

适宜压力条件保持减压贮藏杏鲍菇品质

李志刚¹, 宋 婷^{1,2}, 郝利平¹, 常明昌¹, 石建春¹, 冯翠萍^{1*}

(1. 山西农业大学食品科学与工程学院, 太谷 030801; 2. 晋中市质量技术监督检验检测所, 榆次 030600)

摘 要: 为了探讨不同压力对杏鲍菇减压贮藏品质的影响, 以杏鲍菇为试材, 采用 0.07 mm 的低密度聚乙烯袋抽真空减压包装, 置于 4℃ 下贮藏, 研究杏鲍菇在 0.10、0.06、0.04、0.02 MPa 4 个压力条件下生理生化及品质的变化规律。结果表明: 相对于常压 (0.10 MPa), 0.06、0.04 MPa 在不同程度上可降低杏鲍菇子实体的呼吸强度, 保持超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶 (catalase, CAT) 活性, 抑制膜脂过氧化产物丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 含量的升高, 延缓杏鲍菇子实体的衰老进程, 抑制多酚氧化酶 (polyphenol oxidase, PPO) 活性, 保持杏鲍菇的色泽, 以及杏鲍菇的硬度、弹性、内聚性、咀嚼性等质地品质。其中 0.04 MPa 相对于其他压力贮藏效果更佳。0.02 MPa 使杏鲍菇的生理生化及品质变化出现了异常。由此可得, 适当压力范围内减压贮藏可以有效延缓杏鲍菇的成熟与衰老进程, 较好地保持其品质, 有效延长其贮藏期。

关键词: 贮藏; 压力; 质构; 杏鲍菇; 减压; 生理; 品质

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.040

中图分类号: S646.1⁺9; TS205.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-18-0296-08

李志刚, 宋 婷, 郝利平, 常明昌, 石建春, 冯翠萍. 适宜压力条件保持减压贮藏杏鲍菇品质[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 296—303. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.040 http://www.tcsae.org

Li Zhigang, Song Ting, Hao Liping, Chang Mingchang, Shi Jianchun, Feng Cuiping. Optimum pressure condition maintain quality of *Pleurotus eryngii* in hypobaric storage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(18): 296—303. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.040 http://www.tcsae.org

0 引 言

杏鲍菇又名刺芹侧耳, 是一种珍稀食用菌^[1-2]。因其营养丰富^[3-5], 菌肉肥厚, 质地脆嫩, 味道鲜美, 经常食用具有抗氧化^[6]、预防心血管疾病^[7-9]、增强机体免疫力^[8]等功效, 而备受消费者青睐。近年来, 随着市场需求的不断增加, 工厂化栽培技术的逐步推广, 杏鲍菇的产量大幅增加。然而, 由于杏鲍菇含水率大、酶活性较强, 采后生理代谢旺盛, 导致其在常温下不耐贮藏, 容易出现变软、变黏、褐变、发臭等现象^[10-11], 使其大大丧失营养价值和商品价值, 给杏鲍菇产业带来了较大的经济损失。为此, 探究杏鲍菇的采后生理和有效的贮藏保鲜技术, 减少其采后损失, 对促进杏鲍菇产业的健康发展, 提高经济收益具有重要意义。

目前关于杏鲍菇采后贮藏及保鲜技术方面的研究主要有冷藏^[12]、气调贮藏^[13]、臭氧处理^[14]、辐照处理^[13]、涂膜处理^[2]、保鲜剂处理^[11,15]等方面。减压贮藏是在冷藏和气调贮藏的基础上进一步发展起来的一种特殊的贮藏

方法。该方法与常规的冷藏和气调贮藏相比, 具有快速减压降温、快速降氧、快速脱除有害气体成分等特点^[16], 利用其可以有效延缓果蔬的成熟与衰老, 延长果蔬的贮藏期, 尤其在解决耐贮性差的果蔬^[17-20]保鲜问题上显现出了一定的优越性。在食用菌方面目前已有关于平菇^[21-22]、香菇^[23]、金针菇^[24]减压贮藏的相关报道, 均取得了较好的保鲜效果, 而对杏鲍菇的减压贮藏研究鲜见报道。为此, 本试验在前期不同温度对杏鲍菇减压贮藏品质影响的研究^[25]基础上以杏鲍菇为试材, 探讨不同贮藏压力对杏鲍菇子实体采后生理生化变化及贮藏品质的影响, 以期找到杏鲍菇减压贮藏的适宜压力条件, 为进一步探索杏鲍菇的有效贮藏保鲜方法提供理论依据, 为实际生产提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试杏鲍菇 (天绿 2 号) 和包装袋 (0.07 mm 厚的低密度聚乙烯袋) 均由山西晋城泽地萃绿农开发有限公司提供。杏鲍菇采收成熟度为七八成熟, 挑选菇体完整, 长度 15~20 cm 左右, 粗细均匀, 菇体饱满, 表面光洁、无病害、无机械伤的子实体为试验材料。

1.2 处理方法

供试杏鲍菇随机装入 0.07 mm 厚的低密度聚乙烯袋, 使用 DZQ450L 型真空充气包装机 (上海人民包装股份有限公司) 抽真空减压包装, 试验设置 4 个压力水平, 分别为 0.10、0.06、0.04 和 0.02 MPa (以上压力经前期试验筛选

收稿日期: 2015-07-13 修订日期: 2015-07-24

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2012BAD38B07); 山西省科技攻关项目 (20130311017-3); 山西省煤基重点科技攻关项目 (FT2014-03-01)。

作者简介: 李志刚, 男, 河北张北人, 讲师, 现主要从事农产品采后生理、贮藏及加工方面的研究。山西农业大学食品科学与工程学院, 030801。

Email: sxndlzg@163.com

*通信作者: 冯翠萍, 女, 山西应县人, 教授, 博士, 现主要从事食品贮藏、加工与安全方面的研究。山西农业大学食品科学与工程学院, 030801。

Email: ndfcp@163.com

确定且均为绝对压力, 绝对压力=大气压-[相对真空度]。每个压力设置 3 个重复, 每个重复装 8 袋, 每袋装 0.75 kg, 置于 4℃ 下贮藏^[25], 温度波动控制在±0.5℃, 每隔 5 d 取一次样, 测定相关指标。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 色差的测定

样品色差采用 TC-PIIG 型色差仪(北京鑫奥依克光电技术有限公司)测定, 测定时在菇柄上部的平滑部位对称取 2 个点进行色差测定, 重复 3 次, 求平均值。根据 CIELAB 表色系统, L 表示亮度, L 值越大说明样品颜色接近于白色; a 和 b 为彩度指数, 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; 色差值以 ΔE 表示, 计算公式^[26]如下:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \quad (1)$$

式中: ΔL 、 Δa 、 Δb 表示为样品的 L 、 a 、 b 值与标准板的 L^* 、 a^* 、 b^* 值之间的差值。

1.3.2 质构指标的测定

样品质构指标采用 TMS-Pro 型质构仪(美国 Food Technology Corporation 公司)测定, 测定时将杏鲍菇整体置于质构仪载物台上, 分别在距离菇盖顶部 3~4 cm 处、菇柄中部径向穿刺测定质构指标, 每个部位取 3 个点, 重复 3 次, 求平均值。

质构仪测定模式: 质地多面分析(texture profile analysis, TPA); 探头类型: 直径 6 mm 的圆柱形探头; 测试温度: 20~25℃; TPA 参数设置: 起始力 0.3 N; 测试速率 90 mm/min, 测前和测后速率 200 mm/min; 挤压形变量 50%, 停隔时间 5 s; 数据采集速率为 200 次/s。

测定指标: 硬度、弹性、内聚性、咀嚼性。

1.3.3 呼吸强度的测定

每个处理各取杏鲍菇 250~500 g, 采用静置碱液吸收法 20~25℃ 下测定呼吸强度^[27], 重复 3 次, 取平均值。

1.3.4 超氧化物歧化酶活性的测定

采用超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)试剂盒(购自南京建成生物工程研究所)进行测定。测定时沿杏鲍菇样品轴线方向切取同样尺寸的矩形长条, 切碎混匀后, 准确称取 2.0 g, 放入研钵中, 加入 8 mL 生理盐水, 在冰浴上研磨成浆, 匀浆全部倒入 10 mL 离心管中, 4 000 r/min 离心 10 min 取上清液备用, 之后根据试剂盒说明书操作测定 SOD 活性, 重复 3 次, 取平均值。SOD 酶活定义为每毫克组织蛋白在 1 mL 反应液中 SOD 抑制率达 50% 时所对应的 SOD 量为一个 SOD 活力单位。

1.3.5 过氧化氢酶活性的测定

采用过氧化氢酶(catalase, CAT)试剂盒(购自南京建成生物工程研究所)进行测定。测定时沿杏鲍菇样品轴线方向切取同样尺寸的矩形长条, 切碎混匀后, 准确称取 2.0 g, 放入研钵中, 加入预冷的 pH 值为 7.8 的磷酸缓冲液 18 mL, 在冰浴上研磨成浆, 匀浆全部倒入 10 mL 离心管中, 4 000 r/min 离心 10 min 取上清液备用, 之后根据试剂盒说明书操作测定 CAT 活性, 重复 3 次,

取平均值。CAT 酶活定义为每毫克组织蛋白每秒钟分解 1 $\mu\text{molH}_2\text{O}_2$ 的量为一个活力单位。

1.3.6 丙二醛含量的测定

采用丙二醛(malondialdehyde, MDA)试剂盒(购自南京建成生物工程研究所)进行测定。取样及样品处理方法同上, 之后根据试剂盒说明书操作测定 MDA 含量, 重复 3 次, 取平均值。

1.3.7 多酚氧化酶活性测定

取样方法同上, 通过分光光度计^[28]测定, 重复 3 次, 取平均值。PPO 酶活定义为单位质量组织蛋白每分钟吸光值改变 0.01 所需的酶量为一个活力单位。

1.3.8 数据处理

采用 SAS8e 和 Excel 2007 软件进行数据处理和分析。

2 结果与分析

2.1 不同贮藏压力对杏鲍菇色差值的影响

色差值表示颜色差别的大小, 可以反映贮藏过程中菇体颜色的变化。由图 1 可见, 杏鲍菇在不同贮藏压力下的色差值随贮藏时间的延长而增加。贮藏前 10 d 不同贮藏压力下的色差值增加幅度基本一致; 10 d 后, 0.10 和 0.02 MPa 下的色差值增加幅度较大, 0.06 MPa 次之, 0.04 MPa 下的色差值增加相对比较平缓。贮藏到第 25 天, 0.04 MPa 下的色差值明显低于其他组, 方差分析显示, 0.04 与 0.06 MPa 差异显著($P<0.05$), 与 0.10 和 0.02 MPa 差异达极显著($P<0.01$)水平。可见, 0.04 MPa 的贮藏压力有效延缓了杏鲍菇色泽的变化, 较好地保持了杏鲍菇的色泽。

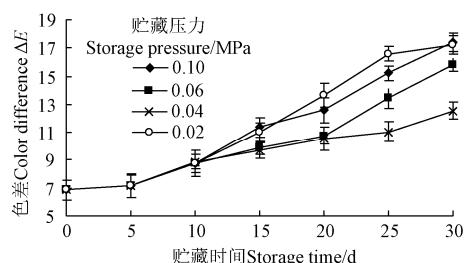


图 1 不同贮藏压力对杏鲍菇色差值的影响

Fig.1 Effect of different storage pressures on color difference of *Pleurotus eryngii*

2.2 不同贮藏压力对杏鲍菇硬度的影响

硬度是评价果蔬品质的重要指标, 可以客观地反映果蔬的成熟程度和品质状态。由图 2 可看出, 不同贮藏压力下杏鲍菇的硬度均呈先上升后下降的变化趋势。菇盖在贮藏前 10 d 硬度逐步增大, 且贮藏压力越低硬度越大, 到第 10 天时各贮藏压力下的硬度均达到最大值; 10d 后硬度开始下降, 且除了 0.02 MPa 外其他贮藏压力下杏鲍菇的硬度仍呈现贮藏压力越低硬度越大的规律。到贮藏第 20 天, 0.04 MPa 下杏鲍菇的硬度明显高于其他压力, 方差分析显示, 0.04 MPa 下杏鲍菇的硬度与 0.02 MPa 达到显著差异($P<0.05$), 与 0.10 和 0.06 MPa 相比达到极显著差异($P<0.01$)。菇柄在贮藏第 5 天硬度达最大值,

且在整个贮藏过程中贮藏压力越低硬度越大。由此可见,不同贮藏压力对杏鲍菇的硬度影响较大,压力越低越有利于保持杏鲍菇的硬度,但压力太低反而会降低菇盖的硬度。综上所述,可以得出 0.04 MPa 较好地保持了杏鲍菇的硬度。

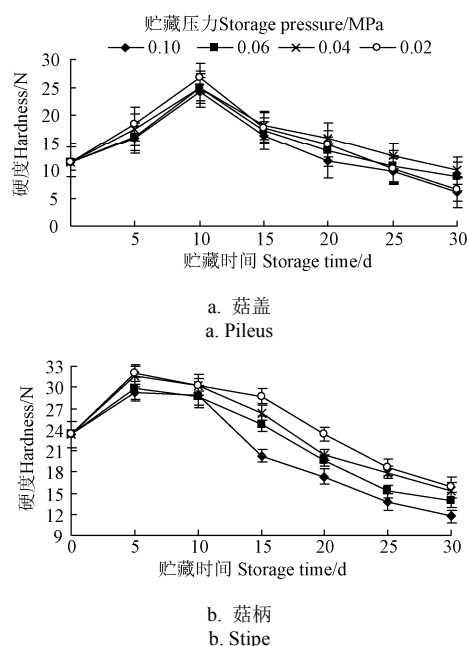


图2 不同贮藏压力对杏鲍菇硬度的影响

Fig.2 Effect of different storage pressures on hardness of *Pleurotus eryngii*

2.3 不同贮藏压力对杏鲍菇内聚性的影响

内聚性反映的是测试样品抵抗外力破坏时内部聚合力的合力大小,数值越大,收缩性越强,细胞间的结合力就越大。

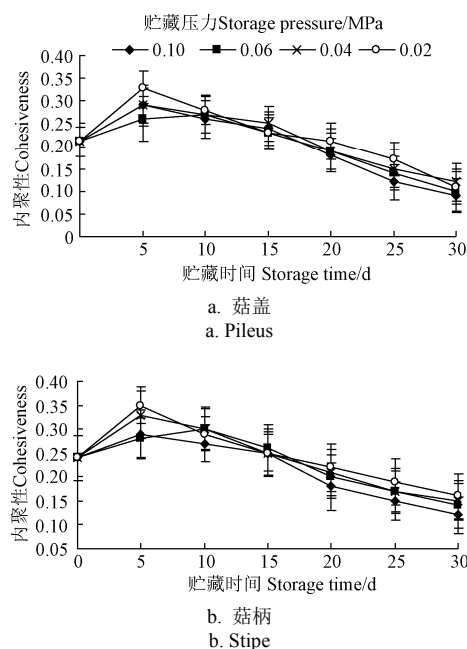


图3 不同贮藏压力对杏鲍菇内聚性的影响

Fig.3 Effect of different storage pressures on cohesiveness of *Pleurotus eryngii*

由图 3 可以看出,在整个贮藏过程中,杏鲍菇不同部位的内聚性均呈先上升后下降的变化趋势,且不同贮藏压力下杏鲍菇的内聚性不同。在贮藏第 5 天时,减压条件下杏鲍菇的内聚性呈现压力越低数值越大的规律,而 0.10 MPa 下菇盖部位内聚性与 0.04 MPa 接近,菇柄部位与 0.06 MPa 接近,这可能是样品个体差异所造成的。贮藏中期,各贮藏压力下的内聚性相对比较接近,但总体呈现压力越低内聚性越大的规律。贮藏第 20 天后,压力越低内聚性越大的规律又较为明显。到贮藏第 30 天时除了 0.02 MPa 下菇盖部位的内聚性低于 0.04 MPa 外,其他均表现为贮藏压力越低内聚性越大的变化规律。由此可见,减压贮藏有利于保持杏鲍菇的内聚性,综合考虑不同压力对杏鲍菇不同部位内聚性的影响,可以得出,0.04 MPa 较好地保持了杏鲍菇的内聚性。

2.4 不同贮藏压力对杏鲍菇弹性的影响

弹性反映的是果蔬受压后迅速恢复形变的能力。由图 4 可以看出,不同贮藏压力下杏鲍菇的弹性均呈先上升后下降的变化趋势。菇盖在第 10 天时达到最大值,之后逐渐下降。0.10 和 0.02 MPa 下菇柄的弹性在第 5 天时达到最大,其他压力下菇柄的弹性于第 10 天时达到最大,之后逐渐下降。对于菇盖,0.04 MPa 下的弹性从贮藏第 10 天开始就高于其他压力。贮藏第 20 天时 0.04 MPa 下的弹性明显大于其他压力,0.06 和 0.02 MPa 相对较小,0.10 MPa 最小。方差分析显示,0.04 MPa 下菇盖的弹性与 0.10 MPa、0.06 和 0.02 MPa 存在极显著差异 ($P < 0.01$)。对于菇柄到贮藏后期具有与菇盖相似的规律,贮藏第 20 天时,0.04 MPa 下的弹性与 0.10 和 0.02 MPa 存在极显著差异 ($P < 0.01$),与 0.06 MPa 存在显著差异 ($P < 0.05$)。由此可见,0.04 MPa 较好地保持了杏鲍菇的弹性。

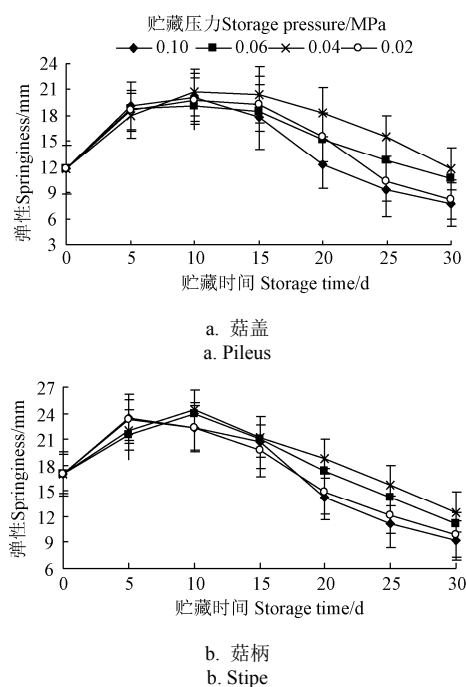


图4 不同贮藏压力对杏鲍菇弹性的影响

Fig.4 Effect of different storage pressures on springiness of *Pleurotus eryngii*

2.5 不同贮藏压力对杏鲍菇咀嚼性的影响

咀嚼性综合反映了果实对咀嚼的持续抵抗性, 体现的是咀嚼果实时所消耗的能量。由图 5 可以看出, 不同贮藏压力下杏鲍菇的咀嚼性均呈先上升后下降的变化趋势。菇盖在贮藏前 10 d 咀嚼性不断增大, 10 d 时达最大, 且在这一阶段贮藏压力越低咀嚼性越大; 10 d 后咀嚼性开始下降, 除了 0.02 MPa 外, 其他贮藏压力下的咀嚼性仍呈现贮藏压力越低咀嚼性越大的规律; 贮藏至 20 d 时, 0.04 MPa 下的咀嚼性最大, 与 0.06 和 0.10 MPa 相比达极显著差异 ($P<0.01$), 与 0.02 MPa 达显著差异 ($P<0.05$)。菇柄的咀嚼性在整个贮藏过程中具有与菇盖相似的变化规律, 贮藏前期规律不是很明显, 贮藏至第 10 天时及 10 d 以后变化规律与菇盖相同。贮藏到 25 d 时, 0.04 MPa 下的咀嚼性与 0.10 和 0.02 MPa 达到极显著差异 ($P<0.01$), 与 0.06 MPa 达到显著差异 ($P<0.05$)。由此可见, 0.04 MPa 较好地保持了杏鲍菇的咀嚼性。

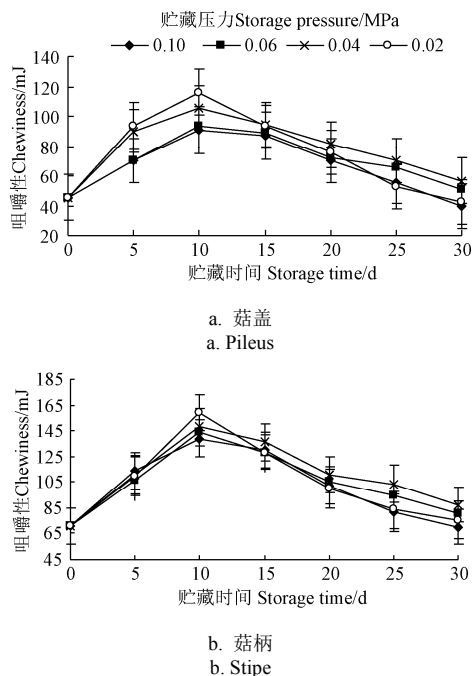


图 5 不同贮藏压力对杏鲍菇咀嚼性的影响

Fig.5 Effect of different storage pressures on chewiness of *Pleurotus eryngii*

2.6 不同贮藏压力对杏鲍菇呼吸强度的影响

呼吸强度是评价果蔬新陈代谢快慢的重要指标之一。由图 6 可以看出, 不同贮藏压力下杏鲍菇的呼吸强度呈先上升后下降再上升的变化趋势, 在贮藏第 15 天时达到呼吸高峰。贮藏前 15 d, 贮藏压力越低呼吸强度越低; 贮藏至第 15 天时, 0.02 MPa 下杏鲍菇的呼吸强度有所升高, 高于 0.04 MPa, 与 0.06 MPa 接近, 但小于 0.10 MPa, 随后的贮藏过程中同样呈现此规律。在贮藏第 25 天时, 0.04 MPa 下的呼吸强度明显低于其他压力, 方差分析显示, 与 0.10 MPa 相比达极显著差异 ($P<0.01$), 与 0.06 和 0.02 MPa 达显著差异 ($P<0.05$)。可见, 0.04 MPa 有效地降低了杏鲍菇的呼吸强度。

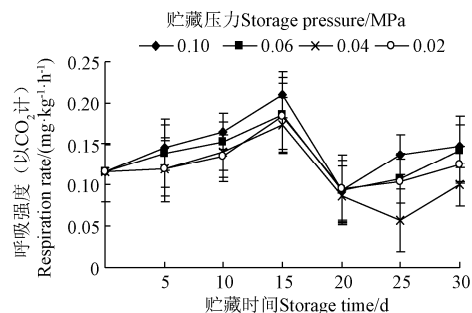


图 6 不同贮藏压力对杏鲍菇呼吸强度的影响

Fig.6 Effect of different storage pressures on respiration rate of *Pleurotus eryngii*

2.7 不同贮藏压力对杏鲍菇 SOD、CAT、PPO 活性和 MDA 含量的影响

超氧化物歧化酶 (SOD) 是生物体内重要的自由基清除剂, 可以保护细胞免受氧化损伤。由图 7a 可见, 不同贮藏压力下杏鲍菇的 SOD 活性均呈先上升后下降的变化趋势。贮藏前 10 d 杏鲍菇的 SOD 活性逐渐增大, 且贮藏压力越低 SOD 活性越小, 贮藏第 10 天时均达到最大值, 10 d 后开始下降。0.10 和 0.06 MPa 下的 SOD 活性下降较快, 0.04 MPa 相对比较平缓, 0.02 MPa 下的 SOD 活性一直保持较低水平。贮藏至第 20 天时, 除了 0.10 MPa 之外, 0.04 MPa 下的 SOD 活性显著 ($P<0.05$) 高于其他压力; 到第 30 天时, 0.04 MPa 下的 SOD 活性高于 ($P<0.05$) 其他压力。可见, 0.04 MPa 的贮藏压力可以较好地保持杏鲍菇的 SOD 活性。

过氧化氢酶 (CAT) 可直接将生物体内产生的 H_2O_2 催化分解为 H_2O 和 O_2 , 使机体免遭活性氧损伤。由图 7b 可以看出, 不同贮藏压力下杏鲍菇的 CAT 活性总体呈下降趋势。在整个贮藏过程中, 0.04 MPa 下杏鲍菇的 CAT 活性一直高于其他压力; 0.06 MPa 下的 CAT 活性相对居中; 0.02 MPa 在贮藏前期与 0.04 MPa 相近, 贮藏中期与 0.06 MPa 相近, 贮藏后期下降较快, 到贮藏第 30 天时低于 0.10 MPa 下的 CAT 活性。方差分析显示, 在贮藏 15 d 时 0.04 MPa 下杏鲍菇的 CAT 活性与 0.02 和 0.06 MPa 相比就已达到显著差异 ($P<0.05$), 与 0.10 MPa 相比达极显著差异 ($P<0.01$)。由此可见, 0.04 MPa 的贮藏压力较好地保持了杏鲍菇的 CAT 活性, 有效延缓了 CAT 活性的降低。

多酚氧化酶 (polyphenol oxidase, PPO) 是一类能催化多酚类物质氧化成醌类的含铜质体金属酶, 除具有降解木质素能力外, 还是菇体引起褐变的主要原因之一^[29-30]。图 7c 显示, 不同贮藏压力下杏鲍菇的 PPO 活性在贮藏前 10 d 均呈上升趋势, 10 d 时 0.04 和 0.06 MPa 达到最大值, 之后开始下降, 而 0.02 和 0.10 MPa 下的 PPO 活性则继续上升, 第 15 天时达到最大值后开始下降。由图 7c 还可以看出, 在贮藏后期, 0.04 MPa 下杏鲍菇 PPO 活性明显低于其他组, 贮藏第 25 天时 0.04 MPa 最小, 0.06 MPa 次之, 0.02 MPa 相对较大, 0.10 MPa 最大, 方差分析表明, 0.04 与 0.06 MPa 存在显著差异 ($P<0.05$), 与 0.02 MPa

和常压存在极显著差异 ($P<0.01$)。由此可知, 0.04 MPa 有效地抑制了杏鲍菇的 PPO 活性, 延缓了杏鲍菇的褐变进程。

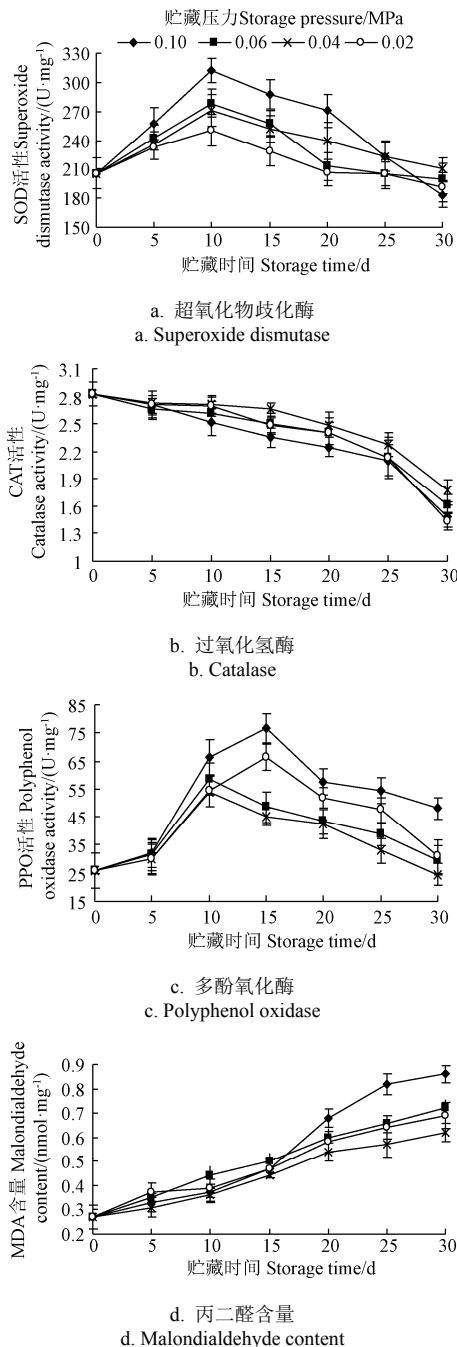


图7 不同贮藏压力对杏鲍菇超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (CAT)、多酚氧化酶 (PPO) 活性、丙二醛(MDA)含量的影响

Fig.7 Effect of different storage pressures on superoxide dismutase, catalase, polyphenol oxidase activity and malondialdehyde content of *Pleurotus eryngii*

丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 是膜脂过氧化的主要产物之一, 是细胞衰老的一种表现。由图 7d 可见, 不同贮藏压力下杏鲍菇的 MDA 含量在贮藏过程中呈不断上升趋势。且在整个贮藏过程中, 0.04 MPa 下杏鲍菇的 MDA 含量始终低于其他处理组。贮藏到 20d 时,

0.04 MPa 下的 MDA 含量与 0.02、0.06 MPa 达到显著差异 ($P<0.05$), 与 0.10 MPa 达到极显著差异 ($P<0.01$)。由此可以得出, 0.04 MPa 的贮藏压力可以有效抑制杏鲍菇的膜脂过氧化进程, 进而延缓杏鲍菇的成熟与衰老。

3 讨论

本研究发现, 相对于常压 (0.10 MPa), 0.06、0.04 MPa 均在不同程度上降低了杏鲍菇子实体的呼吸强度, 保持了杏鲍菇的 SOD、CAT 活性, 抑制了膜脂过氧化产物 MDA 含量的上升, 延缓了杏鲍菇子实体的衰老进程, 抑制了 PPO 活性, 保持了杏鲍菇的色泽, 以及杏鲍菇子实体的硬度、弹性、内聚性、咀嚼性等质地品质, 其中 0.04 MPa 相对于其他压力保鲜效果最佳。这可能是由于减压条件下, 环境压力降低, 空气中各种气体组分分压都相应的迅速下降, 氧气含量迅速降低^[31]; 在抽真空过程中, 杏鲍菇的田间热、呼吸热等可随真空泵的运行而迅速排出, 菇体温度快速下降, 从而能够有效降低杏鲍菇的呼吸强度, 减少自身营养物质的消耗; 同时, 由于减压条件使杏鲍菇子实体组织内外形成一定压力差, 此压力差可使杏鲍菇组织中产生的促衰老激素乙烯及其他挥发性代谢有害产物加快向外扩散, 避免了有害气体对菇体的伤害, 从而有效保持了杏鲍菇的 SOD、CAT 活性, 抑制了有害产物的生成, 延缓了杏鲍菇子实体的成熟与衰老, 使其保持较好的色泽和质地品质。这一研究结果与王士奎等对平菇^[22]、香菇^[23]减压贮藏的研究结果相符。此外, 本研究还发现, 随着贮藏压力由 0.10 MPa 变化到 0.04 MPa, 杏鲍菇的贮藏效果呈现出了贮藏压力越低效果越好的趋势, 分析原因可能是随着减压贮藏压力的逐步降低, 空气中各种气体组分分压相应降低, 氧气含量也逐渐减少; 同时, 菇体组织内外的压差逐渐增大, 降温和脱除有害气体的速度也随着加快, 因此, 杏鲍菇的呼吸强度越来越小, 成熟与衰老进程越来越慢, 保鲜效果越来越好。

0.02 MPa 的贮藏压力并没有延续贮藏压力越低保鲜效果越好的趋势, 该贮藏压力下杏鲍菇子实体的生理生化及贮藏品质的变化表现出了特殊性。贮藏前期 0.02 MPa 下的呼吸强度低于其他压力, 较好地抑制了杏鲍菇的呼吸强度, 但在贮藏第 15 天达到呼吸高峰时, 该压力下的呼吸强度却高于 0.04 MPa, 与 0.06 MPa 接近, 且在随后的贮藏过程中一直保持此规律。0.02 MPa 下 CAT 活性在贮藏前期保持较高水平, 与 0.04 MPa 相近, 但到了贮藏中期却低于 0.04 MPa, 与 0.06 MPa 相近, 贮藏后期下降较快, 到贮藏第 30 天时甚至低于 0.10 MPa。0.02 MPa 下杏鲍菇菇盖部位的硬度以及菇盖、菇柄部位的弹性、咀嚼性在贮藏前期高于其他压力或与其他压力相近, 但在贮藏中后期均下降较快, 到贮藏后期均低于 0.04、0.06 MPa, 与 0.10 MPa 相近。由此可以推断, 0.02 MPa 的贮藏压力下杏鲍菇子实体的生理及品质的变化发生了异常。0.02 MPa 下杏鲍菇的 PPO 活性在贮藏前期低于其他压力, 与 0.04 MPa 接近, 得到了较好的抑制, 但到了贮藏中后期却明显 ($P<0.01$) 高于 0.04 和 0.06 MPa,

仅低于 0.10 MPa; 色差值在贮藏的中后期也明显($P < 0.05$) 高于 0.04 和 0.06 MPa, 与 0.10 MPa 接近, 说明 0.02 MPa 下杏鲍菇的褐变较严重; 0.02 MPa 下的 MDA 含量从贮藏前期开始就保持较高水平, 在整个贮藏过程中一直高于 0.04 MPa, 说明 0.02 MPa 下杏鲍菇的膜脂过氧化作用也比较严重, 这些进一步证明了上述推断。0.02 MPa 下杏鲍菇子实体的生理和品质变化之所以出现上述现象, 分析原因可能是 0.02 MPa 的贮藏压力比较低, 形成的真空度较高, 内外压差较大, 较大的压差对杏鲍菇子实体造成了一定程度的机械损伤和生理伤害, 使得细胞结构遭到破坏, 正常的代谢途径和相关酶系统发生改变, 引起呼吸强度的增加, 自身营养物质消耗的加快, 膜脂过氧化加强, MDA 含量增大, PPO 活性升高, 菇体褐变加重, 加速杏鲍菇子实体的成熟与衰老, 使其质地品质变差。从 0.02 MPa 下杏鲍菇菇盖和菇柄部位硬度不同的变化过程推测, 0.02 MPa 下杏鲍菇的这种特殊的生理和品质变化现象很有可能是从杏鲍菇质构特性相对比较脆弱的菇盖部位开始的, 具体原因有待于进一步研究。

4 结 论

1) 减压贮藏可以有效降低杏鲍菇子实体的呼吸强度, 较好地保持杏鲍菇的超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶 (catalase, CAT) 活性, 有效的抑制多酚氧化酶 (polyphenol oxidase, PPO) 活性和丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 含量的上升, 较好地保持杏鲍菇的色泽和质地品质, 且贮藏压力越低保鲜效果越好, 但贮藏压力不能太低 (约 0.03~0.04 MPa), 压力太低会对杏鲍菇子实体造成一定伤害, 影响贮藏效果, 具体极限压力值需要进一步试验研究确定。

2) 杏鲍菇采用 0.07 mm 厚的低密度聚乙烯袋抽真空减压包装, (4 ± 0.5) $^{\circ}\text{C}$ 下贮藏, 适宜的贮藏压力为 0.04 MPa。与 0.10、0.06 和 0.02 MPa 相比, 0.04 MPa 较好地抑制了杏鲍菇的呼吸强度, 有效的保持了超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (CAT) 活性, 有效抑制了丙二醛 (MDA) 含量的上升, 从而有效地延缓了杏鲍菇子实体的成熟与衰老进程, 较好地保持了杏鲍菇色泽和质地品质。

该研究结果对于确定杏鲍菇减压贮藏的适宜条件, 指导杏鲍菇的贮藏保鲜、采后减损及促进杏鲍菇产业的良好发展具有一定的实际意义, 同时也为减压贮藏技术在生产上的推广和应用提供了理论依据。

参 考 文 献

- [1] 张化朋, 张静, 刘阿娟, 等. 杏鲍菇营养成分及生物活性物质分析[J]. 营养学报, 2013, 35(3): 307—309.
Zhang Huapeng, Zhang Jing, Liu A'juan, et al. Analysis of Nutritional Components and Bioactive Substances of *Pleurotus eryngii*[J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2013, 35(3): 307—309. (in Chinese with English abstract)
- [2] 孔芳, 薛正莲, 杨超英. 壳聚糖复合涂膜对杏鲍菇保鲜效果的研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(18): 215—220.

- Kong Fang, Xue Zhenglian, Yang Chaoying. Effect of chitosan composite coating on preservation of *pleurotus eryngii*[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(18): 215—220. (in Chinese with English abstract)
- [3] 马璐, 杜双田, 金凌云, 等. 杏鲍菇营养生理研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(9): 129—134.
Ma Lu, Du Shuangtian, Jin Lingyun, et al. Studies on the nutritional physiology of *pleurotus eryngii*[J]. Journal of Northwest A&F University: Nat.Sci.Ed., 2010, 38(9): 129—134. (in Chinese with English abstract)
- [4] 颜明娟, 江枝和, 蔡顺香. 杏鲍菇营养成分的分析[J]. 食用菌, 2002, 24(2): 11—12.
- [5] Yaoita Y, Yoshihara Y, Kakuda R, et al. New sterols from two edible mushrooms, *Pleurotus eryngii* and *Panellus serotinus*[J]. Chemical and Pharmaceutical Bulletin, 2002, 50(4): 551—553.
- [6] 杨立红, 史亚丽, 王晓洁, 等. 杏鲍菇多糖的分离纯化及生物活性的研究[J]. 食品科技, 2005(6): 18—21.
Yang Lihong, Shi Yali, Wang Xiaojie, et al. Isolation and purification of polysaccharides of *Pleurotus eryngii* and its bio-active[J]. Food Science and Technology, 2005(6): 18—21. (in Chinese with English abstract)
- [7] 潘崇环, 孙萍. 珍稀食用菌栽培与名贵野生菌的开发利用[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004.
- [8] Mori K, Kobayashi C, Tomita T, et al. Antiatherosclerotic effect of the edible mushrooms *Pleurotus eryngii* (Eringi), *Grifola frondosa* (Maitake), and *Hypsizygus marmoreus* (Bunashimeji) in apolipoprotein E-deficient mice[J]. Nutrition Research, 2008, 28(5): 335—342.
- [9] Kim Se-Won, Kim Hyung-Gun, Lee Byung-Eui, et al. Effects of mushroom, *Pleurotus eryngii*, extracts on bone metabolism[J]. Clinical Nutrition (Edinburgh, Scotland), 2006, 25(1): 166—170.
- [10] 陈健凯, 林河通, 林艺芬, 等. 基于品质和能耗的杏鲍菇微波真空干燥工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 277—284.
Chen Jiankai, Lin Hetong, Lin Yifen, et al. Optimized technology of *Pleurotus eryngii* by microwave-vacuum drying based on quality and energy consumption[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(3): 277—284. (in Chinese with English abstract)
- [11] 赵春燕, 马芳菲, 冯叙桥, 等. 1-MCP 处理对杏鲍菇采后生理和结构变化的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(6): 1—8.
Zhao Chunyan, Ma Fangfei, Feng Xuqiao, et al. Effects of 1-MCP treatments on post-harvest physiology and structure changes of *Pleurotus eryngii*[J]. Food Science, 2014, 35(6): 1—8. (in Chinese with English abstract)
- [12] 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.
Gong Jinlong. Study on Freshness Preservation Technology and Autolysis Mechanism of *Pleurotus eryngii*[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2013. (in Chinese with English abstract)

- [13] 刘鹏. 杏鲍菇采后生理生化及保鲜方法的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
Liu Peng. Studies on the Physiology and Biochemistry Characteristics and Fresh Keeping Technology of Post-Harvest In *Pleurotus eryngii*[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [14] 邢淑婕, 刘开华. 臭氧保鲜技术在刺芹侧耳低温贮藏中的应用[J]. 食用菌学报, 2011, 18(1): 53—55.
Xing Shujie, Liu Kaihua. Effect of ozone treatment on the quality of *Pleurotus eryngii* fruit bodies stored at 4°C[J]. Acta Edulis Fungi, 2011, 18(1): 53—55. (in Chinese with English abstract)
- [15] 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.
Tian Pingping, Wang Jie, Qin Xiaoyi, et al. Effect of Postharvest treatment on the storage quality and antioxidant enzyme system of *pleurotus eryngii*[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(5): 941—951. (in Chinese with English abstract)
- [16] 房祥军, 郅海燕, 宋丽丽, 等. 减压贮藏保持茭白采后品质及调控细胞壁物质代谢[J]. 农业工程学报, 2013, 29(12): 257—263.
Fang Xiangjun, Gao Haiyan, Song Lili, et al. Hypobaric storage maintains postharvest quality and regulates cell wall metabolism in water bamboo shoot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(12): 257—263. (in Chinese with English abstract)
- [17] 陈文恒, 郅海燕, 陈杭君, 等. 减压贮藏对软溶质水蜜桃采后生理和品质的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 108—112.
Chen Wenxuan, Gao Haiyan, Chen Hangjun, et al. Effects of Hypobaric Storage on Postharvest Physiology and Quality of Flesh-melting Textured Juicy Peach[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 108—112. (in Chinese with English abstract)
- [18] 常燕平, 王如福, 王国盛. 减压处理对梨枣果实采后生理及贮藏效果的影响[J]. 中国农学通报, 2005, 21(2): 196—198, 209.
Chang Yanping, Wang Rufu, Wang Guosheng. Effects of hypobaric treatment on postharvest physiology and storage effect of chinese jujube lizao[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(2): 196—198, 209. (in Chinese with English abstract)
- [19] 杨虎清, 吴峰华, 周存山, 等. “东魁”杨梅在减压贮藏过程中品质及相关酶活性的变化[J]. 中国食品学报, 2010, 10(1): 161—166.
Yang Huqing, Wu Fenghua, Zhou Cunshan, et al. Changes of quality and some enzyme activities of ‘dongkui’ chinese bayberry during hypobaric storage[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2010, 10(1): 161—166. (in Chinese with English abstract)
- [20] 朱梦矣. 枇杷采后品质劣变机理及减压贮藏保鲜技术研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2010.
Zhu Mengyi. Study on Postharvest Quality Deterioration and Hypobaric Storage Technology of Loquat fruit[D]. Hangzhou: Zhejiang University Technology, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [21] 李文香, 王士奎, 樊铭聪, 等. 3 种不同贮藏方式对平菇保鲜品质的影响[J]. 中国食用菌, 2014, 33(2): 53—56.
Li Wenxiang, Wang Shikui, Fan Mingcong, et al. Effect of three different storage methods on freshening quality of *Pleurtus Ostreatus*[J]. Edible Fungi of China, 2014, 33(2): 53—56. (in Chinese with English abstract)
- [22] 寇兴凯, 王士奎, 李文香, 等. 微真空贮藏方式对平菇保鲜品质的影响[J]. 食品工业科技, 2014, 35(16): 318—322.
Kou Xingkai, Wang Shikui, Li Wenxiang, et al. Effect of micro-vacuum storage method on fresh-keeping quality of *Pleurtus Ostreatus*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(16): 318—322. (in Chinese with English abstract)
- [23] 冯丽萍, 付海蛟, 魏丹, 等. 不同压力条件对减压罐贮藏生鲜香菇品质的影响[J]. 包装工程, 2014, 35(19): 7—12.
Feng Liping, Fu Haijiao, Wei Dan, et al. Effect of different pressure on the quality of fresh shiitake mushrooms during vacuum tank packaging storage[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(19): 7—12. (in Chinese with English abstract)
- [24] 张琪, 张伟阳, 陈晓东, 等. 聚乳酸薄膜真空包装对金针菇保鲜效果的研究[J]. 食品工业, 2014, 35(3): 91—95.
Zhang Qi, Zhang Weiyang, Chen Xiaodong, et al. Research of polylactide film vacuum packaging on preservation of *Flammulina velutipes*[J]. Food Industry, 2014, 35(3): 91—95. (in Chinese with English abstract)
- [25] 李志刚, 宋婷, 冯翠萍, 等. 不同温度对杏鲍菇减压贮藏品质的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 332—338.
Li Zhigang, Song Ting, Feng Cuiping, et al. Effect of different storage temperature on hypobaric storage quality of *Pleurotus eryngii*[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(3): 332—338. (in Chinese with English abstract)
- [26] Varnalis A I, Brennan J G, Mac Dougall D B, et al. Optimisation of high temperature puffing of potato cubes using response surface methodology[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 61(2): 153—163.
- [27] 张桂. 果蔬采后呼吸强度的测定方法[J]. 知识与经验 (化学分册), 2005, 41(8): 596—597.
- [28] 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.
Li Ning, Yan Ruixiang, Wang Bujiang. Effect of different package methods on quality of *Pleurotus nebrodensis* during cold storage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(7): 377—382. (in Chinese with English abstract)
- [29] 池致念, 柯家耀, 王泽生. 双孢蘑菇褐变的酶学机理研究 (续) [J]. 中国食用菌, 1999, 18(6): 17—18.
Chi Zhinian, Ke Jiayao, Wang Zesheng. Study on the enzymic browning mechanism of *Agaricus bisporus* [J]. Edible Fungi of China, 1999, 18(6): 17—18. (in Chinese with English abstract)
- [30] 李南羿, 金群力, 刘春艳, 等. 双孢蘑菇储藏中的褐变及

相关酶活性研究[J]. 食用菌学报, 2009, 16(3): 53—56.
Li Nanyi, Jin Qunli, Liu Chunyan, et al. Enzymes Associated With Browning of *Agaricus bisporus* Fruit Bodies During Storage[J]. *Acta Edulis Fungi*, 2009, 16(3): 53—56. (in Chinese with English abstract)

[31] 康明丽, 张平. 减压贮藏理论及技术研究进展[J]. 食品与机械, 2001, 82(2): 9—10.
Kang Mingli, Zhang ping. Research progress in the theory and technology of hypobaric storage[J]. *Food and Machinery*, 2001, 82(2): 9—10. (in Chinese with English abstract)

Optimum pressure condition maintain quality of *Pleurotus eryngii* in hypobaric storage

Li Zhigang¹, Song Ting^{1,2}, Hao Liping¹, Chang Mingchang¹, Shi Jianchun¹, Feng Cuiping^{1*}

(1. College of Food Science and Engineering, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China;

2. Jinzhong Institute of Quality and Technical Supervision and Inspection and Testing, Yuchi 030600, China)

Abstract: In order to study the effects of different hypobaric conditions (0.10, 0.06, 0.04, 0.02 MPa) on storage quality and physiological and biochemical indices of *Pleurotus eryngii*, the experiment was carried out with *Pleurotus eryngii* as materials, which were vacuum-packed with 0.07 mm low density polyethylene bags, and stored in 4℃. The results showed that, compared with normal pressure (0.10 MPa), hypobaric storage under 0.06 and 0.04 MPa not only reduced the respiration rate of *Pleurotus eryngii* at different degrees and maintained the activities of superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT), but also inhibited the increase of malondialdehyde (MDA), which delayed aging process, and inhibited the activity of polyphenol oxidase (PPO), which delayed browning degree. So the hardness, springiness, cohesiveness, chewiness and the color of *Pleurotus eryngii* were better maintained under 0.06 and 0.04 MPa, among which the effect of hypobaric storage under 0.04 MPa was better. It also showed that, from 0.10 to 0.04 MPa, the lower the pressure, the better the effect of the hypobaric storage. But when *Pleurotus eryngii* was stored under 0.02 MPa, the changes of storage quality did not obey the law. Under this storage pressure, the change law of the respiration rate, the activity of CAT, the hardness of pileus, the springiness and chewiness of pileus and stipe all showed abnormal conditions. At the same time, abnormal conditions were found in the variations of the activity of PPO, the color and the MDA content of *Pleurotus eryngii* which was stored under 0.02 MPa. The cause of these abnormal conditions may be when the storage pressure was 0.02 MPa, the vacuum degree was higher, and a larger pressure difference was formed. The larger pressure difference caused some mechanical damage and physiological injury on *Pleurotus eryngii* fruit body. The cell structure was destroyed. And the normal metabolic pathway and related enzyme system were changed under the larger pressure difference condition. This storage condition finally caused that the change laws of the storage quality and the physiological and biochemical indices of *Pleurotus eryngii* were different from those under 0.06 and 0.04 MPa, and the concrete change law and the dominant cause needed further study. In summary, the hypobaric storage in appropriate pressure range could effectively reduce the respiration rate, and delay the ripening and senescence process of *Pleurotus eryngii*. The hardness, springiness, cohesiveness, chewiness and the color of *Pleurotus eryngii* were preferably maintained, and the storage period was effectively prolonged. But too low storage pressure would cause some damage to the *Pleurotus eryngii* fruit body and influence the storage effect. The concrete ultimate pressure value for hypobaric storage of *Pleurotus eryngii* needs to be determined by further experimental research.

Key words: storage; pressure; texture; *Pleurotus eryngii*; hypobaric; physiology; quality