

振动胁迫对双孢蘑菇活性氧代谢和抗氧化性能的影响

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2022.01.003

孙炳新 于官楚
任浩 唐建新

沈阳农业大学
食品学院
辽宁 沈阳 110866

摘要:以新鲜的双孢蘑菇为原材料,研究了3 Hz振动频率下经过1, 2 h的振动处理(以未经振动的双孢蘑菇作对照)对双孢蘑菇色泽、活性氧代谢和抗氧化性能的影响。结果表明:振动胁迫加速了双孢蘑菇超氧阴离子(O_2^-)的产生和过氧化氢(H_2O_2)含量的积累,不同振动时间下双孢蘑菇产生的 O_2^- 活力是对照组的2.89倍(1 h)和3.31倍(2 h), H_2O_2 含量是对照组的1.38倍(1 h)和1.56倍(2 h);振动胁迫诱导超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)等抗氧化酶活性迅速升高,相对电导率、丙二醛(MDA)含量大幅上升,抗坏血酸加速分解,总酚、类黄酮含量和多酚氧化酶(PPO)酶活性峰值提前出现。振动胁迫后的双孢蘑菇活性氧自由基大量积累,细胞膜氧化损伤加剧,最终加速了双孢蘑菇的褐变。

关键词:双孢蘑菇;振动胁迫;活性氧代谢;抗氧化性能

中图分类号:TS255.3

文献标志码:A

文章编号:1674-7100(2022)01-0017-09

引文格式:孙炳新,于官楚,任浩,等.振动胁迫对双孢蘑菇活性氧代谢和抗氧化性能的影响[J].包装学报,2022,14(1):17-25.

0 引言

双孢蘑菇(*Agaricus bisporus*)又名白蘑菇或纽扣蘑菇,具有丰富的食用价值和药用价值^[1-3],是目前唯一全球性栽培的食用菌,产量占食用菌总量的30%,备受国内外消费者青睐^[4-5]。双孢蘑菇主要以鲜食为主,然而因其具有呼吸旺盛、含水量高和易受机械损伤等特点,子实体在采后极易失水、开伞和褐变,给蘑菇的贮运带来了困难^[6]。此外,在运输过程中车辆的振动频率约为2~5 Hz^[7],会使双孢蘑菇不断受到振动胁迫,加速了蘑菇褐变、损伤等品质劣变,严重影响双孢蘑菇的货架期和商品价值。

目前已有研究^[8-14]表明,振动可对梨、蓝莓、猕猴桃、杏、苹果、蒜薹、桃等果蔬品质产生不同

程度的损伤。许时星等^[9]探究了不同振动时间处理对蓝莓果实品质和抗氧化活性的影响,发现振动对果蔬的损伤不是瞬时形成的,而是逐渐累积的。S. Chaiwong等^[15]分别在3, 4, 5 Hz振动频率下对草莓进行了50, 150 s的振动试验。结果表明,草莓在5 Hz、150 s的振动水平下显示出更严重的擦伤和更大的电导率值。胡云峰等^[13]发现振动处理后蒜薹的丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量升高,诱导过氧化物酶(peroxidase, POD)、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)、抗坏血酸过氧化物酶(ascorbateperoxidase, APX)活性升高。

尽管国内外学者围绕果蔬贮运问题已展开大量的研究,然而振动胁迫对双孢蘑菇贮藏期间品质和

收稿日期:2021-10-22

基金项目:辽宁省科技厅揭榜挂帅科技攻关专项课题(2021JH1/10400035)

作者简介:孙炳新(1981-),男,山东五莲人,沈阳农业大学副教授,博士,主要从事食品包装与农产品贮藏保鲜研究,
E-mail: packsun@163.com

采后生理相关的研究还未见报道。鉴于此, 本实验研究了不同振动时间对双孢蘑菇贮藏期间的活性氧自由基、抗氧化物质、抗氧化酶活性、细胞膜透性及双孢蘑菇颜色的影响, 旨在为双孢蘑菇物流保鲜技术的开发提供理论依据。

1 试验

1.1 材料与试剂

选择外表洁白、菌盖直径为3~4 cm、无损伤、无畸形、未开伞的新鲜双孢蘑菇为试验样品; BOPP(聚丙烯)托盒尺寸为223 mm×133 mm×40 mm; PA/PE(聚酰胺/聚乙烯)复合膜的厚度为69.2 μm, 透氧率为68.218 cm³/(m²·24 h·0.1 MPa), CO₂的透过率为30.645 cm³/(m²·24 h·0.1 MPa), 透湿率为5.55 g/(m²·24 h)。

O₂、H₂O₂、SOD和CAT试剂盒, 南京建成生物工程研究所; 三氯乙酸、抗坏血酸、愈创木酚、2, 6-二氯靛酚, 均为分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; 2-硫代巴比妥酸, 分析纯, 上海瑞永生物科技有限公司; 邻苯二酚, 分析纯, 沈阳瑞丰精细化学品有限公司。

1.2 仪器与设备

台式微量高速离心机, H1650-W/H1650W型, 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司; 高速低温离心机, CR21N型, 日本日立集团; 电导率仪, DDS-11A型, 上海雷磁创益仪器仪表有限公司; 紫外分光光度计, UV-1800型, 日本岛津公司; 水浴锅, HWS28型, 上海一恒科技有限公司; 酶标仪, Eon型, 美国BioTek公司; 色差仪, CM-2300d型, 柯尼卡美能达; 低温恒温培养箱, MIR-254-PC型, 日本松下公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品处理

试验样品分为3组, 每组约为2 kg, 装入泡沫箱中(尺寸: 26 cm×13 cm×15 cm)。将样品置于模拟运输振动台, 设定振动速率为180 r/min(3 Hz), 振动时间分别为1 h和2 h, 并以未经振动的双孢蘑菇作对照。振动结束后, 取约120 g双孢蘑菇置于BOPP托盒中, 用PA/PE复合膜封装(在薄膜中心位置做扎孔处理, 孔径为0.5 mm)后放入3 °C的低温培养箱中贮藏, 每组样品处理设3个平行试验。

1.3.2 O₂活性和H₂O₂含量的测定

1) O₂活力的测定: 称取约0.1 g组织, 加入1

mL提取液, 进行冰浴匀浆; 4 °C、12 000 r/min下离心10 min, 取上清液, 冰浴待测; 向酶标板中加入上清液与试剂, 混匀, 培养箱37 °C下, 反应10 min; 然后加入其他试剂, 混匀, 培养箱37 °C下, 反应5 min, 于540 nm处测定吸光度值。

2) H₂O₂含量的测定: 称取约0.1 g组织, 加入1 mL丙酮, 进行冰浴匀浆; 4 °C、12 000 r/min下离心10 min, 取上清液, 冰浴待测; 向EP管中加入上清液与试剂, 充分混匀, 25 °C、12 000 r/min下离心10 min, 弃上清液, 留沉淀; 加入试剂溶解沉淀后混匀, 12 000 r/min离心2 min, 于415 nm处测定吸光度值。

1.3.3 总酚和类黄酮含量的测定

参照Zhou Y. H.等^[16]的方法, 称取2 g双孢蘑菇, 加4 mL预冷的体积分数为1%盐酸-甲醇溶液, 冰浴匀浆后转移至25 mL试管, 再加1%盐酸-甲醇溶液至20 mL, 于4 °C避光提取1 h, 期间多次振荡; 然后在4 °C、12 000 r/min下离心20 min, 所得的上清液即为总酚和类黄酮提取液。用酶标仪分别测定所得样品在280 nm和325 nm处的吸光度值, 结果以每克鲜重(fresh weight, FW)样品在波长280 nm和325 nm处吸光度值作为总酚和类黄酮的相对含量。

1.3.4 抗坏血酸含量的测定

参照K. K. Mishra等^[17]的2, 6-二氯靛酚法, 配制L-抗坏血酸(L-ascorbic acid, AsA)标准溶液(质量浓度为0~100 μg/mL), 绘制标准曲线。根据标准曲线方程 $y=0.003x-0.0028$ ($R^2=0.9965$)计算出双孢蘑菇中AsA的含量。

1.3.5 SOD和CAT活性的测定

1) SOD活性的测定: 称取约0.1 g组织, 加入1 mL提取液, 进行冰浴匀浆; 4 °C、12 000 r/min下离心10 min, 取上清液, 冰浴待测; 向EP管中加入上清液与试剂充分混匀, 室温避光静置30 min后, 于450 nm处测定吸光度值。

2) CAT活性的测定: 称取约0.1 g组织, 加入1 mL提取液, 进行冰浴匀浆; 4 °C、12 000 r/min下离心10 min, 取上清液, 冰浴待测; 向EP管中加入上清液与试剂, 混匀, 室温25 °C下反应5 min, 取混合溶液加入试剂, 混匀, 室温25 °C下反应5 min, 于510 nm处测定吸光度值。

1.3.6 APX活性的测定

称取2 g双孢蘑菇, 加入5 mL 0.1 mol/L磷酸钾缓冲液(pH=7.5, 含质量分数为2%的聚乙烯吡咯

烷酮 (polyvinylpyrrolidone, PVPP), 在冰浴条件下匀浆, 于 4 °C、12 000 r/min 下离心 30 min, 收集上清液即为酶提取液, 低温保存备用。

活性测定: 参照文献 [18] 中方法, 以每克鲜重 (FW) 样品每分钟吸光度变化 0.01 为酶活力的 1 个单位 (U/(min·g))。

1.3.7 多酚氧化酶活性的测定

多酚氧化酶 (polyphenol oxidase, PPO) 提取方法同 POD 酶, 参照文献 [18] 中方法, 以每分钟吸光度变化 1 为酶活力的 1 个单位 (U/(min·g))。

1.3.8 MDA 含量和相对电导率的测定

MDA 含量采用硫代巴比妥酸 (thiobarbituric acid, TBA) 法 [19] 测定。相对电导率测定: 切取 6 片大小一致的双孢菇肉, 用去离子水冲洗 3 次, 加 40 mL 去离子水并振荡 30 min, 测定初始电导率 (σ_0), 然后沸水浴 10 min (透气过滤封口膜封口), 冷却至室温后测电导率 (σ_1), 则相对电导率 (σ') 为

$$\sigma' = \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{\sigma_0} \times 100\% \quad (1)$$

1.3.9 色泽

使用色差计测定双孢蘑菇菌盖的 L^* 、 a^* 、 b^* 值。其中 L^* 值反映双孢蘑菇的亮度, 数值越大表示亮度越高; a^* 值反映双孢蘑菇的红绿度, 正值代表偏红, 负值代表偏绿; b^* 值反映双孢蘑菇的黄蓝度, 正值代表偏黄, 负值代表偏蓝。每组随机选取 5 个双孢蘑菇, 在菌盖随机取 3 个点进行测定取平均值。以褐变指数 (browning index, BI) 表征蘑菇菌盖的颜色变化 [20]:

$$BI = \frac{100 \times (x - 0.31)}{0.172} \quad (2)$$

其中

$$x = \frac{a^* + 1.75L^*}{5.645L^* + a^* - 3.012b^*} \quad (3)$$

1.3.10 数据处理

使用 IBM SPSS 20.0 软件对数据进行方差分析, 运用 Duncan 多重比较法对差异显著性 ($p < 0.05$) 进行比较分析, 使用 Origin 9.1 软件对数据进行绘图。

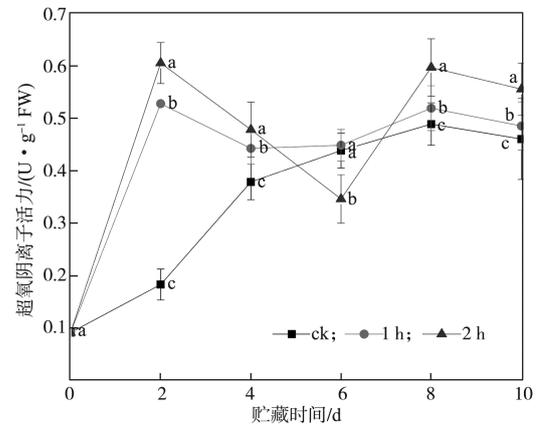
2 结果与分析

2.1 振动胁迫对双孢蘑菇产生 O_2^- 活力和 H_2O_2 含量的影响

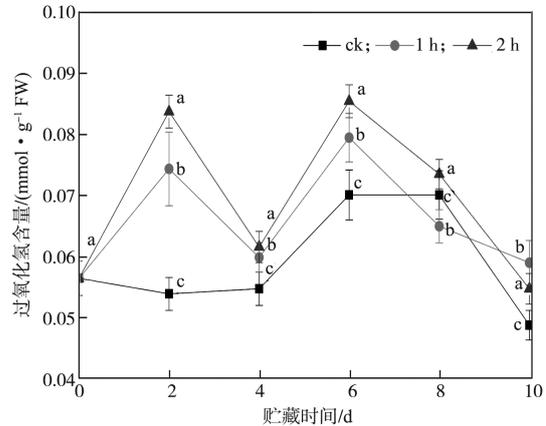
采后的果蔬在成熟衰老过程中会产生大量的活

性氧自由基 (O_2^- 和 H_2O_2)。这些自由基可直接攻击膜系统中的不饱和脂肪酸, 导致膜脂过氧化物的发生, 从而对果蔬组织和细胞膜产生伤害 [21]。

为了研究振动胁迫对双孢蘑菇品质的影响, 将样品置于模拟运输振动台, 振动时间分别为 1, 2 h, 并以未经振动的双孢蘑菇 (简称 CK) 作为对照, 经过一段时间后, 双孢蘑菇产生 O_2^- 活力和 H_2O_2 含量变化如图 1 所示, 图中字母表示同一天内不同处理组之间的显著性 ($p < 0.05$, 下同)。



a) 对 O_2^- 活力的影响



b) 对 H_2O_2 含量的影响

图 1 振动胁迫对双孢蘑菇产生 O_2^- 活力和 H_2O_2 含量的影响

Fig. 1 Effects of vibration stress on production O_2^- activity and H_2O_2 content of *Agaricus bisporus*

由图 1 可知, 从整体上看, 对照组蘑菇产生 O_2^- 活力和 H_2O_2 含量在整个贮藏期内变化趋势基本一致, 均呈先上升后下降的趋势, 且普遍低于振动处理组。振动处理组 (1, 2 h) 双孢蘑菇产生 O_2^- 活力和 H_2O_2 含量在处理后的 2 d 内急剧升高, 分别是对照组的 2.89 倍 (1 h) 和 3.31 倍 (2 h), H_2O_2 含量分别是对照

组的1.38倍(1h)和1.56倍(2h)。结果表明振动胁迫诱导了双孢蘑菇大量活性氧自由基的产生,从而加剧了蘑菇细胞膜的氧化损伤。

2.2 振动胁迫对双孢蘑菇总酚和类黄酮含量的影响

酚类物质和类黄酮是双孢蘑菇中主要的抗氧化成分^[22],这些成分对人体预防癌症和心血管疾病等具有积极作用^[23]。

模拟振动试验中,不同振动时间(1,2h)及未振动对照组双孢蘑菇在经过一段时间后,总酚和类黄酮的含量变化如图2所示。

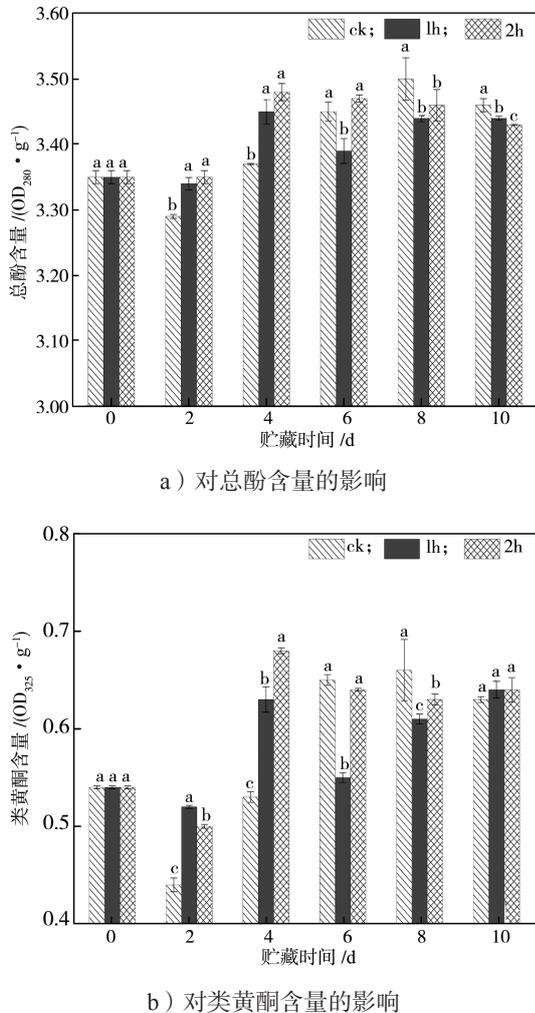


图2 振动胁迫对双孢蘑菇总酚和类黄酮含量的影响
Fig. 2 Effects of vibration stress on total phenolic and flavonoid content of *Agaricus bisporus*

由图2可以看出,双孢蘑菇中总酚与类黄酮含量均呈现先升高后下降的趋势,分别在贮藏第8d(对照组)和第4d(振动处理组)达到峰值。原因可能是振动胁迫对双孢蘑菇产生的应激反应加速了总酚

和类黄酮类物质的生成。这些抗氧化物质将参与双孢蘑菇损伤部位的伤愈过程,并起到延缓蘑菇氧化损伤的作用。在贮藏后期,双孢蘑菇代谢和活性氧大量积累,导致膜脂过氧化加剧,细胞膜结构被破坏,使本来被膜隔离的酚类物质与PPO酶广泛接触并发生酶促褐变,伴随着酚类含量的减少,蘑菇的褐变也逐渐加剧。

2.3 振动胁迫对双孢蘑菇AsA含量的影响

AsA作为植物体内重要的非酶类抗氧化物质,能够在逆境胁迫过程中清除植物体内过量的活性氧,保护细胞膜结构,并在一定程度上抵抗逆境胁迫,延缓果实衰老^[21]。

模拟振动试验中,不同振动时间(1,2h)及未振动对照组双孢蘑菇在经过一段时间后,AsA含量变化如图3所示。

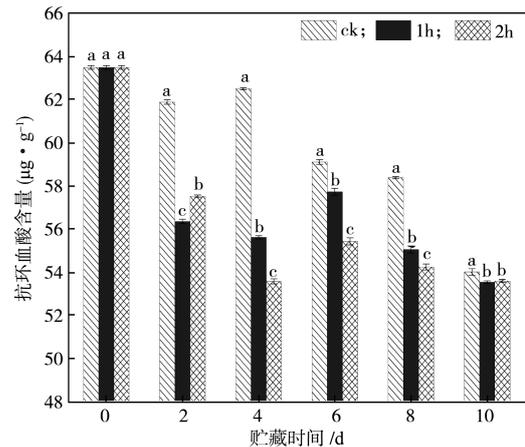


图3 振动胁迫对双孢蘑菇AsA含量的影响
Fig. 3 Effect of vibration stress on ascorbic acid content of *Agaricus bisporus*

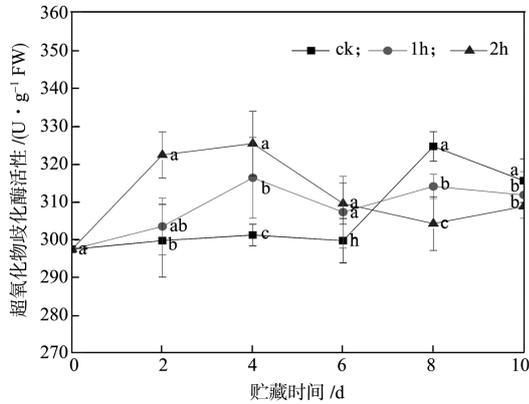
由图3可知,双孢蘑菇的AsA含量在贮藏期内总体上呈下降趋势。新鲜双孢蘑菇的AsA含量为63.51μg/g,振动处理组蘑菇的AsA含量前4d急剧下降,第4d的AsA含量分别是初始值的87.59%(1h)和84.37%(2h),而对照组在前4d下降不明显。这可能是因为振动胁迫加速了AsA分解,AsA氧化生成羰基化合物,与氨基酸、蛋白质等含氮化合物聚合生成有色物质,加速褐变^[24]。由此推测,抗坏血酸氧化引起的非酶促褐变可能是导致双孢蘑菇褐变的主要因素之一。

2.4 振动胁迫对双孢蘑菇抗氧化酶和多酚氧化酶活性的影响

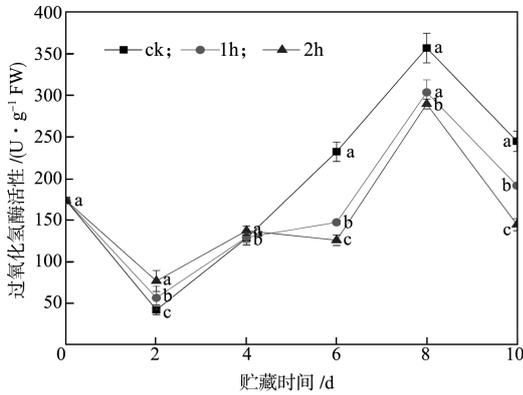
SOD酶、CAT酶和APX酶是抗氧化代谢中重要

的活性氧清除酶, 对细胞内氧化还原平衡起着重要的作用。通过清除组织和细胞中的 O_2 及其分解产生的 H_2O_2 , 可减少膜的氧化损伤, 达到延缓细胞衰老的目的^[9]。PPO 酶能催化 O_2 与酚类物质反应, 导致果蔬发生酶促褐变^[25]。

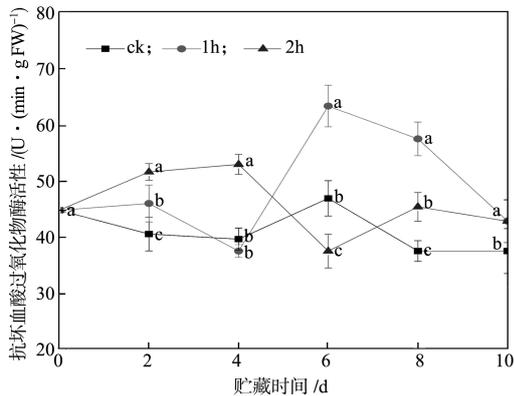
模拟振动试验中, 不同振动时间 (1, 2 h) 及未振动对照组双孢蘑菇在经过一段时间后, 抗氧化酶 (SOD 酶、CAT 酶和 APX 酶) 和多酚氧化酶活性的变化如图 4 所示。



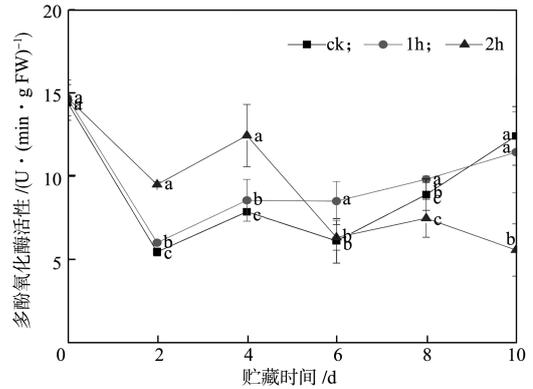
a) 对超氧化物歧化酶活性的影响



b) 对过氧化氢酶活性的影响



c) 对抗坏血酸过氧化物酶活性的影响



d) 对多酚氧化酶活性的影响

图 4 振动胁迫对双孢蘑菇 SOD 酶、CAT 酶、APX 酶和 PPO 酶活性的影响

Fig. 4 Effects of vibration stress on SOD, CAT, APX and PPO activity of *Agaricus bisporus*

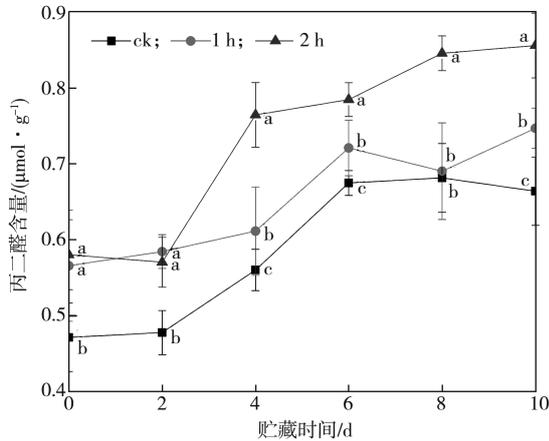
由图 4a 可知, 在振动处理后的前 4 d, 振动组 SOD 酶的活性均显著高于对照组, 且 2 h 振动组的要高于 1 h 振动组。SOD 酶活性在振动胁迫后快速升高, 并在第 4 d 达到峰值, 分别为 316.45 U/g FW (1 h) 和 325.54 U/g FW (2 h)。由图 4b 可知, CAT 酶活性呈现先降低后升高的趋势, 前 4 d 内 CAT 酶活性虽降低, 但振动组仍高于对照组, 4 d 后对照组 CAT 酶活性显著升高, 远超过振动组 CAT 酶活性。由图 4c 可知, 对照组蘑菇的 APX 酶活性在整个贮藏期间变化幅度较小, 但普遍低于振动处理组; 振动组 APX 酶活性分别在第 4 d (2 h) 和第 6 d (1 h) 达到峰值, 随后活性下降。以上结果表明双孢蘑菇经历振动胁迫后会迅速启动自由基清除机制, 以维持蘑菇活性氧代谢的平衡; 随后活性氧清除能力从第 4 d 开始逐渐减弱, 振动组双孢蘑菇的活性氧清除能力在后期低于对照组, 导致蘑菇膜脂过氧化加速, 加剧了细胞膜的氧化损伤。由图 4d 可知, 总体上振动处理后蘑菇的 PPO 酶活性高于对照组, 尤其是在贮藏前期, 2 h 振动处理组蘑菇的 PPO 活性显著提高。这是由于振动胁迫导致的机械损伤加速了酚类物质与 PPO 酶的反应, 从而加速双孢蘑菇的褐变。在贮藏后期, 可能由于酚类物质的大量消耗, 2 h 振动处理组蘑菇的 PPO 活性处于较低水平。

2.5 振动胁迫对双孢蘑菇 MDA 含量和相对电导率的影响

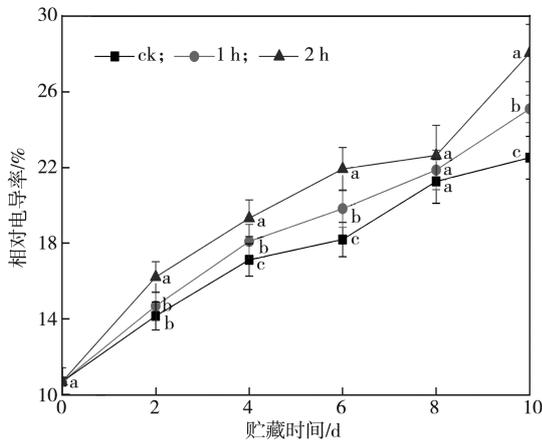
振动胁迫导致膜损伤的原因通常与活性氧 (reactive oxygen species, ROS) 的过量积累和膜脂

过氧化密切相关。MDA 作为多不饱和脂肪酸氧化的产物之一，能加剧细胞膜的损伤，且细胞膜透性与细胞膜的完整程度密切相关，因此 MDA 含量和相对电导率可间接反映细胞膜受损的程度^[26]。

模拟振动试验中，不同振动时间（1, 2 h）及未振动对照组双孢蘑菇在经过一段时间后，MDA 含量和相对电导率的变化如图 5 所示。



a) 对 MDA 含量的影响



b) 对相对电导率的影响

图 5 振动胁迫对双孢蘑菇 MDA 含量和相对电导率的影响

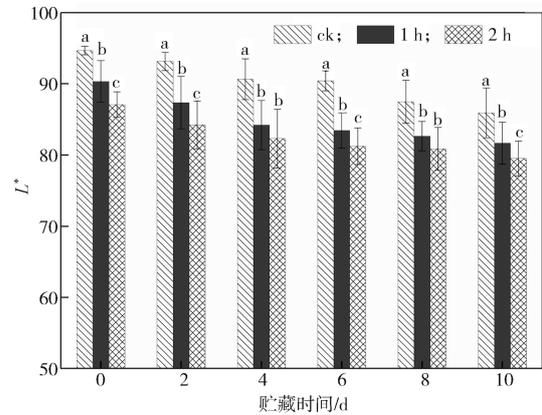
Fig. 5 Effects of vibration stress on MDA content and relative electrical conductivity of *Agaricus bisporus*

由图 5 可以看出，蘑菇的 MDA 含量和相对电导率在贮藏期内均呈上升趋势，且振动处理组显著性高于对照组 ($p < 0.05$)，表明蘑菇在贮藏期内细胞膜的损伤随贮藏时间的延长而加剧，从而导致更多的电解质渗漏^[27]，这是机械振动造成的典型生理损伤之一，在梨^[28]、哈密瓜^[29]、草莓^[30]等果实的振动研究中有类似报道。

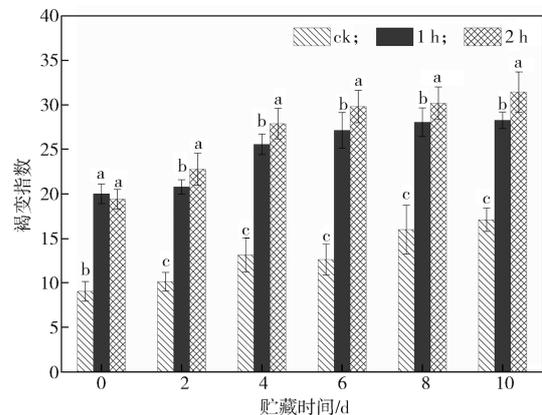
2.6 振动胁迫对双孢蘑菇色泽的影响

色泽作为双孢蘑菇采后最直观的品质参数，是影响消费者购买行为的重要因素。褐变是振动胁迫后品质下降的主要表现之一，可由 L^* 和 BI 来反映^[31]。 L^* 值越低双孢蘑菇颜色越暗，研究表明当双孢蘑菇的 L^* 值大于 80 时，是消费者可接受的品质^[32]。

模拟振动试验中，不同振动时间（1, 2 h）及未振动对照组双孢蘑菇在经过一段时间后， L^* 和 BI 的变化如图 6 所示。



a) 对 L^* 的影响



b) 对 BI 的影响

图 6 振动胁迫对双孢蘑菇 L^* 和褐变指数的影响

Fig. 6 Effects of vibration stress on L^* and browning index of *Agaricus bisporus*

由图 6 可知，振动处理后双孢蘑菇的亮度值显著低于对照组，BI 值则显著高于对照组，表明双孢蘑菇的褐变程度随振动时间的延长而不断加剧，这可能与贮藏后期大量活性氧积累，较低的 SOD 酶、CAT 酶活性以及较低的总酚、类黄酮和抗坏血酸含量相关，导致 MDA 含量和电导率不断升高，细胞氧化损伤严重，从而加速双孢蘑菇褐变。由此推断，抗氧化

酶活性变化是导致双孢蘑菇褐变的主要原因^[24]。

3 结论

振动胁迫对双孢蘑菇的色泽及抗氧化性能具有显著的影响, 振动胁迫引发的氧化应激加速了总酚和类黄酮等抗氧化物质的产生, 并诱导双孢蘑菇产生大量的活性氧自由基, 伴随着膜脂过氧化作用逐渐加剧最终导致细胞的氧化损伤。此外, 振动胁迫后双孢蘑菇通过提高抗氧化酶活性迅速启动自由基清除机制, 以维持蘑菇活性氧代谢的平衡。然而随着自由基的大量积累, 在第4 d后双孢蘑菇的活性氧清除能力开始逐渐减弱, 导致蘑菇膜脂过氧化加速, 加剧了细胞膜的氧化损伤。

综合以上, 振动胁迫条件下双孢蘑菇的活性氧自由基迅速积累, 导致细胞膜的氧化损伤加剧, 从而加速了双孢蘑菇的褐变。

参考文献:

- [1] XUE Y, XIE J, XU X S, et al. UPLC-QqQ/MS Combined with Similarity Assessment of 17 Nucleic Acid Constituents in 147 Edible Fungi from Sichuan Basin, China[J]. Food Research International, 2019, 120: 577-585.
- [2] 夏妮. 双孢蘑菇力学特性及机械损伤机理的研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2013.
XIA Ni. Study on Mechanical Properties and It's Mechanism of *Agaricus Bisporus*[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2013.
- [3] 郑丹丹, 胡扬扬, 王琦. 双孢蘑菇活性成分研究进展[J]. 食用菌学报, 2016, 23(2): 94-103.
ZHENG Dandan, HU Yangyang, WANG Qi. Recent Research on Bioactive Components from *Agaricus Bisporus*[J]. Acta Edulis Fungi, 2016, 23(2): 94-103.
- [4] BAN Z J, LI L, GUAN J F, et al. Modified Atmosphere Packaging (MAP) and Coating for Improving Preservation of Whole and Sliced *Agaricus Bisporus*[J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(12): 3894-3901.
- [5] GHOLAMI R, AHMADI E, FARRIS S. Shelf Life Extension of White Mushrooms (*Agaricus Bisporus*) by Low Temperatures Conditioning, Modified Atmosphere, and Nanocomposite Packaging Material[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2017, 14: 88-95.
- [6] ZHANG K X, PU Y Y, SUN D W. Recent Advances in Quality Preservation of Postharvest Mushrooms (*Agaricus Bisporus*): A Review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 78: 72-82.
- [7] JARIMOPAS B, SINGH S P, SAENGNIL W. Measurement and Analysis of Truck Transport Vibration Levels and Damage to Packaged Tangerines During Transit[J]. Packaging Technology and Science, 2005, 18(4): 179-188.
- [8] 周然. 黄花梨运输振动损伤与冷藏品质变化的试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
ZHOU Ran. Studies on the Quality Changes of Huanghua Pears During Transport and Storage[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- [9] 许时星, 郜海燕, 陈杭君, 等. 振动胁迫对蓝莓果实品质和抗氧化酶活性的影响[J]. 林业科学, 2017, 53(9): 26-34.
XU Shixing, GAO Haiyan, CHEN Hangjun, et al. Effect of Vibration on Shelf Quality and Antioxidant Enzyme Activity of Blueberries[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2017, 53(9): 26-34.
- [10] 李正国, 苏彩萍, 王贵禧. 振动胁迫对猕猴桃果实成熟衰老生理的影响[J]. 农业工程学报, 2000, 16(4): 142-143.
LI Zhengguo, SU Caiping, WANG Guixi. Effects of Vibration Stress on the Physiology of Ripening and Senescence of Kiwifruit[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000, 16(4): 142-143.
- [11] 刘华英, 王大地, 包东东, 等. 库车小白杏对振动胁迫的生理反应研究[J]. 北方园艺, 2012(12): 176-179.
LIU Huaying, WANG Dadi, BAO Dongdong, et al. Physiological Reactions of Kuqa Apricot to Mechanical Vibration[J]. Northern Horticulture, 2012(12): 176-179.
- [12] LU F, XU F X, LI Z, et al. Effect of Vibration on Storage Quality and Ethylene Biosynthesis-Related Enzyme Genes Expression in Harvested Apple Fruit[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 249: 1-6.
- [13] 胡云峰, 杜威, 魏增宇. 运输振动降低蒜薹的贮藏品质[J]. 现代食品科技, 2018, 34(8): 75-80, 239.
HU Yunfeng, DU Wei, WEI Zengyu. Transport Vibration Decreases the Storage Quality of Garlic Shoots[J]. Modern Food Science and Technology, 2018, 34(8): 75-80, 239.
- [14] 肖丽娟. 振动胁迫对水蜜桃和黄花梨采后生理及贮藏

- 品质的影响[D].重庆:西南大学,2006.
- XIAO Lijuan. The Effect of Mechanical Vibration Stress on Postharvest Physiology and Storage Quality of Juicy Peach and Huanghua Pear[D]. Chongqing: Southwest University, 2006.
- [15] CHAIWONG S, BISHOP C F H. Effect of Vibration Damage on the Storage Quality of 'Elsanta' Strawberry[J]. Australian Journal of Crop Science, 2015, 9(9): 859-864.
- [16] ZHOU Y H, DENG L L, ZENG K F. Enhancement of Biocontrol Efficacy of *Pichia Membranaefaciens* by Hot Water Treatment in Postharvest Diseases of Citrus Fruit[J]. Crop Protection, 2014, 63: 89-96.
- [17] MISHRA K K, PAL R S, ARUNKUMAR R, et al. Antioxidant Properties of Different Edible Mushroom Species and Increased Bioconversion Efficiency of *Pleurotus Eryngii* Using Locally Available Casing Materials[J]. Food Chemistry, 2013, 138(2/3): 1557-1563.
- [18] 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,2007:136.
- CAO Jiankang, JIANG Weibo, ZHAO Yumei. Experiment Guidance of Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007: 136.
- [19] 李云云,赵春霞,程曦,等.高氧气调包装对双孢蘑菇微生物及其品质的影响[J].食品科学,2016,37(2):261-265.
- LI Yunyun, ZHAO Chunxia, CHENG Xi, et al. Effects of High-Oxygen Modified Atmosphere Packaging on Microorganisms and Quality Maintenance in *Agaricus Bisporus*[J]. Food Science, 2016, 37(2): 261-265.
- [20] PALOU E, LOPEZ-MALO A, BARBOSA-CANOVAS G V, et al. Polyphenoloxidase Activity and Color of Blanched and High Hydrostatic Pressure Treated Banana Puree[J]. Journal of Food Science, 1999, 64(1): 42-45.
- [21] 王静,孙广宇,姬俏俏,等.活性氧在果蔬采后衰老过程中的作用及其控制[J].包装与食品机械,2015,33(5):51-54,58.
- WANG Jing, SUN Guangyu, JI Qiaoqiao, et al. The Role of Active Oxygen in Harvested Fruits and Vegetables During Senescence and Its Control[J]. Packaging and Food Machinery, 2015, 33(5): 51-54, 58.
- [22] 刘容,崔媛媛.UV-C照射与壳聚糖涂膜对鲜切淮山的保鲜效果[J].食品科学,2021,42(3):289-295.
- LIU Rong, CUI Yuanyuan. Effect of UV-C Irradiation and Chitosan Coating on Preserving the Quality of Fresh-Cut Chinese Yam[J]. Food Science, 2021, 42(3): 289-295.
- [23] GAO M S, FENG L F, JIANG T J. Browning Inhibition and Quality Preservation of Button Mushroom (*Agaricus Bisporus*) by Essential Oils Fumigation Treatment[J]. Food Chemistry, 2014, 149: 107-113.
- [24] 李任强,江凤仪,方玲,等.维生素C与氨基酸褐变反应的研究[J].食品工业科技,2002,23(11):32-34.
- LI Renqiang, JIANG Fengyi, FANG Ling, et al. Study on the Chemical Reaction Between Vc and Amino Acid[J]. Science and Technology of Food Industry, 2002, 23(11): 32-34.
- [25] GAO W, WEIJN A, BAARS J J P, et al. Quantitative Trait Locus Mapping for Bruising Sensitivity and Cap Color of *Agaricus Bisporus* (Button Mushrooms)[J]. Fungal Genetics and Biology, 2015, 77: 69-81.
- [26] 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.
- [27] BEAULIEU M, D'APRANO G, LACROIX M. Effect of Dose Rate of Gamma Irradiation on Biochemical Quality and Browning of Mushrooms *Agaricus Bisporus*[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2002, 63(3/4/5/6): 311-315.
- [28] ZHOU R, SU S Q, YAN L P, et al. Effect of Transport Vibration Levels on Mechanical Damage and Physiological Responses of Huanghua Pears (*Pyrus Pyrifolia Nakai, cv. Huanghua*)[J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 46(1): 20-28.
- [29] 曾媛媛,王锡昌,周然,等.运输振动对哈密瓜贮藏品质的影响[J].食品与机械,2016,32(3):141-144,148.
- ZENG Yuanyuan, WANG Xichang, ZHOU Ran, et al. Effects of Transport Vibration on Storage Quality of Hami Melon[J]. Food & Machinery, 2016, 32(3): 141-144, 148.
- [30] CHAIWONG S, BISHOP C F H. Effect of Vibration Damage on the Storage Quality of 'Elsanta' Strawberry[J]. Australian Journal of Crop Science,

2015, 9(9): 859–864.

- [31] WEI W W, LÜ P, XIA Q P, et al. Fresh-Keeping Effects of Three Types of Modified Atmosphere Packaging of Pine-Mushrooms[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2017, 132: 62–70.

- [32] BRIONES G L, VAROQUAUX P, CHAMBROY Y,

et al. Storage of Common Mushroom Under Controlled Atmospheres[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2007, 27(5): 493–505.

(责任编辑: 李玉华)

Effects of Vibration Stress on Active Oxygen Metabolism and Antioxidant Properties of *Agaricus Bisporus*

SUN Bingxin, YU Guanchu, REN Hao, TANG Jianxin

(College of Food Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: Taking *Agaricus bisporus* as the raw material, the effects of 1 h and 2 h vibration treatments (with unvibrated mushrooms as a control) on the color, active oxygen metabolism and antioxidant properties of fresh *Agaricus bisporus* under 3 Hz vibration frequency were studied. The results showed that vibration stress accelerated the production of O_2^- and the accumulation of H_2O_2 content, the O_2^- production of the *Agaricus bisporus* treated with different vibration time was 2.89 times (1 h) and 3.31 times (2 h) of the control group, H_2O_2 content was 1.38 times (1 h) and 1.56 times (2 h) of the control group. After vibration stress, SOD, CAT and APX antioxidant enzyme activities, relative conductivity and MDA content increased significantly. In addition, ascorbic acid decomposition accelerated, total phenols, flavonoids content and PPO enzyme activity peaks appeared earlier. Due to the large accumulation of active oxygen free radicals, the oxidative damage of the cell membrane was aggravated and eventually accelerated the browning of the mushrooms.

Keywords: *Agaricus bisporus*; vibration stress; active oxygen metabolism; antioxidant property