

低压静电场处理对双孢蘑菇采后贮藏品质的影响

徐耀宗, 刘丰怡, 齐元之, 吴依琳, 金钦阳, 王军*
(江南大学, 江苏 无锡 214122)

摘要: **目的** 研究低温贮藏环境下不同电场强度的低压静电场 (Low Voltage Electrostatic Field, LVEF) 对双孢蘑菇采后贮藏品质的影响。**方法** 随机将双孢蘑菇分为不同电压 (100、200、300 V) 的 LVEF 处理组和无任何处理的对照组, 并于温度为 4 °C 的环境下贮藏 8 d。**结果** LVEF 处理能抑制质量损失率和丙二醛含量的上升, 减缓软化速度, 提高类黄酮和抗坏血酸等抗氧化物质的含量, 抑制多酚氧化酶和过氧化物酶活性, 从而延缓双孢蘑菇褐变。电压为 200 V 与 300 V 的 LVEF 处理保鲜效果较好, 但 300 V 的 LVEF 处理抑制细胞膜的氧化损伤和酶活性弱于 200 V 的 LVEF 处理。贮藏 8 d 后, 与对照组相比, 200 V 的 LVEF 处理的双孢蘑菇 L^* 值增加了 4.2%, BI 值减少了 23.1%, 质量损失率减少了 37.4%, 硬度增加了 10.4%。**结论** LVEF 处理能有效延缓双孢蘑菇采后贮藏品质的变化, 且电压为 200 V 的 LVEF 处理双孢蘑菇保鲜效果更好。

关键词: 双孢蘑菇; 低压静电场; 电场强度; 贮藏品质

中图分类号: TS255.3 文献标志码: A 文章编号: 1001-3563(2024)11-0088-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.11.010

Effects of Low Voltage Electrostatic Field Treatment on Postharvest Storage Quality of *Agaricus Bisporus*

XU Yaozong, LIU Fengyi, QI Yuanzhi, WU Yilin, JIN Qinyang, WANG Jun*
(Jiangnan University, Jiangsu Wuxi 214122, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate the effects of low voltage electrostatic field (LVEF) with different electric field strengths on the postharvest storage quality of *Agaricus bisporus* during cold storage. *Agaricus bisporus* were randomly divided into LVEF groups with different voltages (100 V, 200 V, and 300 V) and a control group without any treatment, and stored at 4 °C for 8 days. The results showed that LVEF treatment inhibited the increase in weight loss rate and malondialdehyde content, slowed down the softening rate, increased the content of antioxidants such as flavonoids and ascorbic acid, and inhibited the activities of polyphenol oxidase and peroxidase, thus delaying the browning of *Agaricus bisporus*. LVEF treatments at voltages of 200 V and 300 V were more effective in preserving *Agaricus bisporus*, but the inhibition of oxidative damage to cell membranes and enzyme activities in the LVEF treatment at 300 V was weaker than that in the LVEF treatment at 200 V. After 8 days of storage, compared with the control group, the L^* value of *Agaricus bisporus* treated with LVEF at 200 V increased by 4.2%, the BI value decreased by 23.1%, the weight loss rate decreased by 37.4%, and the hardness increased by 10.4%. In conclusion, LVEF treatment is effective in delaying the changes in postharvest storage quality of *Agaricus bisporus*, and LVEF treatment at a voltage of 200 V is a promising technique for preserving *Agaricus bisporus* during cold storage.

KEY WORDS: *Agaricus bisporus*; low voltage electrostatic field; electric field strength; storage quality

收稿日期: 2023-12-27

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFF1105205); 国家重点研发计划 (2022YFA1203604)

*通信作者

双孢蘑菇 (*Agaricus bisporus*) 又称白蘑菇, 纽扣蘑菇, 因其独特的风味和高营养价值而受到人们喜爱, 其产量占全球蘑菇总产量的 30%^[1]。但由于双孢蘑菇含水量高, 采后仍进行呼吸作用, 表面无保护组织及采收和运输过程中造成的损伤和微生物侵染, 易引起褐变、开伞、营养风味损失和腐烂等问题, 使得商品价值大幅度下降。室温下, 双孢蘑菇保质期仅 1~3 d^[2]。

目前双孢蘑菇有多种保鲜方法已被应用, 如气调保鲜、辐照保鲜和涂膜保鲜等。但这些方法仍有很多局限, 如气调保鲜内部湿度过大可能导致微生物快速生长和果蔬腐败^[3]; 辐照保鲜可能引起食品安全问题^[4]; 涂膜处理操作复杂^[5]。因此, 亟需一种更安全、高效、经济的保鲜技术应用于双孢蘑菇。

低压静电场 (Low Voltage Electrostatic Field, LVEF) 是一种安全、高效、经济的非热物理保鲜技术。Xu 等^[6]发现 LVEF 处理可以抑制草莓的细胞壁代谢和降低活性氧代谢反应水平。崔帅等^[7]发现 LVEF 辅助低温能更好保持葡萄和无花果的感官品质。Cheng 等^[8]发现 LVEF 协同微酸性电解水处理可以抑制鲜切菠萝的呼吸强度。孟晓曼等^[9]发现低压静电场处理可以降低白玉菇的呼吸强度, 减少水分散失, 显著改善其感官品质。因此, 将 LVEF 应用于双孢蘑菇保鲜具有一定的理论基础, 但很少有关于不同电场强度的 LVEF 处理对双孢蘑菇采后贮藏品质影响的研究。

本文以双孢蘑菇为研究对象, 通过测定颜色、质量损失率、硬度、可溶性固形物、丙二醛等指标, 研究低温贮藏下不同电场强度的 LVEF 处理对双孢蘑菇采后贮藏品质的影响, 为双孢蘑菇的贮藏保鲜提供参考。

1 实验

1.1 材料与仪器

主要材料: 双孢蘑菇由无锡春晓食用菌有限公司提供, 去除双孢蘑菇根部并挑选颜色洁白、无机械损伤、无病害和未开伞的双孢蘑菇为试验材料。

主要仪器: LVEF 装置, 无锡博亚电子科技有限公司; CR-400 色差仪, 日本柯尼卡美能达公司; TMS-Pro 质构仪, 美国 FTC 公司; PAL-BX/ACIDF5 糖酸度计, 日本 ATAGO 公司; UV-1800 紫外分光光度计, 日本岛津国际贸易公司; KTHA-015TBS 恒温恒湿箱, 昆山庆声电子科技有限公司。

1.2 实验设计

随机将双孢蘑菇分为 4 组: 以无任何处理作为对照组 (CK 组), 另外 3 组双孢蘑菇放入不同电场强度的 LVEF 中, 极板间距为 20 cm, 电压分别为 100、

200、300 V, 记为 LVEF-100 组、LVEF-200 组、LVEF-300 组。4 组样品均贮藏于 4 °C 的环境下, 并于贮藏第 0、2、4、6、8 天测定相关指标。

1.3 指标测定方法

1.3.1 颜色

颜色测定参照 Yan 等^[10]的方法并略有修改。每组固定 12 个双孢蘑菇作为测量对象, 使用 CR-400 色差仪测量双孢蘑菇菌盖的颜色 L^* 、 a^* 、 b^* 。 L^* 值表示亮度, a^* 表示红绿程度, b^* 表示黄蓝程度, L^* 、 a^* 、 b^* 值越大, 双孢蘑菇表面越亮、越红、越黄。褐变指数 (Browning Index, BI) 根据式 (1) 和 (2) 计算。

$$I_B = \frac{100(X - 0.31)}{0.172} \quad (1)$$

$$X = \frac{a^* + 1.75L^*}{5.645L^* + a^* - 3.012b^*} \quad (2)$$

式中: I_B 为褐变指数。

1.3.2 质量损失率

每组固定 12 个双孢蘑菇为测量对象, 质量损失率根据式 (3) 计算。

$$w = \frac{m_0 - m_t}{m_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: w 为质量损失率; m_0 为第 0 天双孢蘑菇的质量, g; m_t 为贮藏第 t 天时双孢蘑菇的质量, g。

1.3.3 硬度

硬度测定参照 Liu 等^[11]的方法并略有修改。每组随机选取 12 个双孢蘑菇, 去掉双孢蘑菇柄, 使其稳固在操作台上, 使用配备 P7 探针的 TMS-Pro 质构仪, 测量速度为 1.00 mm/s, 测量深度为 5 mm, 测量过程中最大力为硬度。

1.3.4 可溶性固形物

可溶性固形物 (Total Soluble Solid, TSS) 含量测定参照 Xu 等^[6]的方法并略有修改。将 25 g 双孢蘑菇放入研钵中捣碎并使用纱布挤出汁液, 使用糖酸度计测定 TSS 含量。每次操作重复 3 次, 取 3 次测定值的平均值为 TSS 含量。

1.3.5 总酚、类黄酮、可溶性鞣

总酚、类黄酮含量测定参照 Obajemihi 等^[12]的方法, 单位均为 g/kg。

可溶性鞣含量测定参照 Zhang 等^[13]的方法并略有修改。称取 5 g 双孢蘑菇, 加入 10 mL 甲醇, 冰浴条件下研磨成匀浆, 于 4 °C、12 000 r/min 条件下离心 12 min, 在 437 nm 处测量上清液的吸光度值。

1.3.6 抗坏血酸

抗坏血酸 (Ascorbic Acid, ASA) 含量测定参照 Xu 等^[6]的方法, 单位为 mg/kg。

1.3.7 丙二醛

丙二醛 (Malondialdehyde, MDA) 含量测定参照王佳莉等^[14]的方法, 单位为 $\mu\text{mol}/\text{kg}$ 。

1.3.8 多酚氧化酶和过氧化物酶

多酚氧化酶 (Polyphenol Oxidase, PPO) 和过氧化物酶 (Peroxidase, POD) 活性测定参照 Liu 等^[15]的方法, 单位均为 U/g 。

1.4 数据处理

实验重复 3 次, 结果表示为平均值 \pm 标准差。采用 Origin 2022 绘图, SPSS 26 软件的 Duncan 多重比较进行显著性分析 ($P < 0.05$ 为差异性显著), 以不同小写字母表示。

2 结果与分析

2.1 LVEF 处理对双孢蘑菇颜色的影响

颜色是衡量双孢蘑菇质量和新鲜度的最重要指标, 也是反映消费者接受度的最重要参数。双孢蘑菇采

收后, 颜色逐渐由白色变为棕色, 这主要是由于酶的氧化、衰老和微生物的生长^[16]。如图 1a 所示, 各组双孢蘑菇的 L^* 值随贮藏时间的增加而逐渐下降, 且 LVEF 组双孢蘑菇的 L^* 值始终高于 CK 组。贮藏前 2 d, LVEF 组与 CK 组双孢蘑菇的 L^* 值无明显差异 ($P > 0.05$)。贮藏第 4~8 天, LVEF 组双孢蘑菇的 L^* 值始终显著高于 CK 组 ($P < 0.05$), 说明 LVEF 处理能有效抑制双孢蘑菇白度的降低。第 8 天时, CK、LVEF-100、LVEF-200 与 LVEF-300 组双孢蘑菇的 L^* 值分别为 83.73、84.97、87.22 和 87.29, 说明 LVEF-200 与 LVEF-300 处理均能较好地保持双孢蘑菇的白度, 延缓其褐变速度。

如图 1b 所示, 各组双孢蘑菇的 BI 值随贮藏时间的增加而逐渐增加, 与白度呈现相反的变化趋势。贮藏前 2 d, LVEF 组与 CK 组双孢蘑菇的 BI 值无明显差异 ($P > 0.05$)。贮藏第 6 天至贮藏结束, LVEF-200 组双孢蘑菇的 BI 值显著低于 CK 组和 LVEF-100 处理组 ($P < 0.05$), 与 LVEF-300 组 BI 值无明显差异 ($P > 0.05$), 说明 LVEF-200 与 LVEF-300 处理能有效延缓双孢蘑菇褐变。双孢蘑菇外观变化如图 1c 所示, 与 L^* 值与 BI 值变化趋势一致。

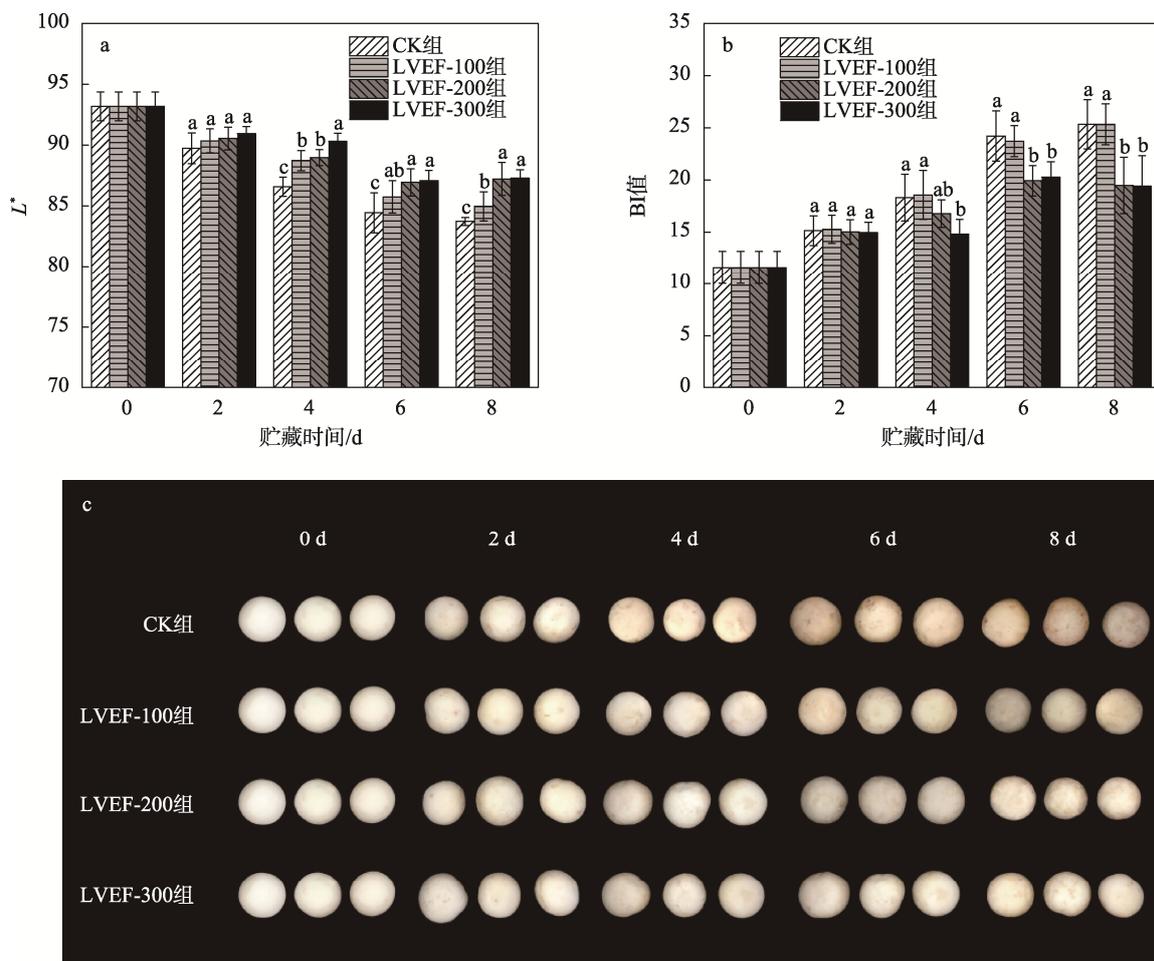


图 1 LVEF 处理对双孢蘑菇 L^* (a)、BI 值 (b) 和外观 (c) 的影响
Fig.1 Effects of LVEF treatment on L^* (a), BI (b), and appearance (c) of *Agaricus bisporus*

2.2 LVEF 处理对双孢蘑菇质量损失率的影响

质量损失率是反映双孢蘑菇因呼吸和蒸腾作用而导致水分和物质损失的重要指标。当质量损失率为 4%~6% 时, 双孢蘑菇便会出现明显的枯萎或收缩^[17]。LVEF 处理对双孢蘑菇质量损失率的影响如图 2 所示, 各组的质量损失率随着贮藏时间的增加而增加。贮藏第 2 天至贮藏结束, LVEF-200 组与 LVEF-300 组双孢蘑菇的质量损失率均显著低于 CK 组 ($P < 0.05$)。贮藏第 8 天时, CK、LVEF-100、LVEF-200 与 LVEF-300 组的质量损失率分别为 26.83%、19.56%、16.79% 和 16.97%, 这可能是因为 LVEF 处理可以抑制双孢蘑菇的呼吸代谢和蒸腾作用^[9], 且较高电压的 LVEF 处理可以更好地防止双孢蘑菇水分和营养物质的损失。

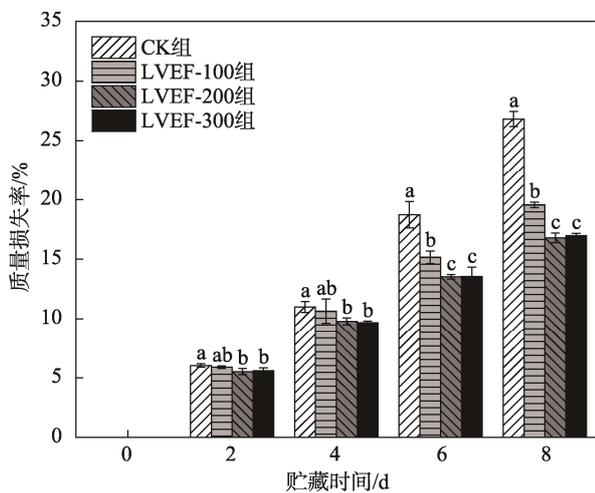


图 2 LVEF 处理对双孢蘑菇质量损失率的影响
Fig.2 Effect of LVEF treatment on weight loss rate of *Agaricus bisporus*

2.3 LVEF 处理对双孢蘑菇硬度的影响

硬度也是反映双孢蘑菇品质的重要指标。双孢蘑菇在储存过程中的硬度变化如图 3 所示, 各组的硬度随着贮藏时间的增加而下降, 这可能与双孢蘑菇中蛋白质和多糖的降解、菌丝体的收缩和中央液泡的破坏有关^[18]。贮藏 8 天后, LVEF-200 与 LVEF-300 组双孢蘑菇的硬度显著高于 CK 组和 LVEF-100 组 ($P < 0.05$), 说明 LVEF-200 与 LVEF-300 处理能有效延缓双孢蘑菇软化。这可能是因为较高电场强度的 LVEF 处理能降低细胞壁分解酶的活性, 从而延缓其硬度下降^[6]。

2.4 LVEF 处理对双孢蘑菇 TSS 含量的影响

TSS 含量反映了果蔬的成熟度和品质, 与果蔬中糖和有机酸的含量相关, 其含量变化主要是因为果蔬的新陈代谢和呼吸作用^[19]。如图 4 所示, 双孢蘑菇在

贮藏过程中 TSS 含量呈现不同的变化趋势。CK 和 LVEF-100 组的 TSS 含量随着贮藏时间的增加而增加, TSS 含量的增加可能是因为水分的流失^[20]。贮藏 8 d 后, CK 和 LVEF-100 组的 TSS 含量显著高于 LVEF-200 组和 LVEF-300 组 ($P < 0.05$)。与 CK 组和 LVEF-100 组不同, LVEF-200 组与 LVEF-300 组 TSS 含量在整个储存期间保持稳定, 且 LVEF-200 组双孢蘑菇的 TSS 含量变化较小, 表明 LVEF-200 处理能有效维持双孢蘑菇 TSS 含量, 保护双孢蘑菇的风味。

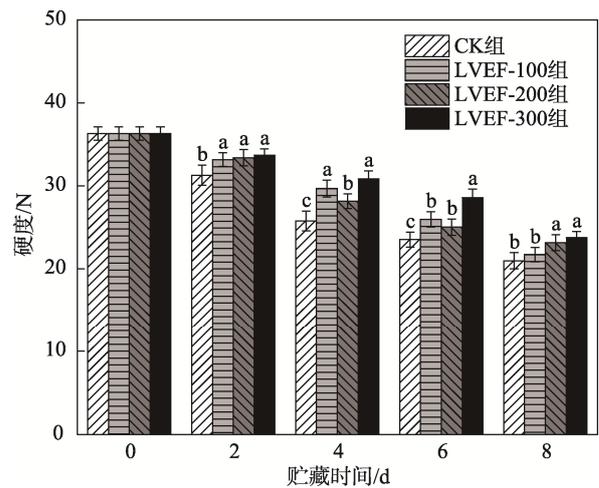


图 3 LVEF 处理对双孢蘑菇硬度的影响
Fig.3 Effect of LVEF treatment on hardness of *Agaricus bisporus*

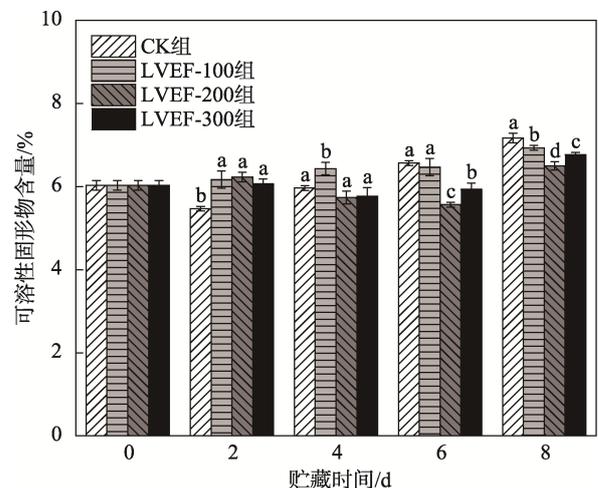


图 4 LVEF 处理对双孢蘑菇可溶性固形物含量的影响
Fig.4 Effect of LVEF treatment on total soluble solid content of *Agaricus bisporus*

2.5 LVEF 处理对双孢蘑菇总酚、类黄酮、可溶性鞣和 ASA 含量的影响

酚类物质和类黄酮物质是双孢蘑菇中主要的天然抗氧化成分, 能够有效抵抗外界不利环境、内部氧化和病原菌侵袭^[21]。如图 5a 所示, 双孢蘑菇中的总酚含量呈先增加后下降的趋势, 在第 4 天时, 总酚含

量达到顶峰,在王佳莉等^[14]的研究中也发现了类似的结果。贮藏前4 d, CK组双孢蘑菇的总酚含量显著低于LVEF-200组和LVEF-300组($P < 0.05$)。第4天时, LVEF-200组双孢蘑菇的总酚含量显著高于LVEF-300组($P < 0.05$),表明较高电压的LVEF处理能提高酚类物质在贮藏初期的积累。这可能是因为LVEF处理刺激植物细胞,细胞发生防御反应,从而诱导酚类物质的合成^[22]。

如图5b所示,各组双孢蘑菇的类黄酮含量随着贮藏时间的增加而增加,且CK组的类黄酮含量低于LVEF组。贮藏8 d后,CK、LVEF-100、LVEF-200与LVEF-300组双孢蘑菇的类黄酮含量分别为0.51、0.46、0.62和0.63 g/kg。其中,LVEF-200组的类黄酮含量显著高于CK组和LVEF-100组($P < 0.05$),与LVEF-300组之间无明显差异($P > 0.05$)。这说明LVEF-200与LVEF-300处理均可以提高双孢蘑菇的类黄酮含量,这可能是因为较高电压的LVEF处理能刺激苯丙烷类代谢,进而合成更多的类黄酮^[23]。

可溶性醌是酶促褐变产物,可以直接反映果蔬的褐变程度^[24]。如图5c所示,各组双孢蘑菇的可溶性醌含量随着贮藏时间的增加而增加,贮藏第4天至贮藏

结束,CK组的可溶性醌含量显著高于LVEF组($P < 0.05$),表明LVEF处理能有效延缓双孢蘑菇褐变。第8天时,LVEF-300组的可溶性醌含量最低,与CK、LVEF-100组之间的差异显著($P < 0.05$),与LVEF-200组之间无明显差异($P > 0.05$),表明LVEF-200与LVEF-300处理均可以有效延缓褐变,与图1c中双孢蘑菇颜色变化趋势一致。这可能是因为较高电压的LVEF处理能抑制PPO和POD的活性,从而减缓总酚及类黄酮氧化生成黑色素等物质的速度^[25]。

ASA是一种低分子质量的内源性抗氧化剂,在清除果蔬中的活性氧方面发挥着至关重要的作用^[26]。LVEF处理对双孢蘑菇的ASA含量变化如图5d所示,ASA含量呈先上升后下降的趋势,于第2天时达到顶峰,此时CK、LVEF-100、LVEF-200与LVEF-300组的ASA含量分别为124.13、145.91、138.60和146.06 mg/kg,表明LVEF处理能提高双孢蘑菇贮藏初期的ASA含量。贮藏结束时,LVEF-200组与LVEF-300组的ASA含量显著高于CK组和LVEF-100组($P < 0.05$)。结果表明,较高电压的LVEF处理能有效维持双孢蘑菇ASA含量。

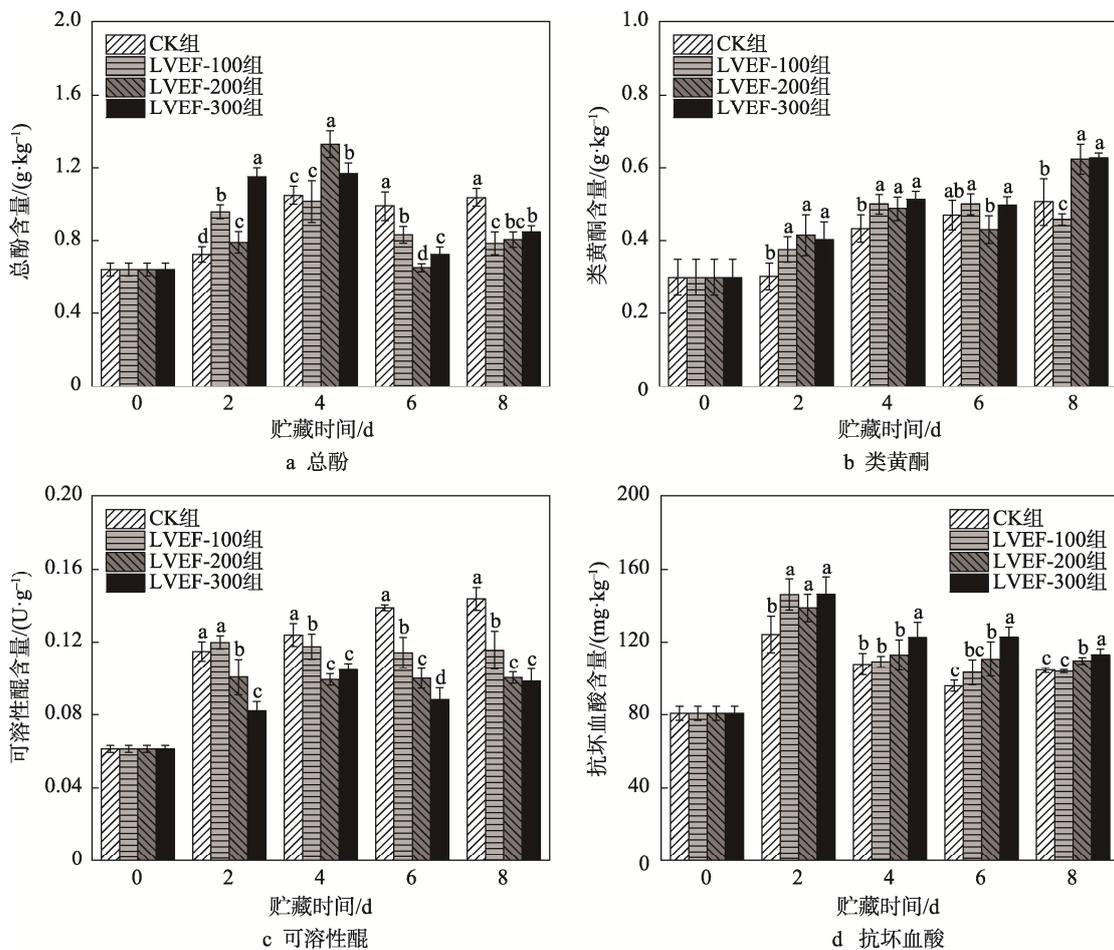


图5 LVEF处理对双孢蘑菇总酚、类黄酮、可溶性醌和抗坏血酸含量的影响

Fig.5 Effects of LVEF treatment on content of total phenolics, flavonoids, soluble quinone and ascorbic acid of *Agaricus bisporus*

2.6 LVEF 处理对双孢蘑菇 MDA 含量的影响

MDA 是脂质过氧化的产物之一, 可以表示细胞膜氧化损伤水平^[27]。如图 6 所示, 双孢蘑菇中的 MDA 含量随着贮藏时间的增加而上升。值得注意的是, 贮藏前 6 d, LVEF-200 组和 LVEF-300 组的 MDA 含量无明显差异 ($P > 0.05$)。贮藏 8 d 后, LVEF-200 组的 MDA 含量显著低于其他组 ($P < 0.05$), 这表明 LVEF 处理可以减缓细胞膜氧化损伤的速度且 LVEF-200 处理效果最佳, 从而维持双孢蘑菇细胞膜的完整性, 延缓采后贮藏品质的变化。

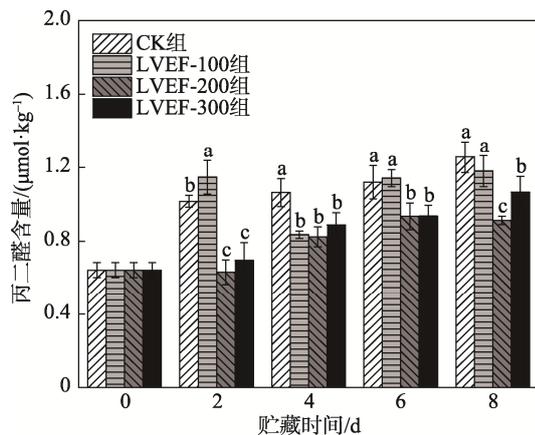


图 6 LVEF 处理对双孢蘑菇丙二醛含量的影响
Fig.6 Effect of LVEF treatment on malondialdehyde content of *Agaricus bisporus*

2.7 LVEF 处理对双孢蘑菇 PPO 和 POD 活性的影响

双孢蘑菇采后易发生褐变, 主要是因为 PPO 和 POD 将酚类物质氧化成醌, 醌进一步氧化和聚合成颜色较深的化合物, 导致果蔬的颜色和质量下降^[28]。双孢蘑菇在储存期间 PPO 活性的影响如图 7a 所示, 在贮藏前 4 d, PPO 活性先下降再上升, 于第 4 天达

到最大值, 随后下降, CK 组双孢蘑菇的 PPO 活性始终处于较高的水平。贮藏 8 d 后, 与 CK 组相比, LVEF-100、LVEF-200 与 LVEF-300 组的 PPO 活性分别下降了 1.18%、21.24%和 17.91%。表明 LVEF 处理能显著抑制蘑菇的 PPO 活性且 LVEF-200 处理效果最佳, 从而抑制双孢蘑菇褐变。

双孢蘑菇在贮藏期间 POD 活性的影响如图 7b 所示。贮藏前 4 d, CK 组的 POD 活性上升, 而 LVEF 组的 POD 活性却是先下降再上升, 这表明 LVEF 处理在贮藏初期能抑制 POD 活性。各组双孢蘑菇的 POD 活性均于第 4 天达到最大值, 随后急剧下降, 贮藏第 6~8 天, LVEF-200 组的 POD 活性显著低于 CK 组 ($P < 0.05$), 表明 LVEF 处理能抑制双孢蘑菇的 POD 活性且 LVEF-200 组处理效果最佳。PPO 通过催化酚类物质氧化形成醌, 醌进一步聚合导致棕色聚合物的形成, 并伴随着细胞膜氧化损伤及过氧化氢的大量积累, 而 POD 可以催化过氧化氢氧化酚类物质产生醌, 进一步加剧了棕色聚合物的形成^[13]。LVEF 处理抑制了 POD 和 PPO 的活性, 这可能是延缓双孢蘑菇褐变速度的原因。

3 讨论

双孢蘑菇的颜色是衡量双孢蘑菇质量和新鲜度的最重要指标, 也是反映消费者接受度的最重要参数。研究表明, LVEF 处理能有效延缓双孢蘑菇褐变速度。导致双孢蘑菇褐变的原因之一是酶促褐变。当双孢蘑菇受到机械性损伤或自然衰老时, 细胞膜完整性遭到破坏, 使酚类物质在 PPO 和 POD 的协同作用下氧化成醌, 醌进一步氧化和聚合成棕色聚合物, 导致双孢蘑菇的 L^* 值降低和 BI 值增加^[13]。研究表明, LVEF 处理能有效抑制双孢蘑菇 MDA 含量的上升, 不仅减少了酚类物质与 PPO、POD 的接触, 还抑制了 PPO 和 POD 活性, 从而延缓双孢蘑菇的褐变速度。

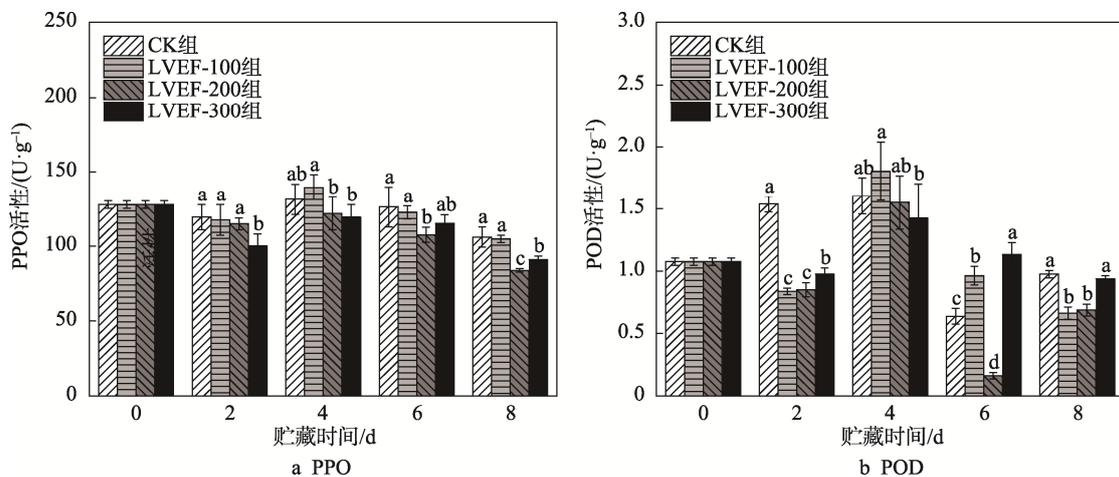


图 7 LVEF 处理对双孢蘑菇 PPO 和 POD 活性的影响
Fig.7 Effects of LVEF treatment on PPO and POD activities of *Agaricus bisporus*

双孢蘑菇的质量损失率和硬度也是衡量其质量和新鲜度的重要指标。结果表明,双孢蘑菇的质量损失率随着贮藏时间的延长而上升,硬度随之下降。这可能是因为贮藏过程中呼吸和蒸腾作用增强,导致水分流失、细胞膨压下降和组织异常代谢,使得细胞壁结构遭到破坏,进而引起组织软化^[29]。LVEF处理可以降低双孢蘑菇质量损失和软化速度,与 Xu 等^[6]用 LVEF 处理草莓的研究结果一致,研究发现 LVEF 可以降低细胞壁降解酶的活性,减缓细胞壁组分的降解,从而维持稳定的细胞壁结构,进而抑制双孢蘑菇的质量损失和软化速度。

4 结语

研究表明,LVEF处理能有效延缓双孢蘑菇贮藏品质的变化,且LVEF-200处理保鲜效果较好。LVEF-200处理可以有效抑制双孢蘑菇质量损失和硬度下降。此外,LVEF处理通过抑制MDA含量上升、PPO和POD的活性,提高总酚、类黄酮和ASA等抗氧化物质的含量,从而延缓了双孢蘑菇的褐变速度。本研究仅从酶促褐变的角度进行研究,仍需进一步研究LVEF处理对双孢蘑菇细胞结构和微生物生长的影响,以便更加全面地揭示LVEF保鲜机理。

参考文献:

- [1] CHAUDHARI A K, DAS S, SINGH B K, et al. Green Facile Synthesis of Cajuput (*Melaleuca Cajuputi* Powell.) Essential Oil Loaded Chitosan Film and Evaluation of Its Effectiveness on Shelf-Life Extension of White Button Mushroom[J]. *Food Chemistry*, 2023, 401: 134114.
- [2] 刘晨霞, 乔勇进, 田姗姗, 等. 臭氧熏蒸浓度对双孢蘑菇质构及营养品质的影响[J]. *食品与机械*, 2022, 38(7): 148-152.
LIU C X, QIAO Y J, TIAN S S, et al. Effects of Different Concentrations of Ozone Fumigation on the Storage Quality of *Agaricus Bisporus*[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(7): 148-152.
- [3] SALAMAT R, GHASSEMZADEH H R, RANJBAR F, et al. The Effect of Additional Packaging Barrier, Air Moment and Cooling Rate on Quality Parameters of Button Mushroom (*Agaricus bisporus*)[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2020, 23: 100448.
- [4] 周婷婷, 曹少谦, 张境, 等. 脉冲强光处理对双孢蘑菇贮藏品质的影响[J]. *核农学报*, 2020, 34(5): 994-1001.
ZHOU T T, CAO S Q, ZHANG J, et al. Effects of Intense Pulsed Light Treatment on Storage Quality of *Agaricus Bisporus*[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2020, 34(5): 994-1001.
- [5] 商立超, 赵凤春, 弓志青, 等. 抗坏血酸联合乳酸链球菌素复合涂膜保鲜采后双孢蘑菇研究[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(20): 346-351.
SHANG L C, ZHAO F C, GONG Z Q, et al. Preservation of Postharvest *Agaricus Bisporus* by VC/Nisin Composite Coating[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(20): 346-351.
- [6] XU C, ZHANG X Y, LIANG J, et al. Cell Wall and Reactive Oxygen Metabolism Responses of Strawberry Fruit during Storage to Low Voltage Electrostatic Field Treatment[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2022, 192: 112017.
- [7] 崔帅, 段玉权, 侯华铭, 等. 低压静电场辅助低温对葡萄和无花果保鲜效果的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(13): 294-302.
CUI S, DUAN Y Q, HOU H M, et al. Effects of Low Voltage Electrostatic Field Assisted Low Temperature on Preservation of *Vitis Vinifera* Linn and *Ficus Carica* Linn[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(13): 294-302.
- [8] CHENG R Y, LI W X, WANG Y H, et al. Low Voltage Electrostatic Field Treatment of Fresh-Cut Pineapples with Slightly Acidic Electrolytic Water: Influence on Physicochemical Changes and Membrane Stability[J]. *Scientia Horticulturae*, 2023, 308: 111602.
- [9] 孟晓曼, 孙亚男, 程儒杨, 等. 低压静电场-真空协同保鲜对白玉菇采后品质和抗氧化代谢的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(23): 72-81.
MENG X M, SUN Y N, CHENG R Y, et al. Effect of Low-Voltage Electrostatic Field-Assisted Vacuum Storage on Postharvest Quality and Antioxidant Metabolism of White *Hypsizygos Marmoreus*[J]. *Food Science*, 2022, 43(23): 72-81.
- [10] YAN M, YUAN B, XIE Y, et al. Improvement of Postharvest Quality, Enzymes Activity and Polyphenoloxidase Structure of Postharvest *Agaricus bisporus* in Response to High Voltage Electric Field[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 166: 111230.
- [11] LIU J, LIU S, ZHANG X, et al. Effect of Gallic Acid Grafted Chitosan Film Packaging on the Postharvest Quality of White Button Mushroom (*Agaricus bisporus*)[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 147: 39-47.
- [12] OBAJEMIHI O I, ESUA O J, CHENG J H, et al. Effects of Pretreatments Using Plasma Functionalized Water, Osmodehydration and Their Combination on Hot Air

- Drying Efficiency and Quality of Tomato (*Solanum Lycopersicum* L.) Slices[J]. *Food Chemistry*, 2023, 406: 134995.
- [13] ZHANG P R, FANG D L, PEI F, et al. Nanocomposite Packaging Materials Delay the Browning of *Agaricus bisporus* by Modulating the Melanin Pathway[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2022, 192: 112014.
- [14] 王佳莉, 唐建新, 英丽美, 等. 二氧化碳短期厌氧处理对双孢蘑菇采后生理及品质的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(17): 255-262.
- WANG J L, TANG J X, YING L M, et al. Effect of Short-Term Oxygen-Free Modified Atmospheres Containing Different CO₂ Levels on Postharvest Physiology and Quality of *Agaricus Bisporus*[J]. *Food Science*, 2022, 43(17): 255-262.
- [15] LIU F Y, XU Y Z, ZENG M, et al. A Novel Physical Hurdle Technology by Combining Low Voltage Electrostatic Field and Modified Atmosphere Packaging for Long-Term Stored Button Mushrooms (*Agaricus bisporus*)[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2023, 90: 103514.
- [16] OZ A T, ULUKANLI Z, BOZOK F, et al. The Postharvest Quality, Sensory and Shelf Life of *Agaricus bisporus* in Active Map[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2015, 39(1): 100-106.
- [17] LOUIS E, VILLALOBOS-CARVAJAL R, REYES-PARRA J, et al. Preservation of Mushrooms (*Agaricus bisporus*) by An Alginate-Based-Coating Containing A Cinnamaldehyde Essential Oil Nanoemulsion[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2021, 28: 100662.
- [18] ZHANG L M, LIU Z L, SUN Y, et al. Combined Antioxidant and Sensory Effects of Active Chitosan/Zein Film Containing α -Tocopherol on *Agaricus bisporus*[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2020, 24: 100470.
- [19] NI X Y, YU J H, SHAO P, et al. Preservation of *Agaricus Bisporus* Freshness with Using Innovative Ethylene Manipulating Active Packaging Paper[J]. *Food Chemistry*, 2021, 345: 128757.
- [20] CAI M, ZHONG H Z, MA Q H, et al. Physicochemical and Microbial Quality of *Agaricus bisporus* Packaged in Nano-SiO₂/TiO₂ Loaded Polyvinyl Alcohol Films[J]. *Food Control*, 2022, 131: 108452.
- [21] GAO X Q, WU W J, CHEN H Z, et al. Nitric Oxide Treatment Delays Quality Deterioration and Enzymatic Browning of *Agaricus bisporus* via Reactive Oxygen Metabolism Regulation[J]. *Food Frontiers*, 2023, 4(1): 447-458.
- [22] HUANG Y C, YANG Y H, SRIDHAR K, et al. Synergies of Modified Atmosphere Packaging and High-Voltage Electrostatic Field to Extend the Shelf-Life of Fresh-Cut Cabbage and Baby Corn[J]. *Lwt-Food Science and Technology*, 2021, 138: 110559.
- [23] 张婷婷, 王凤玲, 彭梦云, 等. 低压静电场对采后马铃薯块茎愈伤效果的影响[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(10): 62-69.
- ZHANG T T, WANG F L, PENG M Y, et al. Effects of Low-Voltage Electrostatic Field Treatment on Wound Healing in Postharvest Potato Tubers[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(10): 62-69.
- [24] TREESUWAN K, JIRAPAKKUL W, CHONHENCHOB V, et al. Sulfite-Free Treatment Combined with Modified Atmosphere Packaging to Extend Trimmed Young Coconut Shelf Life during Cold Storage[J]. *Food Control*, 2022, 139: 109099.
- [25] 张旭, 潘先兴, 田一鸣, 等. 食用菌褐变机理及抑制方法研究进展[J]. *中国果菜*, 2022, 42(5): 38-44.
- ZHANG X, PAN X X, TIAN Y M, et al. Research Progress on Browning Mechanism and Inhibition Methods of Edible Fungi[J]. *China Fruit & Vegetable*, 2022, 42(5): 38-44.
- [26] XU Y Y, TIAN Y, MA R N, et al. Effect of Plasma Activated Water on the Postharvest Quality of Button Mushrooms, *Agaricus Bisporus*[J]. *Food Chemistry*, 2016, 197: 436-444.
- [27] DONG S T, GUO J T, YU J T, et al. Effects of Electron-Beam Generated X-Ray Irradiation on the Postharvest Storage Quality of *Agaricus bisporus*[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2022, 80: 103079.
- [28] ZHANG X J, ZHANG M, LAW C L, et al. High-Voltage Electrostatic Field-Assisted Modified Atmosphere Packaging for Long-Term Storage of Pakchoi and Avoidance of Off-Flavors[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2022, 79: 103032.
- [29] 孙涵, 李玲, 王相友. 双孢菇高氧动态气调保鲜参数优化[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(24): 282-290.
- SUN H, LI L, WANG X Y. Parameter Optimization of High O₂ Dynamic Controlled Atmosphere Storage of *Agaricus Bisporus*[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(24): 282-290.