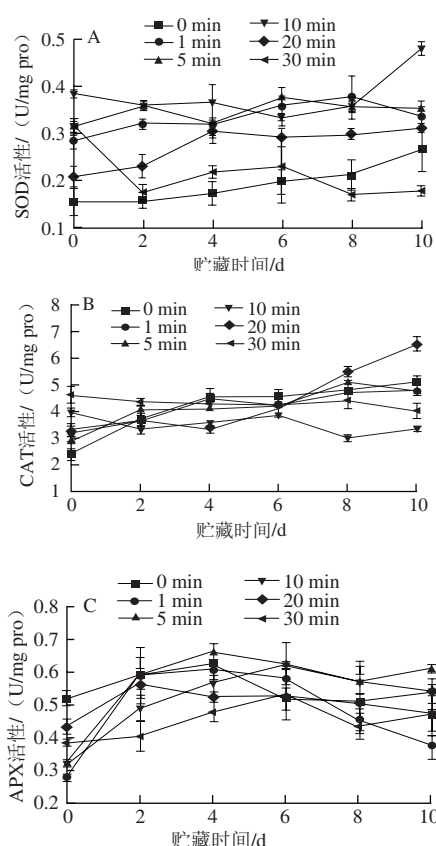


图5 不同热风处理时间对鲜切双孢蘑菇SOD (A)、CAT (B) 和APX (C) 活性的影响

Fig. 5 Effect of different time periods of hot air treatment on SOD, CAT and APX activities of fresh-cut *Agaricus bisporus*

2.6 不同热风处理时间对鲜切双孢蘑菇AsA含量的影响

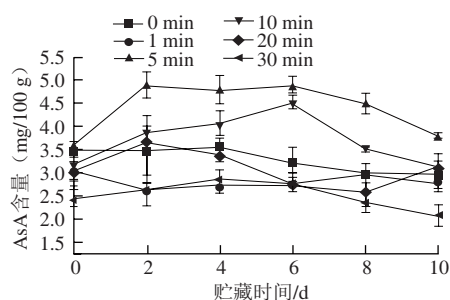


图6 不同热风处理时间对鲜切双孢蘑菇AsA含量的影响

Fig. 6 Effect of different time periods of hot air treatment on AsA content of fresh-cut *Agaricus bisporus*

AsA是植物细胞重要的抗氧化剂, 它可还原、清除 $\cdot\text{OH}$, 清除 H_2O_2 , 还可再生AsA。由图6可以看出, 随着贮藏时间的延长, 除了对照组和处理30 min组鲜切双孢蘑菇AsA含量呈缓慢下降的趋势, 其他热风处理组均呈先升高再降低的趋势, 其中热风处理5、10 min组AsA含量总体保持最高, 并显著高于对照组和其他处理组。以上分析表明, 热风处理5、10 min组能显著提高鲜切双孢蘑菇AsA含量, 增强抗氧化性。

2.7 相关性分析

表1 对照组各指标相关性分析

Table 1 Correlation analysis of indexes for control samples

指标	BI	贮藏时间	PPO活性	POD活性	PAL活性	TP含量	SOD活性	CAT活性	$\text{O}_2^{\cdot-}$ 产生速率	H_2O_2 含量	APX活性	AsA含量
BI	1											
贮藏时间	0.98**	1										
PPO活性	0.80*	0.88**	1									
POD活性	0.09	0.19	0.58	1								
PAL活性	0.32	0.32	0.34	0.49	1							
TP含量	0.76*	0.80*	0.98**	0.64	0.33	1						
SOD活性	0.93**	0.94**	0.73	0.11	0.39	0.64	1					
CAT活性	0.92**	0.90**	0.83*	0.07	0.02	0.81*	0.76*	1				
$\text{O}_2^{\cdot-}$ 产生速率	0.90**	0.90**	0.84*	0.23	0.04	0.82*	0.83*	0.92**	1			
H_2O_2 含量	-0.55	-0.68	-0.89**	-0.49	-0.05	-0.85*	-0.45	-0.71	-0.63	1		
APX活性	-0.62	-0.67	-0.40	0.01	-0.56	-0.25	-0.82*	-0.32	-0.38	0.19	1	
AsA含量	-0.85*	-0.91**	-0.82*	-0.34	-0.63	-0.72	-0.90**	-0.66	-0.67	0.60	0.84*	1

注: *.显著相关性 ($P<0.05$); **.极显著相关性 ($P<0.01$)。下同。

表2 热风处理各指标相关性分析 (5 min)

Table 2 Correlation analysis of indexes for 5 min hot air treated samples

指标	BI	贮藏时间	PPO活性	POD活性	PAL活性	TP含量	SOD活性	CAT活性	$\text{O}_2^{\cdot-}$ 产生速率	H_2O_2 含量	APX活性	AsA含量
BI	1											
贮藏时间	0.98**	1										
PPO活性	-0.22	-0.02	1									
POD活性	-0.86*	-0.79*	0.37	1								
PAL活性	0.77*	0.81*	0.07	-0.69	1							
TP含量	0.71	0.80*	0.35	-0.60	0.95**	1						
SOD活性	0.40	0.48	0.29	0.11	0.42	0.44	1					
CAT活性	0.88**	0.91**	0.04	-0.64	0.73	0.76*	0.61	1				
$\text{O}_2^{\cdot-}$ 产生速率	0.86*	0.93**	0.22	-0.64	0.71	0.80*	0.55	0.96**	1			
H_2O_2 含量	0.74	0.83*	0.34	-0.56	0.94**	0.99**	0.57	0.81*	0.84*	1		
APX活性	0.52	0.59	0.29	-0.31	0.26	0.44	0.46	0.81*	0.83*	0.48	1	
AsA含量	-0.15	-0.02	0.64	0.37	-0.06	0.19	0.46	0.33	0.34	0.22	0.69	1

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、2所示。对照组鲜切双孢蘑菇BI与PPO活性、TP含量显著正相关 ($P<0.05$), 与AsA含量显著负相关 ($P<0.05$), 与SOD和CAT活性、 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 产生速率极显著正相关 ($P<0.01$) (表1), 这一结果说明鲜切双孢蘑菇褐变不仅由酶促褐变引起, 还与非酶促褐变有关; 鲜切双孢蘑菇经热风处理后BI与PAL活性和 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 产生速率显著正相关 ($P<0.05$), 与CAT活性极显著正相关 ($P<0.01$), 与POD活性显著负相关 ($P<0.05$) (表2), 这一结果说明热风处理可以抑制鲜切双孢蘑菇酶促褐变的发生。

3 讨论

组织褐变是影响鲜切果蔬外观的首要因素, 一方面, 果蔬经鲜切加工后, 由于组织细胞结构受到破坏,

PPO和酚类底物的区室化分布被打破,更易发生酶促褐变^[29]。而控制酶促褐变的措施主要是抑制酶的活性、隔绝或消耗氧气、降低底物浓度或含量。另一方面,由于果蔬组织中含有大量的水、糖类、有机酸、蛋白质、氨基酸等物质,在适宜条件下还可能发生美拉德反应、焦糖化反应、AsA氧化分解等非酶促褐变^[29]。本研究采用40℃、RH 85%热风处理鲜切双孢蘑菇1~30 min,结果发现在热风处理5~10 min时,一方面显著降低了鲜切双孢蘑菇PPO和POD活性(图2),提高了PAL活性并最终提高TP含量(图3),这一结果与罗自生等^[30]采用40℃或45℃热处理轻度加工竹笋能显著抑制PPO和POD活性相一致,但与其延缓了PAL活性和TP含量的提高这一结果相悖,出现这一结果的原因可能是较高的活性氧(H_2O_2)含量,诱导了PAL活性的升高,生成了更多的酚类物质,进而提高产品抗逆性,这一原因与本研究表2结果中 H_2O_2 含量与PAL活性呈极显著正相关相对应,同时也说明了热处理是通过抑制PPO和POD活性来延缓酶促褐变发生的。另一方面,40℃热风处理5~10 min显著提高了鲜切双孢蘑菇SOD活性和AsA含量,延缓了APX活性的下降速率(图5和图6),抑制了 $O_2^- \cdot$ 产生速率(图4A),这一结果与汪开拓等^[28]采用48℃热风处理杨梅果实可显著抑制贮藏期间SOD和APX活性的下降,抑制 $O_2^- \cdot$ 的积累,减轻过量活性氧自由基对细胞膜的损害相一致,同时也说明适当的热处理可以提高抗氧化酶活性和抗氧化物质的含量,在一定程度上保持活性氧代谢的平衡。但其并未提高CAT活性,进而造成了 H_2O_2 的积累,这可能是鲜切双孢蘑菇经热处理后导致其褐变衰老的原因之一,但其具体作用机制仍需做进一步研究。

4 结 论

热风处理5~20 min可延缓鲜切双孢蘑菇BI的上升,显著降低POD、PPO活性,提高PAL活性,提高鲜切双孢蘑菇TP含量,延长货架期2~4 d。热风处理5~30 min可抑制鲜切双孢蘑菇 $O_2^- \cdot$ 产生速率;1~20 min处理可显著提高SOD活性,但对CAT活性影响不大。5~10 min热风处理可显著提高鲜切双孢蘑菇AsA含量,延缓APX活性的下降速率,提高其抗氧化活性。鲜切双孢蘑菇褐变由酶促褐变和非酶促褐变所引起,而热风处理是通过抑制酶促褐变来延缓褐变发生的。

综合以上结果,热风处理5~10 min可抑制鲜切双孢蘑菇酶促褐变的发生、抑制活性氧代谢、提高其抗氧化能力,最终延缓其衰老进程。

参考文献:

- [1] 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. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.2.027.
- [2] QIN Yuyue, LIU Dong, WU Yan, et al. Effect of PLA/PCL/cinnamaldehyde antimicrobial packaging on physicochemical and microbial quality of button mushroom (*Agaricus bisporus*)[J]. Postharvest Biology and Technology, 2015, 99: 73-79. DOI:10.1016/j.postharvbio.2014.07.018.
- [3] GAO Mengsha, FENG Lifang, JIANG Tianjia. Browning inhibition and quality preservation of button mushroom (*Agaricus bisporus*) by essential oils fumigation treatment[J]. Food Chemistry, 2014, 149: 107-113. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.10.073.
- [4] 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. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2015.11.063.
- [5] 孔祥佳,郑俊峰,林河通,等.热处理对果蔬贮藏品质和采后生理的影响及应用[J].包装与食品机械,2011,29(3):34-39. DOI:10.3969/j.issn.1005-1295.2011.03.010.
- [6] 刘战丽,张龙,王相友,等.温度对鲜切马铃薯生理和品质的影响[J].食品科技,2012,37(8):48-51.
- [7] 范文广,王庆国,毛春芳.热处理控制鲜切山药褐变研究[J].食品与发酵科技,2009,45(2):38-41. DOI:10.3969/j.issn.1674-506X.2009.02-011.
- [8] LOAIZA-VELARDE J G, SALTVEIT M E. Heat shocks applied either before or after wounding reduce browning of lettuce leaf tissue[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2001, 126(2): 227-234.
- [9] 黄光荣,蒋家新.温和热处理对切分莴苣酶促褐变的抑制试验[J].食品工业,2002,23(4):35-37.
- [10] 陈莉,屠康.加工前轻微热处理对鲜切砀山梨品质的影响[J].食品工业科技,2005,26(7):51-53;58. DOI:10.3969/j.issn.1002-0306.2005.07.021.
- [11] 鲁莉莎,乔勇进,段丹萍.热处理对鲜切生菜生理生化品质的影响[J].江西农业大学学报,2010,32(3):451-457. DOI:10.3969/j.issn.1000-2286.2010.03.007.
- [12] PATRAS A, TIWARI B K, BRUNTON N P. Influence of blanching and low temperature preservation strategies on antioxidant activity and phytochemical content of carrots, green beans and broccoli[J]. LWT-Food Science and Technology, 2011, 44(1): 299-306. DOI:10.1016/j.lwt.2010.06.019.
- [13] EISSA H A A. Effect of chitosan coating on shelf life and quality of fresh-cut mushroom[J]. Journal of Food Quality, 2007, 30(5): 623-645. DOI:10.1111/j.1745-4557.2007.00147.x.
- [14] JIANG Tianjia. 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. DOI:10.1016/j.postharvbio.2012.09.005.
- [15] JIANG Tianjia, ZHENG Xiaolin, LI Jianrong, et al. Integrated application of nitric oxide and modified atmosphere packaging to improve quality retention of button mushroom (*Agaricus bisporus*)[J]. Food Chemistry, 2011, 126(4): 1693-1699. DOI:10.1016/j.foodchem.2010.12.060.
- [16] LI Shunfeng, ZHANG Lihua, LIU Xinghua. Effects of mouldy core and core rot on physiological and biochemical responses of apple fruit[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2011, 91(14): 2674-2678. DOI:10.1002/jsfa.4511.

- [17] LIU Jun, WU Yuchun, KAN Juan, et al. Changes in reactive oxygen species production and antioxidant enzyme activity of *Agaricus bisporus* harvested at different stages of maturity[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2013, 93(9): 2201-2206. DOI:10.1002/jsfa.6027.
- [18] ZHENG Xiaolin, TIAN Shiping, MENG Xianghong, et al. Physiological and biochemical responses in peach fruit to oxalic acid treatment during storage at room temperature[J]. Food Chemistry, 2007, 104(1): 156-162. DOI:10.1016/j.foodchem.2006.11.015.
- [19] XU Wentao, PENG Xiaoli, LUO Yunbo, et al. Physiological and biochemical responses of grapefruit seed extract dip on 'Redglobe' grape[J]. LWT-Food Science and Technology, 2009, 42(2): 471-476. DOI:10.1016/j.lwt.2008.09.002.
- [20] KAMPFENKEL K, VANMONTAGU M, INZE D. Extraction and Determination of ascorbate and dehydroascorbate from plant tissue[J]. Analytical Biochemistry, 1995, 225(1): 165-167. DOI:10.1006/abio.1995.1127.
- [21] KHAN Z U, AISIKAER G, KHAN R U, 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. DOI:10.1016/j.postharvbio.2014.04.001.
- [22] 李顺峰, 李静, 王安建, 等. 真空充氮热处理对鲜切双孢蘑菇自由基和保护酶的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(2): 326-329; 334. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2016.02.057.
- [23] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. Analytical Biochemistry, 1976, 72(1/2): 248-254. DOI:10.1016/0003-2697(76)90527-3.
- [24] 李静, 李顺峰, 王安建, 等. 适宜热烫条件保持双孢蘑菇片品质和颜色[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 268-273. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2014.06.032.
- [25] GORMLEY R. Chill storage of mushrooms[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1975, 26(4): 401-411. DOI:10.1002/jsfa.2740260404.
- [26] 李顺峰. 苹果霉心病果肉生理及其近红外无损检测研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [27] LIU Fengjuan, TU Kang, SHAO Xinfeng, et al. Effect of hot air treatment in combination with *Pichia guilliermondii* on postharvest anthracnose rot of loquat fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2010, 58(1): 65-71. DOI:10.1016/j.postharvbio.2010.05.009.
- [28] 王开拓, 郑永华. 热空气处理对杨梅果实采后活性氧代谢和热激蛋白合成的影响[J]. 食品科学, 2011, 32(8): 291-295.
- [29] LAMIKANRA O. Fresh-cut fruits and vegetables: science, technology, and market[M]. Florida: CRC Press LLC, 2002.
- [30] 罗自生, 徐晓玲, 严碧芳. 热处理对轻度加工竹笋品质和生理的影响[J]. 农业机械学报, 2008, 39(1): 64-67. DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.