

文章编号:1000-8551(2020)05-0994-08

脉冲强光处理对双孢蘑菇贮藏品质的影响

周婷婷¹ 曹少谦¹ 张 境² 叶文倩¹ 戚向阳^{1,*}⁽¹浙江万里学院生物与环境学院,浙江 宁波 315100;²浙江医药高等专科学校食品学院,浙江 宁波 315100)

摘 要:为探索脉冲强光(IPL)处理对采后食用菌贮藏品质的影响,本试验以新鲜双孢蘑菇为原料,采用不同强度(28.8、48.0、67.2 mJ·cm⁻²)的IPL进行前处理,研究其在25℃贮藏期间生理指标及品质的变化。结果表明,随着贮藏时间的延长,IPL处理能有效延缓双孢蘑菇开伞、质量损失、褐变及脂膜氧化,在一定程度上保持原有硬度。同时,IPL处理可显著抑制双孢蘑菇中过氧化物酶(POD)和多酚氧化酶(PPO)活性($P<0.05$),可减缓其总酚和维生素C含量的下降($P<0.05$),其中48.0 mJ·cm⁻²处理组效果最佳;贮藏第8天,总酚和维生素C含量分别较对照提高39.06%、53.63%。本研究结果为IPL技术在控制食用菌品质方面的应用提供了一定的理论依据。

关键词:脉冲强光;双孢蘑菇;储藏品质

DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2020.05.0994

双孢蘑菇(*Agaricus bisporus*)又名洋蘑菇、白蘑菇,属担子菌纲(basidiomycetes)伞菌目(agaricales)伞菌科(agaricaceae)伞菌属(*agaricus*),是世界范围内广泛栽培的食用菌^[1]。双孢蘑菇色泽洁白、肉质肥嫩、味道鲜美、营养价值极高,富含蛋白质、氨基酸、矿物质及微量元素等,具有降血压、降血脂、抗癌、护肝等多种保健功能^[2-3]。然而,双孢蘑菇含水量高、组织细嫩、菌盖无明显保护结构,表皮极易擦伤,且采后呼吸代谢旺盛,容易发生破膜、褐变与腐败^[4],在加工和贮藏过程中造成较大经济损失。近年来,国内外对双孢蘑菇的保鲜已有大量研究,如低温保鲜^[5]、气调保鲜^[6]、化学保鲜^[1,7]及辐照保鲜^[8]等,但仍存在药剂残留、酚酶残存及氧化损伤等诸多问题。与其他常规保鲜技术相比,辐照保鲜具有无化学残留、加工高效、能较好保持子实体新鲜状态等优点,具有较高的应用价值^[9]。但辐照技术也存在一些问题,如消费者对 γ 射线辐照后的食品放射性残留等安全问题持怀疑态度;电子束辐照易造成维生素C损失^[10];紫外短波(ultraviolet-C, UV-C)处理使菌盖随贮藏时间的延长褐变程度加剧^[11]。因此,选取合适的辐照技术来解决及改善采后

食用菌储藏问题具有重要的现实意义。

脉冲强光(intense pulsed light, IPL)又称脉冲紫外线^[12],是一种新型辐照技术。IPL利用瞬时(<100 μ s)、广波谱(200~1100 nm)、高强度(相当于太阳光到达地球表面的2万倍)的惰性气体光源对透明液体、固态食品及包装材料表面进行杀菌^[13],达到延长食品有效期的目的,并保持或提高食品的天然品质。目前,IPL技术在杀菌^[14]、钝酶^[15]、提高食品品质^[16]等方面已有较多研究,而在改善食用菌品质方面的应用还较少。Kalaras等^[17]研究表明IPL处理可提高双孢蘑菇维生素D₂含量;Chien等^[18]发现IPL处理后的香菇维生素D₂和总酚含量及抗氧化活性增加;曹少谦等^[19]采用IPL技术提高香菇麦角固醇向维生素D₂转化效率的同时,提高了香菇中还原糖和维生素C的含量。上述研究均只阐述经IPL处理后食用菌部分品质的变化,并未对其在贮藏过程中的变化进行研究,故本试验探讨IPL处理对采后双孢蘑菇生理品质及贮藏期的影响,以期新型食用菌保鲜技术的应用与开发提供理论依据。

收稿日期:2018-09-05 接受日期:2018-12-03

基金项目:浙江省“生物工程”一流学科开放基金(KF2019005),宁波市自然科学基金(2018A610335),浙江省重中之重学科学生创新项目(CX2017018),浙江省重中之重学科开放基金(KF2016004)

作者简介:周婷婷,女,主要从事天然产物化学研究。E-mail: ichemzhou@163.com

* 通讯作者:戚向阳,女,教授,主要从事天然产物化学研究。E-mail: qixiangyang85@sina.com

1 材料与方 法

1.1 试验材料与试剂

新鲜双孢蘑菇,同批采收于宁波市蔬菜批发市场,于室温下当天运回实验室。

愈创木酚(化学纯),上海佘山化工厂;福林酚试剂($1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$),上海源聚生物科技有限公司;抗坏血酸(分析纯),宜兴市苏南化工材料厂。其他试剂均为分析纯,购自国药集团化学试剂有限公司。

1.2 主要仪器与设备

C400 * 8 * 6.5-18 型 IPL 设备,纯亮杀菌设备有限公司。参数如下:单次脉冲强度 $3.2\text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$,紫外区占总能量约 20%,其中 C 波段(220~280 nm)占 8%,B 波段(280~320 nm)占 4%,A 波段(320~400 nm)占 8%,脉冲频率 $3\text{ 次}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

CT3-4500 质构仪,美国 Brookfield 公司;GL-20G-II 高速冷冻离心机,上海安亭科学仪器厂;754 紫外-可见分光光度计,上海菁华科技仪器公司。

1.3 试验方法

1.3.1 双孢蘑菇 IPL 处理 选择子实体朵形完整、色泽洁白,成熟度、大小一致,无畸形、无机械损伤及无病虫害的双孢蘑菇作为试验材料,并做去柄处理,分别用 IPL 双面照射处理 0、9、15、21 次(依次相当于强度为 0、28.8、48.0、67.2 $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$),以 $0\text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 处理组为对照。处理后的双孢蘑菇用打孔的保鲜袋(双面打孔,每面 10 个孔)分装,25℃ 恒温恒湿贮藏,每隔 2 d 测定相关指标。

1.3.2 开伞率测定 以开伞个数占总个数的比为计。

1.3.3 失重率测定 参照 Antmann 等^[20]的方法。称量贮藏过程中双孢蘑菇的质量,以其变化量占贮藏前质量的百分比为失重率。

1.3.4 硬度测定 参照 Ye 等^[21]的方法。采用质构仪测定,探头以 $2.0\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速率升降,测试速率为 $2.0\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,下压深度为 5 mm。

1.3.5 过氧化物酶(peroxidase, POD)活性测定 参照李合生^[22]的方法,并稍作修改。剪碎双孢蘑菇,按 1:1(m/v)的比例加入 4℃ 预冷的 $50\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ pH 值 7.0 的磷酸缓冲液和 1% 聚乙烯吡咯烷酮(polyvinylpyrrolidone, PVP)在冰浴中快速匀浆,匀浆液在 4℃、8 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下离心 10 min,上清液即为粗酶液,备用。取 1 mL 0.5% 愈创木酚、1.8 mL 醋酸缓冲液($0.2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, pH 值 5.8)、0.1 mL 0.75% 过氧化氢置于比色皿中,最后再加入 0.2 mL 粗酶液(空白对照加入

0.2 mL $0.2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ pH 值 5.8 的醋酸缓冲液),快速混匀后于 470 nm 波长处测定吸光度值,并记录 3 min 内的吸光度值,每 30 s 记录一次。以每克鲜重的 POD 活性初始每分钟增加的 0.01 个光密度值为一个酶活性单位($\text{U}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$)。按照公式计算 POD 活性:

$$\text{POD 活性} = \frac{\Delta A \times V_t}{0.01 \times G_s \times W \times t} \quad (1)$$

式中, ΔA 为反应时间内吸光值的变化; V_t 为缓冲液体积, mL; G_s 为粗酶液体积, mL; W 为样品鲜重, g; t 为反应时间, min。

1.3.6 多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)活性测定 参照 Augustin 等^[23]和王耀松^[24]的方法,并加以改进。剪碎后的双孢蘑菇按 1:5 的料液比(m/v)加入预冷的磷酸缓冲液($50\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, pH 值 7.0)和 1% PVP 匀浆,在 4℃、8 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下离心 10 min,上清液即为粗酶液。取 2.8 mL $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 儿茶酚于比色皿中,加入 0.2 mL 粗酶液(空白加 0.2 mL 磷酸缓冲液),快速混匀后于 410 nm 波长处测定吸光度值,并记录 3 min 内的吸光度值,每 30 s 记录一次。以每克鲜重的 PPO 活性初始每分钟增加的 0.001 个光密度值为一个酶活性单位($\text{U}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$)。按照公式计算 PPO 活性:

$$\text{PPO 活性} = \frac{\Delta A \times V_t}{0.001 \times G_s \times W \times t} \quad (2)$$

式中, ΔA 为反应时间内吸光值的变化; V_t 为缓冲液体积, mL; G_s 为粗酶液体积, mL; W 为样品鲜重, g; t 为反应时间, min。

1.3.7 褐变度(browning degree, BD)测定 参考王清章等^[25]的方法。称取适量双孢蘑菇,以 1:10 的料液比在蒸馏水中煮沸 30 s,快速冷却后研磨 1 min,4℃、8 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下离心 10 min,上清液于 410 nm 波长处测定吸光度值,即为 BO。

1.3.8 丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量测定 采用硫代巴比妥酸法^[26]。双孢蘑菇剪碎称重,按 1:5 的料液比加入预冷的 10% 三氯乙酸匀浆,在 4℃、8 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下离心 10 min,取上清液 2 mL,加入 2 mL 0.5% 硫代巴比妥酸后混匀,沸水浴 15 min,冷却后 4℃、8 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下离心 5 min,上清液分别于 450、532、600 nm 处测定吸光度值。按照公式计算 MDA 含量:

$$X = \frac{[(A_{532} - A_{600}) \times 6.452 - 0.559 \times A_{450}] \times V_T}{W} \quad (3)$$

式中, X 为 MDA 含量, $\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}$; V_T 为提取液体

积, mL; W 为样品鲜重, g。

1.3.9 总酚含量测定 采用福林酚法^[27], 并作适当修改。取适量双孢蘑菇, 剪碎研磨, 加入 80%乙醇(料液比 1:10, m/v)超声提取 30 min, 常压过滤, 收集滤液备用。取 1 mL 提取液, 加入 6 mL 蒸馏水和 0.5 mL 福林酚试剂混匀, 反应 1 min 后加入 1.5 mL 20%碳酸钠, 蒸馏水定容至 10 mL, 75℃水浴 10 min, 冷却后于 760 nm 处测定吸光度值。以没食子酸作标准品, 采用外标法定量。

1.3.10 维生素 C 含量测定 根据王林霞等^[28]的方法, 并作适当修改。称取适量双孢蘑菇, 加入预冷的 1%盐酸(料液比 5:2, m/v)冰浴研磨, 用蒸馏水定容至 50 mL, 4℃, 8 000 r·min⁻¹条件下离心 10 min。取 2 mL 上清液, 加入 4 mL 10%盐酸, 用蒸馏水定容至 50 mL, 于 243 nm 波长处测定吸光度值。

1.4 数据统计与分析

所有试验均平行测定 3 次, 用 GraphPad Prism 6.0 软件作图, SPSS Statistics 24.0 软件分析方差, $P < 0.05$ 表示显著差异。

2 结果与分析

2.1 IPL 处理对贮藏期内双孢蘑菇开伞率的影响

由表 1 可知, 对照组双孢蘑菇从第 2 天开伞, 贮藏至第 8 天几乎全部开伞。28.8 mJ·cm⁻² 处理组从第 4 天开始开伞, 48.0、67.2 mJ·cm⁻² 处理组贮藏 6 d 后才

开伞, 贮藏结束时, 各处理组开伞率明显低于对照组, 且中、高强度 IPL 处理组效果更优。表明 IPL 处理能有效减缓双孢蘑菇在贮藏期间的开伞。

表 1 IPL 处理对贮藏期内双孢蘑菇开伞率的影响

Table 1 Effect of IPL treatments on cap opening rate of *Agaricus bisporus* during storage

| 脉冲强度 Pulsed intensity/(mJ·cm ⁻²) | 贮藏时间 Storage time/d | | | | |
|---|---------------------|-----|-----|-----|-----|
| | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 |
| 0(对照) | 0/7 | 1/7 | 3/7 | 4/7 | 6/7 |
| 28.8 | 0/7 | 0/7 | 1/7 | 2/7 | 4/7 |
| 48.0 | 0/7 | 0/7 | 0/7 | 1/7 | 2/7 |
| 67.2 | 0/7 | 0/7 | 0/7 | 1/7 | 2/7 |

2.2 IPL 处理对贮藏期内双孢蘑菇失重率的影响

由表 2 可知, 随着贮藏时间的延长, 双孢蘑菇的失重率持续增加, 这是由于刚采收的双孢蘑菇含水量高达 90%, 但其几乎没有角质层来防止水分散失, 单向的蒸腾作用导致菇体内水分损失, 同时呼吸作用伴随有机物的分解代谢, 子实体出现干瘪、皱缩而导致开伞、质量减轻等^[29-30]。贮藏第 4 天时, IPL 处理组失重率显著低于对照组, 这可能是 IPL 处理抑制了子实体内线粒体呼吸代谢相关酶活性, 导致其代谢速度减缓, 失重的速度减慢。贮藏至第 8 天时, 对照组双孢蘑菇失重率为 6.16%, 子实体萎蔫程度较严重, IPL 处理组双孢蘑菇的新鲜度优于对照组。说明 IPL 处理在一定程度上能延缓双孢蘑菇在贮藏过程中失重率的上升。

表 2 IPL 处理对贮藏期内双孢蘑菇失重率的影响

Table 2 Effect of IPL treatments on weight loss rate of *Agaricus bisporus* during storage

| 脉冲强度 Pulsed intensity/(mJ·cm ⁻²) | 贮藏时间 Storage time/d | | | | | /% |
|---|---------------------|------------|------------|------------|------------|----|
| | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | |
| 0(对照) | 0.00±0.00a | 1.16±0.02b | 2.70±0.01a | 4.40±0.02a | 6.16±0.03a | |
| 28.8 | 0.00±0.00a | 1.07±0.03b | 1.97±0.02b | 3.01±0.01b | 5.46±0.01b | |
| 48.0 | 0.00±0.00a | 1.35±0.03a | 2.17±0.01b | 2.99±0.01b | 4.99±0.02c | |
| 67.2 | 0.00±0.00a | 1.51±0.01a | 2.16±0.03b | 3.21±0.02b | 5.10±0.01c | |

注: 同列不同小写字母表示显著差异 ($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at 0.05 level. The same as following.

2.3 IPL 处理对贮藏期内双孢蘑菇硬度的影响

由表 3 可知, 48.0、67.2 mJ·cm⁻² 处理组双孢蘑菇的硬度在整个贮藏期内变化较小, 而 28.8 mJ·cm⁻² 处理组在贮藏前 6 d 变化不大, 贮藏至第 8 天时明显降低。对照组双孢蘑菇硬度在贮藏第 2 天时下降, 之后随贮藏时间的延长持续上升, 至第 8 天显著高于各 IPL 处理组。上述结果表明, IPL 处理有利于双孢蘑菇

保持一定的硬度。

2.4 IPL 处理对贮藏期内双孢蘑菇 POD 活性的影响

由表 4 可知, 贮藏 2 d 时, 双孢蘑菇 POD 活性均升高, 但对照组 POD 活性上升速度大于各 IPL 处理组 ($P < 0.05$)。贮藏至第 4 天时, 各试验组 POD 活性均明显下降, 且 IPL 处理组 POD 活性与对照组之间无显著差异; 贮藏第 6 天时, IPL 处理组 POD 活性均显著

表3 IPL处理对贮藏期内双孢蘑菇硬度的影响

Table 3 Effect of IPL treatments on firmness of *Agaricus bisporus* during storage

| 脉冲强度 Pulsed intensity/($\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$) | 贮藏时间 Storage time/d | | | | |
|---|---------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 |
| 0(对照) | 534.00±18.80b | 437.33±21.73c | 589.00±6.00b | 675.33±46.29a | 788.33±45.25a |
| 28.8 | 599.00±11.36ab | 603.67±9.29b | 568.00±29.51b | 624.00±38.51a | 479.00±18.03c |
| 48.0 | 688.33±45.58a | 764.67±27.10a | 769.67±35.64a | 690.00±41.39a | 674.67±21.57b |
| 67.2 | 575.00±39.00b | 604.33±45.22b | 726.33±22.03a | 664.00±37.00a | 702.67±43.90b |

表4 IPL处理对贮藏期内双孢蘑菇 POD活性的影响

Table 4 Effect of IPL treatments on peroxidase activity of *Agaricus bisporus* during storage

| 脉冲强度 Pulsed intensity/($\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$) | 贮藏时间 Storage time/d | | | | |
|---|---------------------|------------|------------|------------|------------|
| | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 |
| 0(对照) | 3.01±0.54c | 4.94±0.04a | 1.33±0.35a | 2.54±0.08a | 0.99±0.05a |
| 28.8 | 3.46±0.25ab | 3.77±0.22c | 1.48±0.13a | 2.05±0.26b | 0.69±0.08b |
| 48.0 | 3.75±0.08a | 4.65±0.13b | 1.29±0.14a | 1.80±0.10c | 0.43±0.06c |
| 67.2 | 3.53±0.20ab | 3.60±0.05c | 1.42±0.13a | 2.24±0.08b | 0.67±0.08b |

低于对照组 ($P<0.05$); 贮藏至第 8 天时, 48.0 $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 处理组 POD 活性最低, 其余 2 个 IPL 处理组之间无显著差异。上结果说明 IPL 处理使双孢蘑菇在贮藏后期的 POD 活性低于对照组。

2.5 IPL处理对贮藏期内双孢蘑菇 PPO活性的影响

由表 5 可知, 贮藏前 2 d, 双孢蘑菇 PPO 活性无明

显变化; 贮藏至第 4 天时, 各组 PPO 活性均迅速升高; 贮藏第 6 天时, 48.0 $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 处理组 PPO 活性显著低于对照组 ($P<0.05$); 贮藏至第 8 天时, 各 IPL 处理组 PPO 活性均显著低于对照组 ($P<0.05$)。上述结果表明, 与对照组相比, 在贮藏后期 IPL 处理能显著抑制双孢蘑菇 PPO 活性的升高。

表5 IPL处理对贮藏期内双孢蘑菇 PPO活性的影响

Table 5 Effect of IPL treatments on polyphenol oxidase activity of *Agaricus bisporus* during storage

| 脉冲强度 Pulsed intensity/($\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$) | 贮藏时间 Storage time/d | | | | |
|---|---------------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 |
| 0(对照) | 530.83±5.14b | 461.54±32.77b | 1 051.87±5.80b | 1 159.80±11.39a | 1 033.22±8.26a |
| 28.8 | 495.30±29.34c | 525.41±6.25ab | 1 072.29±28.52b | 1 131.92±17.16a | 994.64±12.90b |
| 48.0 | 543.96±9.64b | 591.78±35.73a | 1 026.26±12.45b | 1 040.74±30.09b | 979.22±11.15c |
| 67.2 | 661.70±10.63a | 464.68±30.91b | 1 171.38±35.8a | 1 174.27±38.75a | 1 009.71±11.35b |

2.6 IPL处理对贮藏期内双孢蘑菇褐变度(BD)的影响

由表 6 可知, 随着贮藏时间的延长, 双孢蘑菇 BD 整体呈增加趋势。贮藏第 6 天时, 28.8、48.0 $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 处理组 BD 显著低于对照组 ($P<0.05$); 贮藏至第 8

天, IPL 处理组 BD 均显著低于对照组 ($P<0.05$), 其中 IPL 处理组 BD 由大到小依次为 28.8 $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}<67.2$ $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}<48.0$ $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。上述结果说明 IPL 处理能有效延缓贮藏后期双孢蘑菇褐变度的增加。

表6 IPL处理对贮藏期内双孢蘑菇褐变度的影响

Table 6 Effect of IPL treatments on browning degree of *Agaricus bisporus* during storage

| 脉冲强度 Pulsed intensity/($\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$) | 贮藏时间 Storage time/d | | | | |
|---|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 |
| 0(对照) | 0.071±0.001c | 0.120±0.003c | 0.143±0.001c | 0.202±0.001a | 0.267±0.001a |
| 28.8 | 0.117±0.001a | 0.101±0.002d | 0.184±0.002b | 0.181±0.001b | 0.236±0.002b |
| 48.0 | 0.089±0.002b | 0.142±0.001a | 0.147±0.002c | 0.148±0.002c | 0.209±0.001d |
| 67.2 | 0.071±0.002c | 0.134±0.001b | 0.168±0.003a | 0.196±0.001a | 0.221±0.001c |

2.7 IPL 处理对贮藏期内双孢蘑菇 MDA 含量的影响

由表 7 可知,在双孢蘑菇贮藏过程中 MDA 含量整体呈上升趋势,其中 48.0 $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 处理组的变化较平缓。贮藏 4 d 后,67.2 $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 处理组 MDA 含量显著

低于对照组 ($P<0.05$);贮藏第 8 天,各处理组 MDA 含量均显著低于对照组 ($P<0.05$),但不同处理组之间的差异无统计学意义。表明 IPL 处理对贮藏后期双孢蘑菇 MDA 含量的升高有一定的抑制作用。

表 7 IPL 处理对贮藏期内双孢蘑菇 MDA 含量的影响

Table 7 Effect of IPL treatments on malondialdehyde content of *Agaricus bisporus* during storage / ($\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$)

| 脉冲强度 Pulsed intensity/ $(\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2})$ | 贮藏时间 Storage time/d | | | | |
|--|---------------------|------------|------------|------------|------------|
| | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 |
| 0(对照) | 2.21±0.04b | 2.85±0.09b | 3.37±0.03b | 2.95±0.03a | 4.64±0.19a |
| 28.8 | 1.86±0.07c | 2.43±0.01c | 3.75±0.06a | 2.91±0.03a | 3.82±0.11b |
| 48.0 | 2.33±0.14b | 3.04±0.07a | 3.34±0.09b | 2.96±0.03a | 3.72±0.08b |
| 67.2 | 2.65±0.04a | 3.00±0.02a | 3.09±0.05c | 2.63±0.06b | 3.76±0.10b |

2.8 IPL 处理对贮藏期内双孢蘑菇总酚含量的影响

由表 8 可知,贮藏前 2 d,各组双孢蘑菇中总酚含量快速上升,其中 48.0、67.2 $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 处理组总酚含量显著高于对照组 ($P<0.05$)。贮藏第 4 天时,各组的总酚含量又迅速下降,之后随着贮藏时间的延长变化较平缓,而 48.0 $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 处理组总酚含量从第 4 天开始

显著高于对照组 ($P<0.05$);贮藏第 8 天时,各 IPL 处理组总酚含量均显著高于对照组 ($P<0.05$),且 28.8、48.0 和 67.2 $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 处理组较对照组分别提高 20.07%、39.06%、7.59%。上述结果说明 IPL 处理能有效保留贮藏后期双孢蘑菇的总酚含量。

表 8 IPL 处理对贮藏期内双孢蘑菇总酚含量的影响

Table 8 Effect of IPL treatments on total phenolic content of *Agaricus bisporus* during storage / ($\text{mg}\cdot 100\text{g}^{-1}$)

| 脉冲强度 Pulsed intensity/ $(\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2})$ | 贮藏时间 Storage time/d | | | | |
|--|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 |
| 0(对照) | 33.55±0.13c | 62.15±0.27c | 34.21±0.21c | 37.28±0.27b | 25.58±0.25d |
| 28.8 | 40.98±0.13a | 48.36±1.66d | 36.79±0.27b | 34.80±0.40c | 30.71±0.81b |
| 48.0 | 36.01±0.74b | 72.20±0.40b | 37.92±0.10a | 43.22±0.13a | 35.57±0.62a |
| 67.2 | 31.12±0.71d | 79.77±0.23a | 28.97±0.46d | 34.51±0.53c | 27.52±0.84c |

2.9 IPL 处理对贮藏期内双孢蘑菇维生素 C 含量的影响

由表 9 可知,贮藏前 4 d,各试验组维生素 C 含量均升高,之后开始下降,且在贮藏过程中各 IPL 处理组维生素 C 含量均显著高于对照组 ($P<0.05$),其中

48.0 $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 处理组维生素 C 含量显著高于另外 2 个 IPL 处理组;贮藏第 8 天时,28.8、48.0 和 67.2 $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 处理组维生素 C 含量较对照组分别高 39.09%、53.63%、12.72%。上述结果表明 IPL 处理能显著提高贮藏后期双孢蘑菇的维生素 C 含量。

表 9 IPL 处理对贮藏期内双孢蘑菇维生素 C 含量的影响

Table 9 Effect of IPL treatments on vitamin C content of *Agaricus bisporus* during storage / ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)

| 脉冲强度 Pulsed intensity/ $(\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2})$ | 贮藏时间 Storage time/d | | | | |
|--|---------------------|------------|------------|------------|------------|
| | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 |
| 0(对照) | 1.02±0.01c | 1.31±0.01d | 1.94±0.01d | 1.63±0.01d | 1.10±0.01d |
| 28.8 | 1.22±0.01b | 2.00±0.01b | 2.28±0.02b | 1.98±0.01c | 1.53±0.02b |
| 48.0 | 1.37±0.02a | 2.29±0.01a | 2.43±0.01a | 2.09±0.01a | 1.69±0.01a |
| 67.2 | 0.93±0.01d | 1.74±0.02c | 2.20±0.01c | 2.04±0.01b | 1.24±0.01c |

3 讨论

本研究结果表明, IPL 处理在一定程度上可以保持双孢蘑菇的贮藏品质。贮藏期内 IPL 处理组双孢蘑菇硬度变化较小, 而对照组硬度呈上升趋势, 贮藏第 8 天时对照组双孢蘑菇硬度显著高于 IPL 处理组。姜天甲^[31]发现食用菌硬度与木质化程度有关, 木质化加剧, 食用菌硬度增加, 且 POD 通过催化分解过氧化氢使木质素单体发生聚合而参与木质素的合成。本研究中, IPL 处理组 POD 活性在贮藏 6 d 后显著低于对照组 ($P < 0.05$), 可能是 IPL 处理对双孢蘑菇中 POD 活性有一定抑制作用, 减慢其参与木质化进程, 使得双孢蘑菇能较大限度地保持原有硬度。

双孢蘑菇褐变与子实体内 PPO、POD 活性密切相关^[4, 32]。随着自然衰老和损伤的进行, 菇体细胞膜透性遭到破坏, 使得原本被细胞膜隔层分开的酶与底物(氧气与酚类物质)接触后发生反应^[29], 使酚类物质氧化产生黑色素而褐变。本研究中, PPO 和 POD 活性在贮藏前、中期均呈上升趋势, 这可能是因为采后双孢蘑菇仍进行着旺盛的生命活动, 当其无法从培养基中吸取养分来满足菌丝体生长需求时, 菌丝体会启动相应的应激机制^[33], 可能会通过升高 PPO 和 POD 活性来应答此机制, 导致双孢蘑菇发生褐变。本研究结果表明, 在贮藏后期, 双孢蘑菇褐变程度继续加深, 但 IPL 处理组的 BD 明显低于对照组, 而此时 PPO、POD 活性亦显著低于对照组, 即贮藏后期 BD 的变化与 PPO、POD 活性的变化一致。其原因可能是 IPL 处理加剧了蛋白质在贮藏过程中的氧化^[34], 随着贮藏时间的延长, PPO、POD 活性均低于对照组, 延缓了酶促反应速度, 减缓了双孢蘑菇褐变。

维生素 C 和多酚在生物体内具有抗氧化等多种生理功能。本研究结果表明, 在贮藏期内双孢蘑菇中维生素 C 和酚含量均呈先上升后下降的趋势, 这可能是由于采后双孢蘑菇前期生长发育仍在继续, 子实体仍可合成这两种物质, 也可能是失水浓缩的结果; 贮藏后期随着抗氧化反应的进行和子实体品质的下降, 维生素 C 及多酚发生降解, 导致其含量降低。IPL 处理组维生素 C 含量在贮藏过程中均明显高于对照组, 可能是 IPL 处理诱导了双孢蘑菇维生素 C 的合成, 而总酚含量在贮藏后期才高于对照组, 可能是由于该阶段 PPO 和 POD 活性显著低于对照组, 使得酚类物质氧化速度降低。双孢蘑菇脂膜由稳定性较差的不饱和脂肪酸组成, MDA 是细胞膜过氧化作用的主要产物, 其含

量高低反映子实体因脂膜损伤而衰老的程度^[3]。本试验中, 双孢蘑菇 MDA 含量在贮藏期间持续上升, 说明子实体氧化损伤持续进行, 到贮藏后期 IPL 处理组 MDA 含量显著低于对照组, 可能与其内源性抗氧化剂维生素 C 和酚类物质有关, 且与多酚含量更为密切, 使试验后期处理组抗氧化能力优于对照组。

IPL 处理能有效控制双孢蘑菇采后品质, 但不同处理强度对贮藏期内双孢蘑菇新鲜度的影响存在差异, 因此将 IPL 技术应用于食用菌的品质控制时可通过优化脉冲参数来实现。本研究为 IPL 技术在食用菌领域中的应用提供了科学依据。

4 结论

本研究结果表明, 与对照组相比, IPL 处理组双孢蘑菇在贮藏过程中开伞率及失重率的上升已明显减慢, IPL 处理能有效延缓贮藏后期双孢蘑菇 MDA 含量的上升, 抑制 PPO、POD 活性, 保持硬度、总酚及维生素 C 含量, 从而减缓双孢蘑菇的衰老褐变。本研究结果推动了食用菌保鲜技术的发展, 弥补了传统保鲜技术的缺点。本研究分析了 IPL 处理后双孢蘑菇贮藏品质变化的原因, 后期将对其进行验证, 以便全面探讨 IPL 处理对生鲜双孢蘑菇贮藏品质的影响及相关机制。

参考文献:

- [1] 崔晶. 二氧化氯对双孢菇贮藏效果的影响及其褐变机理的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2011
- [2] 王治洲, 李晓芳, 宋树鑫, 刘孟禹, 董同力. 双孢菇贮藏预处理及保鲜技术研究进展[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(4): 200-206
- [3] 路媛媛. UV-C 和高 CO₂ 处理对双孢蘑菇采后生理及抗氧化品质的影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016
- [4] 徐冬颖, 姜爱丽, 胡文忠, 杨柳, 陈晨. 双孢菇保鲜及抗褐变处理研究现状[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(6): 254-259
- [5] Aguirre L, Frias J M, Barry-Ryan C, Grogan H. Assessing the effect of product variability on the management of the quality of mushrooms (*Agaricus bisporus*) [J]. Postharvest Biology and Technology, 2008, 49(2): 247-254
- [6] 杜传来, 郁志芳, 韩玲玲. 气调保鲜包装对双孢菇贮藏效果的影响[J]. 包装工程, 2010, 31(23): 17-21
- [7] 张强, 王松华, 祝嫦巍, 王趁芳, 郭健, 邹俊. 两种复配保鲜剂对双孢菇保鲜作用的研究[J]. 现代食品科技, 2013, 29(10): 2431-2435
- [8] 金宇东, 董飞. 食用菌辐照保鲜技术研究进展[J]. 现代农业科技, 2017(15): 85-89
- [9] 徐丽婧, 高丽朴, 王清, 左进华. 辐照保鲜技术及其在双孢蘑菇

- 保鲜中的应用[J]. 食品工业科技, 2014, 35(9): 392-395
- [10] 张娟琴, 邢增涛, 白冰, 宋卫国. 电子束辐照对双孢菇采后品质的影响[J]. 核农学报, 2011, 25(1): 88-92
- [11] Guan W Q, Fan X, Yan R X. Effects of UV-C treatment on inactivation of *Escherichia coli* O157: H7, microbial loads, and quality of button mushrooms [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2012, 64(1): 119-125
- [12] Lee H, Yoon Y, Her N G, Han J H, Oh J, Park J W. Photodegradation of benzene and phenanthrene in aqueous solution using pulsed ultraviolet light[J]. *Ksce Journal of Civil Engineering*, 2017, 21(5): 1607-1613
- [13] Pollock A M, Singh A P, Ramaswamy H S, Ngadi M. Pulsed light destruction kinetics of *L. monocytogenes*[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 84: 114-121
- [14] Hilton S T, de Moraes J O, Moraru C I. Effect of sublethal temperatures on pulsed light inactivation of bacteria[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2017, 39: 49-54
- [15] Alhendi A, Yang W, Goodrich-Schneider R, Sarnoski P J. Total inactivation of lipoxygenase in whole soya bean by pulsed light and the effect of pulsed light on the chemical properties of soya milk produced from the treated soya beans[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2018, 53(2): 457-466
- [16] Kwaw E, Ma Y, Tchabo W, Apaliya M T, Sackey A S, Meng W, Xiao L. Impact of ultrasonication and pulsed light treatments on phenolics concentration and antioxidant activities of lactic-acid-fermented mulberry juice[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 92: 61-66
- [17] Kalaras M D, Beelman R B, Holick M F, Elias R J. Generation of potentially bioactive ergosterol-derived products following pulsed ultraviolet light exposure of mushrooms (*Agaricus bisporus*) [J]. *Food Chemistry*, 2012, 135(2): 396-401
- [18] Chien R C, Yang S C, Lin L M, Mau J L. Anti-inflammatory and antioxidant properties of pulsed light irradiated *Lentinula edodes*[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2017, 41(4): 1-10
- [19] 曹少谦, 陈麒宇, 程亮. 脉冲强光处理对香菇中维生素 D₂ 含量的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(19): 80-83, 301
- [20] Antmann G, Ares G, Lema P, Lareo C. Influence of modified atmosphere packaging on sensory quality of shiitake mushrooms[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2008, 49(1): 164-170
- [21] Ye J J, Li J R, Han X X, Zhang L, Jiang T J, Xia M. Effects of active modified atmosphere packaging on postharvest quality of shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) stored at cold storage[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2012, 11(3): 474-482
- [22] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007
- [23] Augustine M A, Ghazali H M, Hashim H. Polyphenoloxidase from guava (*Psidium guajava* L.) [J]. *Journal Science of Food Agriculture*, 1985, 36(12): 1259-1265
- [24] 王耀松. 蟹味菇采后生理及贮藏保鲜技术研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007
- [25] 王清章, 刘怀超, 孙颀. 莲藕贮藏中褐变度及多酚氧化酶活性的初步研究[J]. 中国蔬菜, 1997(3): 4-6
- [26] 蒋德安. 植物生理实验手册[M]. 成都: 四川科技出版社, 1998
- [27] 闫利萍, 韩志敏, 张家静, 贺云, 刘甜甜, 左玉洁, 汪张贵. 山茶花粉总酚含量测定方法的比较[J]. 蚌埠学院学报, 2015, 4(1): 10-14
- [28] 王林霞, 李佳娜, 许秋梅. 果蔬中维生素 C 含量测定方法比较[J]. 绍兴文理学院学报(自然科学版), 2017, 37(2): 75-79
- [29] 孟德梅, 申琳, 陆军, 生吉萍. 双孢菇采后感官品质变化的因素分析与保鲜技术研究进展[J]. 食品科学, 2010, 31(15): 283-287
- [30] Guillaume C, Schwab I, Gastaldi E, Gontard N. Biobased packaging for improving preservation of fresh common mushrooms (*Agaricus bisporus* L.) [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2010, 11(4): 690-696
- [31] 姜天甲. 主要食用菌采后品质劣变机理及调控技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010
- [32] 陈存坤, 董成虎, 纪海鹏, 李春媛, 于晋泽, 王文生. 臭氧处理对双孢菇采后生理和贮藏品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(17): 155-158
- [33] 张娟亲. 双孢菇和白灵菇采后品质及储藏保鲜技术研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2010
- [34] Fernández M, Ganán M, Guerra C, Hierro E. Protein oxidation in processed cheese slices treated with pulsed light technology[J]. *Food Chemistry*, 2014, 159(13): 388-390

Effects of Intense Pulsed Light Treatment on Storage Quality of *Agaricus bisporus*

ZHOU Tingting¹ CAO Shaoqian¹ ZHANG Jing² YE Wenqian¹ QI Xiangyang^{1,*}

(¹College of Biological and Environmental Sciences, Zhejiang Wanli University, Ningbo, Zhejiang 315100;

²Faculty of Food Science, Zhejiang Pharmaceutical College, Ningbo, Zhejiang 315100)

Abstract: In order to explore the impacts of intense pulsed light (IPL) treatment on the storage quality of post-harvest edible fungi, different intensity (28.8, 48.0 and 67.2 $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$) of IPL treatment on physiology indices and quality of *Agaricus bisporus* during stored at 25°C were investigated. The results indicated IPL treatment could efficiently retard the cap opening, weight loss, browning degree and membrane lipid oxidation of the *Agaricus bisporus* with the prolongation of storage time, and maintain the original firmness to a certain extent. It could also inhibit the peroxidase and polyphenol oxidase activity significantly ($P<0.05$), and delay the reduction of the total phenol and vitamin C content ($P<0.05$) at the same time. The *Agaricus bisporus* treated with 48.0 $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ was found to have the best effectiveness, which total phenol and vitamin C content 39.06% and 53.63% higher than that of the control group, respectively, after 8 days storage. This research provides references for the application of IPL technology in controlling the quality of edible fungi.

Keywords: intense pulsed light (IPL), *Agaricus bisporus*, storage quality