

# 气调包装对白灵菇褐变及生物有效性的影响

李喜宏, 薛婷\*, 李媛媛, 汤尧

(天津科技大学食品工程与生物技术学院, 天津 300457)

**摘要:** 在4℃、相对湿度95%的环境中, 采用不同厚度PVC膜、PE膜(0.03mm, 0.05mm)和微孔膜(0.015mm)保鲜白灵菇, 贮藏期28d, 定期检测O<sub>2</sub>和CO<sub>2</sub>体积分数、色差、多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)、多糖生物利用度等生理生化指标, 研究被动自发气调对白灵菇褐变和多糖生物有效性的影响。结果表明: 在贮藏的第7天, 0.05mm薄膜包装内可形成稳定的低氧高二氧化碳的气体环境, 并能维持21d, 气体体积分数分别为O<sub>2</sub> 0.3%~2.1%, CO<sub>2</sub> 6%~10.3%, 推迟了PPO酶活性高峰的到来, 抑制白灵菇PPO酶活性升高; 在贮藏前期能较好的维持多糖生物有效性; 而不同包装对白灵菇颜色影响不显著。因此, 厚度为0.05mm的薄膜自发气调包装能较好地抑制白灵菇褐变, 减缓白灵菇营养成分的损失, 延长白灵菇贮藏期。

**关键词:** 白灵菇; 自发气调包装(MAP); 褐变; 体外消化; 生物利用度

## Effect of Modified Atmosphere on Browning and Bioavailability of *in vitro* Digests of *Pleurotus nebroidensis*

LI Xi-hong, XUE Ting\*, LI Yuan-yuan, TANG Yao

(College of Food Engineering and Biotechnology, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

**Abstract:** In order to gain insight into the effect of positive modified atmosphere on the browning and polysaccharide bioavailability of *Pleurotus nebroidensis*, such physiological and biochemical indexes as oxygen and carbon dioxide concentrations, color difference, polyphenol oxidase (PPO) activity and polysaccharide bioavailability were measured on *Pleurotus nebroidensis* modified atmospheric packaged with PVC or PE films of different thickness (0.03 or 0.05 mm) or microporous film (0.015 mm) at regular time intervals during 28 days of storage at 4 °C and 95% relative humidity. A low-oxygen, high-carbon dioxide stable environment composed of 0.3%–2.1% O<sub>2</sub> and 6%–10.3% CO<sub>2</sub> was formed by 0.05 mm thick film on storage day 7 and could keep for 21 days. The environment could delay the occurrence of the PPO activity peak, inhibit the increase of PPO activity, and maintain polysaccharide bioavailability during the early part of the storage period. Different packages had no significant difference in their effect on the color of *Pleurotus nebroidensis*. Consequently, modified atmosphere packaging with 0.05 mm thick film could inhibit the browning of *Pleurotus nebroidensis* well, reduce the loss of nutrients and extend the storage life of *Pleurotus nebroidensis*.

**Key words:** *Pleurotus nebroidensis*; modified atmosphere package; browning; *in vitro* digests; bioavailability

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-6630(2012)04-0252-05

白灵菇(*Pleurotus nebroidensis*), 又称白灵侧耳、白阿魏菇、阿魏侧耳等, 属于真菌门担子菌纲、伞菌目、侧耳科侧耳属<sup>[1]</sup>, 白灵菇高含蛋白质、脂肪、粗纤维、碳水化合物和真菌类多糖, 其中, 白灵菇生物活性有效组分真菌多糖的含量很高, 具有较高的药用价值和调节人体生理平衡的作用<sup>[2]</sup>, 并受到世界各国的重视。

近年来, 我国白灵菇栽培发展很快, 2008年生产21.6万吨, 是2003年白灵菇产量的4倍, 这种增长速度超过其他任何珍稀食用菌品种。目前, 白灵菇以市场鲜销为主, 与其他食用菌一样, 含水率高达85%,

通常采后3~6d, 菇体内的水分大量散失, 贮藏运输过程易出现褐变、菇面开裂、菇盖上翘、软化、液化、腐烂及产生异味等现象, 极大地限制了其长期贮运, 严重降低了白灵菇的商品和食药两用价值。

用生物有效性体系研究食品中尤其新鲜果蔬中营养成分的消化吸收情况起步较晚, 研究者们摸索出一套在体外模拟体内胃肠道消化的化学方法来预测体内生物有效性的方法, 评价果蔬营养成分的生物有效性, 生物利用度是评价其生物有效性的直接方法<sup>[3-4]</sup>。Miller等<sup>[5]</sup>首次运用生物有效性原理评价肉中铁元素的生物有效性,

收稿日期: 2011-01-02

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2008BADAIB07)

作者简介: 李喜宏(1960—), 男, 教授, 博士, 研究方向为农产品加工与保鲜。E-mail: xueting3605614@126.com

\*通信作者: 薛婷(1978—), 女, 工程师, 博士研究生, 研究方向为农产品加工与保鲜。E-mail: xt0929.ok@163.com

发现铁元素的有效性与人体验试验相吻合; Gil-Izquierd 等<sup>[6]</sup>利用生物有效性评价橘子汁中黄酮及酚类物质在人体中的消化情况, 仅有 15%~30% 的成分被人体消化。生物有效性方法已广泛用于微量元素如 Zn、Fe、Ca、Mg 等的评价, 用于新鲜果蔬营养成分的有效性评价较少。本实验主要通过贮藏期间白灵菇自身的呼吸作用自发调节不同包装内 O<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 体积分数, 研究被动自发气调包装内白灵菇的色差、多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)活性和多糖生物利用度, 探讨被动气调对白灵菇褐变和白灵菇多糖生物有效性的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

白灵菇, 由天津市林业果树研究所食用菌研究室提供, 直接采于菇房, 立即运往冷库, 4℃预冷 24h; 不同厚度的保鲜膜由国家农产品保鲜工程技术研究中心(天津)材料研究室提供, O<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 透过率如表 1 所示。

表 1 保鲜膜气体透过率

Table 1 Gas permeability of different fresh-keeping films

种类 名称	规格/ mm	O <sub>2</sub> 透过率/(cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> · d·0.1MPa))	CO <sub>2</sub> 透过率/(cm <sup>3</sup> / (m <sup>2</sup> ·d·0.1MPa))
PVC1	225×450×0.05	8384.84	22266.66
PVC2	225×450×0.03	13547.52	35020.71
PE1	225×450×0.05	9820.00	24827.90
PE2	225×450×0.03	23504.71	36690.62
PE(CK)	225×450×0.015	—	—

### 1.2 试剂

石英砂、磷酸二氢钾、磷酸氢二钾、儿茶酚、三氯乙酸、氯化钠、盐酸、氢氧化钠、苯酚、葡萄糖(均为分析纯)、胃蛋白酶、胰蛋白酶(均为生化试剂) 天津华生源科技有限公司。

### 1.3 仪器与设备

Checkpoint O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>手持式气体分析仪 丹萃(远东)有限公司; T6 新世纪紫外可见分光光度计 北京普析通用仪器有限责任公司; 5804R 离心机 德国 Eppendorf 公司; tr-300 色差计 日本东京公司。

### 1.4 方法

#### 1.4.1 原材料处理

选取无机械损伤、色泽乳白, 未开伞、大小均匀一致的白灵菇作为实验材料, 用刀切去带有培养基的菌柄, 称取 300g 分别放入厚度为 0.03mm 和 0.05mm PVC 和 PE 包装中, 厚度为 0.015mm 的 PE 微孔膜包装作为对照, 将包装好的白灵菇贮藏在 4℃、相对湿度 95% 的环境中。每个处理 12 个重复, 定期检测相关指标。

#### 1.4.2 包装内气体分析

贮藏期间用气体分析仪每 7d 测定密封包装内 O<sub>2</sub> 和

CO<sub>2</sub> 体积分数, 为保证相对准确性, 每个包装只测定一次气体, 每次 2 个平行。

#### 1.4.3 菌盖色差测定

用色差计测定<sup>[7]</sup>。L\* 表示亮度, a\* 正值表示偏红, 负值表示偏绿; b\* 正值表示偏黄, 负值表示偏蓝; 测定结果与标准颜色(L\* = 97, a\* = -2, b\* = 0)进行比较, 以 ΔE 表示菌盖的整体颜色变化。

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - 97)^2 + (a^* + 2)^2 + (b^*)^2}$$

#### 1.4.4 多酚氧化酶测定

酶液提取: 称取样品 5g 于预冷的研钵中, 加入 10mL 磷酸缓冲液, 冰浴研磨成匀浆, 加入缓冲液冲洗研钵, 并使最终体积为 10mL, 于 4℃、3000r/min 离心 10min, 上清液即为 PPO 粗提液, 记下总体积<sup>[8]</sup>。

活性测定: 配制酶的反应体系包括 3.9mL 磷酸缓冲液、1mL 0.1mol/L 儿茶酚和 0.8mL 酶液; 做两组重复试验, 用磷酸缓冲液调零, 反应体系加入酶液后, 于 37℃水浴保温 10min, 迅速放入冰浴中, 立即加入 2mL 20% 三氯乙酸终止反应, 于 420nm 测其吸光度(0、30、60s)。以煮过失活的酶液作为对照。

$$\text{酶活力} = (\Delta A \times D) / 0.01t$$

式中: ΔA 为反应时间内吸光度的变化; t 为反应时间; D 为稀释倍数(总体积/取用体积)。

#### 1.4.5 多糖生物利用度测定

##### 1.4.5.1 消化前样品处理与总多糖测定

取白灵菇样品 2g, 切碎, 加入 40mL 蒸馏水, 100℃热水浸提 1.5h, 收集滤液, 滤渣加入 40mL 蒸馏水, 浸提 1h, 收集滤液, 再加入 20mL 蒸馏水, 浸提 0.5h, 收集并合并滤液, 定容到 100mL。取 1mL 滤液稀释 10 倍, 用苯酚-硫酸法测定多糖质量浓度<sup>[9]</sup>, 苯酚质量分数为 5%。

##### 1.4.5.2 消化过程与工艺参数调控

胃消化液(stimulated gastric fluid, SGF)及胰消化液(stimulated intestinal fluid, SIF)的配制和消化过程均参考 Miller 等<sup>[5]</sup>和 George 等<sup>[10]</sup>的方法。

取 5mL 以上未稀释前的滤液, 调 pH 值至 2.0, 加入 SGF 消化液 5mL, 37℃条件水浴振荡 30min, 模拟胃的消化吸收; 然后再加入 200μL 0.2mol/L NaOH, 调整混合液的 pH 值在 6.8, 加入 SIF 消化液 10mL, 37℃条件下水振荡 30min, 模拟小肠的消化吸收; 加入 300μL 0.2mol/L HCl 溶液, 调整混合液的 pH 值在 6.8, 5000r/min 离心 30min, 取上清液, 定容到 2mL, 弃渣(模拟白灵菇消化后留在体内的部分, 渣为排除体外的食物残渣)。取上清液加入 Amicon ultra filter 试管中, 共记 15g, 进行超滤离心(5000r/min、30min), 得到约 3mL 超滤上清液。此操作模拟进入血液循环的部分, 得到

的滤液可以进入人体。

#### 1.4.5.3 消化后剩余多糖测定

取 1mL 超滤上清液稀释 10 倍, 用苯酚-硫酸法测定多糖质量浓度。

#### 1.4.5.4 标准曲线的绘制

分别准确吸取质量浓度 0.1mg/mL 的标准葡萄糖储备溶液 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8mL, 置于干燥的具塞试管中, 依次加入蒸馏水, 终体积为 1.0mL, 以蒸馏水作为空白, 用苯酚-硫酸法进行显色反应, 测定吸光度。以葡萄糖溶液的质量浓度  $C(\mu\text{g/mL})$  为横坐标, 吸光度( $A$ )为纵坐标, 绘制吸光度-葡萄糖质量浓度的关系曲线, 其线性回归方程为:  $A = 0.0088 + 8.4371C(\mu\text{g/mL})$ ; 相关系数  $r = 0.9996$ , 葡萄糖含量在 5.00~70.00  $\mu\text{g/mL}$  范围内呈良好的线性关系。绘制的标准曲线见图 1。

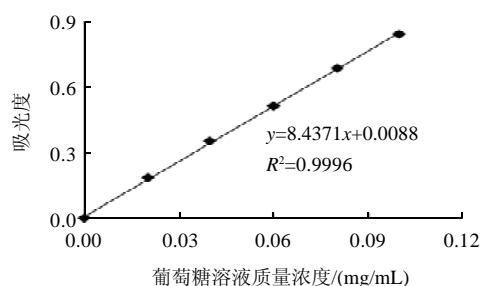


图 1 葡萄糖标准曲线

Fig.1 Standard curve of glucose

#### 1.4.5.5 多糖生物利用度

根据测得的吸光度, 由回归方程计算, 即得出多糖质量浓度, 比较消化前后的多糖质量浓度即可得出多糖的生物利用度。

$$\text{多糖生物利用度} \% = \frac{\text{消化后多糖质量浓度}}{\text{消化前多糖质量浓度}} \times 100$$

#### 1.5 统计分析

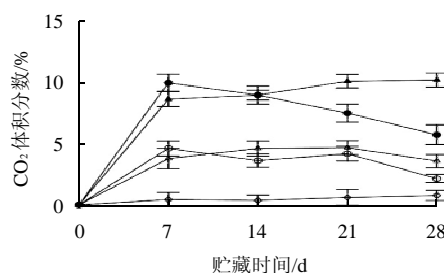
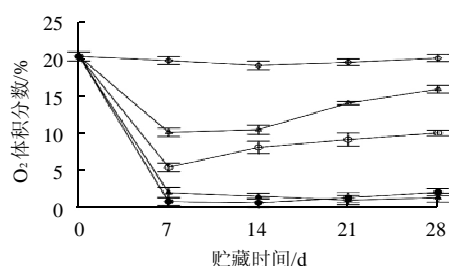
所有实验重复 3 次, 以 3 次平均值作分析。所有数据都用 SPSS13.0 作单因素方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 被动自发气调包装内气体分析

自发气调包装内气体组分主要是由食用菌呼吸引起的  $\text{O}_2$  消耗和  $\text{CO}_2$  产生, 而  $\text{O}_2$  消耗率和  $\text{CO}_2$  产生率主要取决于包装的气体透过率和果蔬的呼吸强度<sup>[11]</sup>。如图 2 所示, 微孔膜由于膜上有许多小孔, 包装内气体成分

接近于大气成分的体积分数。不同厚度 PVC 和 PE 包装内  $\text{O}_2$  和  $\text{CO}_2$  曲线波动趋势相同, 第 7 天  $\text{CO}_2$  和  $\text{O}_2$  体积分数分别达到最高值和最低值, 之后趋于平缓稳定状态, 表明不同厚度的 PVC 和 PE 包装均在贮藏的第 7 天形成低氧高二氧化碳的自发气调状态, Gabriela 等<sup>[12]</sup>研究发现, 用 PE 主动气调包装香菇(15% 和 25%  $\text{O}_2$ ), 在第 6 天形成低氧高二氧化碳的气调状态, 这与本实验结果一致。



◇. 微孔膜; △. 0.03mm PE; ○. 0.03mm PVC; ▲. 0.05mm PE; ▼. 0.05mm PVC。

图 2 贮藏期间不同包装内  $\text{O}_2$  和  $\text{CO}_2$  体积分数变化

Fig.2 Changes in  $\text{O}_2$  and  $\text{CO}_2$  volume fractions of different packages during storage

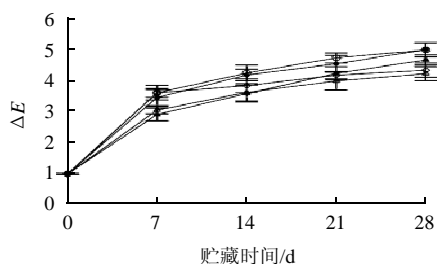
本实验中厚度为 0.05mm PVC 和 PE 包装膜有较低的  $\text{O}_2$  和  $\text{CO}_2$  气体透过率(表 1), 第 7 天, 包装内  $\text{O}_2$  体积分数为 0.3%~2.1%,  $\text{CO}_2$  体积分数为 6%~10.3%; 0.03mm PVC 包装内  $\text{O}_2$  体积分数为 5%~10%,  $\text{CO}_2$  体积分数为 2.3%~4.3%; 0.03mm PE 包装内体积分数为 10%~16%,  $\text{CO}_2$  体积分数为 3.5%~4.6%; 厚度为 0.05mm 和 0.03mm 的薄膜包装白灵菇, 气体体积分数有显著差异。

由于果蔬采后 24h 后呼吸强度迅速升高, 白灵菇等食用菌相对于大部分蔬菜有较高的呼吸强度, 密封包装顶隙的气体体积分数随薄膜的气体渗透率而变化。自发气调包装贮藏白灵菇, 迅速消耗  $\text{O}_2$  积累  $\text{CO}_2$ , 必须选择  $\text{CO}_2$  透过率比  $\text{O}_2$  透过率大的包装材料, 维持包装内低氧环境, 当薄膜、包装容量和透气面积一定的情况下, 薄膜的透过率与膜的透气系数成正比, 与膜的厚度成反

比<sup>[11]</sup>, 因此可以通过调节厚度或添加填充物调节薄膜透过率, 使得包装内气体组成达到白灵菇适宜的气调指标, 并使得密封包装在一定时间内维持气体比例。

## 2.2 被动自发气调包装对白灵菇色差的影响

白灵菇贮藏期间, 菌盖颜色逐渐变黄, 如图3所示, 贮藏初期变化较明显, 在贮藏到第7天时, 各处理均出现曲线减缓趋势, 与包装内气体变化相对应。边晓琳等<sup>[13]</sup>采用主动自发气调贮藏金针菇(3% O<sub>2</sub>), 贮藏初期对照和气调处理色差值变化较明显, 到第5天时, 色差值变化较平缓, 与本实验结果一致, 表明气体体积分数对色差 $\Delta E$ 影响不明显。不同厚度PVC和PE包装对白灵菇色差的影响没有显著差别, Kim等<sup>[14]</sup>用PVC和PE膜包装切分和未切分双孢菇, 整个贮藏期, 各处理的色差 $\Delta E$ 均无显著性差异, 进一步表明色差 $\Delta E$ 与包装内气体体积分数无直接关系。



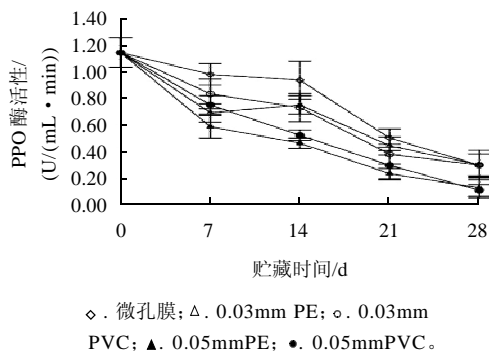
◇. 微孔膜; △. 0.03mm PE; ○. 0.03mm PVC; ▲. 0.05mm PE; ●. 0.05mm PVC。

图3 贮藏期间不同包装内色差变化

Fig. 3 Changes in  $\Delta E$  of different packages during storage

## 2.3 被动自发气调包装对白灵菇PPO酶活性的影响

PPO是与白灵菇颜色变化关系密切的酶之一, 如图4所示, 贮藏期间不同包装的白灵菇PPO酶活性变化表现不同的趋势, 升高和降低的波动频率也有所不同。厚度为0.05mm包装内的白灵菇PPO酶活性一直呈下降趋势, 而微孔膜和0.03mm厚度包装内白灵菇PPO酶活性在最初期迅速下降, 第7天, 曲线趋于平缓。



◇. 微孔膜; △. 0.03mm PE; ○. 0.03mm PVC; ▲. 0.05mm PE; ●. 0.05mm PVC。

图4 贮藏期间不同包装内PPO酶活性变化

Fig. 4 Changes in PPO activity of different packages during storage

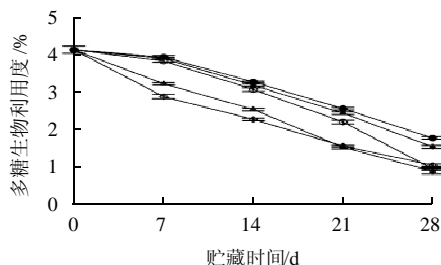
白灵菇预冷时, PPO酶活性在低温作用下逐渐降低, 表现出对低温的适应, 预冷24h后, PPO酶活性为1.13U/(mL·min), 而后随贮藏时间的延长缓慢上升, 第7天又略有回落(图4); 厚度为0.05mm包装内白灵菇的PPO酶活性则一直保持在较低水平, 整个贮藏过程均低于其他3组; 对照处理微孔膜包装内白灵菇的PPO酶活性则一直保持在较高的水平。周春梅等<sup>[15]</sup>在25℃用不同保鲜膜贮藏白玉菇, 同样发现微孔膜包装的白玉菇PPO酶活力明显高于另外3种包装方式(0.06mm PE、PVC和0.025mm PE), 差异显著( $P < 0.05$ ), 而这3种包装膜的白玉菇PPO酶活性接近, 无明显差异。

本实验初期白灵菇PPO酶活性上升, 微孔膜组第14天时形成小高峰, 之后下降; 厚度为0.03mm包装的白灵菇PPO酶活性在第14天达到高峰后下降, 随后PPO酶活性逐渐与微孔膜包装趋于一致。可推断出, 厚度为0.05mm包装膜推迟了PPO酶活性高峰的到来, 显著抑制白灵菇PPO酶活性的升高。原因有可能为: 厚度0.05mm包装内低氧环境, 降低酶促反应底物合成速度, 减少底物的产生, PPO酶活性在第14天达到高峰, 后期贮藏呈下降趋势是由于前期酶促反应产物抑制作用; 抑制白灵菇PPO酶活性; 降低白灵菇膜透性的破坏, 减少PPO与底物接触的机会。

## 2.4 被动自发气调包装对白灵菇多糖生物有效性的影响

多糖是白灵菇的主要生物活性物质, 具有显著的抗肿瘤、抗疲劳、抗氧化和延缓衰老等功效<sup>[16]</sup>。因此, 对白灵菇保鲜处理应该考虑对多糖类物质的影响, 特别是对多糖类物质的生物利用度的影响。

由图5可知, 整个贮藏期间, 多糖的生物利用度均呈下降趋势, 初期, 厚度为0.05mm和0.03mm的PVC包装内白灵菇多糖生物利用度下降缓慢, 第7天迅速下降, 其中厚度为0.03mm的PVC包装膜内白灵菇的多糖利用度下降幅度远远大于0.05mm厚度包装膜, 在贮藏的第28天与微孔膜和0.03mm厚度的PE膜趋于一致。



◇. 微孔膜; △. 0.03mm PE; ○. 0.03mm PVC; ▲. 0.05mm PE; ●. 0.05mm PVC。

图5 不同保鲜膜包装白灵菇多糖生物利用度变化曲线

Fig. 5 Changes in polysaccharide bioavailability of *Pleurotus nebrodensis* in different packages during storage

总体上来看, 4℃时, 在贮藏前7d, 厚度为0.05mm的包装内白灵菇的多糖的生物有效性变化性较小, 具有较好的稳定性, 显著高于对照白灵菇( $P < 0.05$ ), 能较好的维持多糖的生物有效性, 不影响体外消化吸收。

### 3 讨 论

白灵菇具有特殊的生长规律和采后生理活动, 采收后仍有旺盛的生命力, 会降解自身积累的生物大分子来保持生长的需要, 导致品质下降<sup>[17]</sup>。影响白灵菇采后储藏保鲜的环境因素主要是温度、湿度、氧气和二氧化碳的浓度。试验采用低温和气调结合的典型物理方法贮藏白灵菇。选择不同透气性的包装材料, 自发创造一个低O<sub>2</sub>和高CO<sub>2</sub>的环境, 限制氧的供应, 再与低温结合, 抑制酶的活性, 延缓呼吸作用与酶促生化反应, 延长白灵菇品质保持的时间<sup>[18]</sup>。保鲜膜具有一定的透气性, 其透气率随塑料的厚度、气体体积分数等而变化<sup>[19]</sup>。不同厚度薄膜利用菌体的呼吸作用, 自动调低O<sub>2</sub>体积分数、升高CO<sub>2</sub>体积分数, 达到气调保鲜的目的。本实验中密封包装均在第7天形成被动自发气调状态, 在21d内保持稳定状态。厚度为0.05mm的包装内气体体积分数分别为O<sub>2</sub> 0.3%~2.1%, CO<sub>2</sub> 6%~10.3%, 同Lopez-Briones等<sup>[20]</sup>报道一致, 保持O<sub>2</sub>体积分数在1%~2%贮藏蘑菇, 不会产生无氧呼吸, 有利贮藏。

白灵菇多糖是一种由葡萄糖、半乳糖、木糖组成的单一组分的杂多糖, 梁艳丽等<sup>[21]</sup>研究认为, 在14℃贮藏白灵菇过程中, 糖代谢分为两个明显的阶段: 在贮藏第1~7天的过程中, 总糖含量下降, 而可溶性糖含量却呈现上升趋势, 在贮藏第7~9天的过程中, 总糖和可溶性糖含量均表现出明显的下降。表明, 在贮藏后期, 白灵菇品质的进一步劣变则是由糖的分解引起的。本实验中, 多糖的生物利用度在贮藏的前7d变化较稳定, 贮藏后期下降较快, 这与李荣春等<sup>[21]</sup>研究糖代谢规律相似。关于白灵菇的多糖生物利用度是否与自身多糖代谢规律有直接关系, 需要进一步试验研究。

本实验低氧与低温贮藏环境显著抑制白灵菇PPO酶活性升高, 减少营养损失, 贮藏前期提高多糖的生物利用度, 保持较好的品质, 延长贮藏期。表明厚度为0.05mm薄膜包装可以形成适宜白灵菇贮藏的气体指标, 并且适合在高二氧化碳体积分数的环境中贮藏。

总之, 采用被动气调处理白灵菇, 研究其在贮藏过程中生理褐变, 有助于理解气调包装对白灵菇的贮藏机理。厚度为0.05mm薄膜包装在低温条件下贮藏的白灵菇仍能保持较好的品质, 起到一定的后续效应。由此可以推断, 自发气调包装对于白灵菇的保鲜有很好的

发展前景, 但其保持白灵菇品质的机理和气调包装的透气率的改进还待进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 张金霞, 左雪梅, 黄晨阳. 食用菌新秀: 阿魏侧耳[J]. 土壤肥料, 2003 (6): 46-47.
- [2] 甘勇, 吕作舟. 首次对阿魏侧耳多糖理化性质及免疫活性研究[J]. 菌物系统, 2001, 20(2): 228-232.
- [3] YUN S, HABICHT J P, MILLER D D, et al. An *in vitro* digestion/Caco-2 cell culture system accurately predicts the effects of ascorbic acid and polyphenolic compounds on iron bioavailability in humans[J]. Journal of Nutrition, 2004, 134(10): 2717-2721.
- [4] GLAHN R P. Caco-2 cell ferritin formation predicts nonradiolabeled food iron availability in an *in vitro* digestion/Caco-2 cell culture model [J]. Journal of Nutrition, 1998, 128(9): 1555-1561.
- [5] MILLER D D, SCHRICKER B R, RASMUSSEN R R, et al. An *in vitro* method for estimation of iron availability from meals[J]. the American Journal of Clinical Nutrition, 1981, 34: 2248-2256.
- [6] GIL-IZQUIERDO A, FERRERES F, TOMAS-BERBERAN F A. *In vitro* availability of flavonoids and other phenolics in orange juice[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(2): 1035-1041.
- [7] ARES G, PARENTELLI C, GAMBARO A, et al. Sensory shelf life of shiitake mushrooms stored under passive modified atmosphere[J]. Postharvest Biology and Technology, 2006, 41(2): 191-197.
- [8] 熊巧玲. 白灵菇采后生理生化及保鲜技术研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2007.
- [9] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007.
- [10] GEORGE S, BRAT P, ALTER P, et al. Rapid determination of polyphenols and vitamin C in plant-derived products[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(5): 1370-1373.
- [11] ARES G, LAREO C, LEMA P. Modified atmosphere packaging for postharvest storage of mushrooms: A review[J]. Fresh Produce, 2007, 1 (1): 32-40.
- [12] GABRIELA A, GASTON A, PATRICIA L, et al. Influence of modified atmosphere packaging on sensory quality of shiitake mushrooms[J]. Postharvest Biology and Technology, 2008, 49(1): 164-170.
- [13] 边晓琳, 张艳芬, 冯莉, 等. 自发气调对采后金针菇生理生化的影响[J]. 食品科学, 2010, 31(6): 283-287.
- [14] KI M K, JUNG A K, JIN S L, et al. Effect of modified atmosphere packaging on the shelf-life of coated, whole and sliced mushrooms[J]. LWT-Food Science and Technology, 2006, 39(4): 365-372.
- [15] 周春梅, 王欣, 刘宝林. 不同薄膜包装对白玉菇自发气调保鲜的效果[J]. 食品与发酵工业, 2010, 36(6): 205-210.
- [16] 李永泉, 吴炬, 花立民, 等. 白阿魏侧耳菌丝体多糖(PNMP)体外抗氧化活性[J]. 兰州大学学报, 2003, 39(6): 70-73.
- [17] 熊巧玲, 邢增涛. <sup>60</sup>Co 辐照对白灵菇采后低温贮藏的影响[J]. 核农学报, 2007, 21(3): 273-276.
- [18] GIL M I, CASTANER M, FERRERES F, et al. Modified-atmosphere Packaging of minimally processed "Lollo Rosso" (*Lactuca sativa*)[J]. Z Lebensm Unters Forsch A, 1998, 206(5): 350-354.
- [19] 肖功年, 彭建. 平菇气调包装保鲜[J]. 无锡轻工大学学报, 2002, 21 (6): 592-595.
- [20] LOPEZ-BRIONES G, VAROQUAUX P, CHAMBROY Y, et al. Storage of common mushroom under controlled atmospheres[J]. Int J Food Technol, 1992, 27(5): 493-505.
- [21] 李荣春, 梁艳丽, 张陶. 白灵菇在贮藏过程中营养成分的动态变化[J]. 中国食用菌, 2004, 24(2): 54-56.