

# 纳米包装材料对双孢菇细胞壁代谢及品质的影响

李志啸<sup>1</sup>, 杨文建<sup>1</sup>, 方东路<sup>2</sup>, 裴 斐<sup>1</sup>, 马 宁<sup>1</sup>, 方 勇<sup>1</sup>, 赵立艳<sup>2</sup>, 安欣欣<sup>2</sup>, 胡秋辉<sup>1,\*</sup>

(1.南京财经大学食品科学与工程学院, 江苏 南京 210003; 2.南京农业大学食品科技学院, 江苏 南京 210095)

**摘 要:** 在包装材料中添加纳米银、纳米二氧化钛、纳米凹凸棒土和纳米二氧化硅, 制备了一种纳米聚乙烯 (polyethylene, PE) 包装袋, 通过实验来探讨纳米包装材料对双孢菇在贮藏期间的细胞壁代谢和相关酶活性的影响及其保鲜机理。在  $(4 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 、相对湿度  $(90 \pm 5)\%$  贮藏条件下测定包装袋内  $\text{CO}_2$  含量、双孢菇的硬度、褐变度、总酚含量、木质素含量、纤维素含量、几丁质含量、苯丙氨酸解氨酶 (PAL) 和过氧化物酶 (POD) 活性指标的变化。结果显示, 与普通 PE 包装材料相比, 添加纳米粒子的包装材料能够较好地保持双孢菇的质地, 抑制子实体的自溶、木质化劣变的现象。贮藏 10 d 后, 纳米包装袋内  $\text{CO}_2$  含量、双孢菇褐变度、纤维素、木质素含量分别比普通 PE 包装低 10.5%、32.2%、15.2% 和 22.2%, 达到显著性差异 ( $P < 0.05$ )。纳米 PE 包装袋能够有效地抑制贮藏期间双孢菇木质素的积累、组织纤维化及相关酶活性的上升, 较好地保持了双孢菇贮藏品质, 延长了贮藏时间。

**关键词:** 双孢菇; 纳米材料; 保鲜; 细胞壁代谢; 木质化

## Effects of Nano-Packaging on Cell Wall Metabolism and Postharvest Qualities of *Agaricus bisporus*

LI Zhixiao<sup>1</sup>, YANG Wenjian<sup>1</sup>, FANG Donglu<sup>2</sup>, PEI Fei<sup>1</sup>, MA Ning<sup>1</sup>, FANG Yong<sup>1</sup>, ZHAO Liyan<sup>2</sup>, AN Xinxin<sup>2</sup>, HU Qiuhiu<sup>1,\*</sup>

(1. College of Food Science and Engineering, Nanjing University of Finance & Economics, Nanjing 210003, China;

2. College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** A nano-packaging material containing nano silver, nano titanium dioxide, nano attapulgite and nano silica was prepared and used to investigate its effect on cell wall metabolism of and related enzyme activities of *Agaricus bisporus* including  $\text{CO}_2$  concentration, firmness, browning degree and the contents of total phenols, lignin, cellulose and chitin, as well as the activities of phenylalanine ammoniolyase (PAL) and peroxidase (POD) during storage at  $(4 \pm 0.5)^\circ\text{C}$  and relative humidity of  $(90 \pm 5)\%$ . Results suggested that compared with normal polyethylene (PE) packaging material, the nano-packaging material could better maintain the texture of *Agaricus bisporus* and inhibit the autolysis and lignification of fruiting bodies. After 10 days of storage,  $\text{CO}_2$  concentration in the package, and browning degree and cellulose and lignin contents of *Agaricus bisporus* were significantly decreased by 10.5%, 32.2%, 15.2% and 22.2%, respectively, as compared with normal packaging material ( $P < 0.05$ ). The nano-packaging material could maintain the storage quality and extend the shelf life of *Agaricus bisporus* by inhibiting the accumulation of lignin and cellulose and increasing related enzyme activities.

**Key words:** *Agaricus bisporus*; nano-material; preservation; cell wall metabolism; lignification

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201606045

中图分类号: TS206.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2016) 06-0248-06

引文格式:

李志啸, 杨文建, 方东路, 等. 纳米包装材料对双孢菇细胞壁代谢及品质的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(6): 248-253.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201606045. <http://www.spkx.net.cn>

LI Zhixiao, YANG Wenjian, FANG Donglu, et al. Effects of nano-packaging on cell wall metabolism and postharvest qualities of *Agaricus bisporus*[J]. Food Science, 2016, 37(6): 248-253. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-201606045. <http://www.spkx.net.cn>

双孢菇又名白蘑菇、洋蘑菇, 由于其具有良好的口感和独特的风味, 并且相比较于大多数蔬菜含有更高的

蛋白质和更易吸收的碳水化合物, 深受广大消费者的喜爱<sup>[1]</sup>。双孢菇在欧美国家是消费者的主要食用菌, 是目前

收稿日期: 2015-11-05

基金项目: 公益性行业 (农业) 科研专项 (201303080); 江苏省高校自然科学研究项目 (13KJB550011);

江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 李志啸 (1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为食品贮藏保鲜。E-mail: lizhixiao0803@163.com

\*通信作者: 胡秋辉 (1962—), 男, 教授, 博士, 研究方向为食品加工与贮藏保鲜。E-mail: qiuhiu@njue.edu.cn

唯一全球性栽培的食用菌,也是世界上栽培面积最大的食用菌,其产量占食用菌总量的50%<sup>[2]</sup>。相比于其他食用菌,双孢菇子实体含水量高,贮藏期间呼吸速率更高,蒸腾作用更为旺盛,在贮运过程中容易造成大量水分散失和菇体的后生长,以及子实体的木质化和自溶等品质劣变现象,双孢菇采后的保鲜问题成为制约双孢菇产业发展的一个重要瓶颈。

目前,对于食用菌采后保鲜技术主要集中在气调保鲜、涂膜保鲜、辐照处理、臭氧保鲜等,在实际生产销售中应用较多的是自发性气调结合冷藏的方式。然而如今由于栽培方式的改进以及物流水平的提高,农产品受产量和季节性影响越来越弱,保藏的要求已经从静态长期保鲜转向流通运输环节中的动态保鲜。而食用菌作为一种鲜活农产品,采用新型包装技术实现保鲜成为了一种趋势。而纳米包装材料作为新型保鲜包装,能够很好地运用于动态保鲜环节<sup>[3]</sup>。纳米材料由于其特殊的组成和结构,使它具备了传统普通聚乙烯(polyethylene, PE)材料所不具备的性能,表现出良好的抗菌性能、抑制乙烯产生、阻湿性等<sup>[4-5]</sup>,同时前期对纳米保鲜材料的物理性能的研究结果显示,添加了纳米银、纳米二氧化钛和纳米凹凸棒土可有效降低包装材料的透湿量和透氧量,提高其纵向拉伸强度,显著改善了包装材料的机械性和功能<sup>[6]</sup>。所以相比较于普通PE包装材料,纳米包装材料更适合鲜活农产品的贮藏保鲜<sup>[7]</sup>。本课题组在前期已经制备了一种添加了纳米银、纳米二氧化钛、纳米凹凸棒土和纳米二氧化硅的新型复合纳米包装袋,并应用于绿茶<sup>[8]</sup>、猕猴桃<sup>[9]</sup>和生菜中<sup>[10]</sup>。并对双孢菇进行保鲜效果的研究,结果显示,该纳米包装材料能够通过抑制水分散失、褐变、呼吸强度等达到延长其保质期的作用<sup>[6]</sup>。而关于在贮藏期间细胞壁代谢的机制还缺乏深入的研究。

细胞壁是维持细胞形态的支撑物质,有研究<sup>[11]</sup>表明,果实的成熟、软化、衰老与细胞壁结构及成分的变化密切相关。目前关于双孢菇采后保鲜技术更多注重于对子实体褐变、活性氧等方面研究,而对于纳米包装材料包装后的双孢菇在贮藏期间的细胞壁代谢研究较少。本实验在前期纳米保鲜实验的基础上,通过前期已经制备的纳米保鲜袋,研究其在双孢菇的低温贮藏过程中,对双孢菇硬度、褐变度等表观品质和细胞壁主要成分含量变化的影响,从细胞壁代谢方面初步研究,来探索纳米包装材料保鲜作用的机理。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

双孢菇(*Agaricus bisporus*)由江苏省天丰食用菌科贸有限公司提供。实验于2015年8月3—13日在江苏省粮油品质控制及深加工技术重点实验室进行。

纳米包装袋的制备:以纳米银30%、纳米二氧化钛35%、纳米凹凸棒土25%和纳米二氧化硅10%为原料混合制成纳米复合粉体。然后按照纳米复合粉体15%、PE塑料68%、偶联剂2%、分散剂10%、润滑剂5%混匀,制成纳米母粒。最后以复合塑料粒子84.5%、纳米母粒7.5%和防雾剂母粒8%混匀后吹膜制成厚度为40 μm的纳米薄膜。利用以上配方研制的纳米包装材料,用SF-200型手压式塑料封接机制成规格为20 cm×22 cm的纳米包装袋。按照同样工艺制备不含纳米粒子的40 μm厚普通PE塑料薄膜包装袋作为对照。同时测试依据GB/T 1038—2000《塑料薄膜和薄片气体透过性试验方法》测量了普通PE包装袋和纳米包装袋的标准CO<sub>2</sub>透过率,分别为0.101 893 cm<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·d·Pa)和0.109 529 cm<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·d·Pa)。

### 1.2 仪器与设备

TA.XT2i质构仪 美国Stable Micro Systems公司;  
SCY-2A气体测试仪 上海昕瑞仪器仪表有限公司;  
Allegra 64R冷冻离心机 美国Beckman公司;恒温恒湿培养箱 宁波江南仪器设备有限公司;HH-6数显恒温水浴锅 国华电器有限公司;U-3900紫外-可见分光光度计 日本日立公司;SF-200型手压式塑料封接机。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 样品处理

实验当天双孢菇采后立即运至冰箱4℃,预冷24 h,挑选菇体完整、颜色洁白、未开伞、无病虫害和机械伤、菌盖直径35~40 mm的双孢菇用利刀削去菇柄,进行包装封口。包装袋材料为纳米PE材料(处理组),普通PE材料(对照组),规格为:20 cm×22 cm。每袋装双孢菇180 g,每个处理组 and 对照组各20袋,置温度(4±0.5)℃、相对湿度(90±5)%条件下贮藏。每2 d测定1次双孢菇的生理等实验指标,连续测定10 d。每个指标重复测定3次。

#### 1.3.2 指标测定

##### 1.3.2.1 CO<sub>2</sub>含量的测定

采用SCY-2A气体测试仪进行测定,采用20 mL针筒抽取封闭纳米包装袋和普通PE包装袋内气体的方式来取样。

##### 1.3.2.2 硬度的测定

采用TA.XT.Plus物性测定仪测定,测定参数为:采用P1探头,探头预备速率5.00 mm/s;测定速率1.00 mm/s;探头测后速率1.00 mm/s;测定高度6.00 mm;最小感知力0.005 kg;每次取5个菇体的菌伞表面测定,将下压过程中的最大力视为其硬度,最后取其平均值。

##### 1.3.2.3 褐变度的测定

根据段颖等<sup>[12]</sup>的方法:取鲜切蘑菇样品1 g于20 mL煮沸的蒸馏水中(蒸馏水沸腾后放入样品)约30 s后冷却,

充分研磨。用1 000 r/min离心5 min后于波长410 nm处比色。以 $A_{410\text{ nm}} \times 20$ 为双孢菇褐变度的值。

### 1.3.2.4 总酚含量的测定

称取切碎的蘑菇柄1 g, 加入5 mL含1% HCl-甲醇溶液, 研磨成匀浆, 用1 mL含1% HCl-甲醇溶液洗涤研钵, 转移到10 mL离心管中, 摇匀, 于12 000 r/min离心10 min, 取上清液1 mL按照标准曲线的操作过程以含1% HCl-甲醇溶液为对照, 在波长765 nm处测定吸光度。以没食子酸做标准曲线加以计算总酚含量。

### 1.3.2.5 木质素含量的测定

木质素参照Bruce等<sup>[13]</sup>的方法进行测定并略微更改。称取1 g材料, 加5 mL 95%乙醇溶液研磨, 经3 000×g离心7 min, 沉淀物以95%乙醇溶液冲洗3次, 再用乙醇-正己烷(1:2, V/V)冲洗3次, 收集沉淀物使其干燥, 干燥物溶于25%溴乙酰-冰醋酸溶液中, 在70℃恒温水浴中加塞保温30 min, 然后加0.9 mL 2 mol/L NaOH终止反应, 再加5 mL冰醋酸和0.1 mL 7.5 mol/L的羟胺盐酸, 并以冰醋酸定容至10 mL, 1 000×g离心7 min, 取上清液在280 nm波长处测定吸收度, 以每克鲜质量在280 nm波长处的吸收度表示木质素含量。测定3次重复。

### 1.3.2.6 纤维素含量的测定

纤维素含量测定参照牛森<sup>[14]</sup>的方法进行测量并稍加更改。准确称取烘干的样品1 g, 放入100 mL容量瓶中, 将容量瓶放入冰浴中, 加冷的60%  $\text{H}_2\text{SO}_4$ 溶液60~70 mL, 在冷的条件下消化处理0.5 h, 然后用60%  $\text{H}_2\text{SO}_4$ 溶液。稀释至刻度, 摇匀, 用玻璃坩埚漏斗过滤。吸取上述滤液2.0 mL, 加0.5 mL 2%蒽酮试剂, 再沿管壁加5.0 mL浓 $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 盖上塞子, 以后操作同纤维素标准液, 测出样品在620 nm波长处的消光值。计算公式为:

$$X = \frac{A \times 10^{-3} \times C}{B}$$

式中:  $A$ 为标准曲线上查得的纤维素含量/ $\mu\text{g}$ ;  $B$ 为样品质量/g;  $C$ 为样品稀释倍数;  $X$ 为样品中纤维素含量/( $\text{mg/g}$ )。

### 1.3.2.7 几丁质含量的测定

几丁质含量的测定方法参照傅海舰等<sup>[15]</sup>, 以标准D-氨基葡萄糖盐酸盐溶液制作标准曲线。

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

采用南京建成生物工程研究所生产的相应试剂盒测定。30℃条件下每毫克组织蛋白在每毫升反应体系中每分钟使吸光度变化0.1为一个酶活力单位(U/mg pro)。蛋白含量采用Bradford<sup>[16]</sup>法测定。

### 1.3.2.9 过氧化物酶(peroxidase, POD)活性的测定

采用南京建成生物工程研究所生产的相应试剂盒测

定。37℃条件下每毫克组织蛋白每分钟催化产生1  $\mu\text{g}$ 的底物的酶量定义为一个POD活力单位(U/mg pro)。

## 1.4 数据统计分析

采用JMP软件进行数据分析, 实验数据采用邓肯氏(Duncan's)差异性分析, 以 $P < 0.05$ 判断为显著性差异,  $P < 0.01$ 判断为极显著性差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 纳米包装袋中 $\text{CO}_2$ 含量

表1 不同材料保鲜袋内 $\text{CO}_2$ 含量比较

Table 1 Comparison of  $\text{CO}_2$  contents of PE and nano packages

包装类别	贮藏时间/d				
	2	4	6	8	10
普通PE包装	14.70±0.90 <sup>a</sup>	17.30±0.48 <sup>a</sup>	16.00±0.59 <sup>a</sup>	16.00±0.13 <sup>a</sup>	15.80±0.60 <sup>a</sup>
纳米材料包装	13.50±0.61 <sup>a</sup>	14.70±0.43 <sup>b</sup>	15.50±0.42 <sup>b</sup>	15.20±0.18 <sup>b</sup>	14.30±0.21 <sup>b</sup>

注: 同列数据肩标不同字母代表差异显著( $P < 0.05$ )。

经过10 d、4℃的贮藏, 不同材料包装中 $\text{CO}_2$ 的含量变化如表1所示。可以看出, 普通PE包装袋中的 $\text{CO}_2$ 含量始终高于纳米材料包装, 这与Jiang Tianjia等<sup>[17]</sup>测定的结果一致。其中, 在4、6、8、10 d中普通PE包装内的 $\text{CO}_2$ 含量显著性高于纳米包装材料( $P < 0.05$ )。本实验团队前期对包装材料的物理性能测量结果显示, 纳米包装材料的透湿量和透氧量分别比普通PE包装降低了19.53%和32.86%<sup>[18]</sup>, 而 $\text{CO}_2$ 透过率并没有显著差异。更多的 $\text{CO}_2$ 释放量表明了普通PE包装材料中双孢菇有着更高的呼吸速率, 也表明了纳米包装材料在一定程度上抑制了双孢菇的呼吸强度。

### 2.2 纳米包装袋对双孢菇硬度的影响

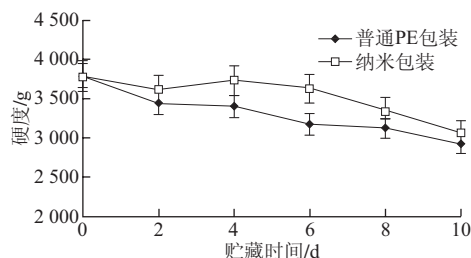


图1 不同包装材料对双孢菇硬度的影响

Fig.1 Effect of different packaging materials on firmness of *Agaricus bisporus*

果蔬硬度的维持主要取决于细胞壁的机械强度和细胞的膨压, 而机械强度和细胞的膨压与果蔬组织内大分子物质和水分含量密切相关<sup>[19]</sup>。不同包装材料贮藏双孢菇菇体的硬度变化如图1所示。在贮藏前4 d, 纳米包装的双孢菇菇体的硬度略微增长, 随后逐渐下降。而普通PE包装双孢菇菇体的硬度在第4、6天时分别为3 391.6、3 169.4 g, 极显著低于纳米包装的3 729.2、3 623.6 g



( $P<0.01$ )。实验表明相比于普通PE包装, 纳米包装材料延缓了双孢菇硬度的下降, 从而较好地保持了双孢菇的质地。

### 2.3 纳米包装袋对双孢菇褐变度的影响

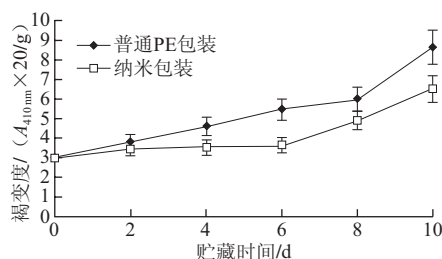


图2 不同包装材料对双孢菇褐变度的影响

Fig.2 Effect of different packaging materials on browning degree of *Agaricus bisporus*

由图2可以看出, 普通包装材料和纳米包装材料处理的双孢菇在4℃贮藏期间, 其褐变度均随着时间的延长而逐渐增大。其中在第4、6、8、10天时, 纳米包装材料处理组的双孢菇褐变度显著低于对照组 ( $P<0.05$ )。而贮藏后期2种包装材料处理的双孢菇褐变度均急剧增加, 这是由于在贮藏后期膜脂过氧化作用和细胞膜透性的加剧, 导致细胞膜系统破坏, 使酚类物质与相关的酶类接触并发生反应, 从而加剧了褐变反应的发生<sup>[20]</sup>。

### 2.4 纳米包装袋对双孢菇总酚含量的影响

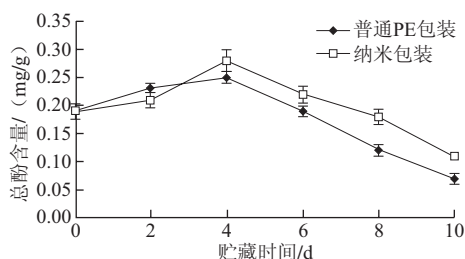


图3 不同包装材料对双孢菇总酚含量的影响

Fig.3 Effect of different packaging materials on total phenol content of *Agaricus bisporus*

酚类物质的氧化是影响采后双孢菇组织色泽发生褐变的主要因素, 而褐变现象是由于多酚氧化酶作用于酚类物质底物而引起, 因此果实褐变度与其组织内部总酚含量密切相关<sup>[21]</sup>。从图3可以看出, 在贮藏期间纳米包装和普通PE包装处理的双孢菇总酚含量均呈现先略微上升后下降的趋势。这可能是由于随着贮藏时间的延长, 双孢菇子实体受到环境的胁迫而引起组织内产生更多酚类物质, 酚类物质可以参与组织的愈伤过程以及增强子实体对不良环境的抗逆性<sup>[22]</sup>。贮藏第10天时, 纳米包装材料处理的双孢菇总酚含量为0.11 mg/g, 而普通PE包装材料处理的双孢菇总酚含量为0.07 mg/g, 分别比贮

藏初期0.23 mg/g下降了52.2%和69.6%, 达到显著水平 ( $P<0.05$ )。同时在贮藏第8、10天时, 纳米包装材料处理的双孢菇总酚含量分别比普通PE包装材料处理高33.3%、36.4%, 达到显著水平 ( $P<0.05$ )。

### 2.5 纳米包装袋对双孢菇木质素含量的影响

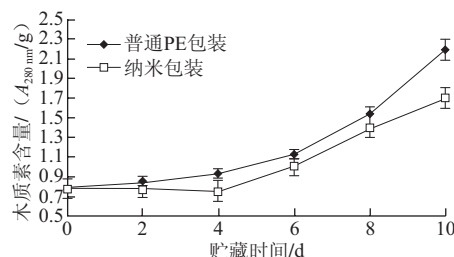


图4 不同包装材料对双孢菇木质素含量的影响

Fig.4 Effect of different packaging materials on lignin content of *Agaricus bisporus*

木质素含量是反映植物木质化程度的直观指标<sup>[23]</sup>, 其含量高低直接影响着果蔬的品质。如图4所示, 纳米包装袋处理能够抑制木质素的积累。对于纳米和普通PE包装2种处理, 木质素的积累在贮藏第10天时达到最大值, 分别为1.70 A<sub>280 nm</sub>/g和2.19 A<sub>280 nm</sub>/g, 达到显著水平 ( $P<0.05$ )。结果表明, 双孢菇在贮藏后期出现了木质化现象, 而纳米包装袋能够延缓木质素的积累, 从而较好地保持双孢菇的品质。

### 2.6 纳米包装袋对双孢菇纤维素含量的影响

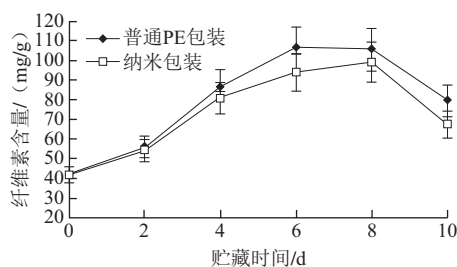


图5 不同包装材料对双孢菇纤维素含量的影响

Fig.5 Effect of different packaging materials on cellulose content of *Agaricus bisporus*

双孢菇细胞壁的组成成分主要包括β-葡聚糖、几丁质、纤维素、半纤维素等, 所以研究双孢菇中纤维素含量是衡量细胞老化的又一重要指标<sup>[24]</sup>。如图5所示, 纳米包装和普通PE包装处理的双孢菇在贮藏期间均呈现先上升后下降的趋势, 而普通PE包装材料处理的双孢菇纤维素含量在第6天达到最高值106.11 mg/g, 纳米包装材料在第8天达到最高值101.06 mg/g, 可以看出纳米包装相比于普通PE材料延缓了双孢菇子实体纤维素的积累, 保持了双孢菇的品质。

## 2.7 纳米包装袋对双孢菇几丁质含量的影响

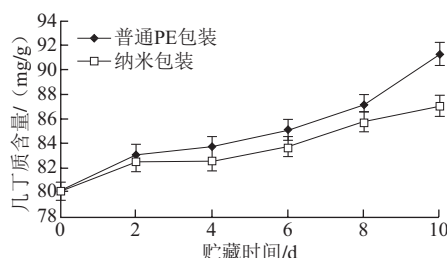


图6 不同包装材料对双孢菇几丁质含量的影响

Fig.6 Effect of different packaging materials on chitin content of *Agaricus bisporus*

几丁质是以 $\beta$ -1,4-*N*-乙酰氨基葡萄糖为单元的无支链多聚体,是真菌细胞壁的主要组成成分,与纤维素共同构成纤维状的微纤丝在细胞壁中起到骨架作用<sup>[20]</sup>。如图6所示,双孢菇在贮藏期间几丁质含量呈现上升趋势,这可能是双孢菇在采后逆性条件下的应激反应。贮藏前期,几丁质含量增长缓慢,但在第10天时普通PE包装和纳米包装的双孢菇几丁质含量达到最高峰,分别达到91.3 mg/g和87.1 mg/g,纳米包装双孢菇显著低于普通PE包装( $P<0.05$ )。说明纳米包装材料在一定程度上抑制了几丁质的增加,延缓了双孢菇的老化。

## 2.8 纳米包装对双孢菇PAL活性的影响

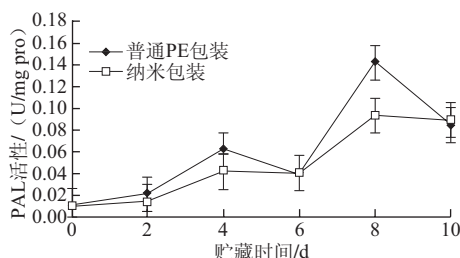


图7 不同包装材料对双孢菇PAL活性的影响

Fig.7 Effect of different packaging materials on PAL activity of *Agaricus bisporus*

PAL连接初级代谢和苯丙烷类代谢,是苯丙氨酸代谢途径的关键酶和限速酶<sup>[25]</sup>。从图7可以看出,纳米包装和普通PE包装的双孢菇中PAL活性处于较低水平,但在贮藏第4天和第8天时出现了不同程度的上升。贮藏第4天PAL活性的上升与总酚含量(图3)的增加趋势相一致,这是由于酚类化合物作为苯丙烷类代谢产物,PAL在一定程度上参与了酚类物质的合成。贮藏第8天双孢菇中PAL活性的上升与木质素含量(图4)后期的增加相一致,说明了木质素的合成与PAL活性有密切关系。其中贮藏第8天PAL活性达到最高峰,普通包装和纳米PE包装PAL活性分别为0.142 U/mg pro和0.093 U/mg pro,达到显著水平( $P<0.05$ )。因此相比于普通PE包装,纳米包装材料抑制了贮藏期间双孢菇中PAL活性的增加,减缓了苯丙氨酸代谢速率。

## 2.9 纳米包装对双孢菇POD活性的影响

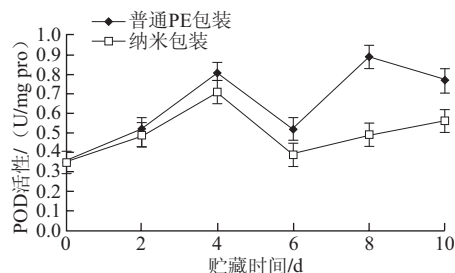


图8 不同包装材料对金针菇POD活力的影响

Fig.8 Effects of different packaging materials on POD activity of *Agaricus bisporus*

POD在植物体内主要催化过氧化氢氧化其他底物后生成水从而清除过氧化氢,同时催化木质醇单体发生脱氢氧化聚合反应,参与木质素合成和累积的过程<sup>[26]</sup>。同时有研究<sup>[27]</sup>表明POD在过氧化氢的存在下也能催化酚类物质的氧化和聚合导致组织的褐变。图8显示,贮藏前期POD活性迅速上升,这可能因为双孢菇细胞中由于活性氧代谢产生了过氧化氢,而POD开始参与过氧化氢的清除。然而,在贮藏第8天和第10天时普通PE包装的POD活性分别是纳米包装的1.8倍和1.4倍,达到显著水平( $P<0.05$ )。

## 3 讨论与结论

本实验所使用的是本课题组前期研发的一种添加纳米银、纳米二氧化钛和纳米凹凸棒土的纳米PE包装材料。其中加入纳米银主要是由于银离子所具有的抗菌作用,纳米粒径的银能够大大地加快银从材料中扩散至表面在水和空气的体系中形成银离子,与微生物表面蛋白结合,从而使微生物的膜电位发生变化新陈代谢异常达到杀菌效果<sup>[28]</sup>。二氧化钛作为一种无机功能材料,包装袋中所添加的纳米级二氧化钛更是具有抗菌杀毒、吸收紫外线、自清洁和阻隔性良好等普通二氧化钛所不具备的优异功能<sup>[29]</sup>。同时添加的纳米凹凸棒土不仅可以改善包装材料的机械性和阻隔性,还可以帮助其他添加的纳米活性粒子更为均匀、稳定地分散在纳米复合物中<sup>[30]</sup>。环境中微生物的侵染是造成双孢菇发生褐变的一个重要原因,本团队成员在前期对纳米包装材料的抑菌性实验中显示出纳米包装具有抑菌、防霉的效果<sup>[31]</sup>,并且在前期对包装材料的物理性能测量结果也显示,相比于普通PE材料,纳米包装具有更低的透氧率和透湿率,从而维持了包装袋中低氧和高湿的环境<sup>[18]</sup>。纳米包装材料对微生物的抑制作用以及其袋内的高湿、低氧的环境降低了双孢菇呼吸强度和褐变程度,延缓了双孢菇细胞壁中木质素、纤维素和几丁质含量的增加,降低了PAL和POD活性的增加,减缓了相关生理生化活动。

本实验中,随着贮藏期的延长,双孢菇中木质素含量呈现不断增加的趋势,相比于普通PE包装,纳米包装的双孢菇木质素含量在贮藏第10天时降低了15.2%,达到显著性差异( $P<0.05$ )。因此纳米包装材料减缓了木质素的积累,从而有效抑制了贮藏后期双孢菇的木质化劣变。同时,作为组成细胞壁骨架结构的物质纤维素和几丁质,纳米材料包装处理的双孢菇中2种物质的含量均低于普通PE包装处理,说明了纳米包装材料减少了纤维素和几丁质在贮藏期间的增加,延缓了双孢菇的老化,降低了细胞壁的代谢速率。

作为苯丙氨酸代谢的关键酶以及木质素代谢的限速酶, PAL活性在纳米包装处理中得到了明显的抑制,因而减缓了木质素在贮藏期间的合成。而作为参与木质素在细胞壁的聚合过程的POD,其在纳米包装材料中的活性在贮藏后期显著性低于普通PE包装( $P<0.05$ ),说明了纳米包装抑制了POD活性的增加,在一定程度上降低了木质素的增加。并且结合总酚含量和木质素含量变化趋势,贮藏后期POD同时参与了木质素的合成以及酚类物质的氧化。同时在贮藏后期,纳米包装处理减缓了总酚含量的下降,并且显著性降低了双孢菇褐变度的升高,说明了纳米包装材料有效抑制了双孢菇的褐变。

综合上述结果表明,在贮藏期间纳米包装袋内的CO<sub>2</sub>含量显著低于普通PE包装,相比于普通PE包装,纳米包装袋抑制了双孢菇的呼吸作用,延缓了其硬度和总酚含量的下降,降低双孢菇褐变程度,同时减缓了双孢菇细胞壁中木质素、纤维素和几丁质含量的增加,抑制了PAL和POD活性的增加,有效地降低了双孢菇在贮藏期间的新陈代谢,较好地保持了双孢菇的质地和外观品质。

#### 参考文献:

- [1] HU Y H, CHEN C M, XU Lian, et al. Postharvest application of 4-methoxy cinnamic acid for extending the shelf life of mushroom (*Agaricus bisporus*) [J]. Postharvest Biology and Technology, 2015, 104(1): 33-34. DOI:10.1016/j.postharvbio.2015.03.007.
- [2] 王德宇. 双孢蘑菇多糖的分离、纯化及结构研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2008.
- [3] 杨燕婷. 食品纳米包装材料的制备及对金针菇、猕猴桃的保鲜作用[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- [4] PÉREZ-ESTEVE E, BERNARDOS A, MARTÍNEZ-MÁÑEZ R, et al. Nanotechnology in the development of novel functional foods or their package [J]. Recent Patents on Food, Nutrition and Agriculture, 2013, 5(1): 35-43. DOI:10.2174/2212798411305010006.
- [5] CHAU C F, WU S H, YEN G C. The development of regulations for food nanotechnology [J]. Trends in Food Science and Technology, 2007, 18(5): 269-280. DOI:10.1016/j.tifs.2007.01.007.
- [6] 杨文建, 单楠, 杨芹, 等. 纳米包装材料延长双孢蘑菇贮藏品质的作用[J]. 中国农业科学, 2012, 45(24): 5065-5072. DOI:10.3864/j.issn.0578-1752.2012.24.012.
- [7] ECHEGOYEN Y, NERIN C. Performance of an active paper based on cinnamon essential oil in mushrooms quality [J]. Food Chemistry, 2015, 170(1): 30-31. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.08.032.
- [8] ZHAO L Y, LI F, CHEN G T, et al. Effect of nanocomposite-based packaging on preservation quality of green tea [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2012, 47(3): 572-578. DOI:10.1111/j.1365-2621.2011.02879.x.
- [9] HU Q H, FANG Y, YANG Y T, et al. Effect of nanocomposite-based packaging on postharvest quality of ethylene-treated kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) during cold storage [J]. Food Research International, 2011, 44(6): 1589-1596. DOI:10.1016/j.foodres.2011.04.018.
- [10] 马宁, 石学彬, 方勇, 等. 纳米包装材料对生菜保鲜品质的影响[J]. 食品科学, 2012, 33(18): 281-285.
- [11] 罗自生, 寿浩林. Nsec涂膜对黄花梨软化和细胞壁代谢的影响[J]. 果树学报, 2011, 28(1): 143-146. DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.2011.01.021.
- [12] 段颖, 耿胜荣, 韩永斌, 等. 蘑菇保鲜剂的筛选及其保鲜效果[J]. 食品工业与发酵, 2004, 30(5): 143-146. DOI:10.3321/j.issn:0253-990X.2004.05.034.
- [13] BRUCE R J, WEST C A. Elicitation of lignin biosynthesis and isoperoxidase activity by pectic fragments in suspension cultures of castor bean [J]. Plant Physiology, 1989, 91(3): 889-897. DOI:jstor.org/stable/4272444.
- [14] 牛森. 石学彬, 方勇, 等. 纳米包装材料对生菜保鲜品质的影响[J]. 食品科学, 2012, 33(18): 281-285.
- [15] 傅海舰, 薛长湖, 杜世振, 等. 两种比色法测定甲壳素类化合物含量的研究方法[J]. 中国食品学报, 2003(增刊1): 219-222. DOI:10.3969/j.issn.1009-7848.2003.z1.048.
- [16] 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: 248-254.
- [17] JIANG T J, FENG L F, WANG Y B. Effect of alginate/nano-Ag coating on microbial and physicochemical characteristics of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) during cold storage [J]. Food Chemistry, 2013, 141(1): 954-960. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.03.093.
- [18] 单楠, 杨芹, 杨文建, 等. 纳米包装材料延长金针菇贮藏品质的作用[J]. 食品科学, 2012, 33(2): 264-265.
- [19] 巩晋龙. 杏鲍菇(*Pleurotus eryngii*)冷藏保鲜技术及自溶机理研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2013.
- [20] 刘红锦, 徐为民, 王静, 等. 果蔬的褐变及其控制方法[J]. 食品研究与开发, 2008, 29(4): 159-162. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2008.04.049.
- [21] 罗晓芳, 田砚亭, 姚洪军, 等. 组织培养过程中PPO活性和总酚含量的研究[J]. 北京林业大学学报, 1999(1): 92-95. DOI:10.3321/j.issn:1000-1522.1999.01.018.
- [22] 郁志芳, 夏志华, 陆兆新. 鲜切甘薯酶促褐变机理的研究[J]. 食品科学, 2005, 26(5): 54-59. DOI:10.3321/j.issn:1002-6630.2005.05.008.
- [23] 罗自生. 采后竹笋木质化与内源激素的关系[J]. 中国农业科学, 2006, 39(4): 792-797. DOI:10.3321/j.issn:0578-1752.2006.04.021.
- [24] ZIVANOVIC S, BUESCHER R, KIM S K. Mushroom texture, cell wall composition, color, and ultrastructure as affected by pH and temperature [J]. Journal of Food Science, 2003, 68(2): 1860-1865. DOI:10.1111/j.1365-2621.2003.tb12343.x.
- [25] 高雪. 植物苯丙氨酸解氨酶研究进展[J]. 现代农业科技, 2009, 30(1): 30-32. DOI:10.3969/j.issn.1007-5739.2009.01.015.
- [26] CAI C, XU C J, LI X, et al. Accumulation of lignin in relation to change in activities of lignification enzymes in loquat fruit flesh after harvest [J]. Postharvest Biology and Technology, 2006, 40(2): 163-169. DOI:10.1016/j.postharvbio.2005.12.009.
- [27] 吴明江. 植物过氧化物酶的生理作用[J]. 生物学杂志, 1994, 62(6): 14-16.
- [28] ZHOU N I, LIU Y, LI L, et al. A new nanocomposite biomedical material of polymer/Clay-Cts-Ag nano composites [J]. Current Applied Physics, 2007, 7(Suppl 1): 58-62. DOI:10.1016/j.cap.2006.11.016.
- [29] 祝钧, 苏醒, 张晓娟. 纳米包装材料在果蔬保鲜中的应用[J]. 食品科学, 2008, 29(12): 766-768. DOI:10.3321/j.issn:1002-6630.2008.12.179.
- [30] 柳翱, 李海东, 程凤梅. PVA从MMT纳米复合材料的制备及性能表征[J]. 长春工业大学学报, 2008, 29(2): 129-131. DOI:10.15923/j.cnki.cn22-1382/t.2008.02.005.
- [31] 杨燕婷, 杨芹, 杨方美, 等. 纳米包装材料对金针菇的保鲜作用[J]. 中国农业科学, 2009, 42(9): 3253-3254. DOI:10.3864/j.issn.0578-1752.2009.09.030.