

比较不同包装膜对白灵菇的保鲜效果

邹优花¹, 翟梦杰¹, 连玲丹¹, 李彦增², 李伟鹏³, 李晨⁴, 王杰^{1*}

(1. 华南农业大学食品学院, 广东广州 510642) (2. 河南世纪香食用菌开发有限公司, 河南许昌 461100)
(3. 许昌世纪香生物科技有限公司, 河南许昌 461103) (4. 许昌市建安区经济作物推广站, 河南许昌 461000)

摘要: 研究了三种包装膜 (PE、PE+ 微孔、PP) 对白灵菇贮藏品质的影响, 并探究其影响的机制。结果表明: 聚乙烯 (Polytene, PE) 包装膜白灵菇褐变程度为所有处理最低, 外观品质最好。贮藏至第 12 天, 可溶性蛋白和还原糖的含量分别提高了 21.39%、70.68%, 总糖含量为所有处理中最高。重量和硬度分别下降了 0.82%、1.15%, 电导率和丙二醛 (Malondialdehyde, MDA) 含量最低, 几丁质酶 (Chitinase, CHT) 和 β -1,3- 葡聚糖酶 (β -1,3-glucanase, Glu) 活性分别降低了 46.87%、48.56%。超氧化物歧化酶 (Superoxide Dismutase, SOD) 和过氧化氢酶 (Catalase, CAT) 的活性最高, 其中 CAT 的活性提高了 2.42 倍。抗氧化物质类黄酮和总酚含量分别提高了 1.62 倍、8.18 倍。木质素含量增加了 1.20 倍。PE+ 微孔处理贮藏后期虽增强 SOD 活性及提高抗氧化物质的生成, 但延缓褐变效果较差。聚丙烯 (Polypropylene, PP) 处理组褐变氧化、失重则最严重。综上, PE 包装膜的贮藏效果最佳, 其可能通过延缓细胞壁的降解, 提高抗氧化酶活性和抗氧化物质含量来增强其抗氧化性, 该研究结果可为白灵菇采收后贮藏保鲜技术提供一定的参考依据。

关键词: 白灵菇; 包装膜; 贮藏品质; 抗氧化性

文章编号: 1673-9078(2024)04-133-141

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.4.0495

Comparison of the Preservation Effects of Different Packaging Films on White Mushroom

ZOU Youhua¹, ZHAI Mengjie¹, LIAN Lingdan¹, LI Yanzeng², LI Weipeng³, LI Chen⁴, WANG Jie^{1*}

(1. College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

(2. Henan Shijixiang Edible Fungus Development Co. Ltd., Xuchang 461100, China)

(3. Xuchang Shijixiang Biotechnology Co. Ltd., Xuchang 461103, China)

(4. Xuchang Jian'an District Cash Crop Extension Station, Xuchang 461000, China)

Abstract: The effects of three packaging films (PE, PE+microporous, and PP) on the storage quality of *Pleurotus ostreatus* were studied, and the mechanism underlying such effects was explored. The results showed that the treatment with the polytene (PE) packaging film led to the lowest browning degree and the best appearance quality, on the 12th day of storage, the contents of soluble protein and reducing sugar increased by 21.39% and 70.68% respectively, with the total sugar content being the highest, and the weight and hardness decreasing by 0.82% and 1.15% respectively. Also, the treatment with

引文格式:

邹优花, 翟梦杰, 连玲丹, 等. 比较不同包装膜对白灵菇的保鲜效果[J]. 现代食品科技, 2024, 40(4): 133-141.

ZOU Youhua, ZHAI Mengjie, LIAN Lingdan, et al. Comparison of the preservation effects of different packaging films on white mushroom [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(4): 133-141.

收稿日期: 2023-04-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31772020); 广东省农业厅种业振兴项目 (2022-WPY-00-004)

作者简介: 邹优花 (1995-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食药菌生物工程, E-mail: 934967043@qq.com

通讯作者: 王杰 (1978-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食药菌生物工程, E-mail: wjcasey@scau.edu.cn

the PE film resulted in the lowest conductivity and malondialdehyde (MDA) content, decreases in the activities of chitinase (CHT) and β -1,3-glucanase (Glu) by 46.87% and 48.56%, respectively, and the highest activities of superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT), with the CAT activity, content of antioxidant flavonoids, content of total phenols, and lignin content increasing by 2.42, 1.62, 8.18 and 1.20 times, respectively. Although the PE+microporous treatment enhanced the activity of SOD and the formation of antioxidant substances in the later stage of storage, the effect of delaying browning was poor. The browning, oxidation and weight loss were the most severe in the PP treatment group. In summary, the treatment with PE packaging film has the best storage effect. It may enhance its antioxidant capacity by delaying the degradation of cell wall, and increasing the activity of antioxidant enzymes and the content of antioxidant substances. The results of this study can provide certain reference and a basis for the post-harvest storage and preservation technology of *Pleurotus ostreatus*.

Key words: *Pleurotus ostreatus*; packaging film; storage quality; antioxidant

白灵菇又称白灵侧耳 (*Pleurotus ostreatus*)、阿魏菇、阿魏侧耳等^[1], 色泽洁白, 口感鲜美, 富含蛋白质、多糖、维生素等, 具有抗氧化、抗肿瘤、增强免疫力等保健功效^[2]。随着市场需求量的增加及种植技术的不断改进, 白灵菇的产量近年来迅速增加。白灵菇在采后运输和贮藏期间极易发生失水、褐变、软化等品质劣变, 严重影响其食用和商业价值, 因此, 探究合适的采后贮藏保鲜技术, 是延长白灵菇货架期, 提高其效益的有效措施^[3]。

气调包装是食用菌贮藏保鲜常用的方式, 通过自发气调方式调节包装内的气体比例, 形成低氧的环境, 有效降低呼吸速率, 可延缓子实体的衰老与成熟^[4]。气调包装的膜材质是影响食用菌贮藏品质的关键因素之一。聚乙烯 (PE) 气调袋可有效抑制呼吸强度, 延缓食用菌的褐变软化, 在香菇、鸡腿菇、蟹味菇上具有较好的保鲜效果^[5]。微孔保鲜袋是一种自发气调保鲜的包装材料, 多应用于果蔬保鲜上。微孔保鲜袋通过维持包装内湿度环境来抑制失水, 并通过调节气体浓度抑制果蔬的呼吸速率达到保鲜效果^[6]。聚丙烯 (PP) 盒子因其良好的密封性可有效防止微生物侵染和氧化反应, 在金针菇贮藏上有较好的效果。白灵菇贮藏上常用的包装材料有 PE 膜、聚氯乙烯 (PVC) 保鲜膜等, 但没有微孔保鲜袋和 PP 包装^[7]。而且, 目前尚未有包装材料影响白灵菇贮藏品质机制的报道。

本研究拟以白灵菇为材料, 选择三种不同的包装膜, 以外观、营养成分、细胞膜的完整性、降解酶、抗氧化性、木质素等指标为评价依据, 研究不同包装膜对白灵菇贮藏品质的影响并揭示其品质变化的调控机制, 旨在白灵菇采后贮藏保鲜研究与应用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本实验所选用白灵菇由河南省许昌世纪香食用菌开发有限公司提供, 白灵菇子实体连带整个菌袋 (未采收) 装箱冷链运输 24 h 内至华南农业大学食品学院实验室进行采摘处理, 挑选无机械损伤, 无病虫害, 大小一致的子实体作为实验材料。

PE 袋 (聚乙烯) 厚度为 0.05 mm, 规格为 200 mm×300 mm, CO₂ 和 O₂ 渗透系数分别为 (50±0.5) 和 (20±0.3) L/m²·d·atm, 广州齐湘生物科技有限公司; PE+ 微孔: 用牙签在 PE 袋两面均戳 25 个直径为 160 μm 的孔径, CO₂ 和 O₂ 渗透系数分别为 (70±0.5) 和 (30±0.3) L/m²·d·atm; PP 盒 (聚丙烯), 240 mm×140 mm×95 mm, CO₂ 和 O₂ 渗透系数分别为 (40±0.5) 和 (20±0.3) L/m²·d·atm, 广东铭星餐具有限公司; 巯基乙醇、L- 苯丙氨酸、N-乙酰氨基葡萄糖 (NAG)、L- 抗坏血酸、乙二胺四乙酸 (EDTA)、L- 甲硫氨酸、磷酸二氢钾、核黄素、没食子酸、乙酸钠、冰醋酸、甲壳素, 上海麦克林生化科技有限公司; 试剂均为分析纯以上。

1.2 仪器与设备

TA.XT Plus 质构仪, 英国 SMS 公司; PAC CHECK Model 650 顶空分析仪, 美国 MOCON 公司; DDS-307 电导率计, 上海仪电科学仪器股份有限公司; HH-4 恒温水浴锅, 常州澳华仪器有限公司; 5804R 高速冷冻离心机, 德国 Sigma 公司; UV-1100 紫外-可见分光光度计, 上海精密科学仪器有限公司; PB-10 pH 计, Sartorius 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 白灵菇预处理

将白灵菇进行3种不同条件处理, A组: 将白灵菇采摘后两个一组置于PE包装膜中, 进行密封处理。B组: 将白灵菇2个一组置于PE袋微孔包装袋中, 密封处理。C组: 将白灵菇2个一组置于PP包装盒中。每组四个平行, 分别放置6℃冷库贮藏12 d, 每隔两天取一次样品并切成0.5 cm块粒状, 用液氮处理后保存于-20℃, 待后期指标检测。

1.3.2 外观品质的测定

每组处理选用四个大小一致, 无机械损伤的白灵菇, 每隔两天取样使用单反相机进行拍照。

1.3.3 失重率与硬度的测定

1.3.3.1 失重率的测定

采用称重的方法进行测定。

$$L = \frac{W_0 - W_1}{W_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

L —失重率, %;

W_0 —白灵菇初始质量, g;

W_1 —取样当天白灵菇质量, g。

1.3.3.2 硬度的测定

参考Li等^[8]的测定方法使用质构仪进行测定。

1.3.4 可溶性蛋白、总糖和还原糖含量的测定

可溶性蛋白含量测定参考田平等^[9]的测定方法, 制备标准曲线, 以牛清白蛋白作为标品, 计算白灵菇中的蛋白质含量, 单位为mg/g, 总糖和还原糖含量的测定参考郑朋朋等^[10]的测定方法。

1.3.5 电导率、丙二醛(MDA)的测定

将白灵菇切成边长0.5 cm块粒称取2 g, 蒸馏水处理3次, 滤纸吸干后加25 mL蒸馏水, 室温静置30 min得样品液。PD-501型便携式多功能测量仪测定样品液的电导率 C_1 后, 沸水浴处理样品液15 min, 冷却后测定电导率 C_0 。

$$E = \frac{C_1}{C_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

E —电导率;

C_1 —蒸馏水处理后的电导率;

C_0 —沸水浴处理后的电导率。

参考Li等^[11]的方法稍作修改。取样品2 g于5.0 mL 5 g/L (m/V) 的三氯乙酸溶液中冰浴研磨至匀浆, 4℃下10 000 r/min离心15 min, 取2.0 mL上清液作为测定提取液加入2.0 mL 6.7 mg/mL的硫代巴比妥酸和5 g/L的三氯乙酸溶液, 沸水浴5 min后立即冷水浴降温。测定波长为532 nm、600 nm的MDA含量。

$$C = \frac{(A_{523} - A_{600}) \times V_1}{(1.55 \times 10^{-1}) \times A \times B} \quad (3)$$

式中:

C —MDA含量, $\mu\text{mol/L}$;

V_1 —提取液总体积, mL;

A —测定提取液体积, mL;

B —材料鲜重, g;

1.55×10^{-1} —MDA的微摩尔消光系数。

1.3.6 降解酶活性的测定

几丁质(CHT)、 β -1,3-葡聚糖酶(Glu)测定方法参考张莉等^[12]的测定方法。

1.3.7 抗氧化酶活性的测定

超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)活性测定参考Li等^[8]方法测定。

1.3.8 抗氧化物质含量的测定

总酚含量的测定采用Folin-Ciocalteus法^[13]。类黄酮含量的测定采用硝酸铝比色法^[14]。

1.3.9 木质素含量的测定

木质素含量测定方法参考王倩^[15]的测定方法。

1.3.10 统计分析

实验数据采用Excel、Graphpad棱镜8.0.2、IBM SPSS Statistic 20等软件进行数据处理和差异显著性方差分析。

2 结果与讨论

2.1 不同包装膜处理对白灵菇外观的影响

如图1所示, 白灵菇的外观品质随着贮藏时间的延长而逐渐发生褐变, 当贮藏到第12天时, PE膜处理的白灵菇褐变程度最低, 外观颜色与气味并无显著性差异, 其次为PE+微孔处理, 在贮藏第12天白灵菇出现萎蔫出水等现象。PP包装处理的白灵菇褐变程度最高, 在贮藏第8天后褐变开始严重, 出现腐烂出水、异味等现象。其原因可能是由于PP包装内部氧气含量较高, 促进白灵菇的呼吸作用从而加速菇体衰老褐变^[16]。



图1 不同包装膜对白灵菇外观的影响

Fig.1 Effect of different packaging films on the appearance of *Pleurotus ostreatus*

2.2 不同包装膜处理对失重率与硬度的影响

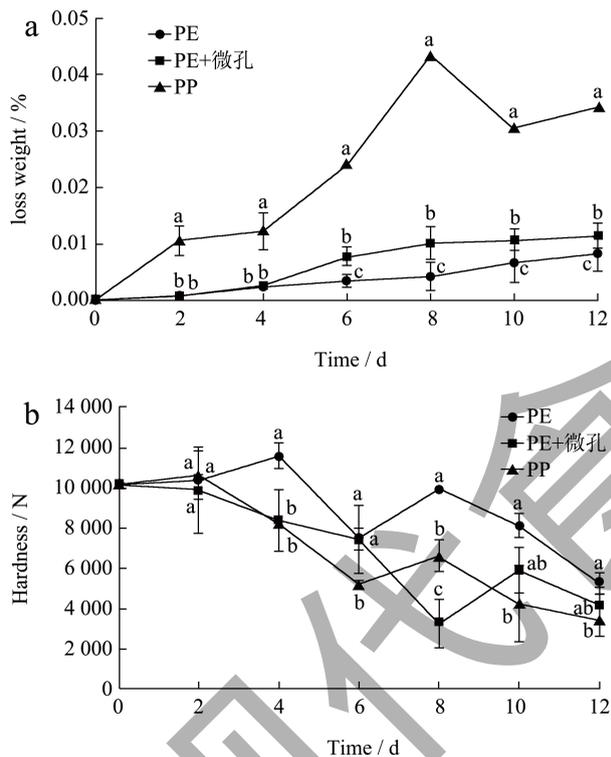


图2 不同包装膜处理对失重率与硬度的影响

Fig.2 Effect of different packaging film treatments on weight loss and hardness

注：不同小写字母表示不同处理组在同一贮藏时间点的显著性差异 ($P < 0.05$)。下同。

失重率和硬度是评价白灵菇品质的关键指标之一。如图 2a 所示，PE 和 PE+ 微孔包装处理中白灵菇失重率随着贮藏时间的增加而增加，在贮藏期间这两种处理的白灵菇失重率分别提高了 0.82%、1.15%，而 PP 包装处理的白灵菇则随着贮藏时间的增加而呈现先上升后下降的趋势，由图 1 的外观结果可知 PP 包装处理的白灵菇在贮藏第 8 天后已出

现腐烂出水的现象，说明该处理的白灵菇在第 8 天的失重率已达到上限 (3.67%)，PP 包装处理由于气密性强，从而使白灵菇无氧呼吸强度高导致失水过多，失重率上升，而 PE 处理可以降低白灵菇的水分流失，延缓质量损失，保持白灵菇的良好品质。梁琪琪等^[17]等在石榴采后贮藏研究中发现 PE 包装有效抑制果蔬的呼吸作用，降低果实的失重率和腐烂率，本研究也得到同样结果。

如图 2b 所示，随着贮藏时间的延长，所有处理组的白灵菇硬度呈下降的趋势，可能是随着水分的流失白灵菇质地受到损伤而发生软化。贮藏第 12 天时，PE、PE+ 微孔、PP 包装处理的白灵菇硬度相对于第 0 天分别下降了 48.39%、59.12%、66.18%，可以看出 PP 包装处理的白灵菇硬度下降最快 ($P < 0.05$)，白灵菇软化情况最严重。PE 包装处理的白灵菇硬度下降最慢 ($P < 0.05$)，说明该处理有效抑制白灵菇的软化，维持白灵菇的良好品质。这与本课题组前期研究发现相一致^[18]，食用菌采后硬度的增加是由木质化抗逆反应引起的，能在一定程度上延缓子实体的品质劣变^[8]。

2.3 不同包装膜处理对营养成分的影响

可溶性蛋白、总糖和还原糖在维持白灵菇代谢活动中起关键作用，也是维持白灵菇品质的关键指标。如图 3a 所示，三种包装膜处理后，白灵菇可溶性蛋白含量从高到低排序为 PP > PE+ 微孔 > PE，至贮藏 12 d 时与第 0 天相比，PP、PE+ 微孔、PE 处理的白灵菇蛋白含量分别提高了 133.20%、28.60%、21.39%，说明 PE+ 微孔和 PE 包装膜处理的白灵菇在贮藏第 12 天可溶性蛋白含量未发生显著性差异，而 PP 包装处理则促进白灵菇蛋白质含量的提高，可能与 PP 包装处理具有较高强度的呼吸作用有关，当

呼吸强度增加时, 需要提供更多的能量来支持细胞的生理过程, 这进一步刺激了蛋白质合成和修复, 导致蛋白质含量的增加有效延缓白灵菇的后熟和衰老^[19]。如图 3b 所示, 总糖整体呈现下降的趋势, 尤其在前 4 d 下降迅速, 第 4 天后有上升的趋势, 到贮藏第 12 d, PE、PE+ 微孔、PP 处理白灵菇总糖与初始值分别下降了 38.81%、43.14%、41.97%。如图 3c 所示, 在贮藏前 8 d, PE 包装处理的白灵菇还原糖含量显著比其他处理高, 到贮藏后期下降至仅低于 PE+ 微孔处理, PP 包装处理的白灵菇还原糖含量在整个贮藏期间显著低于其他处理, 至贮藏第 12 天, PE、PE+ 微孔处理的还原糖含量比第 0 天提高了 70.68%、134.00%, 而 PP 包装处理则下降了 22.74%。

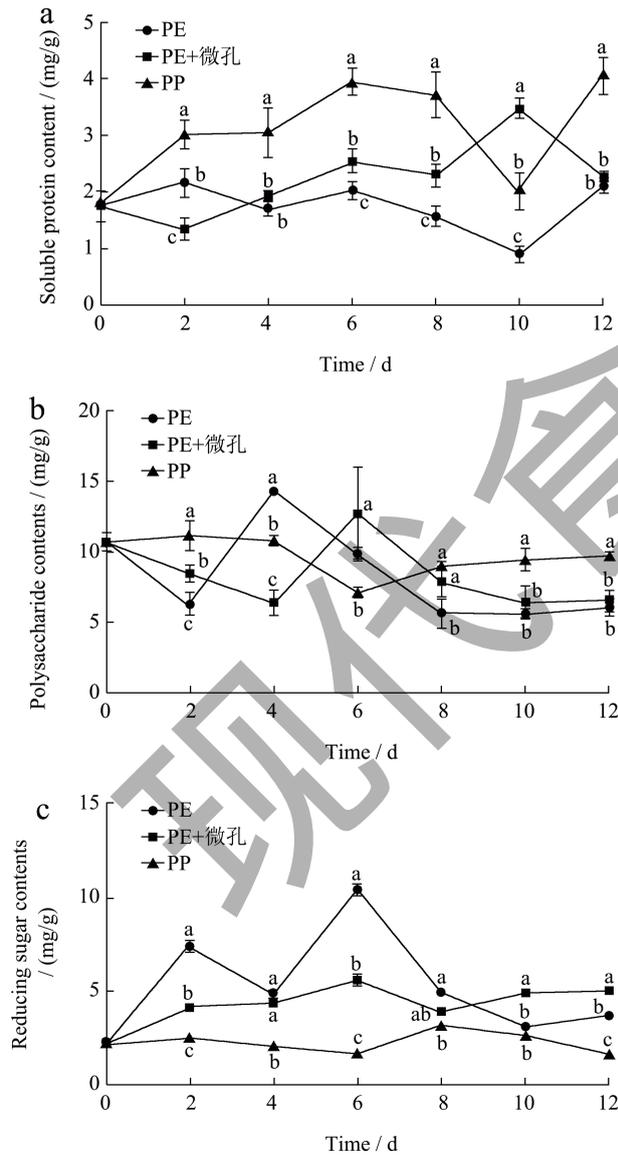


图 3 不同包装膜处理对营养成分的影响

Fig.3 Effect of different packaging film treatments on nutrient composition

在贮藏期间 PP 处理的白灵菇可溶性蛋白含量整体高于其他处理组, 可能由于 PP 包装处理失重率过高, 褐变萎蔫程度过高, 细胞壁破裂, 导致胞质蛋白溶出, 从而可溶性蛋白质含量升高^[20]。

原糖含量整体高于 PE+ 微孔和 PP 处理, 可能 PE 处理抑制白灵菇的呼吸作用, 总糖和还原糖则作为能量代谢物, 为呼吸作用的原料之一^[21], 当内部环境氧气含量较高时, 呼吸作用加快, 从而加快还原糖和总糖的消耗, 导致这些贮备能量降低^[22]。

2.4 不同包装膜处理对细胞膜的影响

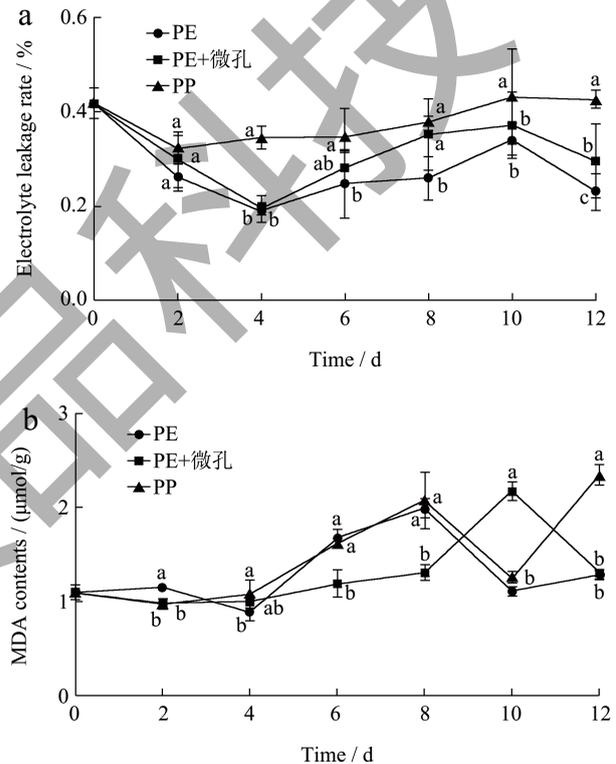


图 4 不同包装膜处理对电导率 (a) 和 MDA 含量 (b) 的影响

Fig.4 Effect of different packaging film treatments on Electrolyte leakage rate (a) and MDA (b) content

细胞膜的完整性主要通过电导率和丙二醛 (MDA) 作为指标^[23], 从结果图 4a 显示, 各处理组的白灵菇电导率在贮藏期均呈现下降-升高-下降的趋势, 但 PE 处理和 PE+ 微孔处理组的白灵菇电导率在 0~4 d 内显著降低, 而 PE 膜处理组则只在 0~2 d 稍下降, 而且 PE 处理在整个贮藏期内显著低于其他处理组 ($P < 0.05$), PP 处理组的电导率则显著高于其他处理组 ($P < 0.05$)。如图 4b 所示, 在贮藏 0~4 d 时, 所有处理组的 MDA 含量变化差异较小, 贮藏第 4 天后 PE 和 PP 处理呈现上升-下降-上升的趋势, PE+ 微孔处理则呈现先上升后下降的

趋势，到贮藏第 12 天，PP 处理的 MDA 含量显著高于其他处理组 ($P<0.05$)，而 PE 和 PE+ 微孔处理并无显著性差异，PE 处理稍低于 PE+ 微孔处理。

上述结果表明，PE 包装膜处理能够有效维持白灵菇较低的电导率并抑制 MDA 含量的积累，菇体的衰老与细胞膜通透性密切相关，作为脂质过氧化的中间产物 MDA 可降低膜脂的不饱和度从而增加细胞膜的通透性，电导率升高^[24]。因此 PE 处理 PP 包装处理的内部氧气含量较高，从而降低了脂质过氧化和细胞膜的通透性，与田平等^[9]的研究结果一致。

2.5 不同包装膜处理对细胞壁降解酶的影响

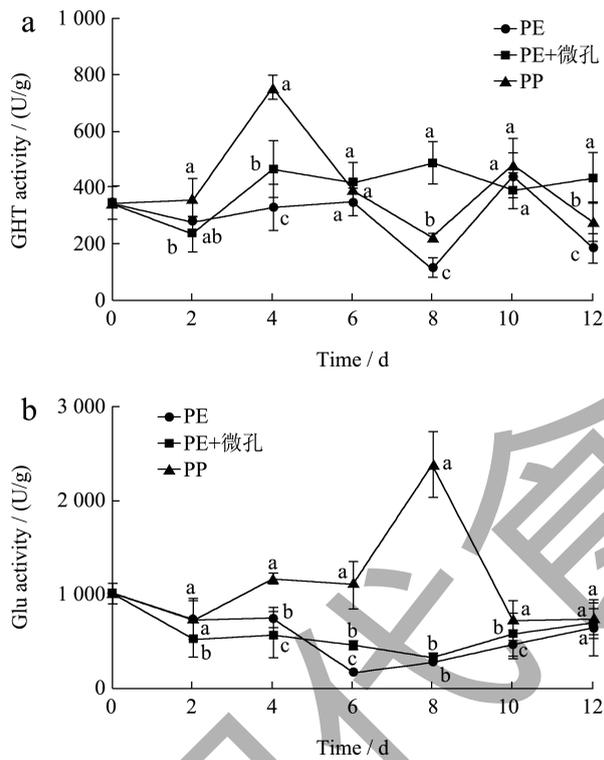


图 5 不同包装膜对几丁质酶 (a) 和 β -1,3-葡聚糖酶 (b) 的影响

Fig.5 Effect of different packaging films on chitinase (a) and β -1,3-glucanase (b)

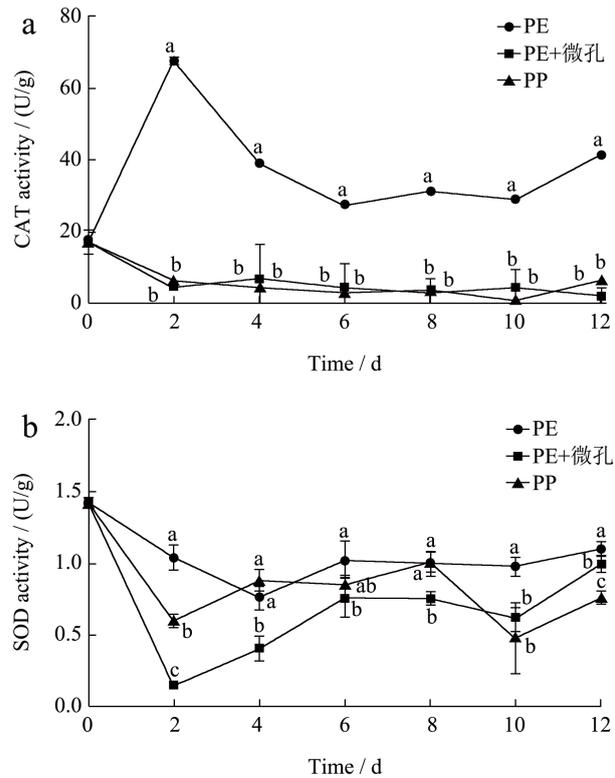
而几丁质酶 (CHT) 和 β -1,3- 葡聚糖酶 (Glu) 是降解几丁质和 β -1,3- 葡聚糖的关键酶，食用菌的细胞壁主要由葡聚糖、几丁质和蛋白质组成，形成坚硬的微原纤维，增强细胞壁强度^[25]，CHT 和 Glu 活性的提高会加速细胞壁的降解，造成子实体的软化，降低食用菌的贮藏品质^[26]。

如图 5a 所示，随着时间的延长，PE 包装膜处理的白灵菇几丁质酶活性有下降的趋势，在贮藏期间 PE 包装处理的几丁质活性显著低于其他处理组

($P<0.05$)，PE+ 微孔包装处理在贮藏期间则无显著性变化，而 PP 包装处理在贮藏第 4 天几丁质酶活性迅速升高后下降。在贮藏第 12 天时，PE、PP 处理的几丁质酶活分别下降了 46.87%、18.95%，PE+ 微孔则提高了 25.77%。由此说明 PE 包装处理有效抑制几丁质酶活性的提高。如图 5b 所示，PE 和 PE+ 微孔包装处理的 β -1,3- 葡聚糖酶呈现先下降后上升的趋势，0~4 d 时，PE+ 微孔处理的酶活性最低，但在贮藏后期 (6~12 d) PE 包装膜处理的 β -1,3- 葡聚糖酶活性显著低于其他处理组 ($P<0.05$)。贮藏第 12 天 PE、PE+ 微孔处理达到活性峰值，但与第 0 天相比，仍分别下降了 48.56%、31.25%，说明 PE 包装处理有效抑制 β -1,3- 葡聚糖酶活性的升高。PP 包装处理则在贮藏第 8 天 β -1,3- 葡聚糖酶活性迅速增加到 2 388.35 U/g，为第 0 天的 2.37 倍，由图 1 外观结果图可看出 PP 处理在第 8 天开始软化出水逐渐加重，可能与 β -1,3- 葡聚糖酶活性突然增加有关，与 Ni 等^[27]研究结果一致。

综上，PE 包装处理也有效抑制几丁质酶和 β -1,3- 葡聚糖酶活性，从而延缓细胞壁的降解，进一步保护了细胞膜脂质氧化，因此维持细胞的完整性，从而有效维持白灵菇贮藏期间的优良品质。

2.6 不同包装膜处理对抗氧化酶及抗氧化物质的影响



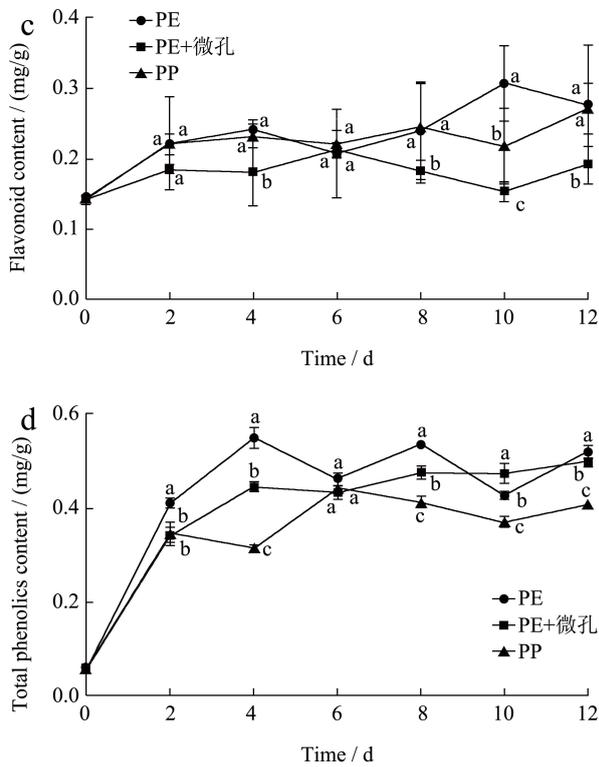


图 6 不同包装膜处理对CAT (a)、SOD (b) 活性及类黄酮 (c)、总酚 (d) 含量的影响

Fig.6 Effect of different packaging film treatments on CAT (a), SOD (b) activity, flavonoids (c), and total phenols (d) content

在果蔬贮藏期间过度旺盛的呼吸作用促进过量的活性氧 (Reaction Oxygen Species, ROS) 产生, 从而造成细胞膜的脂质氧化损伤, ROS 包括 H_2O_2 、超氧阴离子等, 过氧化氢酶 (CAT) 和超氧化物歧化酶 (SOD) 等抗氧化酶通过将 H_2O_2 转化生成 H_2O 和 O_2 , 避免细胞遭受氧化胁迫的损害, 维持机体氧化还原代谢平衡状态^[28]。

如图 6a 所示, PE 包装膜处理的白灵菇 CAT 活性随着贮藏时间的增加呈现上升的趋势, 在整个贮藏期间 PE 处理的白灵菇 CAT 活性显著高于其他处理组 ($P < 0.05$), 与第 0 天相比, 在贮藏第 12 天时 CAT 活性上升了 2.42 倍, 其可能是 PE 包装处理中氧气含量较低, 促使白灵菇组织中的细胞呼吸受到抑制, 当氧气不足时, 细胞会受到氧化应激, 导致细胞内氧化物质积累过多, 引发氧化损伤, 从而启动细胞一系列的防御来应对氧化应激, 进而促进细胞合成更多的过氧化氢酶 CAT, 维持正常的氧化还原状态和细胞代谢^[29]。而 PE+ 微孔和 PP 包装处理的 CAT 活性的趋势一致, 在贮藏期间均呈现下降

的趋势, 至第 12 天分别下降了 7.6 倍、3.32 倍。如图 6b 所示, PE 和 PE+ 微孔处理的趋势一致, 均呈现先下降后上升的趋势, 而 PP 处理呈现下降-上升-下降-上升的趋势, 在贮藏期间, PE 包装处理的 SOD 活性显著比其他处理组高 ($P < 0.05$), 贮藏第 12 天时 PE、PE+ 微孔、PP 处理的 SOD 酶活性分别下降了 22.39%、29.75%、46.37%。上述结果表明 PE 包装处理的白灵菇 CAT 和 SOD 活性显著高于其他处理组, 主要通过调控 ROS 对白灵菇组织的损害, 增强白灵菇抗氧化性, 延缓白灵菇的褐变程度和衰老, 维持良好品质^[30]。

总酚和类黄酮作为食用菌的抗氧化剂, 通常通过清除自由基或过氧化物自由基从而避免生物系统中的脂质氧化。如图 6c 所示, 随着贮藏时间的增加 PE 包装处理白灵菇类黄酮含量随之增加, 在第 4 天后显著高于其他处理 ($P < 0.05$)。PE+ 微孔和 PP 包装处理的类黄酮含量变化为先上升后下降再上升, 在贮藏第 12 天, PE、PE+ 微孔、PP 包装处理的类黄酮含量分别提高了 2.68 倍、1.36 倍、1.94 倍, 说明 PE 包装处理在贮藏后期有效促进类黄酮含量, 提高白灵菇的抗氧化性。

如图 6d 所示, 总酚随着贮藏时间的延长而增加。在贮藏期间, PE 包装膜处理的总酚含量整体比其他处理高, 在贮藏第 12 天时, PE、PE+ 微孔、PP 包装处理的总酚含量分别提高了 8.18 倍、7.86 倍、6.26 倍。综合上述结果, PE 包装膜处理有效提高类黄酮和总酚含量, 更一步说明 PE 包装膜处理增强白灵菇的抗氧化性, 提高白灵菇的贮藏性。

2.7 不同包装膜处理木质素含量的影响

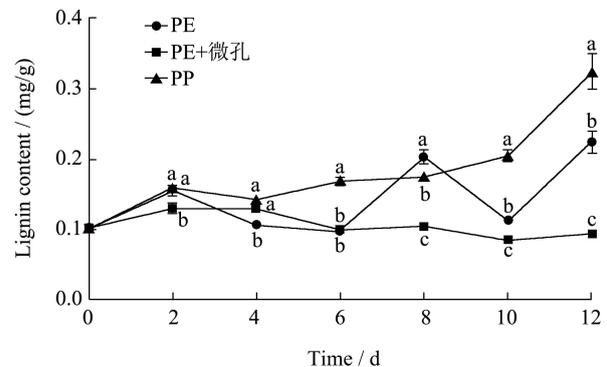


图 7 不同处理方式对木质素含量的影响

Fig.7 Effect of different treatment methods on lignin content

我们前期的研究表明, 木质化现象的发生为食用菌采后抗逆反应的一种形式。如图 7 所示, 在采

后贮藏过程中,三种包装处理的木质化程度各不相同,PE和PP包装处理的木质素含量随着贮藏时间的增加而增加,PE+微孔包装处理则随着贮藏时间的增加而降低,到贮藏12d时,与第0天相比PE和PP包装处理的木质素含量分别提高了1.20倍、2.18倍,而PE+微孔包装则下降了10%。PE处理在贮藏后期(6~12d)木质素含量显著高于PE+微孔处理,可能是菇体发生木质化抗逆反应、抵抗不良外界环境胁迫所致,从而维持细胞膜完整性,延缓细胞壁降解,减缓菇体衰老。值得注意的是,PP处理在贮藏第8天后木质素急剧上升,同时伴随着严重的褐变、细胞膜损伤和细胞壁降解,Wang等^[31]在白菜贮藏研究中发现木质素沉积和细胞壁降解等均参与了果蔬的采后衰老,因此表明PP处理的菇体木质化程度最高,细胞衰老最严重,过度的木质化会降低菇体的质地和口感。PE+微孔处理在整个贮藏期间的木质素含量与第0天并无显著差异,说明该处理在贮藏后期并未引起木质化的抗逆反应,可能与微孔处理提高包装内环境的空气流动性有关。综上,白灵菇的PE包装处理有效调整木质素含量,适当引起抗逆反应,维持白灵菇的良好品质。

3 结论

本文研究了三种包装膜对白灵菇贮藏品质的影响及其可能的影响机制,结果表明:PE包装膜能有效延缓白灵菇发生褐变,维持良好的外观品质,降低白灵菇水分流失和组织软化,提高蛋白质和还原糖含量、延缓总糖含量的消耗,并减缓MDA和细胞壁通透性的增高。PE+微孔处理在贮藏后期虽增强SOD活性及提高抗氧化物质的生成,但延缓褐变氧化效果并不理想。PP处理组则褐变失重,呼吸代谢旺盛,细胞严重氧化衰老。PE包装膜可能通过延缓细胞壁的降解,提高抗氧化酶活性和抗氧化物质含量来增强其抗氧化性,加强以木质化形式的抗逆反应等方面来保持菇体较好的贮藏品质。

参考文献

[1] 曹瑶,闻绍锋,刘书畅,等.白灵菇研究进展综述[J].食用菌,2019,27(3):169-173.
[2] CUI H Y, WANG C L, WANG Y R, et al. The polysaccharide isolated from *Pleurotus nebrodensis* (PN-S) shows immunostimulating activity in RAW264.7 macrophages [J]. Chinese Journal of Natural Medicines, 2015, 13(5): 355-360.

[3] 刘晓丽,李若昀,张冠群,等.白灵菇酸菜营养酱的研制[J].食用菌,2020,42(6):63-66.
[4] ÖZOGUL F, POLAT A, ÖZOGUL Y. The effects of modified atmosphere packaging and vacuum packaging on chemical, sensory and microbiological changes of sardines (*Sardina pilchardus*) [J]. Food Chemistry, 2004, 85(1): 49-57.
[5] 刘志芳.薄膜包装冷藏对鸡腿蘑采后生理及贮藏效应的研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2007.
[6] 钟智炜.微孔包装结合壳聚糖活性涂膜对百香果的保鲜效果及作用机制[D].南昌:南昌大学,2022.
[7] 贾连文,班兆军,徐新明,等.包装膜对白灵菇低温贮藏品质的影响[J].中国食用菌,2010,29(6):52-54.
[8] LI D, QIN X, TIAN P, et al. Toughening and its association with the postharvest quality of king oyster mushroom (*Pleurotus eryngii*) stored at low temperature [J]. Food Chemistry, 2016, 196: 1092-1100.
[9] 田平平,王杰,秦晓艺,等.采后处理对杏鲍菇贮藏品质及抗氧化酶系统的影响[J].中国农业科学,2015,48(5):941-951.
[10] 郑朋朋,李珊,张加研,等.玛咖与酒浸玛咖的成分分析与比较[J].食品研究与开发,2015,36(17):36-39.
[11] LI B B, DING Y, TANG X L, et al. Effect of L-arginine on maintaining storage quality of the white button mushroom (*Agaricus bisporus*) [J]. Food and Bioprocess Technology, 2019, 12(4): 563-574.
[12] 张莉,冯晓元,丁立孝,等.黄柏提取物对采后梨果实PAL、CHT及GLU的诱导[J].食品研究与开发,2007,28(2):28-31.
[13] NADEEM M, RANJHA M, AMEER K, et al. Effect of sonication on the functional properties of different citrus fruit juices [J]. International Journal of Fruit Science, 2022, 22(1): 568-580.
[14] CHU X, LI R, WEI H, et al. Determination of total flavonoid and polysaccharide content in *Anoectochilus formosanus* in response to different light qualities using hyperspectral imaging [J]. Infrared Physics & Technology, 2022, 122: 104098.
[15] 王倩.基于两种木材培养基质的秀珍菇菌丝/生物质复合板材的制备及性能研究[D].泰安:山东农业大学,2022.
[16] 李仟仟,高欣,吕春洁.包装材料的透气性对新鲜香菇保鲜的影响[J].民营科技,2018,5:66-67.
[17] 梁琪琪,张润光,刘皓涵,等.低温结合薄膜包装对石榴果实采后生理及贮藏品质的影响[J].食品与发酵工业,2020,46(8):187-191.
[18] 翟梦杰,杜敏如,林晖,等.不同包装方式对农贸市场模式销售鲜香菇品质的影响[J].现代食品科技,2023,39(2):235-242.
[19] 张国强.双孢蘑菇气调保鲜技术的研究[D].上海:上海海洋大学,2019.
[20] HALIM R, PAPACHRISTOU I, CHEN G Q, et al. The

- effect of cell disruption on the extraction of oil and protein from concentrated microalgae slurries [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 346: 126597.
- [21] 曹兵,刘毓璟,张雁南,等.枸杞果实糖代谢研究进展[J].*经济林研究*,2017,35(1):158-164.
- [22] DE ALMEIDA TEIXEIRA G H, SANTOS L O, CUNHA JÚNIOR L C, et al. Effect of carbon dioxide (CO₂) and oxygen (O₂) levels on quality of 'Palmer' mangoes under controlled atmosphere storage [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2018, 55(1): 145-156.
- [23] 李宁,阎瑞香,王步江.不同包装方式对白灵菇低温保鲜效果的影响[J].*农业工程学报*,2011,27(7):377-382.
- [24] 阎瑞香,李宁,朱志强,等.不同保鲜膜包装对双孢蘑菇采收后贮藏品质影响[J].*中国食用菌*,2010,29(4):46-48,51.
- [25] JIANG T J, WANG Q S, XU S S, et al. Structure and composition changes in the cell wall in relation to texture of shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) stored in modified atmosphere packaging [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2010, 90(5): 742-749.
- [26] KARAKURT Y, TOKA D. The influence of hot water and calcium chloride on the changes in cell wall composition and the activities of cell wall hydrolases during storage in *Agaricus bisporus* [J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2016, 40(2): 220-226.
- [27] NI Z D, XU S X, YING T J. The effect and mechanism of ultrasonic treatment on the postharvest texture of shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2018, 53(8): 1847-1854.
- [28] 魏云潇,叶兴乾.果蔬采收后成熟衰老酶与保护酶类系统的研究进展[J].*食品工业科技*,2009,30(12):427-431.
- [29] VESELOVA S V, NUZHNAIA T V, MAKSIMOV I V. The effect of 1-methylcyclopropene on the components of pro- and antioxidant systems of wheat and the development of protective reactions in fungal pathogenesis [J]. *Prikladnaia Biokhimiia i Mikrobiologiia*, 2014, 50(5): 517-525.
- [30] XIE J, QIN Z, PAN J, et al. Melatonin treatment improves postharvest quality and regulates reactive oxygen species metabolism in "Feizixiao" litchi based on principal component analysis [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 965345.
- [31] WANG L, CHEN Y, WU M, et al. Involvement of lignin deposition and cell wall degradation in stem senescence of Chinese flowering cabbage during storage [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2023, 198: 112256.