

低频极化电场处理对草莓采后抗病性能及贮藏品质的作用

徐景钰, 朱洁, 李显灏, 曹崇江*

(中国药科大学工学院, 江苏南京 211198)

摘要: 探究了低频极化电场 (Low-Frequency Polarized Electric Field, LFPEF) 处理对采后草莓贮藏期间的抗病性能及品质的影响。结果表明, 与对照组相比, LFPEF 处理提高了贮藏末期草莓果实硬度 (53.10%)、可溶性固形物含量 (6.50%) 和可溶性糖含量 (7.72%), 将失重率从 4.96% 降低至 3.30%。此外, LFPEF 处理降低了草莓灰霉病发病率及病斑直径, 提高了采后草莓果实贮藏品质。在贮藏第 6 天, 相比对照组, LFPEF 处理使得过氧化氢酶 (Catalase, CAT)、多酚氧化酶 (Polyphenol Oxidase, PPO) 活性下降 32.9% 和 6.95%, 超氧化物歧化酶 (Superoxide Dismutase, SOD)、抗坏血酸过氧化物酶 (Ascorbate Peroxidase, APX) 和谷胱甘肽还原酶 (Glutathione Reductase, GR) 活性分别上升 84.77%、63.15%、40.63%, 诱导了 H_2O_2 迸发, 促进了抗坏血酸 (Ascorbic Acid, ASA)、谷胱甘肽 (Glutathione, GSH)、总酚和类黄酮等抗氧化物质积累, 从而提高了机体抗氧化能力。此外, LFPEF 降低了草莓果实纤维素酶 (Cellulase, CEL)、 β -半乳糖苷酶 (β -galactosidase, β -GAL)、果胶甲酯酶 (Pectin Methylesterase, PME)、多聚半乳糖醛酸酶 (Polygalacturonase, PG) 活性, 使得贮藏第 6 天时草莓原果胶及总果胶含量分别比对照组增加 21.12% 和 70.21%。综上, LFPEF 处理通过激活抗氧化系统和维持细胞壁结构, 提高采后草莓抗病性, 维持了草莓采后品质, 对于采后草莓贮藏有一定参考价值。

关键词: 低频极化电场; 草莓; 采后抗病; 抗氧化; 细胞壁

文章编号: 1673-9078(2025)04-205-215

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.4.0258

Effects of Low Frequency Polarized Electric Field Treatment on Postharvest Disease Resistance and Storage Quality of Strawberries

XU Jingyu, ZHU Jie, LI Xianhao, CAO Chongjiang*

(School of Engineering, China Pharmaceutical University, Nanjing 211198, China)

Abstract: The effects of low-frequency polarized electric field (LFPEF) treatments on the disease resistance and quality of postharvest strawberries during storage were investigated. The results showed that, compared with the control group, LFPEF treatment increased the hardness, soluble solid content, and soluble sugar content of strawberry fruits by 53.10%, 6.5%,

引文格式:

徐景钰, 朱洁, 李显灏, 等. 低频极化电场处理对草莓采后抗病性能及贮藏品质的作用 [J]. 现代食品科技, 2025, 41(4): 205-215.

XU Jingyu, ZHU Jie, LI Xianhao, et al. Effects of low frequency polarized electric field treatment on postharvest disease resistance and storage quality of strawberries [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(4): 205-215.

收稿日期: 2023-03-04

基金项目: 江苏省重点研发计划项目 (SBE2022310082); 国家自然科学基金项目 (32172272); 江苏省农业科技自主创新资金项目 (CX(22)3076)

作者简介: 徐景钰 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 采后果蔬保鲜, E-mail: 1061399017@qq.com

通讯作者: 曹崇江 (1977-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品品质与营养, E-mail: ccj33@163.com

and 7.72%, respectively, and reduced the weight loss rate from 4.96% to 3.30% at the end of storage. In addition, LFPEF treatment reduced the incidence of gray mold and the diameter of the lesions in postharvest strawberries and improved the quality of the strawberries after harvest. On day 6 of storage, compared with the control group, LFPEF treatment decreased the activities of catalase and polyphenol oxidase by 32.9% and 6.95%, while the activities of superoxide dismutase, ascorbate peroxidase, and glutathione reductase increased by 84.77%, 63.15%, and 40.63%, respectively. This treatment induced hydrogen peroxide (H_2O_2) burst and promoted the accumulation of antioxidant substances such as ascorbic acid, glutathione, total phenols, and flavonoids, thereby fortifying the antioxidant capacity of strawberries. Additionally, LFPEF treatment inhibited the activities of cellulase, β -galactosidase, pectin methylesterase, and polygalacturonase and improved the contents of protopectin and total pectin by 21.12% and 70.21%, respectively, in strawberries. In conclusion, LFPEF treatment could improve disease resistance and maintain the quality of postharvest strawberries by activating the antioxidant system and preserving the cell wall structure. These findings provide valuable insights for postharvest storage of strawberries.

Key words: low-frequency polarized electric field; strawberries; postharvest disease resistance; anti-oxidation; cell wall

草莓 (*Fragaria×ananassa* Duch.) 是蔷薇科草莓属植物, 其富含多种维生素、花青素、多酚类、黄酮类等物质, 具有促消化、抗氧化、抗炎等功效^[1]。其色鲜味佳, 汁水丰富, 是世界范围内广受消费者喜爱的水果之一。然而由于草莓果实无外表皮, 肉质柔软, 在贮运环节极易发生损伤, 受到微生物侵袭, 伴随细胞壁结构破坏及活性氧代谢紊乱, 造成腐烂和品质劣变, 带来资源浪费和经济损失^[2]。

利用物理场处理提高采后果蔬品质是近年来新兴的保鲜方法, 因其具有安全性高、操作简便、成本低等优点受到研究者的关注^[3]。已有研究表明, 电场结合低温贮藏可以将杨梅贮藏期从 30 d 延长至 50 d, 并有效维持杨梅外观品质及风味^[3]。孟晓曼等^[4]采用低压静电场协同低温处理白玉菇可有效降低其呼吸强度, 提高机体抗氧化能力, 延缓采后衰老。此外, 强度为 25 kV/m 的高压静电场也可降低采后菠菜的呼吸强度和膜透过性, 维持采后菠菜品质^[5]。Giannoglou 等^[6]的研究提出脉冲电磁场可能是通过提高 β -葡萄糖苷酶活性, 增加草莓采后芳香特性, 维持感官品质。类似的, Yan 等^[7]发现电场处理可延缓双孢菇褐变, 这可能是由于电场处理改变了多酚氧化酶 (Polyphenol Oxidase, PPO) 的二级和三级结构。上述研究表明电场可能通过改变果蔬机体内源性酶活性, 进而影响生物代谢过程, 延长采后果蔬货架期。

采后果实防御能力下降, 易受到病原体侵袭, 进而发生一系列品质劣变^[8]。因此开发有效保鲜手段提高果实抗病性和采后品质至关重要。增加果实抗氧化胁迫能力、促进抗性物质合成、维持细胞膜完整性和细胞壁强度等均可诱导采后水晶梨抗

性, 减少霉菌侵袭^[2]。酶促和非酶促抗氧化系统失衡是造成果实代谢失衡、抗病性降低的关键原因^[9], 因此可通过维持抗氧化系统稳态提高抗病性。例如, 生防酵母 *T-2* 刺激可提高采后葡萄过氧化物酶 (Peroxidase, POD)、过氧化氢酶 (Catalase, CAT)、苯丙氨酸解氨酶 (Phenylalaninammonialyase, PAL) 活性, 促进类黄酮和酚类化合物的积累, 激活机体抗氧化系统, 延缓果实腐烂及衰老^[10]。此外, 细胞壁组成变化、果实硬度降低会造成机体防御屏障损害, 进而易受到病原体侵袭^[11]。褪黑素处理可通过影响细胞壁及活性氧代谢系统, 抑制芒果软化, 降低腐烂率^[12]。这些结果表明细胞壁结构的维持及抗氧化系统的激活有助于提高果实采后抗病能力。然而, 目前关于低频极化电场 (Low-Frequency Polarized Electric Field, LFPEF) 处理对采后草莓抗病性的研究未见报道。

本研究以草莓为研究对象, 使用 LFPEF 这一安全绿色的物理处理手段, 探究其对采后草莓贮藏品质、抗病性能的影响, 阐明抗氧化系统及细胞壁代谢在草莓采后品质维持和抗病性中的作用, 为采后草莓保鲜提供低成本、便捷的处理方法, 降低草莓采后保鲜期短带来的经济损失。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

草莓购自南京市江宁区王墅市场, 选取新鲜、无损伤、无微生物感染、成熟度色泽相近的成熟果实。塑料保鲜盒, 购自台州市汇之美塑业有限公司。无水乙醇、丙酮、氢氧化钠、碳酸钠、吐温

80, 国药试剂化学有限公司; 没食子酸、聚半乳糖醛酸, 阿拉丁试剂有限公司; 乙酸钠、磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、巯基乙醇, 上海安耐吉化学有限公司; 果胶、羧甲基纤维素, 上海源叶生物科技有限公司。抗坏血酸 (Ascorbic Acid, ASA)、谷胱甘肽 (Glutathione, GSH) 含量测定试剂盒、谷胱甘肽还原酶 (Glutathione Reductase, GR)、抗坏血酸过氧化物酶 (Ascorbateperoxidase, APX)、多酚氧化酶 (Polyphenol Oxidase, PPO)、CAT 活性测定试剂盒, 南京建成生物科技有限公司; 超氧化物歧化酶 (Superoxide Dismutase, SOD) 活性测定试剂盒、原果胶、总果胶含量测定试剂盒, 北京索莱宝科技有限公司; 灰葡萄孢菌 (*Botrytis cinerea*) AS3.3789, 上海保藏生物技术中心。

1.2 仪器与设备

低频极化电场, 苏州晶彩无限公司; Mx-S DLAB 可调式混匀仪, 大龙; SHGWYT-3 手持式折光仪, 北京中慧天成科技有限公司; CS-280 色差仪, 英国 Stable Micro System 公司; SMS TA.XT 质构仪, 英国 Stable Micro System 公司; MULTISKAN GO 酶标仪, 美国赛默飞世尔科技有限公司; LRHS-200-II 恒温恒湿箱, 上海恒跃恒温恒湿培养箱; SPX-100B-Z 超净台, 上海博迅医疗生物仪器股份有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 草莓处理方法

第一部分: 将购买的新鲜草莓去除田间热后随机分为两组 (LFPEF 组和对照组), 每组 130 颗草莓样本, 重复 3 次。将样品至于保鲜盒中, 置于 $(15 \pm 1)^\circ\text{C}$, RH 85%~90% 的恒温恒湿箱中贮藏。经预实验条件筛选, LFPEF 组放置于距离电场板 10 cm 的位置, 每天处理 3 h, 对照组不做处理, 实验所用 LFPEF 参数为: 电压 3 000 V, 电流 1 mA, 频率 50~60 Hz。于贮藏的 0、1、2、3、4、5、6 d 随机取样, 并在 -80°C 下贮存, 用于后续测试。

第二部分: 取去除田间热的新鲜草莓用 75% 乙醇擦拭消毒后自然晾干。将购买的灰葡萄孢菌活化后, 用含有 0.1% 吐温 80 的无菌水冲洗孢子, 并用三层纱布过滤去除菌丝体, 稀释至孢子数每毫升 2×10^5 spore。取 20 μL 注射至草莓赤道部位, 注射深度约为 5 mm。将接种灰葡萄孢菌的草莓均匀分为两组 (对照组和 LFPEF 组), 每组 12 颗, 重复 3 次。对照组不做处理, LFPEF 组每天使用

LFPEF 处理 3 h, 置于 $(15 \pm 1)^\circ\text{C}$, RH 85%~90% 的恒温恒湿箱中贮藏 6 d, 用于记录发病率及病斑直径。

1.3.2 失重率测定

采用称重法测定, 计算公式如下:

$$L = \frac{w_1 - w_0}{w_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

L ——失重率, %;

w_1 ——测试当天的草莓质量, g;

w_0 ——第 0 天的草莓质量, g。

1.3.3 果肉硬度、可溶性固形物和可溶性糖含量的测定

使用 TA-XT 型号质构仪, 直径 5 mm 的圆形探头, 测试前、中、后探头速度分别为 1、5、5 mm/s, 应变力为 5 g, 时间间隔 5 s。硬度为第一次下压的最大作用力。使用手持式折光仪测定草莓果肉可溶性固形物含量 (Soluble Solids Content, SSC), 滴加 2~3 滴新鲜草莓果汁覆盖棱镜后读数。可溶性糖含量测定参考 Ling 等^[13]的方法使用蒽酮-硫酸法测定。

1.3.4 色差测定

使用手持色差仪, 进行黑白校准后于草莓赤道部位取点测定 L^* (亮度)、 a^* (红绿值) 和 b^* (黄蓝值), 通过下述公式计算色度值。

$$c = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (2)$$

式中:

c ——色度值;

a^* ——红绿值;

b^* ——黄蓝值。

1.3.5 发病率及病斑直径测量

在贮藏 6 d 内, 取接种灰葡萄孢菌的草莓记录发病率, 使用十字交叉法测量病斑直径^[9]。

1.3.6 总酚、类黄酮含量和 PPO 活力测定

总酚的测定参考 Wu 等^[10]的方法并稍作修改, 使用 Folin-Ciocalteu 试剂测定。类黄酮含量测定采用铝离子比色法^[10], 结果以芦丁为标准计算。

1.3.7 抗坏血酸、谷胱甘肽和 H_2O_2 含量测定

使用南京建成试剂盒测定 ASA 和 GSH 含量。 H_2O_2 含量的测定使用硫酸钛法^[9]。

1.3.8 抗氧化酶活力测定

取草莓样品, 置于研钵中, 加入 pH 值为 7.5 的磷酸钠缓冲液, 冰浴研磨, 离心取上清液测定^[14]。

SOD 活性测定使用北京索莱宝试剂盒。CAT 活性、APX 活性及 GR 活性测定使用南京建成试剂盒。结果以 U/g 表示。PPO 活性测定使用南京建成试剂盒, 具体操作参考试剂盒说明书, 最终结果用为 U/g 表示。

1.3.9 原果胶和总果胶含量测定

原果胶和总果胶测定采用咔唑-硫酸法, 使用北京索莱宝试剂盒, 最终结果用 mg/g 表示。

1.3.10 细胞壁酶活力测定

参考 Zhang 等^[11]的方法提取细胞壁降解酶的粗酶液。

β -半乳糖苷酶 (β -galactosidase, β -GAL) 活力参考 Zhang 等^[11]的方法测定。取 0.2 mL 粗酶液, 加入 6.6 mol/L 的对硝基苯基- β -D-吡喃半乳糖苷的乙酸钠溶液 (pH 值为 4.7) 中, 于 37 °C 下孵育 1 h 后, 加入

2 mL 碳酸钠溶液终止反应, 测定 400 nm 下的吸光度。

果胶甲酯酶 (Pectin Methylesterase, PME) 活力测定, 参考王瀚博等^[8]的方法, 并作修改。测定体系包含 0.3 mL 粗酶液、0.5 mL 草酸钠溶液和 10 mL 1% (m/V) 的果胶, 于 40 °C 下孵育 1 h, 每 20 min 用 0.1 mol/L 的 NaOH 溶液调 pH 值为 7.8, 记录消耗 NaOH 的量。

多聚半乳糖醛酸酶 (Polygalacturonase, PG) 和纤维素酶 (Cellulase, CEL) 活力的测定使用 3,5-二硝基水杨酸法^[8]。上述测定结果均用 U/g 表示。

1.4 数据处理

每个指标设置三个生物学重复, 至少测定三次平行, 使用 Origin 2023 进行制图, SPSS Statistic 2023 进行显著性分析, $P < 0.05$ 表示差异显著。

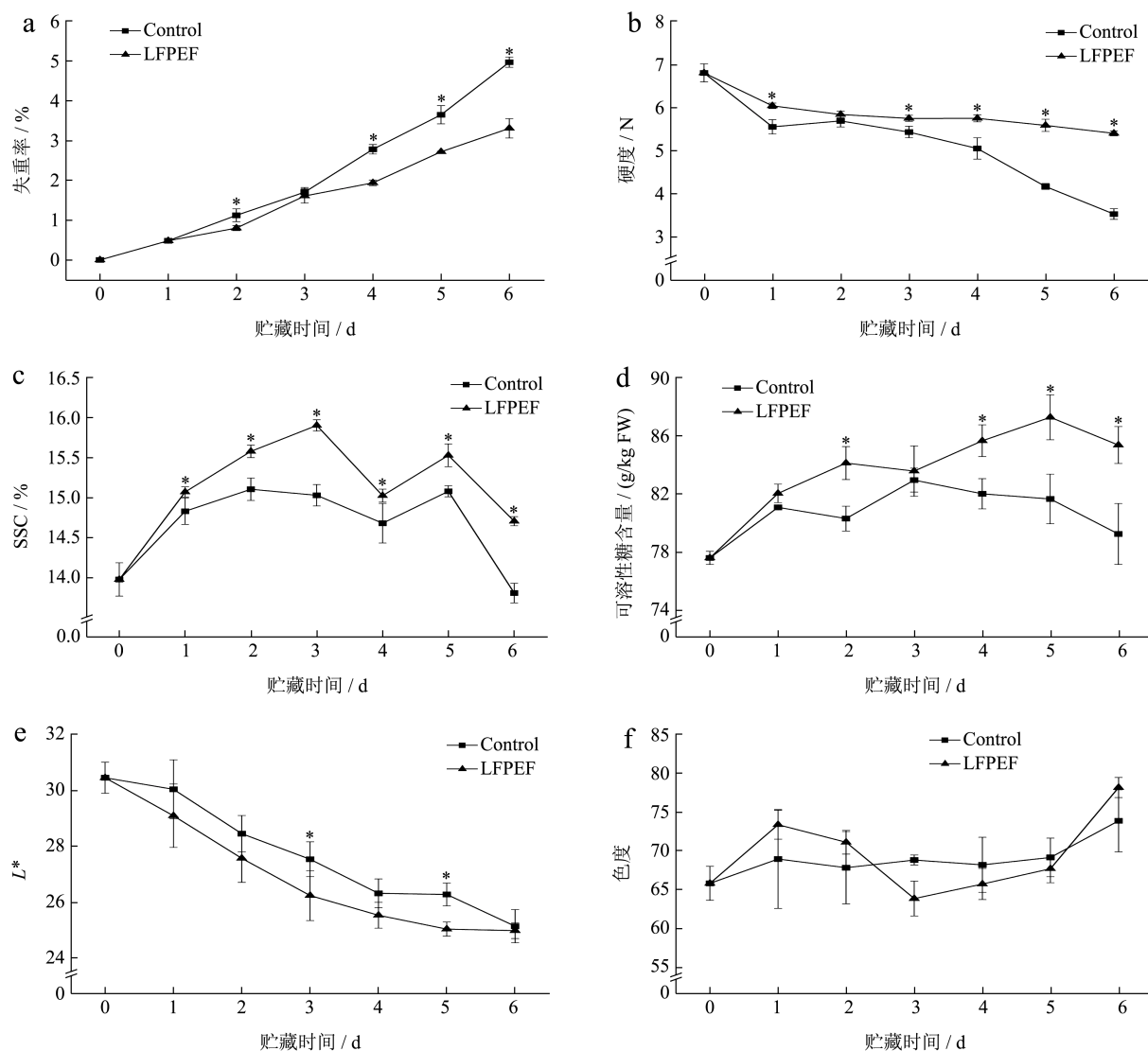


图1 LFPEF对草莓贮藏期间失重率(a)、硬度(b)、SSC(c)、可溶性糖含量(d)、 L^* (e)和色度(f)的影响
Fig.1 Effect of LFPEF on weight loss (a), hardness (b), SSC (c), soluble sugar content (d), L^* (e) and chroma (f) of strawberry during storage

注: 竖线表示标准误 ($\pm$ SE), *表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

2 结果与讨论

2.1 低频极化电场处理对草莓失重率、硬度、SSC、可溶性糖含量及颜色的影响

果实在贮藏过程中由于蒸腾作用和呼吸,水分和碳源不断消耗,伴随着质量损失和硬度降低^[14]。草莓在贮藏过程中的失重率变化如图 1a 所示,随贮藏时间延长,草莓质量持续损失。贮藏第 3 天后对照组失重率显著高于电场处理组,至第 6 天贮藏结束时,对照组失重率为 4.96%,LFPEF 组失重率为 3.30%。在贮藏期间,果实硬度呈下降趋势,LFPEF 组在贮藏第 2 天后硬度稳定在较高水平,第 6 天时对照组硬度从初始的 6.81 N 下降至 3.53 N,而 LFPEF 仅降低至 5.40 N,相较于对照组有显著性差异。Yuan 等^[15]在甜瓜采后保鲜的研究中也指出果实硬度越高,越有利于抵抗病原菌的侵染。可溶性固形物是评估果蔬风味口感的重要指标,如图 1c 可溶性固形物总体呈现先上升后下降的趋势,前期的增加可能是由于成熟度增加,淀粉或是不可溶性多糖的水解,而后期由于呼吸代谢及微生物侵袭导致营养物质严重损失,可溶性固形物含量降低^[16]。表明 LFPEF 处理可能通过降低草莓采后呼吸强度或是病原体侵染,减少可溶性固形物消耗。其中对照组在贮藏第 2 天达峰值,SSC 为 15.10%,LFPEF 组 SSC 最高值出现在贮藏第 3 天,为 15.90%。LFPEF 组 SSC 在贮藏期间显著高于对照组 ($P < 0.05$)。与该研究结果类似,戴瀚铖^[17]发现 4.3 kV/m 高压静电场处理可以将鲜切桃 SSC 从 8.01% 提升至 9.21%。贮藏过程中草莓可溶性糖含量不断提高,而 LFPEF 组可溶性糖含量在贮藏第 2、4、5、6 天显著高于对照组 (图 1d),可能由于 LFPEF 处理降低了草莓采后代谢强度,维持糖含量,并且可溶性糖含量是评判苹果草莓风味的关键指标^[18],因此 LFPEF 处理有利于提高草莓采后甜度,维持良好风味品质。 L^* 值可用来表示果实亮度,可用于评估草莓在贮藏中果肉明亮程度,数值越大表明颜色越深,相比对照组 LFPEF 处理组 L^* 值在贮藏期较小,第 3 天及第 5 天显著低于对照组 (图 1e)。色度大小可用来衡量样品饱和度情况^[19],如图 1f 所示,LFPEF 组与对照组在贮藏全程中均无显著性差异,表明 LFPEF 处理对草莓色度无明显影响。

2.2 低频极化电场处理对草莓病斑直径的影响

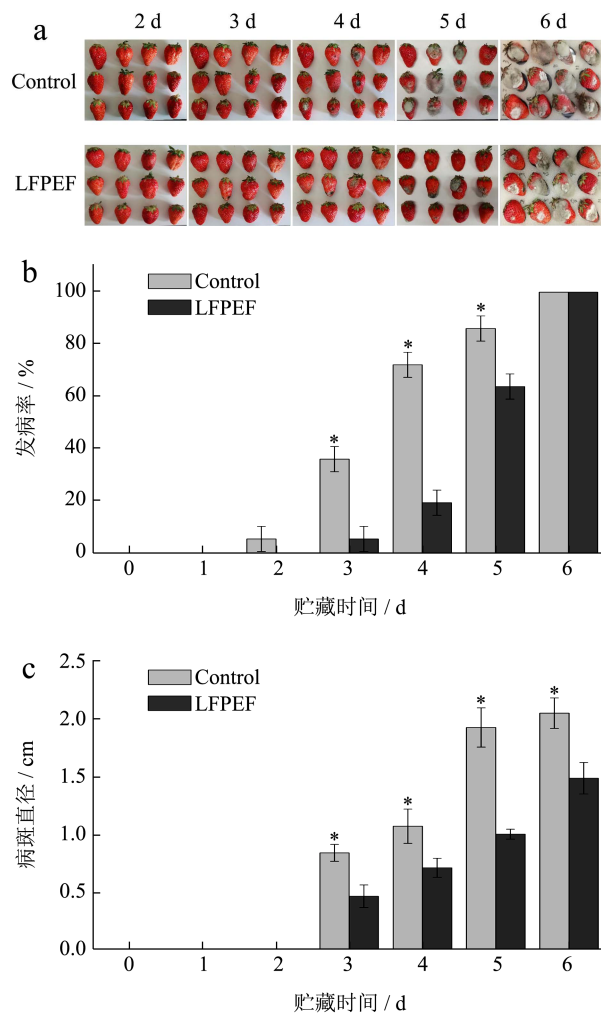


图 2 LFPEF 处理对草莓灰霉病外观 (a) 发病率 (b) 及病斑直径 (c) 的影响

Fig.2 Effects of LFPEF treatment on appearance (a) incidence (b) and lesion diameter (c) of strawberry gray mold

草莓生长发育及贮藏运输过程中最常见的病害是由灰葡萄孢菌引起的灰霉病,采后灰葡萄孢菌感染是造成草莓产业经济损失的主要原因^[20]。在本研究中,草莓在贮藏过程中病斑变化的外观图如图 2a 所示,贮藏第 3 天起草莓逐渐出现灰霉菌病斑并逐渐增大,其中经过低频极化电场处理的草莓病斑相较于对照组更小。LFPEF 组在贮藏第 3 天开始发病,相比对照组推迟了 1 d,在贮藏 3~5 d 内,两组发病率有显著性差异 ($P \leq 0.05$),其中第 4 天差异最大,对照组为 72.23%,LFPEF

组为 19.45% (图 2b)。如图 2c 所示, 贮藏 0~2 d 内, 微生物繁殖较为缓慢, 至贮藏第 3 天起病斑直径开始快速增长。贮藏 3~6 d, 对照组病斑直径分别是低频极化电场组的 1.80、1.50、1.91 和 1.38 倍。在贮藏第 5 天, 对照组病斑直径为 1.92 cm, LFPEF 组为 1.00 cm, 病斑直径差异最为显著 ($P<0.05$)。这表明 LFPEF 处理可延缓草莓中灰葡萄孢菌病斑直径扩大, 提高了草莓采后抗病性。

2.3 低频极化电场处理对总酚、类黄酮含量及 PPO 活力的影响

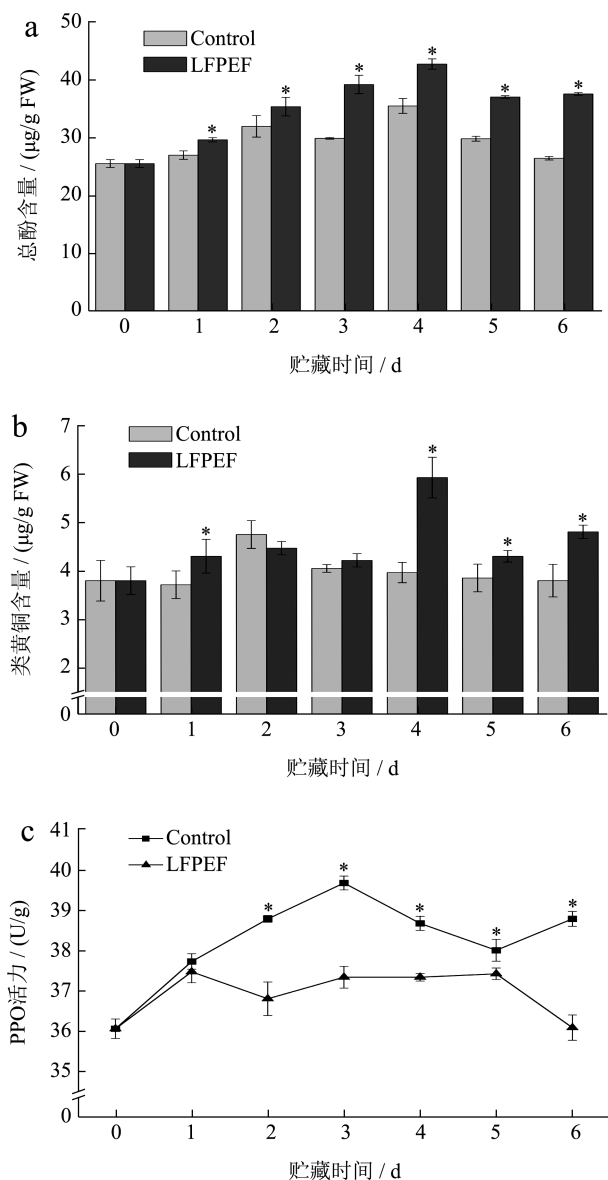


图 3 LFPEF 处理对草莓总酚 (a)、类黄酮 (b) 含量和 PPO 活力 (c) 的影响

Fig.3 Effects of LFPEF treatment on total phenol (a), flavonoid (b) content and PPO activity (c) of strawberry

多酚和黄酮类化合物具有抗炎、抗菌、抗氧化等功效, 是草莓中的重要营养物质。它们是参与植物活性氧代谢的非酶促抗氧化物质, 也是植物的胁迫防御间接信号分子。酚类化合物可以直接抑制病原体生长, 黄酮类化合物不仅可以作为抗氧化剂清除植物机体的 ROS, 对于病原体引起的采后疾病还可以诱导防御反应^[21,22]。草莓果实在贮藏过程中的总酚含量如图 3a 所示, 随贮藏时间的增加, 草莓果实中总酚含量整体呈现出前期上升后期下降的趋势。在贮藏 1~6 d 内, LFPEF 组总酚含量分别是对照组的 1.10、1.11、1.31、1.20、1.24 和 1.42 倍, 两组间差异显著 ($P<0.05$)。LFPEF 组类黄酮含量在贮藏第 4 天最高, 是对照组的 1.49 倍, 可能是 LFPEF 处理激活了草莓苯丙烷代谢通路导致苯丙素类化合物的积累^[23]。此外贮藏第 1、5、6 天也显著高于对照组, 分别高出 15.84%、11.63% 及 26.55% (图 3b)。LFPEF 处理组 PPO 活性在贮藏 6 d 内均低于对照组, 从第 2 天开始具有显著性差异 ($P<0.05$)。对照组 PPO 活性在贮藏过程中先升后降, 峰值出现在贮藏第 3 天, 为初始 PPO 酶活性的 1.10 倍。LFPEF 组 PPO 活性在贮藏第 1 天增高, 随后下降并在贮藏 2~5 d 内基本保持稳定, 贮藏第 6 天时继续降低, 最终 PPO 活力为对照组的 93% (图 3c)。由此可知, LFPEF 处理可降低 PPO 活性, 减少酚类物质氧化, 维持总酚和类黄酮含量。类似的, Ge 等^[24]发现硝酸普钠处理可将苹果多酚和黄酮含量分别提高 13% 和 12%, 这提高了苹果对青霉病的抗性, 并通过莽草酸和苯丙烷通路揭示了硝酸普钠处理提高苹果抗病能力的机制。

2.4 低频极化电场处理对草莓 AsA、GSH 和 H_2O_2 含量的影响

ASA-GSH 循环是植物抗氧化系统的关键组成, ASA 和 GSH 作为内源性抗氧化剂是非酶抗氧化系统的主要物质^[25]。图 4a 中, 对照组 ASA 含量随着贮藏时间的增加总体呈现先降后升再降的趋势。电场处理组 ASA 含量在贮藏 0~2 d 及 4~6 d 内呈上升趋势, 在贮藏第 4 天时最高, 为 633.43 mg/kg。对照组和 LFPEF 组 ASA 含量在贮藏期内均存在显著性差异, 贮藏至第 5 天时, LFPEF 组 ASA 活性是对照组 1.62 倍, 差异最为显著 ($P<0.05$)。GSH 含量变化如图 4b 所示, LFPEF 组变化呈双峰, 峰

值分别出现在贮藏第2天和第4天比对照组 GSH 含量高 11.91% 和 18.59%，对照组 GSH 含量峰值出现在贮藏第3天，为 110.89 mg/kg。除第3天外，LFPEF 处理组 GSH 含量均显著高于对照组 ($P<0.05$)。

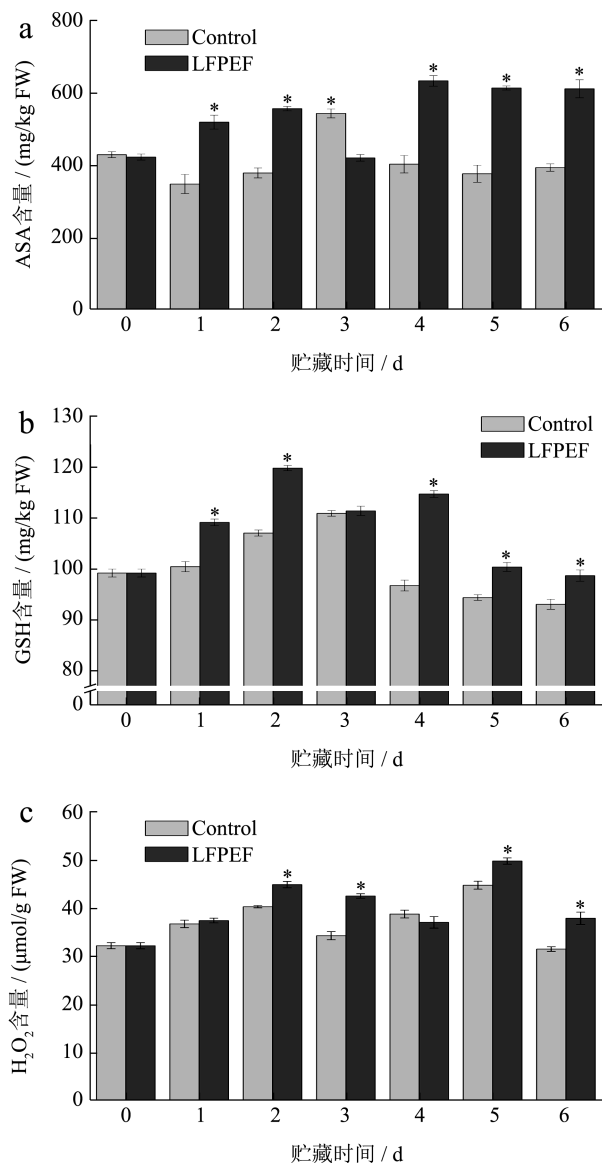


图4 LFPEF处理对草莓ASA (a)、GSH (b)、H₂O₂ (c)含量的影响

Fig.4 Effects of LFPEF treatment on ASA (a), GSH (b) and H₂O₂ (c) contents of strawberry

ROS的产生是植物机体抵御病原体侵害的早期反应，H₂O₂作为最稳定的ROS在植物抵抗病原体方面发挥重要作用，H₂O₂的积累可以增强果实抗病性并激活相关抗氧化酶^[9]。已有报道指出机体受胁迫时通过氧化爆发，促进H₂O₂积累，有效降低了猕猴桃^[9]、龙眼^[26]、苹果^[27]的病害程度，提高

了抗病性。如图4c所示，对照组和LFPEF组H₂O₂含量在贮藏第5天时均大幅提高，可能是由于贮藏后期果蔬更易遭受病原体侵袭，而H₂O₂作为植物机体和病原体作用的信号分子受生物胁迫后迅速响应而上升，且后续实验结果也表明贮藏中后期CAT酶活降低，这也会促进H₂O₂的积累。贮藏第5天时，对照组和LFPEF组中H₂O₂含量分别为44.74 μmol/kg和49.77 μmol/kg。除贮藏第4天外，LFPEF组H₂O₂含量均高于对照组，且在贮藏第2、3、5、6天与对照组有显著性差异 ($P<0.05$)，说明LFPEF处理可能通过促进H₂O₂积累降低草莓灰霉菌病斑直径。

2.5 低频极化电场处理对草莓抗氧化酶活性的影响

尽管H₂O₂的积累有利于诱导机体抗性产生，但是过量的ROS会引发果实氧化损伤，促进果实衰老从而易遭到病原体侵染，因此维持活性氧代谢平衡也是提高植物防御能力的必要条件^[8]。在酶促抗氧化系统中，SOD、CAT、APX和GR通过酶促反应将机体内的活性氧转化为H₂O，是活性氧清除系统中的关键防御酶^[28]。如图5a、5b所示，SOD和CAT活性总体呈现先升后降趋势。对照组SOD酶活性在贮藏第3天出现峰值，相较LFPEF组峰值提前了一天。整个贮藏时间内，LFPEF组SOD活性显著高于对照组 ($P<0.05$)，至贮藏结束时LFPEF组SOD活性为对照组的1.85倍。对照组和LFPEF组CAT活性最高的时间均为贮藏第3天，随后均逐渐降低，在贮藏第4天时，对照组CAT活性为29.76 U/g，LFPEF组CAT活性为23.05 U/g，是对照组的77.46%。除贮藏第2天外，对照组CAT活性均高于LFPEF组。图5c中。对照组APX活性呈缓慢下降趋势，LFPEF组APX活性在贮藏期间总体维持较高水平，APX活性差异最大的时间出现在贮藏第5天，LFPEF组是对照组的1.81倍。贮藏结束时对照组和LFPEF组APX活性分别为1.43 U/g和2.34 U/g。APX活性除贮藏第3天外，LFPEF组均显著高于对照组 ($P<0.05$)。如图5d所示，LFPEF组的GR活性在贮藏0~4 d内呈上升趋势，贮藏4~6 d内呈下降趋势，贮藏结束时是初始GR活性的1.23倍，而对照组GR活性至贮藏第6天时降低至初始GR活性的87%。在贮藏全程中LFPEF组GR活性始终显著高于对照组 ($P<0.05$)。

上述结果表明, LFPEF 处理可降低 CAT 活性, 这和上述 H_2O_2 含量提高的结果相互印证, 此外提高 SOD、APX 和 GR 活性的提升也有助于维持草莓抗氧化系统稳态, 积累抗性物质。也有一些研究表明电场处理可影响采后果蔬抗氧化系统相关指标, 进而提高贮藏品质。例如, Zhao 等^[29]的报道指出高压静电场可提高成熟番茄 SOD、APX、CAT 活性, 增加 GSH、ASA 和总酚含量, 提升其抗氧化能力, 延缓果实衰老。此外, Wang 等^[30]研究了曲酸对采后木瓜炭疽病的影响, 指出曲酸处理可通过提高木瓜抗氧化酶 (SOD、CAT) 活性及防御酶相关基因 (*POX*、*PR-1*、*PAL*) 的表达增强机体抗氧化水平, 激活防御系统, 7 d 后将木瓜中短孢炭疽菌病斑直径降低了 30%, 这也验证了抗氧化系统在采后果蔬抗病性中的作用。

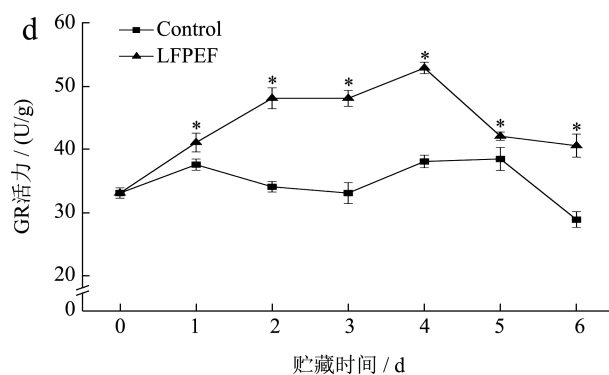
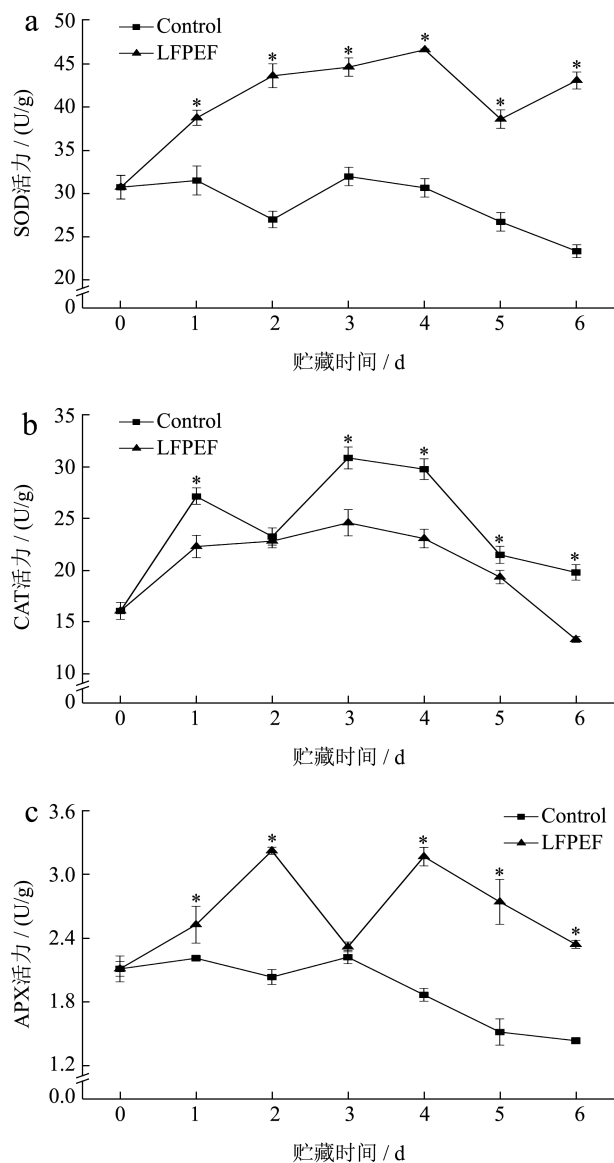


图5 LFPEF 处理对草莓 SOD (a)、CAT (b)、APX (c) 和 GR (d) 活力的影响

Fig.5 Effects of LFPEF treatment on SOD (a), CAT (b), APX (c) and GR (d) activities of strawberry

2.6 低频极化电场处理对原果胶和总果胶含量的影响

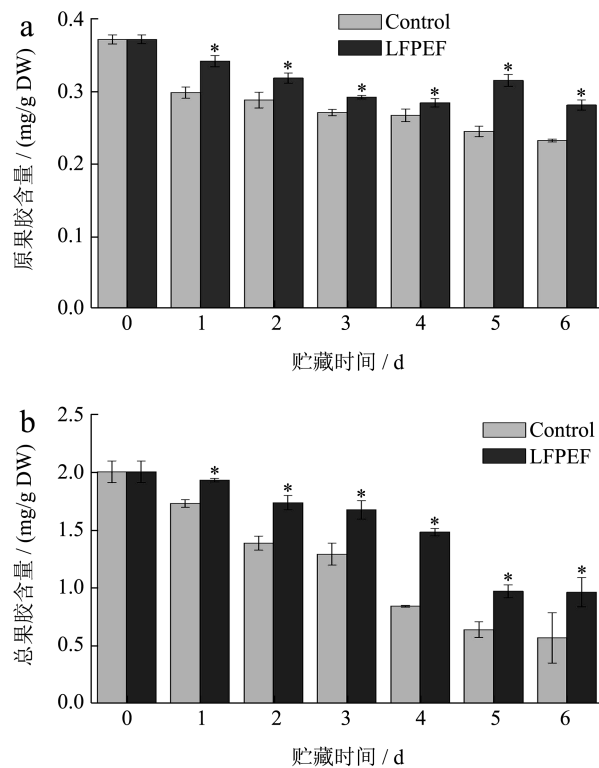


图6 LFPEF 处理对草莓原果胶 (a) 和总果胶 (b) 含量的影响

Fig.6 Effect of LFPEF treatment on the contents of raw pectin (a) and total pectin (b) in strawberry

细胞壁是果实抵御病原体攻击的第一道屏障, 是植物抗病研究中不可或缺的部分。细胞壁完整性越高则植物对病原体的抵抗能力越强^[30]。细胞壁成分包括纤维素、果胶、半纤维素等, 是维持细

胞壁机械性能的物质基础。果胶的降解会导致纤维素及半纤维素的分解,导致果实组织松动及软化,因此维持果蔬果胶含量对于细胞壁结构具有关键意义^[31]。如图 6a 所示,原果胶含量总体随贮藏时间延长呈现降低趋势,期间 LFPEF 组原果胶含量始终高于对照组,其中贮藏第 5 天时两组差异最大,LFPEF 组为对照组的 1.29 倍,贮藏结束时对照组和 LFPEF 组原果胶含量分别为初始的 62.53% 和 75.65%。总果胶变化趋势(图 6b)和原果胶类似,在贮藏期间总果胶也不断损失,但贮藏期间内 LFPEF 组总果胶损失程度仍低于对照组,在贮藏 1~6 d 内分别比对照组高出 11.75%、25.36%、29.71%、76.82%、52.28% 和 70.21%,并具有显著性差异。贮藏结束时,对照组和 LFPEF 组总果胶含量分别从初始的 2.00 mg/g 降低至 0.56 mg/g 和 0.96 mg/g ($P<0.05$)。Chen 等^[32]的研究指出香芹酚处理可提高柚子抗病性,这与原果胶含量的维持密切相关,增加了细胞壁粘附性及细胞完整性。本研究结果说明 LFPEF 处理能有效维持草莓果胶组分,而有研究指出草莓在贮藏中的软化及真菌感染都与细胞壁主要成分果胶的降解有关^[33],因此 LFPEF 处理有助于提高采后草莓抗病性。

2.7 低频极化电场处理对 β -GAL、PME、PG 和 CEL 活力的影响

细胞壁组分的变化主要受细胞修饰酶活性影响, β -GAL、PME、PG 和 CEL 参与细胞壁主要成分果胶和纤维素的降解,其酶活性的降低可利于细胞壁结构的维持^[34]。如图 7a 所示,LFPEF 组 β -GAL 活性在贮藏 0~3 d 及 4~5 d 内缓慢提升,贮藏 3~4 d 及 5~6 d 时下降。而对照组在贮藏第 2~5 天内均维持上升趋势,并在第 5 天急速增加至 LFPEF 组的 1.22 倍。PME 活性(图 7b)在贮藏期内呈先上升后下降趋势,除贮藏第 2 天外,对照组均显著高于 LFPEF 组,贮藏第 3 天时,对照组为 65.33 U/g,LFPEF 组为 62.41 U/g,两组差异最大($P<0.05$)。如图 7 所示,对照组和 LFPEF 组的 PG 活性均呈现双峰变化,初始 PG 活力为 26.23 U/g,LFPEF 组峰值出现在贮藏第 1 天和第 4 天,对照组峰值出现在贮藏第 2 天和第 4 天,除贮藏第 1 天外对照组 PG 活性显著高于 LFPEF 组($P<0.05$)。贮藏结束时对照组 PG 活性为 29.41 U/g,LFPEF 组 PG 活性仅为对照组的 70.83%。LFPEF 处理还可以有效降低 CEL 活性,减少纤维素降解,LFPEF 组 CEL 活性

在整个贮藏期间内基本保持稳定,但对照组呈先升后降趋势,并在贮藏第 2 天出现峰值,是 LFPEF 组的 1.28 倍,差异最大(图 7d)。

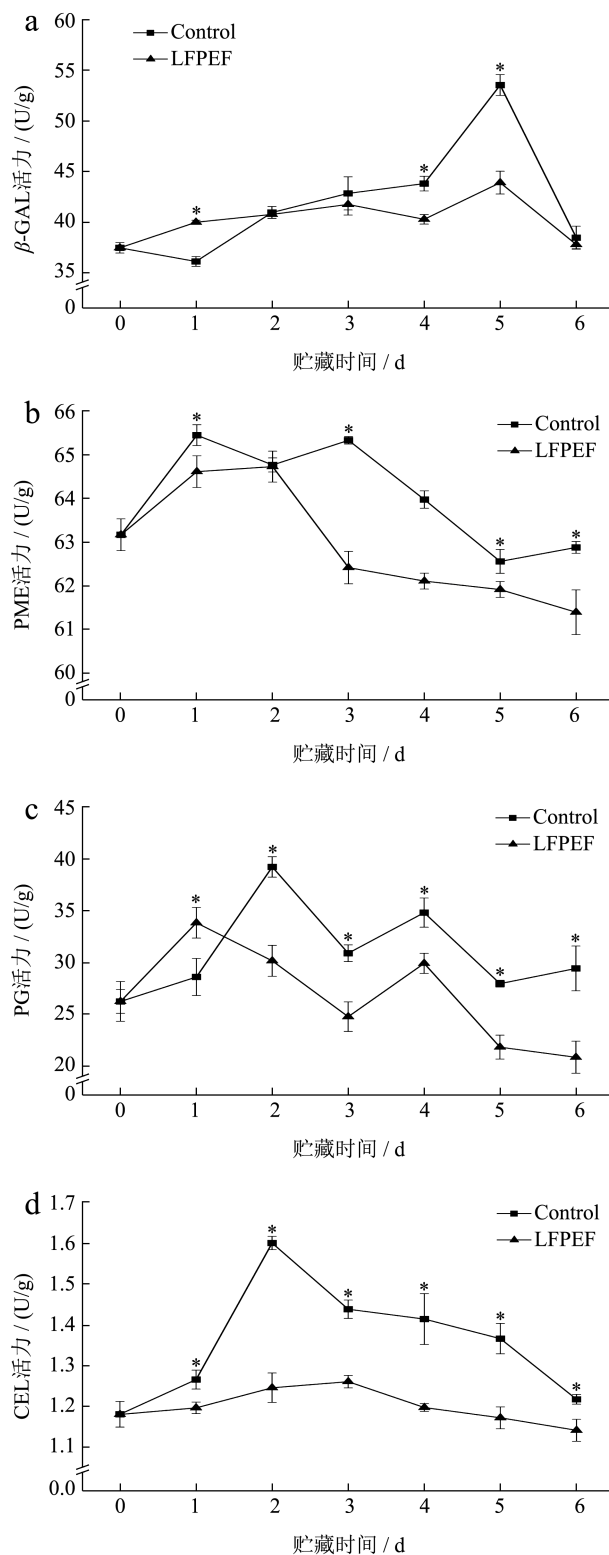


图 7 LFPEF 处理对草莓 β -GAL (a)、PME (b)、PG (c) 和 CEL (d) 活力的影响

Fig.7 Effects of LFPEF treatment on β -GAL (a), PME (b), PG (c) and CEL (d) activity of strawberry

有研究指出龙眼受 *Phomopsis longanae* Chi (*P. longanae*) 侵袭会使得 PME、PG、 β -GAL、CEL 活性增加, 进一步促进细胞壁成分流失, 最终导致果实病害发生^[35]。Liu 等^[36]的研究发现电场处理可减少丙二醛积累并降低呼吸强度及 PME 活性, 延缓采后柿子软化, 表明 LFPEF 处理可以通过降低细胞壁酶活性, 强化草莓屏障, 延缓果实软化, 减少病害发生, 该结果也与上述草莓硬度结果相互印证。

3 结论

综上, LFPEF 处理显著抑制了草莓果实的失重, 保持了较高的 SSC 和可溶性糖含量, 同时维持了草莓细胞壁果胶含量, 降低了 β -GAL、PME、PG、CEL 活性, 延缓了果实硬度的下降, 有效降低了草莓灰霉病发病率及病斑直径。此外, LFPEF 处理提高 SOD、APX、GR 活性, 降低了 CAT 和 PPO 活性, 提高了 H_2O_2 含量, 促进了多酚和黄酮的积累, 通过诱导氧化爆发并激活草莓果实体内抗氧化体系, 有效延缓草莓果实的衰老并提高其采后抗病。

参考文献

- [1] 罗学兵, 贺良明. 草莓的营养价值与保健功能[J]. 中国食物与营养, 2011, 17(4): 74-76.
- [2] ZHAO L A, HAN J J, LI B, et al. Transcriptome analysis of the disease resistance in postharvest pears induced by *Meyerozyma guilliermondii* combined with alginate oligosaccharide [J]. Biological Control, 2022, 170: 104931.
- [3] 林月. 空间电场结合低温贮藏对杨梅果实品质的影响研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2022.
- [4] 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.
- [5] LI T, AN G M, SUN Q J, et al. Effects of high voltage electrostatic field and weak magnetic field assisted refrigeration on preservation of spinach [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2023, 17(6): 6484-6502.
- [6] MARIANNA G, ZACHAROULA-M X, SOFIA C, et al. Effect of cold atmospheric plasma and pulsed electromagnetic fields on strawberry quality and shelf-life [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 68: 102631.
- [7] 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.
- [8] 王瀚博. 茉莉酸甲酯对蓝莓果实采后品质及抗病性调控机制研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2021.
- [9] XIE G F, LIU N, ZHANG Y, et al. Postharvest MeJA maintains the shelf quality of kiwifruit after cold storage by regulating antioxidant capacity and activating the disease resistance [J]. Postharvest Biology Technology, 2024, 211: 112827.
- [10] WU C Y, WANG Y C, AI D, et al. Biocontrol yeast *T-2* improves the postharvest disease resistance of grape by stimulation of the antioxidant system [J]. Food Science & Nutrition, 2022, 10(10): 3219-3229.
- [11] ZHANG Q, DAI W T, JIN X W, et al. Calcium chloride and 1-methylcyclopropene treatments delay postharvest and reduce decay of New Queen melon [J]. Scientific Reports, 2019, 9: 13563.
- [12] ALAGIE N, DONG X Q, LIU Q, et al. Melatonin treatment inhibits mango fruit (Cv. 'Guiqi') softening by maintaining cell wall and reactive oxygen metabolisms during cold storage [J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, 205: 112500.
- [13] LING L J, LUO H, ZHAO Y H, et al. Fungal pathogens causing postharvest fruit rot of wolfberry and inhibitory effect of 2,3-butanedione [J]. Front Microbiol, 2023, 13.
- [14] ARYOU E, ZEINAB G, NASIR G, Effect of salep-based edible coating enriched with grape seed extract on postharvest shelf life of fresh strawberries [J]. Journal of Food Safety, 2019, 39(6): e12710.
- [15] YUAN L, BI Y, GE Y H, et al. Postharvest hot water dipping reduces decay by inducing disease resistance and maintaining firmness in muskmelon (*Cucumis melo* L.) fruit [J]. Scientia Horticulturae, 2013, 161: 101-110.
- [16] CHEN K, BRENNAN C, CAO J, et al. Characterization of chitosan/eugenol-loaded IRMOF-3 nanoparticles composite films with sustained antibacterial activity and their application in postharvest preservation of strawberries [J]. Lwt-Food Science and Technology, 2023, 186: 115270.
- [17] 戴瀚铖. 鲜切桃品种筛选及高压静电场保鲜技术研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2021.
- [18] NOSHIRVANI N, ALIMARI I, MANTASHLOO H. Impact of carboxymethyl cellulose coating embedded with oregano and rosemary essential oils to improve the post-harvest quality of fresh strawberries [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2023, 17(5): 5440-5454.
- [19] LIU C H, ZHENG H H, SHENG K L, et al. Effects of melatonin treatment on the postharvest quality of strawberry fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 139: 47-55.
- [20] LIN Y X, LIANG W H, CAO S P, et al. Postharvest application of sodium selenite maintains fruit quality and improves the gray mold resistance of strawberry [J]. Agronomy, 2023, 13(7): 1689.
- [21] GUO M, LI C, HUANG R, et al. Ferulic acid enhanced resistance against blue mold of *Malus domestica* by regulating

- reactive oxygen species and phenylpropanoid metabolism [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2023, 202: 112378.
- [22] IRENEUSZ G, RAFAL B, JAROSLAW K. Comprehensive review of antimicrobial activities of plant flavonoids [J]. *Phytochemistry Reviews*, 2019, 18(1): 241-272.
- [23] CHEN C K, ZHANG H J, DONG C H, et al. Effect of ozone treatment on the phenylpropanoid biosynthesis of postharvest strawberries [J]. *Rsc Advance*, 2019, 9(44): 25429-25438.
- [24] GE Y H, CHEN Y R, LI C Y, et al. Effect of sodium nitroprusside treatment on shikimate and phenylpropanoid pathways of apple fruit [J]. *Food Chemistry*, 2019, 290: 263-269.
- [25] JIANG Z Z, ZHU H G, ZHU H Y, et al. Exogenous ABA enhances the antioxidant defense system of maize by regulating the AsA-GSH cycle under drought stress [J]. *Sustainability*, 2022, 14(5): 3071.
- [26] TANG J Y, CHEN H B, LIN H T, et al. Acidic electrolyzed water treatment delayed fruit disease development of harvested longans through inducing the disease resistance and maintaining the ROS metabolism systems [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 171: 111349.
- [27] GE Y H, WEI M L, LI C Y, et al. Reactive oxygen species metabolism and phenylpropanoid pathway involved in disease resistance against *Penicillium expansum* in apple fruit induced by ϵ -poly-L-lysine [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(13): 5082-5088.
- [28] ZHANG X Y, YAO Y Q, DHANASEKARAN S, et al. Controlling black spot of postharvest broccoli by *Meyerozyma guilliermondii* and its regulation on ROS metabolism of broccoli [J]. *Biological Control*, 2022, 170: 104938.
- [29] ZHAO R Q, HAO J X, XUE J, et al. Effect of high-voltage electrostatic field pretreatment on the antioxidant system in stored green mature tomatoes [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2011, 91(9): 1680-1686.
- [30] WANG Y X, WANG S Y, BETA T, et al. Kojic acid induces resistance against *Colletotrichum brevisporum* and enhances antioxidant properties of postharvest papaya [J]. *Food Control*, 2023, 144: 109405.
- [31] CHEN Y, SUN J, LIN H, et al. Paper-based 1-MCP treatment suppresses cell wall metabolism and delays softening of Huanghua pears during storage [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017, 97(8): 2547-2552.
- [32] CHEN C Y, CAI N, WAN C P, et al. Cell wall modification and lignin biosynthesis involved in disease resistance against in harvested pummelo fruit elicited by carvacrol [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2022, 102(8): 3140-3149.
- [33] POSÉ S, KIRBY A R, PANIAGUA C, et al. The nanostructural characterization of strawberry pectins in pectate lyase or polygalacturonase silenced fruits elucidates their role in softening [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 132: 134-145.
- [34] MACHAEL C J. Plant cell walls: supramolecular assembly, signalling and stress [J]. *Structural Chemistry*, 2009, 20: 245-253.
- [35] CHEN Y H, ZHANG S, LIN H T, et al. Phomopsis longanae Chi-induced changes in activities of cell wall-degrading enzymes and contents of cell wall components in pericarp of harvested longan fruit and its relation to disease development [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9: 1051.
- [36] LIU C E, CHEN W J, CHANG C K, et al. Effect of a high voltage electrostatic field (HVEF) on the shelf life of persimmon (*Diospyros kaki*) [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 75: 236-242.