

脉冲强光预处理联合控湿干燥提升香菇的贮藏品质

金晓燕^{1,2}, 赵鑫淇¹, 张龙^{1,3}, 马海乐¹, 周存山^{1*}

(1. 江苏大学食品与生物工程学院, 江苏镇江 212013) (2. 江苏恒顺醋业股份有限公司, 江苏镇江 212143)

(3. 南京神农园食品产业有限公司, 江苏南京 211219)

摘要: 该研究探讨了脉冲强光 (IPL) 预处理联合控湿干燥对香菇储藏品质的影响。研究发现, 脉冲强光预处理可以降低贮藏期间新鲜和干香菇的呼吸速率, 分别为对照的 76.69% 和 84.65%; 脉冲强光预处理提高了还原糖的保留率。新鲜和干香菇在贮藏期间对照的多酚氧化酶 (PPO) 活性分别是 IPL 预处理样品的 1.73 倍和 1.39 倍, 酶促褐变反应受到抑制, 也因此提高了总酚的保留率。IPL 可以提高鲜、干香菇在贮藏期间的品质、多糖保留率和抗氧化能力, 延缓软化。IPL 处理降低了新鲜香菇在贮藏期间的菌落总数 (从 6.43~8.02 log CFU/g 减少至 3.29~4.66 log CFU/g), 但是对干香菇在贮藏期间菌落总数影响较小。与热烫处理相比, 脉冲强光处理提升香菇贮藏品质更佳。因此脉冲强光可以作为一种稳定的预处理手段用于香菇干燥和保鲜中。

关键词: 脉冲强光预处理; 控湿干燥; 香菇; 贮藏品质

文章编号: 1673-9078(2023)03-174-185

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.3.0105

Improving the Storage Quality of Shiitake Mushroom by Intense Pulsed Light Pretreatment Combined with Humidity-controlled Drying

JIN Xiaoyan^{1,2}, ZHAO Xinqi¹, ZHANG Long^{1,3}, MA Haile¹, ZHOU Cunshan^{1*}

(1.School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

(2.Jiangsu HengshunVinegar Industry Co. Ltd., Zhenjiang 212143, China)

(3.Nanjing Shennongyuan Food Industry Co. Ltd., Nanjing 211219, China)

Abstract: The effects of intense pulsed light (IPL) pretreatment combined with humidity-controlled drying on storage quality of shiitake mushroom were evaluated. The results showed that IPL pretreatment could reduce the respiration rate of fresh and dried shiitake mushroom, by 76.69% and 84.65%, respectively, and improved the retention rate of reducing sugar during storage. The polyphenol oxidase (PPO) activities of the fresh and dried shiitake mushrooms during storage were 1.73 times and 1.39 times that of the IPL-pretreated samples, respectively, and the enzymatic browning reaction was inhibited, thereby increasing the retention rate of total phenols. IPL treatment was found to improve the quality, polysaccharide retention rate, and antioxidant capacity of fresh and dried shiitake mushroom during storage and delayed softening. IPL treatment also reduced the total bacterial count of fresh shiitake mushroom (from 6.43~8.02 to 3.29~4.66 log CFU/g) but had little effect on the total bacterial count of dried shiitake mushroom. IPL treatment improved the storage quality of shiitake mushrooms to a greater degree than did blanching treatment. Therefore, IPL treatment can be used as a stable pretreatment method for the drying and preservation of shiitake mushrooms.

Key words: intense pulsed light pretreatment, humidity-controlled drying, shiitake mushroom, storage quality

引文格式:

金晓燕,赵鑫淇,张龙,等.脉冲强光预处理联合控湿干燥提升香菇的贮藏品质[J].现代食品科技,2023,39(3):174-185.

JIN Xiaoyan, ZHAO Xinqi, ZHANG Long, et al. Improving the storage quality of shiitake mushroom by intense pulsed light pretreatment combined with humidity-controlled drying [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(3): 174-185.

收稿日期: 2022-01-28

基金项目: 安徽省科技重大专项(18030701152); 国家重点研发计划项目(2017YFD0400903)

作者简介: 金晓燕 (1981-), 女, 工程师, 研究方向: 食品物理加工, E-mail: 54440535@qq.com

通讯作者: 周存山 (1979-), 男, 教授, 研究方向: 食品物理加工, E-mail: cunshanzhou@163.com

香菇营养丰富、味道鲜美, 是我国的大宗出口农产品之一。新鲜香菇由于含水量高, 采后代谢快, 保质期仅有 2~3 d, 并不利于市场流通和运输, 因此干燥成为了延长香菇保质期的有效办法^[1]。但市场上对干香菇外形要求极高, 而传统的干燥方式仍以热风干燥为主, 所生成的干制品收缩都极为严重, 品质较差^[2]且能量利用率低^[3], 与市场 and 消费者需求存在一定

差距。因此,需要寻找一种能够提高香菇干燥品质的方法。

脉冲强光(Intensive Pulsed Light, IPL)是波长从紫外线区域到近红外线区域的复合光,脉冲强光的光和太阳光波段类似,但光强是太阳光的几千甚至一万倍,尤其UV-C波段光强明显。脉冲强光能在1s以内将电能存储在电容器中,但是却能在百分之一或千分之一秒内快速释放电能,发出的闪光具有较高的峰值功率,可以在短时间内利用光化学/光热作用杀死微生物^[4]。脉冲强光起源于1970年代末期,日本首次应用其进行消毒工作,第一项专利始于1984年^[4],Bank等^[5]在1990年发表了第一篇关于脉冲强光灭活微生物的论文,在20世纪30年代Art 6等^[6]发现可以用UV-C处理延长食物贮藏期,Holl 6sy等^[7]发现脉冲强光可以通过抑制酶活降低酶促褐变带来的不良影响。脉冲强光在杀菌、灭酶方面有显著的效果。脉冲强光是一种表面杀菌和钝酶的技术,尤其针对湿物料和透明的液体物料,如鲜切蔬菜、澄清透明的果汁、肉类。脉冲强光的穿透能力较弱,不适物料内部的灭菌和灭酶,在脉冲强光无法照射的地方达不到杀菌灭酶的效果,这是脉冲强光的不足。脉冲强光虽然有许多不足,但可以达到减菌的效果,带式振动的脉冲强光处理设备可以让物料抖动甚至翻面,提高了脉冲强光的杀菌、钝酶效率。

本课题组前期的研究^[8,9]表明,脉冲强光预处理联合控湿干燥对降低香菇收缩率、钝化多酚氧化酶、抑制褐变有积极的作用。为了探究该种预处理手段是否可以保证香菇在贮藏中品质的稳定性,所以我们模拟日常生活中贮藏条件,分别对新鲜和干燥后的香菇进行贮藏,研究其在贮藏过程中褐变及其品质的变化,并分析产生变化的原因。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

香菇由江苏科恒环境科技有限公司提供,挑选作为试验材料的香菇新鲜、表面无机械损伤。所有用于实验的香菇保证香菇的直径为5~7cm,菌盖厚度(H)(1.2±0.2)cm。湿基含水率为87.0%±1.31%(105℃烘干24h)^[8]。试验前将香菇置于(4±1)℃的冰箱中保存。

1.2 仪器

控湿干燥箱,江苏大学自制;ZW-SY-2D脉冲强光灯,美国PerkinElmer公司;T6新世纪紫外可见光

分光光度计,北京普析通用仪器有限公司;控温控湿培养箱,江苏大学自制;KQ-300DE数控超声波清水器,昆山市超声仪器有限公司;CR-400手持式色差仪,德国Associates Laboratory;HR1500-A2生物安全柜,青岛海尔特种电器有限公司;HYL-C2组合式摇床,太仓市强乐试验设备有限公司;DL-5C离心机,上海安亭科学仪器厂;PQ001低场核磁共振仪,苏州纽迈分析仪器股份有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 对照组(Control)

(1)新鲜样品的对照组:新鲜香菇洗净不做任何处理置于4℃的冰箱贮藏。

(2)干燥样品的对照组:干燥过程分3个阶段进行,第一阶段温度为40℃、湿度为30%±2%,干燥至香菇含水量为30%~40%;第二阶段温度为50℃、湿度为20%左右,干燥至含水量为10%~20%;第三阶段温度为60℃、湿度为10%左右,干燥至香菇含水量为8%左右,结束干燥过程。然后将干燥后的样品置于37℃,室湿(80%)的条件下贮藏。

1.3.2 脉冲强光预处理(IPL)

(1)香菇置于脉冲强光仪器中,用强度为0.48 J/(cm² pulse)、通量12.0 J/cm²预处理,预处理后置于4℃的冰箱内贮藏。

(2)预处理后的样品按照1.3.1方法干燥,干燥后的样品置于37℃,室湿(80%)的条件下贮藏。

1.3.3 热烫预处理(HB)

(1)香菇在100℃沸水浴中处理60s,用吸水纸擦干香菇表面多余的水分后置于4℃的冰箱内贮藏。

(2)预处理后的样品按照1.3.1方法干燥,干燥后的样品置于37℃,室湿(80%)的条件下贮藏。

1.3.4 磁共振成像的测定

使用低场核磁测定新鲜及干香菇每个贮藏周期的水分分布状态,核磁共振波谱的关键参数参数设置P1=10 μs, SF=21 MHz, SW=200 kHz, TD=1 024, DRG1=3, TW=3 000 ms, NECH=17 000, NS=8, TR=10 000 ms, TE=18.13 ms, Averages=16^[10]。

1.3.5 呼吸强度(RI)测定及还原糖含量测定

1.3.5.1 呼吸强度(RI)测定

将一个完整的新鲜/干燥后的样品放入装有250 mL NaOH(0.4 mol/L)的烧杯中,在密封的干燥器中放30 min,然后加入两滴酚酞,用2 mol/L草酸滴定残留的NaOH,呼吸强度根据草酸消耗量计算^[11]。

$$F = \frac{\Delta V \times C \times 44}{W \times t} \quad (1)$$

式中:

F —呼吸强度 (RI);

ΔV —草酸消耗量, mL;

C —草酸浓度, mol/L;

W —样品质量, g;

t —实验时间, min.

1.3.5.2 还原糖含量测定

香菇粉中还原糖用 80 °C 热水浸提, 在 8 mL 提取液 (10 mg/mL) 中加入 1.5 mL DNS, 混匀后在水浴锅中用沸水浴进行加热, 加热 5 min 后立即冷却至室温, 然后定容到 25 mL 并于 540 nm 波长下测定吸光值, 使用无水葡萄糖作为标准测定还原糖含量^[12]。

1.3.6 酶促褐变

1.3.6.1 多酚氧化酶酶活测定

制备粗酶液: 在 30 g 的新鲜香菇中加入 50 mL 含 2% (m/V) PVPP (聚乙烯吡咯烷酮) 的磷酸缓冲液 (pH 值 6.9), 搅拌均匀后用超声 (功率: 600 W) 提取 10 min, 静置 40 min, 离心取上清液。

PPO 活性测定: 将混合物 (含 1 mL 0.3 mol/L 儿茶酚和 5 mL 0.1 mol/L 磷酸盐缓冲液, pH 值 6.9) 在 40 °C 下水浴 10 min, 然后加入 1 mL 上述粗酶液, 在 420 nm 波长处测定吸光值。PPO 活性的一个单位 (U) 定义每分钟内吸光值 0.001 的改变量^[13]。

1.3.6.2 总酚含量测定

干燥后的香菇磨成粉过 100 目筛, 用体积分数 95% 甲醇提取 20 min, 离心取上清液为粗提物。在 0.5 mL 上述提取液 (20 mg/mL) 中加入 2.5 mL 5% (m/V) 的福林酚溶液, 混匀静置 2 min 后加入 2.5 mL 7.5% (m/V) 的 Na_2CO_3 溶液, 将混合物在 50 °C 下加热 5 min, 在 760 nm 波长处测定吸光值。香菇中总酚的含量以没食子酸为标准进行测定^[14]。

1.3.7 褐变程度分析

1.3.7.1 表面颜色变化

使用分光测色仪测定样品的表面颜色^[12], 包括 L 、 a 和 b 值。 L 值表示亮度, a 代表样品的红绿度, b 代表样品的黄蓝度。颜色变化值 ΔE 越大, 表示样品颜色较新鲜样品颜色变化越大。每组样品重复 6 次, 取其平均值。颜色变化值 ΔE 计算公式如下^[15]:

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2} \quad (2)$$

式中:

L_0 、 a_0 、 b_0 —新鲜样品的颜色值;

L^* 、 a^* 、 b^* —样品的颜色值。

1.3.7.2 褐变指数分析

根据分光测色仪测定的 L 、 a 、 b 值计算褐变指数

(BI)^[16]。

$$B = \frac{a^* + 1.75L^*}{5.645L^* + a^* - 3.012b^*} - 0.31 \quad (3)$$

式中:

B —褐变指数 (BI);

L^* 、 a^* 、 b^* —分别代表干香菇的亮度、红/绿、黄/蓝。

1.3.7.3 褐变度分析

在过 100 目筛的 0.2 g 香菇粉中加入 20 mL 蒸馏水, 将匀浆离心取上清液, 在 410 nm 波长处测定上清液的吸光值, 吸光值即为 BD 值^[17]。

1.3.8 香菇贮藏中品质测定

1.3.8.1 多糖含量测定

超声提取香菇粉中多糖含量 (料液比 1:50, g:mL), 50 °C 下提取 40 min, 稀释至 0.2 mg/mL, 并加入苯酚 (体积分数 5%) 2 mL、浓硫酸 10 mL, 冷却至室温后于 490 nm 下测定吸光值。使用无水葡萄糖作为标准测定多糖含量^[18]。

1.3.8.2 硬度测定

将香菇菌盖放在测试平台中央, 用穿刺的方法测定菌盖的中间点的硬度, 以此过程中所需的最大力来表示。测试条件如下: 探头直径、测前速度、测试速度、刺入深度、探针高度、测后速度、接触力分别为 4 mm、2 mm/s、2 mm/s、10 mm、25 mm、5 mm/s、10 g^[19]。

1.3.8.3 抗氧化性测定

(1) 样品提取

在 100 g 过 100 目筛的粉末里加入 80 mL 体积分数 95% 的甲醇, 混合物在 60 °C 的超声中提取 20 min, 8 000 r/min 离心 10 min, 取上清液, 反复提取两次, 将上清液合并, 旋蒸, 于 4 °C 下保存。

(2) DPPH 自由基清除率

将由 400 μL 上清液和 3.5 mL 0.14 mmol/L DPPH 组成的混合物在室温下避光反应 30 min。之后, 用分光光度计在 517 nm 下进行测定, 以体积分数 95% 的甲醇溶液作空白对照。按照之前的步骤进行对照实验, 混合物由 400 μL 体积分数 95% 的甲醇溶液和 3.5 mL 0.14 mmol/L DPPH 组成^[20]。

(3) ABTS⁺ 自由基清除率

将 200 μL 的粗提物与 2 mL ABTS 工作溶液 (将 7 mmol/L ABTS 和 2.4 mmol/L 过硫酸钾溶液混合在黑暗条件下静置 12~16 h, 形成 ABTS 储备液。样品测定时用磷酸缓冲液稀释, 在 734 nm 处的吸光度为 0.7 ± 0.02 , 得到 ABTS 工作液) 混合。在 30 °C 的水浴中加热混合物 10 min, 在 734 nm 的波长下测量^[21]。

对照使用蒸馏水代替样品溶液。

(4) 羟基清除率

将由 1 mL 提取液、1 mL FeSO₄ (9 mmol/L), 1 mL 水杨酸-乙醇 (9 mmol/L), 1 mL H₂O₂ (8.8 mmol/L) 组成的混合物在 37 °C 水浴锅中加热 30 min, 在 510 nm 波长处测定吸光度, 然后分别用蒸馏水代替样品和 H₂O₂ 重复以上操作, 分别测定吸光值。

1.3.8.4 微生物含量

计算贮藏期间新鲜与干燥香菇的菌落总数含量。将香菇以 1:10、1:100、1:1 000 的比例置于无菌生理盐水中, 并搅拌 2 min, 然后吸取 1 mL 置于菌落总数测试片上, 培养 48 h 后计数。根据 3 个重复样品的平均值计算每 g 样品的 CFU 的对数^[22]。

1.3.8.5 感官评价

评价小组由 12 位评价人员 (年龄: 20~60 岁; 男性 4 位, 女性 8 位) 组成, 在评价前经过基本的味觉、嗅觉、香菇的感官属性、标度方法培训, 培训时间大于 20 h, 并且对香菇无特殊的喜好或厌恶感。

香菇熟制方法: 先在 40 °C 水中复水 40 min (干香菇:水=1:40)。取 100 g 复水香菇样品于 1 000 mL 沸盐水 (含 4 g/L NaCl) 中煮制 5 min, 捞出冷却至室温备用。样品采用随机三位数编码, 平衡排序呈送。每组感官评价 3 次。

标尺采用 5 点数字标度, 增量 0.5, 来量化香菇各属性的强度, 其中 0 表示无, 5 表示极强。分别选用 Control 组、IPL-RHD 组、HB-RHD 组处理贮藏 35 d 的干香菇进行品评, 参比样则选用市售某品牌干香菇, 香菇感官属性、定义、参比样强度见表 1。

表 1 香菇感官属性的定义及参比

Table 1 Definition and reference for sensory attributes of shiitake mushroom.

范畴	属性	定义	参比样强度
外观	干瘪	形容外观干枯收缩、不丰满	3.5 (干制)
	菌盖与菌褶色泽	指通过肉眼可以观察到的颜色和光泽	3.0 (干制)
气味	香菇味	香菇里特有的气味	3.0 (干制) 4.0 (熟制)
	硬度	产品在受力时, 对变形抵抗较大。在口腔中通过牙齿间 (固体) 或舌头与上颚间 (半固体) 对于产品的挤压而感知 (软、硬、坚硬)	4.0 (干制) 3.0 (熟制)
质构	弹性	一种固体和半固体产品的基本物理性质, 是与变形恢复速度和解除形变压力后变形物质恢复原状的程度有关的机械质地特性	1.5 (熟制)
	嫩度	形容食品入口后, 在咀嚼和吞咽时感受到的细嫩滑润感	2.0 (熟制)
	多汁性	形容产品入口后, 在口腔中感受到的一种富含水分的状态	2.0 (熟制)
风味	鲜味	由谷氨酸钠、肌苷酸二钠等特定种类的氨基酸或核苷酸钠盐的水溶液产生的一种基本味感	3.0 (熟制)
	甜味	形容如糖似蜜的, 往往令人舒适、愉快的感觉	1.0 (熟制)
	回甘	入口后在舌根和喉部的一种淡淡的甜感, 并带有滋润的感觉	2.0 (熟制)
	苦味	由奎宁、咖啡因等的稀水溶液产生的一种基本味感	3.0 (熟制)

1.4 数据统计分析

所有实验至少进行三次, 数据显示为均值±标准差。采用 SPSS 22.0 软件 (SPSS Inc., USA) 对数据进行统计学分析。采用单因素分析 (ANOVA) 和 Duncan 检验分析各组间差异 ($P<0.05$)。平均值的差异在 $P<0.05$ 时被认为是显著的。

2 结果与分析

2.1 磁共振成像的结果分析

新鲜香菇在 4 °C 贮藏的 T₂ 加权成像如图 1 所示, 亮度越高代表氢质子的信号量高即水分含量高, 磁共

振成像技术可以直观的显示出在贮藏期间香菇的水分分布。从图 1 中可以看出香菇菌褶部分和与菌柄连接处的亮度较高, 水分含量高, 菌盖区域呈现蓝色, 氢质子含量少, 水分含量很低, 随着贮藏时间的增加, 菌柄和菌褶的亮度区域逐渐减少, 菌盖区域的亮度变化不如菌褶、菌柄处显著, 且菌褶菌柄的轮廓逐渐清晰说明整个贮藏期间香菇水分逐渐损失, 尤其是菌柄和菌褶等含水量高的地方, 但 HB 预处理的样品在贮藏前期香菇所有表面的亮度均高于对照组和 IPL 处理的样品, 在贮藏后期香菇表面逐渐变暗, 这种现象表明香菇在贮藏期间首先损失水分的是表面含水量高的地方 (菌盖表面、菌褶、菌柄表面和下方) 且有研究表明在贮藏期间损失的主要是自由水^[10], HB 预处理

后的样品在贮藏期间水分含量均高于 IPL 和对照组,这也解释了 HB 处理的样品菌落总数增长率高的原因,其表面水分被微生物利用生长繁殖,新鲜香菇在贮藏后期菌褶表面水分含量较前期有所增加,这就解释了对照组后期微生物含量增加的原因。

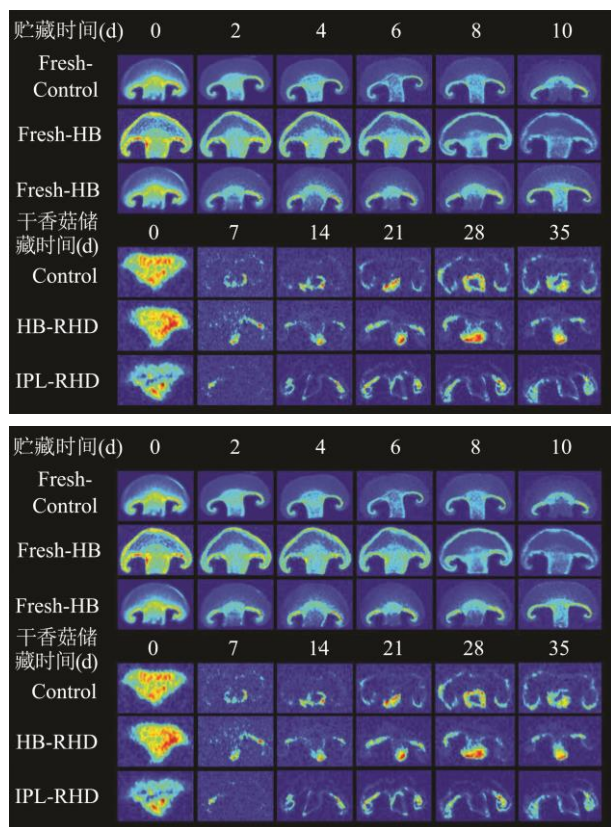


图 1 新鲜及干香菇在贮藏期间 T₂ 加权成像的影响

Fig.1 Effects of fresh and dried shiitake mushroom on T₂ weighted imaging during storage

干燥香菇的 T₂ 加权成像如图 1 所示,由表可知不论哪一种预处理条件,在贮藏的第一个周期整个香菇的亮度降低,表明在第一个贮藏周期主要是失水的过程,从干燥样品贮藏的第二周期开始容易损失水分的区域(菌褶、菌柄表面和下方)亮度增加,表明氢质子信号量增加,水分含量增加;与对照组和 HB 预处理的干制品相比较, IPL 预处理的干香菇颜色变化最不明显,表明 IPL 预处理的干香菇在整个贮藏期间水分变化不显著, IPL 预处理可以有效的阻止在贮藏过程中由水分含量变化造成的物理化学变化如褐变、细胞壁分解、微生物活动等,在整个干香菇的贮藏过程是一个水分含量增加的过程,且增加的部位一致,但质量变化无显著性差异,这也是为什么干香菇在整个贮藏期间菌落总数无显著性差异的原因。

综上所述,新鲜香菇在整个贮藏期间水分含量呈现减少趋势,干燥香菇在整个贮藏期间水分呈现先增加后减少的趋势。

2.2 贮藏对香菇呼吸强度的影响

图 2 显示了不同预处理下的新鲜和干香菇在贮藏期间呼吸速率的变化。根据结果可知,在整个贮藏期间,无论是新鲜香菇还是干香菇的呼吸速率都呈现出先增加后降低的趋势,香菇呼吸速率在贮藏前期增加的原因可能是湿度增加和香菇在采收及干燥过程中受到损伤促使香菇在贮藏期间通过增加呼吸速率来增加组织伤愈合过程,而后降低可能是因为呼吸产物增加、底物下降导致的^[11]。处理前后的新鲜香菇均在第四天的呼吸速率达到最大值。在贮藏开始时,脉冲强光和热烫预处理的香菇呼吸速率分别是对照组的 96.89% 和 92.16%,到第 10 天,脉冲强光和热烫预处理的香菇呼吸速率分别是对照组的 76.69% 和 74.31%。在整个贮藏期中相同贮藏时间,脉冲强光和热烫预处理的香菇呼吸速率均显著 ($P < 0.05$) 低于对照组,脉冲强光处理的香菇呼吸速率显著 ($P < 0.05$) 低于热烫预处理的香菇,说明通过脉冲强光和热烫预处理均可以降低新鲜香菇呼吸速率。

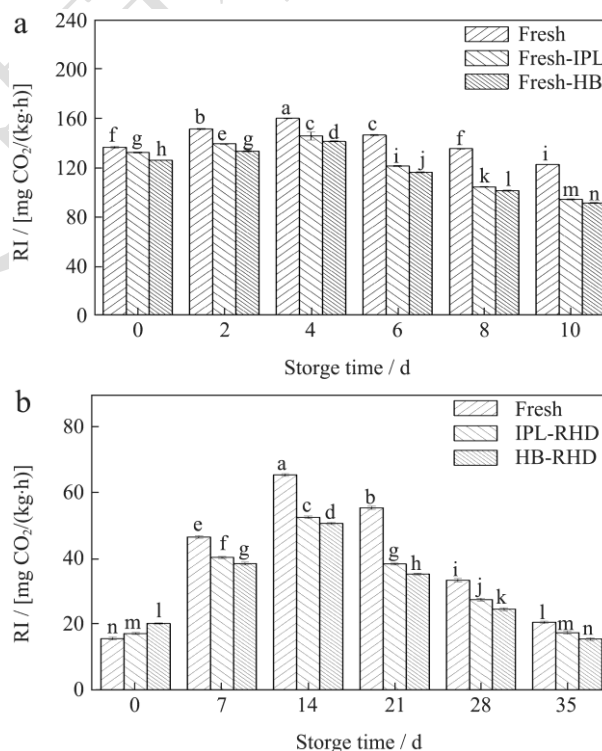


图 2 贮藏时间对新鲜香菇 (a)、干香菇 (b) 呼吸强度的影响
Fig.2 The effect of storage time on the respiratory intensity of fresh mushroom (a) and dried mushroom (b)

注: 图中不同字母表示不同样品之间存在显著性差异 ($P < 0.05$), 下图同。

干燥香菇的呼吸速率均在第 14 天达到最大值,在贮藏刚开始时,脉冲强光和热烫预处理的呼吸速率分别是对照品的 1.10 和 1.30 倍,其呼吸速率高于对照组

说明处理后的香菇在整个干燥过程呼吸强度变化低，这也解释了预处理后得到的干燥样品品质保留率高于对照组的原因，到第 10 天，脉冲强光和热烫预处理的呼吸速率分别是对照品的 84.65% 和 75.08%。随着贮藏时间的加长，相同贮藏时间内，脉冲强光和热烫预处理的香菇呼吸速率均显著 ($P < 0.05$) 低于对照组，结果表明脉冲强光和热烫预处理均可以降低香菇呼吸速率，这也为后期解释香菇在贮藏中的品质变化提供了依据。

2.3 贮藏对香菇还原糖含量的影响

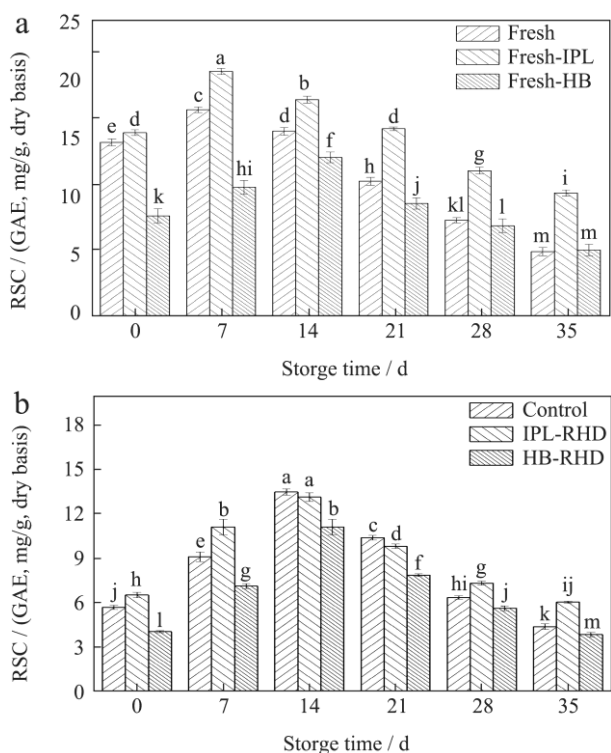


图 3 贮藏时间对新鲜香菇 (a)、干香菇 (b) 还原糖含量的影响

Fig.3 Effect of storage time on reducing sugar content of fresh shiitake mushroom (a) and dried shiitake mushroom (b)

图 3 显示了不同预处理下的新鲜和干燥后香菇在贮藏期间还原糖含量的变化，还原糖含量的变化与其呼吸速率密切相关，香菇还原糖变化趋势与呼吸速率相一致，均是先增加后减少。新鲜香菇和干香菇的呼吸速率分别在第 2 天和第 14 天达到最大值（分别为 21.25 mg/g, 13.49 mg/g），在贮藏初期还原糖含量增加的原因应该是为了满足香菇机体呼吸代谢的需要不断合成，而还原糖的积累又加速其非酶褐变的进程，随着非酶褐变的发生，还原糖作为底物含量开始下降，这也为后面 L 值的变化分析奠定了基础^[8]。无论是新鲜香菇还是干香菇，随着贮藏时间的增加，脉冲强光预处理的香菇中还原糖含量均高于对照组和热烫预处理

得到的香菇，这应该是因为脉冲强光降低了香菇在贮藏中的呼吸速率和贮藏期间的非酶褐变的程度；热烫预处理的呼吸速率低于脉冲强光预处理得到的干香菇的呼吸速率，但是其还原糖含量却低于脉冲强光预处理得到的干香菇中的还原糖含量，应该是因为热烫预处理的香菇在贮藏中非酶褐变的反应强度高于脉冲强光预处理得到的香菇。

2.4 多酚氧化酶酶活分析

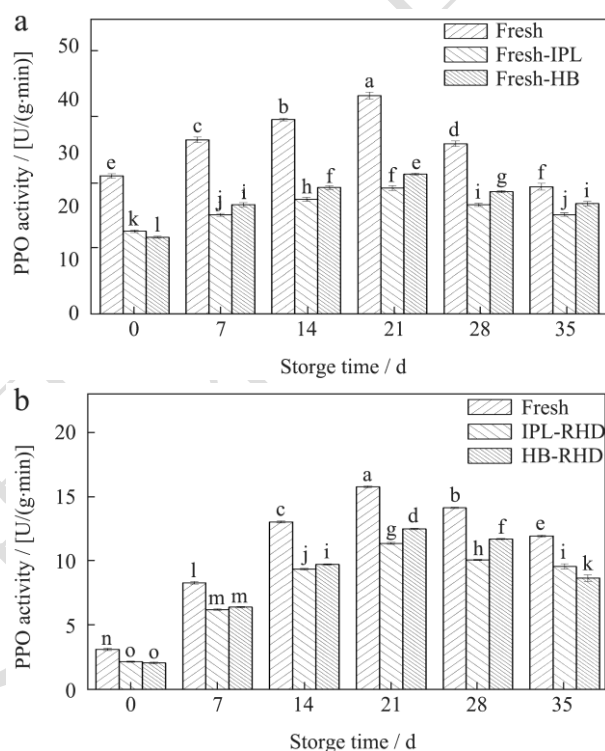


图 4 贮藏时间对新鲜香菇 (a)、干香菇 (b) PPO 含量的影响

Fig.4 Effect of storage time on PPO content of fresh shiitake mushroom (a) and dried shiitake mushroom (b)

对于新鲜的香菇，PPO 及其底物存在不同的组织中且两者均处于潜伏状态，贮藏中由于呼吸作用增强、组织加速降解、导致菇体衰老使正常膜结构分解、破坏，使 PPO 与酚类结合导致褐变发生^[23]。新鲜和干香菇在贮藏期间 PPO 的变化如图 4 所示。在贮藏前期 PPO 活性增大，分别在第 6 天、第 21 天达到最大值，然后 PPO 活性降低，且预处理后的样品显著低于对照组 ($P < 0.05$)，新鲜样品的 PPO 的最大值 40.73 U/(g·min) 是脉冲强光处理后样品的最大值 23.49 U/(g·min) 的 1.73 倍，是热烫预处理后样品最大值 26.07 U/(g·min) 的 1.56 倍，贮藏结束后新鲜样品的 PPO 值 23.74 U/(g·min) 是脉冲强光处理后样品的最大值 18.52 U/(g·min) 的 1.28 倍，是热烫预处理后样品做最大值 20.59 U/(g·min) 的 1.15 倍。对于干制品，对照组的 PPO 最大值 15.77 U/(g·min) 是脉冲强光处理后样品

最大值 11.38 U/(g min) 的 1.39 倍, 是热烫预处理后样品做大值 12.51 U/(g min) 的 1.26 倍, 贮藏结束后对照组样品的 PPO 值 11.96 U/(g min) 是脉冲强光处理后样品最大值 9.58 U/(g min) 的 1.25 倍, 是热烫预处理后干燥样品最大值 8.69 U/(g min) 的 1.38 倍。

脉冲强光和热烫预处理得到的新鲜、干制香菇在贮藏期间多酚氧化酶含量均低于对照组的原因可能是脉冲强光和热烫预处理对多酚氧化酶造成的破坏是不可逆的, 与 Concellón 等^[24]在研究茄子在贮藏中 PPO 变化的研究结果一致, 且在研究中指出 PPO 活性与 L 值直接相关, 为下文解释色差变化提供了理论基础。

2.5 总酚含量测定

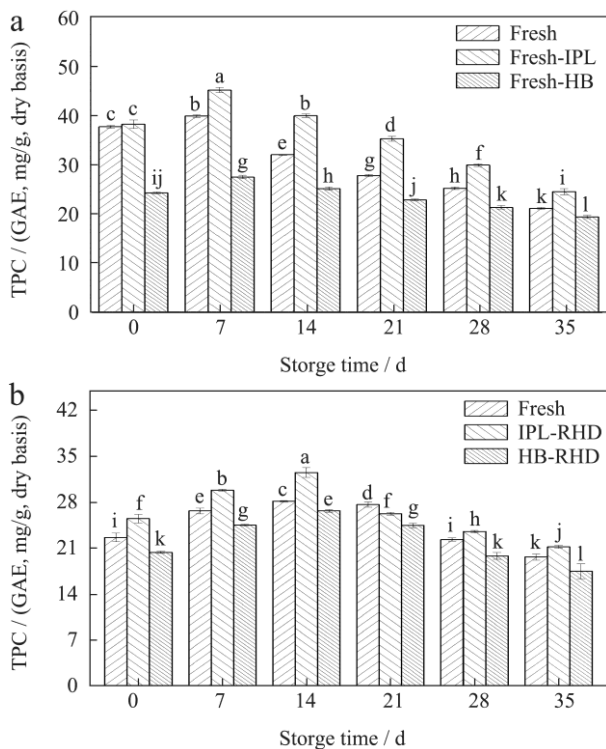


图 5 贮藏时间对新鲜香菇 (a)、干香菇 (b) 总酚含量的影响

Fig.5 Effect of storage time on TPC content of fresh shiitake mushroom (a) and dried shiitake mushroom (b)

图 5 显示了贮藏期间新鲜、干制香菇总酚含量变化, IPL 预处理不会影响新鲜香菇中的初始酚含量, 但随着新鲜香菇的不断贮藏, 总酚含量呈现出先增加后减少的趋势, 在第二天总酚含量达到最大值, 脉冲强光处理后样品的最大值 (45.39 mg/g) 是新鲜样品的 TPC 的最大值 (40.09 mg/g) 的 1.13 倍, 是热烫预处理后样品最大值 (27.69 mg/g) 的 1.64 倍, 贮藏结束后脉冲强光处理后样品的最大值 (24.70 mg/g) 是

新鲜样品的 TPC 值 (21.31 mg/g) 的 1.16 倍, 是热烫预处理后样品做大值 (19.59 mg/g) 1.26 倍。

干香菇的总酚含量同样呈现先增加后降低的趋势, 在第 14 天总酚含量达到最大值, 脉冲强光处理后样品最大值 (32.61 mg/g) 是对照组的 TPC 最大值 (28.24 mg/g) 的 1.15 倍, 是热烫预处理后样品做大值 (26.79 mg/g) 的 1.22 倍, 贮藏结束后脉冲强光处理后样品最大值 (21.31 mg/g) 是对照组样品的 TPC 值 (19.76 mg/g) 的 1.08 倍, 是热烫预处理后干燥样品最大值 (17.59 mg/g) 的 1.21 倍。无论是新鲜样品还是干制品, 热烫处理的总酚含量均最低, 主要是因为热烫温度高使总酚降解以及部分酚溶解于水中。与 Hughey 等^[25]得到的结果一致。





































2.6 贮藏对香菇褐变程度的影响

表 2 显示了香菇在贮藏中的 L、ΔE、BI、BD 值变化及实物图片外观变化, 由表可知无论是新鲜香菇还是干燥后的香菇其 L 值逐渐降低 ΔE、BI、BD 逐渐升高, 从香菇实物图片也可以看出菌盖由于褐变的发生而颜色逐渐变暗, 其中对照组与 HB 预处理组外观褐变更加明显, 这可能是酶促褐变引起的^[26]。导致香菇褐变的酶主要是多酚氧化酶, 研究表明, 脉冲强光可以抑制 PPO 活性, 因此脉冲强光预处理后得到的样品褐变程度低^[27]。褐变程度与酚含量有很好的相关性, 研究表明这是香菇颜色变化的限制因素^[26]。

由表 2 还可以看出, 贮藏结束时的 IPL 预处理后的新鲜香菇的 L、ΔE₁、BI、BD 值与未处理的新鲜香菇贮藏第六天时的 L、ΔE₁、BI、BD 值相近, 从外观上看菌盖颜色没有明显变化, 贮藏结束时 IPL 预处理后的干香菇的 L、ΔE₂、BI、BD 值处于未处理的干香菇贮藏第 7 天和第 14 天中间的 L、ΔE₂、BI、BD 值, 从干香菇的照片中可以直观地看到香菇菌盖呈现浅棕色且明亮。相同贮藏时间内 HB 预处理的新鲜香菇及干香菇的 L、ΔE₁、BI 值均比未处理和 IPL 预处理后的新鲜香菇及干香菇低, 从表 2 中香菇图片也可直观看到 HB 预处理后的新鲜香菇表面不明亮呈现深棕色, 干香菇表面不明亮呈现焦黑色, 这可能是因为高温预处理促进了美拉德反应, 并且随后形成的棕色色素影响了香菇的表面颜色和褐变程度。综上表明脉冲强光预处理不仅可以降低新鲜香菇褐变、还可以显著降低干香菇贮藏期间的褐变程度, 延长香菇的保质期。

表2 新鲜及干香菇在贮藏期间表面颜色、褐变度的影响

Table 2 Effects of fresh and dried shiitake mushroom on surface color, browning during storage

组别	新鲜香菇贮藏时间/d						
	0	2	4	6	8	10	
Fresh							
	<i>L</i>	52.97±0.33	48.21±0.25	44.37±0.21	41.24±0.27	38.64±0.51	33.80±0.29
	ΔE_1	-	5.65±0.16	8.66±0.53	11.79±0.33	14.55±0.71	19.58±0.51
	BI	49.60±0.45	53.61±2.14	57.46±1.11	68.88±0.35	83.13±0.80	106.29±1.62
BD	0.33±0.03	0.44±0.02	0.52±0.01	0.58±0.01	0.66±0.01	0.73±0.02	
Fresh-HB							
	<i>L</i>	28.99±0.84	27.49±0.22	27.36±0.44	26.91±0.08	25.06±0.83	22.11±0.18
	ΔE_1	-	2.34±0.96	2.55±0.36	3.51±0.73	5.27±0.92	8.49±0.72
	BI	45.78±1.80	48.48±1.40	52.52±1.64	57.61±1.53	58.51±1.60	63.55±0.54
BD	0.54±0.02	0.66±0.03	0.70±0.01	0.74±0.01	0.82±0.02	0.93±0.01	
Fresh-IPL							
	<i>L</i>	53.45±0.32	50.21±0.25	48.37±0.21	46.33±0.13	44.24±0.27	41.30±0.13
	ΔE_1	-	3.22±0.19	4.72±0.52	6.89±0.19	8.81±0.35	11.93±0.14
	BI	49.59±0.31	51.10±1.02	54.93±0.97	56.12±1.07	63.31±0.36	66.53±1.09
BD	0.32±0.01	0.41±0.01	0.47±0.01	0.51±0.01	0.57±0.01	0.59±0.01	
组别	干香菇贮藏时间/d						
	0	7	14	21	28	35	
Control							
	<i>L</i>	52.11±0.76	43.21±0.38	31.84±0.15	26.31±0.39	24.45±0.32	22.40±0.95
	ΔE_2	-	5.99±0.70	6.02±0.42	10.09±0.52	15.70±0.84	18.19±0.63
	BI	44.53±0.35	52.14±0.23	53.87±0.34	54.66±0.99	59.64±0.53	64.30±0.21
BD	0.59±0.02	0.70±0.01	0.79±0.01	0.86±0.01	0.96±0.01	1.07±0.02	
HB-RHD							
	<i>L</i>	28.77±0.05	28.68±0.19	27.94±0.19	22.91±0.40	19.45±0.33	17.18±0.31
	ΔE_2	-	4.35±0.31	6.55±0.42	8.35±0.23	9.27±0.27	10.15±0.25
	BI	12.53±0.78	16.24±0.40	16.83±0.64	19.65±1.19	39.28±1.09	40.35±0.28
BD	0.46±0.01	0.58±0.01	0.67±0.01	0.75±0.01	0.80±0.01	0.90±0.01	
IPL-RHD							
	<i>L</i>	51.84±0.79	46.59±0.93	40.85±0.66	37.31±0.58	31.77±0.89	38.21±0.52
	ΔE_2	-	9.50±0.54	21.27±0.67	21.87±0.48	31.33±0.38	34.21±0.15
	BI	53.86±0.40	54.34±0.65	55.20±0.57	56.38±0.23	58.97±1.13	60.15±0.22
BD	0.33±0.02	0.41±0.01	0.49±0.01	0.56±0.01	0.64±0.01	0.73±0.02	

2.7 贮藏对多糖含量的影响

新鲜香菇及干香菇在贮藏期间多糖含量变化如图 6 所示, 由图 6 可知新鲜香菇的多糖含量呈现先增加后降低的趋势, 原因可能是增加的多糖含量参与组织伤愈过程, 后期下降可能是香菇呼吸强度增加、菇体衰老。香菇多糖含量在第二天达到最大值, 脉冲强光处理的香菇多糖含量最大值 (118.05 mg/g) 是新鲜香菇多糖含量 (115.32 mg/g) 的 1.02 倍, 是热烫预处理的香菇多糖 (75.37 mg/g) 的 1.57 倍, 当贮藏结束时, 脉冲强光处理的香菇多糖含量 (92.15 mg/g) 是新鲜香菇多糖含量 (84.20 mg/g) 的 1.09 倍, 是热烫预处理的香菇多糖含量 (60.25 mg/g) 的 1.53 倍。

干香菇的多糖含量同样呈现先增加后降低的趋势, 其含量在第 14 天达到最大值, 脉冲强光处理的干香菇多糖含量最大值 (95.68 mg/g) 是对照组多糖含量 (100.42 mg/g) 的 0.95 倍, 是热烫预处理的干香菇多糖 (76.94 mg/g) 的 1.24 倍, 当贮藏结束时, 脉冲强光处理的干香菇多糖含量 (88.92 mg/g) 是对照组多糖含量 (82.39 mg/g) 的 1.08 倍, 是热烫预处理的干香菇多糖含量 (69.30 mg/g) 的 1.28 倍。脉冲强光处理的干香菇多糖含量整体变化趋势小于对照组和热烫预处理的干香菇多糖含量。

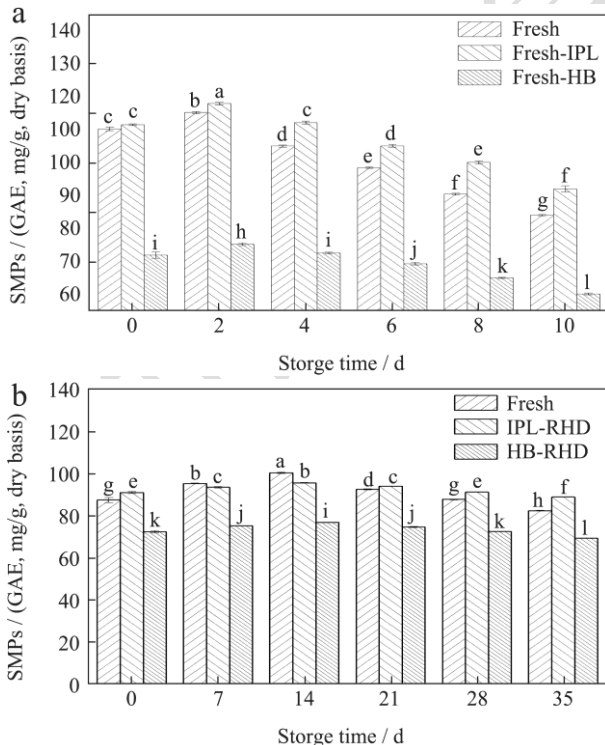


图 6 贮藏时间对新鲜香菇 (a)、干香菇 (b) 多糖含量的影响
Fig.6 Effect of storage time on SMPs content of fresh shiitake mushroom (a) and dried shiitake mushroom (b)

2.8 贮藏对香菇硬度的影响

香菇在衰老过程中硬度会逐渐降低, 这极大的减少了其采收寿命和货架期, 图 7 表明, 脉冲强光和热烫预处理显著 ($P < 0.05$) 降低了香菇在贮藏过程中硬度的损失。新鲜的香菇经过脉冲强光和热烫预处理分别获得最大硬度为 862.07、730.42 N, 贮藏结束时其硬度分别为 680.93、546.09 N; 干燥的香菇经过脉冲强光和热烫预处理分别获得最大硬度 1 102.04、2 541.08 N, 贮藏结束时其硬度分别为 606.22、1 522.18 N, 硬度的降低可能是因为脉冲强光和热烫预处理降低了贮藏过程中的感染、呼吸速率、衰老和组织降解, 进而导致香菇软化^[28]。

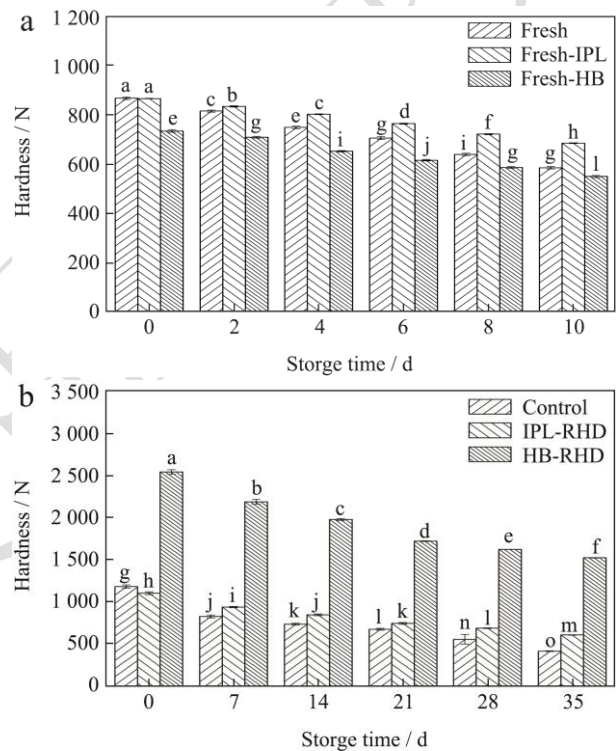


图 7 贮藏时间对新鲜香菇 (a)、干香菇 (b) 硬度的影响
Fig.7 Effect of storage time on hardness of fresh shiitake mushroom (a) and dried shiitake mushroom (b)

2.9 贮藏对香菇抗氧化性的影响

酚类化合物是香菇的主要抗氧化剂成分, 香菇抗氧化能力与总酚含量具有直接关系^[29]。图 8 中显示了通过 DPPH 和 ABTS⁺方法测量的香菇的抗氧化能力的变化, 贮藏前期抗氧化能力升高可能与酶促褐变期间醌的聚合有关^[29], 在聚合反应的早期会形成二聚体和三聚体使得抗氧化能力增加, 贮藏后期抗氧化能力降低可能与总酚含量降低, 菇体衰老有关^[30]。无论是新鲜香菇在贮藏期间的抗氧化能力还是干制香菇在贮藏期间的抗氧化能力顺序都是 IPL 预处理的香菇 > 新鲜香菇 > 热烫预处理得到的香菇。

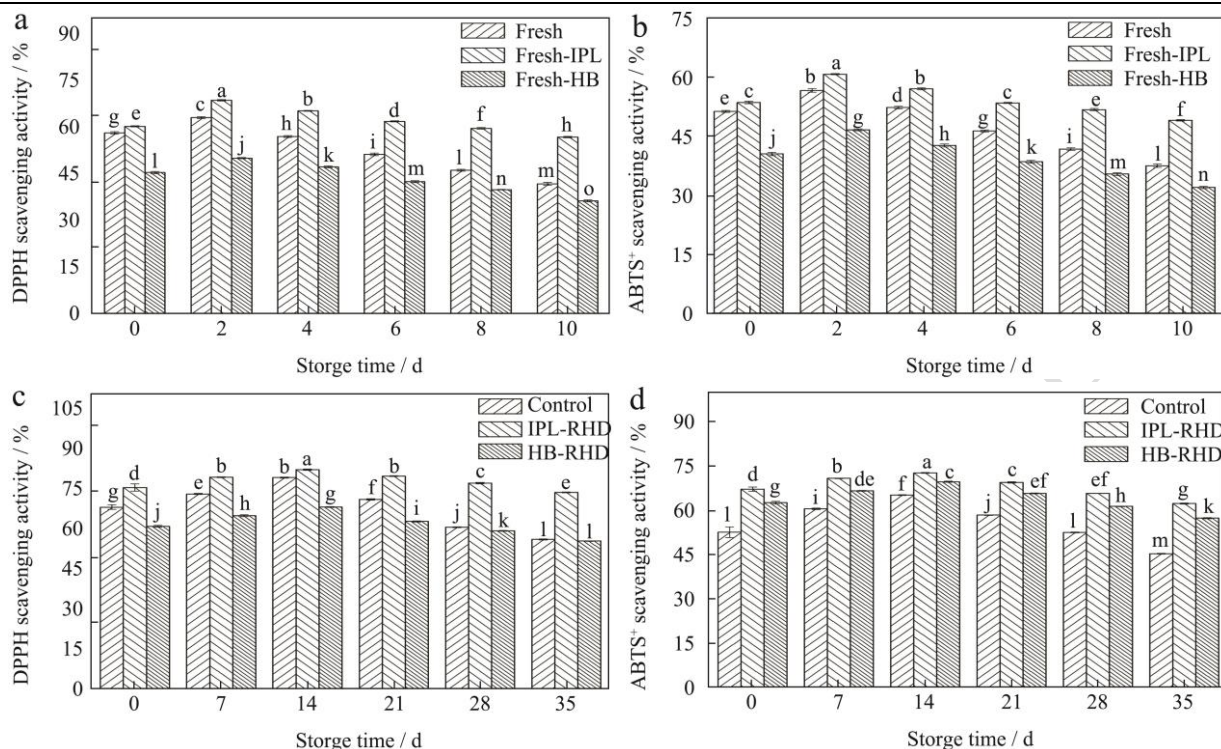


图 8 贮藏时间对新鲜香菇 (a、b)、干香菇 (c、d) 抗氧化性的影响

Fig.8 Effect of storage time on antioxidant activity of fresh shiitake mushroom (a, b) and dried shiitake mushroom (c, d)

表 3 新鲜及干香菇在贮藏期间微生物的影响 (log CFU/g)

Table 3 Effects of fresh and dried shiitake mushroom on microorganism during storage (log CFU/g)

组别	新鲜香菇贮藏时间/d					
	0	2	4	6	8	10
Fresh-Control	6.43±0.03	6.98±0.05	7.31±0.04	7.76±0.01	7.83±0.06	8.02±0.01
Fresh-HB	3.46±0.01	4.02±0.04	4.41±0.05	4.73±0.05	5.02±0.11	5.21±0.08
Fresh-IPL	3.29±0.12	3.67±0.04	3.94±0.16	4.14±0.07	4.47±0.09	4.66±0.15
组别	干香菇贮藏时间/d					
	0	7	14	21	28	35
Control	2.58±0.03	2.71±0.01	2.89±0.01	3.21±0.02	3.52±0.03	3.78±0.04
HB-RHD	2.34±0.01	2.51±0.02	2.72±0.04	3.18±0.07	3.44±0.04	3.52±0.02
IPL-RHD	2.44±0.01	2.69±0.03	2.81±0.05	3.23±0.03	3.49±0.02	3.82±0.03

2.10 贮藏对香菇微生物含量的影响

表 3 显示了新鲜香菇经热烫、脉冲强光预处理后贮藏 10 天菌落总数的变化, 由表可知, 脉冲强光和热烫预处理降低了新鲜香菇的菌落总数含量, 对数分别由新鲜香菇的 6.43~8.02 log CFU/g 减少至 3.29~4.66、3.46~5.21 log CFU/g, 热烫预处理的增加趋势高于 IPL 预处理, 应该是因为热烫预处理后得到的香菇在贮藏过程中的含水量高, 更有利于微生物的生长^[31], 由菌落总数的变化可知新鲜香菇在贮藏期间品质的变化不仅是由菌落变化导致的, 也取决于贮藏过程中褐变程度。

表 3 显示了干香菇在贮藏期间的菌落总数变化, 干燥后香菇的菌落总数降低, 主要是因为干香菇水分

含量极低。随着贮藏时间的增加, 菌落总数略有增加, 应该是贮藏条件有利于微生物生长, 但干燥前的预处理条件并没有对微生物含量造成影响, 因此, 干香菇在贮藏期间的品质变化主要是由菌体呼吸强度的强弱和褐变程度导致的。

2.11 感官评价结果分析

三种预处理方式对干香菇的感官特性影响如图 9 所示, 相较于未处理的干香菇和 HB 预处理的干香菇, IPL 预处理的干香菇菌褶与菌盖颜色更浅, 这与表 2 中表面颜色及褐变度结果分析一致。经过 IPL 预处理和 HB 预处理的干香菇在风味上香菇味比未处理要浓郁, 可能是预处理产生了部分香味物质。HB 预处理

的干香菇感官硬度最大,这可能是由于热烫处理使得香菇渗出物封闭其表面的气孔和裂缝进而使得其硬化现象较严重。HB 预处理的干香菇干瘪程度最大,因是经过热烫处理,干燥前期物料表面水分快速丢失导致皱缩。

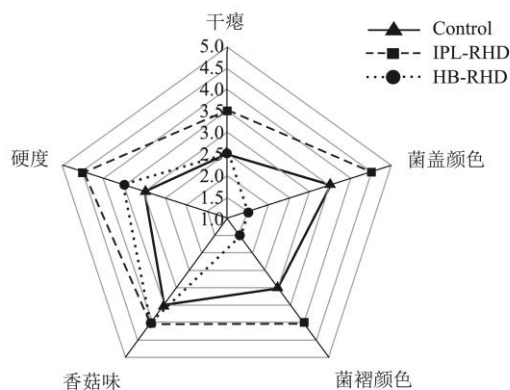


图9 不同预处理方式对干香菇的感官特性影响

Fig.9 Effect of different pretreatment methods on sensory characteristics of shiitake mushrooms.

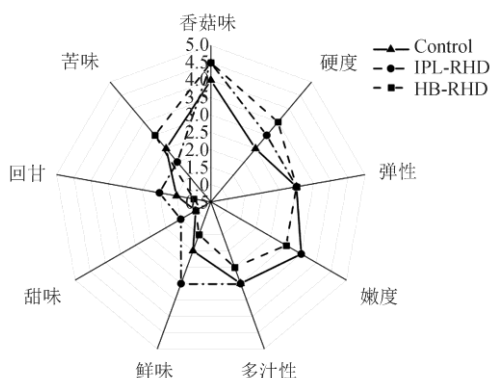


图10 不同预处理方式对熟制香菇的感官特性影响

Fig.10 Effect of different pretreatment methods on sensory characteristics of cooking shiitake mushroom.

不同预处理方式对熟制香菇的感官特性见图10。在风味方面,熟制后的HB 预处理和IPL 预处理的香菇气味较浓,与图9中干香菇感官结果一致;经过IPL 预处理后的香菇其鲜味、甜味、回甘属性均最高,这可能是由于经过脉冲强光处理后,增加了香菇中还原糖、呈味氨基酸的含量;经过HB 预处理的香菇苦味最浓,这与其表面褐变颜色结果相同,可能是热烫促进了美拉德反应,产生了一系列苦味物质。在口感方面,HB 预处理香菇口感较硬,而IPL 预处理与未处理香菇依次较容易咀嚼;在弹性、嫩度、多汁性方面,IPL 预处理与未处理香菇口感相似,口感更嫩,汁水更多,这可能与干燥过程中香菇形成的细小均匀的微观结构密切相关^[32]。综上可以得出,经过IPL 预处理的干香菇具有更好的口感品质。

3 结论

脉冲强光处理可以降低贮藏期间新鲜和干香菇的呼吸速率,延长贮藏期,提高还原糖的保留率。脉冲强光抑制了PPO 活性,有利于减缓酶促褐变,提高香菇在贮藏期间总酚的保留率。脉冲强光处理使多糖保留率和抗氧化能力较高,延缓软化。脉冲强光预处理可以显著降低新鲜香菇在贮藏期间的菌落总数,但是对干香菇在贮藏期间菌落总数的变化影响不显著。本文研究为脉冲强光作为一种潜在技术手段应用于提高香菇储藏品质提供参考。

参考文献

- [1] 高帅平,魏书信,王安建,等.两种气调保鲜方式对香菇贮藏品质及生理生化性质的影响[J].食品工业科技,2021,42(4): 276-281.
- [2] Cao Z Z, Zhou L Y, Bi J F, et al. Effect of different drying technologies on drying characteristics and quality of red pepper (*Capsicum frutescens* L.): a comparative study [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, 96(10): 3596-3603.
- [3] 张卫鹏,高振江,肖红伟,等.基于Weibull 函数不同干燥方式下的茯苓干燥特性[J].农业工程学报,2015,31(5):317-324.
- [4] Gómez-López V M, Ragaert P, Debevere J, et al. Pulsed light for food decontamination: a review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2007, 18(9): 464-473.
- [5] Bank H L, John J, Schmehl M K, et al. Bactericidal effectiveness of modulated UV light [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1990, 56: 3888-3889.
- [6] Artés F, Allende A. Processing lines and alternative preservation techniques to prolong the shelf-life of minimally processed leafy vegetables [J]. European Journal of Horticultural Science, 2005, 70: 231-245.
- [7] Hollósy F. Effects of ultraviolet radiation on plant cells [J]. Micron, 2002, 33: 179-197.
- [8] 张瑾.基于收缩、褐变及贮藏特性的香菇脉冲强光联合控湿干燥研究[D].镇江:江苏大学,2021.
- [9] Zhang J, Yu X, Xu B, et al. Effect of intensive pulsed light on the activity, structure, physico-chemical properties and surface topography of polyphenol oxidase from mushroom [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2021, 72: 102741.
- [10] 李然然.基于低场核磁技术研究香菇干燥及贮藏过程中的品质变化[D].大连:大连工业大学,2019.
- [11] Jiang T J, Feng L F, Li J R. Changes in microbial and

- postharvest quality of shiitake mushroom (*Lentinusedodes*) treated with chitosan-glucose complex coating under cold storage [J]. Food Chemistry, 2012, 131(3): 780-786.
- [12] Jin X, Yang R, Guo L, et al. iTRAQ analysis of low-phytatemung bean sprouts treated with sodium citrate, sodium acetate and sodium tartrate [J]. Food Chemistry, 2017, 218: 285-293.
- [13] Sukhonthara S, Kaewka K, Theerakulkait C. Inhibitory effect of rice bran extracts and its phenolic compounds on polyphenol oxidase activity and browning in potato and apple puree [J]. Food Chemistry, 2016, 190: 922-927.
- [14] Chen T, Zhang Y, Shang Y, et al. NBD-BPEA regulates Zn(2+)- or Cu(2+)-induced Aβ40 aggregation and cytotoxicity [J]. Food Chemistry Toxicol, 2018, 119: 260-267.
- [15] Feng Y, Yu X, Yagoub A E A, et al. Vacuum pretreatment coupled to ultrasound assisted osmotic dehydration as a novel method for garlic slices dehydration [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 50: 363-372.
- [16] Dibanda R F, Akdowa E P, Rani P A, et al. Effect of microwave blanching on antioxidant activity, phenolic compounds and browning behaviour of some fruit peelings [J]. Food Chemistry, 2020, 302: 125308.
- [17] Murtaza A, Iqbal A, Zhu L H, et al. Effect of high-pressure carbon dioxide on the aggregation and conformational changes of polyphenol oxidase from apple (*Malus domestica*) juice [J]. Innovative Food Science & Emerging, 2019, 54: 43-50.
- [18] Zhang J, Wen C, Gu J, et al. Effects of subcritical water extraction microenvironment on the structure and biological activities of polysaccharides from *Lentinusedodes* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 123: 1002-1011.
- [19] 肖菲.微波杀菌对香菇品质的影响[D].上海:上海交通大学, 2012.
- [20] Min B, Gu L, McClung A M, et al. Free and bound total phenolic concentrations, antioxidant capacities, and profiles of proanthocyanidins and anthocyanins in whole grain rice (*Oryza sativa* L.) of different bran colours [J]. Food Chemistry, 2012, 133(3): 715-722.
- [21] Liu Y, Huang G. The antioxidant activities of carboxymethylated cushaw polysaccharide [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 121: 666-670.
- [22] Wang X, Feng Y, Zhou C, et al. Effect of vacuum and ethanol pretreatment on infrared-Hot air convection drying of scallion (*Allium fistulosum*) [J]. Food Chemistry, 2019, 295: 432-440.
- [23] Murata M, Tsurutani M, Hagiwara S, et al. Subcellular location of polyphenol oxidase in apples [J]. Biosci Biotechnol Biochem, 1997, 61(9): 1495-1499.
- [24] Concellón A, Añón M C, Chaves A R. Characterization and changes in polyphenol oxidase from eggplant fruit (*Solanum melongena* L.) during storage at low temperature [J]. Food Chemistry, 2004, 88(1): 17-24.
- [25] Hughey C A, Januszewicz R, Minardi C S, et al. Distribution of almond polyphenols in blanch water and skins as a function of blanching time and temperature [J]. Food Chemistry, 2012, 131(4): 1165-1173.
- [26] Zhang S, Yu Y, Xiao C, et al. Effect of carbon monoxide on browning of fresh-cut lotus root slice in relation to phenolic metabolism [J]. LWT - Food Science and Technology, 2013, 53(2): 555-559.
- [27] Manzocco L, Panozzo A, Nicoli M C. Inactivation of polyphenoloxidase by pulsed light [J]. Food Science, 2013, 78(8): E1183-E1187.
- [28] Sastry S K, Datta A K, Worobo R W. Ultraviolet light [J]. Journal of Food Science, 2000, 65(s8): 90-92.
- [29] Park D H, Park J J, Olawuyi I F, et al. Quality of White mushroom (*Agaricus bisporus*) under argon- and nitrogen-based controlled atmosphere storage [J]. Scientia Horticulturae, 2020, 265: 109229.
- [30] Liu Q, Kong W, Hu S, et al. Effects of oudemansiellaradicata polysaccharide on postharvest quality of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) and its antifungal activity against *Penicillium digitatum* [J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 166: 111207.
- [31] Wu B, Guo Y, Wang J, et al. Effect of thickness on non-fried potato chips subjected to infrared radiation blanching and drying [J]. Journal of Food Engineering, 2018, 237: 249-255.
- [32] 赵圆圆,易建勇,毕金峰,等.干燥方式对复水香菇感官、质构及营养品质的影响[J].食品科学,2019,40(3):101-108.